



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY



ROZPRAWA DOKTORSKA

**BADANIA WPLYWU KINEMATYKI
ORAZ WARUNKÓW CHŁODZENIA I SMAROWANIA
W PROCESIE SZLIFOWANIA OSTRZY NOŻY
PLANARNYCH NA ICH TRWAŁOŚĆ
EKSPLOATACYJNĄ**

mgr inż. Bartosz Zieliński

Promotor
prof. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny

Koszalin, kwiecień 2022 r.

Spis treści

Streszczenie	5
Abstract	6
Wykaz symboli i akronimów.....	7
1. WPROWADZENIE	10
2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH W ZAKRESIE WYZNACZONYM TEMATEM ROZPRAWY	14
2.1. Charakterystyka ostrzy technicznych.....	14
2.1.1. Cechy ostrzy technicznych.....	15
2.1.2. Materiały stosowane do produkcji ostrzy technicznych	18
2.1.3. Technologia wytwarzania ostrzy technicznych.....	21
2.1.4. Zastosowanie ostrzy technicznych	21
2.2. Charakterystyka procesu kształtowania ostrzy technicznych w procesach szlifowania, mikroszlifowania i docierania	23
2.3. Rodzaje substancji o działaniu chłodzącym, smarującym i antyadhezyjnym oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania.....	33
2.4. Zjawiska zużycia ostrzy technicznych	38
2.5. Problemy w procesie cięcia tkanek miękkich	40
2.6. Ocena ostrości ostrzy technicznych	41
2.7. Wnioski z analizy literatury	44
3. CELE, HIPOTEZA, PROBLEMY BADAWCZE I ZAKRES ROZPRAWY.....	47
3.1. Cele pracy	47
3.1.1. Cel poznawczy	47
3.1.2. Cel unitarny	47
3.1.3. Cel metodyczny.....	47
3.2. Hipoteza pracy	47
3.3. Problemy badawcze	48
3.3.1. Główny problem badawczy.....	48
3.3.2. Problemy szczegółowe.....	48
3.4. Zakres pracy.....	48
3.5. Schemat obiektu badań	49
4. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH	54
4.1. Metodyka badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy.....	54
4.1.1. Cel badań.....	54
4.1.2. Parametry i warunki badań.....	54
4.1.3. Przedmiot obrabiany	59
4.1.4. Ściernice.....	62

4.2.	Metodyka badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia.....	63
4.2.1.	Cel badań.....	63
4.2.2.	Narzędzie tnące	63
4.2.3.	Materiał cięty	64
4.2.4.	Parametry i warunki badań.....	65
4.3.	Metodyka badań właściwych procesu szlifowania ostrzy	67
4.3.1.	Cel badań.....	67
4.3.2.	Parametry i warunki badań.....	67
4.3.3.	Przedmiot obrabiany	73
4.3.4.	Ściernice	73
4.4.	Metodyka badań eksploatacyjnych ostrzy w procesie cięcia tkanek miękkich	73
4.4.1.	Cel badań.....	73
4.4.2.	Parametry i warunki badań.....	73
4.4.3.	Charakterystyka ciętych tkanek miękkich	78
4.4.4.	Stanowisko przemysłowe do cięcia tkanek miękkich (skórowania).....	78
4.5.	Stanowiska pomiarowe	80
4.5.1.	Stanowisko do pomiarów stykowych struktury geometrycznej powierzchni obrobionych.....	80
4.5.2.	Stanowisko do rejestracji obrazów ostrzy noży planarnych po szlifowaniu metodą mikroskopii optycznej.....	81
4.5.3.	Stanowisko do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego (EDS).....	83
5.	AUTORSKIE STANOWISKA BADAWCZE I POMIAROWE	84
5.1.	Stanowisko do badań procesu szlifowania ostrzy technicznych.....	84
5.1.1.	Parametry techniczne	85
5.1.2.	Zespoły funkcjonalne	86
5.1.2.1.	Korpusy	86
5.1.2.2.	Napęd główny	91
5.1.2.3.	Układy hydrauliczne i pneumatyczne	92
5.1.2.4.	Zespoły manipulacyjne osi X, Y i Z	94
5.1.2.5.	Zespoły manipulacyjne osi C i A.....	99
5.1.2.6.	Układy sterująco-kontrolne.....	101
5.1.2.7.	Układy podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania	103
5.1.2.8.	Uchwyt przedmiotu obrabianego	106
5.1.3.	Podsumowanie	106
5.2.	Stanowisko do pomiaru siły cięcia	107

5.2.1.	Opis budowy stanowiska do pomiaru siły cięcia	107
5.2.2.	Parametry techniczne stanowiska do pomiaru siły cięcia	112
5.2.3.	Podsumowanie	112
5.3.	Stanowisko do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania	112
6.	BADANIA ROZPOZNAWCZE PROCESU SZLIFOWANIA OSTRZY	115
6.1.	Analiza wyników badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy	115
6.1.1.	Analiza wartości siły cięcia F	115
6.1.2.	Analiza struktury geometrycznej powierzchni.....	119
6.1.3.	Analiza obrazów mikroskopowych.....	125
6.2.	Analiza wyników badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia	129
6.3.	Wnioski z badań rozpoznawczych.....	132
7.	BADANIA WŁAŚCIWE PROCESU SZLIFOWANIA OSTRZY	135
7.1.	Analiza wyników badań właściwych mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych parametrów kinematycznych procesu szlifowania ostrzy	135
7.2.	Analiza wyników badań właściwych mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych warunków chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesie szlifowania ostrzy	143
7.3.	Wnioski z badań właściwych.....	157
8.	BADANIA EKSPLOATACYJNE OSTRZY W PROCESIE CIĘCIA TKANEK MIĘKKICH	160
8.1.	Analiza wyników badań eksploatacyjnych ostrzy w warunkach przemysłowych	160
8.1.1.	Proces skórowania gładzicy (<i>Peuronectes Platessa</i>)	163
8.1.2.	Proces skórowania flądry (<i>Platichthys Flesus</i>).....	166
8.1.3.	Analiza korzyści wynikających z wydłużenia okresu trwałości noży	169
8.2.	Wnioski z badań eksploatacyjnych	171
9.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	173
9.1.	Wnioski poznawcze	173
9.2.	Wnioski uytylitarne.....	176
9.3.	Wnioski metodyczne.....	177
9.4.	Wnioski do dalszych prac	178
9.5.	Upowszechnienie rezultatów rozprawy	179
	Bibliografia.....	181
	Spis rysunków	190
	Spis tabel	200

Streszczenie

Celem nierniejszej pracy była analiza zjawisk podstawowych w strefie szlifowania ostrzy noży planarnych ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru (cBN) w trzech odmianach kinematycznych (szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie stożkową powierzchnią czołową ściernicy) umożliwiającą wytypowanie warunków realizacji tego procesu zapewniających w efekcie wydłużenie okresu trwałości kształtowanych narzędzi w procesie skórowania ryb płaskich.

W związku z powyższym w pracy zamieszczono analizę literatury (rozdział 2.) dotyczącej aktualnego stanu wiedzy w zakresie cięcia materiałów organicznych, rodzajów i kształtów narzędzi tnących, metod kształtowania ostrzy technicznych oraz problemów występujących w procesie cięcia tkanek miękkich a także sposobów oceny ostrości ostrzy technicznych. W kolejnej części (rozdział 3.) zamieszczono elementy metodyczne charakterystyczne dla rozpraw doktorskich, takie jak cele, hipotezę, problemy badawcze i zakres pracy. W rozdziale 4. opisano szczegółowo metodykę przeprowadzonych prac badawczych w sposób umożliwiający ich odtworzenie. Informacje przedstawiono z podziałem na trzy podstawowe etapy badań: badania rozpoznawcze, badania właściwe oraz badania eksploatacyjne przeprowadzone w warunkach przemysłowych. Istotną część pracy (rozdział 5.) stanowi opis budowy autorskich stanowisk badawczych i pomiarowych. W toku prac zaprojektowano i wykonano 5-osiową szlifierkę wyposażoną w układ sterowania CNC (ang. *Computerized Numerical Control*), stanowisko do pomiaru siły cięcia oraz stanowisko do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania. Najważniejszą merytorycznie częścią rozprawy stanowią trzy rozdziały opisujące wyniki badań rozpoznawczych (rozdział 6.), badań właściwych (rozdział 7.) oraz rezultaty prób eksploatacyjnych przeprowadzonych w warunkach przemysłowych w procesie skórowania ryb płaskich (rozdział 8.). W ostatnim rozdziale (rozdział 9.) niniejszej rozprawy doktorskiej zamieszczono podsumowanie oraz zbiór wniosków podzielonych na wnioski poznawcze, użytkowe, metodyczne oraz wnioski dotyczące kierunków dalszych prac.

Przeprowadzone badania eksploatacyjne dowiodły możliwości uzyskania około 18% wydłużenia okresu trwałości ostrzy co w warunkach zakładu przetwórstwa rybnego pozwala na uzyskanie efektu skali i wpływa korzystnie zarówno na zredukowanie kosztów narzędzi, jak i na ograniczenie czasu przestoju linii technologicznej, związanego z wymianą ostrzy w maszynie do skórowania.

Abstract

The aim of this work was to analyse the basic phenomena in the grinding zone of planar knife blades using grinding wheels with grains of cubic boron nitride (cBN) in three kinematic variants (grinding with the circumference of the wheel, grinding with the face of the wheel, grinding with the conical face of the wheel) enabling the selection of conditions for the realisation of this process ensuring in effect an increase in the service life of shaped tools in the process of skinning flat fish.

In connection with the above, the dissertation contains an analysis of the literature (Chapter 2) concerning the current state of knowledge in the field of organic material cutting, types and shapes of cutting tools, methods of shaping technical blades and problems occurring in the process of soft tissue cutting as well as methods of assessing the sharpness of technical blades. The next part (Chapter 3) contains methodological elements characteristic of PhD theses, such as objectives, hypothesis, research problems and the scope of the work. Chapter 4 describes in detail the methodology of the research work carried out in such a way that it can be reproduced. The information is divided into three basic stages of research: exploratory research, proper research and operational research conducted in industrial conditions. An important part of the work (Chapter 5) is the description of construction of the author's test and measurement stands. In the course of work, a 5-axis grinder equipped with the CNC (Computerized Numerical Control) system, a stand for measuring the cutting force and a stand for removing material elements from the edge of the blade created in the grinding process were designed and constructed. The most important substantive part of the dissertation consists of three chapters describing the results of exploratory research (Chapter 6), proper research (Chapter 7) and the results of operational tests conducted in industrial conditions in the process of skinning flat fish (Chapter 8). The last chapter (Chapter 9) of this dissertation contains a summary and a set of conclusions divided into cognitive, utilitarian, methodological and conclusions concerning the directions of further works.

The conducted operational tests have proved that it is possible to obtain about 18% extension of the blade life, which in the conditions of a fish processing plant allows to obtain the effect of scale and has a favourable influence on both the reduction of tool costs and the reduction of downtime of the technological line, connected with the replacement of blades in the skinning machine.

Wykaz symboli i akronimów

Symbole

a_d	– dosuw obciążania, mm
$a_{e\ wy}$	– naddatek dla przejścia wyiskrzającego, mm
$a_{e\ zgr}$	– naddatek dla przejścia zgrubnego, mm
F	– siła cięcia, N
F_p	– siła początkowa naprężenia próbki, N
i	– przełożenie przekładni bezluzowej
i_d	– liczba przejść obciążających
J_{in}	– momenty bezwładności, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
m	– masa, kg
n	– liczba powtórzeń punktów planu
N_{ay}	– średnia prędkość wejściowa, obr./min
N_{in}	– maksymalna prędkość wejściowa, obr./min
n_s	– prędkość obrotowa ściernicy, obr./min
n_{sd}	– prędkość obrotowa ściernicy przy obciążaniu, obr./min
P_{max}	– maksymalna moc elektryczna elektrowrzeciona, kW
P_{pocz}	– początkowa moc elektryczna elektrowrzeciona na biegu jałowym, kW
Q	– wydatek czynnika chłodząco-smarującego, dm^3/min
Q_{CAG}	– wydatek schłodzonego sprężonego powietrza generowanego przez dyszę CAG, dm^3/min
Q_{MQL}	– wydatek aerozolu powietrzno-olejowego podawanego w metodzie smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem MQL, ml/h
r	– promień wierzchołka ostrza, μm
R	– współczynnik korelacji wielowymiarowej
S_a	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, mm
S_{bi}	– wskaźnik nośności powierzchni
S_{dq}	– średnie kwadratowe nachylenie powierzchni, mm/mm
S_{dr}	– rozwinięcie powierzchni, %
S_{ds}	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni, mm^{-2}
S_{mvr}	– średnia objętość pustek powierzchni, mm^3/mm^2
S_t	– całkowita wysokość nierówności powierzchni, mm
S_{tr}	– wskaźnik tekstury powierzchni

Ta	– średni moment obrotowy, Nm
Tm	– chwilowy moment obrotowy, Nm
Tn	– znamionowy moment obrotowy, Nm
Tr	– maksymalny moment obrotowy, Nm
v_c	– prędkość liniowa ruchu głównego (prędkość szlifowania), m/s
v_f	– prędkość posuwu wzdłużnego ściernicy, mm/min
v_{fc}	– prędkość posuwu ostrza tnącego, mm/s
v_{fd}	– prędkość posuwu przy obciąganiu, m/s
α	– wartość kąta wierzchołkowego ostrza, °
α_n	– kąt opisujący geometrię ostrza wielościanowego, °
α_s	– kąt osiowego odchyłu ściernicy w pierwszej płaszczyźnie, °
β_s	– kąt osiowego odchyłu ściernicy w drugiej płaszczyźnie, °
ΔP	– przyrost mocy szlifowania, kW
σ	– odchylenie standardowe
χ_s	– wartość kąta osiowego odchyłu ściernicy w trzeciej płaszczyźnie, °

Akronimy

AMR	– automatyczny odczyt powiększenia (ang. <i>Automatic Magnification Reading</i>)
BSI	– współczynnik ostrości narzędzia (ang. <i>Blade Sharpness Index</i>)
CAD	– projektowanie wspomagane komputerowo (ang. <i>Computer Aided Design</i>)
CAG	– dysza doprowadzania gazów (ang. <i>Cold Air Gun</i>)
CAMQL	– smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego podawanego poprzez schłodzone sprężone powietrze (ang. <i>Cooled Air Minimum Quantity Lubrication</i>)
CAOM	– smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco smarującego wraz z jednoczesnym podawaniem schłodzonego sprężonego powietrza (ang. <i>Cold Air and Oil Mist</i>)
CMOS	– matryca światłoczuła (ang. <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>)
CNC	– komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych (ang. <i>Computerized Numerical Control</i>)
CPS	– czynna powierzchnia ściernicy
DTR	– dokumentacja techniczno-ruchowa
EDS	– dyspersja promieniowania rentgenowskiego (ang. <i>Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)

- FLC – elastyczne sterowanie intensywnością oświetlenia (ang. *Flexible LED Control*)
- LED – dioda elektroluminescencyjna (ang. *Light-Emitting Diode*)
- MMOB – matematyczny model obiektu badań
- MQC – chłodzenie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (ang. *Minimum Quantity Cooling*)
- MQCL – zminimalizowany wydatkiem płynu chłodząco-smarującego o obniżonej temperaturze (ang. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*)
- MLQ – smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (ang. *Minimum Quantity Lubrication*)
- PCS – płyn chłodząco-smarujący
- SEM – skaningowy mikroskop elektronowy (ang. *Scanning Electron Microscope*)
- SGP – struktura geometryczna powierzchni
- SSP – schłodzone sprężone powietrze
- USB – uniwersalna magistrala szeregową (ang. *Universal Serial Bus*)

1. WPROWADZENIE

Specyfika operacji produkcyjnych prowadzonych we współczesnym przemyśle spożywczym, zwłaszcza w jego obszarach związanych z przetwórstwem ryb, opisanych szczegółowo w pracach Sena (2005), Boziarisa (2013) oraz Bordy i współautorów (2017), wymaga stosowania wielu (niekiedy złożonych) operacji przetwórczych prowadzących do efektywnego rozdzielania surowca rybnego. Jedną z takich operacji jest obróbka surowca w celu usunięcia niepożądanych elementów (m.in. płetw, głów, ości, kręgosłupa) oraz nadania mu odpowiedniego kształtu i wymiarów. Częścią obróbki jest odkórowanie, opisane w pracach Halla (2011 i 2012), polegające na oddzieleniu od ryby fileta (płata mięsa bez ości i skóry). W tym przypadku zwykle stosuje się maszyny technologiczne pracujące w cyklu automatycznym lub ręcznym. Wyposażone są one w pojedyncze noże przemysłowe lub ich zespoły zawierające w niektórych przypadkach nawet 6-8 noży lub więcej, przy czym mogą one być nieruchome względem podawanego surowca lub mogą wykonywać ruch posuwisto-zwrotny. Na rysunku 1 jako przykład wyżej wymienionej operacji skórowania przedstawiono widok hali produkcyjnej w zakładzie przetwórczym firmy Espersen Poland Sp. z o.o. (Koszalin, Polska).

a)



b)



c)



Rys. 1. Linia do skórowania ryb płaskich w przedsiębiorstwie Espersen Poland Sp. z o.o. (Koszalin, Polska): a) widok ogólny linii technologicznej; b) maszyna skórująca ST600 firmy Steen F.P.M. International (Kalmthout, Belgia); c) obszar roboczy w procesie skórowania (Zieliński i Nadolny, 2019; Zieliński i inni, 2020; Gibson i inni, 2014)

Przemysłowe ostrza tnące są wykonywane głównie z węglowych i stopowych stali narzędziowych, stali szybko tnących, a także stali nierdzewnych, scharakteryzowanych w pracy Colása i Tottena (2016). Te ostatnie są najczęściej stosowane w przemyśle spożywczym i są dopuszczone do kontaktu z żywnością. Ponieważ proces skórowania jest jedną z kluczowych operacji decydujących o docelowej masie półproduktu oraz jego kształcie i wymiarach, jak wskazuje praca Halla (2011), przetwórcy kładą duży nacisk na utrzymanie krótkiego czasu procesu i jego wysoką wydajność. Proces ten może zostać zakłócony przez wystąpienie szeregu niekorzystnych czynników, utrudniających lub (w niektórych przypadkach) uniemożliwiających jego dalszy przebieg. Najczęściej są one związane ze stanem powierzchni narzędzia skrawającego. Na ten stan mają istotny wpływ m.in:

- czynniki sprzyjające powstawaniu silnych oddziaływań korozyjnych (m.in. wilgotne środowisko pracy, stosowanie związków alkalicznych i fosforanów do odkazania i ochrony surowca przed mikroorganizmami, stosowanie kwasu azotowego i fosforowego do usuwania osadów poprodukcyjnych),
- czynniki sprzyjające zużyciu mechanicznemu, głównie zmiana geometrii krawędzi tnących przemysłowych ostrzy tnących w wyniku procesu obróbki (np. stopień krawędzi tnących),
- czynniki sprzyjające zmianie właściwości materiału, prowadzące do zwiększenia jego podatności na odkształcenia.

Niezależnie od tego, czy występuje jeden z wymienionych czynników, czy też ich kombinacja, dąży się do minimalizacji skutków ich występowania głównie ze względów ekonomicznych. Przestoje maszyn technologicznych pracujących w linii produkcyjnej związane z wymianą ostrzy tnących są zazwyczaj długotrwałe i kosztowne, ponadto koszt nowego, dobrej jakości ostrza jest również wysoki. W celu zminimalizowania ostatniego z powyższych, w praktyce przemysłowej często stosuje się działania związane z odnawianiem zdolności skrawnych narzędzi skrawających poprzez ich regenerację. W przypadku przemysłowych ostrzy tnących dąży się do uzyskania ich pierwotnego kształtu, a przede wszystkim do odtworzenia prawidłowych wartości kątów pochylenia krawędzi tnących. Efektywną regenerację można przeprowadzić stosując np. proces szlifowania narzędziami ściernymi wykonanymi z ziaren regularnego azotku boru cBN i spojonych spoiwem ceramicznym, scharakteryzowany w pracy Jacksona i Davima (2010).

Analizując jedną z ważniejszych cech noży, jaką jest ich trwałość, nie można zapomnieć o wszelkiego rodzaju zakłóceniach, na jakie trafia ostrze w czasie pracy. Nieregularność kształtu samego surowca (fileta), wtrącenia w postaci piasku lub łusek, które dostarczane są

z poprzedzających etapów produkcji, bardzo negatywnie wpływają na okres trwałości ostrza. Wilgotne i korozyjne środowisko pracy a także obecność kwasu azotowego oraz fosforowego są również niekorzystne. Dochodzi do przedwczesnych uszkodzeń (ubytków) krawędzi tnącej, co prowadzi do przerw w procesie produkcyjnym realizowanym w systemie potokowym (linia produkcyjna). Wynika z tego konieczność prowadzenia prac badawczych w zakresie możliwości wydłużenia okresu trwałości ostrzy technicznych, ich modyfikacji oraz regeneracji.

Najważniejszym celem niemiejszej pracy była analiza zjawisk podstawowych w strefie szlifowania ostrzy noży planarnych ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru (cBN) w trzech odmianach kinematycznych (szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie stożkową powierzchnią czołową ściernicy) umożliwiającą wytypowanie warunków realizacji tego procesu zapewniających w efekcie wydłużenie okresu trwałości kształtowanych narzędzi w procesie skórowania ryb płaskich.

W związku z powyższym w pracy zamieszczono analizę literatury (rozdział 2.) dotyczącej aktualnego stanu wiedzy w zakresie cięcia materiałów organicznych, rodzajów i kształtów narzędzi tnących, metod kształtowania ostrzy technicznych oraz problemów występujących w procesie cięcia tkanek miękkich a także sposobów oceny ostrości ostrzy technicznych.

W kolejnej części (rozdział 3.) zamieszczono elementy metodyczne charakterystyczne dla rozpraw doktorskich, takie jak cele, hipotezę, problemy badawcze i zakres pracy.

W rozdziale 4. opisano szczegółowo metodykę przeprowadzonych prac badawczych w sposób umożliwiający ich odtworzenie. Informacje przedstawiono z podziałem na trzy podstawowe etapy badań: badania rozpoznawcze, badania właściwe oraz badania eksploatacyjne przeprowadzone w warunkach przemysłowych.

Istotną część pracy (rozdział 5.) stanowi opis budowy autorskich stanowisk badawczych i pomiarowych. Stworzenie odpowiednich warunków do prowadzenia obróbki różnymi odmianami kinematycznymi procesu szlifowania wymagało wykonania specjalistycznego stanowiska badawczego. W rezultacie zaprojektowano i wykonano 5-osiową szlifierkę wyposażoną w układ sterowania CNC (ang. *Computerized Numerical Control*). Wymiary oraz kształt ostrza zdeterminowały stopień skomplikowania stanowiska badawczego. W podrozdziale 5.1. zawarto opis etapów projektowania stanowiska, użytych elementów oraz parametrów technicznych stanowiska. W procesie projektowania stanowiska badawczego określono parametry techniczne niezbędne do prowadzenia pełnego zakresu badań. Konieczne było zapewnienie możliwości precyzyjnego odwzorowania (regeneracji) kształtu ostrza. Kształtowanie kątów ostrza w dużym zakresie wartości, struktury geometrycznej powierzchni

roboczych, prostoliniowości, a także umożliwienie wprowadzania modyfikacji. W rozdziale 5. pracy opisano również zaprojektowane i wykonane stanowisko do pomiaru siły cięcia (podrozdział 5.2.) oraz stanowisko do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania (podrozdział 5.3.).

Najważniejszą merytorycznie częścią rozprawy stanowią trzy rozdziały opisujące wyniki badań rozpoznawczych (rozdział 6.), badań właściwych (rozdział 7.) oraz rezultaty prób eksploatacyjnych przeprowadzonych w warunkach przemysłowych w procesie skórowania ryb płaskich (rozdział 8.). Analizowane zagadnienie z uwagi na swoją obszerność skłoniło autora do przyjęcia szeregu założeń badawczych. Najważniejszym z nich było przyjęcie, że ostrza kształtowane będą ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru cBN. W pracy określono eksperymentalnie najkorzystniejsze warunki kształtowania ostrza o zadanej geometrii w procesie szlifowania realizowanego obwodem ściernicy, czołem ściernicy oraz ściernicą z ukształtowaną strefą stożkową. Badania prowadzone były z zastosowaniem handlowych noży planarnych stosowanych do rozdzielania materiałów organicznych, które są standardowo eksploatowane w zakładach przemysłu spożywczego. Wyniki badań procesu szlifowania zweryfikowano na stanowisku do pomiaru siły ciecicia. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych poddano weryfikacji w procesie produkcyjnym prowadzonym w warunkach przemysłowych. Przeprowadzone próby eksploatacyjne ukształtowanych noży potwierdziły wyniki badań laboratoryjnych i wykazały możliwość nawet 18% wydłużenia okresu trwałości w odniesieniu do noży referencyjnych.

W ostatnim rozdziale (rozdział 9.) niniejszej rozprawy doktorskiej zamieszczono podsumowanie oraz zbiór wniosków podzielonych na wnioski poznawcze (podrozdział 9.1.), utylitarne (podrozdział 9.2.), metodyczne (podrozdział 9.3.) oraz wnioski dotyczące kierunków dalszych prac (podrozdział 9.4.). Zamieszczono w nim również informację o upowszechnieniu wyników badań w formie publikacji naukowych (podrozdział 9.5.).

2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH W ZAKRESIE WYZNACZONYM TEMATEM ROZPRAWY

2.1. Charakterystyka ostrzy technicznych

Ostrzem technicznym nazywa się narzędzie służące do rozdzielania w procesie cięcia, odcinania lub nacinania materiałów niemetalowych (rys. 2-3). Na świecie produkuje się dużą liczbę narzędzi przeznaczonych do cięcia materiałów niemetalowych. Narzędzia tnące ze względu na swoją powszechność występowania znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Stale rozwijające się nowe dziedziny przemysłu, nowe technologie, optymalizacje procesów produkcyjnych zwiększają wymagania dotyczące właściwości eksploatacyjnych ostrzy technicznych.



Rys. 2. Przykłady ostrzy technicznych firmy Lutz Blades (www.lutz-blades.com, 2020)



Rys. 3. Przykładowe ostrza techniczne stosowane w przemyśle przetwórstwa spożywczego (www.industrysourcing.com, 2020)

Z uwagi na niewielkie wymiary poprzeczne w obszarze krawędzi tnącej, narzędziom tym stawia się szczególnie duże wymagania wytrzymałościowe. Oczekuje się by siła cięcia (rozdzielenia materiału) była możliwie mała.

Podstawową cechą określającą ostrza jest ich zdolność tnąca, pod którą rozumie się siłę, jaką należy przyłożyć by zainicjować cięcie (rozdzielanie) materiału ciętego. Wpływ na to ma wiele czynników, między innymi rodzaj materiału i jego właściwości fizyczne, warunki cięcia, właściwości geometryczne krawędzi ostrza oraz powierzchni przylegających, a także wielkość kąta klina. Narzędzia w szczególności wykonujące ruch w kierunku prostopadłym do krawędzi tnącej powinny cechować się podwyższoną wytrzymałością dla zachowania ciągłości procesu oraz gwarantować pożądaną, jakość krawędzi przecinanych materiałów.

Pomimo ogromnej liczby procesów realizowanych z zastosowaniem ostrzy technicznych nadal prowadzi się badania w celu określenia tzw. współczynników ostrości narzędzia BSI (ang. *Blade Sharpnes Index*). Część autorów publikacji stwierdza, że współczynnik *ostrości narzędzi* zależy od potrzebnej siły jaką należy przyłożyć by rozdzielić znany materiał, natomiast inni uzależniają ją od pomiaru kąta i promienia krawędzi ostrza (McGorry i inni, 2005; Marsot i inni, 2007).

Wnioskować można, że na świecie określone charakterystycznych cech ostrzy technicznych budzi wiele pytań i zależne jest od przyjętej metody (McCarthy i inni, 2007). Np. w pracy Schuldt'a i innych (2013) autorzy stwierdzają, że zaproponowana przez nich metoda pomiaru siły cięcia daje korzystniejsze rezultaty w odniesieniu do porównania nowych i zużytych narzędzi, a tym samym staje się wiodącą dla tego typu analiz. Dzieje się tak ponieważ, test taki może uwzględniać dodatkowe czynniki procesu, takie jak prędkość, zróżnicowanie przecinanego materiału a także umożliwia przeprowadzenie oceny krawędzi przecinanego materiału.

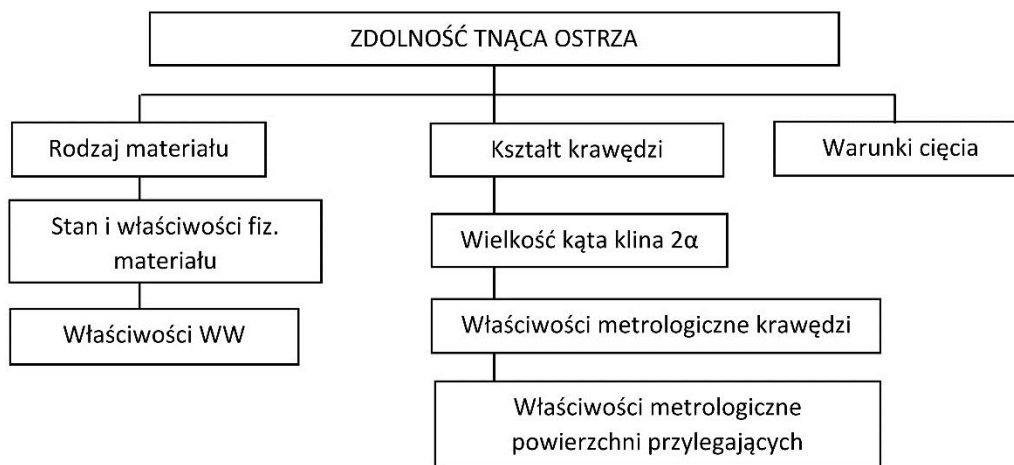
Inny wniosek można wysnuć z faktu, że istnieje norma (ISO 8442-5:2005) określająca definicje podstawowe w odniesieniu do noży do użytku domowego i przemysłowego a także przedstawiająca pojęcie ostrości i opisująca parametry krawędzi ostrza. Norma ta określa również sposób testowania ostrzy z punktu widzenia możliwej do uzyskania wydajności procesu cięcia.

2.1.1. Cechy ostrzy technicznych

Charakterystyka narzędzi tnących uwarunkowana jest wieloma czynnikami. Można podzielić je ze względu na zastosowanie jako ręczne bądź maszynowe, a w następstwie ze względu na kształt. W przypadku maszynowego zastosowania noże mogą przybierać kształt

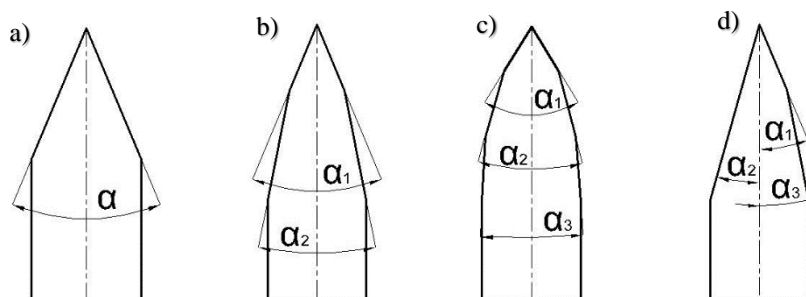
prostoliniowy, tarczowy, cylindryczny, taśmowy (prosty i ząbkowany), kształtowy (Dłużewski i Dłużewska, 2008; Dowgiałło 2002).

Podstawową cechą narzędzi jest ich tzw. *zdolność tnąca*, pod którą rozumie się konieczność przyłożenia wymaganej siły potrzebnej do cięcia (rozdzielania) materiału rzeczywistego. Zdolności tnące ostrza technicznego zależą od wielu czynników. Na rysunku 4 przedstawiono rodzaje zdolności tnącej ostrzy technicznych zależne od metody cięcia oraz przeznaczenia ostrza (Karpiński i Stępień, 1987).



Rys. 4. Czynniki wpływające na zdolność tnąca (Karpiński i Stępień, 1987)

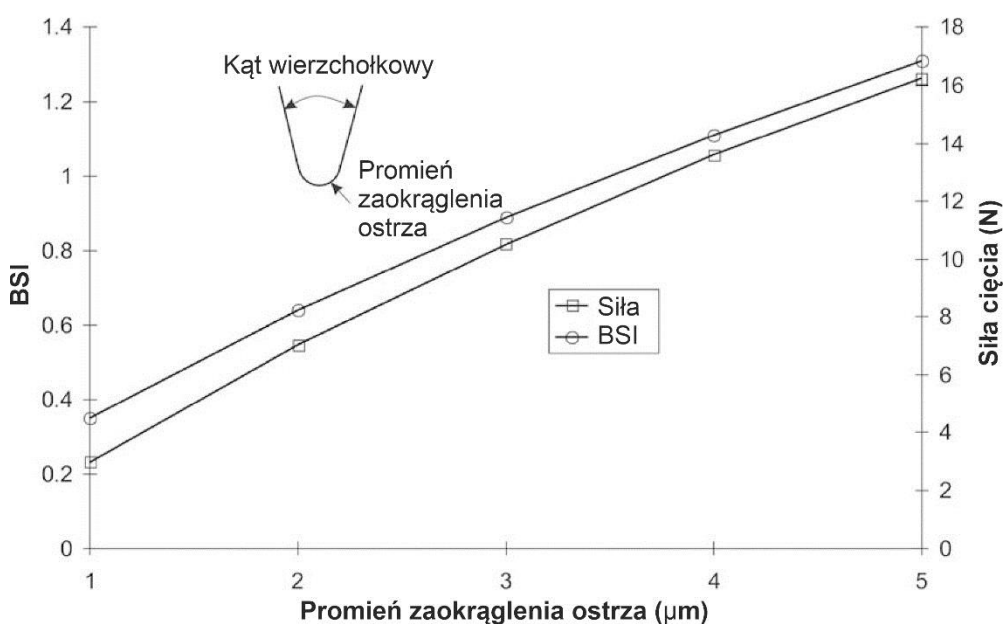
Ostrza techniczne mogą być ukształtowane, jako jedno, dwu a nawet trzyczęściowe. Występują jako symetryczne oraz asymetryczne. Rysunek 5 przedstawia przekroje poprzeczne typowych ostrzy technicznych (Karpiński i Stępień, 1987).



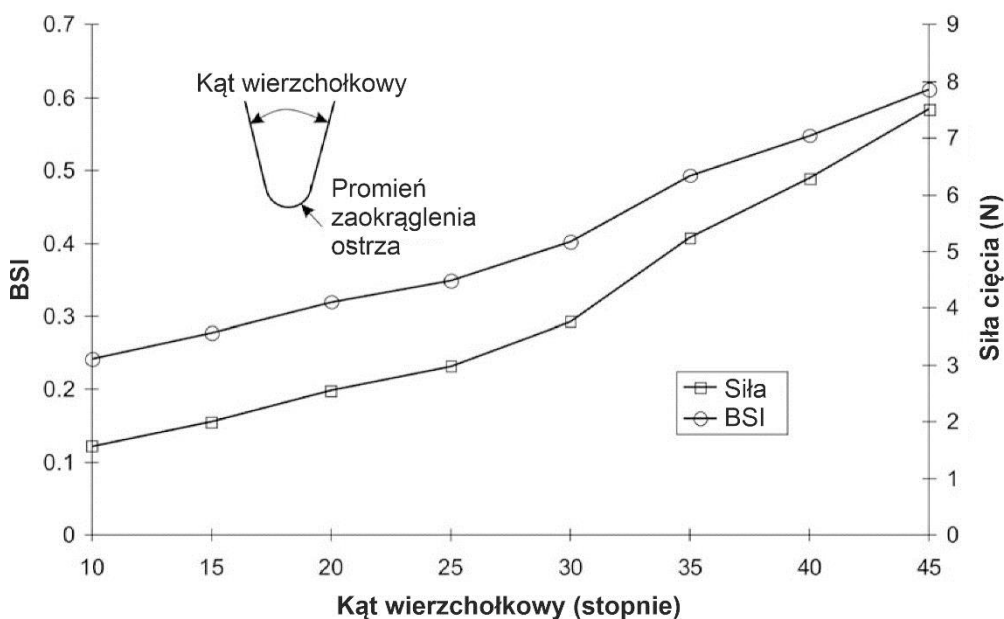
Rys. 5. Kształty ostrzy technicznych: a) jednościńowe symetryczne; b) dwuścińowe symetryczne; c) trójścińowe symetryczne; d) dwuścińowe asymetryczne (Karpiński i Stępień, 1987)

Trwałość ostrza oraz siły cięcia zależą bezpośrednio o wartości kąta α a wartości, jakie powszechnie się stosuje w przemyśle spożywczym mieszczą się w przedziale $\alpha = 3-10^\circ$ oraz $\alpha_1 = 20-30^\circ$ (Verhoeven, 2004). Ograniczenie wartości minimalnej tego kąta wynika z trwałości ostrza oraz towarzyszącego temu zjawisku *przewijania krawędzi* ostrza na etapie obróbki.

W zależności od zastosowania i obrabianego materiału wartość kąta istotnie wpływa na energochłonność procesu cięcia (McCarthy i inni, 2007a). W analizie (McCarthy i inni, 2010) autorzy badają wpływ zarówno kąta ostrza, jaki i promienia zaokrąglenia krawędzi. Badania przeprowadzono w odniesieniu do cięcia miękkich ciał stałych. Na wykresach zamieszczonych na rysunku 6 i 7 przedstawiono graficznie zależności zmiany wartości siły cięcia w stosunku do zmiany promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej (rys. 6) w zakresie 1-5 μm oraz zmiany wartości siły cięcia w zależności od wartości kąta ostrza przy niezmiennym promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej (rys. 7).

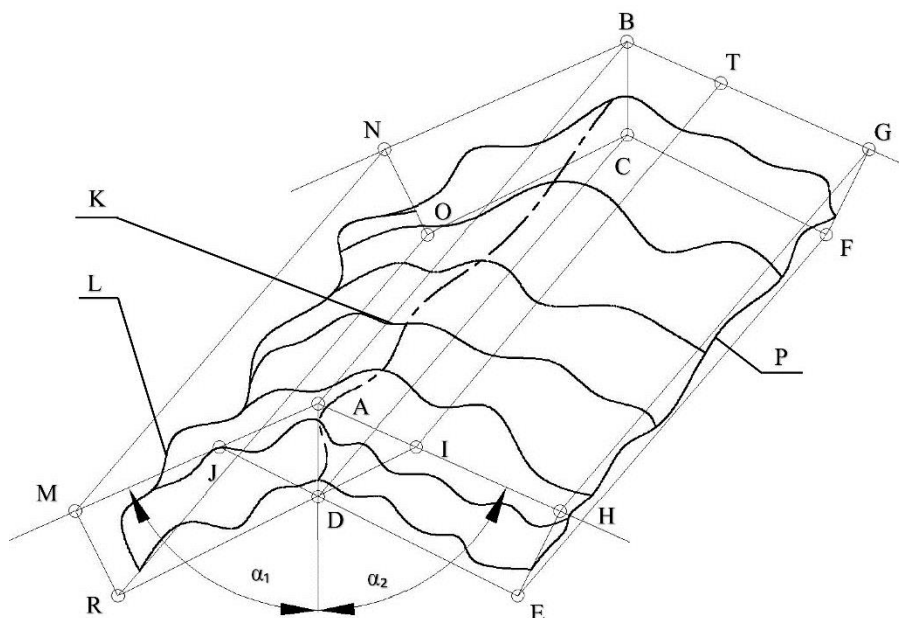


Rys. 6. Współczynnik BSI w funkcji promienia krawędzi tnącej i stałym promieniu 25° (McCarthy i inni, 2010)



Rys. 7. Współczynnik BSI w funkcji zmiany kąta ostrza i stałym promieniu $1 \mu\text{m}$ (McCarthy i inni, 2010)

Analizując krawędź ostrza można stwierdzić, że jest ona wynikiem przenikania się dwóch chropowatych powierzchni, które uzyskiwane są w procesie szlifowania. Na rysunku 8 pokazano ogólny model powierzchni tworzących krawędź ostrza (Karpiński i Stępień, 1987).



Rys. 8. Model budowy krawędzi ostrza (Karpiński i Stępień, 1987)

Powierzchnie boczne, tworzące w wyniku interferencji krawędź ostrza, położone są w stosunku do osi ostrza pod kątami α_1 i α_2 . Normalnymi do tych powierzchni są powierzchnie ABGH i ABNM. Chropowatości rzeczywistych powierzchni przylegających do krawędzi K są różne. Można je opisać wyznaczając ich zarysy lewy L i prawy P, leżące w płaszczyźnie MNOR oraz EFGH, prostopadłe do płaszczyzn nominalnych i równoległych do nominalnej krawędzi ostrza AB. Z metrologicznego punktu widzenia opis krawędzi ostrza jest dość trudnym zagadnieniem, co dodatkowo utrudnia brak jakichkolwiek norm opisujących ten problem. Analizę krawędzi ostrza należy poprzedzić analizą powierzchni bocznych jako powierzchni chropowatych. Nie bez znaczenia pozostaje także materiał, z jakiego zbudowane jest ostrze (Karpiński i Stępień, 1987).

2.1.2. Materiały stosowane do produkcji ostrzy technicznych

Z uwagi na szeroki zbiór typów ostrzy technicznych w niniejszej pracy skoncentrowano się na ostrzach technicznych mających zastosowanie w procesie cięcia materiałów organicznych. Wiodącym materiałem do produkcji ostrzy technicznych w przemyśle spożywczym jest stal nierdzewna. PN-EN ISO 8442-2 (1997) określa materiał i wyroby przeznaczone do kontaktu z żywnością wykonane ze stali nierdzewnej lub pokryte srebrem.

Kolejną coraz powszechniej stosowaną grupą materiałów są materiały ceramiczne. Według niektórych źródeł pierwsze noże ceramiczne pojawiły się już w latach 80-tych XX w. w Japonii (Krejcie i inni, 2012). Rozwój tej technologii doprowadził do stworzenia odpowiednich norm dla noży z materiałów ceramicznych (PN-EN ISO 8442-9:2018-04).

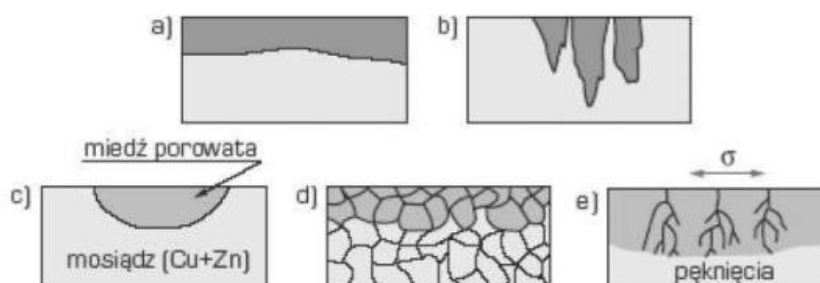
W medycynie (w zależności od rodzaju zabiegów) również najczęściej stosowane są ostrza wytwarzane ze stali nierdzewnej, lecz można spotkać także ostrza diamentowe, które pożądane są w operacjach precyzyjnych (okulistyce) ze względu na swoją twardość (Krejcie i inni, 2003).

W publikacjach można spotkać także wyniki badań dotyczących powlekania ostrzy cienkimi warstwami i ich wpływu na energię cięcia oraz procesy gojenia się ran wykonanych takimi narzędziami (Jinn i inni, 2019). Narzędzia powlekane charakteryzują dobrymi właściwościami z uwagi na zmniejszenie siły cięcia, jednak jednocześnie pojawia się ryzyko rozwarstwienia (łuszczenia) naniesionych powłok oraz zwiększają się wymagania w odniesieniu do metod regeneracji ostrza (Jang i inni, 2015).

W przemyśle spożywczym najbardziej popularne są narzędzia tnące wykonane ze stali nierdzewnej. Pracują one w środowisku mocno agresywnym o dużej wilgotności w kontakcie z środkami powodującymi korozję. Materiał musi cechować się odpowiednią odpornością na takie zjawiska zarówno w środowisku wodnym jak i atmosferze powietrza.

Stal nierdzewną można określić jako stop Fe z minimum 10,5% zawartością Cr. Jest ona odporna na korozję dzięki zdolności do pasywacji, zależnie od składu chemicznego danego stopu (Przybyłowicz, 1999).

Rozróżnić można kilka typów korozji: elektrochemiczną, międzykrystaliczną, wżerową czy naprężeniową (rys. 9). Korozja międzykrystaliczna jest nierównomierna i trudna do wykrycia bez specjalistycznych narzędzi, co czynią ją najmniej pożądaną (Dobrzański, 1999).



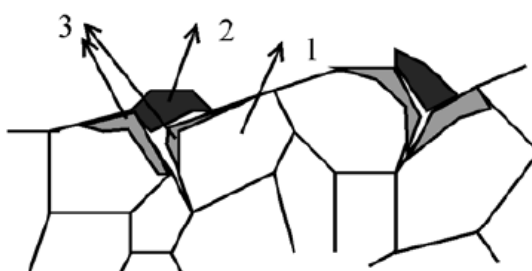
Rys. 9. Typowe uszkodzenie korozyjne: a) korozja równomierna; b) korozja wżerowa; c) korozja selektywna; d) korozja międzykrystaliczna; e) pęknięcie korozyjne (Dobrzański, 1999)

Materiały jednofazowe cechują się największą odpornością korozyjną, posiadają strukturę ferrytyczną lub austenityczną i są najczęściej stosowanymi stalami nierdzewnymi (Przybyłowicz, 1999).

Cr w ilości, około 12%, jaki zawarty jest w stalach ferrytycznych oraz martenzytycznych, powoduje wzrost potencjału elektrochemicznego zwiększając odporność korozyjną. Przy większej zawartości chromu i mniejszej zawartości węgla stale mają strukturę ferrytyczną. Większa ilość chromu skutkuje podwyższoną hartownością. Ferrytyczna stal posiada odporność na działanie utleniających kwasów typu chromowy, siarkowy, azotowy. Nie jest odporna natomiast na działanie kwasów redukcyjnych jak m. in. kwas solny (Przybyłowicz, 1999).

Stale o strukturze martenzytycznej są typowymi stalami nierdzewnymi zachowującymi swoją twardość i wytrzymałość do temperatury 500°C, ale nie posiadają właściwości kwasoodpornych (Przybyłowicz, 1999). W ich składzie jest chrom i nikiel oraz zawartość węgla nieprzekraczająca 0,1%. Zawartość niklu dla struktury austenitycznej wynosi ok. 8%. Nikiel może zastępować podwójną ilość manganu. Stal dodatkowo może zawierać molibden w ilości 2-5% i niewielką ilość niobu czy tytanu, które wiążą węgiel ograniczając korozję międzykrystaliczną. Stale te są odporne na roztwory alkaliczne oraz kwasy azotowe, natomiast nie są odporne na działanie kwasów redukcyjnych (Przybyłowicz, 1999).

Korozja międzykrystaliczna (rysunek 10) stanowi istotny problem i spowodowana jest występowaniem węglików chromu na granicach ziaren, wyciągając tym samym chrom ze strefy przygranicznej ziarna (Surowska, 2002).



Rys. 10. Schemat korozji międzykrystalicznej: 1 – wnętrze ziarna, 2 – wydzielona faza, 3 – obszar zubożony (Surowska, 2002)

Zmniejszenie zawartości Cr w stali poniżej 12% nasila zjawiska korozyjne. Stosować można wiele zabiegów w celu zapobiegania korozji międzykrystalicznej, m.in. ograniczając zawartość węgla, przesycając stal dla ustabilizowania austenitu, ograniczać wpływ temperatury, stosując dodatki tytanu czy niobu (5-10% w stosunku do zawartości węgla) (Surowska, 2002).

2.1.3. Technologia wytwarzania ostrzy technicznych

Ostrza techniczne wykonane ze stali nierdzewnej kształtuje się głównie w procesie szlifowania, a w zależności od przeznaczenia mogą być poddane obróbce wykańczającej w postaci m.in. docierania, polerowania czy też polerownia elektrochemicznego (Krejcie i inni, 2003). Proces ten z uwagi na zależność od wielu czynników powoduje, że jakość krawędzi ostrza jest zmienna a uzyskanie spójności wyników (ostrości) nadal jest wyzwaniem. Wybór metody obróbki oraz użytych narzędzi do uzyskania ostatecznych żądanych cech ostrza jest bardzo istotny. Porównanie ww. metod jest przedmiotem publikacji (Verhoeven, 2004). Należy jednak zaznaczyć, że firmy produkcyjne specjalizujące się w produkcji wszelkich narzędzi tnących ustalają własne procesy technologiczne bazując na swoich doświadczeniach oraz dostępnych nowych technologiach rynkowych.

Śledząc dostępne materiały można znaleźć w szczególności w urzędach patentowych alternatywne metody wytwarzania ostrzy technicznych ze stali nierdzewnej. Pomimo tego nadal najpowszechniej stosowaną metodą kształtowania ostrzy technicznych jest obróbka ścierna (Krejcie i inni, 2003). Szersza analiza procesu szlifowania ostrzy technicznych zamieszczona została w podrozdziale 2.2. niżej pracy.

2.1.4. Zastosowanie ostrzy technicznych

Ostrza techniczne mają szerokie zastosowanie w cięciu oraz rozdrabnianiu tkanek organicznych a także wszelkich warzyw i owoców. Odgrywają dużą rolę między innymi w takich dziedzinach jak: chirurgia ogólna, przetwórstwo mięsne, przetwórstwo rybne, przetwórstwo warzyw i owoców, zoologia, medycyna sądowa i innych. Poprawność pracy ostrza ma duży wpływ zarówno na materiał, który jest przecinany, ale również na osobę użytkującą narzędzie lub maszynę. W medycynie wpływa bezpośrednio na zdrowie i życie ludzkie. Istnieje wiele badań, które opisują, że rana wykonana ostrym skalpelem redukuje ból pacjenta i zmniejsza czas gojenia się rany (McCarthy i inni, 2007).

Podobnie ma się sytuacja w odniesieniu do użytkowników narzędzi tnących w przemyśle spożywczym. Eksploatacja niewystarczająco ostrych narzędzi prowadzi do wielu zaburzeń mięśniowo-szkieletowych w wyniku użycia nadmiernej siły przez pracowników (Claudon i Marsot, 2006) W przypadku maszyn zużyte narzędzie powoduje nadmierne zużycie energii a także przedwczesne zużycie części eksploatacyjnych, na które oddziałuje nadmierna siła (McGorry i inni, 2005a).

Kolejny obszar szerokiego stosowania narzędzi tnących to przetwórstwo warzyw i owoców. Procesy krojenia i rozdrabniania z użyciem narzędzi istotnie wpływają na

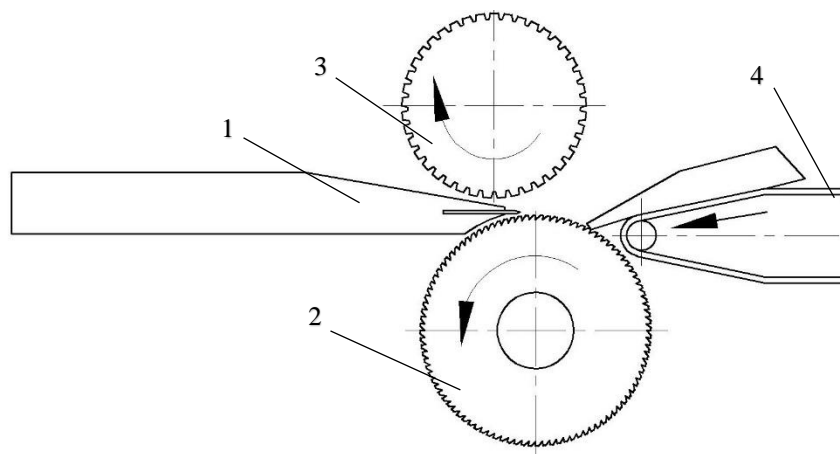
energochłonność procesu, który pochłania energię na poziomie 350 miliardów kWh rocznie. (Kowalik, 2011). Procesy krojenia prowadzi się za równo w czasie zbiorów roślin, jaki w czasie podzbiorowym. Charakterystyczne cięcie warzyw i owoców prowadzi się by uzyskać produkty o określonym kształcie (plastry, kostki oraz inne formy) (Nadulski i inni, 2013).

W procesie obróbki ryb narzędzia tnące wykorzystywane są na etapie produkcyjnym i używane są do oddzielenia części jadalnych od niejadalnych. Można w tym zakresie wyróżnić operacje patroszenia, odgławiania, porcjowania a także skórowania (Majewski, 2005). W zależności od prowadzonego etapu obróbki stosuje się noże o różnym kształcie i wielkości. Ciało ryby składa się z tkanek o różnej wytrzymałości, co zwiększa złożoność procesów cięcia. W procesie cięcia powstają straty energii w wyniku tarcia i adhezji powodując znaczne zapotrzebowanie na energię do jego realizacji.

Jednym z procesów obróbki tuszy ryb jest proces skórowania. Na rynku istnieje wielu producentów urządzeń do skórowania filetów ryby a stale rosnące wymagania powodują rozwój nowych sposobów oraz technik tego procesu. Można wyszczególnić kilka znanych metod skórowania filetów ryby (Kawka i Dutkiewicz, 1986):

- metoda z zastosowaniem nieruchomego noża;
- metoda z zastosowaniem ruchomego noża;
- metoda z zastosowaniem noża taśmowego.

Metoda skórowania z zastosowaniem nieruchomego noża, zakłada zastosowanie układu kinematycznego podającego surowiec, w którym zapewniana jest odpowiednia przestrzeń od bębna operacyjnego (podającego rybę) dostosowaną do grubości usuwanej skóry. Przestrzeń ta zwykle jest regulowana i ustawia się ją indywidualnie do wielkości obrabianej ryby. Schemat ideowy konstrukcji urządzenia realizującego skórowanie tą metodą pokazano na rysunku 11. Bęben operacyjny zazwyczaj posiada większą prędkość liniową na obwodzie od przenośnika podającego w celu wygładzania (usunięcia fałd) fileta dostarczanej ryby. Następnie bęben operacyjny chwytą skórę i wprowadza ją pod ostrze noża. Działanie to jest wspomagane jednocześnie przez wałek dociskowy. Nóż skórujący może przybierać kształt płaski lub ząbkowany w celu zmniejszenia oporów krojenia dla delikatniejszego mięsa. Sam nóż może przybierać kształt wyprofilowany lub prosty (Kawka i Dutkiewicz, 1986).



Rys. 11. Ideowy schemat oskórzarki z nożem nieruchomym: 1 – suport nożowy wraz z nożem, 2 – bęben operacyjny, 3 – wałek dociskowy, 4 – przenośnik podający (Kawka i Dutkiewicz, 1986)

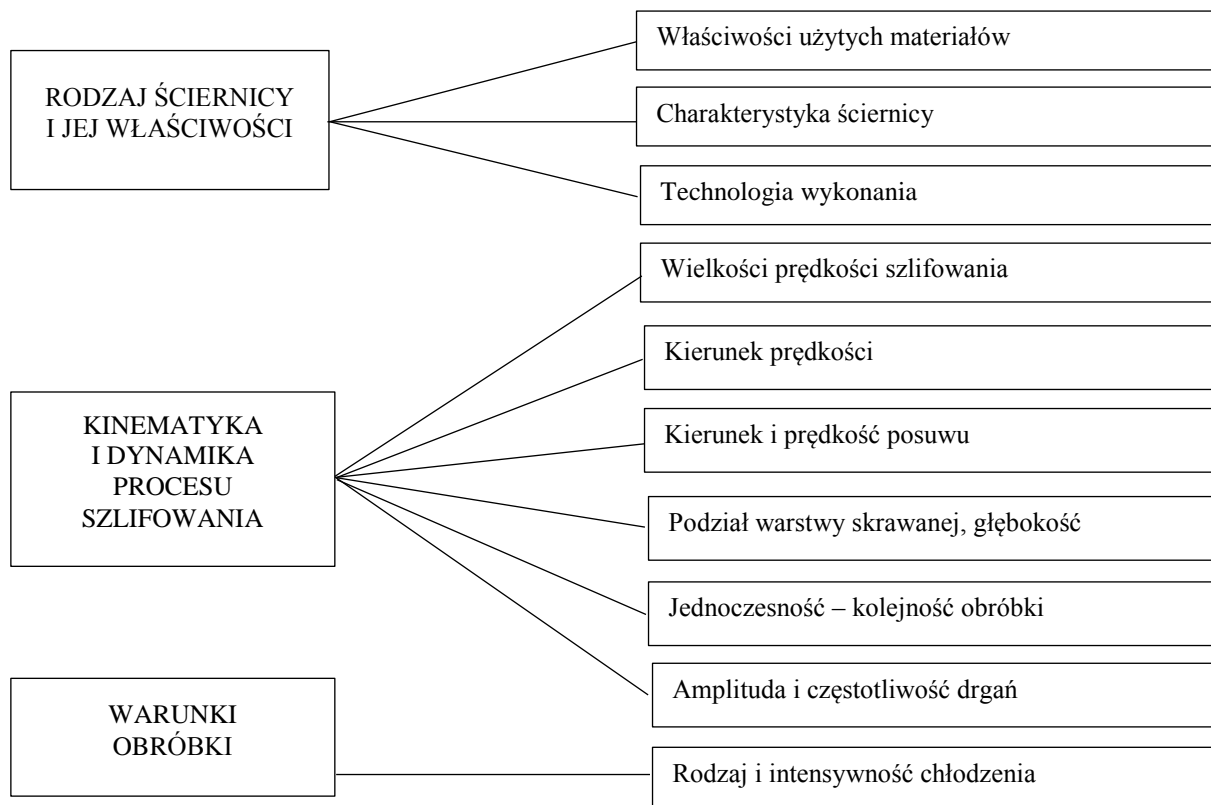
Metoda skórowania z zastosowaniem ruchomego noża jest stosowana dla obróbki filetów o różnej grubości skóry. Listwa oporowa zamocowana suwliwie (na sprężynach) przylega do noża a pod naporem fileta cofa się odsłaniając ostrze. Metodę tą stosuje się do różnych gatunków ryb (Kawka i Dutkiewicz, 1986).

Metoda skórowania z zastosowaniem noża taśmowego jest metodą zakładającą wykorzystanie bębna mrożącego pełniącego rolę transportową. Obrabiana ryba przymarza (stroną skóry) do powierzchni bębna, a następnie za pomocą noża taśmowego (umieszczonego stycznie do powierzchni bębna) odcinana jest od części fileta. Przymarznęta skóra usuwana jest z bębna poprzez skrobak. Maszyny tego typu wyposażone są we własny układ chodzenia bądź mogą być podłączone do zewnętrznego układu zasilania (Kawka i Dutkiewicz, 1986).

2.2. Charakterystyka procesu kształtowania ostrzy technicznych w procesach szlifowania, mikroszlifowania i docierania

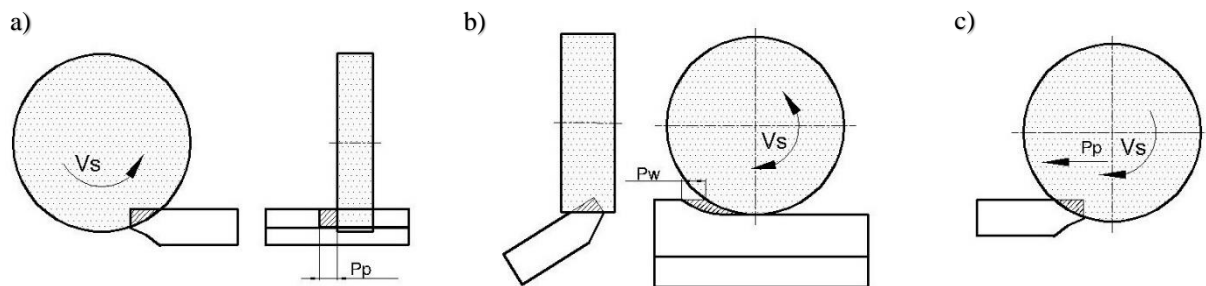
Ostrza noży technicznych kształtuje się głównie w procesie szlifowania. Określone parametry ustalone dla tego procesu wpływają bezpośrednio na charakterystykę ukształtowanego narzędzia. Z punktu widzenia, jakości ostrza czynniki związane z technologią szlifowania, które o tym decydują, przedstawiono na rysunku 10 (Karpiński i Stępień, 1987). Wiele z nich nie jest w pełni znana, podobnie jak zależności, które zachodzą między nimi.

Istotnym czynnikiem w kształtowaniu ostrza w procesie szlifowania jest kierunek prędkości szlifowania. Istnieje możliwość szlifowania na krawędź ostrza bądź przeciwnie. Zagadnie nie jest do końca zbadane, ale z praktycznego punktu widzenia mniejsze przewinięcie krawędzi ostrza uzyskuje się nacierając ściernicą na krawędź ostrza. Bez dalszych badań trudno jest określić wszystkie pozytywne i negatywne cechy podziału warstwy szlifowania w stosunku do uzyskanej jakości ostrza.



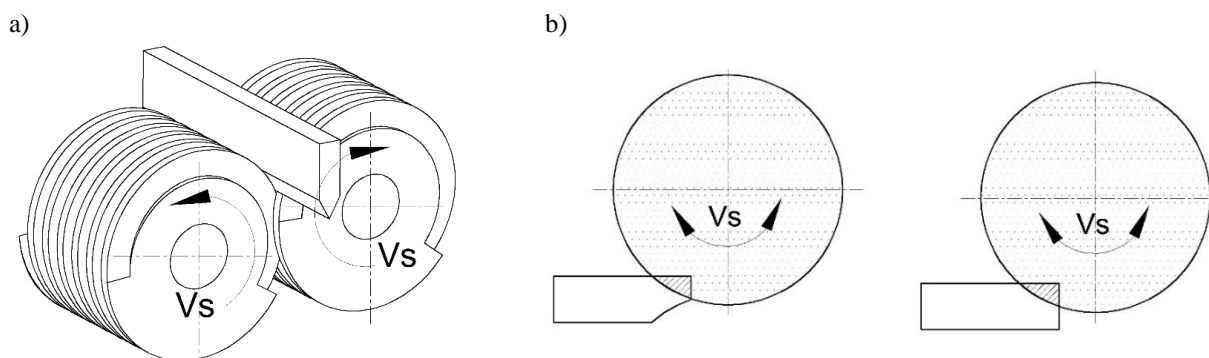
Rys. 12. Czynniki związane z technologią szlifowania wpływające na jakość ostrzy technicznych (Karpiński i Stępień, 1987)

Na rysunku 13 przedstawiono podział warstwy skrawanej przy szlifowaniu ostrzy technicznych (Karpiński i Stępień, 1987).



Rys. 13. Podział warstwy skrawanej przy szlifowaniu ostrzy technicznych: a) obwodowa prostopadła do krawędzi ostrza (kierunek prędkości skierowany na ostrze); b) obwodowa wzdłuż krawędzi ostrza; c) obwodowa prostopadła do krawędzi ostrza (kierunek prędkości skierowany od krawędzi ostrza) (Karpiński i Stępień, 1987)

Istotnym zagadnieniem jest również ustalenie kolejności obróbki ostrza. Na rysunku 14 pokazano możliwość przeprowadzona obróbki jednocześnie po obu stronach lub po kolejno z jednej a potem drugiej stronie ostrza technicznego.



Rys. 14. Kolejność obróbki ostrza: a) jednoczesna obróbka obu stron; b) obróbka kolejno jednej a potem drugiej strony (Karpiński i Stępień, 1987)

Przypadek obróbki jednoczesnej daje zdecydowanie mniejsze prawdopodobieństwo przewijania krawędzi. Wybór sposobu szlifowania decyduje o jakości powierzchni przylegających do krawędzi a tym samym o kształcie i charakterystyce metrologicznej krawędzi. Nie wszystkie metody mogą być metodami uniwersalnymi, ponieważ z punktu widzenia kształtu ostrza nie można ich zastosować np. w przypadku konieczności uzyskania kształtów wklęsłych narzędzi (Karpiński i Stępień, 1987). Wynika z tego, że o końcowej jakości użytkowej ostrza w znaczącym stopniu decyduje zastosowana odmiana kinematyczna procesu szlifowania (Plichta, 1996).

Kolejnym czynnikiem determinującym jakość kształtowanego ostrza technicznego jest rodzaj ściernicy użytej w procesie szlifowania. Ze względu na swoje korzystne cechy (w tym przede wszystkim dużą wartość współczynnika przewodzenia ciepła) jako najkorzystniejsze uważane są ściernice zbudowane z ziaren regularnego azotku boru cBN (Plichta, 1996; Klocke, 2009; Rowe, 2009; Nadolny, 2012) W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny i właściwości regularnego azotku boru.

Ściernice z ziarnami cBN posiadają dużą odporność temperaturową (nawet do 1600°C), co jest korzystniejsze w porównaniu ze ściernicami wytworzonymi z ziaren diamentowych oraz Al_2O_3 . Dla pełnego wykorzystania potencjału skrawnego narzędzi z ziarnami cBN zaleca się zwiększenie prędkości obrotowej ściernicy a także stosowanie obrabiarek o dużej sztywności. Ziarna cBN cechują się dużą ostrością krawędzi a tym samym są w stanie oddzielać wiór przy znacznie mniejszym zagłębieniu się w obrabiany materiał, zmniejszając jednocześnie naprężenia w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego w procesie szlifowania. Efektywność szlifowania tego typu narzędziami zależy przede wszystkim od wielkości ziaren. Z punktu widzenia trwałości zdecydowanie rzadziej wymagają one obciążenia w stosunku do ściernic z ziarnami Al_2O_3 (Plichta, 1996).

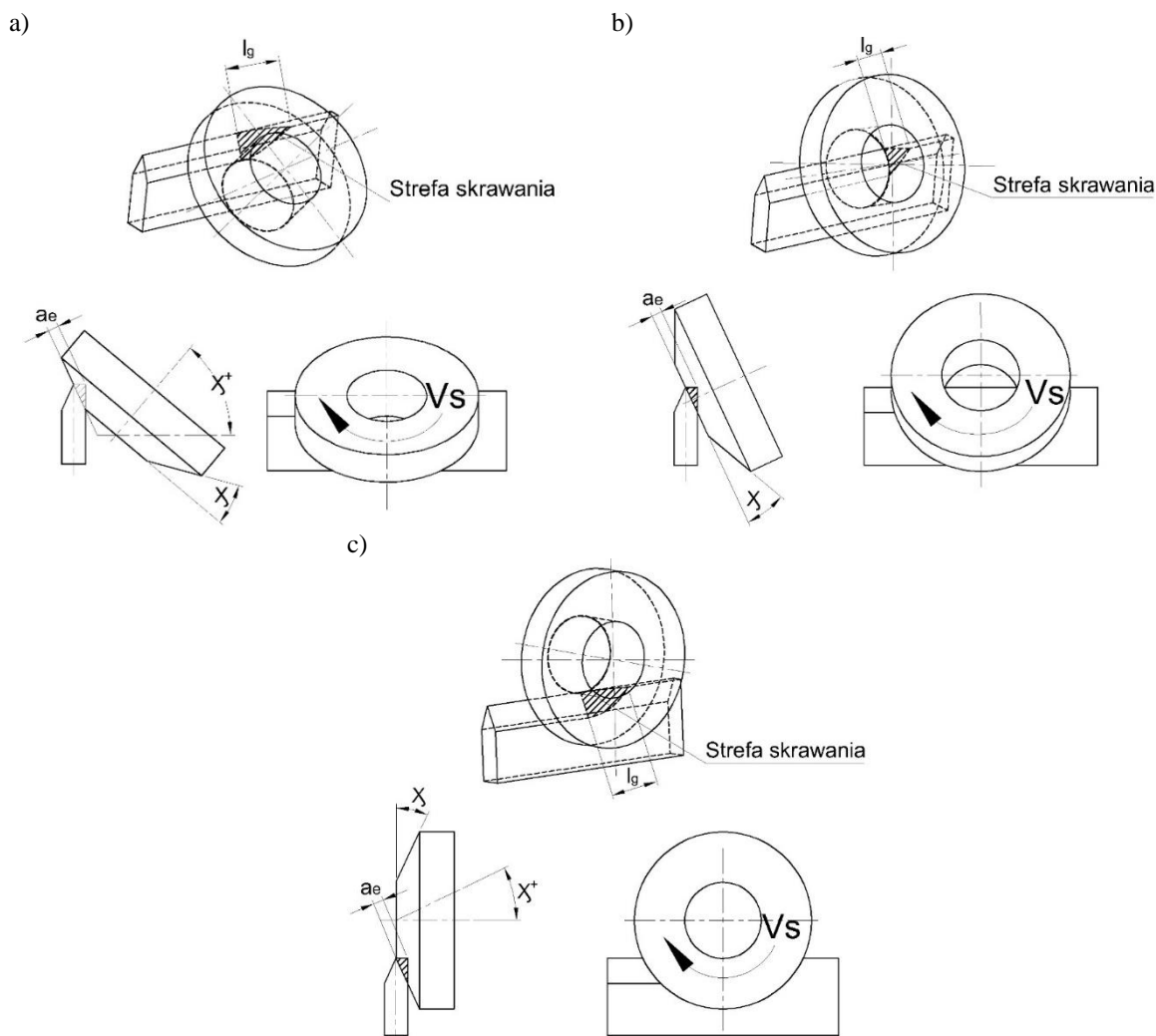
Tab. 1. Skład chemiczny i właściwości regularnego azotku boru (Klocke, 2009; Rowe, 2009; Nadolny, 2012)

Symbol chemiczny	cBN
Pełna nazwa	regularny azotek boru
Skład chemiczny	~43,6% B ~56,4% N
Wielkość kryształu	od ~10 μm (monokrystaliczny) do < 1 μm (mikrokrystaliczny)
Kształt	blokowy (heksagonalny) lub nieregularny, bardzo ostry
Gęstość właściwa	3,48 g/cm ³
Twardość Knoop HK	42-54 GPa
Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}	3,7 MPa·m ^{1/2}
Współczynnik tarcia (stal hartowana)	0,19
Współczynnik przewodzenia ciepła λ	240-1300 W/m·K

Ostrza techniczne o zarysie prostoliniowym stanowią największą grupę produkowanych narzędzi i mogą być szlifowane metodą obwodową (obwodem ściernicy) wzdłużną jednostronnie, jak i dwustronnie (Karpiński, 1996). Ostrza krzywoliniowe wypukłe można kształtować przy użyciu narzędzi kształtowych najpierw z jednej a potem z drugiej strony oraz metodą obwodową z obu stron jednocześnie. Ostrza krzywoliniowe wklęsłe obrabia się ściernicami kształtowymi szlifując poszczególne krawędzie ostrza naprzemiennie (Karpiński, 1996).

Różne odmiany kinematyczne procesu szlifowania charakteryzują się zmiennością kształtu, przekroju poprzecznego i wymiarów strefy szlifowania a także kierunku śladów obróbki. Na rysunku 15 przedstawiono trzy odmiany kinematyczne procesu szlifowania ściernicami małogabarytowymi w zależności od pozycji osi ściernicy względem strefy obróbki (Plichta, 1996). Odmiana przedstawiona na rysunku 15b cechuje się najkrótszą strefą szlifowania natomiast ślady obróbki powstałe na obrabianym narzędziu są najkorzystniejsze. Najdłuższą strefę szlifowania uzyskano dla metody przedstawionej na rysunku 15c, co jest korzystne na usuwania dużych naddatków (największa liczba ziaren aktywnych biorących udział w usuwaniu naddatku obróbkowego). Kolejne modyfikacje opisywanych trzech przypadków można uzyskać poprzez dodatkowe odchylenie osi ściernicy do przodu lub tyłu

w stosunku do kierunku posuwu. W ten sposób można modyfikować wielkość i kształt strefy szlifowania (Plichta, 1996).



Rys. 15. Odmiiany kinematyczne procesu szlifowania ściernicami małowabarytowymi w zależności od pozycji osi ściernicy względem strefy obróbki: a) oś ściernicy usytuowana poniżej fazy ostrza; b) oś ściernicy usytuowana w obszarze fazy ostrza; c) oś ściernicy usytuowana powyżej fazy ostrza (Plichta, 1996)

Szlifowanie czołowe polega na tym, że główna część operacji wykonana jest przez czołową powierzchnię ściernicy usytuowaną prostopadle lub pod kątem względem jej osi obrotu (Oczos i Porzycki, 1986). Jest sposobem obróbki w procesie szlifowania materiałów stosowanych w branżach motoryzacyjnych, lotniczych czy energetycznych. Występuje jako typowy proces obróbki dla wałów przekładni, silników ze stali hartowanej z wykorzystaniem ściernic z cBN, diamentowych oraz konwencjonalnych (Urgoiti i inni, 2020). Tą metodą można kształtować średnice, promienie naroża oraz powierzchnie czołowe przedmiotu obrabianego (Walsh i inni, 2004). W ramach tej odmiany procesu szlifowania można dodatkowo wyszczególnić kolejne warianty różniące się kinematyką, podejściem technologicznym jak

również elastycznością. Z uwagi na kinetykę można wyszczególnić następujące przypadki (Urgoiti i inni, 2017):

- szlifowanie czołowe kątowe (szlifowanie z posuwem osiowym, szlifowanie wgłębne pod kątem, szlifowanie konturowe);
- szlifowanie czołowe proste (promieniowe szlifowanie wgłębne, szlifowanie wgłębne pod kątem, szlifowanie z posuwem osiowym, wielostopniowe szlifowanie z posuwem osiowym).

Kształt ściernicy (uwzględniając metodę obróbki) może być prosty lub kątowy. Wybór odpowiedniej metody procesu szlifowania czołowego przekłada się na jego wydajność, efektywność produkcyjną a także ograniczony jest możliwościami parku maszynowego. Zjawiska niekorzystne towarzyszące procesowi szlifowania w postaci generowania wysokiej temperatury w strefie obróbki, nadmiernemu zużyciu się ściernicy, zwiększaniu mocy szlifowania, determinują właściwy wybór jego odmiany kinematycznej. Poprzez indywidualną analizę i przyjętą strategię obróbki można wpływać na wielkość kontaktu ściernicy z obrabianym materiałem, a co za tym idzie, na szybkość usuwania materiału, jak i wielkość strumienia ciepła indukowanego w kierunku przedmiotu obrabianego (Urgoiti i inni, 2017).

Podjęto wiele prac badawczych polegających na optymalizacji procesu szlifowania, uwzględniając wydajność obróbki, ograniczenie zużycia ściernicy oraz zmniejszenie lub wyeliminowanie niekorzystnych zmian temperaturowych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrobionego. W pracy Oliveri i współautorów (2005) porównali oni proces obróbki jedno- oraz wieloetapowej realizowanej w odmianie czołowej i promieniowej. Wyniki badań wykazały, że wieloetapowość obróbki powoduje nadmierne zużycie ściernicy oraz zwiększa niekorzystny wpływ temperatury na obrabiany materiał.

W swojej pracy Dražumeric i współautorzy (2018) przedstawili nową metodę wyznaczania przyrostów posuwu w celu zwiększenia wydajności przy jednoczesnym uniknięciu uszkodzeń termicznych. Stwierdzili, że w strefie szlifowania występują dwa maksima temperatury przy posuwie zarówno osiowym, jak i promieniowym. W związku z tym opracowana metoda wyznacza takie wartości posuwów, aby w tych dwóch krytycznych punktach osiągnąć z góry określony próg przypaleń szlifierskich. W rezultacie określono, że możliwe jest osiągnięcie krótszych czasów cyklu przy mniejszym ryzyku uszkodzenia termicznego.

Analizę opartą na kinematyce procesu oraz geometrii kontaktu a tym samym uwzględniającą rozkład temperatury w strefie szlifowania oraz zużycie ściernicy przeprowadzili Urgoiti i współautorzy (2020). Uzyskane wyniki opublikowanych badań

wykazały, że zmiany grubości wióra wzdłuż powierzchni styku wpływają na lokalne defekty cieplne. Opracowano model wpływu parametrów kinematycznych szlifowania na defekty cieplne i uzyskano zadowalającą korelację jego wyników z rezultatami weryfikujących badań doświadczalnych.

Docieranie jest dynamicznie rozwijającą się metodą obróbki bardzo dokładnej. Obróbkę tę stosuje się dla szerokiej gruby materiałów metalowych jak i niemetalowych, zarówno w stanie tzw. miękkim, jak i utwardzonym. Docieranie stosuje się także do obróbki kryształów technicznych oraz ceramiki (Mackensen i Longerich, 1997). Obróbka docieraniem charakteryzuje się przede wszystkim wielością śladów kontaktu mikroziaren ściernych z powierzchnią obrabianego przedmiotu, towarzyszącą temu procesowi niską temperaturą oraz relatywnie małymi naciskami powierzchniowymi, przy zachowaniu wysokiej dokładności kształtowej obrabianych przedmiotów (Barylski, 2004).

Standardowy sposób docierania jest procesem obróbki realizowanym na odpowiednich urządzeniach z użyciem płynnych lub półpłynnych środków ściernych dozowanych na powierzchnię czynną docieraka (Karpiński i Kukiełka, 1993).

Dla prawidłowego przebiegu tego procesu wymagane jest równomierne rozmieszczenie pojedynczej warstwy mikroziaren ściernych w strefie obróbki. Zwykle podawanie ścierniwa jest nadmierne i część ziaren nie bierze udziału w obróbce (np. są usunięte przez układ separujący) (Brylski, 2013). Ponowne odzyskanie ziaren ściernych jest nieuzasadnione ekonomicznie, co generuje stosunkowo duże koszty związane z utylizacją odpadów poprocesowych (w Niemczech od 5 do 10 tyś. ton odpadu rocznie) (Egger i inni, 1999).

Ze względu na odmiany docieranie można podzielić na (Zalewski i inni, 2017):

- kształt powierzchni obrabianej (powierzchnie płaskie, powierzchnie płasko-równoległe; powierzchnie walcowe i inne);
- rodzaj docierania (wstępne, dokładne);
- metody docierania (mechaniczne, mechaniczno-chemiczne).

Gatunek oraz wielkość ziaren ściernych biorących udział w procesie docierania (zazwyczaj korund, elektrokorund, węgliki boru, diament syntetyczny) dobierany jest w zależności o charakteru obrabianego materiału (przede wszystkim jego twardości) i ma istotny wpływ na chropowatość powierzchni oraz wydajność prowadzonego procesu (Zalewski i inni, 2017). Wielkości ziaren można również sklasyfikować ze względu podział procesu docierania jako: obróbka zgrubna (wielkość ziarna 57,5-17,3 μm), średnio dokładna (wielkość ziarna 17,3-9,3 μm) oraz dokładna (wielkość ziarna 6,5- 3 μm) (Zalewski i inni, 2017).

Istotnym aspektem procesu docierania jest rodzaj docieraka, a w zasadzie użyty materiał, z którego został wykonany. Docieraki z uwagi na rodzaj materiału i twardość mogą być wykonane z: żeliwa, stali miedzi, mosiądzu drewna, szkła, fibry, skóry lub filcu (Zalewski i inni, 2017). *Docieraki miękkie* (np. miedziane) powodują głębsze osadzenie ziaren ściernych, a tym samym następuje proces bruzdowania i mikroskrawania (uzyskuje się mniejsze wysokości chropowatości a powierzchnia obrobiona jest bardziej błyszcząca). Docieraki miękkie cechują się mniejszą wydajnością usuwania materiału. *Docieraki twarde* (przeważnie z hartowanego żeliwa lub stali) stosuje się głównie w procesach docierania o dużej wydajności. *Docieraki średniej twardości* są najbardziej popularne i wykonuje się je z droбноziarnistego żeliwa lub stali niestopowej (Cichosz, 2002; Olszak, 2008).

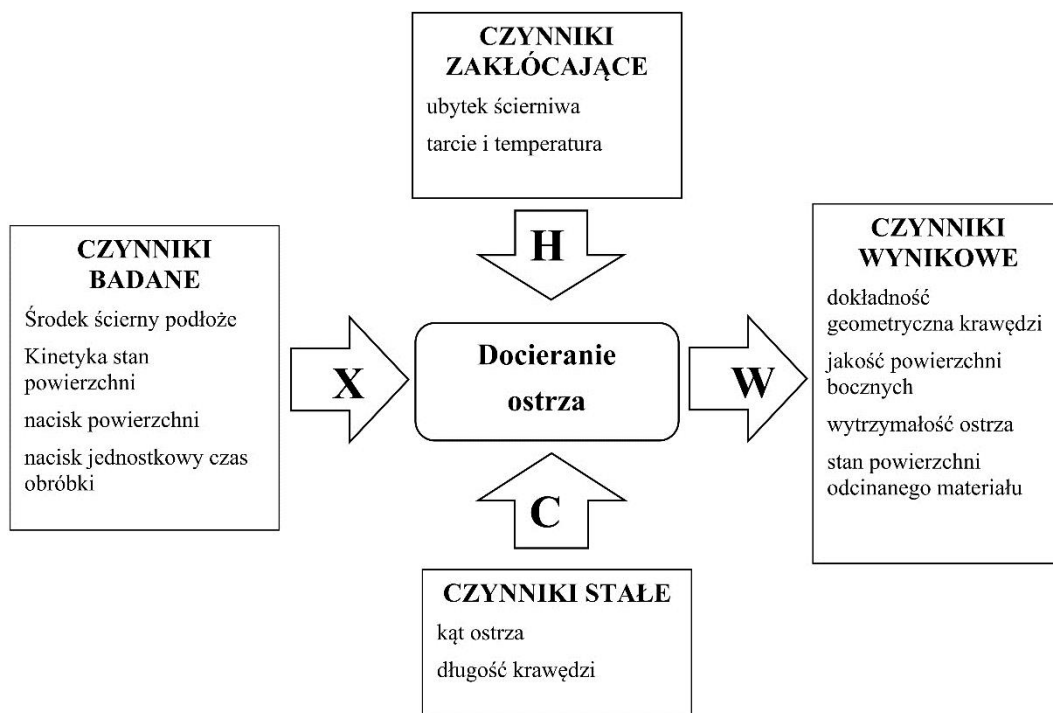
W metodzie docierania istotny jest nacisk, który ma wpływ na rodzaj obróbki zgrubnej lub dokładnej oraz na uzyskiwaną chropowatość. W początkowej fazie obróbki chropowatość powierzchni znacząco się zmniejsza, a następnie pozostaje niemal niezmienna wraz z wydłużaniem realizacji procesu docierania (Olszak, 2008).

Jedną z nowoczesnych odmian obróbki ścierniej jest mikroszlifowanie (Kacalak i inni, 2014), w tym również mikroszlifowanie z kinematyką docierania. Jest to rodzaj obróbki wykończeniowej (bardzo dokładnej) powierzchni płaskich ściernicami (Brylski, 2013). Wielu światowych producentów oferuje urządzenia do realizacji tego typu obróbki różniących się konstrukcją narzędzi ściernych (o budowie jednolitej bądź składanej). Podstawowe różnice pomiędzy tradycyjnym docieraniem a mikroszlifowaniem to przede wszystkim (Feld, 2001):

- w docieraniu klasycznym ziarna podawane w postaci płynnej lub półpłynnej zawiesiny wykonują pracę, gdy chwilowo utwierdzą się w docieraku;
- zastosowanie większych ziaren w klasycznym docieraniu przy stałym udziale objętościowym powoduje spadek koncentracji powierzchniowej a tym samym wzrost siły nacisku na pojedyncze ziarna ścierniwa, zwiększając ryzyko ich rozdrobnienia;
- powierzchnie uzyskane w odniesieniu do dwóch omawianych metod się różnią: powierzchnia po docieraniu jest kraterowa natomiast po mikroszlifowaniu widoczne są rysy wraz z wypływkami materiału. Widoczne są także kierunki pracy ziaren dla obu metod. Wygląd powierzchni po mikroszlifowaniu jest matowo-błyszczący zaś po docieraniu matowy o odpowiedniej chropowatości.

Docieranie klasyczne jest szeroko opisanym procesem w licznych publikacjach, określone są też w znacznej mierze jego cechy charakterystyczne jak i parametry użytkowe. Jednak z punktu widzenia ostrzy technicznych zagadnienie to jest pomijane. Złożoność procesu

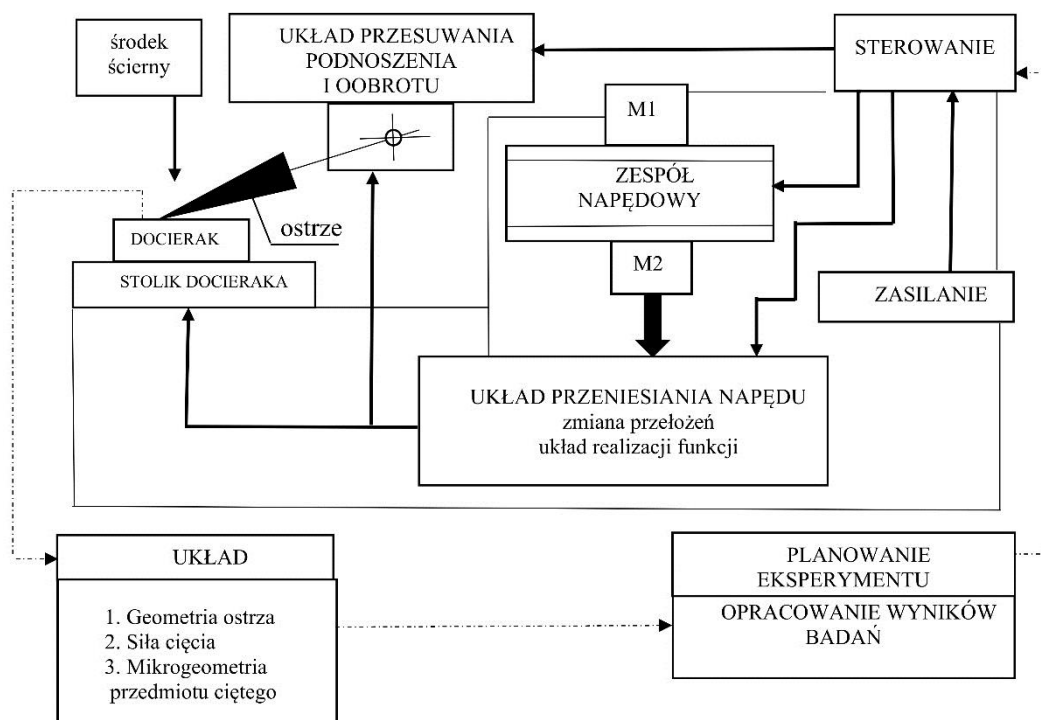
docierania ostrzy technicznych oraz wielość czynników mających wpływ na jego rezultaty przedstawiono na rysunku 16 (Karpiński i Kukielka, 1993).



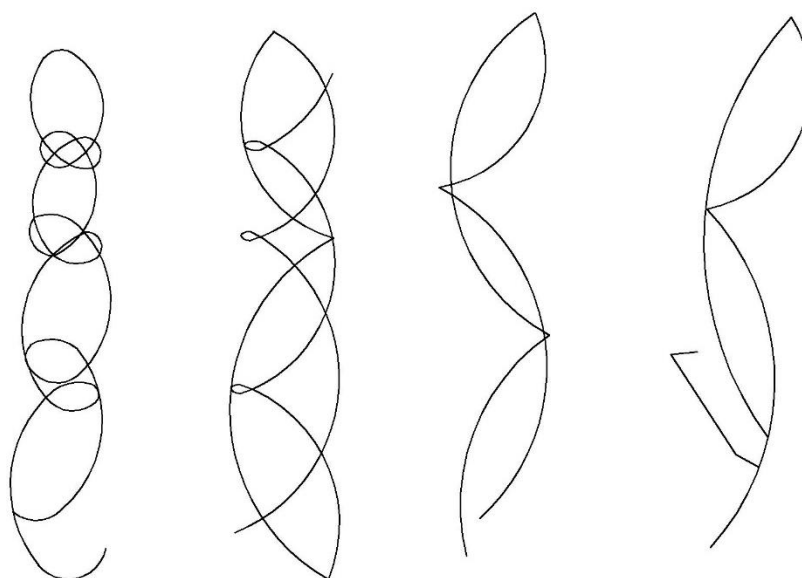
Rys. 16. Ogólny model procesu docierania (Karpiński i Kukielka, 1993)

Docieranie narzędzia w obszarze jego krawędzi jest szczególnie utrudnione w pierwszej fazie, ponieważ linia styku ostrza w stosunku do docieraka jest bardzo mała (liniowa), oraz pojawia się problem z utrzymaniem koncentracji ziaren w tym obszarze (ostrze zgarnia materiał ścierny). Ciekawy opis stanowiska badawczego oraz wyników związanych z docieraniem ostrzy technicznych przedstawiono w pracy Karpińskiego i Kukielki (1993). Analizowano w niej również zastosowanie past diamentowych o różnorodnej ziarnistości. Na rysunku 17 przedstawiono model stanowiska badawczego do realizacji procesu docierania ostrzy technicznych. Na stanowisku tym uzyskano w zoptymalizowanych warunkach jednakowe parametry obróbki wzdłuż całej krawędzi tnącej ostrza. Dzięki przyjętemu układowi kinematycznemu uzyskano tor ruchu krawędzi ostrza, którego krzywa jest linią niezamykającą się (tory w kolejnych ruchach nie pokrywają się). Korzyści płynące z tego sposobu pracy zapewniają równomierne rozprowadzanie ścierniwa oraz jednakowe (prawidłowe) zużycie docieraka. Na rysunku 18 pokazano charakterystyczne ruchy docieranego ostrza względem docieraka.

W przeprowadzonych badaniach procesu docierania zaobserwowano zjawisko przewijania krawędzi ostrza. Skutkowało to koniecznością unoszenia i obracania docieranego noża co kilka cykli roboczych.



Rys. 17. Model stanowiska badawczego do realizacji procesu docierania ostrzy technicznych (Karpiński i Kukielka, 1993)



Rys. 18. Tory ruchu punktu ostrza względem docieraka (Karpiński i Kukielka, 1993)

W czasie eksperymentu zauważono, że w pierwszej fazie docierania następuje głównie usuwanie nierówności geometrycznych wynikających z poprzedzającego procesu obróbki, przez co proces przebiega szybciej. Druga część obróbki przebiega wolniej, jest zależna od gradacji past polerskich i wpływa bezpośrednio na szczyrбаты krawędzi ostrza. Gradacja past polerskich w pierwszym etapie obróbki nie ma istotnego znaczenia, z kolei w drugiej części

proces uzależniony jest bezpośrednio od niej. Im mniejsza wielkość ziaren tym powierzchnia boczna charakteryzuje się mniejszą chropowatością a co za tym idzie także szczyrbałością ostrza (Karpiński i Kukielka, 1993).

2.3. Rodzaje substancji o działaniu chłodzącym, smarującym i antyadhezyjnym oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania

Procesy szlifowania charakteryzują się dużym udziałem tarcia wynikającym z niezdefiniowanej geometrii ziaren ściernych oraz ich losowej orientacji na powierzchni czynnej narzędzi ściernych, co skutkuje generowaniem dużej ilości ciepła i wymusza stosowanie czynników chłodząco-smarujących do skutecznej realizacji tego procesu (Klocke, 2009; Marinesu, 2004). Syntetycznie zadania czynników chłodząco-smarujących w procesie szlifowania można przedstawić następująco (Oczóś, 1986):

- tworzenie stabilnej warstewki smaru, która zmniejsza tarcie między ziarnem ściernym i przedmiotem obrabianym oraz między spoiwem i przedmiotem obrabianym,
- chłodzenie powierzchni przedmiotu obrabianego i czynnej powierzchni ściernicy poprzez przejmowanie i odprowadzanie ciepła,
- zwilżanie i czyszczenie ściernicy,
- wyplukiwanie wiórów ze strefy szlifowania,
- zabezpieczenie antykorozyjne obrabiarki i materiału obrabianego,
- przeciwdziałanie rozwojowi bakterii, spienianiu się itp.

Znanych jest bardzo dużo rodzajów substancji o działaniu chłodzącym, smarującym i antyadhezyjnym podawanych celowo w procesach szlifowania w celu korzystnego oddziaływania na warunki tribologiczne w strefie styku wierzchołków aktywnych ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą, które można podzielić ze względu na stan skupienia na ciecze chłodząco-smarujące, gazy chłodzące oraz ciała stałe (Nadolny, 2019). Stosowanie substancji chłodzących, smarnych i antyadhezyjnych w procesach szlifowania wiąże się z ponoszeniem znacznych kosztów, a ponadto wiele ze stosowanych powszechnie czynników chłodząco-smarujących negatywnie oddziałuje na środowisko oraz zdrowie człowieka. W związku z tym od wielu lat obserwowana jest intensyfikacja rozwoju metod minimalizacji ich wydatku lub poszukiwania możliwości całkowitej rezygnacji z ich stosowania i prowadzenia szlifowania „na sucho”. Alternatywą dla stosowania cieczy chłodząco-smarujących są metody doprowadzenia gazów z użyciem dysz CAG (ang. *Cold Air Gun*) lub metodą chłodzenia kriogenicznego (ciekły CO₂ lub N₂), które zapewniają w ograniczonym stopniu realizację

funkcji chłodzącej jednak niedostatecznie smarują strefę szlifowania (Ahmed i inni, 2016; Dhar i inni, 2002; Manimaran i inni, 2014; Marinescu i inni, 2007; Cordes i inni, 2014; Guitouni i inni, 2016; Jerold i Kumar, 2012; Patil i inni, 2016).

Na skuteczność oddziaływania czynnika chłodząco-smarującego w procesie szlifowania decydujący wpływ, poza rodzajem, ma jego wydatek oraz skuteczność docierania bezpośrednio do strefy kontaktu czynnej powierzchni ściernicy (CPS) powierzchnią obrabianą, przez co od wielu lat prowadzone są intensywne prace badawcze dotyczące rozwoju nowych metod doprowadzania mediów chłodząco-smarujących. W literaturze przedmiotu wiele uwagi poświęca się również rozwojowi metod hybrydowych chłodzenia i smarowania strefy szlifowania, w których precyzyjnie doprowadzane są ciecze, gazy i ciała stałe ze zminimalizowanym wydatkiem. W tym zakresie do najczęściej opisywanych należą metody znane pod anglojęzycznymi akronimami:

- smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego MQL (ang. *Minimum Quantity Lubrication*) (Heinzel, 1999; Silva i inni, 2005; Silva i inni, 2007; Tawakoli i inni, 2009),
- chłodzenie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego MQC (ang. *Minimum Quantity Cooling*) (Priarone i inni, 2015; Świerczyński, 2015; Weinert i inni, 2004),
- zminimalizowany wydatek płynu chłodząco-smarującego o obniżonej temperaturze MQCL (ang. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) (Ayoama, 2002; Chandrasekaran i Thuvander, 1998; Machado i Wallbank, 1997; Zhang i inni, 2012),
- smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego podawanego poprzez schłodzone sprężone powietrze CAMQL (ang. *Cooled Air Minimum Quantity Lubrication*) (Saber i inni, 2016; Tawakoli i inni, 2010),
- smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego wraz z jednoczesnym podawaniem schłodzonego sprężonego powietrza CAOM (ang. *Cold Air and Oil Mist*) (Choi i inni, 2002; Nguyen i Zhang, 2003; Stachurski i Nadolny, 2018; Stachurski i inni, 2018; Yui i Terashima, 1999).

Należy również zaznaczyć, że możliwe jest zastępowanie cieczy i gazów o działaniu chłodząco-smarującym substancjami w stanie stałym, dostarczonymi do strefy szlifowania np. w formie impregnatu wypełniającego wolne przestrzenie międzyziarnowe w ściernicach. Do najczęściej opisywanych substancji o działaniu smarnym i antyadhezyjnym w stanie stałym stosowanych w ściernicach impregnowanych można zaliczyć siarkę, grafit, woski, żywice,

hBN, MoS₂, silikon i inne substancje (Chattopadhyay i inni, 1985; Marinescu i inni, 2007; Saleem i inni, 2017; Woźniak, 1984).

W tabeli 2 przedstawiono syntetyczne zestawienie znanych czynników chłodząco-smarujących oraz metod ich doprowadzenia do strefy kontaktu CPS z powierzchnią przedmiotu obrabianego (Nadolny, 2019).

Tab. 2. Rodzaje czynników chłodząco-smarujących oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania (Nadolny, 2019)

	Czynnik chłodząco-smarujący	Metoda doprowadzenia do strefy szlifowania	Typ dyszy doprowadzającej cieczy chłodząco-smarującej	Wydatek czynnika Q	
CIECZE	Ciecze niemieszalne z wodą	Metoda zalewowa	Dysze niskociśnieniowe o przekroju kołowym (ang. <i>round pipe nozzle</i>)	$Q \uparrow \uparrow$	
			Dysze niskociśnieniowe o przekroju prostokątnym (ang. <i>rectangular nozzle</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe o przekroju owalnym (ang. <i>squeezed pipe</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe Webstera (ang. <i>Webster nozzle</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe schodkowe (ang. <i>step nozzle</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe stożkowe (ang. <i>taper nozzle</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe Lechlera (ang. <i>Lechler nozzle</i>)		
			Dysze niskociśnieniowe trzewikowe (ang. <i>shoe nozzle</i>)		$Q \uparrow$
	Ciecze mieszalne z wodą	Strumieniowo-ciśnieniowe doprowadzanie cieczy chłodząco-smarującej	Dysze strumieniowe o przekroju kołowym (ang. <i>round jet nozzle</i>)	$Q \uparrow$ lub $Q \downarrow$	
			Dysze strumieniowe punktowe (ang. <i>spot jet nozzle</i>)		
			Dysze strumieniowe rozpraszające (ang. <i>swell nozzle</i>)		
			Dysze strumieniowe igłowe (ang. <i>needle nozzle</i>)		
	Roztwory wodne	Odśrodkowe doprowadzenie cieczy chłodząco-smarującej przez ściernicę	Przez pory ściernicy	$Q \uparrow$ lub $Q \downarrow$	
			Przez kanały w ściernicy		
			Przez kanały w korpusie ściernicy		
Przez kanały w przekładce rozdzielającej ściernice elementarne w ściernicy składanej			$Q \downarrow$		
Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego odśrodkowo metodą MQL przez pory ściernicy			$Q \downarrow \downarrow$		
		$\uparrow \uparrow$ Bardzo duży	\uparrow Duży	\downarrow Mały	$\downarrow \downarrow$ Bardzo mały

Tab. 2. Rodzaje czynników chłodząco-smarujących oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania (Nadolny, 2019) – *ciąg dalszy*

	Czynnik chłodząco-smarujący	Metoda doprowadzenia gazu chłodzącego	Wydatek czynnika Q		
GAZY	Schłodzone sprężone powietrze	Stosowanie dysz CAG (ang. <i>Cold Air Guns</i>)	$Q \uparrow$ lub $Q \downarrow$		
	Ciekły azot LN ₂ Ciekły CO ₂	Chłodzenie kriogeniczne			
	Czynnik chłodząco--smarujący	Metoda doprowadzenia substancji smarującej lub antyadhezyjnej w stanie stałym	Wydatek czynnika Q		
CIAŁA STAŁE	Siarka, woski, żywice itp.	Impregnacja ściernic substancjami smarnymi lub antyadhezyjnymi	Znane z literatury i praktyki przemysłowej metody impregnacji ściernic siarką, woskami, żywicami	$Q \downarrow$	
	Siarka		Metoda impregnacji ściernic ceramicznych siarką z częściowym odwirowaniem impregnatu	$Q \downarrow$	
	Węgiel amorficzny		Metoda impregnacji ściernic ceramicznych węglem amorficznym na drodze termicznego rozkładu związków organicznych	$Q \downarrow$	
	Grafit, MoS ₂ , heksagonalny azotek boru hBN		Metoda impregnacji ściernic ceramicznych impregnatami w formie proszków przez zanurzenie w zawieszynie	$Q \downarrow$	
	Silikon		Metoda impregnacji ściernic ceramicznych koloidalnym silikonem	$Q \downarrow$	
	Impregnat silikonowo-grafitowy		Impregnacja ściernic impregnatem silikonowo-grafitowym w warunkach zmniejszonego ciśnienia	$Q \downarrow$	
	Grafit		Ściernice segmentowe z elementami (segmentami) wykonanymi ze smaru stałego	$Q \downarrow$	
	Grafit		Ciągłe dostarczanie w trakcie procesu szlifowania smaru stałego (np. grafitu) na czynną powierzchnię ściernicy	$Q \downarrow$	
		$\uparrow\uparrow$ Bardzo duży	\uparrow Duży	\downarrow Mały	$\downarrow\downarrow$ Bardzo mały

Tab. 2. Rodzaje czynników chłodząco-smarujących oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania (Nadolny, 2019) – *ciąg dalszy*

	Czynnik chłodząco-smarujący	Metoda hybrydowa	Wydatek czynnika Q
HYBRYDOWE – KILKA RODZAJÓW SUBSTANCJI JEDNOCZEŚNIE	Olej transportowany przez strumień sprężonego powietrza	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (ang. <i>Minimum Quantity Lubrication – MQL</i>)	$Q \downarrow\downarrow$
	Woda lub wodna emulsja olejowa transportowane przez strumień sprężonego pow.	Chłodzenie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego (ang. <i>Minimum Quantity Cooling – MQC</i>)	$Q \downarrow\downarrow$
	Olej lub wodna emulsja olejowa podawane do strefy szlifowania w środowisku niskiej temperatury	Metoda zminimalizowanego wydatku płynu chłodząco-smarującego o obniżonej temperaturze (ang. <i>Minimum Quantity Cooling Lubrication – MQCL</i>)	$Q \downarrow\downarrow$
	Olej transportowany przez strumień schłodzonego sprężonego powietrza	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego podawanego poprzez schłodzone sprężone powietrze (ang. <i>Cooled Air Minimum Quantity Lubrication – CAMQL</i>)	$Q \downarrow\downarrow$
	Olej transportowany przez strumień sprężonego powietrza metodą MQL oraz dodatkowy strumień schłodzonego sprężonego powietrza podawany równocześnie dyszą CAG	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego wraz z jednoczesnym podawaniem schłodzonego sprężonego powietrza (ang. <i>Cold Air and Oil Mist – CAOM</i>)	$Q \downarrow\downarrow$
	Sproszkowany stały smar dodawany do płynu chłodząco-smarującego – zarówno cieczy, jak i aerozoli – wodnych lub olejowych	Doprowadzenie sproszkowanych substancji smarujących i antyadhezyjnych w stanie stałym do strefy szlifowania	$Q \downarrow$ lub $Q \downarrow\downarrow$ lub $Q = 0$
	Woda lub wodna emulsja olejowa domieszkowana MoS ₂ lub grafitem, transportowana przez strumień sprężonego powietrza	Chłodzenie ze zminimalizowanym wydatkiem metodą MQC cieczami domieszkowanymi sproszkowanymi substancjami smarnymi i antyadhezyjnymi	$Q \downarrow\downarrow$
	Olej transportowany przez strumień sprężonego powietrza odśrodkową metodą MQL oraz dodatkowy strumień SSP podawany równocześnie dyszą CAG	Hybrydowa metoda chłodzenia i smarowania strefy szlifowania integrująca odśrodkowe smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem metodą MQL oraz chłodzenie strumieniem schłodzonego sprężonego powietrza	$Q \downarrow\downarrow$
	Siarka, węgiel amorficzny, grafit, silikon, impregnat silikowno-grafitowy, MoS ₂ , hBN, Teflon® itp. w formie impregnatu ściernicy oraz dodatkowy strumień schłodzonego sprężonego powietrza podawany równocześnie dyszą CAG	Hybrydowa metoda chłodzenia i smarowania strefy szlifowania integrująca impregnację ściernicy i chłodzenie strumieniem schłodzonego sprężonego powietrza	$Q = 0$
	$\uparrow\uparrow$ Bardzo duży \uparrow Duży \downarrow Mały $\downarrow\downarrow$ Bardzo mały		

2.4. Zjawiska zużycia ostrzy technicznych

Zużyciem ostrza nazywa się głównie odkształcenie plastyczne materiału w obszarze krawędzi tnącej. Duży wpływ na jego zakres ma materiał, z którego jest wykonane ostrze oraz kąt wierzchołkowy. Nie bez znaczenia pozostaje także środowisko fizyczno-chemiczne, w jakim dane ostrze pracuje. W szczególności jest to istotne w przypadku rozdzielania materiałów biologicznych (Socha, 1989).

W odniesieniu do narzędzi tnących w procesie obróbki skrawaniem zjawiska zużycia mogą występować na skutek działania (Cichosz, 2013):

- ścierania mechanicznego,
- zużycia zmęczeniowego,
- zużycia zmęczeniowo-cieplnego,
- zużycia adhezyjnego,
- zużycia cieplnego,
- zużycia dyfuzyjnego,
- zużycia chemiczno-utleniającego,
- a także deformacji plastycznej narzędzia.

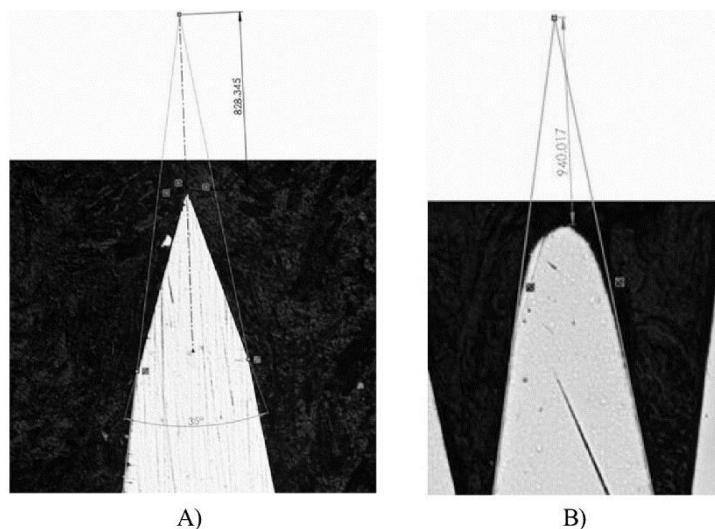
W literaturze trudno jest znaleźć materiały, które odnoszą się bezpośrednio do definicji ostrza zużytego. Trudno jest jednoznacznie określić próg, od którego pracujące narzędzie jest zużyte i powinno podlegać wymianie lub regeneracji. Dostępne są publikacje, które odnoszą się do form zużycia narzędzi tnących stosowanych np. w obróbce drewna (Ghosh i inni, 2015). W przypadku przemysłu spożywczego publikacje odnoszą się głównie do porównania zwiększenia siły cięcia ostrza zużytego w stosunku do wartości wyznaczonej dla ostrza nowego.

Odnosząc się do narzędzi dla przemysłu drzewnego można wyszczególnić charakterystyczne objawy zużycia krawędzi ostrzy, jak i powierzchni tworzących ostrze. Wpływają one bezpośrednio na zwiększenie zużycia energii (Ratnasingam i Perkins, 1998), hałas, wibracje a także ostatecznie, na jakość krawędzi przecinanego materiału (Ghosh i inni, 2015). Nie bez znaczenia pozostają parametry procesu tj. prędkość cięcia, czas pracy oraz rodzaj ciętego materiału.

Zużycie narzędzi można monitorować bezpośrednio poprzez analizę zmian geometrycznych ostrza (Sheikh-Ahmed i inni, 2003), oraz pośrednio obserwując zachodzące zmiany na podstawie rejestracji siły cięcia lub poboru mocy niezbędnej do realizacji procesu (Cuppini i inni, 1990).

Według danych opublikowanych przez Aknouche'a i innych (2009) zjawiska zużycia krawędzi ostrzy technicznych stosowanych w przemyśle drzewnym można podzielić na: nagłe zużycie (biegowe), liniowe (posiadające okres stabilności) i katastroficzne (awaria narzędzia). W pracy (Ghosh i inni, 2015) wskazano charakterystyczne zjawiska zużycia noży w rębaku drewna. Narzędzia posiadały ślady ścierania powierzchni noża, odpryskiwania, pęknięcia krawędzi oraz deformacji. Stwierdzono, że na zużycie narzędzia największy wpływ miał czas pracy, zanieczyszczenia ciętego materiału i jego zmienność strukturalna a także wszelkie oddziaływania uderowe skierowane na krawędź tnącą.

W pracy Adamovsky'ego (2015) porównano wpływ zużycia ostrza na siłę cięcia w procesie przecinania włókien węglowych (rys. 19). Wykazano, że zużycie ostrza wpływa na proces cięcia na dwa sposoby. Pierwszy z nich związany jest z tym, że efektywna głębokość zagłębiania się ostrza w podłoże może znacznie się zmniejszać w miarę postępującego zużycia, ponieważ całkowita wysokość ostrza ulega zmniejszeniu. Ten efekt zużycia jest istotny tylko wtedy, gdy ostrza noży wystają na określoną odległość z uchwytu mocującego noże. Wielkość zmiany głębokości może być łatwo kontrolowana poprzez pomiar wysokości wysunięcia krawędzi noży od powierzchni referencyjnej. Drugim efektem postępującego zużycia noża są zmiany geometrii ostrza powodujące konieczność zwiększenia siły nacisku w procesie cięcia.



Rys. 19. Pomiar wielkości zużycia w przekroju poprzecznym ostrza: a) ostrze nowe; b) ostrze zużyte (Adamovsky, 2015)

Z kolei w pracy Díaz-Caballero i współautorów (2018) ocenie poddano ostrza skalpeli. Jako cięty materiał zastosowano tkankę dziąsłową zwierzęcą. Zgromadzone dane i ich analiza pozwoliły wnioskować, że wartość siły cięcia zwiększa się wraz z liczbą wykonanych cięć. Wraz z postępującym zużyciem odnotowano liczne zniekształcenia plastyczne na krawędzi ostrza.

2.5. Problemy w procesie cięcia tkanek miękkich

Tematykę związaną z cięciem tkanek miękkich podzielić można na kilka obszarów związanych z: przetwórstwem mięsa, ryb, medycyną zabiegową, medycyną plastyczną oraz sądową. Główne aspekty związane z energochłonnością procesu, jakością przecinanego materiału, trwałością oraz zdrowiem są obszarem wielu publikacji.

Jak piszą w swojej pracy Kawka i Dutkiewicz (1986) mechanikę krojenia materiałów organicznych przy pomocy narzędzia o klinowym ostrzu można wytłumaczyć następująco: na krawędzi tnącej ostrza przy obciążeniach większych niż zakres sprężystości materiału następuje zagęszczenie struktury tkanek i wydzielenie płynów komórkowych, a przy dalszym zwiększaniu obciążenia – całkowite zniszczenie struktury. Po wtargnięciu krawędzi tnącej w materiał przystępują do akcji również obie powierzchnie klinowe, przy czym mogą one, zależnie od własności materiału, proces krojenia przyśpieszać lub hamować.

Jak twierdzi Lachowicz i Kołakowski (2001) istotny jest aspekt tzw. *tekstury materiału organicznego*. W przypadku obróbki ryb cechy takie jak: twardość, spoistość, sprężystość elastyczność, gumiałość zależą od obszaru i sezonu połowu, temperatury w czasie obróbki oraz innych towarzyszących zjawisk. W wyniku działania niesprzyjających warunków obróbki lub źle dobranych parametrów mogą one wpłynąć na ograniczenie wydajności prowadzonych procesów a także prowadzić do uszkodzenia obrabianego surowca. Dlatego znajomość cech reologicznych oraz towarzyszących ich zmian jest konieczna do określenia właściwego procesu produkcyjnego. Pozwala również na właściwe projektowanie elementów podających, ustalających czy transportujących (Majewski, 2005).

Ocenę tekstury produktów żywnościowych należy rozpatrywać w kategorii sensorycznej. Na rynku dostępnych jest wiele aparatów służących do pomiaru ciał stałych. W przypadku tuszy zwierzęcych (mięsa wołowego) czynniki wpływające na proces krojenia sprowadza się do gatunku, rasy, płci, cech osobistych, wieku, systemu utrzymani zwierząt (Niedźwiedź i inni, 2011). Autorzy stwierdzili, że proces uboju, dojrzewania i przechowywania istotnie wpływa na jego właściwości mechaniczne. Rozkład mięśni a także zawartość w nich kolagenu decyduje o zmienności energii potrzebnej do rozdzielania mięsa. W przeprowadzonym teście porównano siły cięcia mięsa wołowego w zależności od sposobu i długości jego dojrzewania, a także pokazano zmienność warunków obróbki w stosunku do obszaru z jakiej części ciała pochodziło mięso.

W przypadku medycyny proces cięcia wpływa bezpośrednio na zdrowie ludzkie. Charakter przecinania, a tym samym struktura przeciętych tkanek istotnie wpływa na okres gojenia. Najbardziej powszechne są skalpele medyczne które również poddawane są wielu

badaniom (Giovannini i Ehmann, 2016). W tym przypadku bardzo ważne jest by proces cięcia przebiegał z relatywnie małą siłą cięcia tak by ograniczyć inwazyjność.

Częścią obszaru medycy jest niewątpliwie medycyna sądowa. Prowadzone są w jej zakresie badania w celu określenia niezbędnych paramentów związanych z charakterystyką narzędzia, sposobu przebicia narzędzia, sprężystości materiału, wygenerowanej siły, stanu naprężenia mechanicznego skóry w funkcji prędkości i kąta noża – rysunek 20 (Gilchrist i inni, 2007; Gilchrist i inni, 2008). Wyjaśnienie tych aspektów przybliży wyjaśnienie często trudnych kryminalnych dochodzeń.



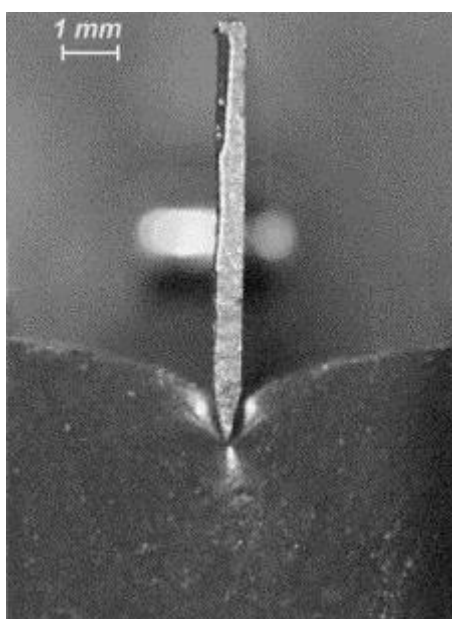
Rys. 20. Stanowisko do pomiaru stosunku naprężenia rzeczywistego do rozciągania w kierunku wzdłużnym i poprzecznym na próbce modelowej imitującej skórę – poliuretanie o twardości 40A wg Shore'a (Gilchrist i inni, 2007; Gilchrist i inni, 2008)

2.6. Ocena ostrości ostrzy technicznych

Laboratoryjna ocena ostrości ostrza technicznego przeznaczonego do zastosowania w przemyśle spożywczym nie jest zadaniem łatwym i najczęściej prowadzona jest przy zastosowaniu specjalistycznych stanowisk do pomiaru siły cięcia. Problem stanowi nie tylko precyzyjny pomiar siły cięcia, który można traktować jako wskaźnik oceny zdolności ostrza do dekohezji ciętego materiału – a w efekcie z oceny jego ostrości. Dodatkową trudność stanowi właściwy dobór materiału ciętego, który powinien w jak najbardziej wierny sposób odpowiadać cechom tkanek biologicznych ciętych w procesach przetwórstwa spożywczego. Tkanki takie są bardzo różnorodne oraz cechują się niejednorodną budową wewnętrzną. Dodatkowo należy również uwzględnić zmienność czynników związanych z ukształtowaniem i stanem (zużyciem) ostrza a także warunkami jego ruchu (kinematyka i dynamika). Wszystko to sprawia, że

problem określenia ostrości ostrzy technicznych nadal stanowi jedno z ważnych wyzwań w badaniach nad rozwojem procesów przetwórstwa spożywczego.

W literaturze tematu można znaleźć informacje prezentujące zarówno wyniki badań analitycznych i obliczeniowych, m.in. w pracy Kakimova i współautorów (2018) oraz McCarthy'ego i współautorów (2010), jak również badań doświadczalnych w tym zakresie (McCarthy i inni, 2007; McGorry i inni, 2005; Hajad i Sirindhorn, 2016; McGorry, 2005a; Diéguez i inni, 2009; Brown i inni, 2005; Gilchrist i inni, 2008). Wydaje się jednak, że znacznie większą dokładność na obecnym etapie rozwoju metod obliczeniowych mają eksperymenty doświadczalne realizowane z użyciem specjalnych stanowisk badawczych (rys. 21).



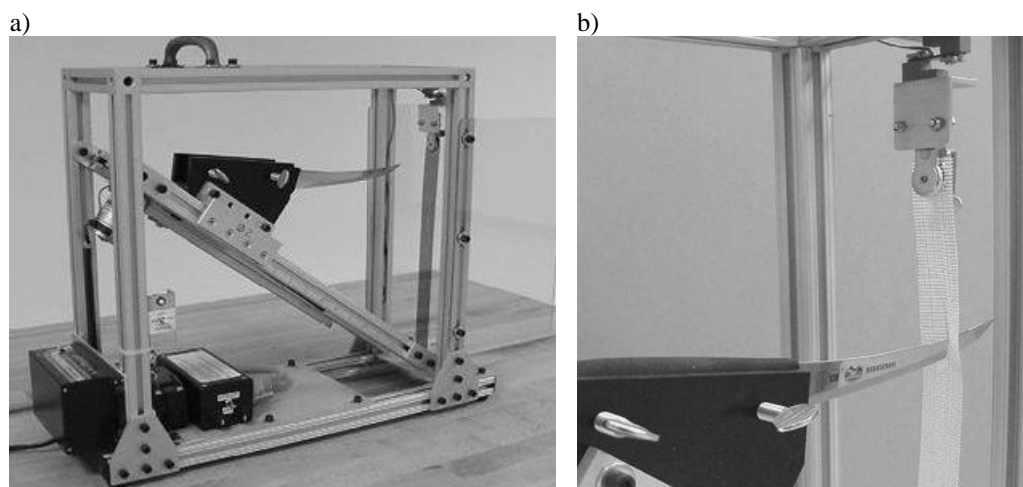
Rys. 21. Poziom wgłębienia ostrza i punkt powstania nacięcia w podłożu (McCarthy i inni, 2007)

Źródła literaturowe dostarczają zbioru przykładów układów pomiarowych zbudowanych specjalnie z myślą o ocenie ostrości ostrzy technicznych w procesie cięcia miękkich ciał stałych. McCarthy i inni (2007 i 2010) w swoich pracach zaproponowali wykorzystanie stanowiska zbudowanego na bazie uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Tinius Olson 50 kN. W dolnej części stanowiska eksperymentalnego materiał podłoża (ciętego materiału) zamocowano w zaciskach przeciwokształceniowych. W górnej części stanowiska zamocowano ostrze za pomocą uchwytu, a cały układ zamocowano do ruchomej trawersy maszyny wytrzymałościowej. Podłoże zamocowano prostopadle do ostrza. Jako podłoże zastosowano płytę poliuretanową o grubości 2,25 mm i twardości 40 A wg Shore'a. Materiał ten wybrano ze względu na to, że charakteryzuje się podobną twardością oraz ma zbliżoną postać strukturalną jak większość tkanek biologicznych (tj. krzywą naprężenie-odkształcenie w kształcie litery J) (McCarthy i inni, 2007; McCarthy i inni, 2010).

McGorry i inni (2005 i 2005a) zaproponowali odmienne podejście do problemu testowania ostrości ostrza. Określili oni, że stanowisko badawcze musi spełniać następujące kryteria:

- powinno być przenośne i możliwe do wykorzystania w zakładzie pakowania mięsa,
- powinno być proste i nie wymagać specjalnych umiejętności do jego obsługi, a także umożliwiać ocenę całej powierzchni tnącej ostrza,
- ruch testowy powinien być reprezentatywny dla ruchów stosowanych przy krojeniu mięsa.

W rezultacie powstało stanowisko spełniające powyższe kryteria, w którym badany nóż umieszczono w uchwycie mocującym, który porusza się na parze szyn nachylonych pod kątem 45° . Badany nóż umieszczono w uchwycie tak, aby oś długa ostrza noża była w przybliżeniu pozioma w stosunku do podłoża. Siłownik liniowy przesuwa ostrze noża w dół szyny z prędkością około 40 mm/s (rys. 22). W tym przypadku materiałem do cięcia było pokryte polipropylenem sito fibreglassowe o prostokątnych oczkach ($1,0 \text{ mm} \times 1,7 \text{ mm}$) i grubości splotu 0,8 mm w celu uzyskania warunków zbliżonych do procesu cięcia mięsa.



Rys. 22. Widok ogólny (a) oraz strefa cięcia (b) specjalnego stanowiska badawczego do pomiaru siły cięcia (McGorry i inni, 2005)

Diéguez i inni (2009) w swojej pracy opisali natomiast stanowisko zbudowane w układzie horyzontalnym. Uchwyt ostrza zamocowano w płaszczyźnie XY , umożliwiając pewną regulację w osi Z w celu dostosowania do różnych geometrii ostrzy testowych. Próbkę przesuwała się w kierunku ostrza ze stałą i znaną prędkością. Ten ruch do przodu był realizowany przez siłownik liniowy (śruba kulowa napędzana serwomotorem). W uchwycie ostrza umieszczono dwa czujniki obciążenia do pomiaru siły cięcia na ostrzu, zarówno w kierunku cięcia, jak i w kierunku pionowym. Podobny układ zastosowali Brown i inni (2005) w swoich badaniach

dotyczących sił w procesach cięcia żywności a także Marsot i inni (2007) w badaniach ostrości ostrzy do cięcia mięsa.

Innym przykładem specjalnie zbudowanego stanowiska badawczego jest system opisany w pracy Gilchrist i współautorów (2007, 2008) – rysunek 20. Autorzy zastosowali próbki w kształcie krzyża, które uzyskano przy użyciu matrycy do cięcia w kształcie krzyża o szerokości ramion 10 mm i długości ramion 120 mm. Próbki przytrzymywano dwoma parami zacisków w sposób kontrolowany, aby odtworzyć zakres nierównomiernych naprężeń dwuosiowych występujących *in-vivo* w skórze. Ostrze noża zamocowano w osobnym zacisku, który z kolei zamocowano do głowicy pomiarowej maszyny wytrzymałościowej jednoosiowej (Tinius Olson). Głowicę pomiarową oraz ostrze noża ustawiono prostopadle do płaszczyzny zaciśniętych próbek skóry, a maszyna wytrzymałościowa pracowała w trybie sterowania przemieszczeniem. Oznacza to, że podczas gdy siłownik maszyny wymuszał zagłębianie się ostrza noża w próbkę symulującą skórę, a następnie jej penetrację, prędkość siłownika odpowiadała bezpośrednio przemieszczeniu próbki poza płaszczyznę (tj. w dół). Również w tych badaniach jako materiał do wykonania próbek zastosowano poliuretan o twardości 40 A w skali Shore'a. Posiada on krzywą naprężenia-odkształcenia w kształcie litery J o wytrzymałości około 17 MPa i sztywności końcowej 22 MPa. Jest to materiał jakościowo podobny do skóry biologicznej. Ponadto jest izotropowy, o czym świadczy superpozycja krzywych testu wzdłużnego i poprzecznego (Gilchrist i inni, 2008).

2.7. Wnioski z analizy literatury

Na podstawie analizy materiałów źródłowych w zakresie wyznaczonym tematem pracy sformułowano poniższe wnioski, stanowiące podstawę do sprecyzowania celów, hipotezy, problemów badawczych i zakresu niniejszej rozprawy doktorskiej.

1. Ostrzem technicznym nazywa się narzędzie służące do rozdzielania w procesie cięcia, odcinania lub nacinania materiałów niemetalowych.
2. Ostrza techniczne mają szerokie zastosowanie w cięciu oraz rozdrabnianiu tkanek organicznych a także wszelkich warzyw i owoców. Odrywają dużą rolę między innymi w takich dziedzinach jak: chirurgia ogólna, przetwórstwo mięsne, przetwórstwo rybne, przetwórstwo warzyw i owoców, zoologia, medycyna sądowa i innych.
3. Podstawową cechą określającą ostrza jest ich zdolność tnąca, pod którą rozumie się siłę, jaką należy przyłożyć by zainicjować cięcie (rozdzielanie) materiału ciętego i która zależy od wielu czynników, między innymi rodzaju materiału i jego

właściwości fizycznych, warunków procesu cięcia, cech geometrycznych krawędzi ostrza oraz powierzchni przylegających, a także wielkość kąta klina.

4. Trwałość ostrza oraz wartość siły cięcia zależą bezpośrednio od wartości kąta wierzchołkowego ostrza α .
5. Ostrza techniczne wykonane ze stali nierdzewnej kształtuje się głównie w procesie szlifowania, a w zależności od przeznaczenia mogą być poddane obróbce wykańczającej w postaci m.in. docierania, polerowania czy też polerownia elektrochemicznego.
6. Różne odmiany kinematyczne procesu szlifowania charakteryzują się zmiennością kształtu, przekroju poprzecznego i wymiarów strefy szlifowania a także kierunku śladów obróbki, co wpływa znacząco na ich jakość technologiczną oraz w efekcie na trwałość w procesie cięcia.
7. Na skuteczność oddziaływania czynnika chłodząco-smarującego w procesie szlifowania decydujący wpływ, poza rodzajem, ma jego wydatek oraz skuteczność docierania bezpośrednio do strefy kontaktu czynnej powierzchni ściernicy powierzchnią obrabianą.
8. Metody hybrydowe chłodzenia i smarowania strefy szlifowania (MQL, MQC, MQCL, CAMQL, CAOM) pozwalają na precyzyjnie doprowadzanie cieczy, gazów i ciała stałe do strefy szlifowania ze zminimalizowanym wydatkiem.
9. W odniesieniu do narzędzi tnących w procesie obróbki skrawaniem zjawiska zużycia mogą występować na skutek działania ścierania mechanicznego, zużycia zmęczeniowego, zużycia zmęczeniowo-cieplnego, zużycia adhezyjnego, zużycia cieplnego, zużycia dyfuzyjnego, zużycia chemiczno-utleniającego a także deformacji plastycznej narzędzia.
10. Zużycie narzędzi można monitorować bezpośrednio poprzez analizę zmian geometrycznych ostrza oraz pośrednio obserwując zachodzące zmiany na podstawie rejestracji siły cięcia lub poboru mocy niezbędnej do realizacji procesu.
11. Mechanikę krojenia materiałów organicznych przy pomocy narzędzia o klinowym ostrzu można wytłumaczyć następująco: na krawędzi tnącej ostrza przy obciążeniach większych niż zakres sprężystości materiału następuje zagęszczenie struktury tkanek i wydzielenie płynów komórkowych, a przy dalszym zwiększaniu obciążenia – całkowite zniszczenie struktury.

12. Laboratoryjna ocena ostrości ostrza technicznego przeznaczonego do zastosowania w przemyśle spożywczym nie jest zadaniem łatwym i najczęściej prowadzona jest przy zastosowaniu w specjalistycznych stanowisk do pomiaru siły cięcia.
13. Opisane w literaturze układy pomiaru siły cięcia (która pozwala wnioskować o ostrości ostrza) charakteryzują się możliwością realizacji prób cięcia w ograniczonym zakresie prędkości.
14. Autorzy prac badawczych zazwyczaj stosowali relatywnie niewielkie wartości prędkości cięcia w celu uzyskania warunków quasi-stacjonarnych.

3. CELE, HIPOTEZA, PROBLEMY BADAWCZE I ZAKRES ROZPRAWY

3.1. Cele pracy

3.1.1. Cel poznawczy

Analiza zjawisk podstawowych w strefie szlifowania ostrzy noży planarnych ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru (cBN) w trzech odmianach kinematycznych (szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie stożkową powierzchnią czołową ściernicy) oraz w warunkach stosowania wybranych metod chłodzenia i smarowania strefy szlifowania (konwencjonalną metodą zalewową, zminimalizowanego smarowania metodą MQL, doprowadzania schłodzonego sprężonego powietrza z użyciem dyszy CAG).

3.1.2. Cel użytkowy

Uzyskanie wytycznych do praktycznego zastosowania metody kształtowania noży planarnych oraz ich regeneracji w procesie szlifowania z zastosowaniem ściernic z cBN w trzech odmianach kinematycznych (szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie stożkową powierzchnią czołową ściernicy) oraz w warunkach stosowania wybranych metod zminimalizowanego chłodzenia i smarowania strefy szlifowania.

3.1.3. Cel metodyczny

Opracowanie metody kształtowania ostrzy noży planarnych z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego stanowiska badawczego wyposażonego w pięcioosiową szlifierkę sterowaną numerycznie, przy użyciu ściernic z ziarnami cBN i wybranych metod zminimalizowanego chłodzenia i smarowania strefy szlifowania, zapewniających uzyskanie oczekiwanej jakości powierzchni noża, przy jednoczesnym wydłużeniu jego okresu trwałości eksploatacyjnej.

3.2. Hipoteza pracy

Należy przypuszczać, że istnieją wartości parametrów oraz warunki regeneracji geometrii ostrzy noży planarnych w procesie szlifowania, które umożliwią poprawę ich właściwości tnących (ocenianej na podstawie siły cięcia, struktury geometrycznej powierzchni ostrzy oraz ich morfologii), przy jednoczesnym wydłużeniu trwałości eksploatacyjnej, w odniesieniu do noży kształtowanych przez producentów narzędzi na potrzeby przetwórstwa rybnego.

3.3. Problemy badawcze

3.3.1. Główny problem badawczy

W jakim stopniu modyfikacja kinematyki procesu szlifowania oraz warunków chłodzenia i smarowania w strefie szlifowania ściernicami z ziarnami regularnego azotku boru wpływa na jakość kształtowanego ostrza oraz okres trwałości noży planarnych wykorzystywanych w przemyśle spożywczym, w odniesieniu do ostrzy referencyjnych?

3.3.2. Problemy szczegółowe

1. Jaki wpływ na jakość kształtowanego ostrza, siłę cięcia prowadzonego z jego zastosowaniem oraz okres trwałości eksploatacyjnej ma modyfikacja kinematyki procesu szlifowania?
2. Jaki wpływ na uzyskiwane wyniki szlifowania mają parametry tego procesu takie jak naddatek obróbkowy oraz prędkość posuwu?
3. Jaki wpływ na jakość kształtowanego ostrza oraz okres jego trwałości ma kierunek śladów szlifowania?
4. Jaki wpływ na trwałość eksploatacyjną ostrza ma chropowatość jego powierzchni?
5. Jaki wpływ na jakość kształtowanego ostrza, siłę cięcia prowadzonego z jego zastosowaniem oraz okres trwałości eksploatacyjnej mają warunki chłodzenia i smarowania w strefie szlifowania w procesie szlifowania?

3.4. Zakres pracy

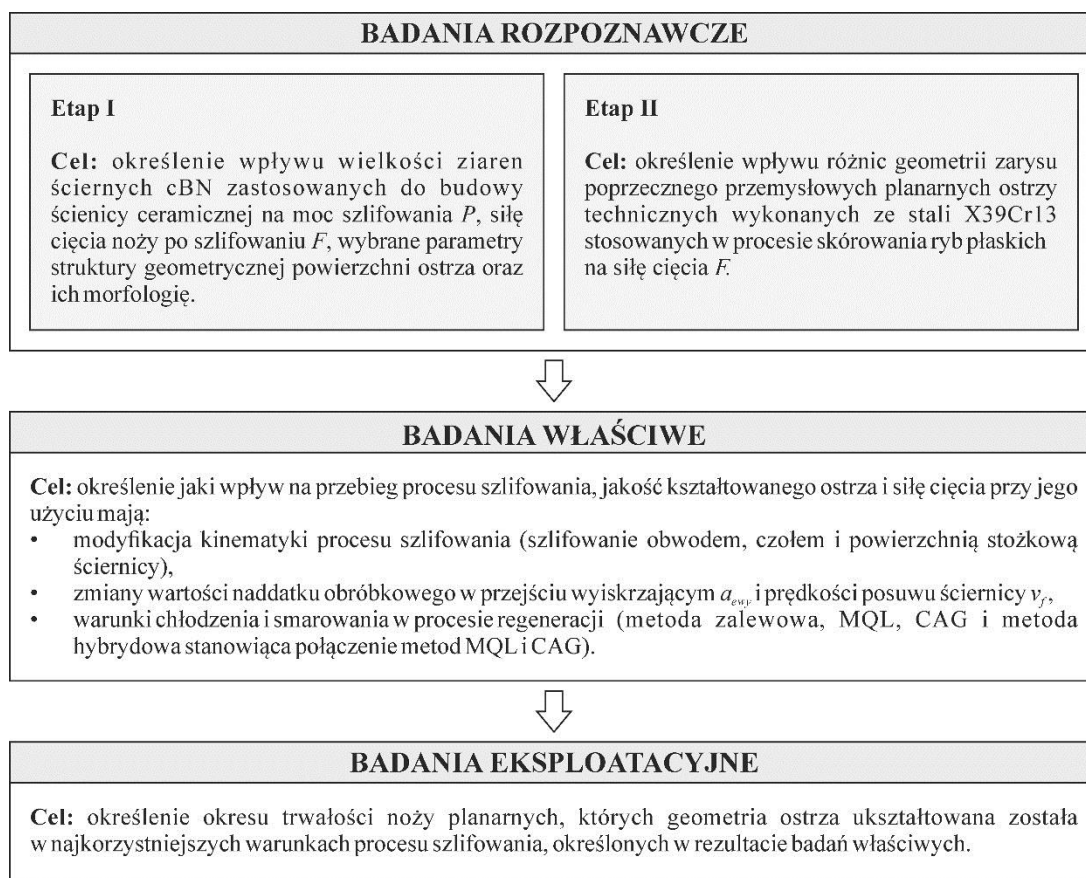
Poniżej przedstawiono najważniejsze elementy stanowiące zakres niniejszej pracy doktorskiej:

- analiza stanu wiedzy i techniki z zakresu będącego tematem pracy,
- zaprojektowanie i wykonanie pięcioosiowej szlifierki sterowanej numerycznie stanowiącej stanowisko badawcze procesu szlifowania planarnych ostrzy technicznych,
- zaprojektowanie i wykonanie sterowanego numerycznie stanowiska do pomiaru siły cięcia planarnych ostrzy technicznych,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych w warunkach laboratoryjnych, mających na celu określenie wpływu kinematyki oraz parametrów technologicznych procesu szlifowania (w tym warunków chłodzenia i smarowania w strefie szlifowania) na jakość kształtowanego ostrza,

- przeprowadzenie badań doświadczalnych w warunkach przemysłowych, mających na celu określenie wpływu geometrii ostrza na jego trwałość eksploatacyjną,
- analiza uzyskanych wyników badań i sformułowanie wniosków poznawczych, użytecznych i metodycznych oraz kierunków dalszych prac.

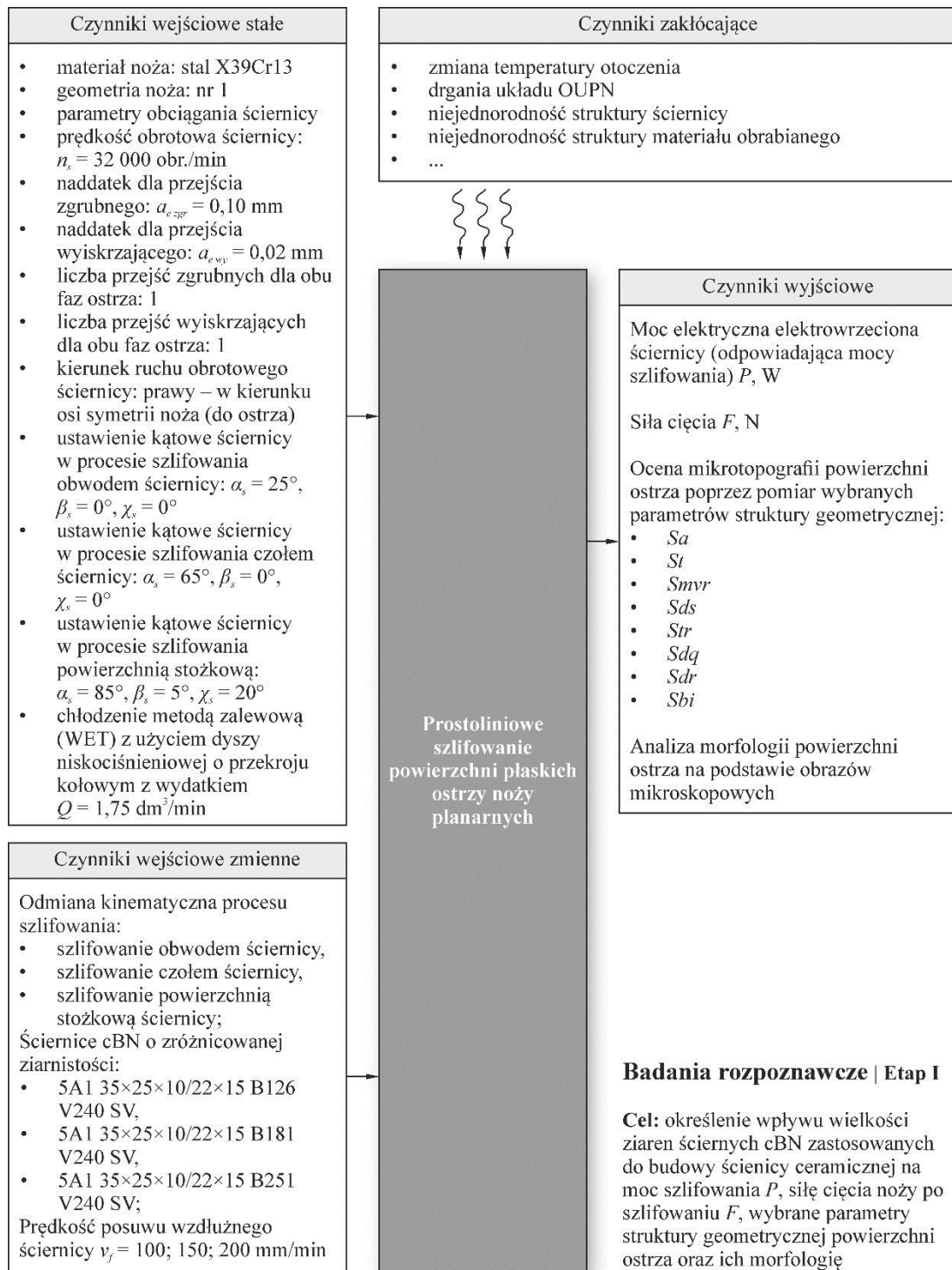
3.5. Schemat obiektu badań

Na rysunku 23 przedstawiono schemat prezentujący logiczne powiązanie trzech głównych etapów badań doświadczalnych wraz z ich celami: badań rozpoznawczych, badań właściwych oraz badań eksploatacyjnych

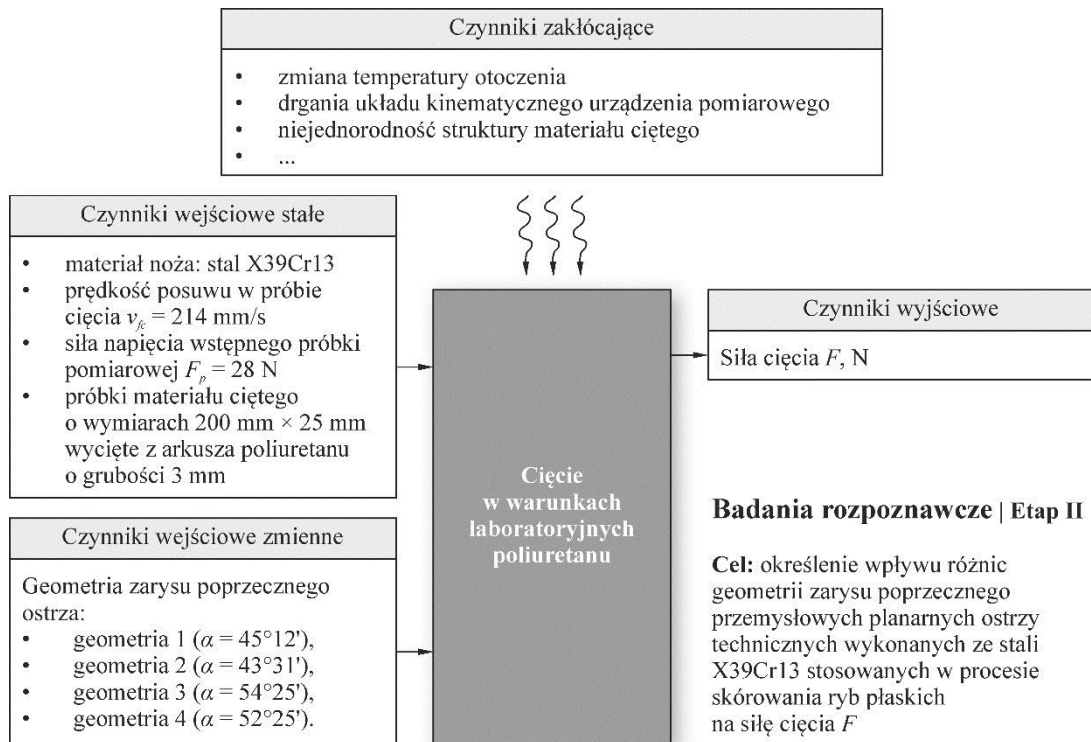


Rys. 23. Schemat prezentujący logiczne powiązanie trzech głównych etapów badań doświadczalnych wraz z ich celami

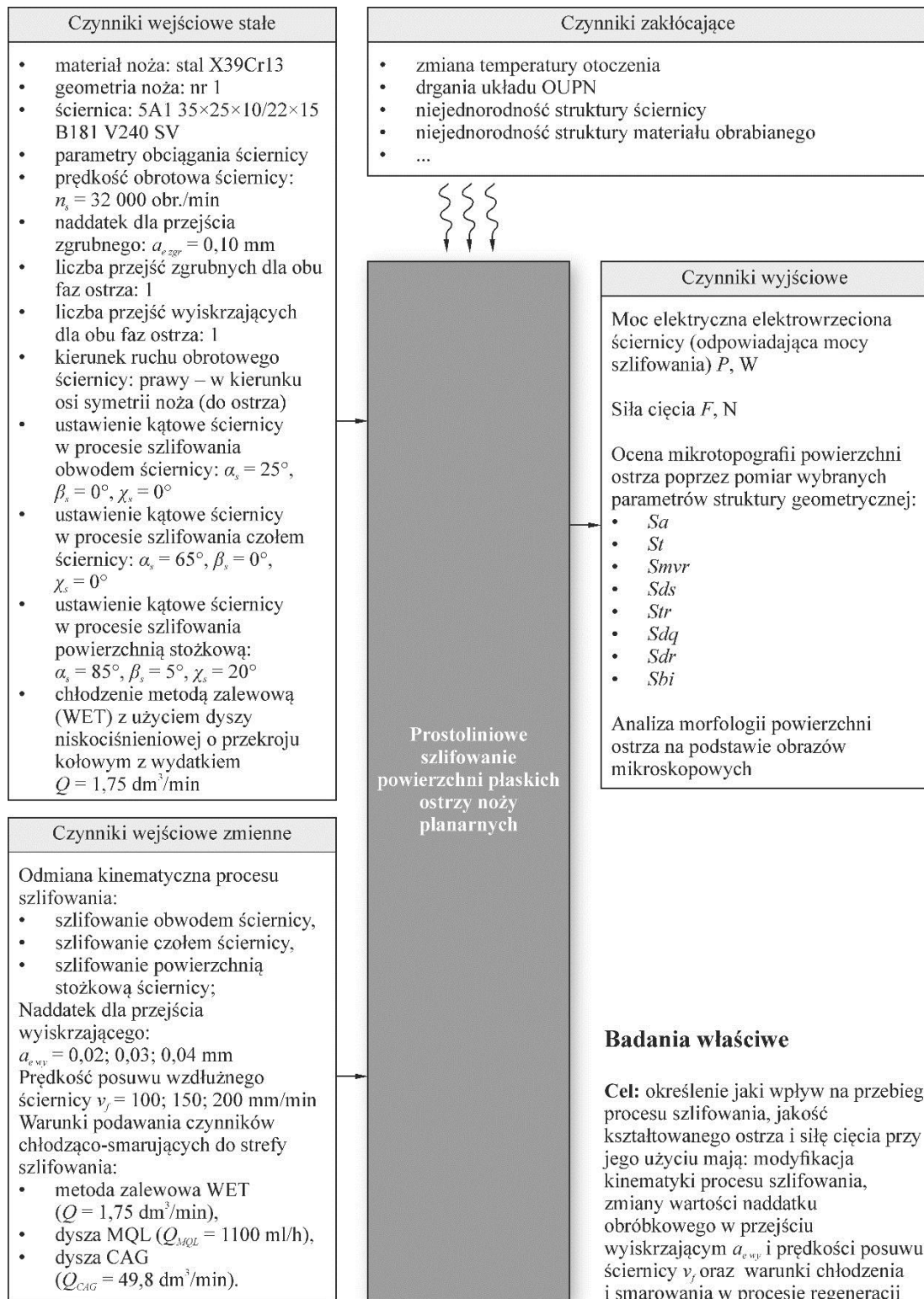
Na rysunkach 24-27 zamieszczono schematy obiektu badań poszczególnych etapów prac badawczych niniejszej rozprawy doktorskiej obejmujące czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia analizowanego procesu.



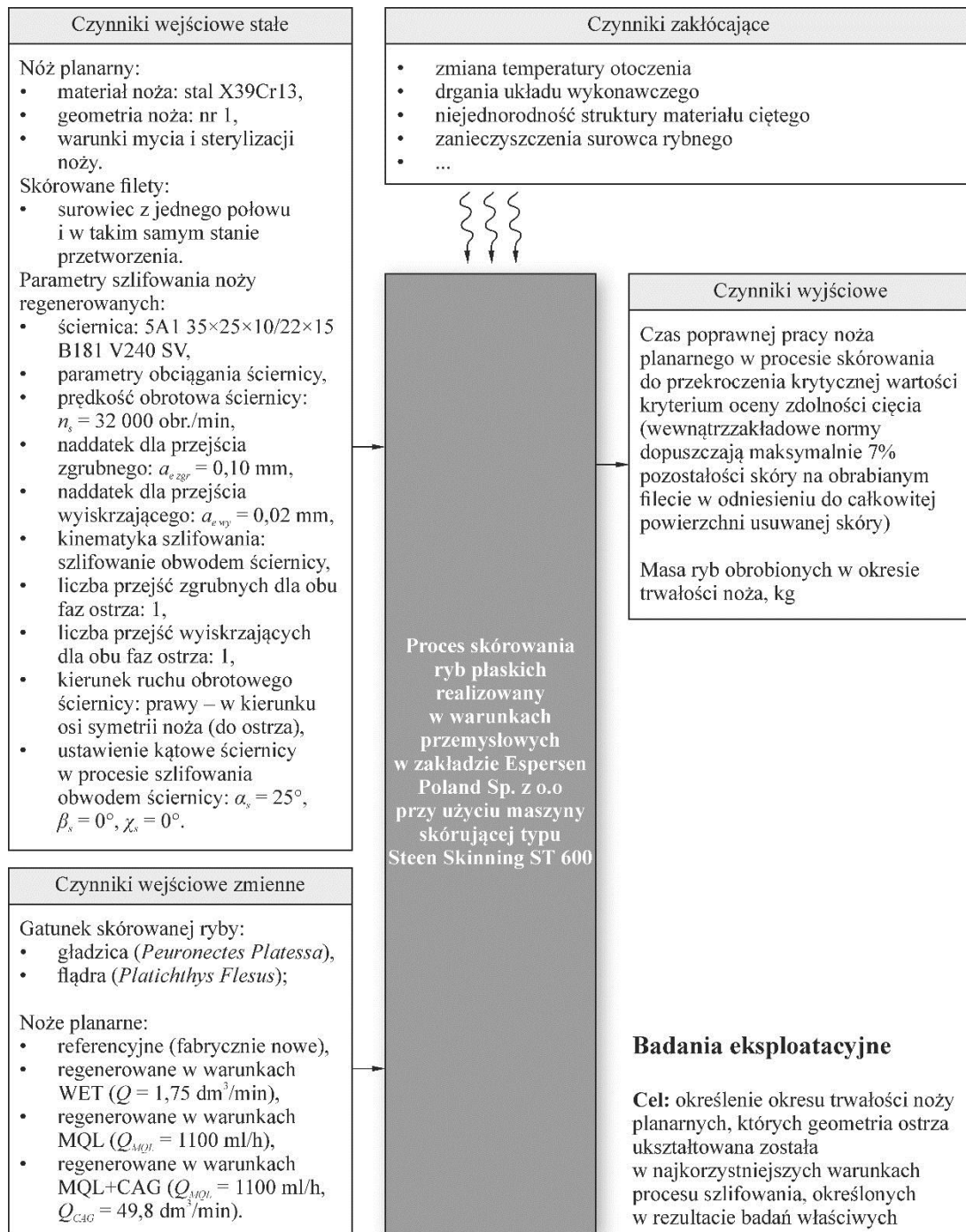
Rys. 24. Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań rozpoznawczych – etap I



Rys. 25. Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań rozpoznawczych – etap II



Rys. 26. Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań właściwych



Rys. 27. Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań eksploatacyjnych

4. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Opis metodyki badań doświadczalnych podzielono na trzy główne obszary związane z przyjętym zakresem prac badawczych opisanych w niniejszej rozprawie doktorskiej. W pierwszej kolejności przedstawiono metodykę badań rozpoznawczych, które miały na celu wybór ściernicy pozwalającej na uzyskanie najkorzystniejszych wyników procesu ostrzenia noży planarnych (podrozdział 4.1.) a następnie opisano metodykę badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia (podrozdział 4.2.). W kolejnych podrozdziałach przedstawiono opis metodyki badań właściwych procesu szlifowania (podrozdział 4.3.) oraz badań eksploatacyjnych, przeprowadzonych w procesie skórowania ryb płaskich realizowanym w warunkach przemysłowych (podrozdział 4.4.).

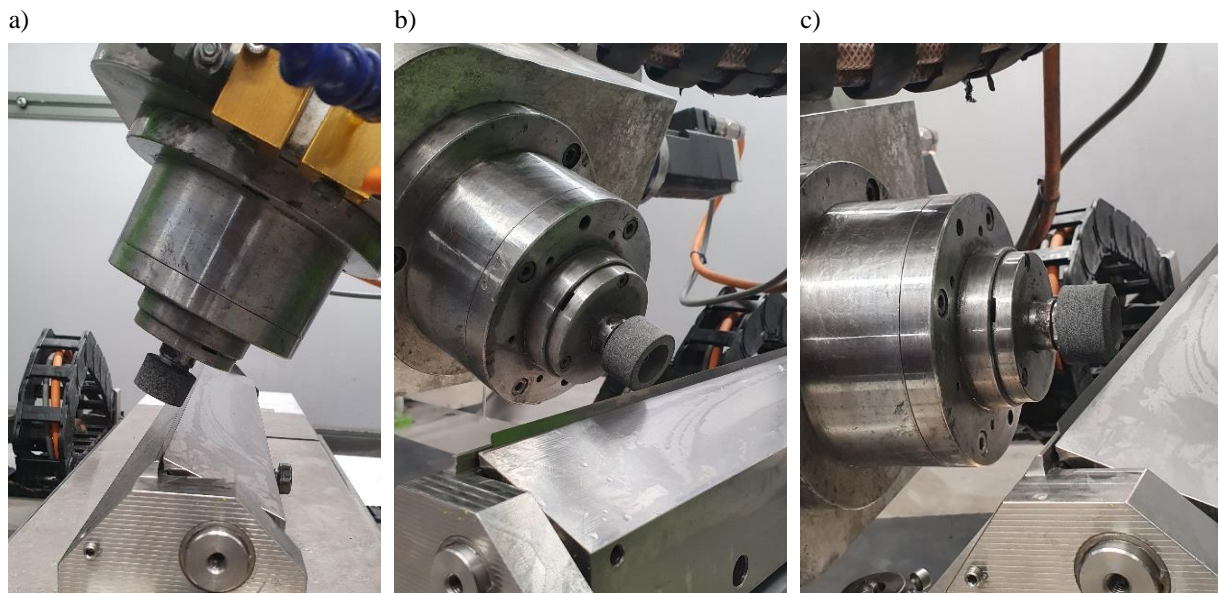
4.1. Metodyka badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy

4.1.1. Cel badań

Celem pierwszego etapu badań rozpoznawczych było określenie wpływu wielkości ziaren ściernych cBN zastosowanych do budowy ściernicy ceramicznej na siłę cięcia noży po szlifowaniu, wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni ostrza oraz jego morfologię. Analizy te miały umożliwić wybór najkorzystniejszej (z punktu widzenia rozpatrywanych rezultatów badanego procesu) wielkości ziaren ściernych ściernicy, która następnie wykorzystana zostanie do przeprowadzenia badań właściwych.

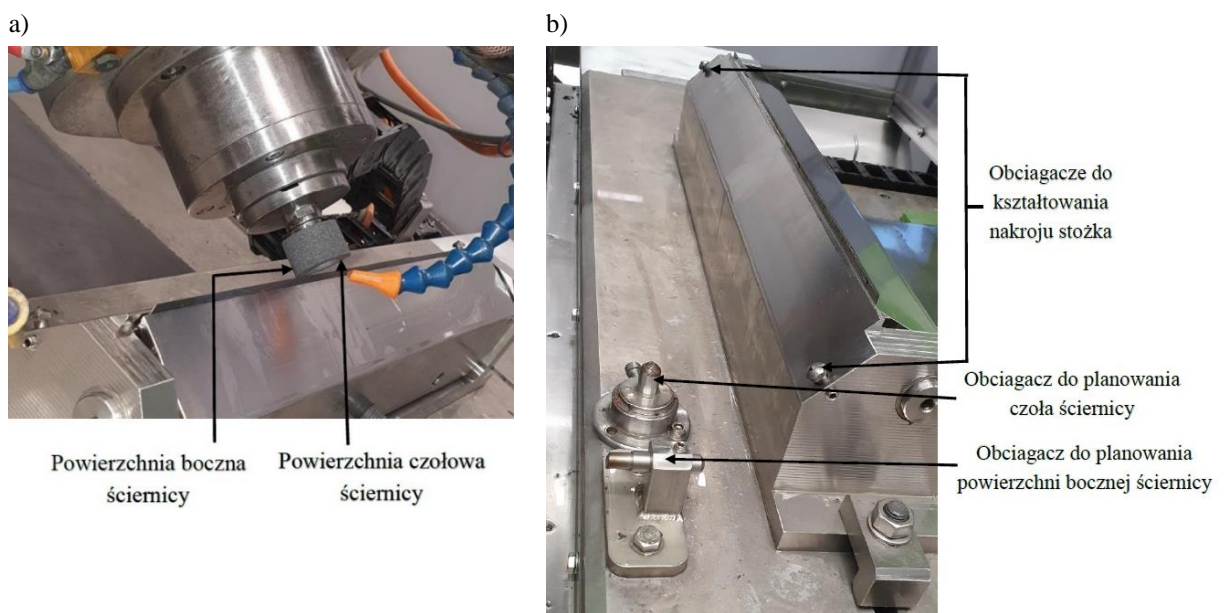
4.1.2. Parametry i warunki badań

Badania rozpoznawcze procesu prostoliniowego szlifowania powierzchni płaskich ostrzy noży planarnych przeznaczonych do procesu skórowania ryb płaskich (wykonanych z wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13) przeprowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym w specjalizowaną pięcioosiową szlifierkę CNC do kształtowania ostrzy noży o małej sztywności (szerzej opisaną w podrozdziale 5.1. niniejszej pracy). Badania przeprowadzono w trzech odmianach kinematycznych procesu szlifowania (szlifowanie obwodem ściernicy – rys. 28a, szlifowanie czołem ściernicy – rys. 28b, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy – rys. 28c), trzema ściernicami o zróżnicowanej ziarnistości (5A1 35×25×10/22×15 B126 V240 SV, 5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV, 5A1 35×25×10/22×15 B251 V240 SV), przy trzech wartościach prędkości posuwu wzdłużnego ściernicy ($v_f = 100; 150; 200$ mm/min).



Rys. 28. Widok strefy roboczej dla szlifowania obwodem (a), czołem (b) i powierzchnią stożkową ściernicy (c)

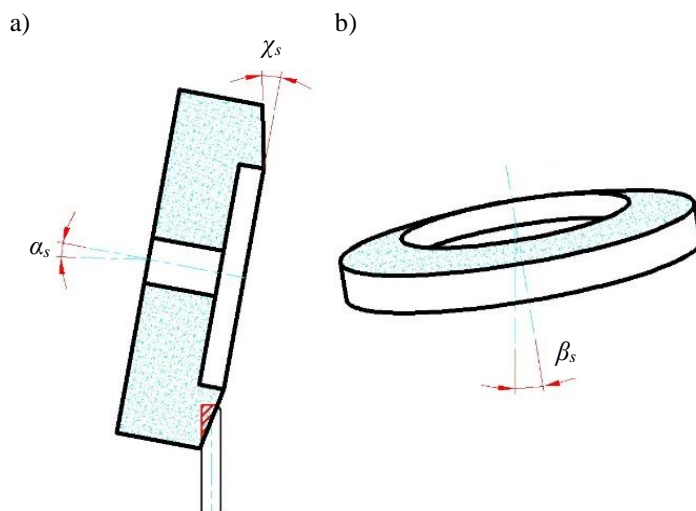
Przed przystąpieniem do próby szlifowania ściernicę każdorazowo obciążano (zarówno jej powierzchnię obwodową, jak i czołową) dla uzyskania pełnej powtarzalności rezultatów obróbki. Na rysunku 29 zamieszczono widok strefy obróbki wraz z umiejscowionymi w niej obciążaczami diamentowymi stosowanymi do kształtowania ściernicy.



Rys. 29. Widok ogólny strefy obróbki (a) oraz umiejscowienia obciążaczy diamentowych (b) stosowanych do obciążania i kształtowania powierzchni stożkowej ściernicy

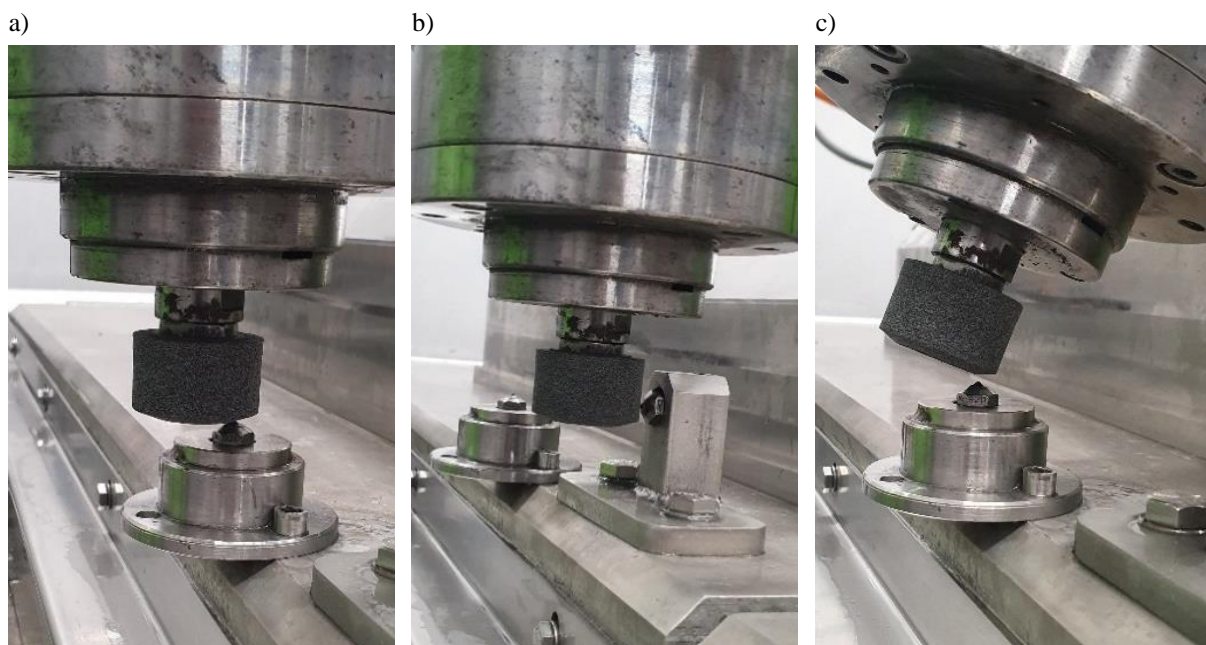
Dla trzeciej z rozpatrywanych odmian kinematycznych procesu szlifowania konieczne było ukształtowanie specjalnego nakroju stożkowego na czynnej powierzchni ściernicy za pomocą obciążacza diamentowego. Na rysunku 30 przedstawiono schemat ustawienia kąтового ściernicy w trzech płaszczyznach względem obrabianego noża planarnego dla

metody szlifowania ściernicą ze stożkowym kształtem czynnej powierzchni. W badaniach przyjęto następujące wartości kątów przedstawionych na rysunku 30: $\alpha_s = 85^\circ$, $\beta_s = 5^\circ$, $\chi_s = 20^\circ$.



Rys. 30. Schemat ustawienia kąтового ściernicy w trzech płaszczyznach względem obrabianego noża planarnego dla metody szlifowania ściernicą ze stożkowym kształtem czynnej powierzchni: a) widok z boku; b) widok z przodu (wartościami kątów zastosowane w opisywanych badaniach: $\alpha_s = 85^\circ$, $\beta_s = 5^\circ$, $\chi_s = 20^\circ$)

Na rysunku 31 przedstawiono widoki przestrzeni roboczej szliferki w trakcie obciągania powierzchni czołowej (rys. 31a) i obwodowej (rys. 31b) ściernicy oraz przy kształtowaniu na niej nakroju stożkowego (rys. 31c).



Rys. 31. Widok przestrzeni roboczej szliferki w trakcie obciągania powierzchni czołowej (a) i obwodowej (b) ściernicy oraz przy kształtowaniu na niej nakroju stożkowego (c)

W tabeli 3 zamieszczono syntetyczne zestawienie parametrów i warunków badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy.

Tab. 3. Zestawienie parametrów i warunków badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy

Proces	Prostoliniowe szlifowanie powierzchni płaskich	
Kinematyka szlifowania	Szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy	
Stanowisko badawcze	Specjalizowana pięcioosiowa szlifierka CNC do kształtowania ostrzy noży o małej sztywności	
Przedmiot obrabiany	Noże planarne przeznaczonych do procesu skórowania ryb płaskich wykonane z wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13 (Kuno Wasser GmbH, Solingen, Niemcy dla Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia) – geometria nr 1	
Ściernice	5A1 35×25×10/22×15 B126 V240 SV 5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV 5A1 35×25×10/22×15 B251 V240 SV (INTER-DIAMENT, Grodzisk Mazowiecki, Polska)	
Parametry obciążania ściernicy	Obciążacz: TYP M1039/D 1,00 ct (Dialeks, Pruszków, Polska) Prędkość obrotowa ściernicy przy obciążaniu: $n_{sd} = 32\ 000$ obr./min Prędkość posuwu przy obciążaniu: $v_{fd} = 0,00165$ m/s Dosuw obciążania: $a_d = 0,03$ mm Liczba przejść obciążających: $i_d = 2$	
Parametry szlifowania	Wielkości wejściowe stałe	Wielkości wejściowe zmienne
	Prędkość obrotowa ściernicy: $n_s = 32\ 000$ obr./min Naddatek dla przejścia zgrubnego: $a_{e\ zgr} = 0,10$ mm Naddatek dla przejścia wyiskrzającego: $a_{e\ wy} = 0,02$ mm Liczba przejść zgrubnych dla obu faz ostrza: 1 Liczba przejść wyiskrzających dla obu faz ostrza: 1 Kierunek ruchu obrotowego ściernicy: prawy – w kierunku osi symetrii noża (do ostrza) Ustawienie kątowe ściernicy w procesie szlifowania obwodem ściernicy: $\alpha_s = 25^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$ Ustawienie kątowe ściernicy w procesie szlifowania czołem ściernicy: $\alpha_s = 65^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$ Ustawienie kątowe ściernicy w procesie szlifowania powierzchnią stożkową: $\alpha_s = 85^\circ, \beta_s = 5^\circ, \chi_s = 20^\circ$	Prędkość posuwu wzdłużnego ściernicy: $v_f = 100; 150; 200$ mm/min Kinematyka szlifowania: szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy Ściernice: 5A1 35×25×10/22×15 B126 V240 SV 5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV 5A1 35×25×10/22×15 B251 V240 SV
Warunki chłodzenia i smarowania strefy szlifowania	Chłodzenie metodą zalewową (WET) z użyciem dyszy niskociśnieniowej o przekroju kołowym z wydatkiem $Q = 1,75$ dm ³ /min Czynnik chłodząco-smarujący: 5% emulsja wodno-olejowa oleju Cimtech® M26 firmy CIMCOOL® Fluid Technology wchodzącej w skład Milacron LLC	

W trakcie badań rejestrowano moc elektryczną elektrowrzeciona ściernicy (odpowiadającą mocy szlifowania) odczytując ją bezpośrednio z wyświetlacza przemiennika częstotliwości Danfoss typu VLT 500 sterującego pracą wrzeciona (rys. 32). Dodatkowo zmierzono wartość mocy elektrycznej elektrowrzeciona na biegu jałowym (moc początkową P_{pocz}). Na podstawie zarejestrowanej w trakcie prób szlifowania maksymalnej wartości mocy P_{max} możliwe było określenie przyrostu mocy szlifowania ΔP wynikającego z realizacji obróbki i będącego różnicą P_{max} i P_{pocz} .

Parametry pracy wrzeciona (przyrost mocy)

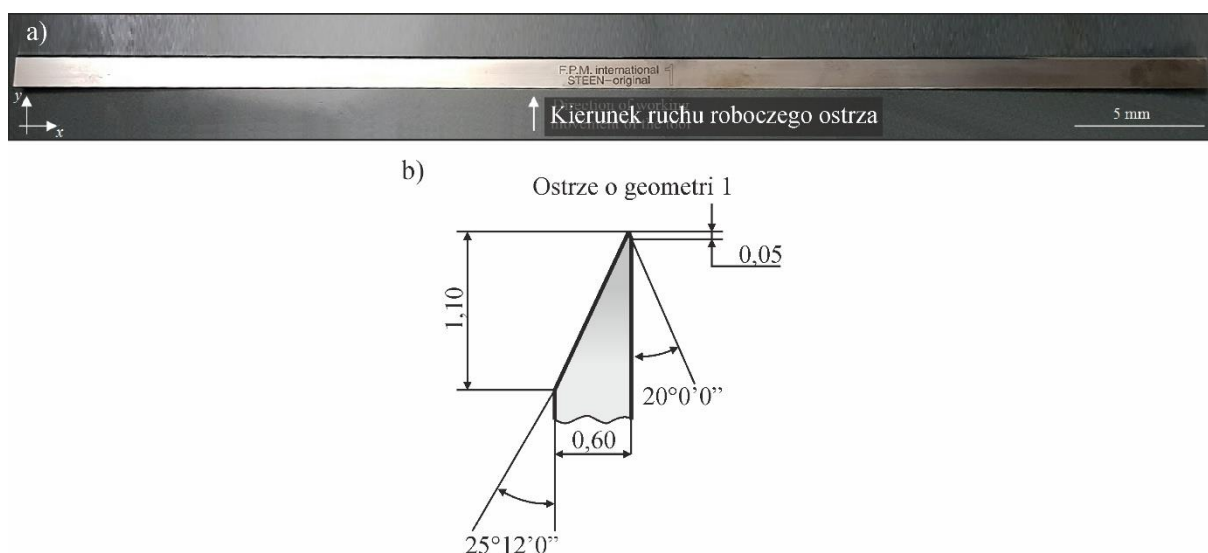


Rys. 32. Widok ogólny przemiennika częstotliwości Danfoss VLT 500 oraz parametrów pracy wrzeciona szlifierskiego w czasie rzeczywistym

Po zakończeniu badań wyznaczono wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni ukształtowanych ostrzy (na stanowisku do pomiarów stykowych struktury geometrycznej powierzchni obrobionych opisanym w podrozdziale 4.5.1.), dokonano mikroskopowej analizy morfologii ostrzy (z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A opisanego w podrozdziale 4.5.2.) oraz przeprowadzono próby mające na celu określenie siły cięcia przy użyciu noży po szlifowaniu. próby te wykonano na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku do pomiaru siły cięcia, opisanym szczegółowo w podrozdziale 5.2.

4.1.3. Przedmiot obrabiany

Do badań właściwych przeznaczono noże planarne (Kuno Wasser GmbH, Solingen, Niemcy, dla Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia) wykonane z wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13. Na rysunku 33 przedstawiono widok ogólny przykładowego narzędzia tnącego (rys. 33a) oraz wymiary geometryczne przekroju poprzecznego (rys. 33b) ostrza noża planarnego stanowiącego przedmiot obrabiany w opisywanych badaniach. W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów wymiarów gabarytowych (wyznaczone z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Video-Check® -IP 250 firmy Werth Messtechnik GmbH, Löberschütz, Niemcy) przykładowych siedmiu noży wraz z wynikami pomiarów ich mikrotwardości metodą Vickersa i Rockwella określonymi twardościomierzem Vickersa HPO 10 (WPM, Leipzig, Niemcy). Właściwości fizyczne stali X39Cr13 podano w tabeli 5.



Rys. 33. Widok ogólny (a) oraz wymiary geometryczne przekroju poprzecznego (b) ostrza noża planarnego stanowiącego przedmiot obrabiany w opisywanych badaniach

Tab. 4. Wymiary gabarytowe oraz mikrotwardość przykładowych siedmiu noży planarnych wykonanych ze stali X39Cr13

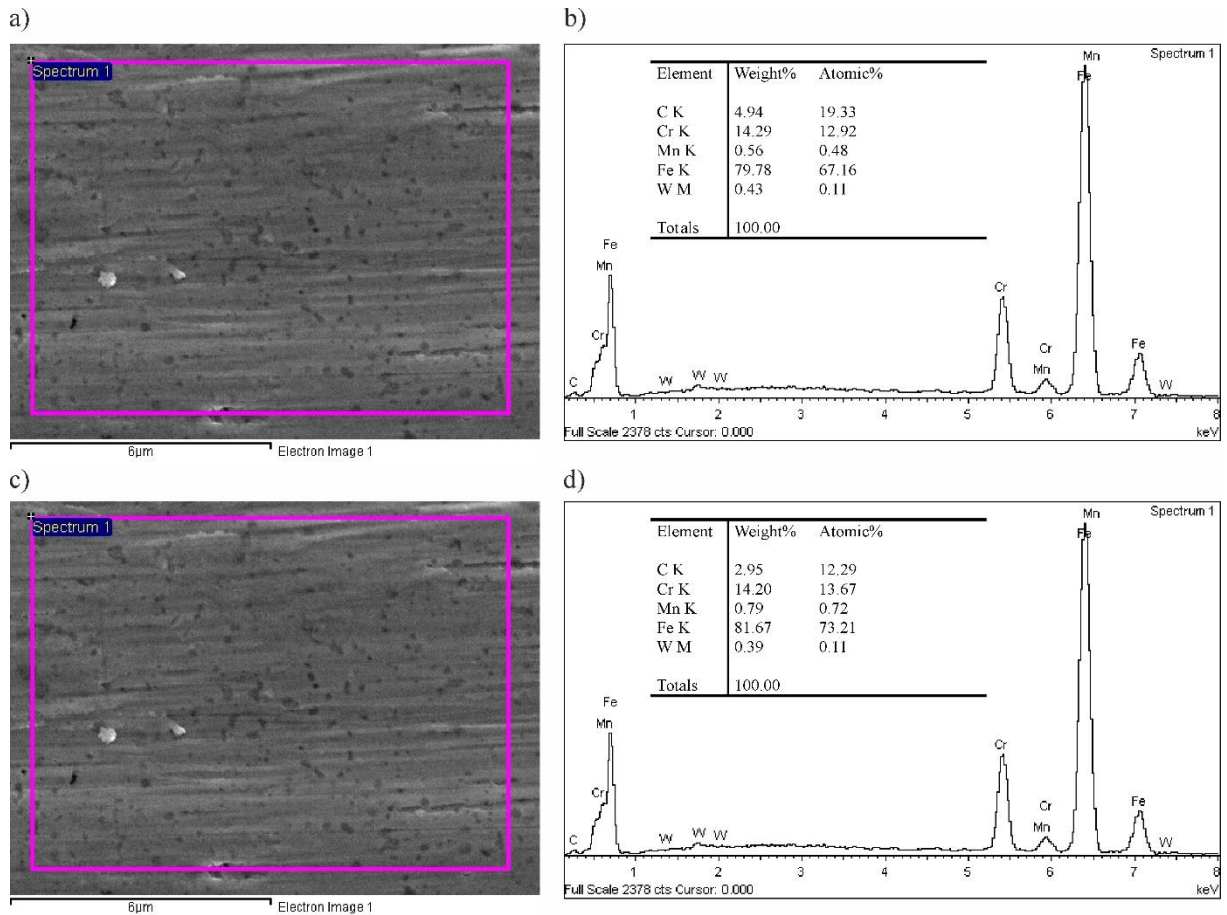
Lp.	Oznaczenie noża	Wymiary gabarytowe			Twardość	
		Długość, mm	Szerokość, mm	Grubość, mm	Vickers, HV	Rockwell, HRC
1.	N1-1	459,79	12,33	0,60	737,00	> 61,70
2.	N1-2	459,49	12,33	0,60	743,00	> 61,80
3.	N1-3	459,46	12,30	0,60	741,00	> 61,20
4.	N1-4	459,50	12,31	0,60	750,00	> 62,50
5.	N1-5	459,80	12,30	0,60	730,00	> 61,40
6.	N1-6	459,65	12,31	0,60	737,00	> 61,70
7.	N1-7	459,15	12,32	0,60	737,00	> 61,70

Tab. 5. Właściwości fizyczne i skład chemiczny stali X39Cr13, z której wykonano noże planarne stanowiące przedmiot obrabiany w opisywanych badaniach

Kraj	EU	USA	Niemcy	Francja	Anglia	Włochy	Chiny	Polska
Norma	EN	–	DIN, WNr	AFNOR	BS	UNI	GB	PN
Oznaczenie	X39Cr13	420	X39Cr13	Z40C13	X39Cr13	X40Cr14	4C13	4H13
Właściwości fizyczne								
Rozszerzalność cieplna	Moduł sprężystości	Liczba Poissona	Rezystancja	Przewodnictwo elektryczne	Ciepło właściwe	Gęstość	Przewodność cieplna	
$10^{-6} \cdot K^{-1}$	GPa	ν	$\Omega \cdot mm^2/m$	$S \cdot m/mm^2$	J/(Kg·K)	Kg/dm ³	W/(m·K)	
10,5	215	0,27-0,30	0,55	1,82	460	7,70	30	
Skład chemiczny (zgodnie z normą EN 10088-1: 2014)								
Pierwiastek	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	
Masa, %	83,00-87,10	0,36-0,42	1,00	1,00	0,04	0,015	12,50-14,50	
Odchyłka	± 0,02	± 0,02	+ 0,05	+ 0,03	+ 0,005	+ 0,003	± 0,15	

W celu dokładnej identyfikacji pierwiastków chemicznych wchodzących w skład materiału, z którego wykonano noże planarne i porównania go ze składem wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13, przeprowadzono mikroanalizę ilościową metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego EDS (ang. *energy-dispersive X-ray spectroscopy*). Do tego celu wykorzystano moduł energodispersyjnego spektrometru rentgenowskiego INCAPenta FET-x3 (Oxford Instruments, Abingdon, Wielka Brytania) sprzężony z elektronowym mikroskopem skaningowym JSM-5500 LV (JEOL Ltd., Tokio, Japonia) opisanym szerzej w podrozdziale 4.5.3. Mikroanalizę ilościową EDS przeprowadzono dla losowo wybranego obszaru znajdującego się na krawędzi tnącej i korpusie referencyjnego ostrza planarnego. Zestaw wyników uzyskanych podczas mikroanalizy ilościowej EDS przedstawiono na rysunku 34.

Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką zawartość w analizowanej próbce takich pierwiastków, jak Fe, Cr, C oraz śladowej ilości Mn. Uzyskane procenty wagowe, analizowane dla dwóch kluczowych pierwiastków – żelaza i chromu (odpowiednio $Fe_{S1} = 79,78\%$, $Fe_{S2} = 81,67\%$ oraz $Cr_{S1} = 14,29\%$, $Cr_{S2} = 14,20\%$), były zgodne z wartościami podanymi w tabeli 5 (odpowiednio Fe = 83,00-87,00% oraz Cr = 12,50-14,50%). Powyższe wartości również potwierdziły dużą zgodność uzyskanych wyników i w przypadku kluczowych pierwiastków Fe, Cr (i Mn) jednoznacznie wskazały na wysokowęglową martenzytyczną stal nierdzewną X39Cr13 jako materiał, z którego wykonano analizowane ostrza planarne.



Rys. 34. Mikroanaliza ilościowa EDS dwóch obszarów noża planarnego: a, c) obrazy mikroskopowe SEM dwóch wybranych obszarów (11,07×8,27 µm) noża, dla których przeprowadzono mikroanalizę; b, d) uzyskane widma EDS z pierwiastkami zidentyfikowanymi w analizowanych obszarach oraz obliczone procentowe udziały masowe i atomowe pierwiastków

Przedmiot obrabiany (nóż planarny) ustalany był przed obróbką w specjalnym uchwycie zawsze w taki sam sposób i unieruchamiany szczękami za pomocą śruby zaciskowej (rys. 35).

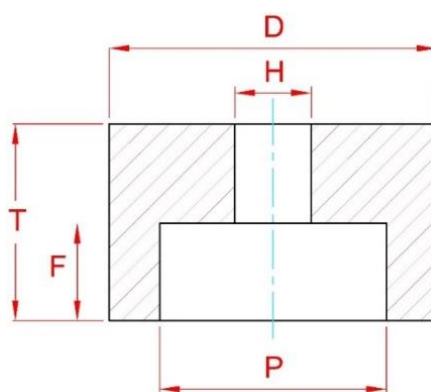


Rys. 35. Widok specjalnego uchwytu (wraz z zamocowanym ostrzem) opracowanego w celu unieruchomienia wiotkiego ostrza planarnego w przestrzeni roboczej szlifierki

Nóż był ustalany w szczękach uchwytu w taki sposób, aby jego dolna krawędź dolegała do punktów bazowych zamontowanych w uchwycie, zapewniając tym samym pełną powtarzalność ustalania przedmiotów obrabianych w przestrzeni roboczej stanowiska badawczego.

4.1.4. Ściernice

Do badań wytypowano ściernice garnkowe firmy INTER-DIAMENT (Grodzisk Mazowiecki, Polska) o parametrach konstrukcyjnych przedstawionych na rysunku 36 i w tabeli 6.



Rys. 36. Oznaczenia wymiarów charakterystycznych ściernicy (www.inter-diamant.com.pl, 2020)

Tab. 6. Wykaz oznaczeń i głównych parametrów technicznych ściernic zastosowanych w badaniach rozpoznawczych (www.inter-diamant.com.pl, 2020)

Oznaczenie ściernicy	Wymiary					Skład			
	D, mm	P, mm	T, mm	H, mm	F, mm	Wielkość ziaren wg. FEPA, μm	Koncentracja ziaren, karat/ cm^3	Stopień twardości	Spoiwo
5A1 35×25×10/22×15 B126 V240 SV	35	22	25	10	15	125/106	4,18	Średni	Ceramiczne
5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV	35	22	25	10	15	180/150	4,18	Średni	Ceramiczne
5A1 35×25×10/22×15 B251 V240 SV	35	22	25	10	15	250/212	4,18	Średni	Ceramiczne

Zastosowane ściernice charakteryzowały się jednakowymi cechami budowy (rodzaj spoiwa, struktura, twardość, rodzaj ziaren ściernych) poza wymiarami ziaren cBN. Do badań przyjęto ściernice z ziarnami regularnego azotku boru o numerze (zgodnie z normami FEPA) B126, B181 i B251. W tabeli 7 przedstawiono zestawienie oznaczeń i wymiarów charakterystycznych zastosowanych mikroziaren ściernych wg różnych norm branżowych.

Tab. 7. Zestawienie oznaczeń i wymiarów charakterystycznych mikroziaren ściernych wg różnych norm branżowych (www.inter-diamant.com.pl, 2020)

Nr ziarna wg FEPA	Rozmiar ziarna FEPA PN-85/M-59108	Rozmiar ziarna US Standard ASTM E-11
B126	125/106 μm	120/140 mesh
B181	180/150 μm	80/100 mesh
B251	250/212 μm	60/70 mesh

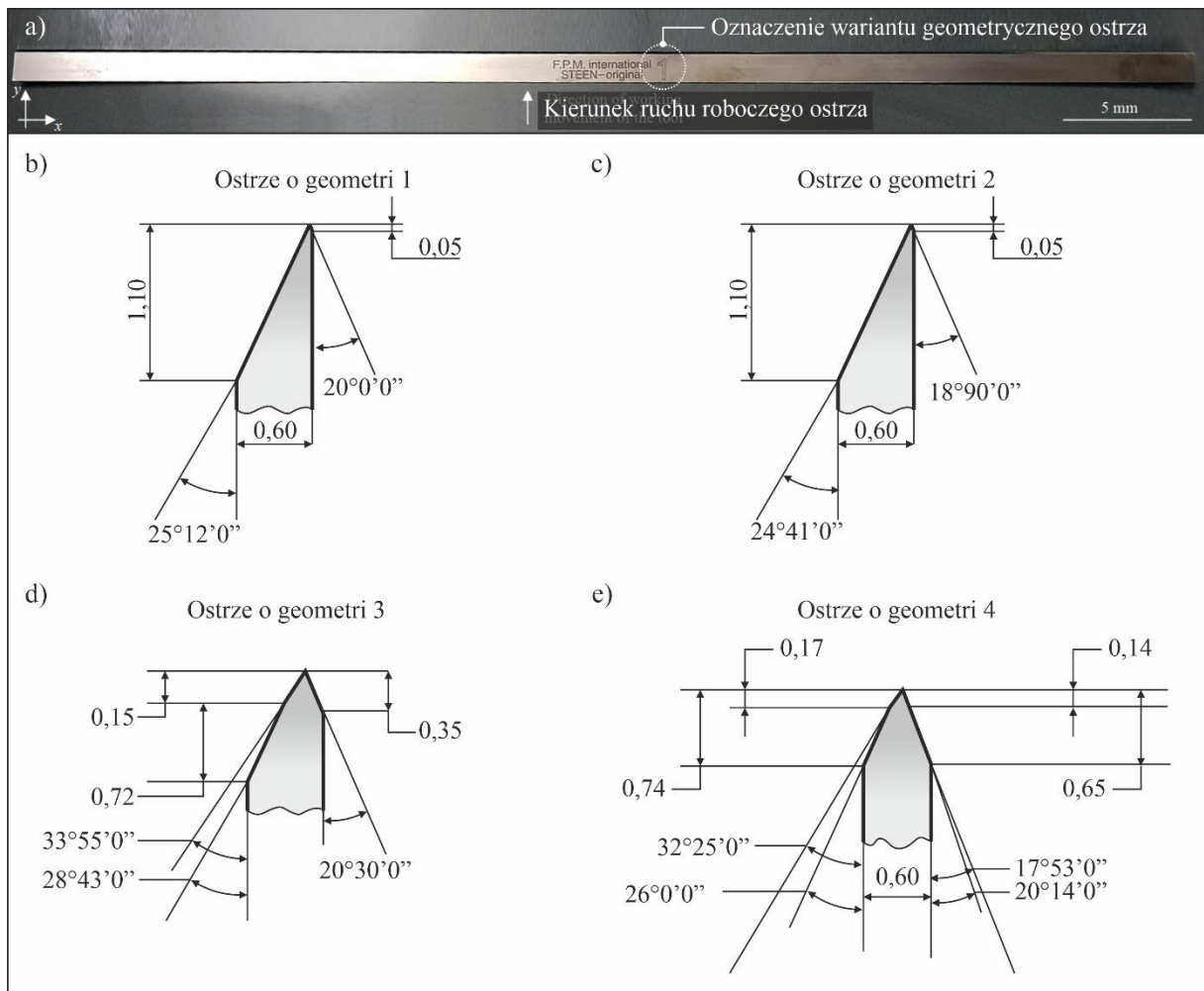
4.2. Metodyka badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia

4.2.1. Cel badań

Celem drugiej części badań rozpoznawczych było przeprowadzenie analizy wpływu różnic w zarysie poprzecznym przemysłowych ostrzy tnących wykonanych ze stali X39Cr13 stosowanych w procesie skórowania płastug z rodziny *Pleuronectidae* na siłę cięcia. Badania takie miały również umożliwić weryfikację poprawności funkcjonowania opracowanego stanowiska testowego. Na stanowisku badawczym został wykonany szereg prób cięcia z wykorzystaniem ostrzy o czterech różnych geometriach zarysu poprzecznego ostrza w celu określenia różnic w sile cięcia pomiędzy poszczególnymi typami ostrzy.

4.2.2. Narzędzie tnące

W badaniach wykorzystano cztery rodzaje ostrzy planarnych różniących się osiowym zarysem ostrza (rys. 37), przeznaczone do procesu skórowania ryb płaskich. Ostrza były wykonane z wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13 (Kuno Wasser GmbH, Solingen, Niemcy dla Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia). Stosowano ostrza nowe (nie używane wcześniej) w stanie w jakim dostarcza je producent.



Rys. 37. Widok ogólny planarnego ostrza technicznego zastosowanego w badaniach (a) oraz rysunki zarysu geometrii przekroju poprzecznego ostrzy poddanych próbom: a) ostrze o geometrii 1; b) ostrze o geometrii 2; c) ostrze o geometrii 3; d) ostrze o geometrii 4

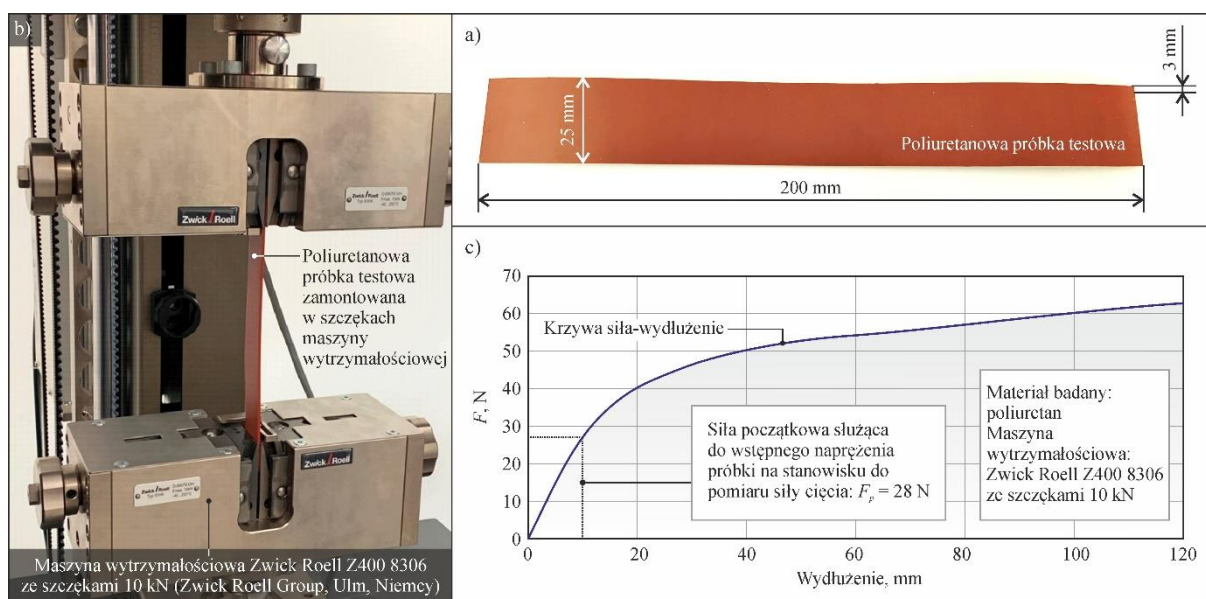
4.2.3. Materiał cięty

Do badania sił cięcia zachodzących w procesie jako materiał cięty wytypowano poliuretan (EKO INDUSTRIE Sp. z o.o., Słupsk, Polska). Materiał ten został wybrany na podstawie badań innych autorów dotyczących analogicznych procesów cięcia (McCarthy i inni, 2007; McCarthy i inni, 2010; Gilchrist i inni 2008) opisanych w podrozdziale 2.5. niniejszej rozprawy. W tabeli 8 zamieszczono zestawienie najistotniejszych parametrów mechanicznych poliuretanu zastosowanego w przeprowadzonych pomiarach siły cięcia.

Do badań przygotowano próbki o wymiarach 200 mm × 25 mm wycięte z arkusza poliuretanu o grubości 3 mm. Na rysunku 38a przedstawiono widok ogólny próbki testowej. W celu określenia siły niezbędnej do wstępnego naprężenia próbki w uchwytach stanowiska badawczego wyznaczono charakterystykę ukształtowanej próbki (rys. 38c) w próbie osiowego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z400 8306, wyposażonej w szczęki 10 kN (Zwick Roell Group, Ulm, Niemcy) – rys. 38b.

Tab. 8. Najważniejsze parametry mechaniczne poliuretanu zastosowanego w przeprowadzonych badaniach siły cięcia (Eko Industrie, 2021)

Parametr	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie DIN 53504	45-50 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu DIN 53504	450-680%
Ścieralność DIN 53516	25-50 mm ³
Gęstość elastomeru	1,25-1,30 g/cm ³
Twardość Shore A DIN 53505	55-95° ShA
Wytrzymałość na temp. = max	80°C



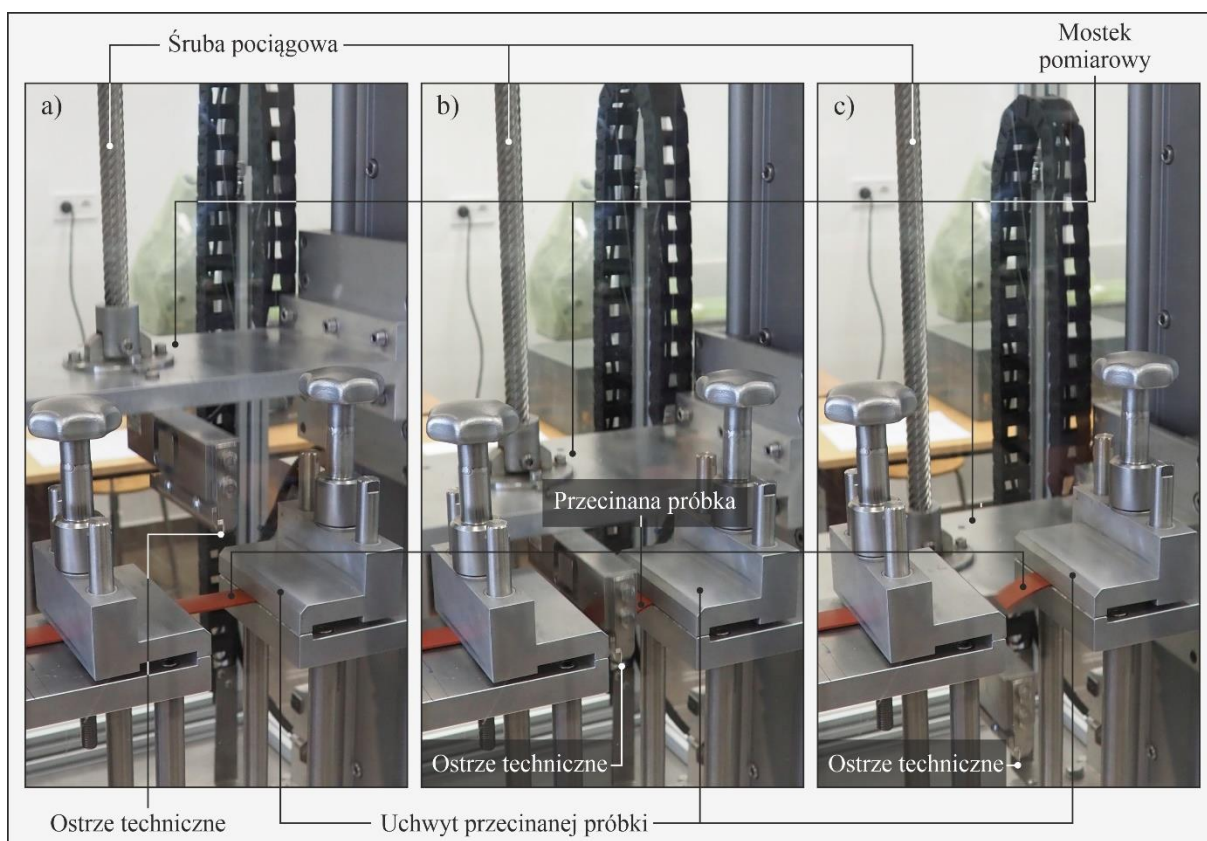
Rys. 38. Widok ogólny próbki testowej wykonanej z poliuretanu (a), którego charakterystykę wytrzymałościową (c) wyznaczono w próbie osiowego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z400 8306 wyposażonej w szczękę 10 kN (Zwick Roell Group, Ulm, Niemcy) (b) (Zieliński i inni, 2021)

Wyniki pomiarów wykazały, że do uzyskania zakładanego wstępnego naprężenia próbki skutkującego wydłużeniem jej o 10 mm niezbędne jest oddziaływanie na jeden z końców próbki siłą $F_p = 28 \text{ N}$ (rys. 34c). Siłę taką stosowano każdorazowo przy mocowaniu próbek w uchwycie stanowiska pomiarowego.

4.2.4. Parametry i warunki badań

Wykonanie pomiaru polegało na zamocowaniu próbki w uchwycie zaciskowym, zamocowaniu badanego ostrza oraz określeniu prędkości poruszania się imaka ostrza, decydującej o prędkości przecinania próbki. W trakcie cięcia belka tensometryczna, na której osadzony jest uchwyt wraz z ostrzem, w sposób ciągły mierzyła siłę cięcia F przekazując dane pomiarowe w czasie ruchu ostrza od startu do zatrzymania. Dane pomiarowe przekazywane były do wzmacniacza cyfrowego a następnie do panelu operatorskiego, gdzie były

archiwizowane. Zarejestrowany rozkład siły w czasie próby mógł być następnie przeniesiony w formie cyfrowej do dowolnego oprogramowania w celu dalszej analizy. Na rysunku 39 zestawiono fotografie wykonane w trzech najważniejszych etapach próby przecinania: etap początkowy – ostrze zbliża się ruchem jednostajnym z zdaną prędkością do próbki testowej (rys. 39a); etap drugi – przecinanie próbki (rys. 39b); etap trzeci – zakończenie testu po przemieszczeniu noża poniżej strefy cięcia (rys. 39c).



Rys. 39. Wizualizacja procesu przecinania próbki testowej wykonanej z poliuretanu: a) etap początkowy – ostrze zbliża się ruchem jednostajnym z zdaną prędkością do próbki testowej; b) etap drugi – przecinanie próbki; c) etap trzeci – zakończenie testu po przemieszczeniu noża poniżej strefy cięcia (Zieliński i inni, 2021)

W celu uzyskania niezmiennego pozycjonowania każdej z mierzonych próbek jej lewą krawędź próbki wyrównano do przygotowanego znacznika odległości, po czym dociskano prawą szczękę uchwytu. Następnie naprężano wstępnie próbkę poprzez przyłożenie do jej lewego końca siły 28 N (co skutkowało wydłużeniem próbki o 10 mm) i zaciskano lewą szczękę uchwytu.

W badaniach przyjęto wartość posuwu ostrza tnącego $v_{fc} = 214$ mm/s równą wartości stosowanej na linii produkcyjnej w zakładzie przemysłowym przetwarzającym ryby płaskie (w tym przypadku prędkość przyjęto na przykładzie danych z zakładu przetwórczego Espersen Poland Sp. z o.o., Koszalin, Polska).

Pomiar siły cięcia przebiegał według następującego algorytmu postępowania:

- zamocowanie ostrza i próbki pomiarowej,
- zamknięcie drzwi komory pomiarowej,
- uruchomienie serwowrotu głównego,
- wyzerowanie osi Z poprzez jej przesunięcie do górnej skrajnej pozycji,
- wprowadzenie wartości prędkości posuwu $v_{fc} = 214$ mm/s,
- zwolnienie przełącznika awaryjnego,
- wyzerowanie odczytu czujnika siły F funkcją *Tare* oraz $Max = 0$,
- uruchomienie procedury pomiarowej funkcją *Start Velocity*,
- po zakończonym pomiarze następowało załączenie wyłącznika awaryjnego,
- otwarcie drzwi komory pomiarowej oraz odmocowanie przeciętej próbki pomiarowej poprzez zwolnienie zacisku szczęk.

Dane pomiarowe pobrane z modułu sterującego były następnie konwertowane za pomocą oprogramowania UniStream Data Converters Suite 1.0.17 (Unitronics, Airport City, Izrael). Przekonwertowane pliki w formacie *.xlsx były w dalszej kolejności przetwarzane i analizowane z użyciem arkusza kalkulacyjnego Excel 356 wersja 2109 kompilacja 16.0.14430.20292 (Microsoft, Redmond, USA).

Dla każdej z 4 analizowanych odmian geometrycznych ostrzy technicznych przeprowadzono 3 próby cięcia (3 powtórzenia). Ogółem w opisywanych badaniach wykonano 12 prób.

4.3. Metodyka badań właściwych procesu szlifowania ostrzy

4.3.1. Cel badań

Podstawowym celem badań właściwych było określenie jaki wpływ na przebieg procesu szlifowania, jakość kształtowanego ostrza i siłę cięcia przy jego użyciu mają:

- modyfikacja kinematyki procesu szlifowania (szlifowanie obwodem, czołem i powierzchnią stożkową ściernicy),
- zmiany wartości naddatku obróbkowego w przejściu wyiskrzającym $a_{e\ wy}$ oraz prędkości posuwu ściernicy v_f ,
- warunki chłodzenia i smarowania (metoda zalewowa, MQL, CAG i metoda hybrydowa stanowiąca połączenie metod MQL i CAG).

4.3.2. Parametry i warunki badań

W badaniach właściwych procesu prostoliniowego szlifowania powierzchni płaskich ostrzy noży planarnych przeznaczonych do procesu skórowania ryb płaskich wykorzystano

stanowisko badawcze wyposażone w specjalizowaną pięcioosiową szlifierkę CNC do kształtowania ostrzy noży o małej sztywności (szerzej opisaną w podrozdziale 5.1. niniejszej pracy). Podobnie jak to miało miejsce w badaniach rozpoznawczych, próby przeprowadzono w trzech odmianach kinematycznych procesu szlifowania (szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy). W badaniach zastosowano jeden rodzaj ściernic, wytypowany na podstawie wyników badań rozpoznawczych: 5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV. Zmieniano prędkość posuwu wzdłużnego ściernicy ($v_f = 100; 150; 200$ mm/min) oraz wartość naddatku obróbkowego. Badania prowadzono w taki sposób, że każdorazowo dana krawędź tnąca szlifowana była najpierw zgrubnie z naddatkiem $a_{e\ zgr} = 0,10$ mm po czym następowało przejście wyiskrzające z trzema różnymi wartościami naddatku: $a_{e\ wy} = 0,02$ mm, 0,03 mm i 0,04 mm.

Dodatkowo w trakcie badań stosowano różne metody podawania czynników chłodząco-smarujących oraz zróżnicowano ich rodzaj i wydatek. Dla najkorzystniejszych warunków procesu szlifowania, wytypowanych w pierwszym etapie badań właściwych realizowanym z zastosowaniem metody zalewowej (WET) wykonano dodatkowe próby szlifowania w warunkach zminimalizowanego podawania do strefy szlifowania aerozolu powietrzno-olejowego (MQL), schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) oraz w warunkach stosowania jednocześnie dyszy MQL i CAG (MQL+CAG). Szczegółowe informacje dotyczące budowy obu dysz, wydatku czynników chłodząco-smarujących oraz rodzaju stosowanego czynnika zamieszczono w podrozdziale 5.1.2.7. niniejszej rozprawy doktorskiej.

Również w przypadku badań właściwych (analogicznie do przebiegu badań rozpoznawczych) przed przystąpieniem do próby szlifowania ściernicę każdorazowo obciążano (zarówno jej powierzchnię obwodową, jak i czołową) dla uzyskania pełnej powtarzalności rezultatów obróbki i wyeliminowania wpływu zużycia ściernicy. Każdorazowo obciążano również nakrój stożkowy ściernicy, zgodnie z parametrami opisanymi w podrozdziale 4.1.2. i podanymi na rysunku 31.

W trakcie badań rejestrowano przyrost mocy szlifowania ΔP a po ich zakończeniu wyznaczono wartości wybranych parametrów SGP ostrzy (na stanowisku do pomiarów stykowych struktury geometrycznej powierzchni obrobionych opisanym w podrozdziale 4.5.1.), analizowano morfologię ostrzy (z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A opisanego w podrozdziale 4.5.2.) oraz wyznaczono siły cięcia nożami po szlifowaniu (na stanowisku do pomiaru siły cięcia opisanym w podrozdziale 5.2.).

W tabeli 9 zamieszczono syntetyczne zestawienie parametrów i warunków, z jakimi prowadzone były badania właściwe.

Tab. 9. Zestawienie parametrów i warunków badań właściwych

Proces	Prostoliniowe szlifowanie powierzchni płaskich	
Kinematyka szlifowania	Szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy	
Stanowisko badawcze	Specjalizowana pięcioosiowa szlifierka CNC do kształtowania ostrzy noży o małej sztywności	
Przedmiot obrabiany	Noże planarne przeznaczonych do procesu skórowania ryb płaskich wykonane z wysokowęglowej martenzytycznej stali nierdzewnej X39Cr13 (Kuno Wasser GmbH, Solingen, Niemcy dla Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia) – geometria nr 1	
Ściernica	5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV (INTER-DIAMENT, Grodzisk Mazowiecki, Polska)	
Parametry obciążania ściernicy	Obciążacz: TYP M1039/D 1,00 ct (Dialeks, Pruszków, Polska) Prędkość obrotowa ściernicy przy obciążaniu: $n_{sd} = 32\ 000$ obr./min Prędkość posuwu przy obciążaniu: $v_{fd} = 0,00165$ m/s Dosuw obciążania: $a_d = 0,03$ mm Liczba przejść obciążających: $i_d = 2$	
Parametry szlifowania	Wielkości wejściowe stałe	Wielkości wejściowe zmienne
	Prędkość obrotowa ściernicy: $n_s = 32\ 000$ obr./min Naddełek dla przejścia zgrubnego: $a_{e\ zgr} = 0,10$ mm Liczba przejść zgrubnych dla obu faz ostrza: 1 Liczba przejść wyiskrzających dla obu faz ostrza: 1 Kierunek ruchu obrotowego ściernicy: prawy – w kierunku osi symetrii noża (do ostrza) Ustawienie kątowne ściernicy w procesie szlifowania obwodem ściernicy: $\alpha_s = 25^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$ Ustawienie kątowne ściernicy w procesie szlifowania czołem ściernicy: $\alpha_s = 65^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$ Ustawienie kątowne ściernicy w procesie szlifowania powierzchnią stożkową: $\alpha_s = 85^\circ, \beta_s = 5^\circ, \chi_s = 20^\circ$	Naddełek dla przejścia wyiskrzającego: $a_{e\ wy} = 0,02; 0,03; 0,04$ mm Prędkość posuwu wzdłużnego ściernicy: $v_f = 100; 150; 200$ mm/min Kinematyka szlifowania: szlifowanie obwodem ściernicy, szlifowanie czołem ściernicy, szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy Warunki podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania: metoda zalewowa, dysza MQL, dysza CAG
Warunki chłodzenia i smarowania strefy szlifowania	Chłodzenie metodą zalewową (WET) z użyciem dyszy niskociśnieniowej o przekroju kołowym z wydatkiem $Q = 1,75$ dm ³ /min Czynnik chłodząco-smarujący: 5% emulsja wodno-olejowa oleju Cimtech® M26 firmy CIMCOOL® Fluid Technology wchodzącej w skład Milacron LLC	
	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego z użyciem dyszy MQL typu ZMIN-MS $Q_{MQL} = 1100$ ml/h Ciśnienie powietrza zasilającego: 0,8 MPa Czynnik chłodząco-smarujący: aerozol powietrzno-olejowy (olej Cimtech® MQL firmy CIMCOOL® Fluid Technology wchodzącej w skład Milacron LLC)	
	Chłodzenie z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza generowanego przez dyszę CAG typu Vortec 610 $Q_{CAG} = 49,8$ dm ³ /min Ciśnienie powietrza zasilającego: 0,6 MPa Czynnik chłodząco-smarujący: schłodzone sprężone powietrze	

W badaniach właściwych zastosowano metodykę planowania eksperymentu, w wyniku której sporządzono plan badań zamieszczony w tabeli 10 (przyjęto liczbę powtórzeń poszczególnych punktów planu $n = 3$).

Tab. 10. Plan eksperymentów wykonanych w ramach badań właściwych

Lp.	Nr próby (3 powtórzenia)	Odmiana kinematyczna szlifowania	Prędkość posuwu v_f , mm/min	Naddatek obróbkowy w przejściu wyiskrzającym $a_{e\ wy}$, mm
1.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02
2.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02
3.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02
4.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02
5.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02
6.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02
7.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02
8.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02
9.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02
10.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02
11.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02
12.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02
13.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02
14.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02
15.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02
16.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02
17.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02
18.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02
19.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02
20.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02
21.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02
22.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02
23.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02
24.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02
25.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02
26.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02
27.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02

Tab. 10. Plan eksperymentów wykonanych w ramach badań właściwych – *ciąg dalszy*

Lp.	Nr próby (3 powtórzenia)	Odmiana kinematyczna szlifowania	Prędkość posuwu v_f , mm/min	Naddatek obróbkowy w przejściu wyiskrzającym $a_{e\ wy}$, mm
28.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03
29.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03
30.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03
31.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03
32.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03
33.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03
34.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03
35.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03
36.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03
37.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03
38.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03
39.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03
40.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03
41.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03
42.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03
43.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03
44.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03
45.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03
46.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03
47.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03
48.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03
49.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03
50.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03
51.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03
52.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03
53.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03
54.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03

Tab. 10. Plan eksperymentów wykonanych w ramach badań właściwych – *ciąg dalszy*

Lp.	Nr próby (3 powtórzenia)	Odmiana kinematyczna szlifowania	Prędkość posuwu v_f , mm/min	Naddatek obróbkowy w przejściu wyiskrzającym $a_{e\ wy}$, mm
55.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04
56.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04
57.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04
58.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04
59.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04
60.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04
61.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04
62.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04
63.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04
64.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04
65.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04
66.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04
67.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04
68.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04
69.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04
70.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04
71.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04
72.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04
73.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04
74.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04
75.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04
76.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04
77.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04
78.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04
79.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04
80.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04
81.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04

4.3.3. Przedmiot obrabiany

W badaniach właściwych szlifowano takie same planarne noże techniczne jak w badaniach rozpoznawczych mających na celu wybór ziarnistości ściernicy. Szczegółowa charakterystyka przedmiotów obrabianych zamieszczona została w podrozdziale 4.1.3.

4.3.4. Ściernice

W badaniach właściwych zastosowano ściernice o jednej charakterystyce, określonej jako najkorzystniejsza na podstawie wyników badań rozpoznawczych. W tabeli 11 zamieszczono oznaczenie i główne parametry techniczne ściernic zastosowanych w badaniach właściwych.

Tab. 11. Oznaczenie i główne parametry techniczne ściernic zastosowanych w badaniach właściwych (www.inter-diamant.com.pl, 2020)

Oznaczenie ściernicy	Wymiary					Skład			
	<i>D</i> , mm	<i>P</i> , mm	<i>T</i> , mm	<i>H</i> , mm	<i>F</i> , mm	Wielkość ziaren wg. FEPA, μm	Koncentracja ziaren, karat/cm ³	Stopień twardości	Spoiwo
5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV	35	22	25	10	15	180/150	4,18	Średni	Ceramiczne

4.4. Metodyka badań eksploatacyjnych ostrzy w procesie cięcia tkanek miękkich

4.4.1. Cel badań

Głównym celem badań eksploatacyjnych procesu skórowania ryb płaskich było określenie okresu trwałości noży planarnych, których geometria ostrza ukształtowana została w najkorzystniejszych warunkach procesu szlifowania, określonych w rezultacie badań właściwych. Najistotniejszym aspektem tej części badań doświadczalnych było przeprowadzenie prób na stanowisku produkcyjnym w warunkach przemysłowych. W rezultacie możliwe było zweryfikowanie w warunkach przemysłowej eksploatacji ostrzy technicznych korzystnych cech noży kształtowanych w zoptymalizowanych warunkach procesu szlifowania określonych w toku wcześniejszych etapów badań.

4.4.2. Parametry i warunki badań

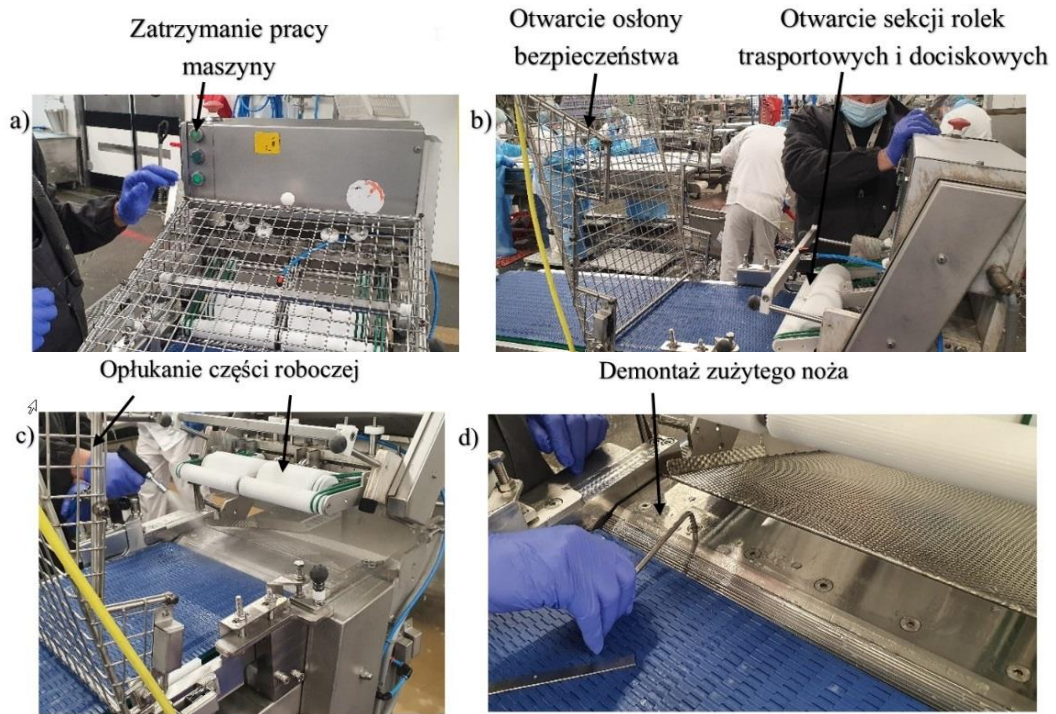
Badania eksploatacyjne noży wytypowanych na podstawie wyników badań właściwych przeprowadzono w warunkach produkcyjnych w zakładzie Espersen Poland Sp. z o.o przy użyciu maszyny skórującej typu Steen Skinning ST 600 (www.steen.be, 2021).

Przed rozpoczęciem stosowania noży w przedsiębiorstwie przetwórstwa spożywczego zostały one poddane procedurze mającej na celu uzyskanie żądanej czystości i sterylności umożliwiającej ich kontakt z żywnością. Przebiegała ona wg następujących etapów:

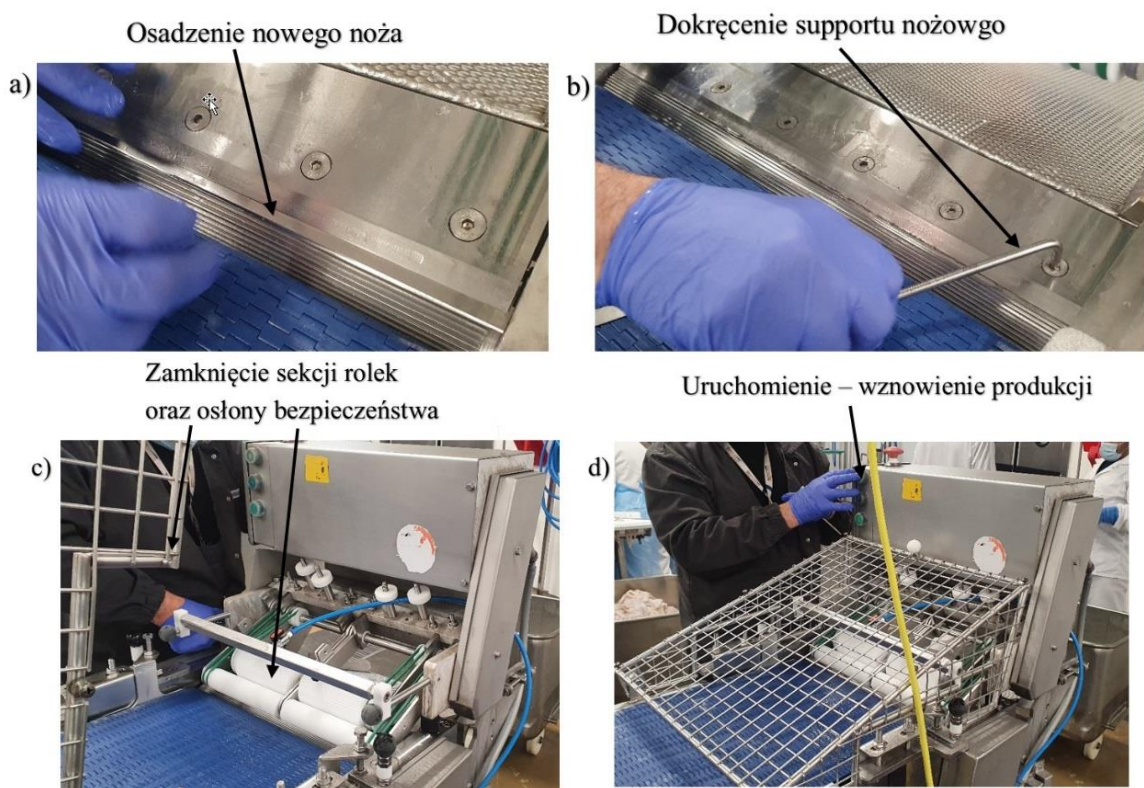
- mycie w roztworze (100 ml środka na 10 l wody) środka chemicznego Diversey Sureclean Plus VK9;
- płukanie pod bieżącą wodą;
- sterylizacja w temperaturze 82-85°C przez co najmniej 10 min;
- naniesienie rozpylonego środka chemicznego na bazie alkoholu Diversey Divodes FG VT29, który jest roztworem gotowym do użycia i odparowuje po krótkim czasie pozostawiając noże w stanie gotowym do użycia w przetwórstwie spożywczym.

Proces skórowania przeprowadzono zarówno dla noży referencyjnych, jak i ukształtowanych w warunkach procesu szlifowania będących wynikiem badań właściwych niniejszej pracy na tej samej partii surowca, w celu wyeliminowania czynników zakłócających mogących wpływać na wynik porównania. Badania eksploatacyjne przeprowadzono zgodnie z poniższym tokiem postępowania:

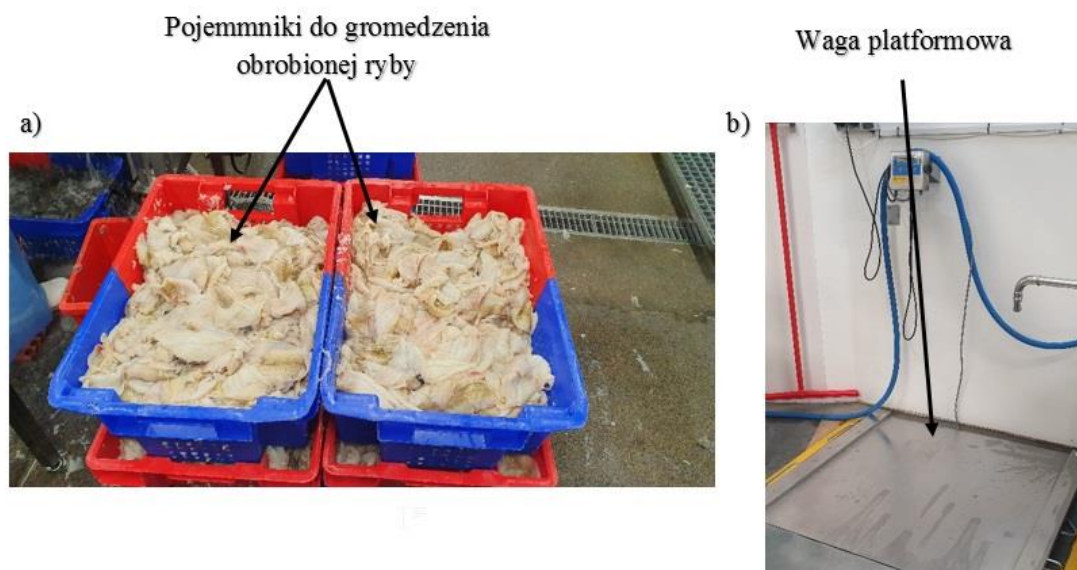
- zatrzymano pracę maszyny odskórzającej – wstrzymano produkcję (rys. 40a),
- uniesiono pokrywę bezpieczeństwa części roboczej (rys. 40b),
- otworzono sekcję rolek dociskowych oraz rolek transportujących (rys. 40b),
- opłukano bieżącą wodą części robocze maszyny odskórzającej z pozostałości przetwarzanego surowca (rys. 40c),
- odkręcono śruby zaciskowe suportu noża i zdemontowano zużyty nóż (rys. 40d),
- osadzono nowy nóż referencyjny o geometrii nr 1 (rys. 41a),
- dokręcono śruby mocujące nowe ostrze (rys. 41b),
- zamknięto sekcję rolek dociskowych i transportowych wraz z osłoną bezpieczeństwa (rys. 41c),
- uruchomiono maszynę skórującą typu Steen Skinning ST 600 (rys. 41d),
- wznowiono produkcję oraz rozpoczęto pomiar czasu,
- podstawiono pusty pojemnik do gromadzenia porcji ryb po procesie odskórzania, który posłużył do określenia wagi obrobionego surowca w jednostce czasu (rys. 42a),
- prowadzono produkcję aż do przekroczenia dopuszczanego udziału pozostałości skóry na obrobionych porcjach filetów rybnych (wewnątrzzakładowe normy dopuszczają maksymalnie 7% pozostałości skóry na obrabianym filecie w odniesieniu do całkowitej powierzchni usuwanej skóry) – rys. 43,
- zatrzymano produkcję oraz zakończono pomiar czasu,
- zwarzono masę obrobionej ryby z użyciem wagi platformowej (rys. 42b) o dokładności pomiaru ± 100 g.



Rys. 40. Wizualizacja toku postępowania podczas demontażu zużytego ostrza na maszynie Steen Skinning ST 600: a) zatrzymanie urządzenia; b) otwarcie części roboczych maszyny; c) opłukanie z pozostałości przetwarzanego surowca i zanieczyszczeń; d) odkręcenie śrub mocujących narzędzie i wyjęcie zużytego noża planarnego



Rys. 41. Wizualizacja sposobu montażu nowego noża i uruchomienia maszyny Steen Skinning ST 600: a) osadzenie noża w suporcie maszyny; b) dokręcenie śrub mocujących nóż; c) zamknięcie części roboczej i osłony bezpieczeństwa; d) włączenie urządzenia do pracy



Rys. 42. Widok narzędzi pomocniczych: a) pojemnik do gromadzenia przetworzonego surowca (filetów po skórowaniu); b) waga platformowa do określenia masy obrobionej ryby dla każdego z testowanych noży planarnych



Rys. 43. Widok fileta rybnego po prawidłowo przeprowadzonym procesie skórowania

Opisane czynności przeprowadzono w ten sam sposób dla 3 noży referencyjnych (nowych) oraz 9 noży ukształtowanych w warunkach procesu szlifowania określonych na podstawie wyników badań właściwych. W tabeli 12 zamieszczono wykaz parametrów oraz warunków otoczenia zastosowanych podczas przetwarzania (skórowania) surowca rybnego. Natomiast w tabeli 13 przedstawiono oznaczenia noży planarnych wytypowanych do badań eksploatacyjnych w procesie cięcia tkanek miękkich (skórowania) wraz z warunkami ich kształtowania w procesie szlifowania.

Tab. 12. Parametry procesu skórowania oraz warunki otoczenia

Temperatura otoczenia	16-18°C
Temperatura wody bieżącej	2-5°C (dysze płuczące maszyny do skórowania oraz stołu do ręcznego filetowania)
Prędkość posuwu przenośnika zasilającego	10 m/min
Prędkość posuwu przenośnika maszyny do skórowania	19 m/min
Wydatek wody dysz płuczących maszyny do skórowania	2,5 dm ³ /min

Tab. 13. Charakterystyka noży planarnych wytypowanych do badań eksploatacyjnych w procesie cięcia tkanek miękkich (skórowania) na podstawie wyników badań właściwych

Lp.	Oznaczenie noża	Warunki chłodzenia i smarowania strefy szlifowania	Parametry kształtowania ostrza w procesie szlifowania
1.	Nóż referencyjny 1	Noże fabrycznie nowe (producent: Kuno Wasser GmbH, Solingen, Niemcy, dla Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia)	
2.	Nóż referencyjny 2		
3.	Nóż referencyjny 3		
4.	Nóż szlifowany (WET) 1	Metoda zalewowa (WET)	Prędkość obrotowa ściernicy: $n_s = 32\ 000$ obr./min Naddatek dla przejścia zgrubnego: $a_{e\ zgr} = 0,10$ mm Naddatek dla przejścia wyiskrzającego: $a_{e\ wy} = 0,02$ mm
5.	Nóż szlifowany (WET) 2		
6.	Nóż szlifowany (WET) 3		
7.	Nóż szlifowany (MQL) 1	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego z użyciem dyszy MQL	Prędkość posuwu wzdłużnego ściernicy: $v_f = 100$ mm/min Kinematyka szlifowania: szlifowanie obwodem ściernicy Liczba przejść zgrubnych dla obu faz ostrza: 1 Liczba przejść wyiskrzających dla obu faz ostrza: 1
8.	Nóż szlifowany (MQL) 2		
9.	Nóż szlifowany (MQL) 3		
10.	Nóż szlifowany (MQL+CAG) 1	Smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego z użyciem dyszy MQL i chłodzenie schłodzonym sprężonym powietrzem z użyciem dyszy CAG	Kierunek ruchu obrotowego ściernicy: prawy – w kierunku osi symetrii noża (do ostrza) Ustawienie kątowne ściernicy w procesie szlifowania obwodem ściernicy: $\alpha_s = 25^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$
11.	Nóż szlifowany (MQL+CAG) 2		
12.	Nóż szlifowany (MQL+CAG) 3		

W badaniach eksploatacyjnych nie uwzględniono noży ukształtowanych w warunkach chłodzenia sprężonym schłodzonym powietrzem z użyciem dyszy CAG ze względu na niekorzystne cechy jakościowe wykazane w rezultacie realizacji badań właściwych.

4.4.3. Charakterystyka ciętych tkanek miękkich

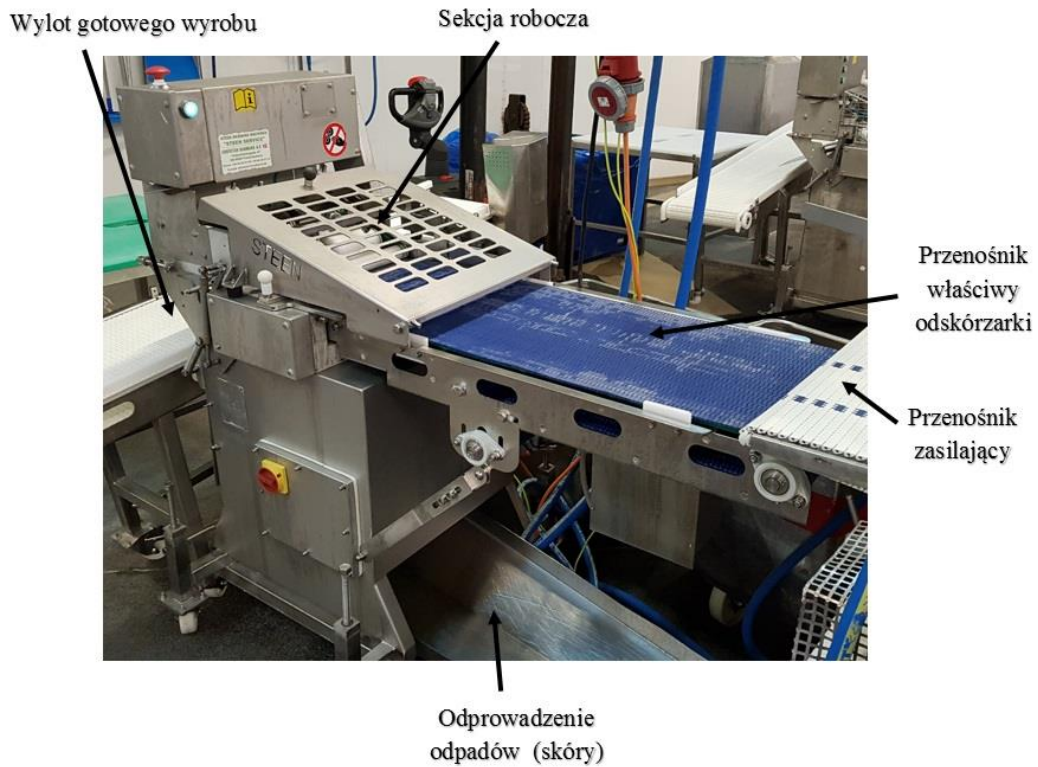
W tabeli 14 przedstawiono szczegółową charakterystykę surowca (filetów z gładzicy *Peuronectes Platessa* i flądry *Platichthys Flesus*) przetwarzanego w procesie skórowania.

Tab. 14. Charakterystyka przetwarzanego surowca rybnego

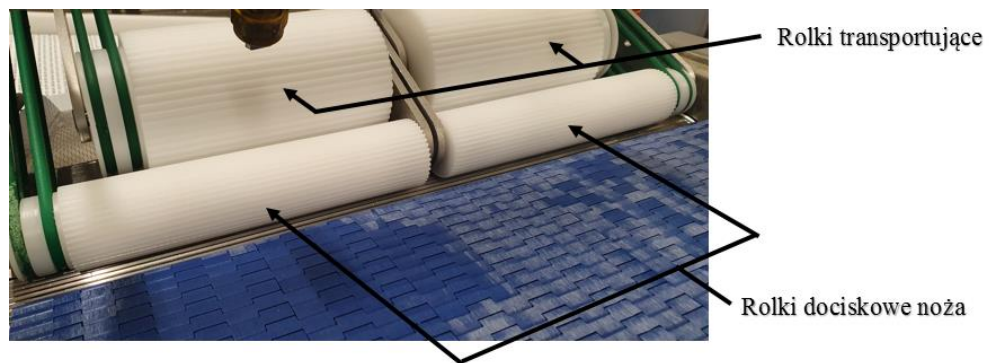
Nazwa	Gładzica cała (<i>Peuronectes Platessa</i>) PLE	Flądra (<i>Platichthys Flesus</i>)
Obszar połowów (pochodzenie)	Morze Bałtyckie; FAO 27 IIID /25; port Kołobrzeg	Morze Bałtyckie; FAO 27 IIID /25; port Kołobrzeg
Waga przed obróbką filetowania (cała ryba)	Przesortowana w przedziale 218-283 g	Przesortowana w przedziale 242-305 g
Waga przed obróbką odskórzania	Pojedynczy filet 90-113 g	Pojedynczy filet 44-51 g
Forma przechowywania	Dostarczona w stanie świeżym (niepoddana procesowi mrożenia na czas transportu)	Dostarczona w stanie zamrożonym (poddana procesowi rozmrażania w zakładzie produkcyjnym)
Temperatura w czasie transportu	0-2°C	-18°C
Temperatur w czasie obróbki	0-3°C	0-3°C
Metoda połowu	Złowiona w morzu metodą włok denny (OTB)	Złowiona w morzu metodą włok denny (OTB)
Okres połowu	Od 16.03.2022 r. do 18.03.2022 r.	Od 21.01.2022 r. do 23.01.2022 r.

4.4.4. Stanowisko przemysłowe do cięcia tkanek miękkich (skórowania)

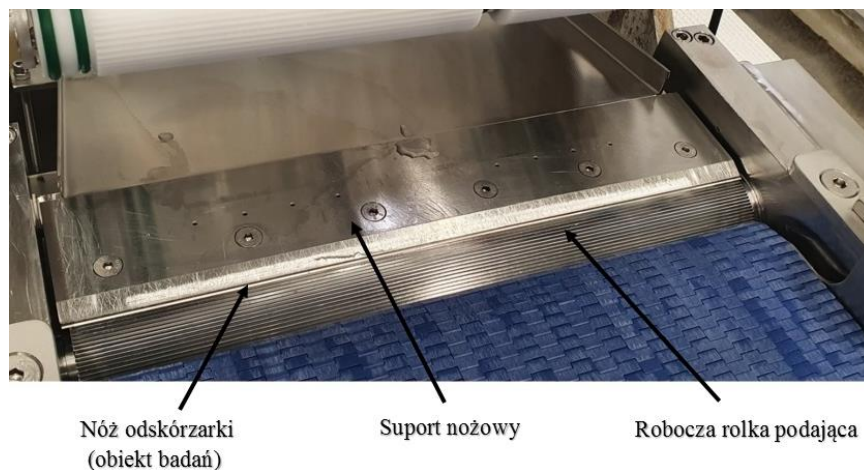
Badania eksploatacyjne noży planarnych przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w maszynę skórującą (odskórzarkę) Steen ST 600 (www.steen.be, 2021), która jest elementem linii technologicznej obróbki ryb płaskich z rodziny flądrowatych (*Pleuronectidae*) znajdującej się w zakładzie produkcyjnym Espersen Poland Sp. z o.o. Na rysunkach 44-46 przedstawiono widok ogólny maszyny do skórowania Steen ST 600 w ciągu technologicznym (rys. 44) oraz widoki szczegółowe jej sekcji roboczej (rys. 45-46).



Rys. 44. Widok ogólny maszyny do skórowania Steen ST 600 na linii produkcyjnej w zakładzie produkcyjnym Espersen Poland Sp. z. o.o.



Rys. 45. Widok maszyny do skórowania Steen ST600 – sekcja robocza w czasie pracy

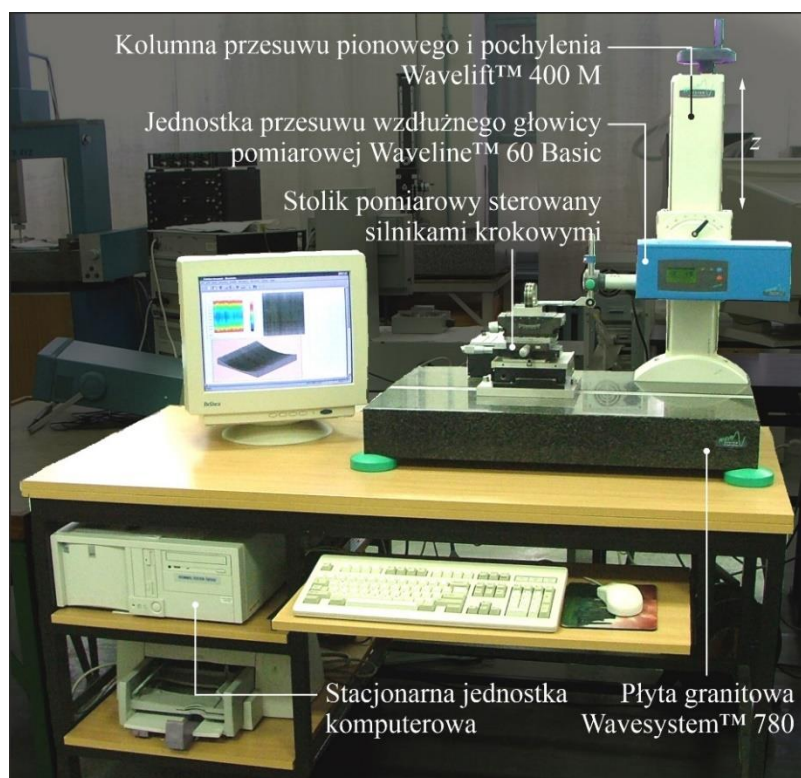


Rys. 46. Widok maszyny do skórowania Steen ST600 – uniesione rolki dociskowo transportowe oraz opis głównych elementów roboczych

4.5. Stanowiska pomiarowe

4.5.1. Stanowisko do pomiarów stykowych struktury geometrycznej powierzchni obrobionych

Pomiar mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH z jednostką przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic (rys. 47).



Rys. 47. Stanowisko do pomiaru profili chropowatości oraz mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH (Kapłonek i inni, 2017)

Pomiarów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) ostrzy noży technicznych dokonywano przy użyciu czujnika indukcyjnego TKL 100/17 z diamentowym ostrzem odwzorowującym w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym równym 90° i promieniu wierzchołka $r = 2,5 \mu\text{m}$.

Podczas badań korzystano z oprogramowania Turbo Roughness for Windows w wersji 3.1 oraz HommelMap Basic w wersji 3.1.0, służącego do sterowania elementami urządzenia (głowica pomiarowa) oraz dokonywania pomiarów. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych mikrotopografii powierzchni zastosowany został program TalyMap Silver 4.1.2, wykorzystujący Mountain Technology™ firmy Digital Surf, który na podstawie wprowadzonych danych wejściowych obliczał wartości parametrów chropowatości powierzchni zgodnych z normą ISO 4287.

4.5.2. Stanowisko do rejestracji obrazów ostrzy noży planarnych po szlifowaniu metodą mikroskopii optycznej

Do akwizycji obrazów cyfrowych powierzchni planarnych ostrzy technicznych zestawiono stanowisko, którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 48.



Rys. 48. Ogólny widok stanowiska do akwizycji obrazów cyfrowych wyposażonego w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. (Nadolny i inni, 2020; Nadolny i inni, 2021; Nadolny i inni, 2021a; Nadolny i inni, 2022)

Głównym elementem stanowiska był wysokorozdzielczy mikroskop cyfrowy Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. (New Taipei City, Taiwan) wyposażony w detektor CMOS (ang. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) o rozdzielczości 5 Mpx (2592×1944 pikseli) umożliwiający obserwację obiektów przy powiększeniu z zakresu 700-900× oraz rejestrację sekwencji wideo (30 klatek na sekundę). Mikroskop był zasilany za pośrednictwem przewodu sygnałowego podłączonego do portu USB komputera przenośnego klasy notebook serii Vostro firmy Dell (Round Rock, Teksas, USA). Mikroskop AM7515MT8A wyposażony był w źródło światła, które stanowiło 8 zintegrowanych diod LED (ang. *Light-Emitting Diode*) charakteryzujących się funkcją elastycznego sterowania intensywnością oświetlenia FLC (ang. *Flexible LED Control*). Pozwalała ona na przełączanie między jasnym polem i oświetleniem koncentrycznym lub ich łączenie. Koncentryczna technologia oświetleniowa jest szczególnie korzystna, gdyż ujawnia szczegóły, które są trudne do obserwacji w normalnych warunkach. AM7515MT8A posiadał funkcję automatycznego odczytu powiększenia AMR (ang. *Automatic Magnification Reading*), która automatycznie wykrywała powiększenie i wyświetlała je w dołączonym oprogramowaniu Dino-Lite Capture

2.0. W tabeli 15 przedstawiono szczegółowe zestawienie najważniejszych parametrów technicznych cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A.

Tab. 15. Parametry techniczne cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. (Nadolny i inni, 2020; Nadolny i inni, 2021; Nadolny i inni, 2021a; Nadolny i inni, 2022)

Oświetlenie	Źródło światła	LED
	Barwa światła	Biała
	Liczba diod	8
	Możliwość przełączania diod	Tak
	Oświetlenie koncentryczne	Tak
	Sterowania intensywnością oświetlenia	Tak
Obiektyw	Powiększenie	700-900×
	Pole obserwacji	0,53 × 0,40 mm
	Minimalna odległość pracy	5,9 mm
	Maksymalna odległość pracy	6,4 mm
	Typ obiektywu	Szkoło z warstwą antyrefleksyjną
Matryca	Typ matrycy	CMOS
	Rozdzielczość	5 Mpx (2592 × 1944 pixeli)
	Klatki na sekundę	30 klatek/s
Kompatybilność	Interfejs	USB 2.0
	System operacyjny	Windows: XP, Vista, 7, 8, 10
	Dołączone oprogramowanie	DinoCapture 2.0
	Obsługiwane formaty plików graficznych	BMP; GIF; PNG; JPG; TIF; RAS; PNM; TGA; PCX; MNG; WBMP; JP2; JPC; PGX;
	Obsługiwany format plików wideo	WMV; FLV; SWF
Obudowa	Materiał obudowy	Aluminium
	Blokada powiększenia	Tak
	Wymiary	10,5 × 3,2 cm (długość × średnica)
	Masa	135 g

Stosowano zakres powiększeń od 758× do 760×, przy wielkości obserwowanego obszaru powierzchni 0,53×0,40 mm. Obrazy rejestrowano w trybie wysokiej rozdzielczości 2592×1944 pikseli i zapisywano w pliku o rozszerzeniu *.tiff.

4.5.3. Stanowisko do rejestracji obrazów metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i przeprowadzania analiz składu pierwiastkowego metodą dyspersji promieniowania rentgenowskiego (EDS)

Do rejestracji obrazów mikroskopowych użyto elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. (rys. 49). Urządzenie to charakteryzowało się następującymi parametrami: zakres powiększeń od $18\times$ do $300\,000\times$, zdolność rozdzielcza od $4,0\text{ nm}$ (tryb wysokiej próżni) do $5,0\text{ nm}$ (tryb niskiej próżni), przy napięciu przyspieszającym 30 kV , ciśnienie w komorze próżniowej od 10 do 270 Pa , napięcie przyspieszające od $0,5$ do 30 kV . Obrazy mikroskopowe charakteryzowały się rozdzielczością 1280×960 pikseli, 8-bitową głębią kolorów, trybem szaroodcieniowym i formatem *.bmp.



Rys. 49. Rys. B.8. Elektronowy mikroskop skaningowy JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. wyposażony w moduł energodispersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments (Kaplonek i Nadolny, 2013; Kaplonek i Nadolny, 2013a; Nadolny i Kaplonek 2015; Nadolny i inni, 2017)

W kolumnie mikroskopu JSM-5500LV zainstalowany był dodatkowy moduł energodispersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) o nazwie INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments (UK). Moduł wyposażony był w detektor typu Si(Li) o średnicy 30 mm^2 i spektralnej zdolności rozdzielczej $< 129\text{ eV}$ (dla linii Mn $K\alpha$). Umożliwiał on jakościową i ilościową analizę pierwiastków o liczbie atomowej $Z > 4$.

5. AUTORSKIE STANOWISKA BADAWCZE I POMIAROWE

5.1. Stanowisko do badań procesu szlifowania ostrzy technicznych

Przeprowadzenie zaplanowanych badań doświadczalnych wymagało zaprojektowania i wykonania specjalnej pięcioosiowej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy noży o niewielkiej sztywności wykorzystywanych w przemyśle spożywczym. Na rysunku 50 przedstawiono widoki urządzenia w trakcie i po zakończeniu budowy.



Rys. 50. Specjalna pięcioosiowa szlifierka CNC do kształtowania ostrzy noży technicznych: a) widok szlifierki w trakcie budowy; b) widok urządzenia gotowego do pracy; c) widok strefy obróbki; d) widok elektrowrzeciona szlifierskiego wraz z uchwytem przedmiotu obrabianego oraz systemem podawania chłodziwa (Zieliński i inni, 2018; Zieliński i inni, 2019; Zieliński i inni, 2019a)

W procesie projektowania stanowiska badawczego określono parametry techniczne niezbędne do prowadzenia pełnego zakresu badań. Zakresy dostępnych przesuwów oraz obrotu w każdej z osi wynikały przede wszystkim z geometrii przedmiotu obrabianego (ostrza technicznego) oraz zarysu jego ostrza. W rezultacie główne założenia techniczno-eksploatacyjne do budowy opisywanego stanowiska szlifierskiego wynikały z założonych celów badawczych oraz wymogów dotyczących geometrii i jakości szlifowanych ostrzy.

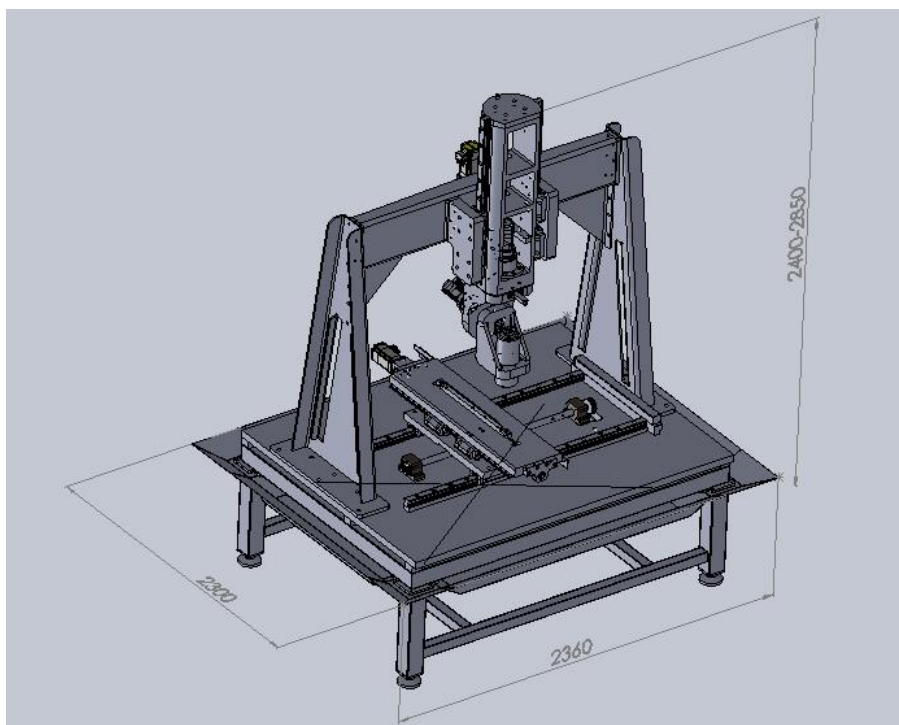
5.1.1. Parametry techniczne

W tabeli 16 przedstawiono podstawowe dane techniczne pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych.

Tab. 16. Parametry techniczne pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych

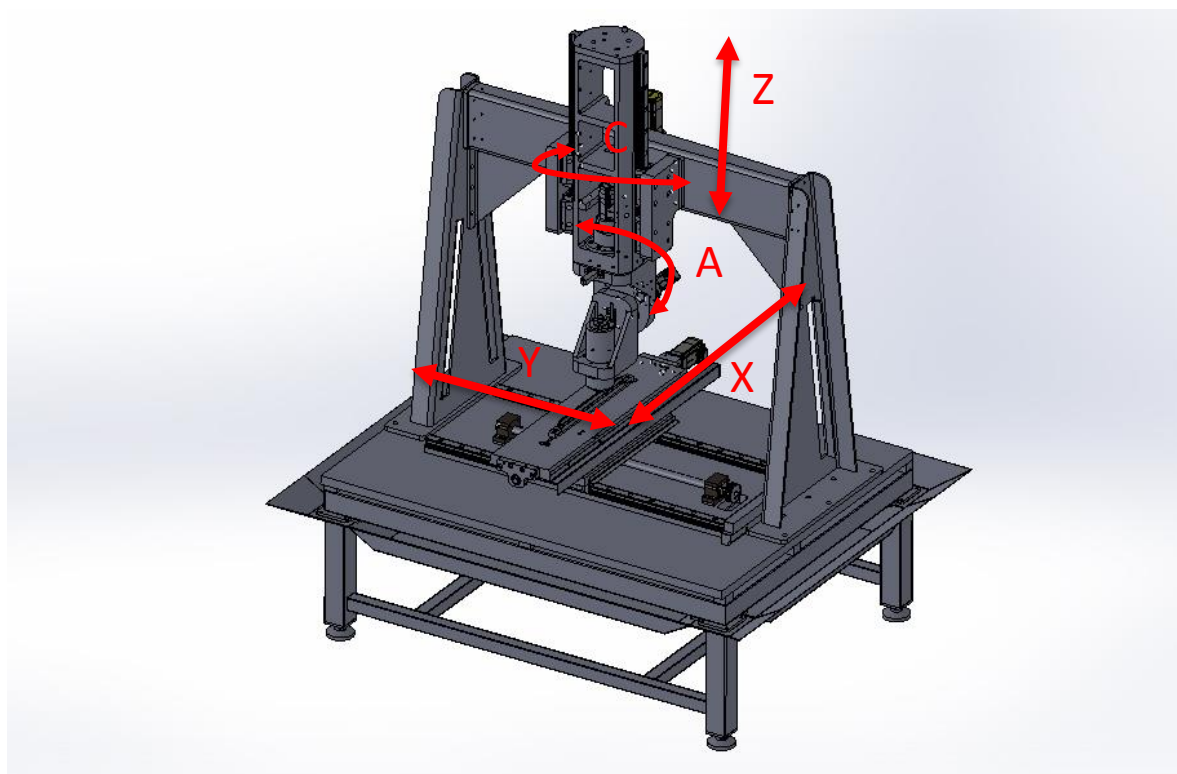
Masa	1200 kg	Przesuw w osi Z	550 mm
Wysokość	2400-2850 mm	Przesuw w osi X	660 mm
Długość	2300 mm	Przesuw w osi Y	1100 mm
Szerokość	2360 mm	Kąt obrotu w osi C	$\pm 180^\circ$
		Kąt obrotu w osi A	$\pm 90^\circ$

Na rysunku 51 przedstawiono rzut modelu pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z naniesionymi jej wymiarami gabarytowymi.



Rys. 51. Widok modelu 3D pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z naniesionymi wymiarami gabarytowymi w mm

Na rysunku 52 zamieszczono schemat kinetyczny szlifierki prezentujący zakres ruchów osi X, Y, Z oraz kierunek obrotów osi A i C.



Rys. 52. Schemat kinetyczny szlifierki z zaznaczonymi kierunkami ruchów osi X, Y, Z oraz kierunek obrotów osi A i C

5.1.2. Zespoły funkcjonalne

W niniejszym podrozdziale zamieszczono charakterystykę najważniejszych zespołów funkcjonalnych, z których zbudowana została opracowana szlifierka.

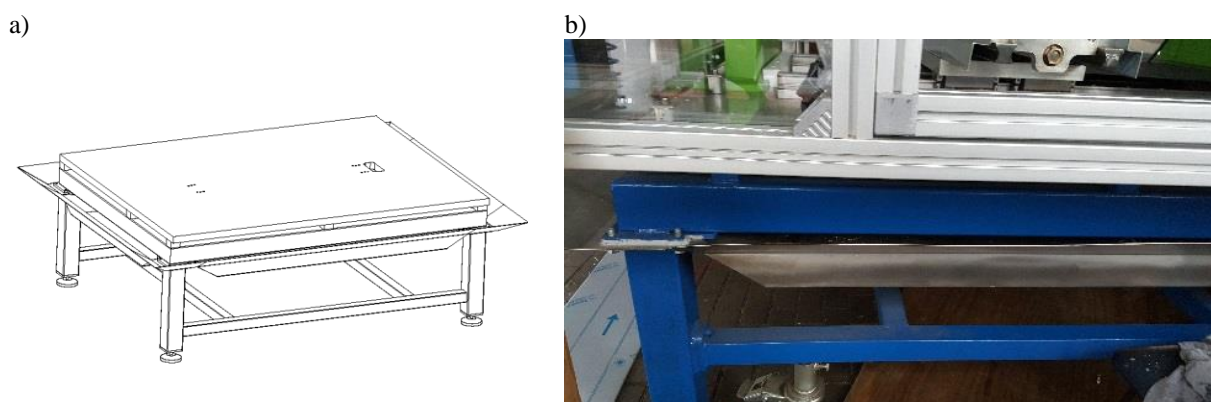
5.1.2.1. Korpusy

Główny korpus dolny

Jednym z kluczowych elementów szlifierki jest korpus dolny, który stanowi bazę całego urządzenia. Poprawność jego wykonania wpływa bezpośrednio na precyzję całego stanowiska. Korpus dolny wykonany został z profili zimnociętych w kształcie kratownicy o przekroju $120 \times 120 \times 6$ mm, które po procesie spawania poddano obróbce odprężającej. Nogi podpierające ramę umieszczono w czterech narożnikach i wykonano je z tego samego profilu o tym samym przekroju. Każda z nóg posiada stopę regulacyjną umożliwiającą wypoziomowanie szlifierki.

Elementem pośrednim pomiędzy ramą a dalszą częścią jest płyta aluminiowa, która jest przykręcona do dolnej części ramy i stanowi bazę montażową dla kolejnych zespołów szlifierki. Dodatkowo korpus wyposażony został w wannę ociekową do zbierania i odprowadzania chłodziwa podawanego do strefy obróbki w procesie szlifowania.

Elementy będące bazą konstrukcyjną całego stanowiska kształtowane były metodą obróbki skrawaniem. Na rysunku 53 przedstawiono widok modelu CAD 3D oraz fotografię korpusu dolnego.

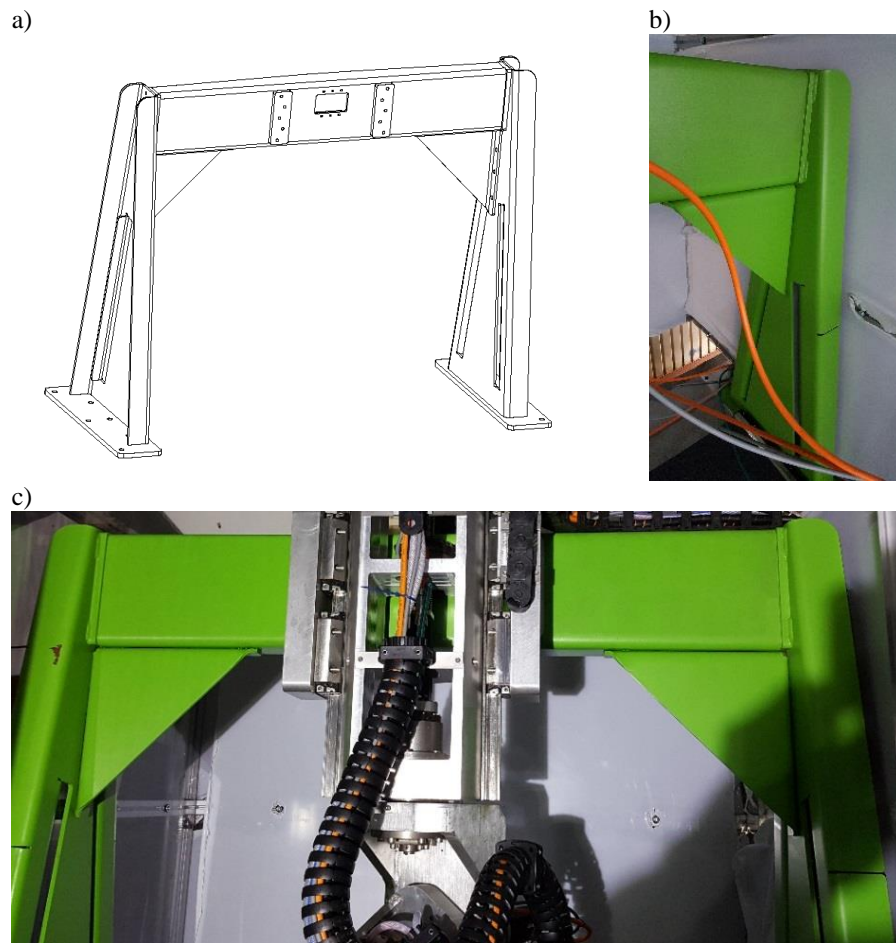


Rys. 53. Widok modelu CAD 3D (a) oraz fotografia (b) korpusu dolnego

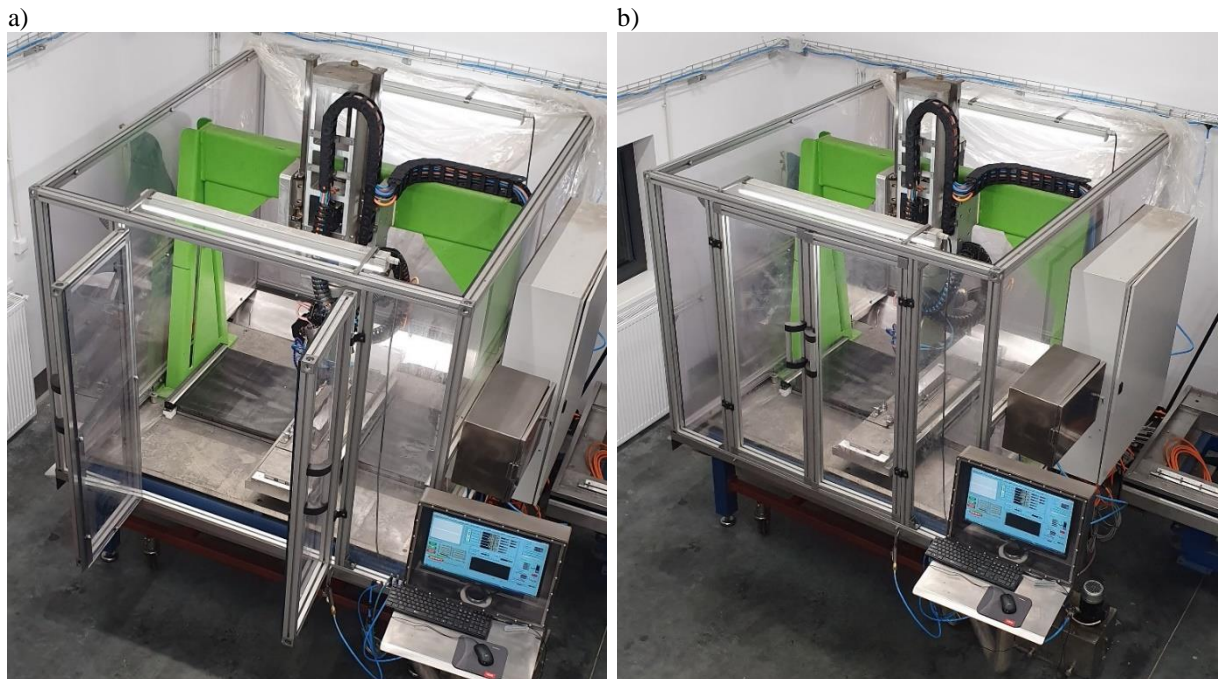
Główny korpus górny

Górny korpus pełni bardzo ważną rolę dla prawidłowej pracy pionowej osi Z oraz towarzyszących jej kolejno osi obrotowych C oraz A obrabiarki. Zbudowany jest w formie bramy dla zapewnienia dużej sztywności w czasie pracy. Składa się z dwóch wsporników bocznych oraz górnej belki skrzyżowanych razem w jedną całość. Posadowiony jest i skrzyżowany do dolnego korpusu. Korpus wykonano z wysokogatunkowej blachy grubości 12 mm ukształtowanej w procesie gięcia dla uzyskania odpowiednio wysokiej sztywności, dobrych parametrów tłumienia drgań oraz wysokiej odporności termicznej. Wszelkie elementy po procesie spawania podano odprężeniu w celu eliminacji naprężeń wewnętrznych a następnie przeprowadzono obróbkę skrawaniem elementów bazowych. Na rysunku 54 przedstawiono widok drutowy modelu CAD 3D (rys. 54a) oraz fotografie (rys. 54b-c) wykonanego korpusu górnego.

W celu zapewnienia właściwego bezpieczeństwa pracy zastosowano klatkę osłonową wykonaną z profili aluminiowych, do których przykręcono płyty transparentnego poliwęglanu o grubości 15 mm. W przedniej części szlifierki znajdują się drzwi umożliwiające obsługę oraz mocowanie obrabianych elementów. Na rysunku 55 przedstawiono widok pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z zamontowaną klatką osłonową.



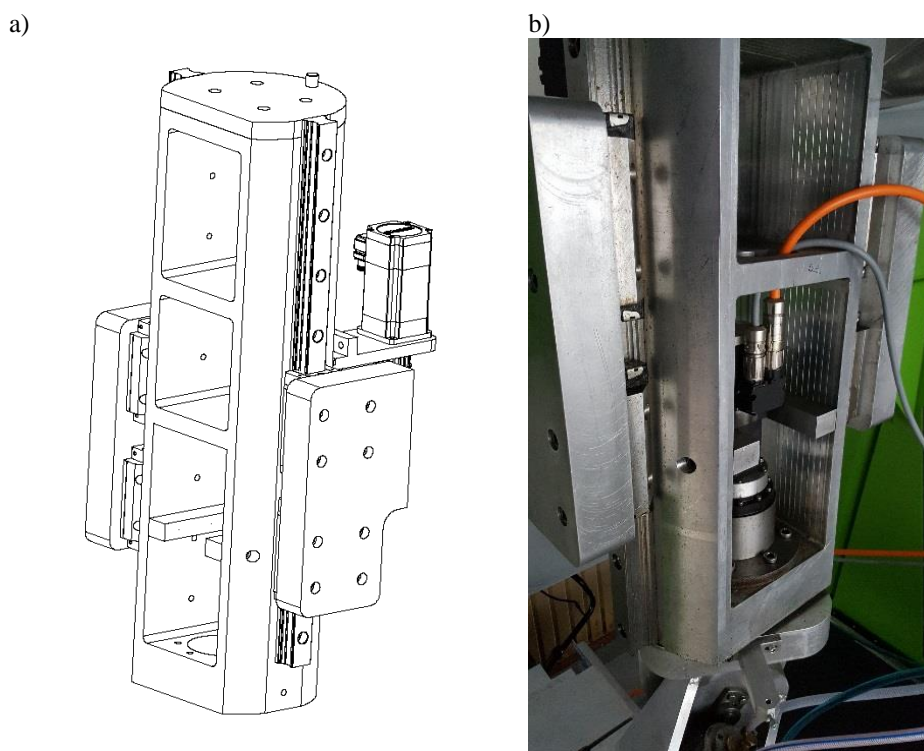
Rys. 54. Główny korpus górny: a) widok aksonometryczny modelu drutowego 3D; b) widok połączenia belki górnej i bocznej korpusu; c) widok ogólny korpusu z zamontowanymi korpusami pomocniczymi



Rys. 55. Widok pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z zamontowaną klatką osłonową: a) widok ogólny z otwartymi drzwiami; b) widok z zamkniętymi drzwiami

Korpus pomocniczy osi Z

Niezwykle ważną funkcję w opisywanej szlifierce pełni pionowy korpus pomocniczy osi Z. Tworzy on integralną część wraz z pozostałymi korpusami osi C i osi A. Wykonany jest z bloku aluminiowego odpowiednio obrobionego dla uzyskania jak najmniejszej masy oraz odpowiedniej sztywności. Do korpusu przykręcone są prowadnice liniowe, które wraz z wózkami liniowymi przymocowane są do głównego górnego korpusu obrabiarki. Na rysunku 56 przedstawiono widok aksonometryczny modelu CAD 3D (rys. 56a) oraz fotografię (rys. 56b) wykonanego korpusu pomocniczego osi Z.

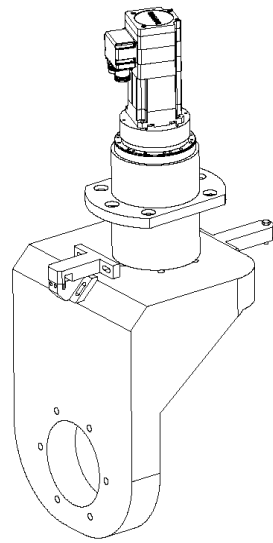


Rys. 56. Korpus pomocniczy osi Z: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami

Korpus pomocniczy osi C

Jedną z dwóch osi obrotowych szlifierki jest oś C. Korpus pomocniczy osi C zamocowany jest do korpusu pomocniczego osi Z, tworząc z nim integralną całość. Korpus wykonany został w całości z wysokogatunkowego aluminium w celu redukcji masy. Odpowiednio zaprojektowane żebra wzmacniające zapewniają mu dużą sztywność konstrukcyjną. Korpus ten stanowi bazę geometryczną dla osi A. Na rysunku 57 przedstawiono widok aksonometryczny modelu CAD 3D (rys. 57a) oraz fotografię (rys. 57b) wykonanego korpusu pomocniczego osi C.

a)



b)

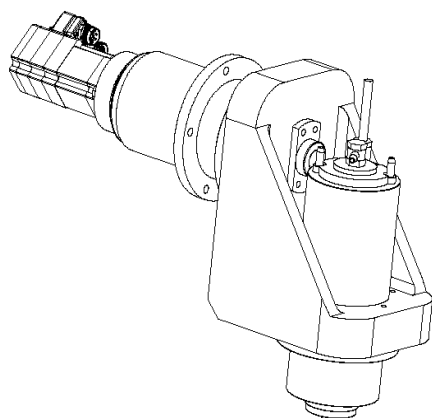


Rys. 57. Korpus pomocniczy osi C: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami

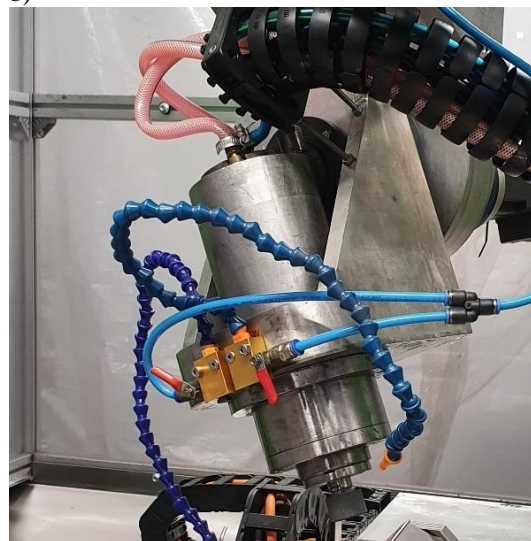
Korpus pomocniczy osi A

Oś A stanowi drugą oś obrotową szlifierki, do której bezpośrednio zamocowane jest wrzeciono ściernicy. Korpus osi A tworzy parę kinematyczną wraz z korpusem osi Z oraz korpusem osi obrotowej C. Podobnie jak w przypadku osi C, korpus wykonany został z wysokogatunkowego aluminium ze względu na redukcję masy oraz odpowiednią sztywność. Korpus pomocniczy jest zarazem bazą montażową dla wrzeciona szlifierskiego. Na rysunku 58 przedstawiono widok aksonometryczny modelu CAD 3D (rys. 58a) oraz fotografię (rys. 58b) wykonanego korpusu pomocniczego osi A.

a)



b)



Rys. 58. Korpus pomocniczy osi A: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami

5.1.2.2. Napęd główny

W opisywanej szlifierce zastosowano bezpośredni napęd główny w postaci elektrowrzeciona szlifierskiego typu PTShPp-30-36Km120 produkcji FŁT Kraśnik SA. W tabeli 17 przedstawiono podstawowe parametry techniczne elektrowrzeciona.

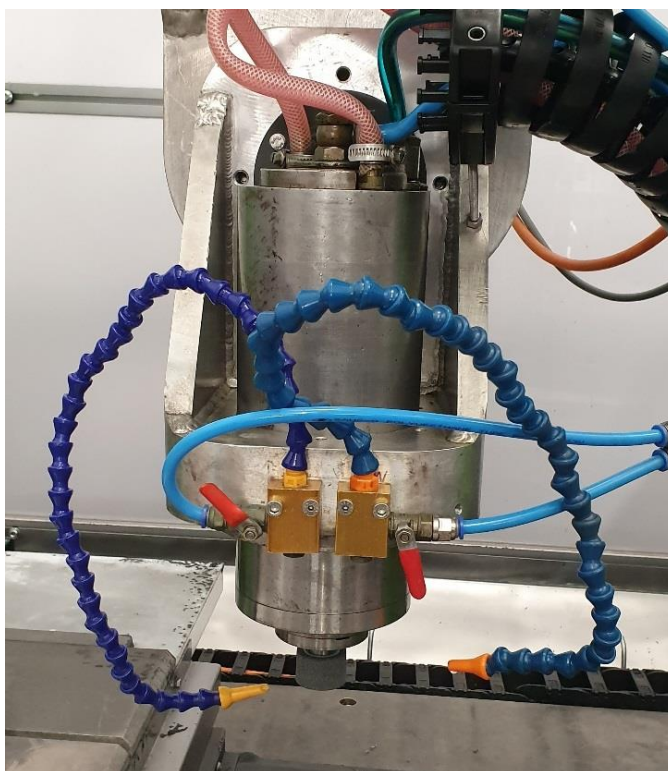
Tab. 17. Parametry techniczne elektrowrzeciona typu PTShPp-30-36Km120 (DTR elektrowrzeciona)

Typ	PTShPp-30-36Km120
Producent	Fabryka Łożysk Toczących Kraśnik SA
Masa	14 kg
Zasilanie	153-183 V
Prędkość obrotowa	30 000-36 000 obr./min
Moc	2,7-3,2 kW
Częstotliwość pracy	500-600 Hz

W opisywanym elektrowrzecionie wirnik silnika jest jednocześnie wrzeciennikiem. Do poprawnego funkcjonowania elektrowrzeciona niezbędny jest dedykowany przemiennik częstotliwości (tzw. falownik) o mocy co najmniej 7,5 kW, z uwagi na wysoki prąd rozruchu rzędu 14 A. Dodatkowymi niezbędnymi elementami elektrowrzeciona są: aparat wytwarzający i podający smarowanie do łożysk elektrowrzeciona w postaci aerozolu powietrzno-olejowego

dedykowany i produkowany przez producenta napędu, a także układ chłodzący. Wymiana narzędzia w elektrowrzecionie odbywa się ręcznie.

Elektrowrzeciono zbudowane jest z silnika asynchronicznego tworząc zwartą konstrukcję odpowiednią dla opracowanej obrabiarki, która zapewnia skuteczne odprowadzanie ciepła w czasie pracy a także w momencie rozruchu. Na rysunku 59 przedstawiono widok elektrowrzeciona zamontowanego w korpusie pomocniczym osi A.



Rys. 59. Widok elektrowrzeciona typu PTShPp-30-36Km120 produkcji FŁT Kraśnik SA zamontowanego w korpusie pomocniczym osi A

5.1.2.3. Układy hydrauliczne i pneumatyczne

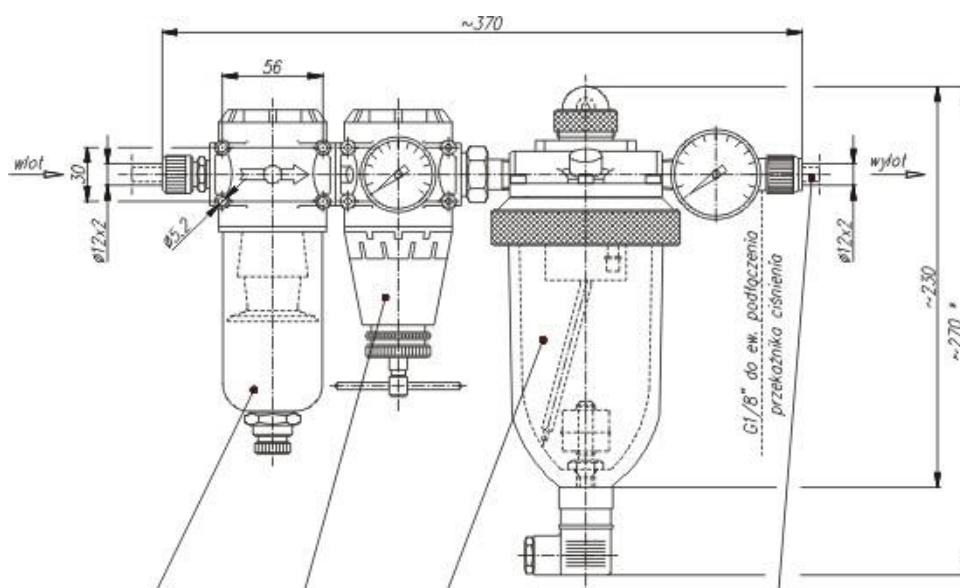
Szlifierka wyposażona jest w układ do wytwarzania aerozolu powietrzno-olejowego, który służy do smarowania łożysk zastosowanego elektrowrzeciona (napędu głównego). Układ ten jest niezbędny do zapewnienia niezmiennych parametrów napędu w czasie jego pracy oraz zapewnia długi czas jego eksploatacji. Zastosowano system typu UDL-5 EP, którego producentem jest firma FŁT Kraśnik SA, ze względu na jego kompatybilność z wybranym typem elektrowrzeciona. Zalecanym przez producenta czynnikiem chłodzącym jest aerozol powietrzno-olejowy na bazie oleju HL-32 w ilości zgodnej z wytycznymi zawartymi w tabeli 18.

Tab. 18. Zalecany przez producenta elektrowrzeciona wydatek czynnika smarującego (DTR elektrowrzeciona)

Zakres prędkości obrotowej wrzeciona		Ciśnienie	Liczba kropli na minutę	Lepkość oleju
Min	Max			
3 500 obr./min	50 000 obr./min	0,10-0,12 MPa	ok. 20	-32 cSt/40°

Na rysunku 60 zamieszczono schemat (rys. 60a) i widok zamontowanego systemu smarowania typu UDL-5 EP produkcji FŁT Kraśnik SA (rys. 60b) a w tabeli 19 jego parametry techniczne.

a)



b)



Rys. 60. System smarowania typu UDL-5 EP produkcji FŁT Kraśnik SA: a) schemat systemu (www.flt24.pl, 2020); b) widok systemu zamontowanego w stanowisku badawczym

Tab. 19. Parametry techniczne systemu typu UDL-5 EP produkcji FŁT Kraśnik SA do smarowania elektrowrzeciona szlifierskiego (www.fl24.pl, 2020)

Ciśnienie na wejściu	0,3-0,7 MPa
Ciśnienie na wyjściu	0,04-0,10 MPa
Dokładność filtracji powietrza	5 μm
Gatunek oleju	HL-32 o lepkości 32 cSt/40°
Zakres regulacji kropłowania	20-100 kropli/min
Pojemność zbiornika rozpylacza	500 cm ³
Masa	~3 kg

Dodatkowym komponentem głównego napędu obrabiarki jest system chłodzący elektrowrzeciono. Odpowiednia ilość płynu chłodzącego w postaci ergolitu skutecznie odprowadza nadmiar temperatury z urządzenia zapewniając jego właściwą pracę. Zastosowany został modułowy układ chłodzący typu EP-18-150K, który zapewnia wydajność przepływu czynnika chłodzącego rzędu 24 dm³/min. Na rysunku 61 przedstawiono widok układu chłodzącego elektrowrzeciono zamontowanego w szlifierce.



Rys. 61. Układ typu EP-18-150K do chłodzenia elektrowrzeciona szlifierskiego

5.1.2.4. Zespoły manipulacyjne osi X, Y i Z

W opracowanej szlifierce występują bardzo istotne połączenia przewodnicowe liniowe w trzech osiach głównych: X, Y i Z. Zgodnie z obowiązującymi trendami do ich budowy zastosowano gotowe elementy toczne. Wszystkie osie posiadają takie same wózki oraz prowadnice. W tabeli 20 przedstawiono najważniejsze parametry wózków liniowych a w tabeli 21 prowadnic liniowych.

Tab. 20. Parametry techniczne wózków liniowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)

Producent	Bosh Rexroth
Typ	FNS
Klasa dokładności	C1 - 2% napięcie wstępne
Rozmiar	45
Kod produktu	R165141

Tab. 21. Parametry techniczne prowadnic liniowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)

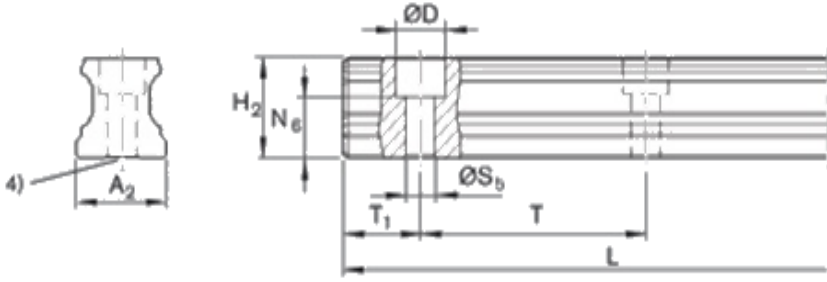
Producent	Bosh Rexroth
Typ	SNS
Klasa dokładności	H
Rozmiar	45
Kod produktu	R160540

Przykładowe widoki zamontowanego układu prowadnic i wózków przedstawiono na rysunku 62, odpowiednio dla osi X (rys. 58a), Y (rys. 58b) i Z (rys. 58c).



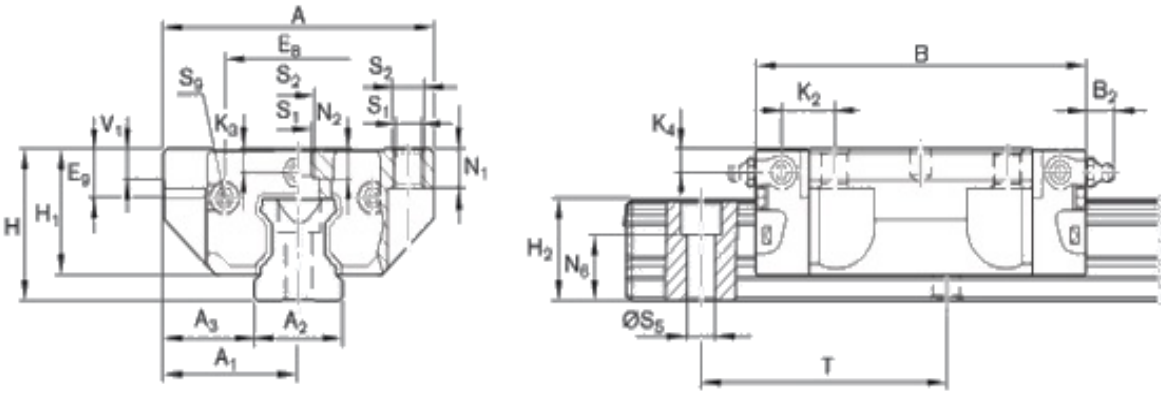
Rys. 62. Układ prowadnic i wózków zamontowanych w specjalnej szlifierce CNC do kształtowania ostrzy technicznych: a) dla osi X; b) dla osi Y; c) dla osi Z

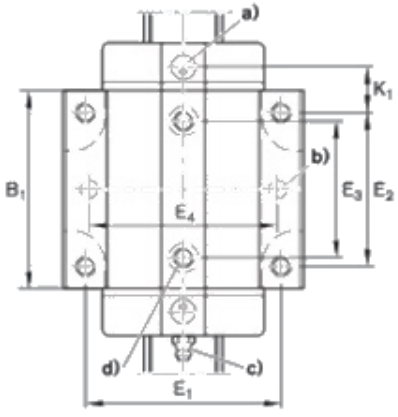
Natomiast na rysunkach 63 i 64 zamieszczono karty katalogowe zastosowanych prowadnic (rys. 63) oraz wózków liniowych (rys. 64).



Rozmiar	Wymiary, mm										Masa
	A_2	D	H_2	L_{max}	$N_6 \pm 0,5$	S_5	T	T_1 min	T_1 s ³	T_1 max	
45	45	20	39,85	3776	23,5	14	105	16	50,5	89	10,5 kg/m

Rys. 63. Karta katalogowa prowadnic liniowych typu SNS firmy Bosh Rexroth zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)



Rozmiar	Wymiary, mm													
	A	A_1	A_2	A_3	B	B_1	E_1	E_2	E_3	E_8	E_9	H	H_1	H_2
45	120	60	45	37,5	137,6	97	100	80	60	69,8	20,9	60	50,3	40,15
	K_1	K_2	K_3	K_4	N_1	N_2	$N_6 \pm 0,5$	S_1	S_2	S_5	S_9	T	V_1	H_2
	17,3	19,3	8,2	8,2	15	12,4	23,5	10,4	M12	14	M4x7	105	10	39,85
45		Masa	Obciążenie, N		Moment obrotowy, Nm									
			C	C_0	M_1	M_{10}	M_L	M_{L0}						
		3 kg	68100	85700	1830	2310	890	1130						

Rys. 64. Karta katalogowa wózków liniowych typu FNS firmy Bosh Rexroth zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)

Do przeniesienia napędu liniowych układów prowadnicowych użyto odpowiednie śruby kulowe wraz z nakrętkami a do napędu zastosowano serwosilniki w konfiguracji pośredniej odpowiednio dla każdej z osi. Dla wszystkich trzech osi użyto takich samych elementów napędowych firmy Bosh Rexroth o średnicy i skoku 32×5. Użyte komponenty charakteryzowały się klasą dokładności T5. W tabeli 22 zamieszczono dane techniczne nakrętek kulowych a w tabeli 23 parametry współpracujących z nimi śrub kulowych.

Tab. 22. Parametry techniczne nakrętek kulowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)

Producent	Bosh Rexroth
Typ	SEM-E-S R151231014
Skok	32×5R
Obciążenie statyczne	40000 N
Obciążenie dynamiczne	25900 N

Tab. 23. Parametry techniczne śrub kulowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)

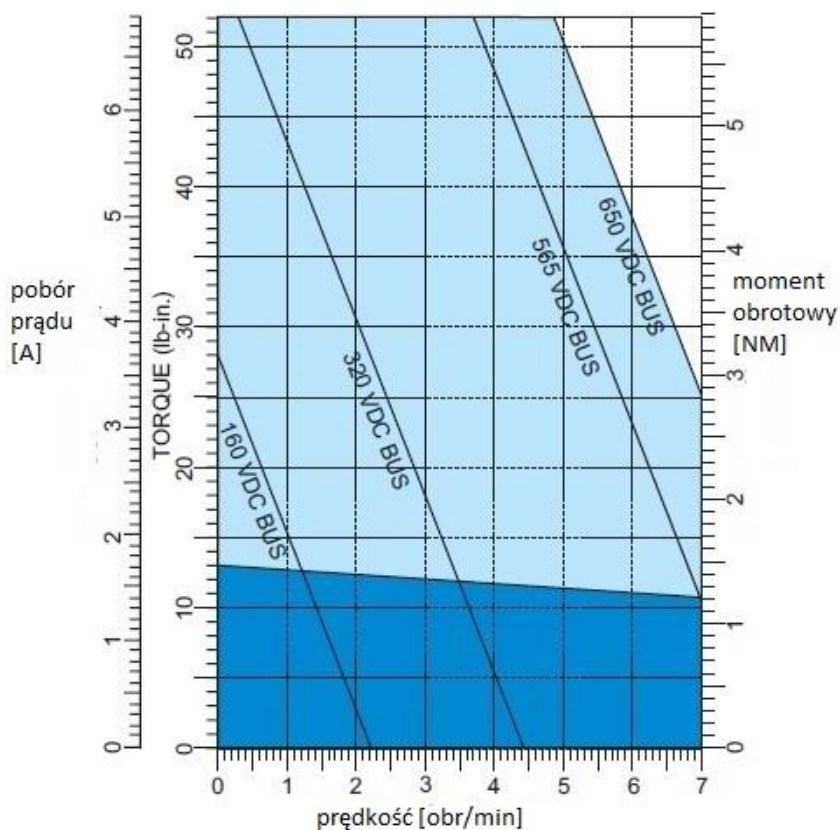
Producent	Bosh Rexroth
Typ	R151131500
Skok	32×5R

Napęd stanowią serwosilniki typu BSM63N-275 firmy Baldor (grupa ABB), które z uwagi na swoją precyzję, wysoki moment obrotowy oraz wbudowany enkoder w pełni zaspokajają potrzeby opisywanej konstrukcji szlifierki. Precyzyjny układ pozycjonowania zawiera enkoder, który zapewnia możliwość sprzężenia zrotnego, a co za tym idzie silniki są również układem pomiarowo-kontrolnym. W tabeli 24 przedstawiono podstawowe dane techniczne zastosowanych serwosilników.

Tab. 24. Dane techniczne serwosilników zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020)

Producent	Baldor (grupa ABB)
Typ	BSM63N-275
Moment obrotowy	1,47 Nm
Przebieżeniowy moment obrotowy	5,88 Nm
Prędkość obrotowa	2130 obr./min

Na rysunku 65 przedstawiono charakterystykę serwośilników typu BSM63N-275 a w tabelach 25-26 ich najważniejsze dane techniczne.



Rys. 65. Charakterystyka serwośilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020)

Tab. 25. Dane techniczne serwośilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020)

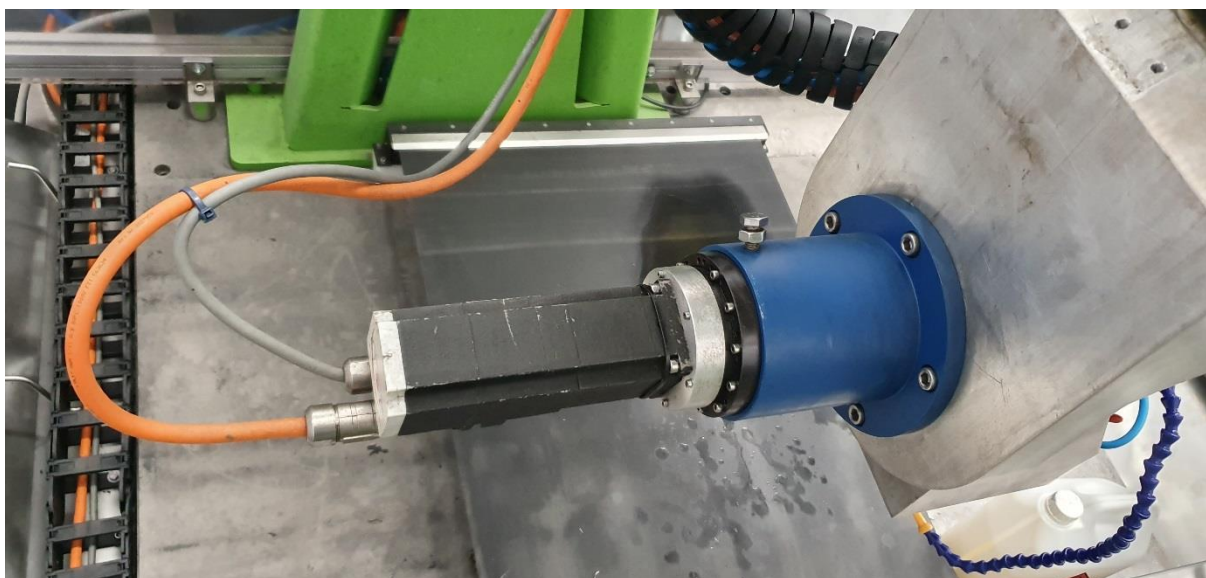
Model	BSM63N-275
Stały moment obrotowy	13 Ib-In
	1,47 Nm
Prąd stały	1,94 A
Maksymalny moment obrotowy	52,02 Ib-In
	5,88 Nm
Prąd maksymalny	6,96 A
Odporność cieplna	1,9 °C/W
Termiczna stała czasowa	19 min
Mechaniczna stała czasowa	0,62 ms
Elektryczna stała czasowa	2,1 ms
Prędkość znamionowa 300 V	4000 obr./min
Prędkość znamionowa 160 V	2130 obr./min

Tab. 26. Parametry elektryczne i mechaniczne serwosilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020)

Model	BSM63N-275
Elektryczne	
Stała momentu obrotowego	7,47 Ib-In/A
	0,844 Nm/A
Napięcie stałe	72,1 Vpk/krpm
	51 Vrms/krpm
Odporność	11,6 Ω
Indukcyjność	24,77 mH
Mechaniczne	
Bezwładność	0,00034 Ib-In-s ²
	0,384 Kg-cm ²
Maksymalna prędkość	10,000 obr./min
Ilość biegunów silnika	4
Masa	5/2,3 lbs/Kg

5.1.2.5. Zespoły manipulacyjne osi C i A

Ważnymi elementami konstrukcji szlifierki są dwie osie obrotowe zwane odpowiednio C i A. Za ich prawidłowe funkcjonowanie (przez które rozumie się precyzyjny obrót) odpowiadają bloki łożyskowe osadzone w specjalnie zaprojektowanych tulejach, które z kolei osadzone są w korpusach pomocniczych osi C i A. Zastosowano tu łożyska stożkowe z odpowiednim napięciem, które zapewniają poprawną realizację tej funkcji. Na rysunku 66 przedstawiono widok tulei dla osi A wraz z zespołem łożyskowym.



Rys. 66. Widok układu napędowego dla osi obrotowej A

Wymagania dotyczące dokładności ruchu elementów wykonawczych wymusiły użycie do napędu osi obrotowych precyzyjnych przekładni falowych. Od kilku lat producenci stosują je z powodzeniem do napędu stołów uchylno-obrotowych, uzyskując w efekcie wysoce bezluzowe układy kinematyczne. Tak jak dla prowadnic i wózków liniowych, również w tym przypadku zastosowano gotowe komponenty, tym razem firmy Harmonic Drive AG – przekładnia falowa typu CPU-25A. W tabeli 27 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące tego komponentu a w tabeli 28 szczegółowe dane techniczne przekładni.

Tab. 27. Podstawowe informacje dotyczące bezluzowych przekładni falowych zastosowanych w budowie osi C i A specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (harmonicdrive.de, 2020)

Producent	Harmonic Drive AG
Typ	CPU-25A
Przenoszony moment obrotowy	108 Nm
Przebieżeniowy moment obrotowy	158 Nm
Przełożenie	1/100

Tab. 28. Szczegółowe dane techniczne bezluzowych przekładni falowych typu CPU-25A firmy Harmonic Drive AG zastosowanych w budowie osi C i A specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (harmonicdrive.de, 2020)

Parametr	Symbol i jednostka	Wartość					
Przełożenie	i	30	50	80	100	120	160
Maksymalny moment obrotowy	T_r , Nm	50	98	137	157	167	176
Średni moment obrotowy	T_a , Nm	38	55	87	108	108	108
Znamionowy moment obrotowy	T_n , Nm	27	39	63	67	67	67
Chwilowy moment maksymalny	T_m , Nm	95	186	255	284	304	314
Maksymalna prędkość wejściowa	$N_{in} (max)$, obr./min	5600					
Średnia prędkość wejściowa	$N_{av} (max)$, obr./min	3500/2575					
Moment bezwładności CPU-M	J_{in} , $\times 10^{-4}$ kgm ²	0,41					
Moment bezwładności CPU-H	J_{in} , $\times 10^{-4}$ kgm ²	1,07					
Moment bezwładności CPU-S	J_{in} , $\times 10^{-4}$ kgm ²	0,32					
Masa CPU-M	m , kg	1,95					
Masa CPU-H	m , kg	2,4					
Masa CPU-S	m , kg	2,5					

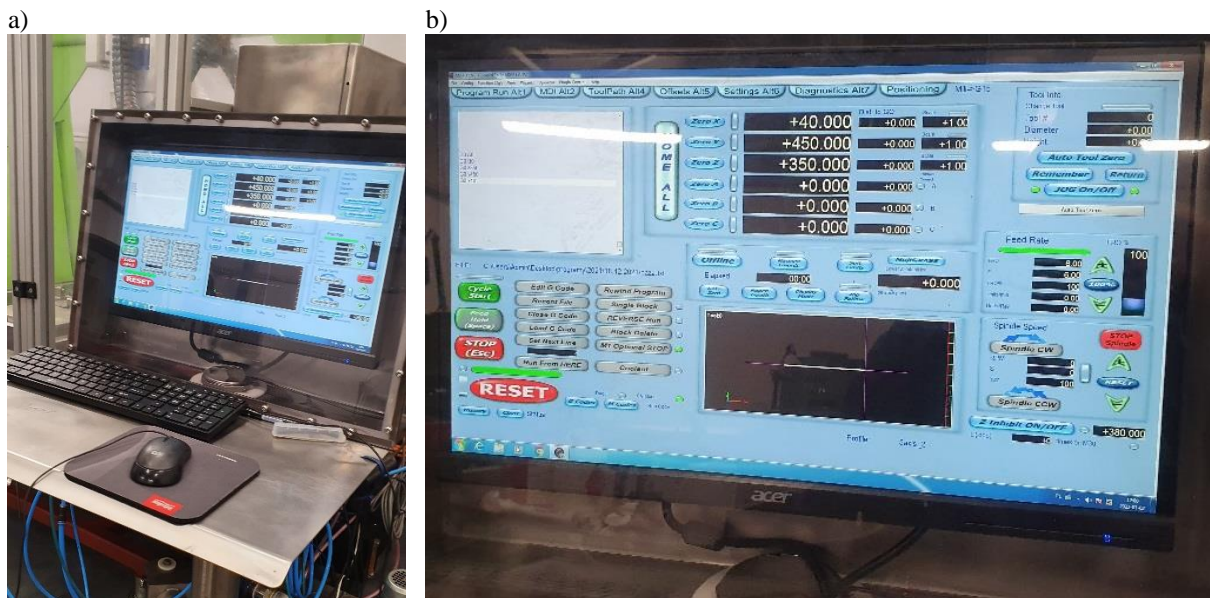
5.1.2.6. Układy sterująco-kontrolne

Do układów sterująco-kontrolnych specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych należy zaliczyć elementy biorące pośrednio udział w sterowaniu pracą obrabiarki (program sterujący Mach 3) oraz sterujące bezpośrednio układy elektryczne (serwowzmacniacze, przetworniki częstotliwości, styczniki itp.) a także elementy pomiarowe (przetworniki impulsowe w serwosilnikach – enkodery, czujniki bazująco-krańcowe poszczególnych osi liniowych i obrotowych itp.).

Program sterujący w postaci G-kodów wprowadzany jest za pośrednictwem aplikacji Mach 3. Za pomocą G-kodów operator może sterować:

- ruchem osi X, Y, Z, C i A uzyskując złożony tor ruchu ściernicy odpowiadający kształtowi przedmiotu obrabianego,
- pracą elektrowrzeciona określając jego prędkość obrotową oraz kierunek obrotów,
- pracą układu chłodzenia strefy obróbki,
- parametrami obróbki, takimi jak: posuw, głębokość warstwy szlifowanej.

Na rysunku 67 przedstawiono widok pulpitu sterującego (rys. 67a) oraz interfejsu operatorskiego programu Mach 3 (rys. 67b) specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych.



Rys. 67. Widok pulpitu sterującego (a) oraz interfejsu operatorskiego programu Mach 3 (b)

Elementy automatyki przemysłowej niezbędne do sterowania pracą szlifierki w większości umieszczone zostały w głównej szafie sterowniczej. Znajdują się w niej między innymi:

- serwowzmacniacze firmy Baldor (grupa ABB) kompatybilne z serwosilnikami tej samej firmy;
- przemiennik częstotliwości (falownik) umożliwiający bezstopniową regulację prędkości obrotowej elektrowrzeciona ściernicy w pewnym zakresie;
- karta sterująca zapewniająca komunikację pomiędzy programem Mach 3 a serwowzmacniaczami poszczególnych osi;
- komputer sterujący z pamięcią wewnętrzną, na którym zainstalowany jest program sterujący, umożliwiający operatorowi pracę w środowisku Windows, zapewniając intuicyjny interfejs;
- pozostałe elementy elektryczne np. styczniki, przekaźniki, zabezpieczenia przeciążeniowe, przewody elektryczno-sygnałowe.

Na rysunku 68 przedstawiono widok wnętrza szafy sterowniczej pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych.

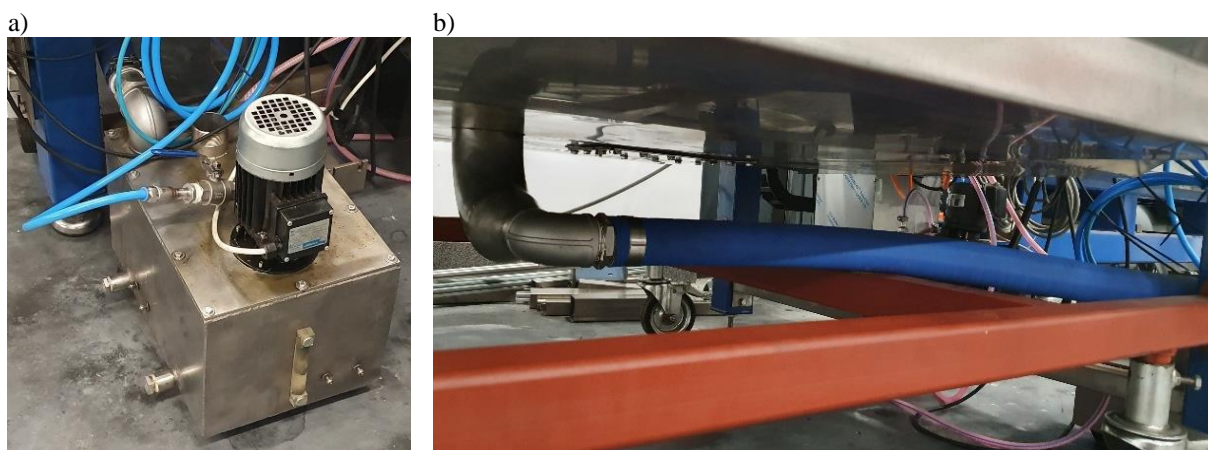


Rys. 68. Widok wnętrza szafy sterowniczej pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych

5.1.2.7. Układy podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania

Układ chłodzenia i smarowania strefy szlifowania metodą zalewową

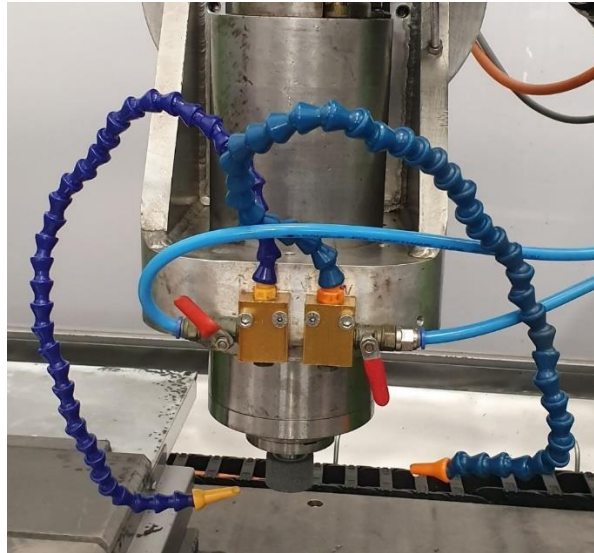
Układ zalewowego podawania płynu chłodząco-smarującego (PCS) do strefy szlifowania został specjalnie zaprojektowany, aby poza funkcją chłodzenia i smarowania strefy obróbki zapewniał również skuteczne oczyszczanie płynu i separację zanieczyszczeń. Na rysunku 69 przedstawiono widok zbiornika, pompy i zaworu regulującego wydatek PCS.



Rys. 69. Widok układu do podawania płynu chłodząco-smarującego: a) widok zbiornika, pompy typu ZV 35 i zaworu regulującego wydatek PCS w procesie szlifowania; b) widok układu powrotu PCS ze strefy obróbki do zbiornika

Zastosowano pompę dozującą typu OSIP ZV 35 o wydajności $30 \text{ dm}^3/\text{min}$ i wysokości podnoszenia do 2 m. Posiada ona przyłącze wyjściowe gwintowane $\frac{3}{4}$ ", do którego zamontowano główny zawór odcinający. Podawanie chłodziwa pomiędzy pompą a dyszami odbywa się za pośrednictwem przewodu o średnicy 12 mm.

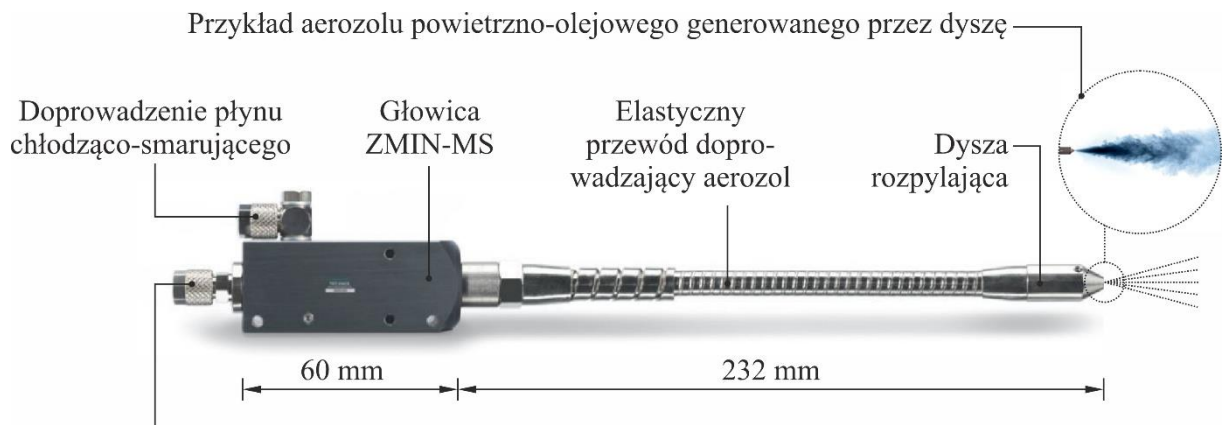
Drugą część systemu podawania chłodziwa stanowią dysze wylotowe umieszczone bezpośrednio w strefie szlifowania (rys. 70). Dysze są elementami handlowymi o średnicy 4 mm. Umożliwiają one przy pełnym otwarciu zaworu dozującego wydatek cieczy chłodząco-smarującej o wartości $Q = 1,87 \text{ dm}^3/\text{min}$ (dla każdej z dysz). Dysze posiadają przyłącza o średnicy $\frac{1}{4}$ " i mają budowę modułową, co daje możliwość ich precyzyjnego ustawienia w relacji do strefy szlifowania. Z uwagi na konieczność wykonania obróbki ostrza z dwóch stron każda z nich ustawiana jest indywidualnie dla poszczególnej strony obróbki. Zapewnia to powtarzalność warunków dostarczania cieczy chłodząco-smarującej do strefy kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym w trakcie przeprowadzania badań.



Rys. 70. Widok dysz podających płyn chłodząco-smarujący do strefy szlifowania

Układ smarowania i chłodzenia strefy szlifowania metodą MQL

Stanowisko badawcze wyposażono również w dyszę rozpylającą typu ZMIN-MS, (rys. 71) przez którą sprężone powietrze pod ciśnieniem 0,8 MPa transportowało do strefy szlifowania czynnik smarujący ze zminimalizowanym wydatkiem wynoszącym 1100 ml/h. W rezultacie w dyszy rozpylającej wytwarzany był aerozol powietrzno-olejowy, w którym jako czynnik smarujący zastosowano olej pod nazwą Cimtech[®] MQL firmy CIMCOOL[®] Fluid Technology wchodzącej w skład Milacron LLC.



Wlot sprężonego powietrza (0,5-0,8 MPa)

Rys. 71. Widok układu do podawania do strefy szlifowania aerozolu powietrzno-olejowego ze zminimalizowanym wydatkiem (zgodnie z założeniami metody MQL)

Układ chłodzenia strefy szlifowania dyszą CAG

W strefie roboczej szlifierki zamocowano również dyszę CAG (ang. *Cold Air Gun*) typu Vortec 610 wyposażoną w dwuwylotowy elastyczny przewód umożliwiający precyzyjne skierowanie strumienia schłodzonego sprężonego powietrza w ściśle określony obszar strefy

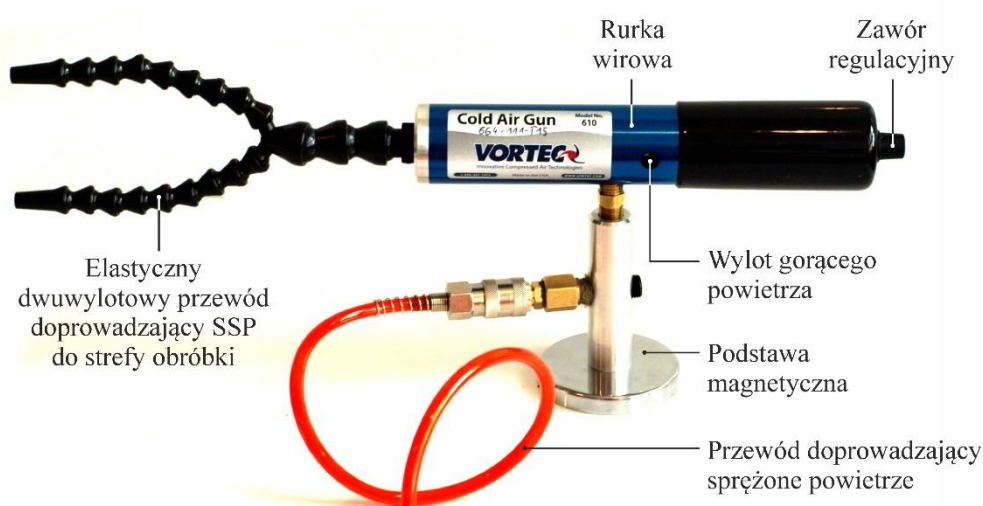
szlifowania. Średnica pojedynczego otworu końcówki przewodu dyszy CAG wynosiła 6,3 mm. Dysza CAG była zasilana sprężonym powietrzem o ciśnieniu roboczym wynoszącym 0,6 MPa. Ustawienie pokrętki regulacji dyszy CAG w pozycji średniej umożliwiło obniżenie temperatury powietrza przy wylocie z przewodu do blisko -5°C . Tak nastawiona dysza Vortec 610 podawała strumień SSP z sumarycznym wydatkiem (obliczonym dla dwóch wylotów) wynoszącym $49,8 \text{ dm}^3/\text{min}$ ($0,00083 \text{ m}^3/\text{s}$) (Kieraś, 2018).

Dysza Vortec 610, jak podaje producent, charakteryzuje się wydajnością chłodzenia w granicach 264 W, przy wydatku powietrza rzędu $57\text{-}425 \text{ dm}^3/\text{min}$ (tab. 29). Ponadto dysza Vortec 610 umożliwia wytworzenie strumienia schłodzonego sprężonego powietrza o temperaturze do nawet $55,6^{\circ}\text{C}$ mniejszej w porównaniu z temperaturą powietrza, które zasila dyszę.

Tab. 29. Dane producenta dotyczące wybranych parametrów dyszy Vortec 610

Moc chłodzenia, W	Wydatek powietrza, dm^3/min	Najmniejsza osiągnięta wartość temperatury, $^{\circ}\text{C}$	Natężenie przepływu powietrza, dm^3/min	Masa urządzenia, kg
264	425	-23	57-425	1,4

W skład wyposażenia dyszy Vortec 610 wchodził elastyczny dwuwylotowy przewód służący do doprowadzania schłodzonego sprężonego powietrza do strefy obróbki i podstawa magnetyczna, umożliwiająca łatwą instalację dyszy w obszarze roboczym szlifierki (rys. 72).

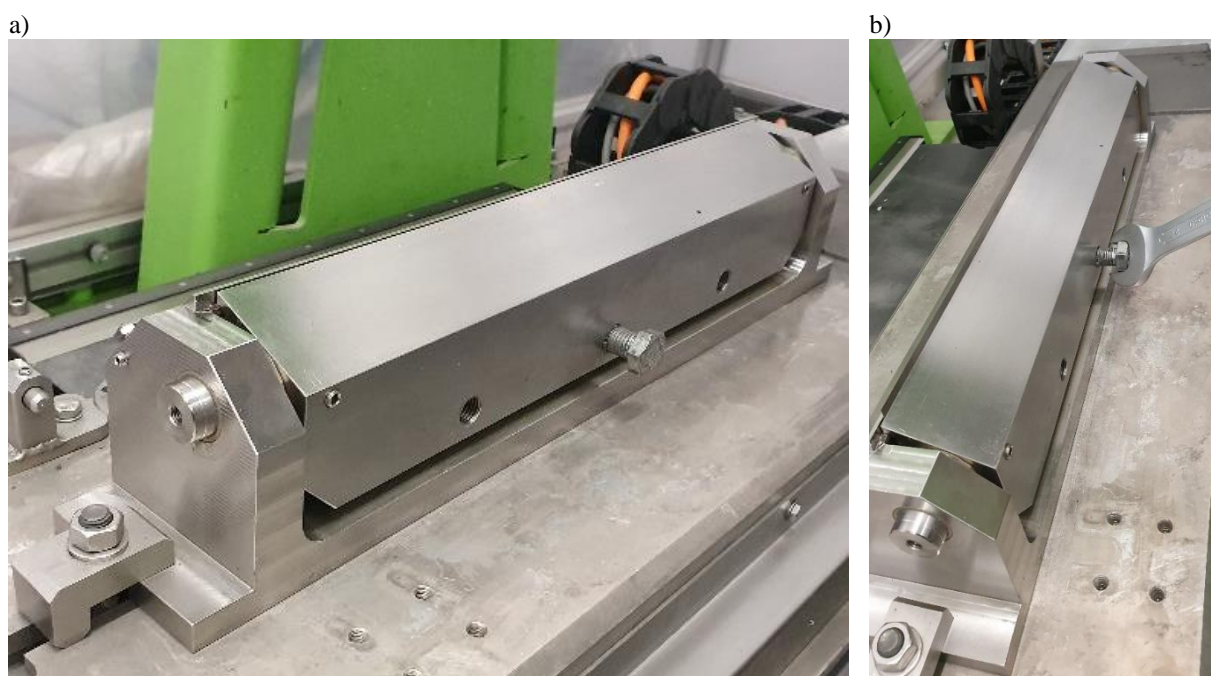


Rys. 72. Elementy funkcjonalne dyszy typu Vortec 610 (Kieraś, 2018)

5.1.2.8. Uchwyt przedmiotu obrabianego

Ważną rolę w ostrzeniu (regeneracji) ostrzy odgrywa właściwie zaprojektowany i wykonany uchwyt mocujący. Bardzo istotna jest powtarzalność procesu, precyzja bazowania przedmiotu, właściwa sztywność w całym procesie oraz zapewnienie odpowiedniego dostępu ściernicy do szlifowanego przedmiotu. W tym konkretnym przypadku ww. uchwyt jest wykonany tylko do danego typu ostrza.

Uchwyt jest bazowany i mocowany do stołu obrabiarki za pomocą łap mocujących, natomiast przedmiot obrabiany zaciskany jest za pomocą szczęki zaciskowej poprzez dokręcenie śruby (rys. 73b). Na rysunku 73 pokazano dwa stany uchwytu: w stanie zwolnionym bez obrabianego ostrza (rys. 73a) oraz w momencie montażu przedmiotu i widocznym sposobem zaciśnięcia ostrza (rys. 73b).



Rys. 73. Widok uchwytu mocującego przedmiot obrabiany: a) bez zamocowanego ostrza; b) z zamontowanym ostrzem (przedstawiono sposób unieruchomienia ostrza)

5.1.3. Podsumowanie

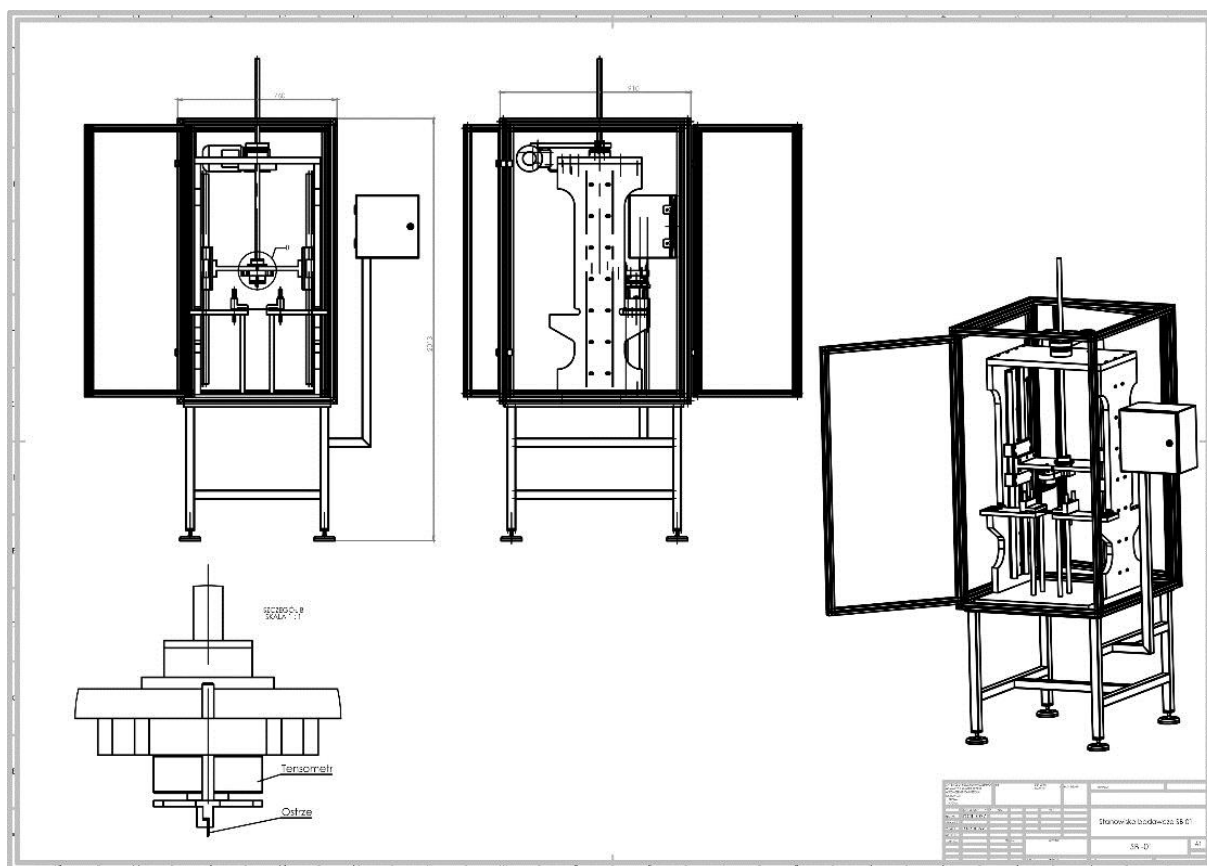
Opracowana i wykonana pięcioosiowa specjalna szlifierka CNC do kształtowania ostrzy technicznych jest urządzeniem prototypowym. Przeprowadzone próby potwierdziły poprawność realizacji żądanych funkcji oraz spełnienie założeń techniczno-eksploatacyjnych, dając tym samym możliwość prowadzenia prac badawczych w zakresie szlifowania ostrzy technicznych zmierzających do rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego niniejszej rozprawy.

5.2. Stanowisko do pomiaru siły cięcia

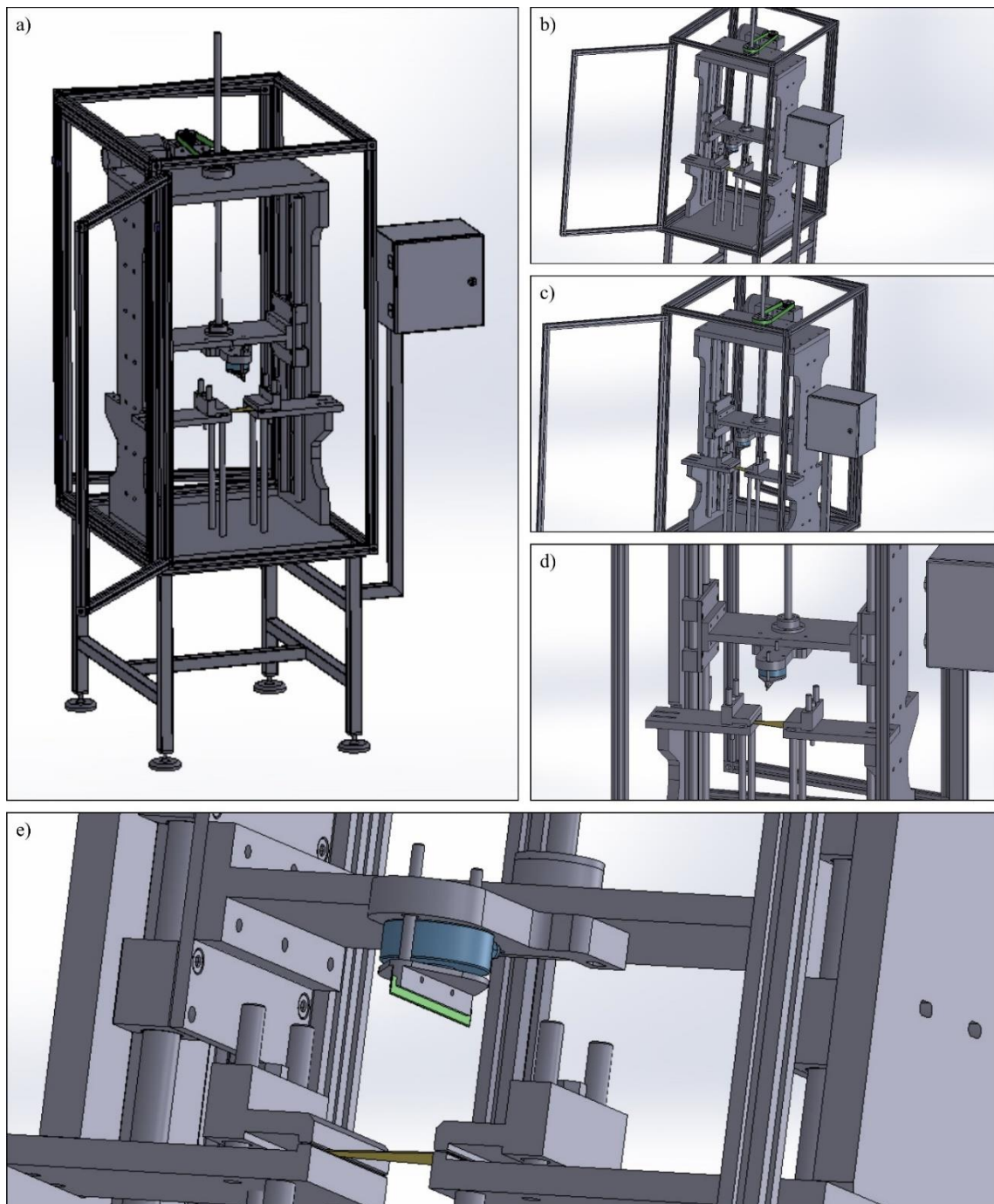
Niniejsza praca dotyczy procesu skórowania ryb płaskich, który realizowany jest w warunkach przemysłowych z prędkością posuwu surowca rzędu 100-300 mm/s. Dlatego zdecydowano się na opracowanie autorskiej konstrukcji stanowiska testowego, które umożliwiłoby ocenę ostrości (poprzez pomiar siły cięcia) różnych rodzajów ostrzy technicznych stosowanych w procesie skórowania ryb przy zachowaniu warunków jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistego procesu skórowania. Przy projektowaniu i wykonywaniu stanowiska testowego wykorzystano wiedzę zawartą w źródłach literaturowych zacytowanych w podrozdziale 2.5. niniejszej rozprawy, dotyczącym znanych metod oceny ostrości ostrzy technicznych.

5.2.1. Opis budowy stanowiska do pomiaru siły cięcia

Na rysunku 74 i 75 przedstawiono opracowany projekt konstrukcyjny stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego. Założono w nim zastosowanie mostka tensometrycznego oraz sterowanego numerycznie napędu posuwu ostrza.



Rys. 74. Widok fragmentu dokumentacji wykonawczej (rysunku złożeniowego) zaprojektowanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego

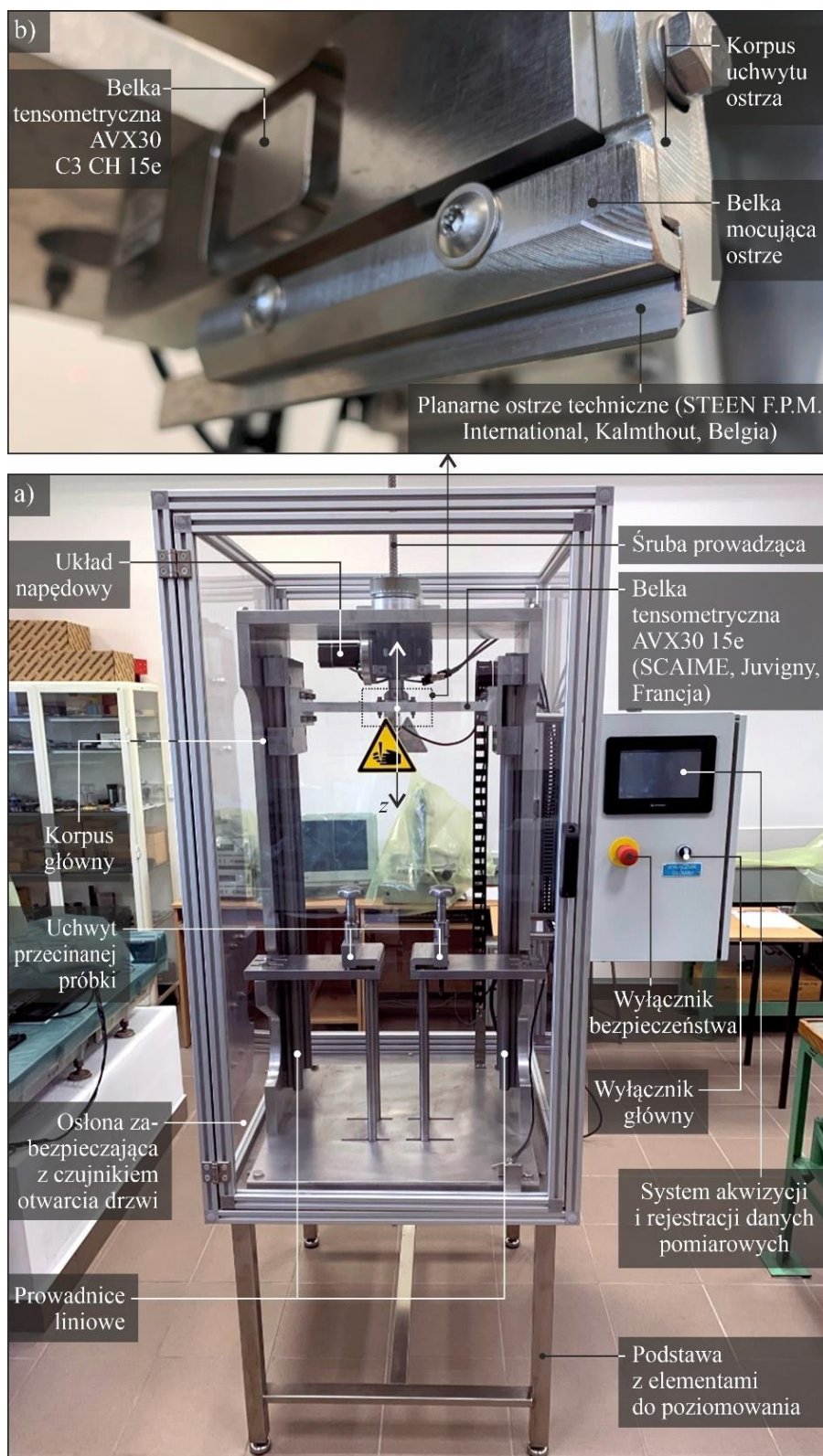


Rys. 75. Widok modelu 3D zaprojektowanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego: a) widok ogólny; b-e) widoki szczegółów konstrukcji

Opracowane oryginalne stanowisko pomiarowe wyposażone zostało w uchwyt do mocowania próbek i ostrzy tnących oraz interfejs operatorski, z którego można zadawać określoną prędkość przecinania próbek v_{fc} . Na opracowanym stanowisku można zatem badać wpływ następujących zmiennych procesu cięcia:

- prędkości cięcia v_{fc} ,
- rodzaju oraz geometrii ostrza,
- rodzaju i kształtu ciętego materiału.

Na rysunku 76 przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego do oceny siły cięcia ze wskazanymi najważniejszymi modułami funkcjonalnymi (rys. 76a) oraz widok sposobu zamocowania ocenianego ostrza (rys. 76b).



Rys. 76. Widok ogólny stanowiska badawczego do oceny siły cięcia ze wskazanymi najważniejszymi modułami funkcjonalnymi (a) oraz widok sposobu zamocowania ocenianego ostrza (b) (Zieliński i inni, 2021)

Praca stanowiska pomiarowego polega na wprowadzeniu w jednostajny ruch posuwowy mostka pomiarowego z zamocowanym ostrzem. Napęd mostka pomiarowego realizowany jest poprzez ruch obrotowy silnika i przekładni, który za pośrednictwem nakrętki i śruby napędowej zamieniany jest na ruch liniowy w osi Z zwany ruchem posuwowym f . Prędkość cięcia v_{fc} mostka pomiarowego można zadawać w bardzo szerokim zakresie wartości (1-400 mm/s), natomiast ruch ustawczy (powrotny) jest stały i nie podlega zmianie.

Podstawą stanowiska do pomiaru siły cięcia jest stabilna rama wykonana z profili nierdzewnych o przekroju 40×40 mm i grubości ścianki 2 mm. Posadowiona ona została na czterech stopach M12, antywibracyjnych z możliwością regulacji. Błat górny wykonany został z blachy nierdzewnej o grubości 10 mm i stanowi element montażowy dla pozostałych modułów stanowiska.

Korpus główny stanowiska (do którego zamocowane są elementy wykonawcze) wykonany został z blachy aluminiowej o grubości 20 mm. Poszczególne elementy zamocowane są za pośrednictwem śrub M10 tworząc sztywną konstrukcję dla prowadnic liniowych, układu napędowego oraz uchwytów badanych próbek.

Prowadnice liniowe są elementami, wzdłuż których wykonywany jest główny ruch roboczy. Prowadnice zamocowane zostały do korpusu głównego za pośrednictwem śrub, po których poruszają się wózki prowadzące mostek pomiarowy z czujnikiem tensometrycznym oraz badanym ostrzem.

Mostek pomiarowy jest elementem ruchomym, który pełni bardzo istotną rolę w całym stanowisku pomiarowym. Do niego przykręcone zostały wózki prowadzące, umożliwiające ruch prostoliniowy a także przymocowano układ napędowy. Odpowiednio skonfigurowany układ napędowy wprowadza w ruch mostek pomiarowy, na którym zamocowano belkę tensometryczną z uchwytem badanych ostrzy.

Dla uzyskania poprawnych wyników ważne jest właściwe mocowanie przecinanych próbek. Uchwyt próbek pomiarowych wykonany został w postaci szczęk zaciskowych odpowiednio podpartych dla uzyskania dużej sztywności układu. Elementy robocze (szczęki) odpowiednio wyprofilowano i wykonano z blachy aluminiowej PA6, które zaciskane są śrubami M12 z ergonomicznymi pokrętkami dla wygody obsługi.

Stanowisko pomiarowe wyposażone zostało w autorski układ sterowania zbudowany z komponentów dostępnych na rynku, odpowiednio dobranych i skonfigurowanych. Głównym elementem umożliwiającym prowadzenie pomiarów jest belka tensometryczna typu Scaime AVX30 15e (SCAIME – Weighing & Measurement for Industry, Juvigny, Francja) o zakresie obciążenia roboczego 0-15 kg. Dane pomiarowe z belki tensometrycznej przesyłane są do

wzmacniacza sygnału Scaime eNod4-T-DI00-000-SC tego samego producenta. Przetworzony sygnał trafia do sterownika, w którym za pośrednictwem autorskiego oprogramowania jest rejestrowany. Pulpit operatorski bazuje na programowalnym panelu operatorskim USL-050-B05 (Unitronics, Airport City, Izrael) gdzie zadawane są parametry pracy oraz gromadzone są wyniki pomiarów. Po wykonaniu pomiaru zarejestrowane dane można pobrać w formie cyfrowej poprzez port USB i poddać dalszej analizie.

Na rysunku 77a-b przedstawiono szczegóły konstrukcyjne wykonanego stanowiska, a na rysunku 77c-e zamieszczono widok okien dialogowych układu sterowania CNC.



Rys. 77. Widok szczegółów konstrukcyjnych wykonanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego (w trakcie prac kalibracyjnych): a) widok górnego mocowania śruby napędowej i jej napędu; b) widok uchwytu noża technicznego oraz szczęk mocujących przecinaną próbkę; c) widok szafy sterowniczej; d) widok ekranu pomiarowego; e) widok ekranu manualnego sterowania pracą urządzenia

Dla zachowania bezpieczeństwa obsługi stanowisko zostało obudowane osłoną zabezpieczającą dostęp do elementów ruchomych w czasie pracy. Osłona posiada drzwi, które zapewniają dostęp do mocowania badanych ostrzy oraz przecinanego materiału. Zabezpieczenie wykonane jest z profili aluminiowych o przekroju 30 mm, pomiędzy którymi osadzono transparentne płyty poliwęglanowe o grubości 4 mm dla zapewnienia dobrej obserwacji przebiegu próby przecinania.

5.2.2. Parametry techniczne stanowiska do pomiaru siły cięcia

W tabeli 30 przedstawiono najważniejsze parametry techniczne stanowiska do pomiaru siły cięcia.

Tab. 30. Najważniejsze parametry techniczne stanowiska do pomiaru siły cięcia

Parametr	Wartość
Zasilanie	AC 230 V / 50 Hz
Systemy bezpieczeństwa	Czujnik zamknięcia drzwi komory pomiarowej, wyłącznik awaryjny
Panel sterowania	Dotykowy panel sterujący USL-050-B05 (Unitronics, Airport City, Izrael)
Częstotliwość próbkowania tensometru	Interwał 3-4 ms (250-333 Hz)
Zakres obciążenia roboczego belki tensometrycznej	0-15 kg
Wartości posuwu pomiarowego	1-400 mm/s
Jednostka pomiaru siły cięcia	Grain
Interfejs komunikacyjny, transfer wyników pomiarowych	USB-A, poprzez cyfrowy nośnik pamięci flash

5.2.3. Podsumowanie

W celu jak najbardziej wiernego odwzorowania warunków przemysłowych procesu cięcia realizowanego przy przetwarzaniu ryb płaskich zaprojektowano i wykonano specjalne stanowisko testowe charakteryzujące się bardzo dużym zakresem zmienności prędkości cięcia $v_{fc} = 1-400$ mm/s. Wykonane stanowisko testowe charakteryzuje się sterowaniem numerycznym i cyfrową rejestracją danych pomiarowych z dużą rozdzielczością oraz częstotliwością zapewniając pełną powtarzalność prowadzonych pomiarów siły cięcia. Precyzję pomiaru siły cięcia oraz poprawność działania wykonanego stanowiska testowego zweryfikowano poprzez przeprowadzenie badań rozpoznawczych, których wyniki opisano w podrozdziale 6.2. niniejszej rozprawy.

5.3. Stanowisko do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania

Po zakończonym kształtowaniu ostrza planarnego w procesie szlifowania powstaje tzw. *przewinięcie* materiału, które należy usuwać (najczęściej ręcznie) z zastosowaniem osełek, drewna lub skóry. W celu zapewnienia pełnej powtarzalności tego zabiegu, na potrzeby

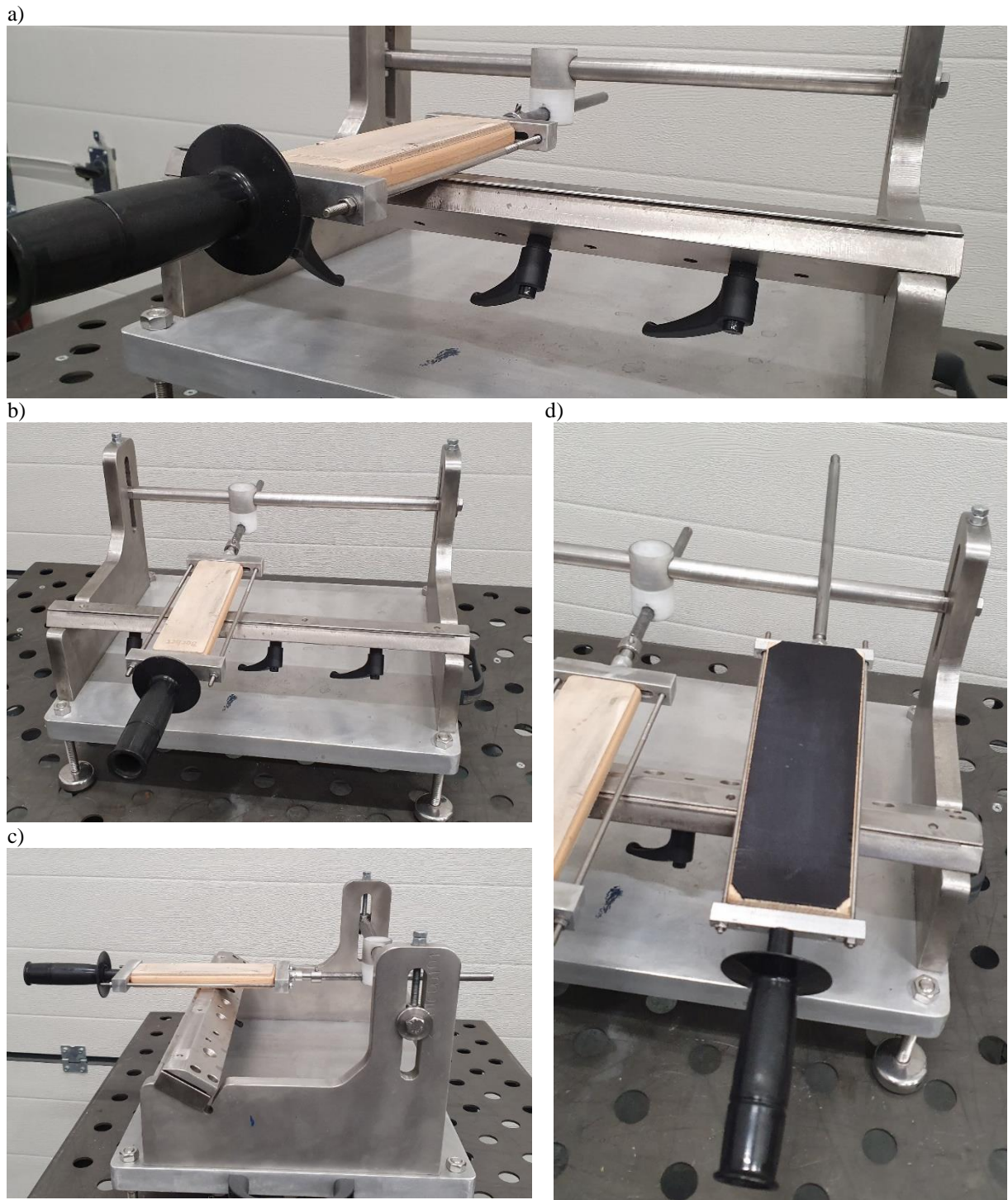
niniejszej pracy doktorskiej opracowano i wykonano specjalne urządzenie. Wyposażone zostało ono w uchwyt obrabianego noża umożliwiający odpowiedni dostęp do ukształtowanego ostrza w celu usunięcia małych wypływek (przewinięć krawędzi) z poprzedzającego procesu. W niniejszej pracy do usuwania przewinięcia zastosowano skórę bydlęcą osadzoną na płaskim drewnianym podkładzie (dostępne w handlu narzędzie przewidziane do tego typu zabiegów). Skóra zaciskana jest przez specjalny uchwyt z prowadnicą, dzięki której ruch suwliwy realizowany jest ze stałym ustalonym kątem względem ostrza. Kąt obróbki może być regulowany w zakresie 15-35°. Ruch roboczy realizowany jest w kierunku od ostrza o kącie większym o około 2° względem powierzchni obrobionej w poprzedzającym procesie. W ten sposób skórzane narzędzie pracuje wyłącznie na relatywnie małym fragmencie ostrza. W ten sposób separuje niespójnie związane elementy małych frakcji metalu od docelowej krawędzi ostrza. Ruch roboczy realizowany jest ręcznie poprzez przesuwanie narzędzia wzdłuż prowadnicy za pomocą ergonomicznego uchwytu.

Proces ten powtarza się kilkakrotnie dla każdej ze stron a liczba cykli zależna jest od parametrów i wyników wcześniejszej obróbki szlifierskiej, kierunku śladów obróbkowych oraz rodzaju użytego narzędzia. W opisywanym zabiegu nie stosowano past polerskich nanoszonych na skórzane narzędzie, gdyż właściwości ściernie pasty powodowałyby dodatkowe usuwanie materiału ostrza. Dodatkowa obróbka spowodowałaby zakłócenia w dalszej analizie krawędzi ostrza ukształtowanej w procesie szlifowania.

Stanowisko badawcze zbudowane zostało z płyt aluminiowych o grubości 20 mm stanowiących solidny korpus, natomiast uchwyt narzędziowy wykonany jest w całości ze stali nierdzewnej. Uchwyt ostrza składa się z dwóch elementów połączonych ze sobą suwliwie za pośrednictwem kołków ustalających. Zaciskanie narzędzia odbywa się trzema śrubami w dolnej części uchwytu gwarantując równomierny zacisk na całej długości ostrza.

Prowadnice poprzeczne i wzdłużne wykonane zostały z prętów o średnicy 16 mm (pręt poprzeczny) i średnicy 12 mm (pręty wzdłużne). Prowadnicę poprzeczną można regulować w pozycji góra-dół jednocześnie zmieniając kąt pracy względem ostrza. Prowadnica wzdłużna połączona przegubowo z prowadnicą poprzeczną dodatkowo skręcona jest na stałe z uchwytem narzędzia.

Na rysunku 78 przedstawiono widok ogólny oraz kilka widoków szczegółowych wykonanego stanowiska w trakcie zabiegu usuwania przewinięcia z ostrza po szlifowaniu.



Rys. 78. Widok stanowiska do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania: a-c) widok ogólny stanowiska w trakcie zabiegu usuwania przewinięcia z ostrza po szlifowaniu; d) widok części roboczej narzędzia – pasa skóry bydlęcej osadzonej na płaskim drewnianym podkładzie

6. BADANIA ROZPOZNAWCZE PROCESU SZLIFOWANIA OSTRZY

6.1. Analiza wyników badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy

Przed przystąpieniem do badań właściwych przeprowadzono badania rozpoznawcze mające na celu określenie wpływu wielkości ziaren ściernych regularnego azotku boru, znajdujących się w ściernicy o spoiwie ceramicznym na wyniki procesu kształtowania ostrzy noży technicznych w procesie szlifowania obwodowego, czołowego oraz szlifowania ściernicą z nakrojem stożkowym. Szczegółowo metodykę tych badań opisano w podrozdziale 4.1. niniejszej rozprawy doktorskiej.

Dla ułatwienia i skrócenia opisu ściernic ocenianych w tej części badań przyjęto zestaw oznaczeń skrótowych ściernic bazujących na najważniejszej różnicy pomiędzy nimi – numerze ziarna ściernego cBN użytego do ich budowy. W tabeli 31 przedstawiono przyporządkowanie oznaczenia technicznego ściernicy do oznaczenia skrótowego przyjętego na potrzeby prezentacji i analizy wyników badań rozpoznawczych, mających na celu wybór ściernicy.

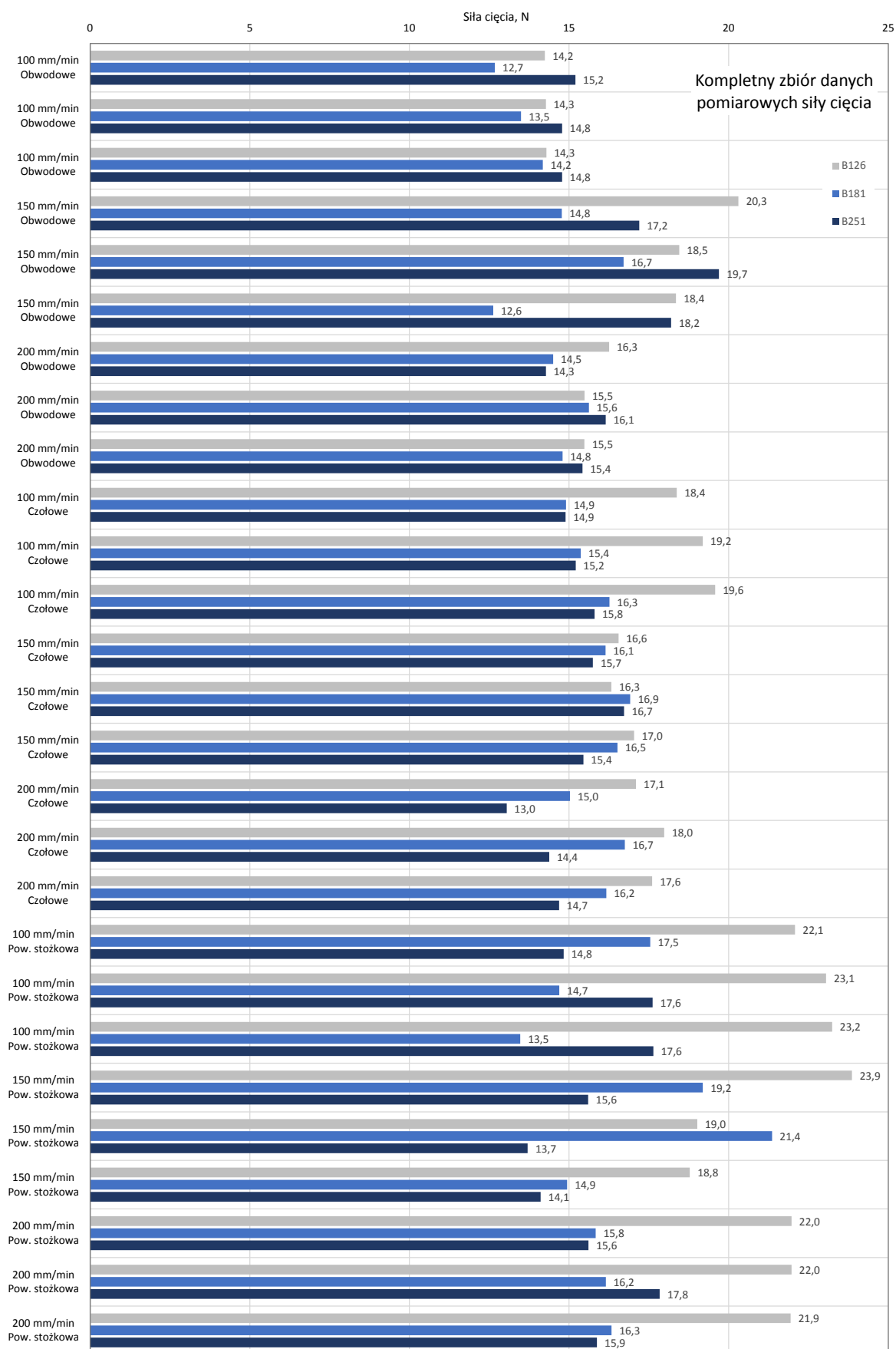
Tab. 31. Wykaz oznaczeń skrótowych ściernicy przyjętych na potrzeby prezentacji i analizy wyników badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy

Oznaczenie techniczne ściernicy	Oznaczenie skrótowe przyjęte w badaniach rozpoznawczych
5A1 35×25×10/22×15 B126 V240 SV	B126
5A1 35×25×10/22×15 B181 V240 SV	B181
5A1 35×25×10/22×15 B251 V240 SV	B251

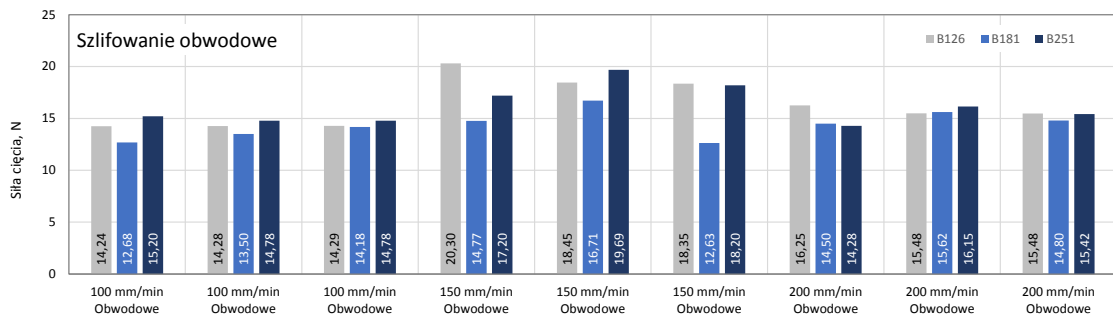
6.1.1. Analiza wartości siły cięcia F

Na rysunku 79 przedstawiono zbiór wszystkich 81 wyników pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania obwodowego, czołowego oraz powierzchnią stożkową, ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251. Dla każdej kombinacji zmiennych warunków szlifowania ukształtowano trzy ostrza (liczba powtórzeń $n = 3$), po czym dla każdego z nich wykonano jeden pomiar siły cięcia na specjalnym stanowisku pomiarowym opisanym szerzej w podrozdziale 5.2. Na kolejnych trzech rysunkach (rys. 80-82) przedstawiono te same wyniki pomiarów osobno dla każdej odmiany kinematycznej procesu szlifowania: szlifowania obwodem ściernicy (rys. 80), szlifowania czołem ściernicy (rys. 81) oraz szlifowania ściernicą z ukształtowaną powierzchnią stożkową (rys. 82).

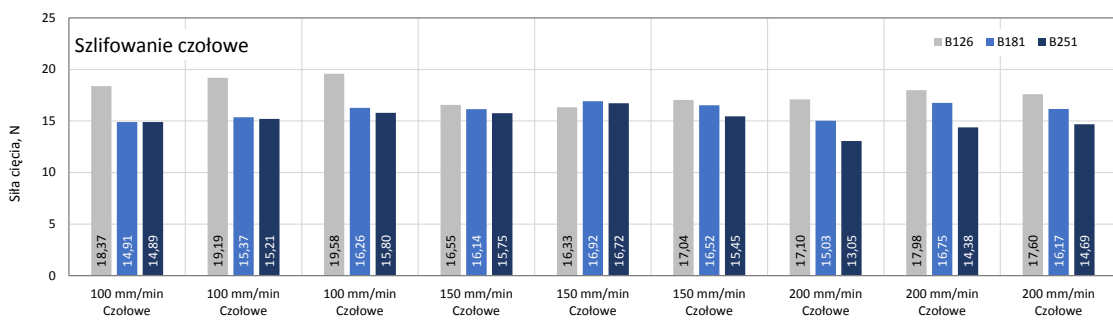
Dla ułatwienia analizy uzyskanych wyników pomiarów siły cięcia sporządzono również wykres przedstawiający jej wartości średnie wyznaczone z pomiarów trzech ostrzy ukształtowanych przy takich samych parametrach procesu szlifowania (rys. 83).



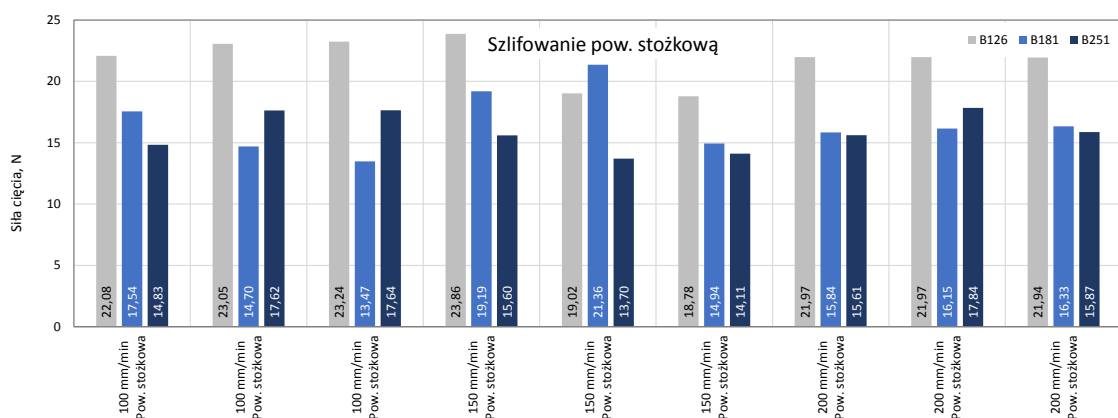
Rys. 79. Zbiór wszystkich wyników pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania obwodowego, czołowego oraz powierzchnią stożkową, ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu $v_f = 100$ mm/s; 150 mm/s i 200 mm/s



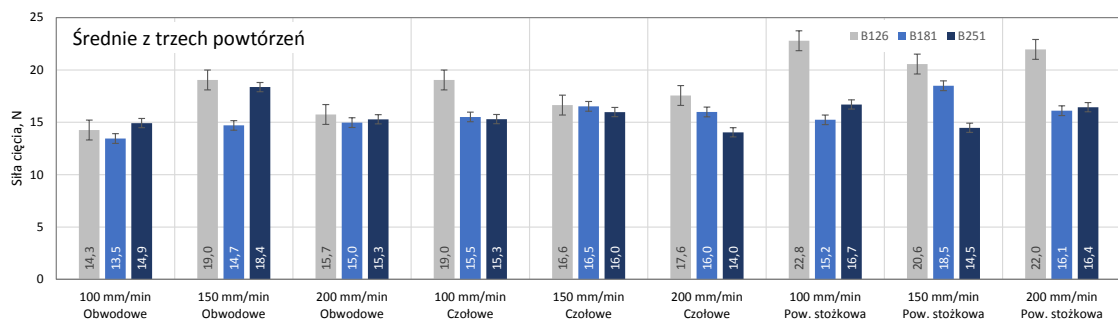
Rys. 80. Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania obwodowego ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s; 150 mm/s i 200 mm/s



Rys. 81. Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania czołowego ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s; 150 mm/s i 200 mm/s

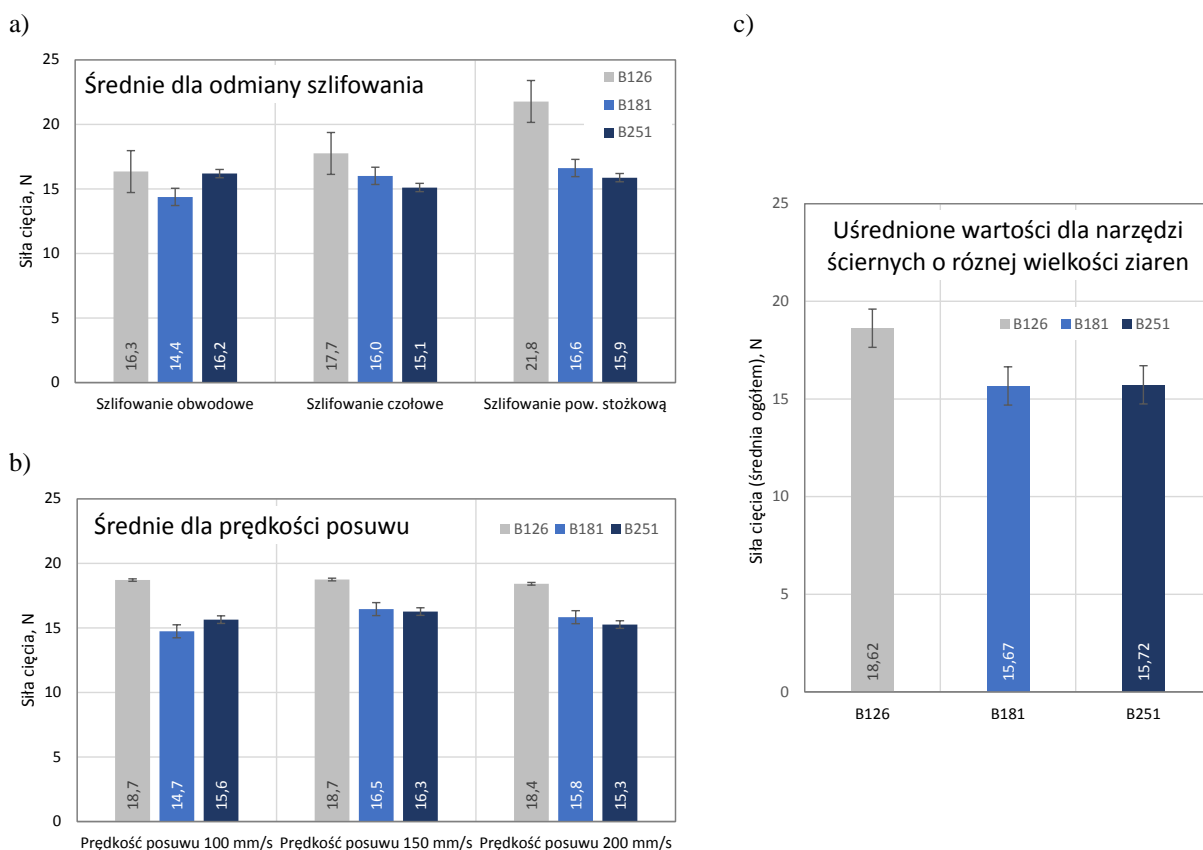


Rys. 82. Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy zbudowanej z ziaren cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s; 150 mm/s i 200 mm/s



Rys. 83. Wartości średnie siły cięcia wyznaczone z pomiarów trzech ostrzy ukształtowanych przy takich samych parametrach procesu szlifowania ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = $\sigma / \sqrt{\text{liczba próbek}}$)

Ponadto zestawiono również wartości średnie siły cięcia wyznaczone z pomiarów ostrzy dla tej samej odmiany kinematycznej procesu szlifowania (rys. 84a) i dla jednakowej wartości prędkości posuwu v_f (rys. 84b). W największym uogólnieniu zmierzone wartości siły przedstawiono w formie wartości średnich obliczonych na podstawie danych ze wszystkich prób z podziałem na wielkość ziarna ściernego cBN i przedstawiono na rysunku 84c.



Rys. 84. Wartości średnie siły cięcia wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251: a) dla tej samej odmiany kinematycznej procesu szlifowania; b) dla jednakowej wartości prędkości posuwu v_f ; c) wyniki średnie ze wszystkich prób z podziałem na wielkość ziarna ściernego cBN (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy $= \sigma / \text{pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek}$)

Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że powierzchnie ostrzy planarnych ostrzy technicznych ukształtowane ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126 wymagają użycia relatywnie największych wartości siły do przecięcia próbek badawczych. Zależność taką zaobserwowano zarówno w przypadku zestawienia wyników pomiarów dla tej samej odmiany kinematycznej procesu szlifowania (rys. 84a), jak i dla jednakowej wartości prędkości posuwu v_f (rys. 84b). W rezultacie wartość sumaryczna wyznaczona ze wszystkich prób (18,62 N) była o około 19% większa w odniesieniu do wartości sumarycznych siły cięcia, uzyskanych dla noży szlifowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B181 (15,67 N) i B251 (15,72 N), co obrazuje wykres zamieszczony na rysunku 80c. W przypadku wyników pomiarów siły cięcia

zmierzonych w trakcie prób cięcia z użyciem ostrzy szlifowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B181 i B251 różnice w wartościach były znacznie mniejsze i nie wykazały żadnego istotnego trendu. Uwidocznilo się to również w wartościach sumarycznych, które były bardzo zbliżone (rys. 84c).

W rezultacie na podstawie uzyskanych wyników pomiarów siły cięcia można jedynie wnioskować o tym, że w badaniach właściwych nie należy stosować ściernicy z ziarnami cBN o numerze B126. W celu znalezienia wyjaśnienia uzyskanych wyników pomiarów siły cięcia przeprowadzono kolejne analizy dotyczące struktury geometrycznej (podrozdział 6.1.2.) oraz oceny obrazów mikroskopowych (podrozdział 6.1.3.) ukształtowanych ostrzy technicznych.

6.1.2. Analiza struktury geometrycznej powierzchni

Do pomiarów mikrotopografii powierzchni ostrza wytypowano dziewięć ostrzy, w taki sposób, żeby ocenie struktury geometrycznej powierzchni poddać po jednym reprezentancie dla każdej kombinacji zmiennych parametrów procesu szlifowania. W tabeli 32 przedstawiono wykaz przyjętych oznaczeń mierzonych ostrzy oraz opis warunków, w jakich realizowany był proces ich szlifowania.

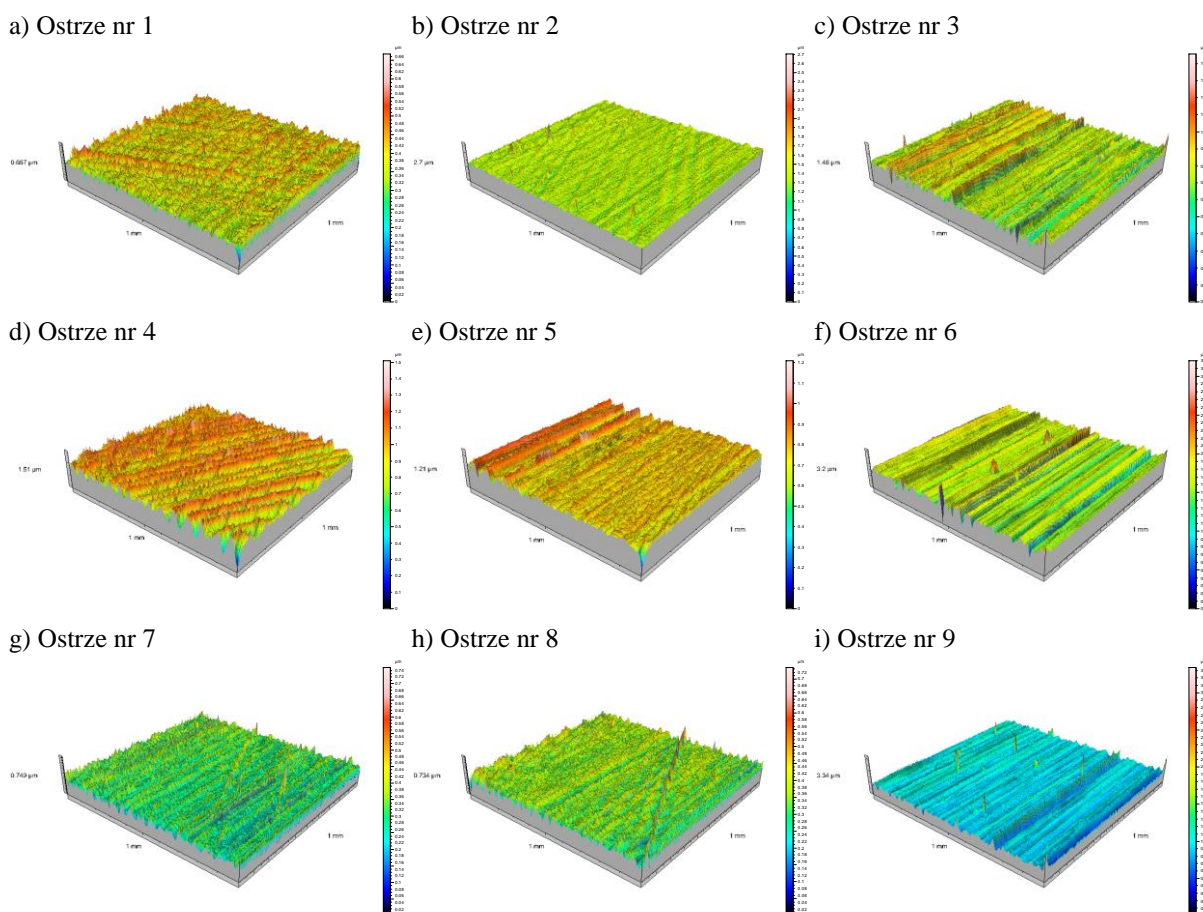
Tab. 32. Oznaczenie oraz opis warunków, w jakich realizowany był proces szlifowania dziewięciu ostrzy wytypowanych do analizy struktury geometrycznej powierzchni

Oznaczenie ostrza	v_f , mm/min	Numer ziaren cBN	Metoda szlifowania
Ostrze nr 1	100	B126	Obwodowe
Ostrze nr 2	100	B126	Czołowe
Ostrze nr 3	100	B126	Strefą stożkową
Ostrze nr 4	100	B181	Obwodowe
Ostrze nr 5	100	B181	Czołowe
Ostrze nr 6	100	B181	Strefą stożkową
Ostrze nr 7	100	B251	Obwodowe
Ostrze nr 8	100	B251	Czołowe
Ostrze nr 9	100	B251	Strefą stożkową

Na rysunku 85 przedstawiono zbiór widoków aksonometrycznych mikrotopografii powierzchni o wymiarach $1,0 \times 1,0$ mm zarejestrowanych dla dziewięciu wytypowanych noży planarnych na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH opisany w podrozdziale 4.5.1. Natomiast w tabeli 33

zamieszczono zestawienie wartości wybranych parametrów SGP obliczonych na podstawie zarejestrowanych mikrotopografii z użyciem oprogramowania TalyMap Silver 4.1.2. Do analizy przyjęto zbiór ośmiu parametrów SGP z pięciu podstawowych grup (Oczóś i Lubimov, 2008):

- amplitudowe (średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni S_a , całkowita wysokość nierówności powierzchni S_t),
- powierzchniowe i objętościowe (średnia objętość pustek powierzchni S_{mvr}),
- przestrzenne (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} , wskaźnik tekstury powierzchni S_{tr}),
- hybrydowe (średnie kwadratowe nachylenie powierzchni S_{dq} , rozwinięcie powierzchni S_{dr}),
- funkcjonalne (wskaźnik nośności powierzchni S_{bi}).



Rys. 85. Widok mikrotopografii powierzchni o wymiarach $1,0 \times 1,0$ mm zarejestrowanych dla dziewięciu wytypowanych noży planarnych (opisanych w tabeli 29) na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5; f) ostrze nr 6; g) ostrze nr 7; h) ostrze nr 8; i) ostrze nr 9

Tab. 33. Zestawienie wartości wybranych parametrów SGP dziewięciu noży, wyznaczonych na podstawie pomiarów mikrotopografii powierzchni ostrza ukształtowanego w procesie szlifowania zrealizowanym w warunkach podanych w tabeli 32

Parametry SGP		Oznaczenie ostrza wytypowanego do analizy SGP								
		nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6	nr 7	nr 8	nr 9
Amplitudowe	$Sa, \mu\text{m}$	0,1040	0,0695	0,0516	0,2060	0,0715	0,1530	0,1330	0,0520	0,0519
	$St, \mu\text{m}$	1,460	2,700	0,667	3,200	1,210	1,510	3,340	0,734	0,749
Powierzchniowe i objętościowe	$Smvr, \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,000736	0,001390	0,000329	0,001640	0,000485	0,000642	0,002430	0,000430	0,000490
Przestrzenne	Sds, mm^{-2}	6205	6795	7563	5804	6959	4527	5852	6846	7348
	Str	0,5760	0,1830	0,0926	0,1860	0,1860	0,0666	0,1860	0,1220	0,1230
Hybrydowe	$Sdq, \mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,0522	0,0664	0,0548	0,0709	0,0516	0,0699	0,0702	0,0499	0,0530
	$Sdr, \%$	0,150	0,220	0,136	0,244	0,133	0,251	0,140	0,124	0,246
Funkcjonalne	Sbi	0,268	0,074	0,279	0,228	0,294	0,546	0,084	0,201	0,170

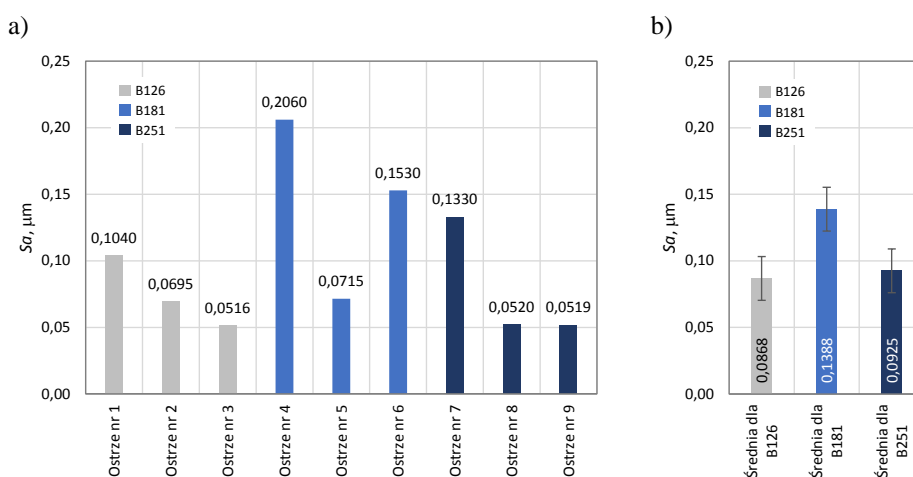
Analizowane parametry SGP przedstawiono następnie graficznie (rys. 86-93) w formie wykresów prezentujących wartości wyznaczone dla powierzchni poszczególnych ostrzy oraz wartości średnich obliczonych dla danych pogrupowanych z podziałem na wielkość ziaren ściernych (B126, B181 i B251).

Na zmierzonych mikrotopografiach wyraźnie widoczne są regularne ślady obróbkowe ukierunkowane zgodnie z kierunkiem przemieszczania aktywnych ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy i wynikających ze złożenia ruchu obrotowego i posuwowego narzędzia (rys. 85). Widoczne są także miejscowe defekty (pojedyncze wierzchołki) oraz rysy, szczególnie na powierzchni ostrzy ukształtowanych ściernicą z ziarnami B126 (ostrze nr 1-3) oraz B251 (ostrze nr 7-9) – rys. 85.

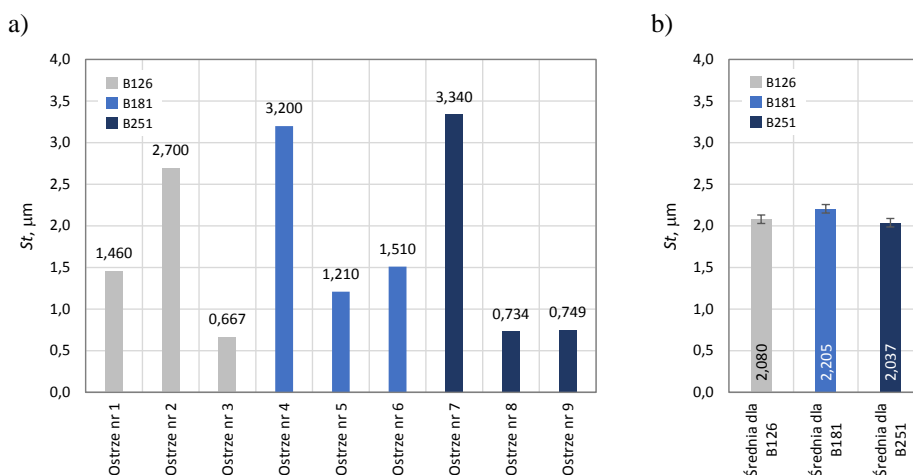
Obliczone wartości parametrów amplitudowych Sa i St wskazują na bardzo małą chropowatość ukształtowanych powierzchni ostrza ($Sa = 0,0516-0,2060 \mu\text{m}$; $St = 0,667-3,340 \mu\text{m}$) – rys. 86 i 87. Jednocześnie widoczne są znaczące (nawet 4-krotne) różnice w wartościach tych parametrów dla poszczególnych powierzchni. Wydaje się jednak, że należy to tłumaczyć losowym charakterem powierzchni i występowaniem nielicznych defektów powierzchni (wierzchołków lub zagłębień), które znacząco wpływają na wartości parametrów amplitudowych.

Wspomniane wyżej miejscowe i nieliczne defekty zostały również wyraźnie wyeksponowane w wartościach parametru $Smvr$, opisującego średnią objętość pustek powierzchni (rys. 88). Natomiast nie wpływały już tak znacząco na gęstość wierzchołków nierówności powierzchni Sds wyrażaną w liczbie wierzchołków na mm^2 ocenianej powierzchni

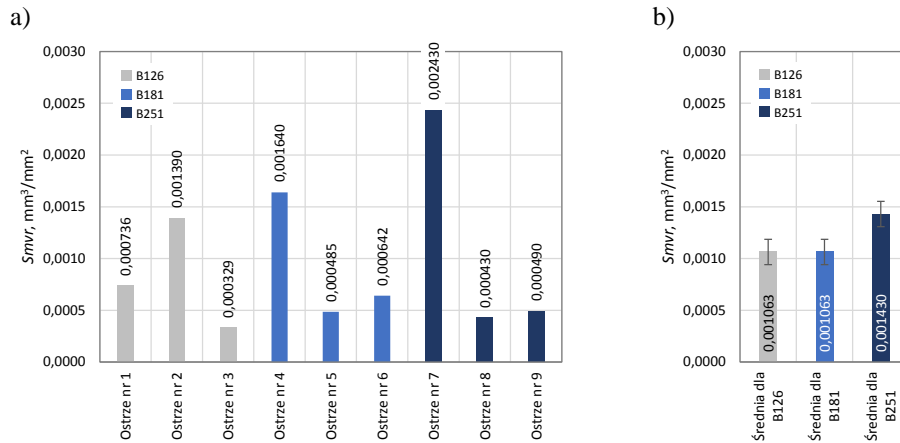
(rys. 89). Na zmierzonych ostrzach zidentyfikowano od 4527 do 7563 wierzchołków na mm², przy czym najmniejsze wartości przyporządkowano ostrzom szlifowanym ściernicą z ziarnami B181. Wartości drugiego z analizowanych parametrów SGP należących do grupy parametrów przestrzennych (wskaźnika tekstury powierzchni *Str*) wskazują na korzystne cechy powierzchni ostrzy ukształtowanych ściernicami z ziarnami B181 oraz B251 (rys. 90).



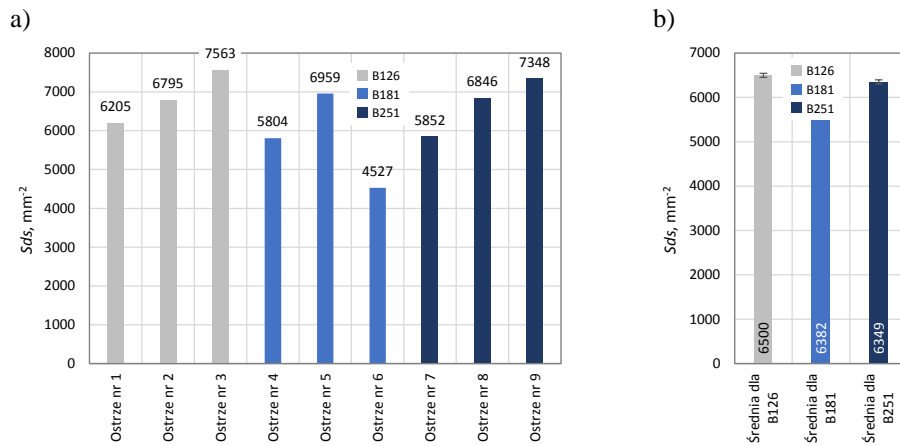
Rys. 86. Wykres zmian wartości średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych powierzchni *Sa*: a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



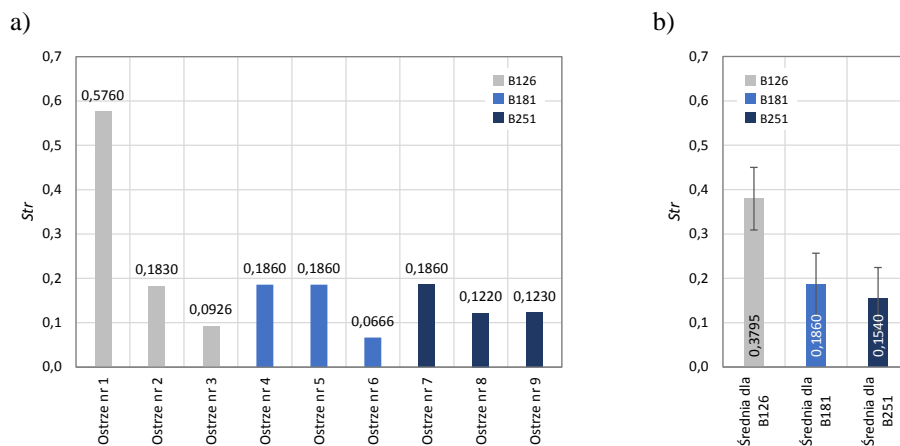
Rys. 87. Wykres zmian wartości całkowitej wysokości nierówności powierzchni *St*: a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



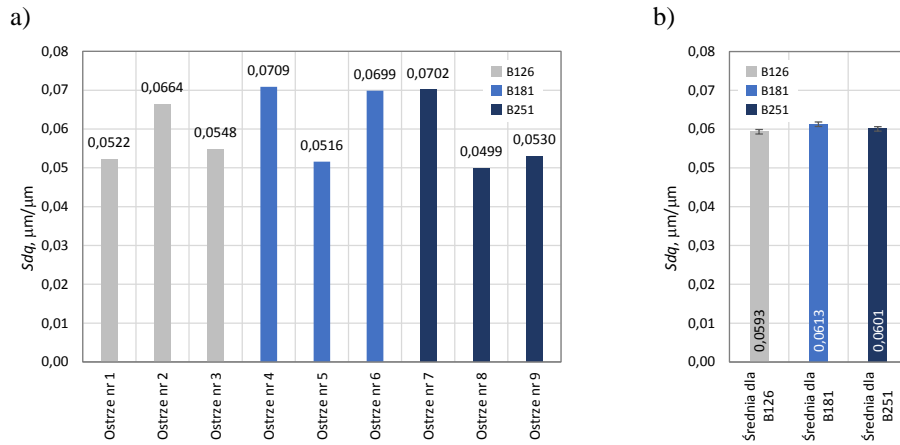
Rys. 88. Wykres zmian wartości średniej objętości pustek powierzchni S_{mvr} : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



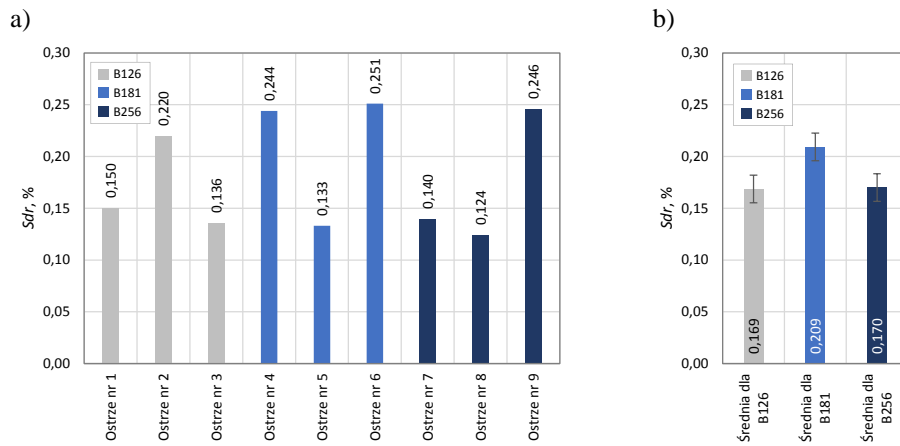
Rys. 89. Wykres zmian gęstości wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów S_{ds} ; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



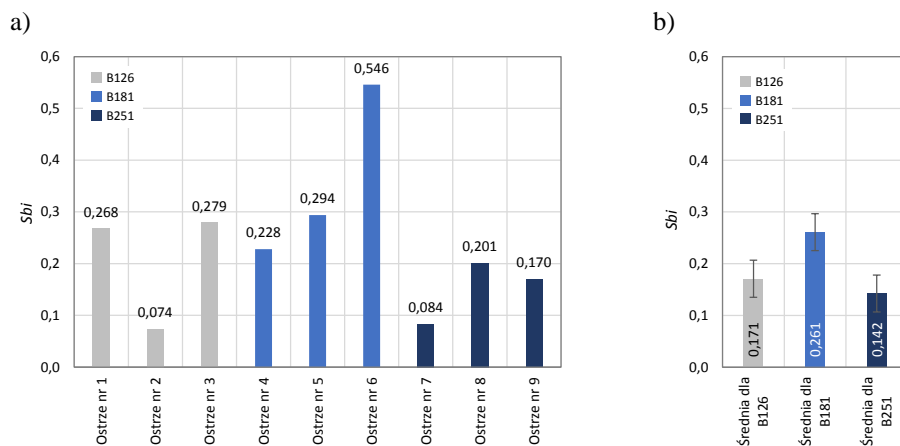
Rys. 90. Wykres zmian wskaźnika tekstury powierzchni S_{tr} : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 91. Wykres zmian wartości średniego kwadratowego nachylenia powierzchni Sdq : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 92. Wykres zmian wartości rozwinięcia powierzchni Sdr : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



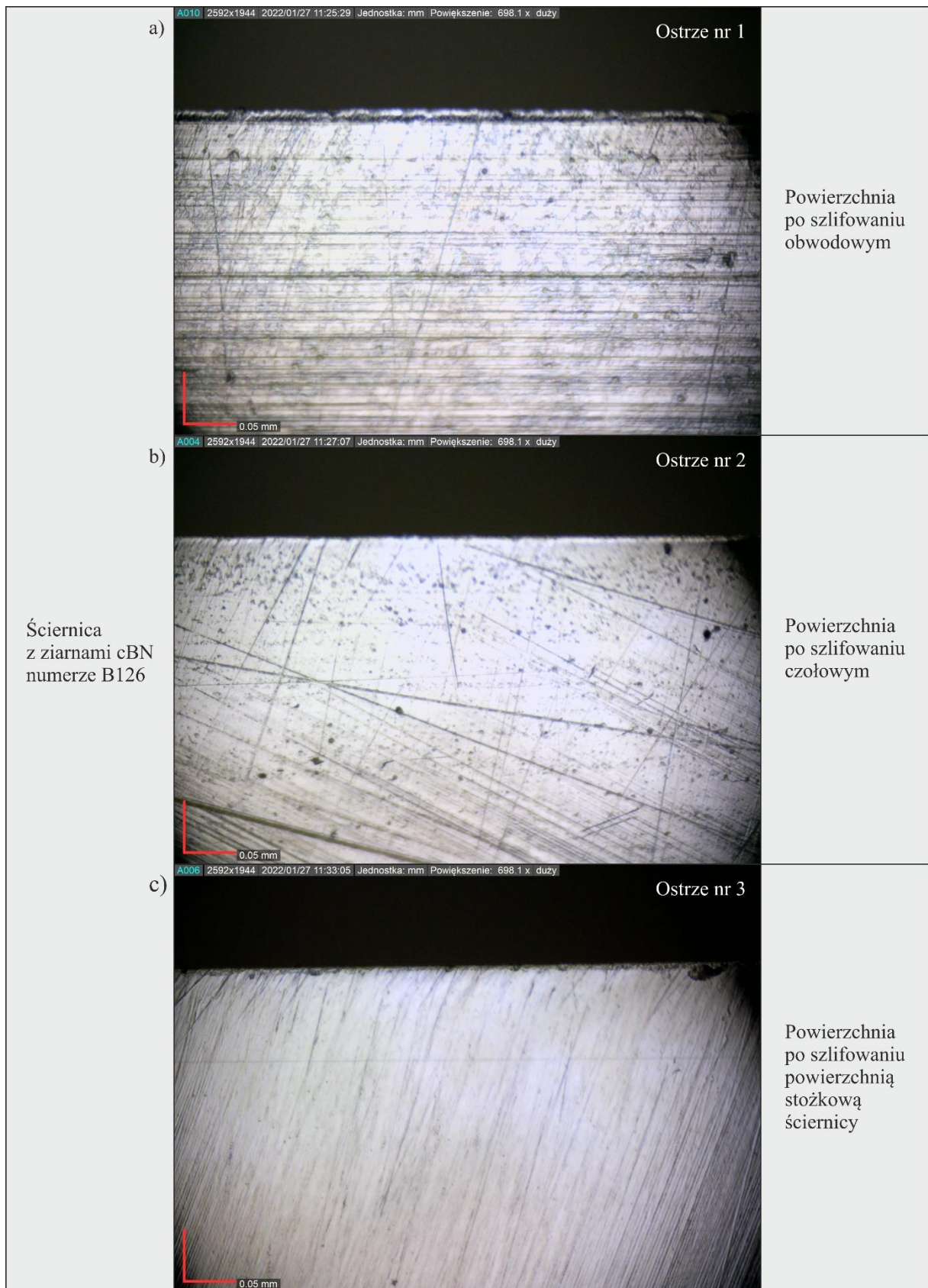
Rys. 93. Wykres zmian wartości wskaźnika nośności powierzchni Sbi : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)

Parametry należące do grupy parametrów hybrydowych (*Sdq* – rys. 91 i *Sdr* – rys. 92) nie ujawniły istotnego trendu w swojej zmienności pozwalającego na ocenę wpływu rodzaju ściernicy na ich wartości. Inaczej jest w przypadku wartości wskaźnika nośności powierzchni *Sbi* (rys. 93) zaliczanego do grupy funkcjonalnych parametrów SGP. W tym przypadku uwidocznił się korzystny wpływ na nośność powierzchni stosowania w trakcie jej kształtowania ściernicy z ziarnami B181. Większa nośność może być interpretowana jako większy udział materiałowy wpływający korzystnie na właściwości funkcjonalne powierzchni pracujących w kontakcie z przeciwpowierzchnią, jak to ma miejsce również w procesie cięcia.

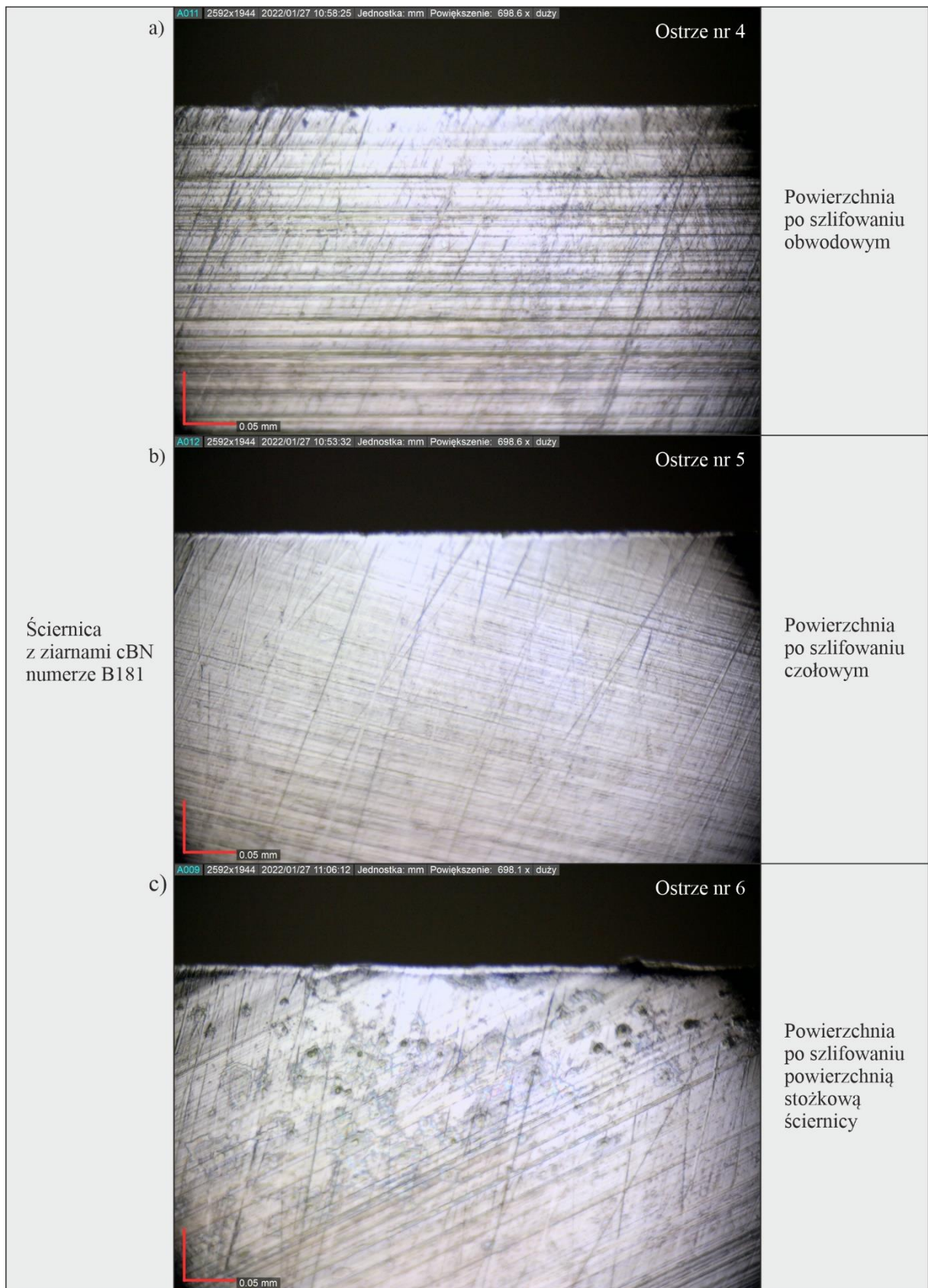
Podsumowując uzyskane wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni dziewięciu powierzchni ostrzy technicznych (rys. 85-93 oraz tab. 33) można stwierdzić, że różnice pomiędzy wartościami parametrów SGP wyliczonymi dla powierzchni kształtowanych trzema porównywanymi rodzajami ściernic są relatywnie niewielkie. Uwzględniając jednak wartości wskaźnika nośności powierzchni *Sbi* (rys. 93), jako ściernicę pozwalającą ukształtować powierzchnię ostrza o najkorzystniejszych cechach funkcjonalnych wytypowano ściernicę z ziarnami B181.

6.1.3. Analiza obrazów mikroskopowych

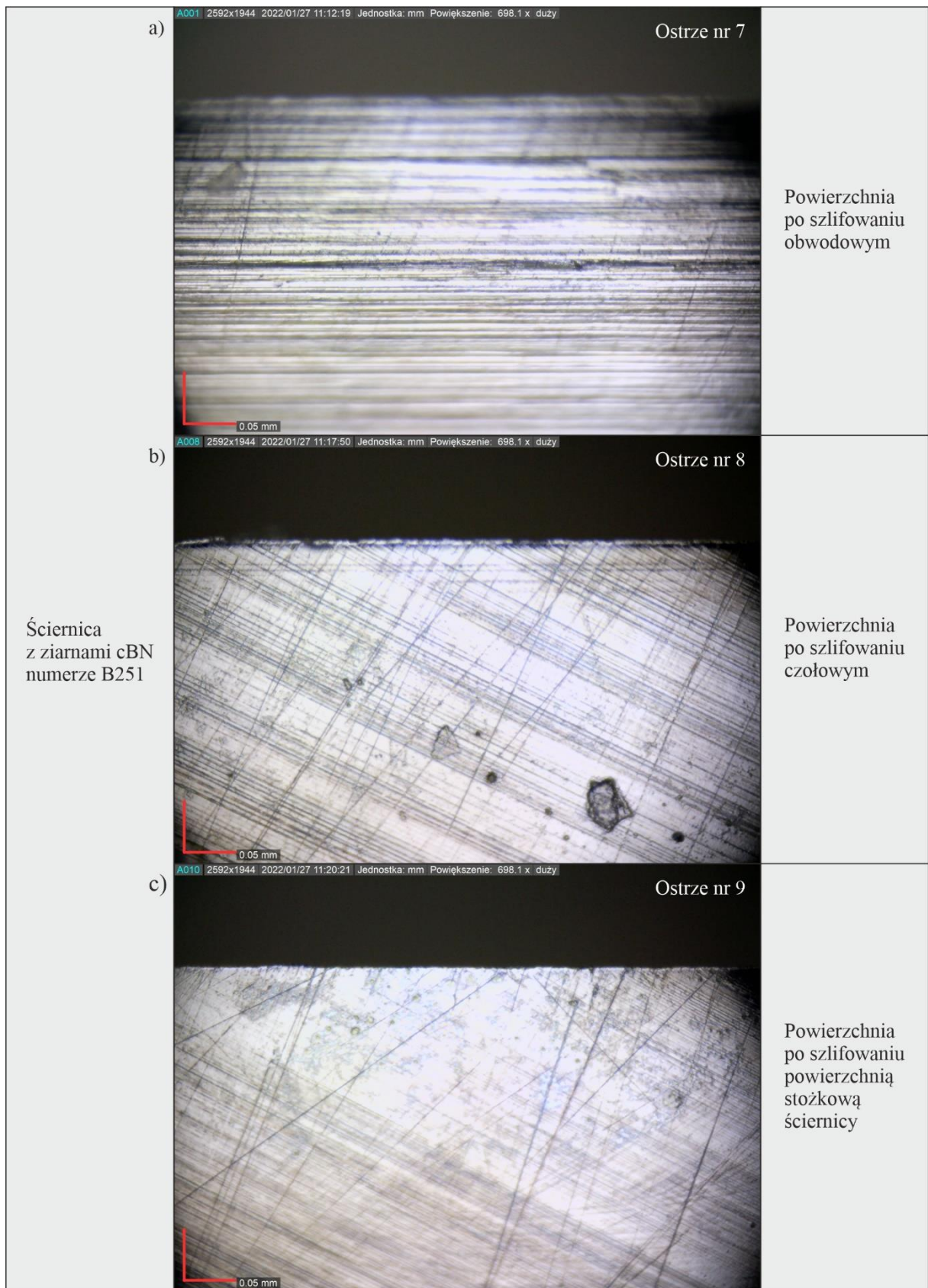
Na rysunkach 94-96 zamieszczono widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126 (rys. 94), B181 (rys. 95) i B251 (rys. 96) zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp., opisanego szerzej w podrozdziale 4.5.2. Analiza tych obrazów potwierdza występowanie charakterystycznych cech powierzchni ostrzy, stwierdzonych wcześniej na podstawie analizy ich mikrotopografii. Widoczne są tam wyraźne ślady obróbkowe w postaci rys, których kierunek odpowiada kinematyce ziaren ściernych kształtujących powierzchnię w poszczególnych odmianach procesu szlifowania (obwodowym, czołowym oraz szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy). Dodatkowo na obrazach mikroskopowych zaobserwowano nieliczne defekty powierzchni w postaci rys skierowanych w kierunku odmiennym od dominującego. Mogły one zostać ukształtowane w trakcie zabiegu usuwania przewinięcia ostrza, w którym narzędzie ze skóry bydlęcej przemieszczane jest wzdłuż ostrza i możliwe jest gromadzenie na nim usuwanych wiórów materiału obrabianego a także w szczególnych przypadkach fragmentów ziaren ściernych lub spoiwa pozostałych na powierzchni ostrza.



Rys. 94. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B126 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 1); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 2); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 3)



Rys. 95. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B181 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 4); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 5); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 6)



Rys. 96. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B251 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 7); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 8); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 9)

Obrazy mikroskopowe ujawniły również występowanie nielicznych nieregularnych wgłębień w ukształtowanej powierzchni. Wydaje się, że defekty te występowały najczęściej na powierzchni noży szlifowanych ściernicą B251 (rys. 96).

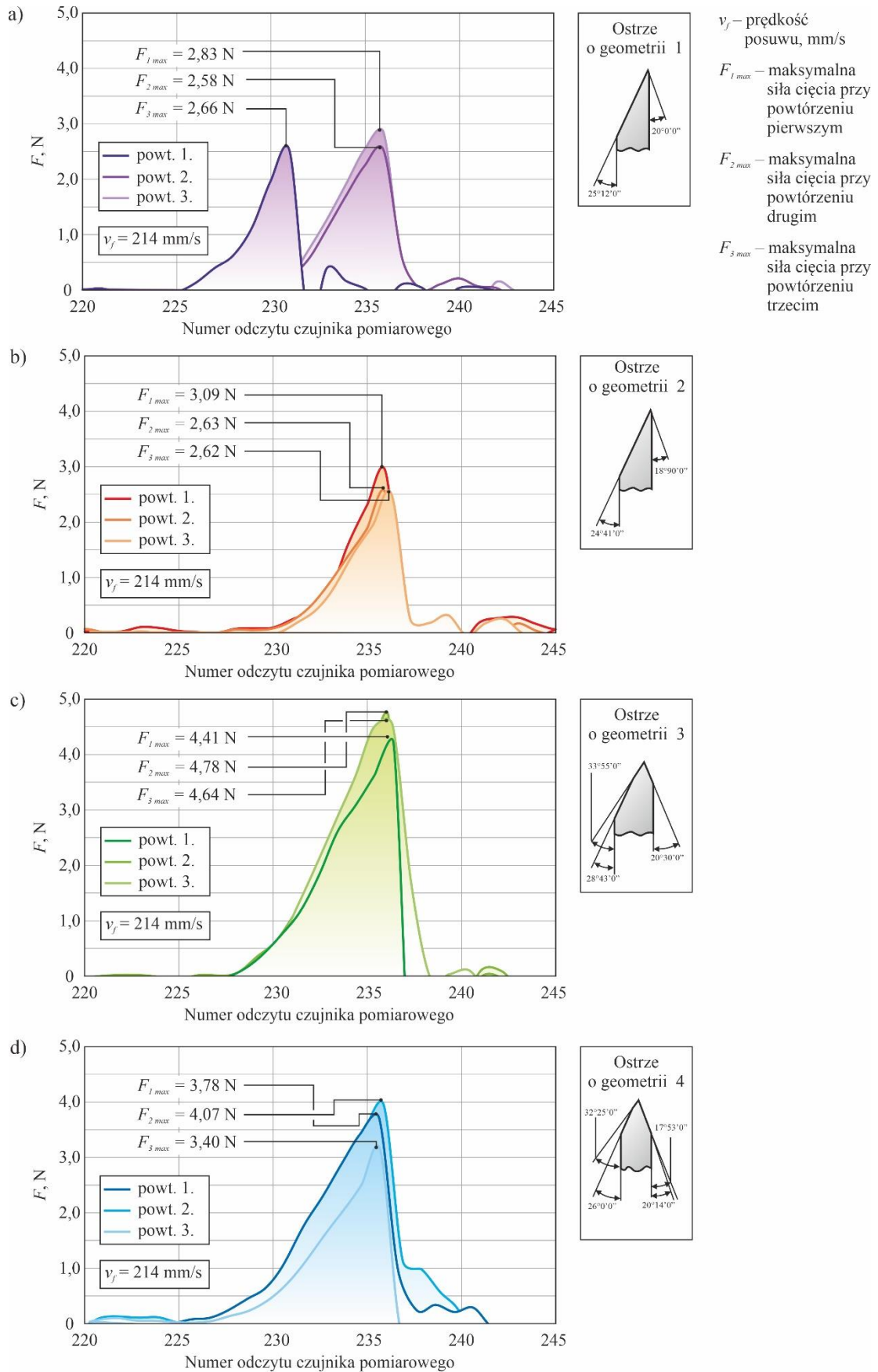
6.2. Analiza wyników badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia

Badania rozpoznawcze mające na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia (opis w rozdziale 5.2.) przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale 4.2. niniejszej rozprawy.

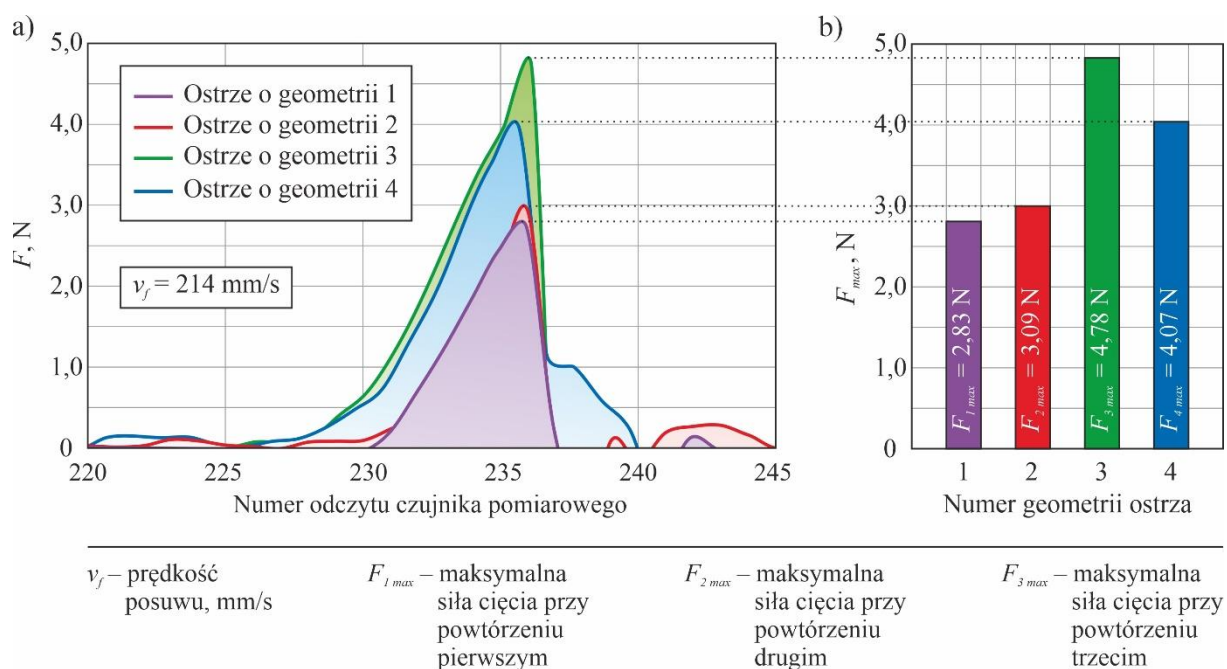
Na rysunku 97 przedstawiono wyniki wykonanych badań doświadczalnych siły cięcia F noży o czterech odmiennych zarysach poprzecznych ostrza, odpowiednio dla ostrza o geometrii 1 (rys. 97a), 2 (rys. 97b), 3 (rys. 97c) i 4 (rys. 97d). Dodatkowo w celu wyznaczenia wpływu różnic w geometrii ostrza na wartości siły cięcia F przedstawiono na jednym wykresie przebiegi zmian mierzonej wartości odpowiadające próbom, w których uzyskano maksymalne wartości F dla każdego z rozpatrywanych typów ostrza (rys. 98a). Następnie wartości maksymalne dla każdej z odmian geometrycznych ostrza przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 98b).

Uzyskane wyniki pomiarów wskazują znaczące różnice w wartościach siły cięcia F pomiędzy ostrzami o geometrii 1 i 2 oraz pozostałymi narzędziami. Siła maksymalna dla ostrza 1 wynosiła $F_{1\ max} = 2,83\ \text{N}$ a dla ostrza 2 $F_{2\ max} = 3,09\ \text{N}$, czyli różniły się one nieznacznie (o około 9%). Natomiast dla ostrza o geometrii 4 siła cięcia była o 43% większa w odniesieniu do $F_{1\ max}$ ($F_{4\ max} = 4,07\ \text{N}$). Największą siłę cięcia zarejestrowano w przypadku geometrii 3 ($F_{3\ max} = 4,78\ \text{N}$) i była ona o około 69% większa od $F_{1\ max}$ (rys. 98b).

Analizując wartości maksymalnej siły cięcia do badanych odmian geometrycznych ostrzy można zauważyć wyraźny związek z wartością ich kąta wierzchołkowego. Noże typu 1 i 2 charakteryzują się najmniejszą wartością kąta wierzchołkowego wynoszącą od $43^{\circ}31'$ (nóż o geometrii 2) do $45^{\circ}12'$ (nóż o geometrii 1). Dla noży typu 4 wartość tego kąta wnosi już $52^{\circ}25'$ a dla noża o geometrii 3 jest największa spośród wytypowanego do badań zestawu narzędzi: $54^{\circ}25'$. Można zatem wnioskować, że zmniejszenie wartości kąta wierzchołkowego sprzyja ograniczeniu siły w procesie cięcia. Jednocześnie takie działanie powodować będzie zmniejszenie wytrzymałości ostrza i zwiększanie jego podatności na odkształcenia i wykruszenia w przypadku kontaktu z twardymi wtrąceniami lub zanieczyszczeniami ciętego surowca.



Rys. 97. Zestawienie wyników badań doświadczalnych siły cięcia F (trzech powtórzeń) noży o czterech odmiennych zarysach poprzecznych ostrza: a) nóż o geometrii 1; b) nóż o geometrii 2; c) nóż o geometrii 3; d) nóż o geometrii 4



Rys. 98. Zestawienie zarejestrowanych wykresów siły cięcia F dla czterech ocenianych geometrii ostrzy – próby z maksymalnymi wartościami F dla każdego ostrza (a) oraz wykres wartości maksymalnych siły F_{max} (b)

Oznacza to, że należy poszukiwać optymalnego kompromisu zapewniającego uzyskanie zarówno wymaganej wytrzymałości mechanicznej, jak i relatywnie małych sił cięcia sprzyjających długotrwałej stabilnej pracy narzędzia. W rozważaniach pominięto wpływ wartości promienia zaokrąglenia ostrza. Założono, że w przypadku wszystkich ocenianych geometrii noży promień zaokrąglenia ostrza jest podobny ze względu na wytypowanie do oceny narzędzi tego samego typu (noże planarne o wymiarach $459,5 \text{ mm} \times 12,3 \text{ mm} \times 0,6 \text{ mm}$), wykonanych z takiego samego materiału (stal X39Cr13) i przez jednego producenta (Steen F.P.M. International, Kalmthout, Belgia).

Wyznaczone różnice w wartościach siły cięcia świadczą o tym, że odmienne ukształtowanie geometrii zarysu poprzecznego ostrza znacząco wpływa na siłę cięcia, co w efekcie skutkować może odmiennym okresem trwałości narzędzi w rzeczywistych procesach produkcyjnych. Wydaje się, że należy dążyć do minimalizowania wartości siły cięcia, świadczącej o oporze materiału ciętego poddawanego dekohezji za pomocą siły mechanicznej oddziaływującej na ostrze tnące. W tym kontekście jako najkorzystniejsze należy uznać wyniki uzyskane ostrzami o geometrii 1 i 2. Z analizy ich zarysu poprzecznego przedstawionego na rysunku 97 wynika, że różnią się one bardzo nieznacznie od siebie, co potwierdza bardzo podobne wartości zarejestrowanych sił cięcia w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych.

Należy jednak pamiętać, że ocena zdolności tnącej (ostrości) ostrza wyrażonej wartością siły cięcia nie stanowi jedyne kryterium oceny efektywności eksploatacyjnej narzędzia tego typu. Z tego powodu badania laboratoryjne powinny być w przyszłości uzupełnione testami eksploatacyjnymi w warunkach rzeczywistego procesu przetwarzania surowca rybnego, żeby określić zjawiska decydujące o zużyciu ostrza oraz wyznaczyć wpływ geometrii ostrzy na ich okres trwałości.

6.3. Wnioski z badań rozpoznawczych

Przeprowadzone badania rozpoznawcze umożliwiły sformułowanie szeregu zamieszczonych poniżej wniosków szczegółowych. Wnioski te podzielono na dwie grupy. Pierwsza dotyczy badań mających na celu wybór ściernicy do badań właściwych procesu szlifowania ostrzy technicznych.

1. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały, że powierzchnie ostrzy planarnych noży technicznych ukształtowane ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126 wymagają użycia relatywnie największych wartości siły do przecięcia próbek badawczych – wartość sumaryczna wyznaczona ze wszystkich prób (18,62 N) była o około 19% większa w odniesieniu do wartości sumarycznych siły cięcia uzyskanych dla noży szlifowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B181 (15,67 N) i B251 (15,72 N).
2. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów siły cięcia można zatem wnioskować, że w badaniach właściwych nie należy stosować ściernicy z ziarnami cBN o numerze B126.
3. Na mikrotopografiach powierzchni ostrzy wyraźnie widoczne są regularne ślady obróbkowe ukierunkowane zgodnie z kierunkiem przemieszczania aktywnych ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy i wynikających ze złożenia ruchu obrotowego i posuwowego narzędzia.
4. Mikrotopografie SGP ujawniły również miejscowe defekty (pojedyncze wierzchołki) oraz rysy, występujące głównie na powierzchni ostrzy ukształtowanych ściernicą z ziarnami B126 (ostrze nr 1-3) oraz B251 (ostrze nr 7-9).
5. Różnice pomiędzy wartościami parametrów SGP wyliczonymi dla powierzchni kształtowanych trzema porównywanymi rodzajami ściernic (B121; B181 i B251) są relatywnie niewielkie. Uwzględniając jednak wartości wskaźnika nośności powierzchni S_{bi} , jako ściernicę pozwalającą ukształtować powierzchnię ostrza

o najkorzystniejszych cechach funkcjonalnych wytypowano ściernicę z ziarnami B181.

6. Analiza obrazów mikroskopowych powierzchni ostrza noży planarnych potwierdziła charakterystyczne cechy powierzchni ostrzy, stwierdzone wcześniej na podstawie analizy ich mikrotopografii.
7. Na obrazach mikroskopowych zaobserwowano nieliczne defekty powierzchni w postaci rys skierowanych w kierunku odmiennym od dominującego, które mogą być efektem zabiegu usuwania przewinięcia ostrza.
8. Obrazy mikroskopowe prezentują także nieliczne nieregularne wgłębienia w ukształtowanej powierzchni występujące najliczniej na powierzchni noży szlifowanych ściernicą B251.
9. Uwzględniając całościowo wyniki pomiarów wartości siły cięcia F , analizy SGP oraz obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że do badań właściwych przeznaczone zostaną ściernice zbudowane z ziaren cBN o numerze B181.

Druga grupa wniosków dotyczy badań rozpoznawczych mających na celu weryfikację poprawności funkcjonowania stanowiska do pomiaru siły cięcia.

1. Cechą unikalną przeprowadzonych badań było zastosowanie niespotykanej dotąd w literaturze kierunkowej relatywnie dużej wartości prędkości cięcia wynoszącej $v_{fc} = 214$ mm/s, która odpowiadała rzeczywistym warunkom tego procesu realizowanego w zakładzie przetwarzającym ryby płaskie (Espersen Poland Sp. z o.o., Koszalin, Polska).
2. Uzyskane wyniki badań pozwoliły wytypować geometrie ostrza 1 i 2 jako najkorzystniejsze – zapewniające najmniejsze wartości siły cięcia F spośród przyjętego do badań zbioru ostrzy.
3. Wyniki badań wykazały wyraźny związek wartości siły cięcia z wartością kąta wierzchołkowego badanych ostrzy. Dla ostrzy z najmniejszą wartością kąta wierzchołkowego (geometria 1: $45^{\circ}12'$, geometria 2: $43^{\circ}31'$) uzyskano najmniejsze wartości siły cięcia (geometria 1: $F_{1\ max} = 2,83$ N, geometria 2: $F_{2\ max} = 3,09$ N).
4. Zwiększenie wartości kąta wierzchołkowego o około 20% do wartości $52^{\circ}25'$ (geometria 4) skutkowało zwiększeniem wartości siły cięcia o 43% w odniesieniu do $F_{1\ max}$ ($F_{4\ max} = 4,07$ N).
5. Największą wartość siły cięcia zarejestrowano dla noża o geometrii 3 ($F_{3\ max} = 4,78$ N, czyli o około 69% więcej niż $F_{1\ max}$), który odznaczał się również

największą wartością kąta wierzchołkowego wynoszącą $54^{\circ}25'$ (około 25% więcej niż w przypadku geometrii 1 i 2).

6. Możliwości techniczne stanowiska badawczego pozwalają na określenie w dalszych badaniach wpływu procesu zużycia ostrzy oraz ich regeneracji na siłę cięcia.
7. Opracowane i wykonane stanowisko testowe pozwoli również w przyszłości prowadzić badania związane z wpływem prędkości cięcia v_{fc} oraz rodzajem i grubością materiału ciętego na siłę cięcia.

7. BADANIA WŁAŚCIWE PROCESU SZLIFOWANIA OSTRZY

Badania właściwe procesu kształtowania ostrzy noży technicznych miały na celu określenie najkorzystniejszych warunków realizacji tego procesu biorąc pod uwagę przyrost mocy szlifowania ΔP oraz wartość siły cięcia F ukształtowanymi ostrzami. Badania te zrealizowano w dwóch etapach. W pierwszym celem było wytypowanie najkorzystniejszych parametrów kinematycznych procesu szlifowania ostrzy (podrozdział 7.1.). W drugim etapie określono najkorzystniejsze warunki chłodzenia i smarowania strefy obróbki (podrozdział 7.2.). Szczegółowy opis metodyki tych badań zamieszczono w podrozdziale 4.3. niniejszej pracy.

7.1. Analiza wyników badań właściwych mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych parametrów kinematycznych procesu szlifowania ostrzy

Badania przeprowadzone zostały z użyciem trójpoziomowego planu eksperymentu umożliwiającego wyznaczenie nieliniowego modelu matematycznego obiektu badań (MMOB). Do wyznaczenia MMOB użyto oprogramowania *Experiment Planner 1.0* opracowanego w Politechnice Koszalińskiej. Do opisu MMOB przyjęto funkcję eksponencjalną $f(x) = e^x$, czyli funkcję wykładniczą o podstawie równej logarytmowi naturalnemu e . Zastosowano funkcję drugiego stopnia z interakcjami. W tabeli 34 przedstawiono kompletny zbiór wyników pomiarów czynników wyjściowych w badaniach właściwych, które stanowiły zbiór wsadowy do dalszego przetwarzania i analizy statystycznej w programie *Experiment Planner 1.0*. W tej części badań, jako czynniki wynikowe procesu analizowano przyrost mocy szlifowania ΔP oraz siłę cięcia F wyznaczoną na specjalnym stanowisku pomiarowym opisanym szczegółowo w podrozdziale 5.2.

W tabeli 35 zamieszczono zestawienie modeli matematycznych obiektu badań opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP w funkcji naddatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f dla procesu szlifowania realizowanego w trzech rozpatrywanych odmianach kinematycznych (szlifowania obwodem, czołem oraz powierzchnią stożkową ściernicy). Analiza wyznaczonych wykresów powierzchniowych wykazała nieznaczny wpływ naddatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ (o niewielkim trendzie rosnącym wraz ze zwiększaniem wartości $a_{e\ wy}$) na wartości ΔP . Podobnie zinterpretować należy wpływ prędkości posuwu v_f na zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP . Wraz ze zwiększaniem v_f rejestrowano coraz większe wartości mocy szlifowania.

Tab. 34. Zestawienie wyników pomiarów czynników wyjściowych w badaniach właściwych

Lp.	Nr próby	Czynniki wejściowe			Czynniki wyjściowe	
		Odmiana kinematyczna szlifowania	v_f , mm/min	a_e wys, mm	ΔP , W	F , N
1.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02	24	11,52
2.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02	20	11,89
3.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,02	24	12,02
4.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02	24	12,05
5.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02	16	12,63
6.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,02	20	12,55
7.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02	32	12,59
8.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02	24	12,69
9.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,02	32	14,51
10.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02	24	13,94
11.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02	16	15,62
12.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,02	20	12,51
13.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02	28	13,24
14.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02	24	13,05
15.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,02	20	15,12
16.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02	36	13,23
17.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02	28	13,02
18.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,02	32	16,04
19.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02	36	12,92
20.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02	40	13,43
21.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,02	36	14,49
22.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02	28	14,77
23.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02	40	12,80
24.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,02	40	13,25
25.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02	44	13,38
26.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02	60	12,96
27.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,02	60	12,94

Tab. 34. Zestawienie wyników pomiarów czynników wyjściowych w badaniach właściwych – *ciąg dalszy*

Lp.	Nr próby	Czynniki wejściowe			Czynniki wyjściowe	
		Odmiana kinematyczna szlifowania	v_f , mm/min	$a_{e\ wy}$, mm	ΔP , W	F , N
28.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03	40	12,72
29.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03	64	12,11
30.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,03	40	13,57
31.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03	80	12,57
32.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03	76	12,26
33.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,03	68	11,45
34.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03	56	11,30
35.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03	68	11,63
36.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,03	64	11,10
37.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03	48	13,34
38.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03	68	15,64
39.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,03	64	15,31
40.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03	80	16,56
41.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03	84	16,16
42.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,03	92	14,98
43.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03	80	15,91
44.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03	84	13,26
45.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,03	84	15,70
46.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03	60	14,04
47.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03	76	12,01
48.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,03	72	13,21
49.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03	88	14,06
50.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03	92	13,65
51.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,03	80	14,16
52.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03	88	13,67
53.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03	84	14,51
54.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,03	80	13,91

Tab. 34. Zestawienie wyników pomiarów czynników wyjściowych w badaniach właściwych – ciąg dalszy

Lp.	Nr próby	Czynniki wejściowe			Czynniki wyjściowe	
		Odmiana kinematyczna szlifowania	v_f , mm/min	$a_{e\ wy}$, mm	ΔP , W	F , N
55.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04	64	12,98
56.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04	68	11,05
57.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	100	0,04	72	13,29
58.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04	72	13,85
59.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04	68	13,73
60.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	150	0,04	72	14,59
61.	1	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04	84	16,73
62.	2	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04	76	15,97
63.	3	Szlifowanie obwodem ściernicy	200	0,04	76	16,63
64.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04	68	13,92
65.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04	72	14,71
66.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	100	0,04	72	15,82
67.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04	84	14,98
68.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04	88	15,24
69.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	150	0,04	76	13,70
70.	1	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04	92	14,08
71.	2	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04	92	15,54
72.	3	Szlifowanie czołem ściernicy	200	0,04	88	14,44
73.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04	76	12,92
74.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04	68	12,21
75.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	100	0,04	84	12,18
76.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04	88	13,30
77.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04	92	13,47
78.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	150	0,04	92	13,65
79.	1	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04	96	14,93
80.	2	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04	92	13,45
81.	3	Szlifowanie pow. stożkową ściernicy	200	0,04	84	13,72

Tab. 35. Zestawienie modeli matematycznych obiektu badań (MMOB) opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP w funkcji nadadtku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f

Szlifowanie obwodem ściernicy	Wykres MMOB			
	Równanie MMOB	$\Delta P = \exp(4,8987 - 119,7853 \cdot a_{e\ wy} - 0,0124 \cdot v_f + 0,0618 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f + 2368,2798 \cdot a_{e\ wy}^2 + 7,1175 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,9930$
Szlifowanie czołem ściernicy	Wykres MMOB			
	Równanie MMOB	$\Delta P = \exp(2,1581 + 62,9903 \cdot a_{e\ wy} + 0,0205 \cdot v_f - 0,0374 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f - 762,6266 \cdot a_{e\ wy}^2 - 8,3693 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,9730$
Szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy	Wykres MMOB			
	Równanie MMOB	$\Delta P = \exp(3,6439 + 24,0509 \cdot a_{e\ wy} + 0,0037 \cdot v_f + 0,0154 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f - 286,9106 \cdot a_{e\ wy}^2 - 1,1476 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,9635$

Najwyraźniej na uzyskane wyniki badań (zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP) wpływała zastosowana odmiana kinematyczna szlifowania. Z porównania modeli zamieszczonych w tabeli 35 wynika, że kształtowanie ostrza planarnego noża technicznego obwodem ściernicy pozwala na znaczące zredukowanie ΔP w porównaniu z wynikami uzyskanymi w przypadku pozostałych dwóch odmian kinematycznych (szlifowanie czołem oraz powierzchnią stożkową ściernicy).

W przypadku szlifowania obwodowego wartości ΔP zmieniały się w zakresie około 21-55 W. Dla szlifowania czołowego rozrzut wartości był największy i wynosił około 48-92 W, a dla szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy było to 66-94 W. Oznacza to, że realizacja procesu szlifowania obwodem ściernicy pozwala na dwu- lub nawet trzykrotne ograniczenie zapotrzebowania na moc w procesie szlifowania w odniesieniu do pozostałych dwóch odmian kinematycznych uwzględnionych w przyjętym planie badań. Należy jednak zaznaczyć, że rozważania te dotyczą mocy chwilowej i ostateczny bilans energetyczny procesu zależy będzie także od czasu jego realizacji, który w przypadku zastosowania prędkości posuwu o najmniejszej wartości ($v_f = 100$ mm/min) będzie najdłuższy spośród przyjętych w badaniach.

Uzyskane wyniki badań w odniesieniu do mocy szlifowania potwierdzają zależności znane z literatury, mówiące o tym, że siła szlifowania (a co za tym idzie również silnie z nią skorelowana moc) zależy głównie od wielkości warstwy skrawanej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający na czynnej powierzchni ściernicy aktywnie biorący udział w usuwaniu materiału obrabianego. Wielkość warstwy skrawanej zależy przede wszystkim od nadatku obróbkowego oraz prędkości posuwu. Zatem wraz ze zmniejszaniem wartości tych parametrów obróbkowych maleje także wielkość warstwy skrawanej oraz wynikająca z niej siła oraz moc szlifowania.

Drugim z rozpatrywanych w opisywanych badaniach czynnikiem wynikowym była siła cięcia wyznaczona na specjalnym stanowisku pomiarowym (opisanym w podrozdziale 5.2.) w trakcie prób cięcia poliuretanu przyjętego jako odpowiednik tkanki zwierzęcej rozdzielanej w warunkach przetwórstwa spożywczego. W tabeli 36 zamieszczono zestawienie modeli matematycznych obiektu badań opisujących zmiany siły cięcia F w funkcji nadatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f dla procesu szlifowania realizowanego w trzech rozpatrywanych odmianach kinematycznych (szlifowania obwodem, czołem oraz powierzchnią stożkową ściernicy).

Tab. 36. Zestawienie modeli matematycznych obiektu badań (MМОB) opisujących zmiany siły cięcia F w funkcji nadadtku na przejście wyskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f

Szlifowanie obwodem ściernicy	Wykres MМОB			
	Równanie MМОB	$F = \exp(1,5899 + 57,1355 \cdot a_{e\ wy} + 0,0024 \cdot v_f - 0,0775 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f - 761,6281 \cdot a_{e\ wy}^2 + 1,0546 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,9824$
Szlifowanie czołem ściernicy	Wykres MМОB			
	Równanie MМОB	$F = \exp(1,2068 + 97,5561 \cdot a_{e\ wy} - 0,00029 \cdot v_f + 0,0952 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f - 1679,6116 \cdot a_{e\ wy}^2 - 1,3446 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,9888$
Szlifowanie powierzchnią stożkową ściernicy	Wykres MМОB			
	Równanie MМОB	$F = \exp(1,8211 + 47,2631 \cdot a_{e\ wy} + 0,0029 \cdot v_f - 0,0791 \cdot a_{e\ wy} \cdot v_f - 718,7015 \cdot a_{e\ wy}^2 + 4,0389 \cdot v_f^2)$	Współczynnik korelacji wielowymiarowej R	$R = 0,8747$

Analiza uzyskanych wykresów powierzchniowych wykazała brak jednoznacznej zależności pomiędzy siłą cięcia F a naddatkiem na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ w procesie szlifowania ostrza. W zależności od przyjętej odmiany kinematycznej szlifowania i prędkości posuwu v_f zwiększanie naddatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ skutkowało zwiększaniem wartości F o około 17% z wartości $\sim 11,8$ N do $\sim 13,8$ N (szlifowanie obwodem ściernicy dla $v_f = 100$ mm/min) lub trendem odwrotnym, jak to miało miejsce w przypadku szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy dla $v_f = 200$ mm/min (wartość F zmniejszyła się o około 14% z wartości $\sim 15,8$ N do $\sim 13,6$ N) – tabela 36.

Analiza wpływu prędkości posuwu v_f na siłę cięcia F wskazuje na słaby trend rosnący, powodujący zwiększanie wartości F wraz ze zwiększaniem v_f w procesie kształtowania ostrza. Zależność ta jest najbardziej wyraźna w przypadku szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy, gdzie zmiana v_f z 100 mm/min na 200 mm/min spowodowała zwiększenie F w zakresie od około 5% (dla $a_{e\ wy} = 0,04$ mm) do nawet 19% (dla $a_{e\ wy} = 0,02$ mm).

Powiązanie wyników pomiarów siły cięcia ze zmianami wartości parametrów technologicznych procesu szlifowania jest utrudnione ze względu na wiele czynników zakłócających o nieokreślonej sile oddziaływania na uzyskiwany efekt pomiaru siły F . Jako najważniejszy z takich czynników należy wymienić zabieg usuwania przewinięcia ostrza realizowany z użyciem specjalnego oprzyrządowania (opisanego w podrozdziale 5.3.) bezpośrednio po szlifowaniu noża. Warunki realizacji tego zabiegu, jego powtarzalność oraz stan stosowanego narzędzia (skóra bydlęca) mogą przyczyniać się do kształtowania ostrza o różnej zdolności rozdzielania materiału, ocenianej następnie poprzez pomiar siły cięcia F .

Podsumowując uzyskane wyniki tej części badań doświadczalnych można stwierdzić, że najkorzystniejszą (pod względem ocenianego przyrostu mocy szlifowania ΔP oraz siły cięcia F) odmianą kinematyczną szlifowania jest szlifowanie obwodem ściernicy. Ponadto stwierdzono, że z przyjętego zakresu zmienności parametrów technologicznych szlifowania najkorzystniejszy przebieg oraz rezultaty procesu można uzyskać stosując wartości minimalne z analizowanego zbioru ($a_{e\ wy} = 0,02$ mm; $v_f = 100$ mm/min). Wyniki opisanych badań doświadczalnych zastosowane zostały następnie do przeprowadzenia prób mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych warunków chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesie szlifowania ostrzy.

7.2. Analiza wyników badań właściwych mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych warunków chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesie szlifowania ostrzy

Próby szlifowania mające na celu określenie najkorzystniejszych warunków podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki przeprowadzono z parametrami, wyznaczonymi na podstawie pierwszego etapu badań właściwych ($a_{e\ wy} = 0,02$ mm; $v_f = 100$ mm/min) opisanych w podrozdziale 7.1. Szczegółowe zestawienie warunków badań i opis przyjętej metodyki badawczej zamieszczono w podrozdziale 4.3. W badaniach porównywano cztery metody podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania:

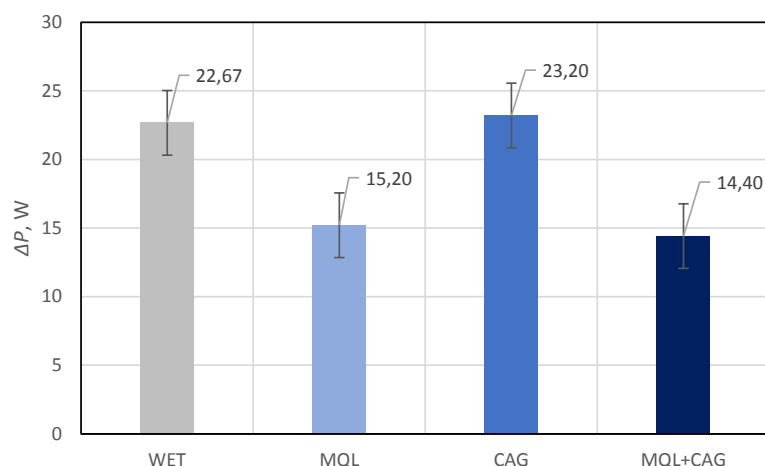
- chłodzenie metodą zalewową (oznaczoną skrótowo jako WET) 5% emulsją wodno-olejową oleju Cimtech[®] M26 podawaną z wydatkiem $Q = 1,75$ dm³/min poprzez dyszę niskociśnieniową o przekroju kołowym;
- smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem (oznaczone skrótowo jako MQL) aerozolu powietrzno-olejowego (olej Cimtech[®] MQL) podawanego z wydatkiem $Q_{MQL} = 1100$ ml/h poprzez dyszę MQL typu ZMIN-MS;
- chłodzenie z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (oznaczone skrótowo jako CAG), generowanego przez dyszę typu Vortec 610 i podawanego z wydatkiem $Q_{CAG} = 49,8$ dm³/min;
- oraz metodę hybrydową (oznaczonej skrótowo jako MQL+CAG) polegającą na jednoczesnym zastosowaniu smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem metodą MQL i chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza dyszą CAG.

Na rysunku 99 przedstawiono widok strefy szlifowania w konfiguracji umożliwiającej zastosowanie wymienionych wyżej czterech metod podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania.

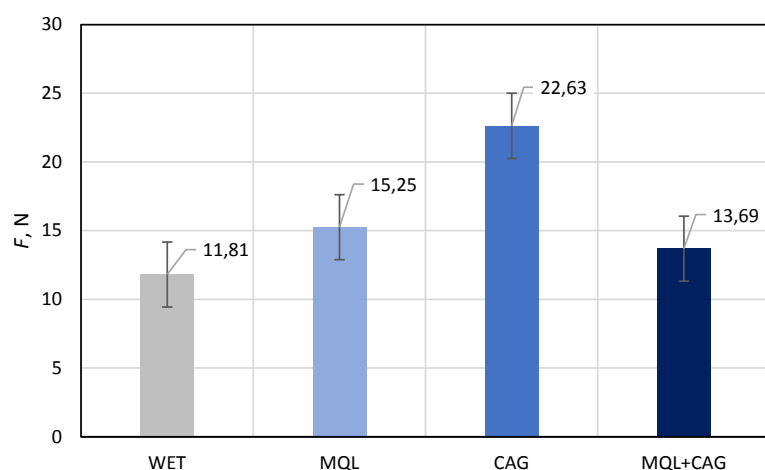
Na rysunku 100 zamieszczono wykres przedstawiający wartości średnie przyrostu mocy szlifowania ΔP wyznaczone w trakcie prób szlifowania przeprowadzonych z 5 powtórzeniami przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki (WET, MQL, CAG oraz MQL+CAG). Natomiast na rysunku 101 przedstawiono wartości średnie z wyników pomiarów siły cięcia F (wykonanych na specjalnym stanowisku pomiarowym opisanym w podrozdziale 5.2.), przeprowadzonych nożami ukształtowanymi w opisywanej części badań właściwych.



Rys. 99. Widok strefy szlifowania w konfiguracji umożliwiającej zastosowanie: a) metody zalewowej (WET); b) smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL); c) chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG); d) metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG)



Rys. 100. Wartości średnie (z 5 powtórzeń) przyrostu mocy szlifowania ΔP wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki: chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL), chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 101. Wartości średnie (z 5 powtórzeń) siły cięcia F wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania: chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL), chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)

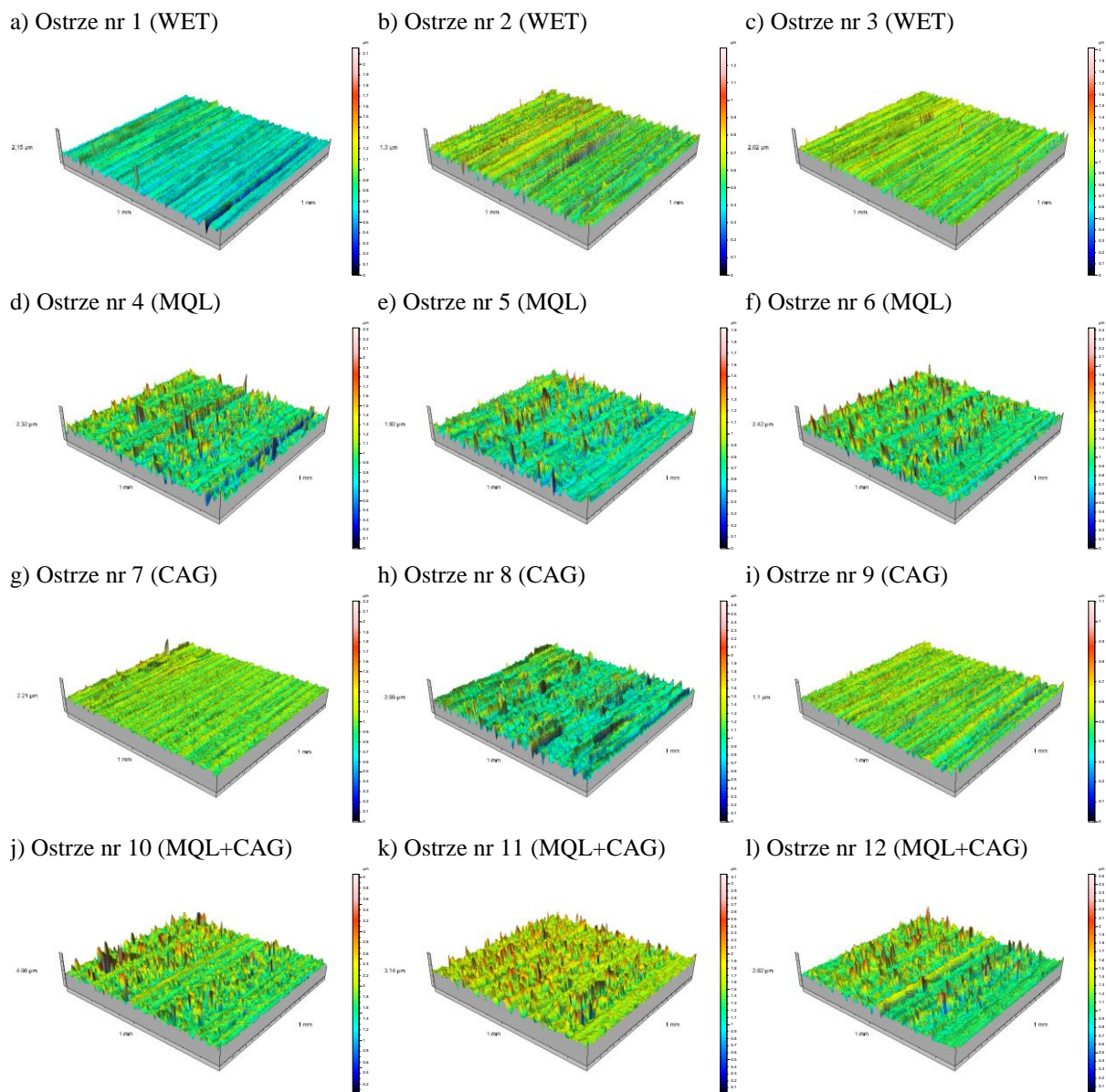
Jak wynika z danych zamieszczonych na rysunku 100, najmniejsze wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP zmierzono podczas realizacji procesu szlifowania w warunkach smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $\Delta P = 15,20$ W) oraz przy zastosowaniu metody hybrydowej (MQL+CAG, $\Delta P = 14,40$ W). W przypadku pozostałych dwóch metod chłodzenia i smarowania strefy obróbki (WET i CAG) wartości ΔP były o około 50-60% większe, wynosząc odpowiednio $\Delta P = 22,67$ W i $\Delta P = 23,20$ W. Zastosowanie metody MQL samodzielnie oraz w połączeniu z dyszą CAG zapewniło bardzo dobrą realizację funkcji smarnej (w metodzie tej doprowadzany jest aerozol powietrzno-olejowy). W warunkach

dobrego smarowania ograniczony zostaje udział tarcia stępionych wierzchołków skrawających o powierzchnię obrabianą, co przejawia się ograniczeniem siły szlifowania oraz skorelowanej z nią mocy, mierzonej w opisywanych badaniach jako moc elektryczna wrzeczona ściernicy.

Porównując wartości średnie siły cięcia F , zestawione na wykresie zamieszczonym na rysunku 101, można zauważyć, że najkorzystniejsze właściwości tnące (przejawiające się relatywnie małymi wartościami F) uzyskano stosując w procesie szlifowania chłodzenie zalewowe (WET, $F = 11,81$ N), smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $F = 15,25$ N) oraz metodę hybrydową (MQL+CAG, $F = 13,69$ N). W przypadku szlifowania w warunkach podawania schłodzonego sprężonego powietrza średnia siła cięcia była aż o 91,6% większa ($F = 22,63$ N) w porównaniu z wynikiem uzyskanym dla najkorzystniejszej metody zalewowej. Dodatkowo należy zaznaczyć, że bezpośrednie obserwacje powierzchni po cięciu prowadzone w trakcie prób wskazywały na zdecydowanie najgorszą jakość próbek poliuretanowych po cięciu ostrzami szlifowanymi w warunkach stosowania wyłącznie dyszy CAG. Uzyskane wyniki pomiarów F dają podstawę do wnioskowania o niedostatecznej jakości ostrza ukształtowanego w takich warunkach, co stanowiło przedmiot dalszych analiz SGP oraz obserwacji mikroskopowych.

W kolejnym etapie analiz dokonano pomiarów mikrotopografii powierzchni noży ukształtowanych w tej części badań (trzech ostrzy dla każdej metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania). Na rysunku 102 przedstawiono zbiór przykładowych widoków aksonometrycznych mikrotopografii powierzchni (o wymiarach $1,0 \times 1,0$ mm) noży planarnych zmierzonych na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH opisany w podrozdziale 4.5.1. Natomiast w tabeli 37 zamieszczono zestawienie wartości wybranych parametrów SGP obliczonych na podstawie zarejestrowanych mikrotopografii z użyciem oprogramowania TalyMap Silver 4.1.2. Zbiór parametrów SGP był tożsamy ze zbiorem wytypowanym do analizy topografii powierzchni, zastosowanym w badaniach rozpoznawczych i zawierał osiem parametrów SGP z pięciu podstawowych grup:

- amplitudowe (S_a , S_t),
- powierzchniowe i objętościowe (S_{mvr}),
- przestrzenne (S_{ds} , S_{tr}),
- hybrydowe (S_{dq} , S_{dr}),
- funkcjonalne (S_{bi}).

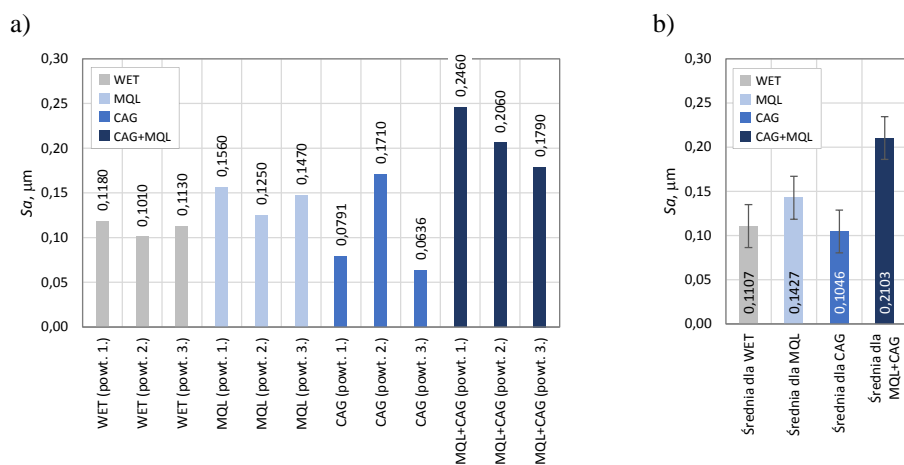


Rys. 102. Widok mikrotopografii powierzchni o wymiarach $1,0 \times 1,0$ mm noży planarnych zmierzonych na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) ostrze nr 1 szlifowane w warunkach metody WET; b) ostrze nr 2 szlifowane w warunkach metody WET; c) ostrze nr 3 szlifowane w warunkach metody WET; d) ostrze nr 4 szlifowane w warunkach metody MQL; e) ostrze nr 5 szlifowane w warunkach metody MQL; f) ostrze nr 6 szlifowane w warunkach metody MQL; g) ostrze nr 7 szlifowane w warunkach metody CAG; h) ostrze nr 8 szlifowane w warunkach metody CAG; i) ostrze nr 9 szlifowane w warunkach metody CAG; j) ostrze nr 10 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG; k) ostrze nr 11 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG; l) ostrze nr 12 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG

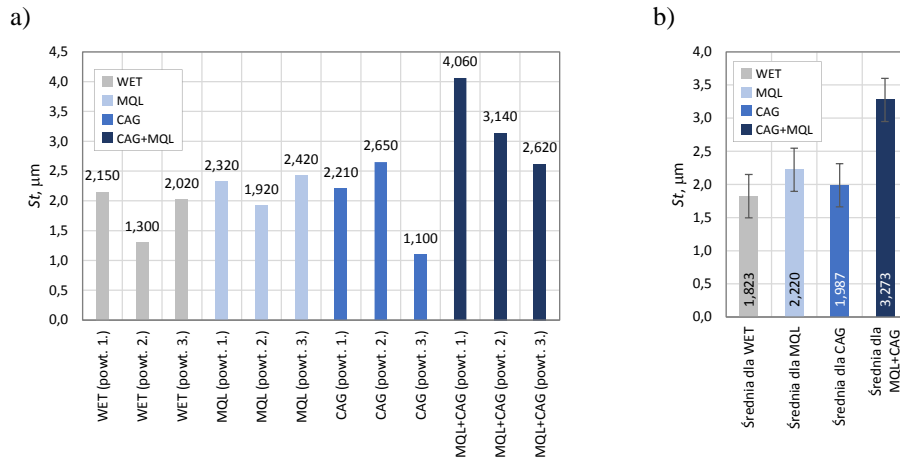
Parametry SGP przedstawiono następnie w formie wykresów (rys. 103-110) poszczególnych wartości dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów oraz zestawienia wartości średnich wyznaczonych z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy.

Tab. 37. Zestawienie wartości wybranych parametrów SGP noży planarnych ukształtowanych w badaniach właściwych wyznaczonych na podstawie pomiarów mikrotopografii powierzchni ostrza

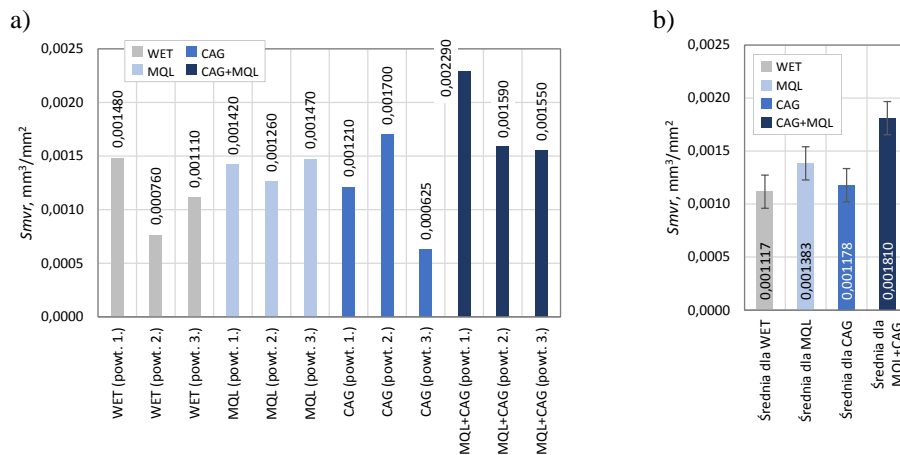
Oznaczenie ostrza wytypowanego do analizy SGP	Parametry SGP							
	Amplitudowe		Pow. i objętościowe	Przestrzenne		Hybrydowe		Funkcjonalne
	$Sa, \mu\text{m}$	$St, \mu\text{m}$	$S_{mvr}, \text{mm}^3/\text{mm}^2$	S_{ds}, mm^{-2}	Str	$S_{dq}, \mu\text{m}/\mu\text{m}$	$S_{dr}, \%$	S_{bi}
WET (powtórzenie 1.)	0,1180	2,150	0,001480	6344	0,1430	0,0222	0,1360	0,1050
WET (powtórzenie 2.)	0,1010	1,300	0,000760	6155	0,4990	0,0518	0,1340	0,2350
WET (powtórzenie 3.)	0,1130	2,020	0,001110	5964	0,1870	0,0522	0,1290	0,1470
MQL (powtórzenie 1.)	0,1560	2,320	0,001420	5297	0,2550	0,0436	0,0947	0,2030
MQL (powtórzenie 2.)	0,1250	1,920	0,001260	5667	0,3910	0,0484	0,1170	0,1830
MQL (powtórzenie 3.)	0,1470	2,420	0,001470	5264	0,4090	0,0470	0,1100	0,1860
CAG (powtórzenie 1.)	0,0791	2,210	0,001210	6255	0,1860	0,0305	0,0464	0,1060
CAG (powtórzenie 2.)	0,1710	2,650	0,001700	5655	0,1860	0,0440	0,0966	0,1690
CAG (powtórzenie 3.)	0,0636	1,100	0,000625	6225	0,1860	0,0321	0,0514	0,1690
MQL+CAG (powtórzenie 1.)	0,2460	4,060	0,002290	4511	0,4290	0,0664	0,2200	0,1980
MQL+CAG (powtórzenie 2.)	0,206	3,140	0,001590	4613	0,1900	0,0585	0,1710	0,2540
MQL+CAG (powtórzenie 3.)	0,179	2,620	0,001550	5143	0,1930	0,0516	0,1330	0,2210



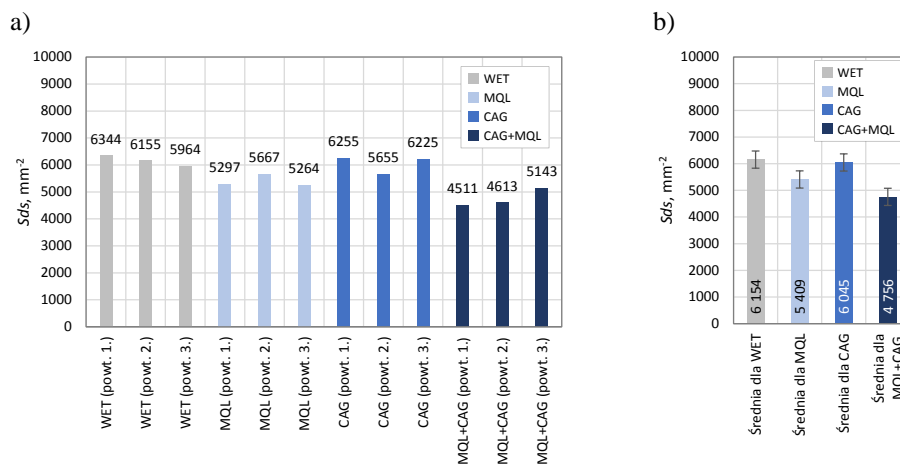
Rys. 103. Wykres zmian wartości średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych powierzchni Sa : a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



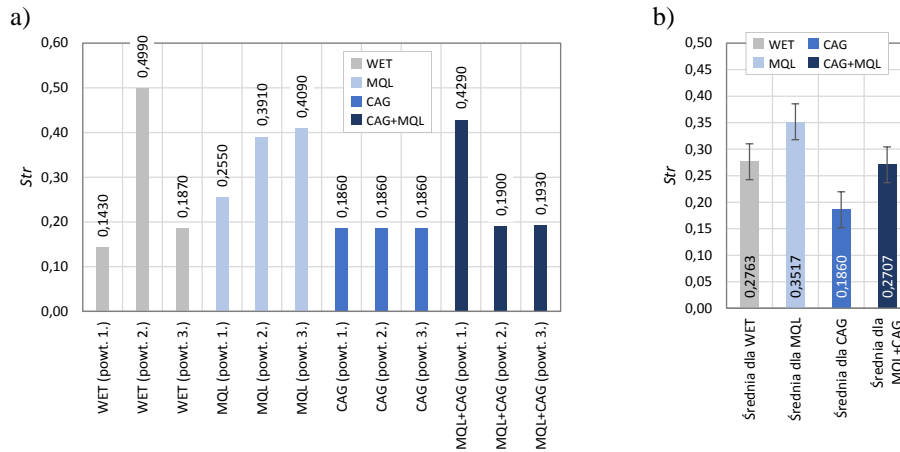
Rys. 104. Wykres zmian wartości całkowitej wysokości nierówności powierzchni St : a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytępionych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



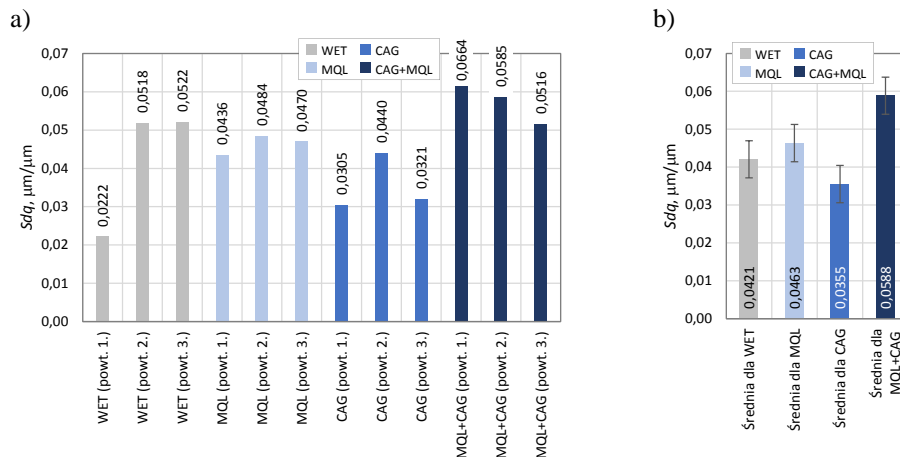
Rys. 105. Wykres zmian wartości średniej objętości pustek powierzchni $Smvr$: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytępionych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



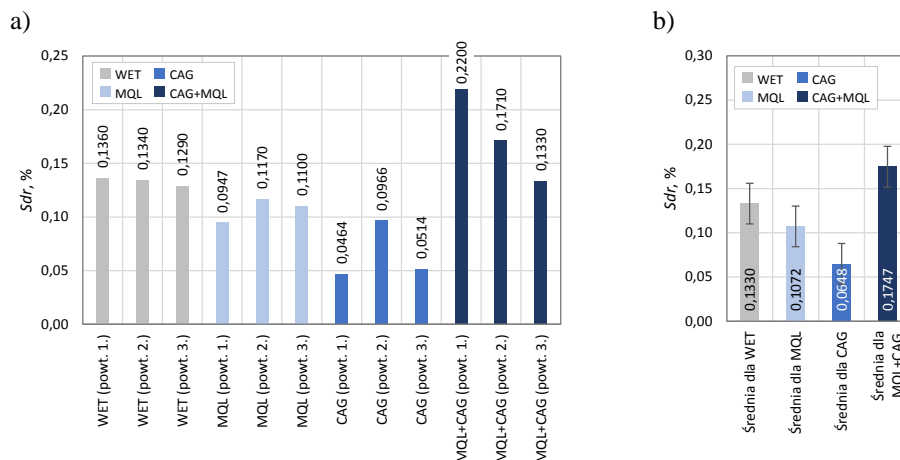
Rys. 106. Wykres zmian gęstości wierzchołków nierówności powierzchni Sds : a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytępionych do pomiarów Sds ; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



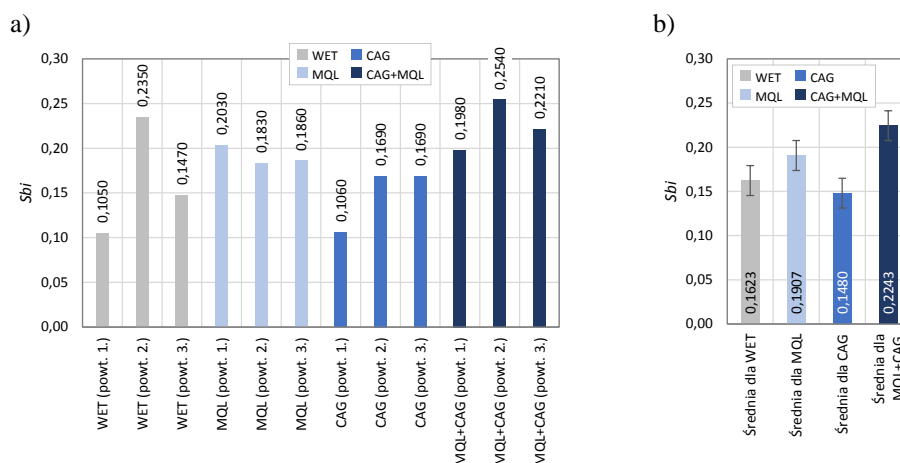
Rys. 107. Wykres zmian wskaźnika tekstury powierzchni *Str*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 108. Wykres zmian wartości średniego kwadratowego nachylenia powierzchni *Sdq*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 109. Wykres zmian wartości rozwinięcia powierzchni *Sdr*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 110. Wykres zmian wartości wskaźnika nośności powierzchni S_{bi} : a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy $= \sigma / \text{pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek}$)

Porównanie wyznaczonych wartości parametrów amplitudowych SGP przedstawionych na rysunkach 103 (średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni S_a) i 104 (całkowita wysokość nierówności powierzchni S_t) wskazuje, że relatywnie najwyższe wartości uzyskano w warunkach szlifowania z zastosowaniem metody hybrydowej podawania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki (MQL+CAG). Wartości średnie opisywanych parametrów dla tej metody były około 30% większe w porównaniu do pozostałych trzech analizowanych wariantów (WET, MQL oraz CAG). Z kolei najmniejsze wartości parametrów amplitudowych SGP zarejestrowano na powierzchniach ostrzy szlifowanych w warunkach chłodzenia z zastosowaniem wyłącznie dyszy CAG, podającej sprężone schłodzone powietrze. Obserwacje tych ostrzy wskazują na znacznie większą temperaturę obróbki, skutkującą powstawaniem przypaleń szlifierskich oraz znaczącym przewinięciem ostrza. Należy przypuszczać, że dodatkowym skutkiem niewystarczającej realizacji funkcji chłodzącej w przypadku tej metody było wygładzenie i stępienie wierzchołków aktywnych ziaren ściernych, które ukształtowały powierzchnię o relatywnie najmniejszej wysokości nierówności.

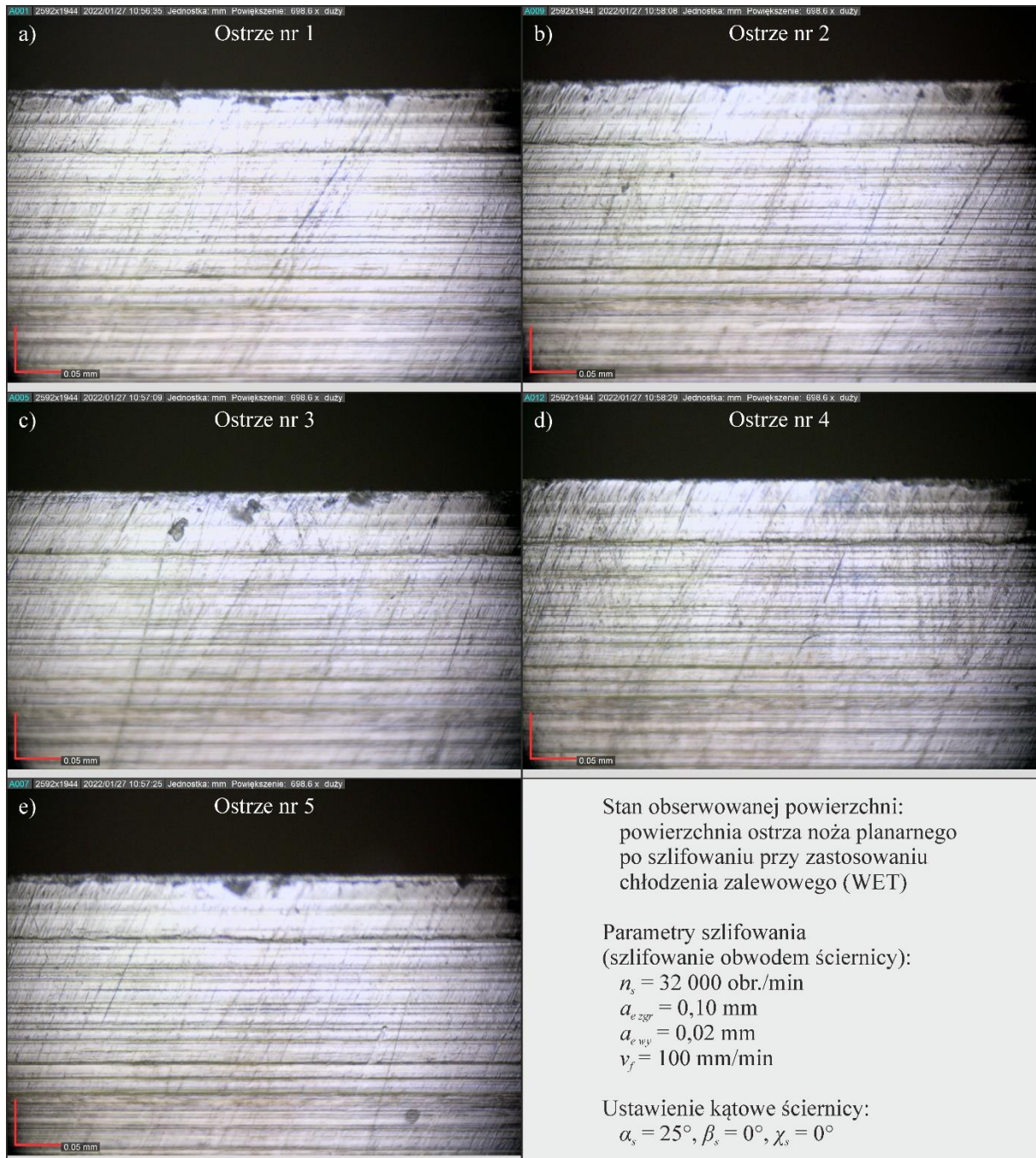
Analogiczny charakter zmian wartości zarejestrowano również dla innych parametrów SGP: średniej objętości pustek powierzchni S_{mvr} (rys. 105), średniego kwadratowego nachylenia powierzchni S_{dq} (rys. 108), rozwinięcia powierzchni S_{dr} (rys. 109) oraz wartości wskaźnika nośności powierzchni S_{bi} (rys. 110). W przypadku wskaźnika tekstury powierzchni S_{tr} (rys. 107) najwyższą wartość uzyskano w przypadku szlifowania ostrzy w warunkach zminimalizowanego smarowania aerozolem powietrzno-olejowym, podawanym dyszą MQL. Natomiast analiza zmian gęstości wierzchołków nierówności powierzchni S_{ds} przedstawionych na rysunku 106 wykazała, że zastosowanie metody MQL w procesie szlifowania skutkowało

zmniejszeniem wartości Sds o około 12%, a dla metody hybrydowej (MQL+CAG) o około 23% w odniesieniu do maksymalnej wartości średniej uzyskanej dla metody zalewowej ($Sds = 6154 \text{ mm}^{-2}$).

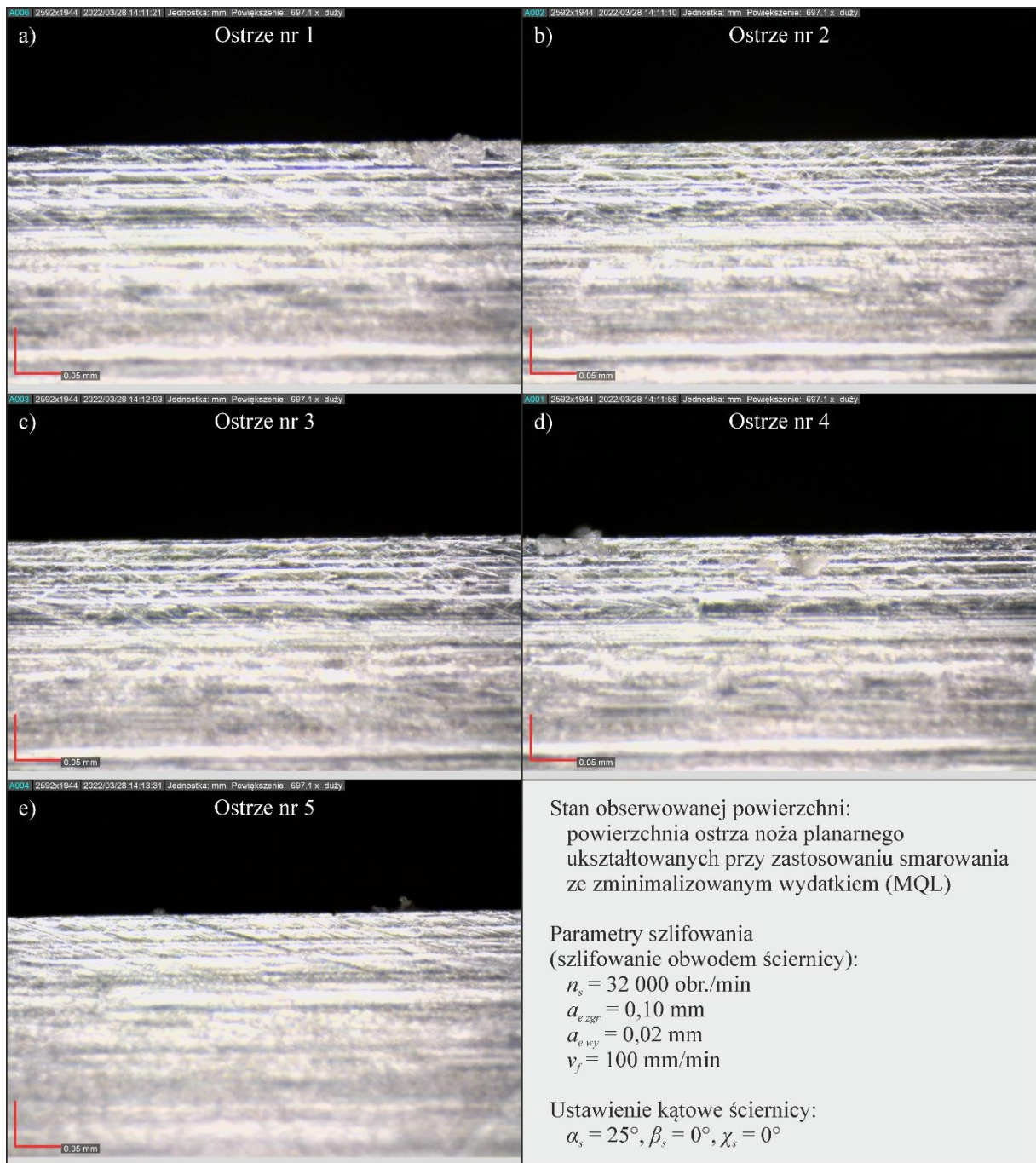
Uzyskane wyniki analiz wybranych parametrów SGP wykazały, że zmiana warunków chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesie szlifowania ostrzy noży planarnych znacząco wpływa na wysokość kształtowanych nierówności (parametry amplitudowe Sa i St), jak również związane z nią cechy objętościowe (parametr $Smvr$), przestrzenne (parametry Sds i Str), hybrydowe (parametry Sdq i Sdr) oraz funkcjonalne (parametr Sbi). Wyniki pomiarów pozwalają wnioskować, że zastosowanie metody zalewowej WET oraz zminimalizowanego smarowania MQL pozwoliło ukształtować powierzchnie ostrza o zbliżonej strukturze geometrycznej. Zastosowanie wyłącznie chłodzenia sprężonym schłodzonym powietrzem z użyciem dyszy CAG spowodowało relatywne zmniejszenie wysokości nierówności Sa i St , wskaźnika tekstury powierzchni Str , średniego kwadratowego nachylenia powierzchni Sdq i wskaźnika nośności powierzchni Sbi oraz nie wpłynęło znacząco na średnią objętość pustek powierzchni $Smvr$ i gęstość wierzchołków nierówności powierzchni Sds . Największy wpływ tej metody zauważono w przypadku wartości rozwinięcia powierzchni Sdr , która była o ponad połowę mniejsza w odniesieniu do metody zalewowej WET. Natomiast zastosowanie w procesie szlifowania metody hybrydowej MQL+CAG skutkowało zwiększeniem wysokości nierówności (Sa i St), średniej objętości pustek powierzchni $Smvr$, średniego kwadratowego nachylenia powierzchni Sdq , rozwinięcia powierzchni Sdr oraz wskaźnika nośności powierzchni Sbi , przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości wierzchołków nierówności powierzchni Sds w porównaniu do wartości średnich parametrów SGP uzyskanych dla metody zalewowej WET. Nie zauważono wyraźnego wpływu chłodzenia i smarowania strefy obróbki metodą hybrydową na zmiany wskaźnika tekstury powierzchni Str .

Podsumowując tą część analiz można stwierdzić, że poprzez dobór warunków chłodzenia i sterowania strefy szlifowania można istotnie wpływać na cechy funkcjonalne powierzchni, co potencjalnie powinno również wpływać na intensywność zjawisk zużycia i ostatecznie na trwałość ostrzy w procesie skórowania ryb płaskich. Zmiany cech funkcjonalnych powierzchni po szlifowaniu z zastosowaniem wybranych metod chłodzenia i smarowania wykazały także pomiary siły cięcia F , których wyniki przedstawiono na rysunku 101. Analiza parametrów SGP zamieszczonych w tabeli 37 oraz na rysunkach 103-110 dostarczyła danych szczegółowych pozwalających na powiązanie cech powierzchni ostrza z wartościami siły cięcia F .

Na rysunkach 111-114 zamieszczono wybrane wyniki obserwacji mikroskopowych powierzchni ostrzy noży planarnych, ukształtowanych przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki (WET – rys. 111, MQL – rys. 112, CAG – rys. 113 oraz MQL+CAG – rys. 114) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A w powiększeniu około 700×.

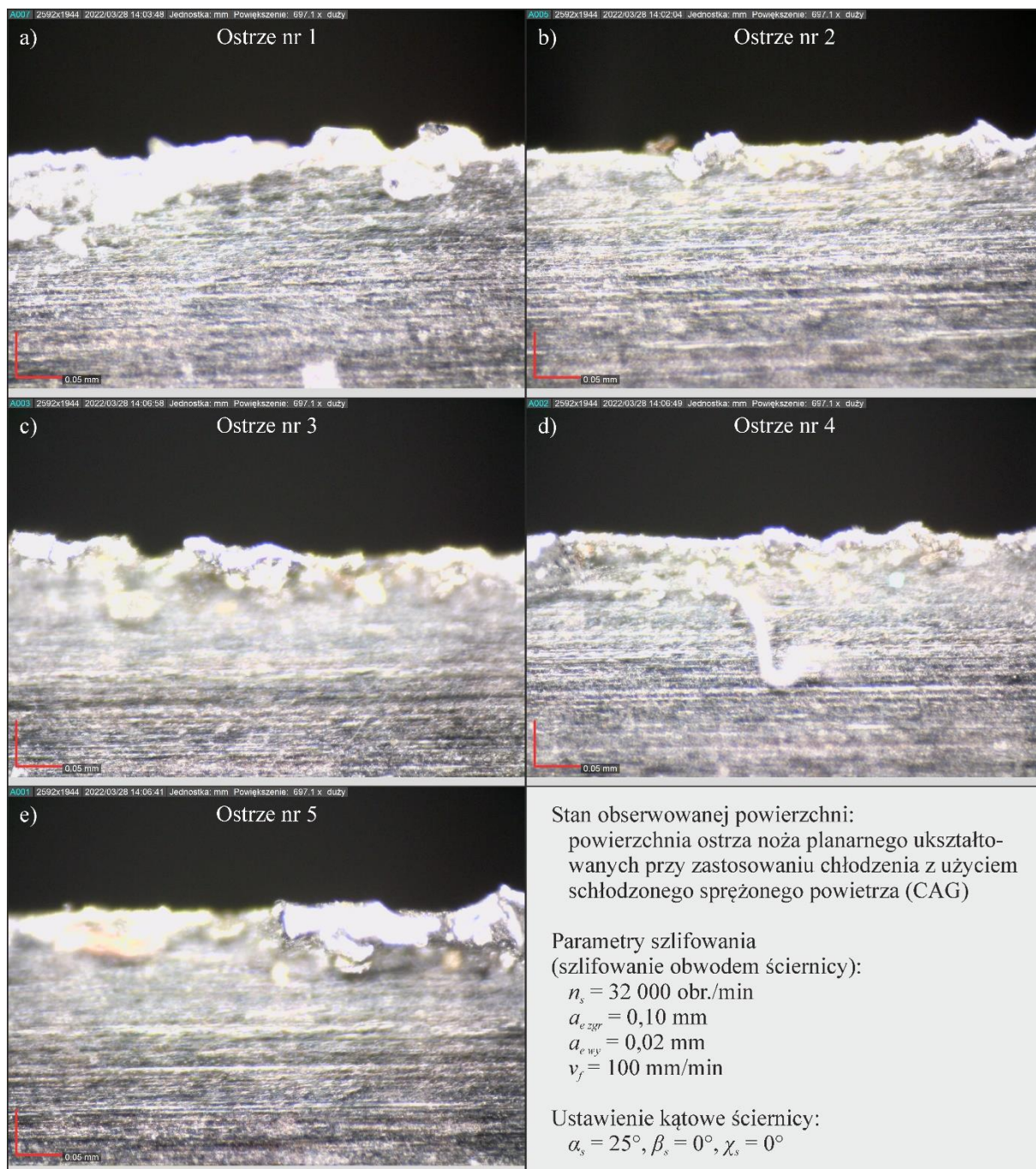


Rys. 111. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5



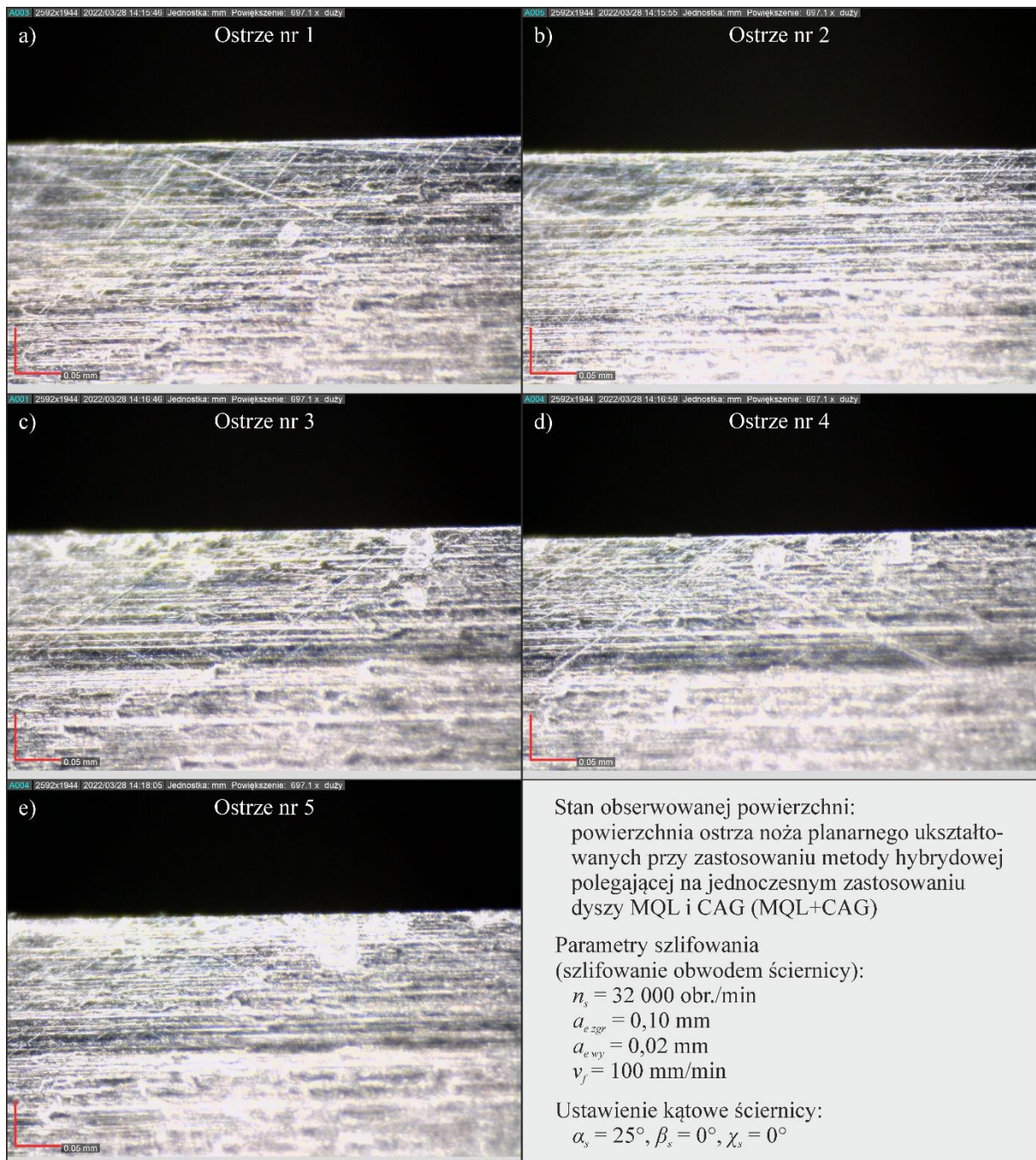
Rys. 112. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5

Analiza obrazów zamieszczonych na rysunkach 111-114 wskazuje na bardzo zbliżony wygląd powierzchni ostrza kształtowanego w warunkach stosowania metody zalewowej (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej (MQL+CAG). Potwierdzają to zbliżone wartości siły F zmierzone w przypadku cięcia próbek testowych tak szlifowanymi nożami (rys. 101).



Rys. 113. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5

W zbiorze analizowanych obrazów mikroskopowych wyraźnie wyróżniają się widoki powierzchni ostrzy ukształtowanych w warunkach podawania sprężonego schłodzonego powietrza (rys. 113). Ostrza te charakteryzowały się bardzo dużym przewinięciem, które nie zostało w pełni usunięte w zabiegu kończącym kształtowanie ostrzy. Na obrazach mikroskopowych wyraźnie widoczne są nieusunięte fragmenty materiału, wióry wstęgowe przywarte do ostrza oraz liczne wyszczerbienia.



Stan obserwowanej powierzchni:
powierzchnia ostrza noża planarnego ukształtowanego przy zastosowaniu metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG)

Parametry szlifowania
(szlifowanie obwodem ściernicy):

$$n_s = 32\,000 \text{ obr./min}$$

$$a_{e\text{ zgr}} = 0,10 \text{ mm}$$

$$a_{e\text{ wy}} = 0,02 \text{ mm}$$

$$v_f = 100 \text{ mm/min}$$

Ustawienie kątowe ściernicy:

$$\alpha_s = 25^\circ, \beta_s = 0^\circ, \chi_s = 0^\circ$$

Rys. 114. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5

Świadczy to niekorzystnych warunkach termicznych w strefie szlifowania powodujących uplastycznienie kształtowanego ostrza. Wynikają one z niedostatecznego chłodzenia oraz braku funkcji smarującej w procesie szlifowania, realizowanym w warunkach stosowania wyłącznie dyszy CAG. W rezultacie średnia siła cięcia tymi ostrzami była niemal dwukrotnie większa niż w przypadku pozostałych noży planarnych szlifowanych w warunkach chłodzenia zalewowego,

metody MQL oraz metody hybrydowej łączącej stosowanie dyszy MQL i dyszy CAG (rys. 101). Obserwacje te potwierdzają również wyniki analizy wartości wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni przedstawionych w tabeli 37 oraz na rysunkach 103-110.

7.3. Wnioski z badań właściwych

Uzyskane wyniki badań właściwych umożliwiły sformułowanie szeregu wniosków szczegółowych, które zamieszczono poniżej z podziałem na dwie grupy. Pierwsza dotyczy wyników badań właściwych badań mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych parametrów kinematycznych procesu szlifowania ostrzy.

1. Spośród rozpatrywanych w badaniach właściwych zmiennych procesu szlifowania, (odmiana kinematyczna, $a_{e\ wy}$, v_f) najwyraźniej na zmiany wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP wpływała zastosowana kinematyka obróbki.
2. Kształtowanie ostrza planarnego noża technicznego obwodem ściernicy pozwala na znaczące (dwu- lub nawet trzykrotne) zredukowanie ΔP w porównaniu z wynikami uzyskanymi w przypadku pozostałych dwóch odmian kinematycznych (szlifowanie obwodem oraz powierzchnią stożkową ściernicy).
3. Przeprowadzone analizy dotyczą mocy chwilowej i ostateczny bilans energetyczny procesu zależęć będzie także od czasu jego realizacji, który w przypadku zastosowania prędkości posuwu o najmniejszej wartości ($v_f = 100$ mm/min) będzie najdłuższy spośród przyjętych w badaniach.
4. Uzyskane wyniki pomiarów przyrostu mocy szlifowania potwierdzają dane z literatury uzależniające siłę (i skorelowaną z nią moc) szlifowania od wielkości warstwy skrawanej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający na czynnej powierzchni ściernicy aktywnie biorący udział w usuwaniu materiału obrabianego. Wielkość warstwy skrawanej zależy zatem przede wszystkim od naddatku obróbkowego oraz prędkości posuwu, przez co wraz ze zmniejszaniem tych parametrów maleje także moc szlifowania.
5. Wyniki badań właściwych wykazały brak jednoznacznej zależności pomiędzy wartościami siły cięcia F a zmianami wielkości naddatku obróbkowego na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$, natomiast wraz ze zwiększaniem v_f zaobserwowano nieznaczne zwiększanie wartości F . Trend ten jest najbardziej widoczny w przypadku szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy, gdzie zmiana v_f z 100 mm/min na

200 mm/min spowodowała zwiększenie F w zakresie od około 5% dla $a_{e\ wy} = 0,04$ mm do nawet 19% dla $a_{e\ wy} = 0,02$ mm.

6. Jednoznaczne powiązanie wyników pomiarów siły cięcia F ze zmianami wartości parametrów nastawnych procesu szlifowania (odmiana kinematyczna, $a_{e\ wy}$, v_f) jest utrudnione ze względu na czynniki zakłócające, w tym przede wszystkim warunki realizacji (powtarzalność, stan stosowanego narzędzia itp.) zabiegu usuwania przewinięcia ostrza realizowanego bezpośrednio po szlifowaniu noża.
7. Spośród rozpatrywanych w badaniach właściwych odmian kinematycznych szlifowania jako najkorzystniejszą (pod względem ocenianego przyrostu mocy szlifowania ΔP oraz siły cięcia F) można wskazać szlifowanie obwodem ściernicy.
8. Z przyjętego w badaniach właściwych zakresu zmienności parametrów $a_{e\ wy}$ i v_f najkorzystniejszy przebieg oraz rezultaty procesu szlifowania uzyskano stosując wartości minimalne z analizowanego zbioru ($a_{e\ wy} = 0,02$ mm; $v_f = 100$ mm/min).

Druga grupa wniosków dotyczy badań właściwych mających na celu wytypowanie najkorzystniejszych warunków chłodzenia i smarowania strefy obróbki w procesie szlifowania ostrzy.

1. Najmniejsze wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP zmierzono podczas realizacji procesu szlifowania w warunkach smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $\Delta P = 15,20$ W) oraz przy zastosowaniu metody hybrydowej (MQL+CAG, $\Delta P = 14,40$ W). W przypadku metody WET i CAG wartości ΔP były o około 50-60% większe, wynosząc odpowiednio $\Delta P = 22,67$ W i $\Delta P = 23,20$ W.
2. Zastosowanie metody MQL oraz metody hybrydowej MQL+CAG zapewniło bardzo dobrą realizację funkcji smarnej, dzięki czemu ograniczony zostaje udział tarcia stępionych wierzchołków skrawających o powierzchnię obrabianą, co przejawia się ograniczeniem siły szlifowania oraz skorelowanej z nią mocy.
3. Najkorzystniejsze właściwości tnące (przejawiające się relatywnie małymi wartościami F) uzyskano stosując w procesie szlifowania chłodzenie zalewowe (WET, $F = 11,81$ N), smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $F = 15,25$ N) oraz metodę hybrydową (MQL+CAG, $F = 13,69$ N).
4. W przypadku szlifowania w warunkach podawania schłodzonego sprężonego powietrza średnia siła cięcia była aż o 91,6% większa ($F = 22,63$ N) w porównaniu z wynikiem uzyskanym dla najkorzystniejszej metody zalewowej, świadcząc o niedostatecznej jakości ostrza ukształtowanego w takich warunkach.

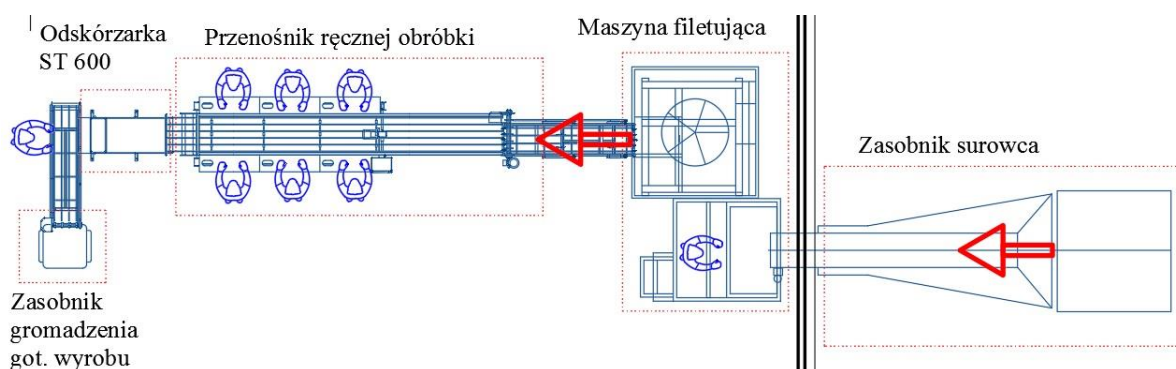
5. Wyniki analiz wybranych parametrów SGP pozwalają wnioskować, że zastosowanie metody zalewowej WET oraz zminimalizowanego smarowania MQL pozwoliło ukształtować powierzchnie ostrza o zbliżonej strukturze geometrycznej.
6. Zastosowanie wyłącznie chłodzenia sprężonym schłodzonym powietrzem z użyciem dyszy CAG spowodowało relatywne zmniejszenie wartości parametrów Sa , St , Str , Sdq i Sbi oraz nie wpłynęło znacząco na wartość $Smvr$ i Sds . Ponadto wartość rozwinięcia powierzchni Sdr dla metody CAG była o ponad połowę mniejsza w odniesieniu do metody zalewowej WET.
7. Zastosowanie w procesie szlifowania metody hybrydowej MQL+CAG skutkowało zwiększeniem wartości parametrów Sa , St , $Smvr$, Sdq , Sdr oraz Sbi , przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości wierzchołków nierówności powierzchni Sds w porównaniu z wartościami średnimi parametrów SGP uzyskanymi dla metody zalewowej WET. Jednocześnie nie zaobserwowano wyraźnego wpływu metody MQL+CAG na zmiany wskaźnika tekstury powierzchni Str .
8. Poprzez dobór warunków chłodzenia i sterowania strefy szlifowania można istotnie wpływać na cechy funkcjonalne powierzchni, co wpływa na zmierzone wartości siły cięcia F oraz potencjalnie powinno również wpływać na intensywność zjawisk zużycia i ostatecznie na trwałość ostrzy w procesie skórowania ryb płaskich.
9. Analiza obrazów mikroskopowych wykazała bardzo zbliżony stan powierzchni ostrzy kształtowanych w warunkach stosowania metody WET, MQL oraz MQL+CAG. Na tym tle wyraźnie wyróżniają się widoki powierzchni ostrzy ukształtowanych w warunkach podawania sprężonego schłodzonego powietrza dyszą CAG, które charakteryzowały się bardzo dużym przewinięciem oraz widocznymi nieusuniętymi fragmentami materiału i wiórami wstęgowymi, przywartymi do ostrza, a także licznymi wyszczerbieniami ostrza. Cechy te potwierdzają wcześniejsze wnioski o niekorzystnych warunkach termicznych w strefie szlifowania w warunkach chłodzenia metodą CAG powodujących uplastycznienie kształtowanego ostrza.
10. Wyniki badań właściwych wykazały, że stosowanie w procesie szlifowania noży planarnych wyłącznie chłodzenia strumieniem sprężonego schłodzonego powietrza, generowanego przez dyszę CAG nie zapewnia uzyskania odpowiedniej jakości ostrza, w związku z czym noże kształtowane w takich warunkach nie zostały uwzględnione w badaniach eksploatacyjnych opisanych w rozdziale 8 niniejszej dysertacji.

8. BADANIA EKSPLOATACYJNE OSTRZY W PROCESIE CIĘCIA TKANEK MIĘKKICH

Badania eksploatacyjne noży technicznych w procesie skórowania ryb płaskich przeprowadzono w warunkach przemysłowych (w zakładzie przetwórczym firmy Espersen Poland Sp. z o.o., Koszalin, Polska) i miały one na celu określenie okresu trwałości noży planarnych, których geometria ostrza ukształtowana została w najkorzystniejszych warunkach procesu szlifowania, określonych w rezultacie badań właściwych. Próby przeprowadzono na stanowisku produkcyjnym w warunkach przemysłowych, co umożliwiło zweryfikowanie w warunkach przemysłowej eksploatacji ostrzy technicznych, korzystnych cech noży kształtowanych w najkorzystniejszych warunkach procesu szlifowania określonych w toku wcześniejszych etapów prac badawczych. Badania przeprowadzono osobno dla dwóch gatunków ryb płaskich: gładzicy (*Peuronectes Platessa*) i flądry (*Platichthys Flesus*). Szczegółowy opis metodyki tych badań zamieszczono w podrozdziale 4.4. niniejszej rozprawy.

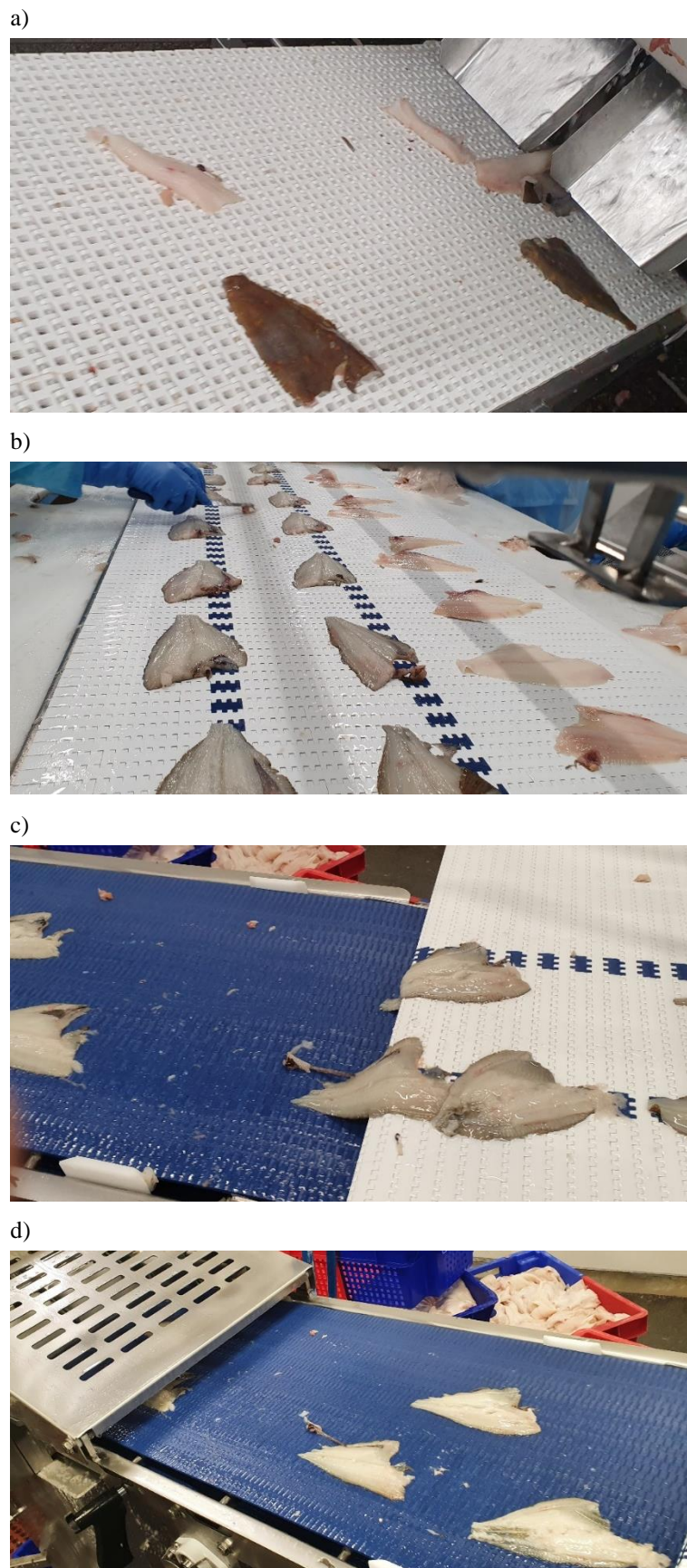
8.1. Analiza wyników badań eksploatacyjnych ostrzy w warunkach przemysłowych

Badania eksploatacyjne planarnych noży technicznych przeprowadzono na stanowisku do skórowania, które jest częścią linii technologicznej obróbki surowca rybnego (rys. 115).

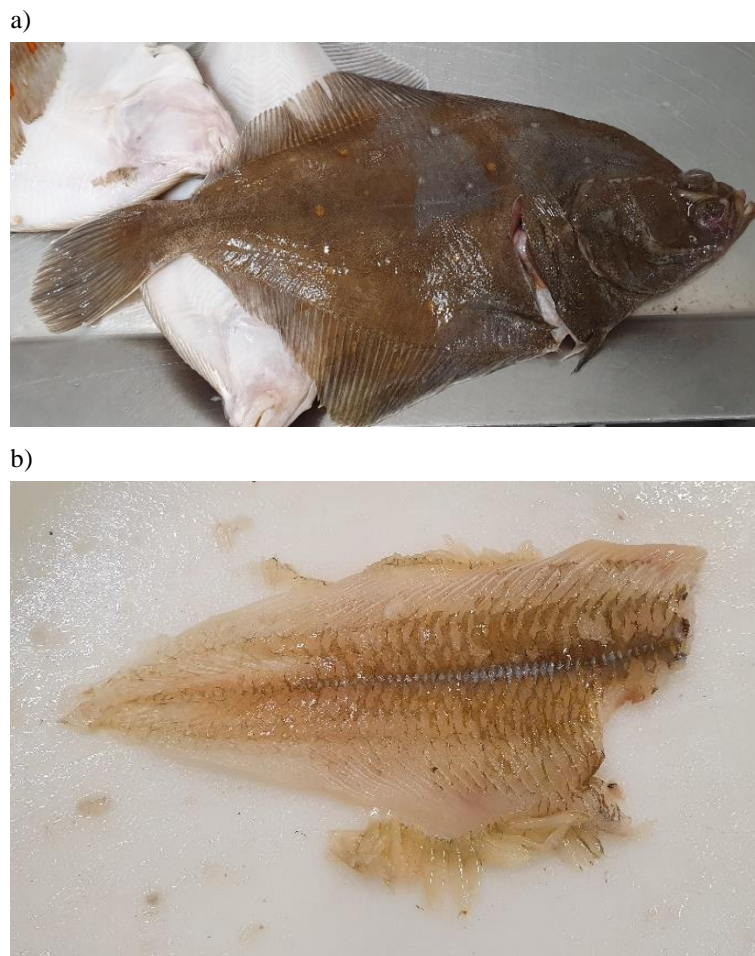


Rys. 115. Schemat ideowy ciągu technologicznego obróbki filetów z gładzicy (*Peuronectes Platessa*) i flądry (*Platichthys Flesus*) z oznaczonym kierunkiem przepływu surowca

Na rysunku 116 zamieszczono widoki poszczególnych etapów procesu obróbki surowca rybnego realizowanych w trakcie badań eksploatacyjnych, w skład których wchodziło filetowanie z użyciem maszyny Baader 176 (rys. 116a), ręczne trzymowanie filetów (rys. 116b), podawanie ryb do transportera maszyny odeskórzającej (rys. 116c) oraz transport fletów do sekcji odeskórzenia (rys. 116d). Na rysunku 117 przedstawiono widok przetwarzanej ryby (gładzicy *Peuronectes Platessa*) przed procesem filetowania (rys. 117a) oraz widok fileta tej ryby po prawidłowo wykonanym procesie odeskórzenia (rys. 117b).



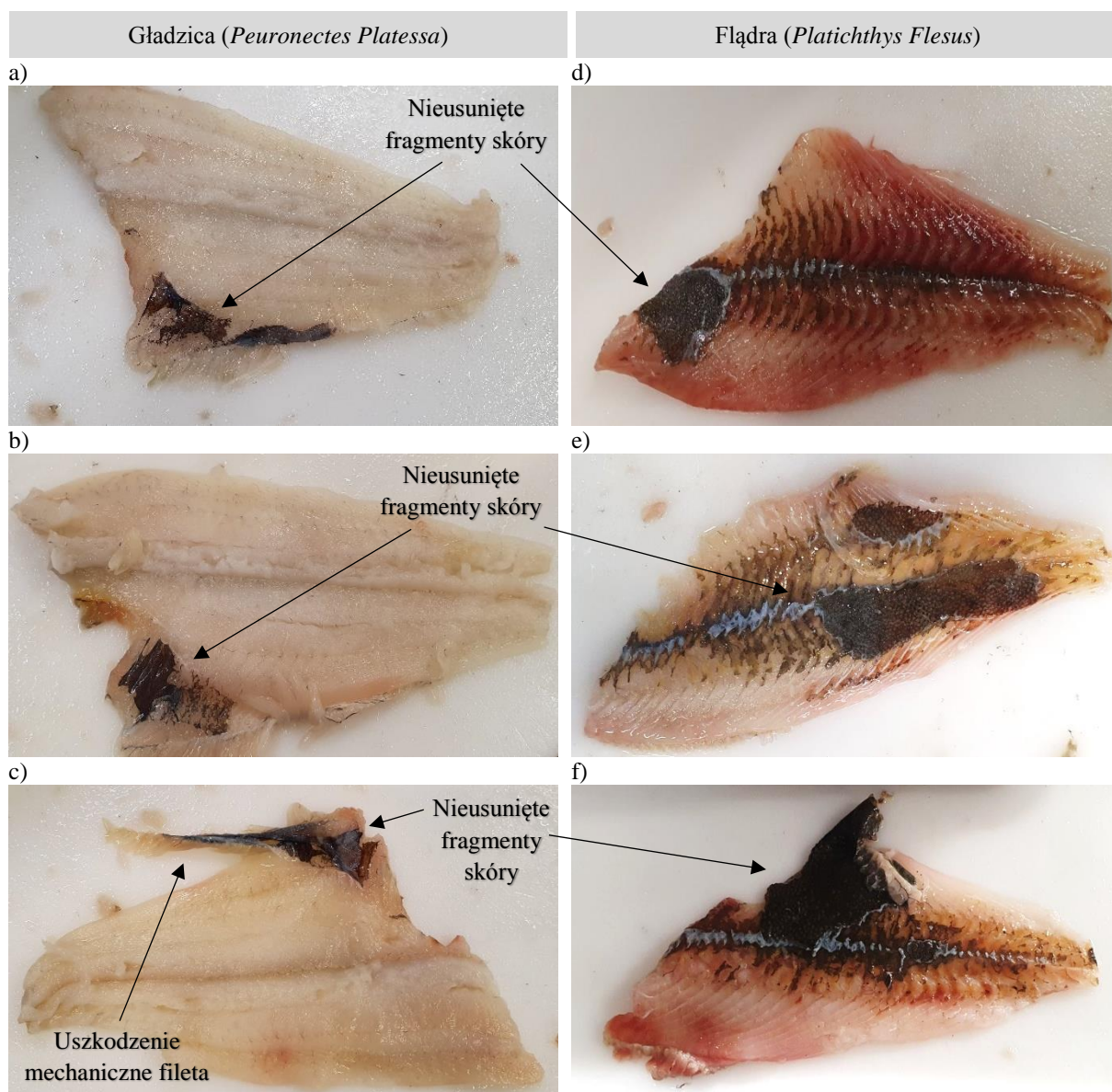
Rys. 116. Widok poszczególnych etapów obróbki surowca rybnego w trakcie badań eksploatacyjnych planarnych noży technicznych: a) filety ryby po obróbce w maszynie Baader 176; b) ręczne trzymowanie filetów; c) podawanie ryby do transportera maszyny odskórzającej; d) transport filetów do sekcji odskórzania



Rys. 117. Widok surowca rybnego (gładzicy *Peuronectes Platessa*) przed procesem filetowania (a) oraz widok fileta tej ryby po prawidłowo wykonanym procesie odskórzania (b)

W badaniach eksploatacyjnych zwracano szczególną uwagę na jakość filetów po procesie odskórzania, przez co rozumie się prawidłowy spójny kształt obrobionej tuszy. Podstawowym kryterium zakończenia okresu trwałości badanych noży planarnych był udział procentowy nieusuniętej skóry na powierzchni fileta po skórowaniu. Przyjęta w zakładzie norma określa, że udział pozostałości skóry na porcjach filetów rybnych po skórowaniu nie może być większy niż 7% w odniesieniu do całkowitej powierzchni usuwanej skóry. Na rysunku 118 przedstawiono przykłady charakterystycznych wad procesu skórowania w postaci nieusuniętych fragmentów skóry a także uszkodzenia mechaniczne filetów gładzicy *Peuronectes Platessa* (rys. 118a-c) i flądry *Platichthys Flesus* (rys. 118d-f). Intensywność powstawania przedstawionych wad nasila się wraz z postępującym zużyciem noży planarnych wywołanym kontaktem z ziarnami piasku, łuskami i drobinami muszli zakotwiczonymi w skórze przetwarzanej ryby. Zużyte narzędzie wpływa negatywnie na proces odskórzania prowadząc nie tylko do niedokładnego usunięcia skóry, ale również do mechanicznych uszkodzeń gotowego wyrobu (rys. 118c). W związku z powyższym każdorazowo

o zakończeniu testu eksploatacyjnego decydował pracownik kontrolujący jakość skórowania zgodnie z opisaną zasadą. W celu ograniczenia wpływu subiektywizmu tej oceny testy przeprowadzono na zmianach roboczych, na których pracował zawsze ten sam, doświadczony pracownik kontroli jakości. Dodatkowo opisywane badania przeprowadzono obrabiając surowiec rybny pochodzący z jednej partii połowowej, żeby ograniczyć wpływ zróżnicowania jakości ryb na uzyskane wyniki.



Rys. 118. Widok fileta gładzicy *Peuronectes Platessa* (a-c) oraz flądry *Platichthys Flesus* (d-f) po odskórowaniu z widocznymi charakterystycznymi wadami tego procesu

8.1.1. Proces skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*)

W tabelach 38-39 oraz na rysunkach 119-120 zamieszczono zestawienie rezultatów badań eksploatacyjnych noży planarnych w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*). W tabeli 38 i na rysunku 119 przedstawiono wyniki pomiaru czasu poprawnej pracy

narzędzi a w tabeli 39 i na rysunku 120 wyniki pomiaru masy obrobionego surowca w procesie odskórzania uzyskane dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych (noży referencyjnych i noży szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego WET, smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem MQL oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG).

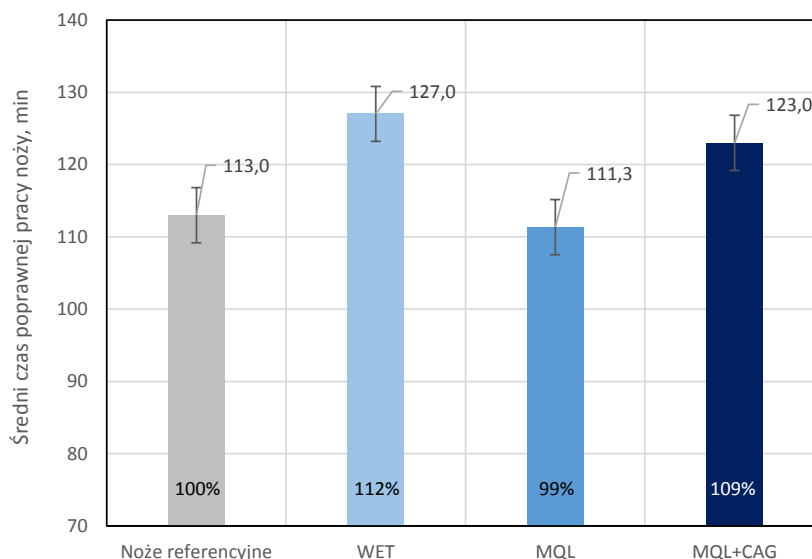
Uzyskane wyniki badań procesu skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) wykazały, że noże ukształtowane w procesie szlifowania realizowanym w warunkach zminimalizowanego smarowania metodą MQL charakteryzowały się niemal identycznym średnim czasem poprawnej eksploatacji oraz nieznacznie mniejszą średnią masą obrobionego surowca rybnego (tab. 38-39 i rys. 119-120). Oznacza to, że w przyjętych warunkach procesu szlifowania ostrza poprawnie odtworzono jego właściwości skrawne oraz charakterystykę pracy noży referencyjnych. W rezultacie poprawnie zregenerowano ostrze umożliwiając jego ponowną eksploatację w procesie skórowania, jednak bez wpływu (negatywnego lub pozytywnego) na okres trwałości.

Tab. 38. Zestawienie wyników pomiaru czasu poprawnej pracy narzędzi w procesie odskórzania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych

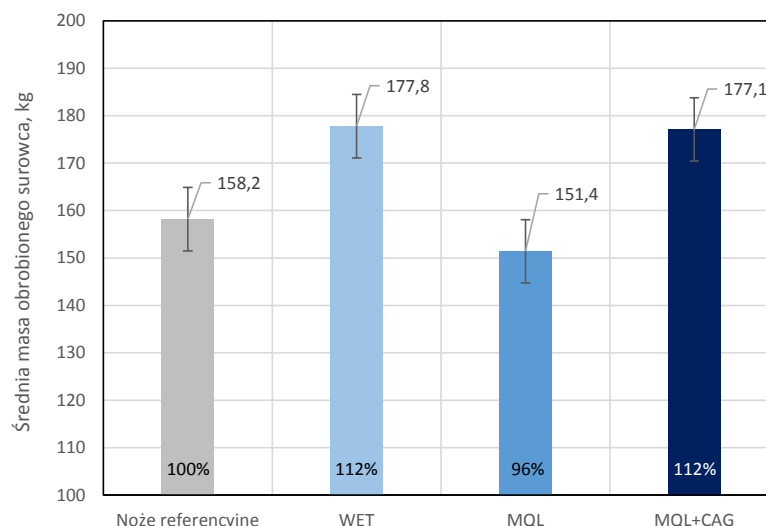
Oznaczenie noży zastosowanych do odskórzania	Czas poprawnej pracy noży w procesie odskórzania realizowanym w warunkach przemysłowych, min	Średni czas poprawnej pracy noży, min	Względny czas pracy noży w odniesieniu do noży referencyjnych, %
Noże referencyjne	105	113,0	100%
	123		
	111		
WET	135	127,0	112%
	121		
	125		
MQL	114	111,3	99%
	118		
	102		
MQL+CAG	126	123,0	109%
	112		
	131		

Tab. 39. Zestawienie wyników pomiaru masy obrobionego surowca w procesie odskórzania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych

Oznaczenie noży zastosowanych do odskórzania	Masa obrobionego surowca w procesie odskórzania realizowanym w warunkach przemysłowych, kg	Średnia masa obrobionego surowca, kg	Względna masa obrobionego surowca w odniesieniu do noży referencyjnych, %
Noże referencyjne	147	158,2	100%
	172		
	155		
WET	189	177,8	112%
	169		
	175		
MQL	155	151,4	96%
	160		
	139		
MQL+CAG	181	177,1	112%
	161		
	189		



Rys. 119. Średni czas pracy noży w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) w warunkach przemysłowych (wyznaczony na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 120. Średnia masa obrabionego surowca rybnego podczas procesu skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) w warunkach przemysłowych (wyznaczona na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)

W przypadku noży szlifowanych z zastosowaniem metody zalewowej (WET) oraz metody hybrydowej (MQL+CAG) wyznaczono odpowiednio 12% i 9% wydłużenie okresu trwałości w odniesieniu do długości poprawnej pracy noży referencyjnych (tab. 38 i rys. 119). Oznacza to, że wyznaczone na drodze badań rozpoznawczych i badań właściwych warunki kształtowania ostrzy planarnych noży technicznych umożliwiają w przypadku tych dwóch metod chłodzenia i smarowania strefy obróbki uzyskanie zauważalnego wydłużenia trwałości eksploatacyjnej narzędzi stosowanych w procesie skórowania ryb płaskich.

8.1.2. Proces skórowania flądry (*Platichthys Flesus*)

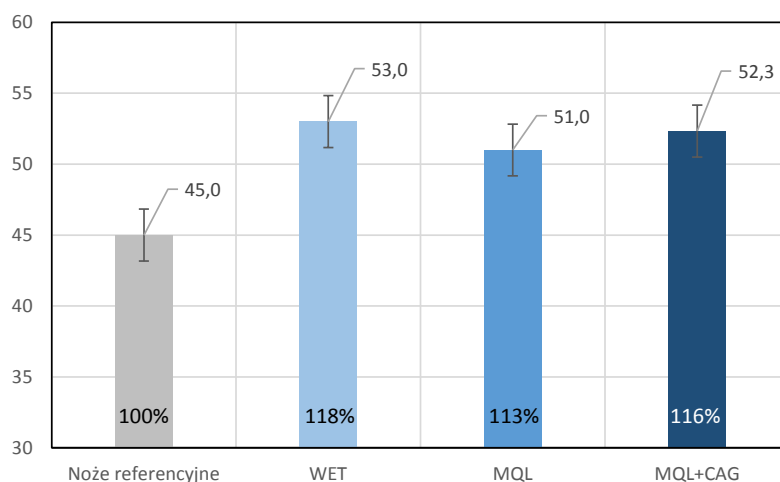
W tabelach 40-41 oraz na rysunkach 121-122 zamieszczono zestawienie rezultatów badań eksploatacyjnych noży planarnych w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*). W tabeli 40 i na rysunku 121 przedstawiono wyniki pomiaru czasu poprawnej pracy narzędzi a w tabeli 41 i na rysunku 122 wyniki pomiaru masy obrabionego surowca w procesie skórowania uzyskane dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych (noży referencyjnych i noży szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego WET, smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem MQL oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG).

Tab. 40. Zestawienie wyników pomiaru czasu poprawnej pracy narzędzi w procesie odskórzania flądry (*Platichthys Flesus*) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych

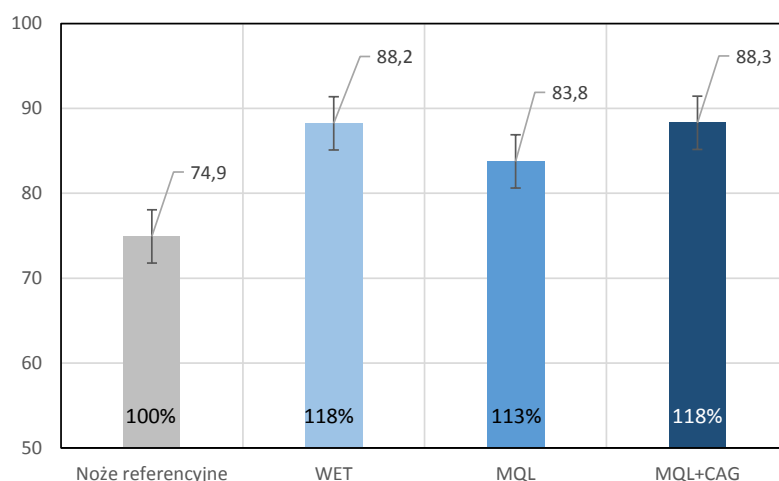
Oznaczenie noży zastosowanych do odskórzania	Czas poprawnej pracy noży w procesie odskórzania realizowanym w warunkach przemysłowych, min	Średni czas poprawnej pracy noży, min	Względny czas pracy noży w odniesieniu do noży referencyjnych, %
Noże referencyjne	48	45,0	100%
	44		
	43		
WET	51	53,0	118%
	56		
	52		
MQL	53	51,0	113%
	51		
	49		
MQL+CAG	50	52,3	116%
	54		
	53		

Tab. 41. Zestawienie wyników pomiaru masy obrobionego surowca w procesie odskórzania flądry (*Platichthys Flesus*) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych

Oznaczenie noży zastosowanych do odskórzania	Masa obrobionego surowca w procesie odskórzania realizowanym w warunkach przemysłowych, kg	Średnia masa obrobionego surowca, kg	Względna masa obrobionego surowca w odniesieniu do noży referencyjnych, %
Noże referencyjne	80	74,9	100%
	73		
	72		
WET	85	88,2	118%
	93		
	87		
MQL	87	83,8	112%
	84		
	80		
MQL+CAG	84	88,3	118%
	91		
	89		



Rys. 121. Średni czas pracy noży w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) w warunkach przemysłowych (wyznaczony na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)



Rys. 122. Średnia masa obrobionego surowca rybnego podczas procesu skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) w warunkach przemysłowych (wyznaczona na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)

Uzyskane wyniki badań procesu skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) potwierdziły możliwość wydłużenia okresu trwałości narzędzi poprzez precyzyjne kształtowanie ostrzy noży planarnych, wykazaną wcześniej w przypadku testów noży przeprowadzonych w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*). Ponieważ mięso flądry cechuje zwartą strukturą, trudniej jest rozwarstwić mięso, niż ma to miejsce w przypadku bardzo delikatnej struktury mięsa gładzicy. W rezultacie okres trwałości noży referencyjnych był znacznie krótszy niż

w procesie skórowania gładzicy i wynosił 43-48 minut. Wpływ na taki wynik miało również relatywnie duże zanieczyszczenie usuwanej skóry.

W przypadku noży kształtowanych w warunkach określonych w efekcie realizacji badań właściwych niniejszej dysertacji, wykazano możliwość wydłużenia średniego czasu pracy noży w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) o 16%-18% (tab. 40 i rys. 121). Jednocześnie średnia masa obrobionego surowca rybnego zwiększyła się w przypadku zastosowania noży oznaczonych jako WET, MQL i CAG+MQL odpowiednio o 18%, 13% i 18% (tab. 41 i rys. 122).

8.1.3. Analiza korzyści wynikających z wydłużenia okresu trwałości noży

Porównanie wyników testów eksploatacyjnych dla noży szlifowanych w warunkach metody zalewowej WET, MQL i metody hybrydowej MQL+CAG (9%-18% wydłużenie okresu trwałości) może świadczyć o korzystniejszych warunkach obróbki w przypadku ostrzy kształtowanych metodą opisaną w niniejszej dysertacji (tab. 38-41 i rys. 119-122). Stosowanie metody MQL znacząco ogranicza wydatek płynu chłodząco-smarującego ($1,1 \text{ dm}^3/\text{h}$) w porównaniu do metody zalewowej ($1,75 \text{ dm}^3/\text{min} = 105 \text{ dm}^3/\text{h}$), co znacząco ogranicza realizację funkcji chłodzącej tej metody. Z uzyskanych wyników badań eksploatacyjnych można wnioskować, że wspomaganie w procesie szlifowania metody MQL dodatkowym chłodzeniem poprzez podawanie schłodzonego sprężonego powietrza generowanego w dyszy CAG skutecznie wspomaga rozpraszanie ciepła ze strefy obróbki umożliwiając kształtowanie ostrzy technicznych o jakości analogicznej do tej uzyskiwanej w warunkach chłodzenia zalewowego. Podkreślić przy tym należy, że wydatek płynnego czynnika chłodząco-smarującego jest ograniczony w takim przypadku ponad 95-krotnie (z $105 \text{ dm}^3/\text{h}$ do $1,1 \text{ dm}^3/\text{h}$) przy jednoczesnym podawaniu około 3000 dm^3 schłodzonego sprężonego powietrza na godzinę. W odróżnieniu od płynów chłodząco-smarujących użycie powietrza jako czynnika chłodzącego nie wiąże się z ponoszeniem kosztów zakupu i utylizacji. Natomiast ponad 95-krotne ograniczenie wydatku płynów chłodzących znacząco redukuje te składniki kosztowe w procesie produkcji i regeneracji ostrzy technicznych.

Wydłużenie okresu trwałości ostrza skutkuje korzyściami dla przedsiębiorstwa produkcyjnego w postaci ograniczenia ilości zużytych noży (redukcja kosztów zakupu) oraz zmniejszenia częstotliwości przestojów produkcyjnych wynikających z wymiany narzędzi. Bazując na danych z przedsiębiorstwa przetwórstwa rybnego Espersen Poland Sp. z o.o. z lat 2020-2021 w tabeli 42 przedstawiono średnią roczną liczbę ostrzy o geometrii 1, jaka została zużyta w procesie produkcyjnym w opisywanym okresie. Zakładając średni czas wymiany

ostrza wynoszący cztery minuty (wartość zmierzona podczas badań eksploatacyjnych) określono straty czasu, które powstają z powodu ich wymiany a także potencjalne korzyści wynikające z 18% wydłużenia okresu trwałości noży.

Tab. 42. Zestawienie liczby zużytych ostrzy o geometrii oraz średnich wartości czasu wynikających z ich wymiany (wg. danych Espersen Poland Sp. z.o.o. za lata 2020-2021)

Średnia roczna liczba zużytych ostrzy geometrii 1, szt.	Sumaryczny czas wymiany narzędzi, h	Zmniejszenie liczby zużytych noży w przypadku 18% wydłużenia ich trwałości, szt.	Zaoszczędzony czas produkcyjny w przypadku 18% wydłużenia trwałości noży, h
4240	283	763	92

Uwzględniając uzyskane wyniki badań eksploatacyjnych i rozszerzając je na noże o geometrii 1-4 (przedstawione na rysunku 33 w podrozdziale 4.2.2.), można obliczyć korzyści skali dla wszystkich typów narzędzi wykorzystywanych w procesie skórowania w zakładzie produkcyjnym. W tabeli 43 zestawiono średnią roczną liczbę ostrzy o geometrii 1-4 zużytych w procesie produkcyjnym w latach 2020-2021 w zakładzie Espersen Poland Sp. z o.o.

Tab. 43. Zestawienie liczby zużytych ostrzy o geometrii 1-4 oraz średnich wartości czasu wynikających z ich wymiany (wg. danych Espersen Poland Sp. z.o.o. za lata 2020-2021)

Geometria ostrza	Średnia roczna liczba zużytych ostrzy, szt.	Sumaryczny czas wymiany narzędzi, h	Zmniejszenie liczby zużytych noży w przypadku 18% wydłużenia ich trwałości, szt.	Zaoszczędzony czas produkcyjny w przypadku 18% wydłużenia trwałości noży, h
1	4240	283	763	51
2	1250	83	225	15
3	4054	270	730	49
4	1051	70	189	13
Razem:	10595	706	1907	127

Wyniki analiz przedstawione w tabeli 43 wykazały, że ograniczenie liczby noży koniecznych do realizacji procesu przetwarzania ryb płaskich, wynikające z wydłużenia okresu trwałości ostrzy o 18%, umożliwia zmniejszenie liczby koniecznych narzędzi o 1907 szt. w skali jednego roku. Dodatkowo możliwe jest uzyskanie średnio 127 dodatkowych godzin produkcyjnych, wynikających ze skrócenia czasu nieprodukcyjnego związanego z wymianą noży w operacji skórowania.

8.2. Wnioski z badań eksploatacyjnych

Uzyskane wyniki badań eksploatacyjnych noży technicznych w procesie skórowania ryb płaskich przeprowadzonych w warunkach przemysłowych umożliwiły sformułowanie szeregu wniosków szczegółowych.

1. W przypadku kształtowania noży w procesie szlifowania realizowanym w warunkach określonych na podstawie wyników przeprowadzonych badań rozpoznawczych i właściwych poprawnie odtworzono właściwości skrawne ostrzy oraz charakterystykę pracy noży referencyjnych umożliwiając ich regenerację i ponowną eksploatację w procesie skórowania ryb płaskich.
2. Możliwość wielokrotnego wykorzystania tego samego ostrza pozwala uzyskać wymierne korzyści finansowe oraz ograniczyć ilość powstałych odpadów.
3. Kształtowanie ostrzy planarnych noży technicznych w warunkach chłodzenia zalewowego (WET) oraz metody hybrydowej (MQL+CAG) umożliwiło odpowiednio 12% i 9% wydłużenie okresu trwałości w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) oraz 18% i 16% w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*), w odniesieniu do długości poprawnej pracy noży referencyjnych w procesie skórowania ryb płaskich.
4. Rezultaty testów eksploatacyjnych uzyskane dla narzędzi szlifowanych w warunkach hybrydowej metody chłodzenia i smarowania strefy obróbki (MQL+CAG) wykazały, że wspomaganie w procesie szlifowania metody MQL dodatkowym chłodzeniem poprzez podawanie schłodzonego sprężonego powietrza generowanego w dyszy CAG skutecznie wspomaga rozpraszanie ciepła ze strefy obróbki umożliwiając kształtowanie ostrzy technicznych o jakości analogicznej do tej uzyskiwanej w warunkach chłodzenia zalewowego WET.
5. Badane ostrza, niezależnie od użytej metody chłodzenia w procesie ich kształtowania, wykazały bardzo dobre właściwości tnące. Nie wpłynęły w żaden inny sposób na proces produkcyjny. Zaobserwowano, że filety rybne, które były obrabiane nie ulegały żadnym uszkodzeniom np. w postaci ich rozwarstwień. Ocena organoleptyczna doświadczonego personelu produkcyjnego nie stwierdziła żadnych różnic jakościowych w stosunku do procesu prowadzanego przy zastosowaniu noży referencyjnych.
6. Zastosowanie hybrydowej metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania (MQL+CAG) pozwala na ponad 95-krotne ograniczenie wydatku płynów chłodzących, znacząco redukując koszty ich zakupu i utylizacji w procesie produkcji

oraz regeneracji ostrzy technicznych (w odniesieniu do szlifowania prowadzonego w warunkach chłodzenia zalewowego WET).

7. Wydłużenie okresu trwałości ostrzy o 18% w procesie przetwarzania ryb płaskich umożliwia zmniejszenie liczby koniecznych narzędzi o 1907 szt. oraz uzyskanie 127 dodatkowych godzin produkcyjnych (wynikających ze skrócenia czasu nieprodukcyjnego związanego z wymianą noży) w skali roku.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków szczegółowych odnoszących się do zdefiniowanego celu poznawczego (podrozdział 9.1.), utylitarnego (podrozdział 9.2.) i metodycznego (podrozdział 9.3.). Ponadto określono wnioski do dalszych prac badawczych (podrozdział 9.4.) i zaprezentowano rezultaty aktywności autora w zakresie upowszechniania rezultatów prac badawczych (podrozdział 9.5.).

9.1. Wnioski poznawcze

1. Na podstawie uzyskanych wyników badań rozpoznawczych określono, że powierzchnie ostrzy planarnych noży technicznych ukształtowane ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126 wymagają użycia relatywnie największych wartości siły do przecięcia próbek badawczych – wartość sumaryczna wyznaczona ze wszystkich prób (18,62 N) była o około 19% większa w odniesieniu do wartości sumarycznych siły cięcia uzyskanych dla noży szlifowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B181 (15,67 N) i B251 (15,72 N).
2. Analiza mikrotopografii oraz obrazów mikroskopowych powierzchni ostrzy wykazała występowanie na nich regularnych śladów obróbkowych ukierunkowanych zgodnie z kierunkiem przemieszczania aktywnych ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy (wynikających ze złożenia ruchu obrotowego i posuwowego narzędzia), a także zidentyfikowano nieliczne defekty powierzchni w postaci rys skierowanych w kierunku odmiennym od dominującego, które mogą być efektem zabiegu usuwania przewinięcia ostrza.
3. Porównanie wyznaczonych wartości parametrów SGP dla powierzchni kształtowanych trzema porównywanymi rodzajami ściernic (B121; B181 i B251) wykazało niewielkie różnice, uwzględniając jednak wartości wskaźnika nośności powierzchni S_{bi} jako ściernicę pozwalającą ukształtować powierzchnię ostrza o najkorzystniejszych cechach funkcjonalnych wytypowano ściernicę z ziarnami B181.
4. Na podstawie kompleksowej analizy wyników badań rozpoznawczych (pomiarów wartości siły cięcia F , wyznaczonego zbioru parametrów SGP oraz obserwacji mikroskopowych) stwierdzono, że spośród trzech rodzajów ściernic różniących się wielkością ziaren cBN (B121; B181 i B251), jako narzędzie umożliwiające uzyskanie najkorzystniejszych wyników obróbki wybrano ściernice zbudowane z ziaren cBN o numerze B181.

5. Wyniki badań przeprowadzonych na specjalnym stanowisku do pomiaru siły cięcia F wykazały wyraźny związek wartości F z wartością kąta wierzchołkowego α badanych ostrzy: dla ostrzy z najmniejszą wartością kąta wierzchołkowego (geometria 1: $\alpha = 45^{\circ}12'$, geometria 2: $\alpha = 43^{\circ}31'$) uzyskano najmniejsze wartości siły cięcia (geometria 1: $F_{1\max} = 2,83$ N, geometria 2: $F_{2\max} = 3,09$ N). Zwiększenie wartości kąta wierzchołkowego o około 20% do wartości $\alpha = 52^{\circ}25'$ (geometria 4) skutkowało zwiększeniem wartości siły cięcia o 43% w odniesieniu do $F_{1\max}$ ($F_{4\max} = 4,07$ N), natomiast największą wartość siły cięcia F zarejestrowano dla noża o geometrii 3 ($F_{3\max} = 4,78$ N, czyli o około 69% więcej niż $F_{1\max}$) który odznaczał się również największą wartością kąta wierzchołkowego wynoszącą $\alpha = 54^{\circ}25'$ (około 25% więcej niż w przypadku geometrii 1 i 2).
6. Spośród zmiennych procesu szlifowania (odmiana kinematyczna, $a_{e\ wy}$, v_f) najwyraźniej na zmiany ΔP wpływała zastosowana kinematyka obróbki. Kształtowanie ostrza planarnego noża technicznego obwodem ściernicy pozwala na znaczące (dwu- lub nawet trzykrotne) zredukowanie ΔP w porównaniu z wynikami uzyskanymi w przypadku pozostałych dwóch odmian kinematycznych (szlifowanie obwodem oraz powierzchnią stożkową ściernicy).
7. Uzyskane wyniki pomiarów ΔP potwierdzają dane z literatury uzależniające siłę (i skorelowaną z nią moc) szlifowania od wielkości warstwy skrawanej przypadającej na pojedynczy wierzchołek skrawający na czynnej powierzchni ściernicy, aktywnie biorący udział w usuwaniu materiału obrabianego.
8. Wyniki badań właściwych wykazały brak jednoznacznej zależności pomiędzy wartościami siły cięcia F a zmianami wielkości nadatku obróbkowego na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$, natomiast wraz ze zwiększaniem v_f zaobserwowano nieznaczne zwiększanie wartości F .
9. Spośród rozpatrywanych w badaniach właściwych odmian kinematycznych szlifowania jako najkorzystniejszą (pod względem ocenianego przyrostu mocy szlifowania ΔP oraz siły cięcia F) można wskazać szlifowanie obwodem ściernicy. Natomiast z przyjętego w badaniach właściwych zakresu zmienności parametrów $a_{e\ wy}$ i v_f najkorzystniejszy przebieg oraz rezultaty procesu szlifowania uzyskano stosując $a_{e\ wy} = 0,02$ mm i $v_f = 100$ mm/min.
10. Najmniejsze wartości przyrostu mocy szlifowania ΔP zmierzono podczas realizacji procesu szlifowania w warunkach smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $\Delta P = 15,20$ W) oraz przy zastosowaniu metody hybrydowej (MQL+CAG,

$\Delta P = 14,40$ W). W przypadku metody WET i CAG wartości ΔP były o około 50-60% większe, wynosząc odpowiednio $\Delta P = 22,67$ W i $\Delta P = 23,20$ W. Wynika z tego, że zastosowanie metody MQL oraz metody hybrydowej MQL+CAG zapewniło bardzo dobrą realizację funkcji smarnej, ograniczenie udziału tarcia stępionych wierzchołków skrawających o powierzchnię obrabianą i w efekcie ograniczenie siły szlifowania oraz skorelowanej z nią mocy.

11. Najkorzystniejsze właściwości tnące (przejawiające się relatywnie małymi wartościami F) uzyskano stosując w procesie szlifowania chłodzenie zalewowe (WET, $F = 11,81$ N), smarowanie ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL, $F = 15,25$ N) oraz metodę hybrydową (MQL+CAG, $F = 13,69$ N). W przypadku szlifowania w warunkach podawania schłodzonego sprężonego powietrza średnia siła cięcia była aż o 91,6% większa ($F = 22,63$ N) w porównaniu z wynikiem uzyskanym dla najkorzystniejszej metody zalewowej, świadcząc o niedostatecznej jakości ostrza ukształtowanego w takich warunkach.
12. Wyniki analiz wybranych parametrów SGP pozwalają wnioskować, że poprzez dobór warunków chłodzenia i sterowania strefy szlifowania można istotnie wpływać na cechy funkcjonalne powierzchni, co wpływa na zmierzone wartości siły cięcia F oraz potencjalnie powinno również wpływać na intensywność zjawisk zużycia i ostatecznie na trwałość ostrzy w procesie skórowania ryb płaskich.
13. Analiza obrazów mikroskopowych wykazała bardzo zbliżony stan powierzchni ostrzy kształtowanych w warunkach stosowania metody WET, MQL oraz MQL+CAG. Na tym tle wyraźnie wyróżniają się widoki powierzchni ostrzy ukształtowanych w warunkach podawania sprężonego schłodzonego powietrza dyszą CAG, które charakteryzowały się bardzo dużym przewinięciem oraz widocznymi nieusuniętymi fragmentami materiału i wiórami wstęgowymi przywartymi do ostrza, a także licznymi wyszczerbieniami ostrza. Cechy te potwierdzają wcześniejsze wnioski o niekorzystnych warunkach termicznych w strefie szlifowania w warunkach chłodzenia metodą CAG powodujących uplastycznienie kształtowanego ostrza.
14. Wyniki badań właściwych wykazały, że stosowanie w procesie szlifowania noży planarnych wyłącznie chłodzenia strumieniem sprężonego schłodzonego powietrza generowanego przez dyszę CAG nie zapewnia uzyskania odpowiedniej jakości ostrza, w związku z czym noże kształtowane w takich warunkach nie zostały uwzględnione w badaniach eksploatacyjnych.

15. W przypadku kształtowania noży w procesie szlifowania realizowanym w warunkach określonych na podstawie wyników przeprowadzonych badań rozpoznawczych i właściwych poprawnie odtworzono właściwości skrawne ostrzy oraz charakterystykę pracy noży referencyjnych umożliwiając ich regenerację i ponowną eksploatację w procesie skórowania ryb płaskich. Możliwość wielokrotnego wykorzystania tego samego ostrza pozwala uzyskać wymierne korzyści finansowe oraz ograniczyć ilość powstałych odpadów.
16. Kształtowanie ostrzy planarnych noży technicznych w warunkach chłodzenia zalewowego (WET) oraz metody hybrydowej (MQL+CAG) umożliwiło odpowiednio 12% i 9% wydłużenie okresu trwałości w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) oraz 18% i 16% w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*), w odniesieniu do długości poprawnej pracy noży referencyjnych w procesie skórowania ryb płaskich.
17. Rezultaty testów eksploatacyjnych uzyskane dla narzędzi szlifowanych w warunkach hybrydowej metody chłodzenia i smarowania strefy obróbki (MQL+CAG) wykazały, że wspomaganie w procesie szlifowania metody MQL dodatkowym chłodzeniem poprzez podawanie schłodzonego sprężonego powietrza generowanego w dyszy CAG skutecznie wspomaga rozpraszanie ciepła ze strefy obróbki umożliwiając kształtowanie ostrzy technicznych o jakości analogicznej do tej uzyskiwanej w warunkach chłodzenia zalewowego WET.
18. Badane ostrza, niezależnie od użytej metody chłodzenia w procesie ich kształtowania, wykazały bardzo dobre właściwości tnące. Nie wpłynęły w żaden inny sposób na proces produkcyjny. Zaobserwowano, że filety rybne, które były obrabiane nie ulegały żadnym uszkodzeniom np. w postaci ich rozwarstwień. Ocena organoleptyczna doświadczonego personelu produkcyjnego nie stwierdziła żadnych różnic jakościowych w stosunku do procesu prowadzanego przy zastosowaniu noży referencyjnych.

9.2. Wnioski utylitarne

1. Wyniki badań i analiz zawartych w niniejszej rozprawie doktorskiej charakteryzują się bardzo dużym potencjałem aplikacyjnym w zakresie metody regeneracji planarnych ostrzy technicznych stosowanych w przemyśle spożywczym.
2. Realizacja procesu regeneracji (ostrzenia) noży planarnych w procesie szlifowania w warunkach określonych jako najkorzystniejsze w wyniku przeprowadzonych

badan doświadczalnych możliwa jest na stanowisku szlifierskim o relatywnie prostej konstrukcji i nie wymaga stosowania 5-osiowej szlifierki CNC (stosowanej w badaniach opisanych w niniejszej rozprawie doktorskiej).

3. Badane w niniejszej rozprawie proekologiczne metody doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania z użyciem dyszy MQL oraz dyszy CAG można zaimplementować zarówno na szlifierkach konwencjonalnych, jak i sterowanych numerycznie.
4. Układy podawania aerozolu powietrzno-olejowego metodą MQL oraz dysze CAG są urządzeniami o relatywnie niewielkich gabarytach, co ułatwia ich umieszczenie w strefie szlifowania, a ponadto charakteryzują się niewielkimi kosztami zakupu.
5. Zastąpienie w procesie szlifowania planarnych ostrzy technicznych metody zalewowej WET doprowadzaniem czynników chłodząco-smarujących poprzez dyszę MQL oraz CAG znacząco ogranicza (95-krotne) zużycie płynu chłodzącego wpływając na ograniczenie kosztów związanych z ich zakupem oraz utylizacją.
6. Wydłużenie okresu trwałości ostrzy o 18% w procesie przetwarzania ryb płaskich umożliwia zmniejszenie liczby koniecznych narzędzi o 1907 szt. oraz uzyskanie 127 dodatkowych godzin produkcyjnych (wynikających ze skrócenia czasu nieprodukcyjnego związanego z wymianą noży) w skali roku.

9.3. Wnioski metodyczne

1. Zastosowana metodyka badań właściwych polegająca na przeprowadzeniu prób z użyciem trójpoziomowego planu eksperymentu umożliwiła wyznaczenie nieliniowego modelu matematycznego obiektu badań.
2. Zastosowane oprogramowania *Experiment Planner 1.0* umożliwiło wyznaczenie MMOB w postaci funkcji eksponencjalnej $f(x) = e^x$ drugiego stopnia z interakcjami oraz analizy statystycznej uzyskanych wartości czynników wyjściowych badanego procesu.
3. Opracowana i wykonana pięcioosiowa specjalna szlifierka CNC do kształtowania ostrzy technicznych jest urządzeniem prototypowym, którego przydatność w procesie precyzyjnego kształtowania ostrzy technicznych potwierdziły przeprowadzone badania weryfikacyjne.
4. Poprawność realizacji żądanych funkcji oraz spełnienie założeń techniczno-eksploatacyjnych pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC umożliwiła przeprowadzenie prac badawczych w zakresie szlifowania planarnych ostrzy

technicznych zmierzających do rozwiązania zdefiniowanego problemu badawczego niniejszej rozprawy.

5. W celu jak najbardziej wiernego odwzorowania warunków przemysłowych procesu cięcia realizowanego przy przetwarzaniu ryb płaskich zaprojektowano i wykonano specjalne stanowisko testowe charakteryzujące się bardzo dużym zakresem zmienności prędkości cięcia $v_{fc} = 1-400$ mm/s, sterowaniem numerycznym oraz cyfrową rejestracją danych pomiarowych z dużą rozdzielczością i częstotliwością, które umożliwiło pełną powtarzalność prowadzonych pomiarów siły cięcia.
6. Opracowane i wykonane stanowisko do pomiaru siły cięcia umożliwiło zastosowanie relatywnie dużej wartości prędkości cięcia wynoszącej $v_{fc} = 214$ mm/s, która odpowiadała rzeczywistym warunkom tego procesu realizowanego w zakładzie przetwarzającym ryby płaskie (Espersen Poland Sp. z o.o., Koszalin, Polska).

9.4. Wnioski do dalszych prac

1. W dalszych pracach badawczych należy określić wpływ zmian warunków realizacji procesu szlifowania oraz metody doprowadzania czynników chłodząco-smarujących na warunki termiczne w strefie obróbki oraz stan warstwy wierzchniej ukształtowanych ostrzy.
2. W przeprowadzonych badaniach pominięto także analizę powierzchni przecięcia próbek testowych stosowanych w pomiarach siły cięcia realizowanych na specjalnym stanowisku pomiarowym. W dalszych pracach można poszerzyć obszar analiz o ten aspekt, który związany z bezpośrednio z jakością powierzchni ciętej przez ostrze kształtowane w procesie szlifowania.
3. Uzyskane wyniki badań procesu szlifowania planarnych ostrzy technicznych stanowią podstawę do opracowania nowych strategii obróbkowych zmierzających do określenia najkorzystniejszego podziału naddatku na przejścia robocze oraz liczby przejść roboczych.
4. W dalszych pracach możliwe jest określenie najkorzystniejszej geometrii ostrza poprzez określenie wpływu modyfikacji wartości kąta wierzchołkowego α (w szerszym zakresie niż przyjęty w niniejszej pracy a wynikający z dostępnych w sprzedaży wariantów geometrycznych ostrzy planarnych) na siłę cięcia F i trwałość eksploatacyjną ostrza w procesie skórowania ryb płaskich.
5. Dalsze prace badawcze powinny dotyczyć także optymalizacji warunków podawania czynników chłodząco-smarujących (położenia kąтового i liczby dysz, rodzaju

i wydatku czynnika chłodząco-smarującego, wartości ciśnienia sprężonego powietrza zasilającego dysze itp.).

6. Ważnym etapem kształtowania jakości eksploatacyjnej ostrzy technicznych jest zabieg usuwania przewinięcia z ostrza po procesie szlifowania. Dalsze prace badawcze powinny dotyczyć określenia najkorzystniejszych warunków realizacji tej części procesu regeneracji właściwości eksploatacyjnych ostrzy oraz wyznaczeniu ich wpływu na trwałość eksploatacyjną narzędzia.
7. W dalszych badaniach możliwe jest doskonalenie metody pomiaru siły cięcia realizowanego ostrzami po obróbce szlifierskiej np. na drodze badań w zakresie wpływu rodzaju materiału oraz geometrii próbek stanowiących odpowiednik tkanki miękkiej stosowanej w warunkach produkcji przemysłowej a także określenie wpływu prędkości cięcia v_{fc} i zużycia ostrzy na siłę cięcia F .

9.5. Upowszechnienie rezultatów rozprawy

Efekty prac badawczych zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej pozwoliły na sporządzenie siedmiu prac naukowych opublikowanych w języku polskim i angielskim, w tym czterech artykułów wydanych w czasopismach z tzw. *listy filadelfijskiej* o sumarycznej wartości wskaźnika wpływu *Impact Factor* $\Sigma_{IF} = 9,083$.

1. **ZIELIŃSKI B.**, KAPŁONEK W., NADOLNY K.: Regeneration of industrial cutting blades made from X39CR13 steel used in skinning process of *Pleuronectidae*-family flatfishes. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2(2018)4, pp. 277-284. DOI: 10.30464/jmee.2018.2.4.277.
2. **ZIELIŃSKI B.**, KAPŁONEK W., NADOLNY K.: Odnowianie zdolności skrawnej ostrzy technicznych stosowanych w przemyśle spożywczym. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 8(2019)3-4, s. 32-37.
3. KAPŁONEK K., NADOLNY K., UNGUREANU M., PIMENOV D.Y., **ZIELIŃSKI B.**: SEM-based observations and analysis of the green silicon carbide (SiCg) grinding wheel active surfaces after the graphite and silicone impregnation process. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 13(2019)2-3, pp. 181-200. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2019.102368 ($IF_{2018} = 0,918$).
4. **ZIELIŃSKI B.**, KAPŁONEK W., SUTOWSKA M., NADOLNY K.: Analysis of a Feasibility Study of a Precision Grinding Process for Industrial Blades Used in the Cutting of Soft Tissues by a Prototype 5-Axis CNC Grinding Machine. *Applied Sciences*, 2019, 9(18), 3883. DOI: 10.3390/app9183883 ($IF_{2018} = 2,217$).
5. **ZIELIŃSKI B.**, NADOLNY K.: Projekt stanowiska badawczego do regeneracji ostrzy technicznych w procesie szlifowania. W: *Innowacyjne metody i technologie w badaniach inżynierskich*, pod red. B. Bałasza i innych, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 364, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2019, s. 255-266.
6. KAPŁONEK W., NADOLNY K., **ZIELIŃSKI B.**, PLICHTA J., PIMENOV D.Y., SHARMA S.: The role of observation-measurement methods in the surface characterizing

of X39Cr13 stainless steel cutting blades used in the fish processing industry. *Materials* 2020, 13(24), 5796; DOI:10.3390/ma13245796 (**IF₂₀₁₉ = 3,057**).

7. **ZIELIŃSKI B.**, CHACIŃSKI T., PIMENOV D.Y., NADOLNY K.: Methodology for Evaluating the Cutting Force of Planar Technical Blades Used in Flatfish Processing. *Micromachines*, 2021, 12, 1516. DOI: 10.3390/mi12121516 (**IF₂₀₂₀ = 2,891**).

Bibliografia

1. Adamovsky M.F.A. 2015, The Effect of Cutting Blade Geometry and Material on Carbon Fiber Severing as Used in High-Volume Production of Composites, The University of Western Ontario.
2. Ahmed L.S., Govindaraju N., Kumar M.P. 2016, Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of Titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(5), pp. 603-607.
3. Aknouche H., Outahyon A., Nouveau C., Marchal R., Zerizer A., Butaud J. C. 2009, Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood. *J. Mater. Process Technology*, 209(6):2918-2922.
4. Ayoama T. 2002, Development of a mixture supply system for machining with minimal quantity lubrication. *Annals of the CIRP*, 51(1), pp. 289-292.
5. Barylski A. 2004, Tendencje rozwoju technologii docierania powierzchni płaskich, II Sympozjum, Wybrane problemy projektowania procesów technologicznych, Politechnika Gdańska, Sopot.
6. Borda D., Nicolau A.I., Raspor P. 2017, Trends in fish processing technologies. CRC Press, Boca Raton.
7. Boziaris I. S. (Ed.). 2013, Seafood processing: Technology, quality and safety. John Wiley & Sons, Chichester.
8. Brown T., James S.J., Purnell G.L. 2005, Cutting forces in foods: experimental measurements. *Journal of Food Engineering*, 70(2), 165-170, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.09.022.
9. Brylski A. 2013, Nowe narzędzia tarczowe do obróbki powierzchni płaskich na docierakach, *Inżynieria maszyn*, R. 18, z. 2.
10. Chandrasekaran H., Thuvander A. 1998, Modelling tool stresses and temperature. Evaluation in turning using FEM. *Machining Science and Technology*, 2, pp. 355-367.
11. Chattopadhyay A.B., Bose A., Chattopadhyay A.K. 1985, Improvements in grinding steels by cryogenic cooling. *Precision Engineering*, 7(2), pp. 93-98.
12. Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D. 2002, The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2), pp. 155-158.
13. Chu J.P., Diyatmika W., Tseng Y.J., Liu Y.K., Liao W.C., Chang S.H., Chen M.J., Lee J.W., Jang J.S.C. 2019, Coating Cutting Blades with Thin-Film Metallic Glass to Enhance Sharpness. *Sci Rep* 9, 15558. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52054-3>.
14. Cichosz P. 2013, Narzędzia skrawające. Wydawnictwo WNT.
15. Cichosz P. 2002, Techniki wytwarzania, obróbka ubytkowa: laboratorium. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
16. Claudon L., Marsot J. 2006, Effect of knife sharpness on upper limb biomechanical stresses – a laboratory study, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 36, 239-246.

17. Colás R., Totten G.E. 2016, Encyclopedia of iron, steel, and their alloys. CRC Press, New York.
18. Cordes S., Hübner F., Schaarschmidt T. 2014, Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. *Procedia CIRP*, 14, pp. 401-405.
19. Cuppini, D., G. D'errico, G. Rutelli. 1990. Tool wear monitoring based on cutting power measurement.
20. Dennis P., Mackensen V., Longerich W. 1997, Feinschleifen Substitution des Lappens. Schleiftechnik im Wettbewerb. Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, Schleiftechnisches Kolloquium, red.: W. Wicharz, F. Klocke, E. Brinksmeier, Aachen, 16.1-16.11.
21. Dhar N.R., Kishore N.S.V., Paul S., Chattopadhyay A.B. 2002, The effects of cryogenic cooling on chips and cutting forces in turning AISI 1040 and AISI 4320 steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216(5), pp. 713-724.
22. Díaz-Caballero A., Tarón-Dunoyer A., Hernandez-Ligardo R. 2018. Data of fracture effort in the deformation of the cutting surface of scalpel blades. *Data in brief*, 2, 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.141>.
23. Diéguez J.L., Pereira A., Martínez J, Pérez J.A., Area J.E. 2009, State of the art in the process of deboning and slicing of meat in the food industry. *Proceedings of the 13th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2009, Hammamet, Tunisia, 16-21 October 2009*.
24. Dłużewski M., Dłużewska A., 2008, Ogólna technologia żywności, WNT Warszawa.
25. Dobrzański L. 1999, Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach, Wydawnictwo WNT Warszawa
26. Dokumentacja techniczno-ruchowa elektrowrzeciona typu PTShPp-30-36Km120 produkcji FŁT Kraśnik SA.
27. Dowgiałło A.M. 2002, Siły cięcia w obróbce ryb. Rozprawa habilitacyjna. Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy. Gdynia.
28. Dražumeric R., Roininen R., Badger J., Krajnik P. 2018, Temperature-based method for determination of feed increments in crankshaft grinding. *J. Mater. Process. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.032>.
29. Egger R., Preising D., Mackensen V., 1999, Wie Lappen, *Maschine u. Werkzeuge*, ½, 69-71.
30. EN 10088-1: 2014. Stainless steels - Part 1: List of stainless steels.
31. Feld M. 2001, Porównanie procesów docierania i mikroszlifowania; *Konf. Projektowanie procesów technologicznych, II Poznań, Politechnika. Poznańska*
32. Ghosh S.C. Heidari M., Hernández R. E., Blais C. 2015, Patterns of Knife Edge Recession in an Industrial Chipper-Canter. *Forest Products Journal*. 65. 358-364. [10.13073/FPJ-D-14-00057](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00057).
33. Gibson R.N., Nash R.D., Geffen, A.J., Van der Veer H.W. (Eds.) 2014, Flatfishes: biology and exploitation (Fish and aquatic resources series 16). John Wiley & Sons, Chichester.

34. Gilchrist M. D., Keenan S., Curtis M., Cassidy M., Byrne G., Destrade M. 2007, Mechanics of Stabbing: Biaxial Measurement of Knife Stab Penetration of Skin Simulant, *Forensic Science International* 177, 1, 52-65.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.10.010>.
35. Gilchrist M.D., Keenan S., Curtis M., Cassidy M., Byrne G., Destrade M. 2008, Mechanics of Stabbing: Biaxial Measurement of Knife Stab Penetration of Skin Simulant. *Forensic Science International*, 77(1), 52-65, DOI: 10.1016/j.forsciint.2007.10.010.
36. Giovannini M., Ehmann K. 2016, Vibrational Cutting of Soft Tissue with Micro-serrated Surgical Scalpels, *Procedia CIRP* 45 (2016) 199 – 202,
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.342>.
37. Guitouni A., Chaieb I., Rhouma A.B., Fredj N.B. 2016, Effects of jet pressure on the ground surface quality and CBN wheel wear in grinding AISI 690 nickel-based superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(11), pp. 5055-5064.
38. Hajad M., Sirindhorn S.R. 2016, Alternative meat slicing knife design to reduce operator cutting force. *Proceedings of the 2nd ISABE*, Pathumthani, Thailand, International Institute of Technology, Thammasat University.
39. Hall G.M. (Ed.) 2011, *Fish processing: sustainability and new opportunities*. John Wiley & Sons, New York.
40. Hall G.M. 2012, *Fish processing technology (2nd Edition)*. Springer Science & Business Media, London.
41. Heinzl C. 1999, *Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen*. Ph.D. dissertation, Universität Bremen.
42. ISO 4287. 1997, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*. International Organization for Standardization, Geneva.
43. ISO 8442-5. 2005, *International Standard Materials and Articles in contact with foodstuff, “Cutlery and Holloware. part 5: Specification for sharpness and edge retention test of cutlery,” ISO 8442-5:2005*.
44. Jackson M.J., Davim J.P. (Eds.) 2010, *Machining with abrasives*. Springer Science+Business Media, New York.
45. Jang J.S.C., Tsai P.H., Shiao A.Z., Li T.H., Chen C.Y., Duh J.G., Chen M.J., Chang S.H., Huang W.C 2015, Enhanced cutting durability of surgical blade by coating with Fe-based metallic glass thin film. *Intermetallics*, Vol. 65, 56-60.
46. Jerold B.D., Kumar M.P. 2012, Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-dioxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(10), pp. 1059-1065.
47. Kacalak W., Bałasz B., Tomkowski R., Lipiński D., Królikowski T., Szafraniec F., Tandecka K., Rypina Ł. 2014, Problemy naukowe i kierunki rozwoju mikroobróbki ścierniej. *Mechanik*, nr 9, str. 157-170.
48. Kakimov A., Bekeshova G., Akimov M., Bakiyeva A., Kadyrbayev Y., Zalilov R., Baykin Y., Cherkasova E., Imangaliyeva Z. 2018, Ultrafine Grinding Process Calculation of Meat Bone-By-Product. *International Journal of Engineering & Technology*, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.42.25572.

49. Kapłonek W., Nadolny K. 2013, Advanced desktop SEM used for measurement and analysis of the abrasive tool's active surface. *Acta Microscopica*, 22(2013)3, 278-288.
50. Kapłonek W., Nadolny K. 2013, Assessment of the grinding wheel active surface condition using SEM and image analysis techniques. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(2013)3, 207-215. DOI: 10.1007/s40430-013-0018-x.
51. Kapłonek W., Nadolny K., Zieliński B., Plichta J., Pimenov D.Y., Sharma S. 2020, The role of observation-measurement methods in the surface characterizing of X39Cr13 stainless steel cutting blades used in the fish processing industry. *Materials*, 13(24), 5796; DOI:10.3390/ma13245796.
52. Kapłonek W., Ungureanu M., Nadolny K., Sutowski P. 2017, Stylus profilometry in surface roughness measurements of the vertical conical mixing unit used in a food industry. *Journal of Mechanical Engineering*, 47(2017)1, pp. 1-8.
53. Karpiński T. 1996, Nowoczesne metody szlifowania ostrzy technicznych. *Archiwum technologii maszyn i automatyzacji* nr. 16; Poznań.
54. Karpiński T., Kukielka J. 1993, Problemy precyzyjnego kształtowania ostrzy technicznych. *Podstawy i Technika Obróbki Ściernej; Zbiór prac XVI Naukowej szkoły obróbki ściernej*, Koszalin.
55. Karpiński T., Stępień P. 1987, Metody ściernego kształtowania ostrzy technicznych. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, 238-248, X Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław.
56. Kawka T., Dudkiewicz D. 1986, *Maszyny do obróbki ryb i kalmarów zarys konstrukcji*, Wydawnictwo Morskie.
57. Keenan J., Daskal V., Hughes J. 2003, Method for the manufacture of surgical blades EP1490191B1 European Patent Specification.
58. Kieraś S. 2018, Badania wpływu zintegrowanej metody chłodzenia strefy obróbki zimnym powietrzem i jej odśrodkowego smarowania aerozolem olejowym na przebieg i wyniki procesu szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych. *Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska*, Koszalin.
59. Klocke F. 2009, *Manufacturing processes 2: grinding, honing, lapping*. Springer-Verlag, Berlin.
60. Kowalik K. 2011, Wpływ technologii cięcia wybranych produktów spożywczych na energochłonność procesu, *rozprawa doktorska*, Lublin.
61. Krejcie AJ, Kapoor SG, Devor RE. 2012, A hybrid process for manufacturing surgical-grade knife blade cutting edges from bulk metallic glass, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 14, no. 1, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.001>.
62. Lachowicz K., Kołakowski E., 2001, Wpływ sezonu połowu oraz stanu dojrzałości gonad na teksturę mięsa śledzi bałtyckich (*Clupea harengus membras* L.). *Folia Univ. Agric Stetin*. 200 seria Scientia Alimentaria, 1, 53-57.
63. Machado A.R., Wallbank J. 1997, The effect of extremely low lubricant volumes in machining. *Wear*, 210(1-2), 76-82.
64. Majewski J. 2005, Parametry maszynowego odgławiania oraz zmienności pracy cięcia odgławiającego płoci w cyklu rocznym.

65. Manimaran G., Pradeep kumar M., Venkatasamy R. 2014, Influence of cryogenic cooling on surface grinding of stainless steel 316. *Cryogenics*, 59, pp. 76-83.
66. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. 2004, *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew Publishing, Norwich, NY.
67. Marinescu I. D., Hitchiner M., Uhlmann E., Rowe W. B., Inasaki I. 2007, *Handbook of machining with grinding wheels*. CRC Press, Boca Raton.
68. Marsot J., Claudon L., Jacqmin M. 2007, Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system. *Appl Ergon.*, 38(1), 83-9. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.12.007.
69. McCarthy C.T., Ni Annaidh N., Gilchrist M.D. 2010, On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry, *Engineering Fracture Mechanics* (77), 437-451, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.10.003>.
70. McCarthy C.T., Hussey M., Gilchrist M.D. 2007, On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(14), 2205-2224, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.10.015.
71. McCarthy C.T., Ni Annaidh A., Gilchrist M.D. 2010, On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(3), 437-451, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.003.
72. McGorry R.W., Dowd P.C., Dempsey P.G. 2005, A technique for field measurement of knife sharpness. *Applied Ergonomics*, 36(5), 635-640, DOI: 10.1016/j.apergo.2005.04.001.
73. McGorry R.W., Dowd P.C., Dempsey P.G. 2005, A technique for field measurement of knife sharpness. *Applied Ergonomics*, 36(5), 635-640, DOI: 10.1016/j.apergo.2005.04.001.
74. McGorry R.W., Dowd P.C., Dempsey P.G. 2005, The effect of blade finish and blade edge angle on forces used in meat cutting operations, *Applied Ergonomics* 36(1), 71-77, 10.1016/j.apergo.2004.08.002.
75. Nadolny K. 2012, *Podstawy budowy i eksploatacji modyfikowanych ściernic z ziarnami mikrokryształicznego korundu spiekane w procesach szlifowania otworów*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 227, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
76. Nadolny K. 2019, *Innowacyjne metody chłodzenia i smarowania w procesach szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych*. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 353, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
77. Nadolny K., Kapłonek W. 2015, SEM-based morphological analysis of the new generation AlON-based abrasive grains (Abral[®]) with reference to Al₂O₃/SiC/cBN abrasives. *Acta Microscopica*, 24(2015)1, 64-78.
78. Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., Gilewicz A. 2020, Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process. *Materials*, 13(10), 2398. DOI: 10.3390/ma13102398.
79. Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., Gilewicz A., Warcholiński B. 2021, Experimental tests of PVD AlCrN- coated planer knives

- on planing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under industrial conditions. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 645-665, DOI: 10.1007/s00107-021-01660-y.
80. Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., Gilewicz A., Warcholiński B. 2021, Moving towards sustainable manufacturing by extending the tool life of the pine wood planing process using the AlCrBN coating. *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 28, July, e00259. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00259.
 81. Nadolny K., Rokosz K., Kapłonek K., Wienecke M., Heeg J. 2017, SEM-EDS-based analysis of the amorphous carbon-treated grinding wheel active surface after reciprocal internal cylindrical grinding of Titanium Grade 2[®] alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(2017)5-8, 2293-2308. DOI: 10.1007/s00170-016-9555-7.
 82. Nadulski R., Zawiślak K., Panasiewicz M., Skwarcz J., Starek A. 2013, Charakterystyka oporów cięcia wybranych materiałów roślinnych o zróżnicowanej budowie morfologicznej, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* Nr 3, 208-209.
 83. Nguyen T., Zhang L.C. 2003, An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), pp. 224-230.
 84. Niedźwiedź J., Żmijewski T., Ostoja H., Cierach M. 2011, Porównanie wartości Maksymalnej Siły cięcia wybranych mięśni z tylnej ćwierćtuszy wołowej, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 3, 57-58.
 85. Oczóś K.E., Lubimov V. 2008, Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. *Mechanik* nr 3/2008.
 86. Oczóś K.E., Porzycki J. 1986, *Szlifowanie – podstawy i technika*. WNT, Warszawa.
 87. Oliveira J.F.G., Silva E.J., Gomes J.J.F., Klocke F., Friedrich D. 2005, Analysis of Grinding Strategies Applied to Crankshaft Manufacturing. *CIRP Ann.*
 88. Olszak W. 2008, *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa.
 89. Patil S., Pawar P., Kekade S., Patil S., Gujar K., Singh R.K.P. 2016, Effect of gas based coolant lubricants on machinability of titanium alloy Ti6Al4V. *Key Engineering Materials*, 705, pp. 233-239.
 90. Plichta J. 1996, *Podstawy szlifowania ściernicami z mikrokryształicznym ziarnem regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
 91. PN-EN ISO 8442-2. 1997, *Materiały i wyroby przeznaczone do kontaktu z produktami spożywczymi*
 92. PN-EN ISO 8442-9:2018-04/. 2018, *Materiały i wyroby przeznaczone do kontaktu z produktami spożywczymi*
 93. Polyurethane board – material card. EKO INDUSTRIE Sp. z o.o., Słupsk, Poland.
 94. Priarone P.C., Robiglio M., Settineri L., Tebaldo V. 2015, Effectiveness of minimalizing cutting fluid use when turning difficult-to-cut alloys. *Procedia CIRP*, 29, pp. 341-346.
 95. Przybyłowicz K. 1999, *Metaloznawstwo*, Wydawnictwo WNT Warszawa.
 96. Ratnasingam, J., Perkins M. C. 1998, An investigation into the tool wear characteristics of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) laminated veneer lumber. *Holz Roh-Werkst.*

97. Rowe W. B. 2009, Principles of modern grinding technology. William Andrew, Burlington.
98. Saberi A., Rahimi A.R., Parsa H., Ashrafijou M., Rabiei F. 2016, Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. *Journal of Cleaner Production*, 131, pp. 728-738.
99. Saleem M.Q., Ahmad A.H., Raza A., Qureshi M.A.M. 2017, Air-assisted boric acid solid powder lubrication in surface grinding: an investigation into the effects of lubrication parameters on surface integrity of AISI 1045. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9-12), pp. 3561-3572.
100. Schuldt S., Roschy A. J., Rohm H., Schneider Y. 2013, Defined abrasion procedures for cutting blades and comparative mechanical and geometrical wear characterisation, *Wear*, vol. 300, 38-43.
101. Sen D.P. 2005, Advances in fish processing technology. Allied Publishers, New Dehli.
102. Sheikh-Ahmad J., Stewart J.S., Feld H. 2003, Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*. 255. 1433-1437. 10.1016/S0043-1648(03)00179-0.
103. Silva L.R., Bianchi E.C., Catai R.E., Fuste R.Y., França T.V., Aguiar P.R. 2005, Study on the behavior of the minimum quantity lubricant MQL-technique under different lubrication and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 27(2), pp. 192-199.
104. Silva L.R., Bianchi E.C., Fuste R.Y., Catai R.E., Franca T.V., Aguiar P.R. 2007, Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant – MQL in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), pp. 412-418.
105. Socha S. 1989, Odkształcenie plastyczne ostrza. *Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie; Zeszyty Naukowe Wydziału mechanicznego Nr. 11*, 221-231.
106. Stachurski W., Sawicki J., Wójcik R., Nadolny K. 2018, Influence of application of hybrid MQL-CCA method of applying coolant during hob cutter sharpening on cutting blade surface condition. *Journal of Cleaner Production*, 171, pp. 892-910. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.059.
107. Stachurski W., Nadolny K. 2018, Influence of the condition of the surface layer of a hob cutter sharpened using the MQL-CCA hybrid method of coolant provision on its operational wear. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5-8), pp. 2185-2200. DOI: 10.1007/s00170-018-2379-x.
108. Surowska B. 2002, Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją, Wydaw. Politechniki Lubelskiej
109. Sutowski P., Nadolny K., Sutowska M., Myśliński P., Gilewicz A., Warcholiński B. 2022, Influence of regeneration process parameters on geometry and defects of clearance surface of planer knives used in wood planing process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(2022)43, DOI: 10.1007/s43452-021-00332-1.
110. Świerczyński J. 2015, Wpływ hybrydowego sposobu podawania płynu obróbkowego i sprężonego powietrza na jakość powierzchni uzyskanej w procesie szlifowania. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź.

111. Tawakoli T., Hadad M.J., Sadeghi M.H. 2010, Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(6), pp. 521-531.
112. Tawakoli T., Haddad M.J., Sadeghi M.H., Daneshi A., Stockert S., Rasifard A. 2009, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), pp. 924-932.
113. Urgoiti J.A., Sánchez D., Barrenetxea J., Álvarez J. 2017, State of the art of different industrial approaches for face grinding applications, *Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2017*, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain.
114. Urgoiti L., Barrenetxea D., Sánchez A., Lanzagorta J.L. 2020, Detailed Thermo-Kinematic Analysis of Face Grinding Operations with Straight Wheels, *Metals* 2020, 10(4), 524; <https://doi.org/10.3390/met10040524>.
115. Verhoeven J. D. 2004, Experiments on Knife Sharpening, Department of Materials Science and Engineering Iowa State University Ames, IA.
116. Verhoeven J.D., 2004, Experiments on Knife Sharpening, Iowa State University.
117. Walsh, A.P.; Baliga, B.; Hodgson, P. 2004, Force modelling of the crankshaft pin grinding process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*
118. Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T. 2004, Dry machining and minimum quantity lubrication. *Annals of the CIRP*, 53, pp. 511-537.
119. Woźniak K. 1984, Chemiczne podstawy obróbki ścierniej. Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr 17, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
120. Yui A., Terashima M. 1999, Development of coolant-less grinding system. *Proceedings of the Thrid International Conference on Abrasive Technology*, p. 394.
121. Zalewski K., Skoczylas A., Bławucki S. 2017, Obróbka gładkościowa i umacniająca; Politechnika Lubelska.
122. Zhang S., Li J.F., Wang Y.W. 2012: Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 32, pp. 81-87.
123. Zieliński B., Chaciński T., Pimenov D.Y., Nadolny K. 2021, Methodology for Evaluating the Cutting Force of Planar Technical Blades Used in Flatfish Processing. *Micromachines*, 2021, 12, 1516. DOI: 10.3390/mi12121516.
124. Zieliński B., Kapłonek W., Nadolny K. 2018, Regeneration of industrial cutting blades made from X39CR13 steel used in skinning process of Pleuronectidae-family flatfishes. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*. 2(2018)4, pp. 277-284. DOI: 10.30464/jmee.2018.2.4.277.
125. Zieliński B., Kapłonek W., Nadolny K. 2019, Odnowianie zdolności skrawnej ostrzy technicznych stosowanych w przemyśle spożywczym. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 8(2019)3-4, s. 32-37.
126. Zieliński B., Kapłonek W., Sutowska M., Nadolny K. 2019, Analysis of a Feasibility Study of a Precision Grinding Process for Industrial Blades Used in the Cutting of Soft Tissues by a Prototype 5-Axis CNC Grinding Machine. *Applied Sciences*, 9(18), 3883. DOI: 10.3390/app9183883.

127. Zieliński B., Nadolny K. 2019, Projekt stanowiska badawczego do regeneracji ostrzy technicznych w procesie szlifowania. W: Innowacyjne metody i technologie w badaniach inżynierskich, pod red. B. Bałazsa i innych, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 364, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 255-266.
128. <https://www.baldor.com/catalog/BSM63N-275AA> (dostęp: luty 2020).
129. https://www.boschrexroth.com/irj/portal/anonymous/eShop?GSAMaterialnumber=apB1aJZ2yfRQbahYatByIQ%3D%3D&productid_encrypted=YES&searchtype=M&destination=catalog&mktx=SEM-E-S%2032X5RX3%2C5-4&display=catalog (dostęp: luty 2020).
130. [https://www.boschrexroth.com/irj/portal/anonymous/eShop?GSAMaterialnumber=rNp58jz%2B3U4dC8TDMUYGjA%3D%3D&productid_encrypted=YES&searchtype=M&destination=catalog&mktx=%C5%9ARUBA%20TOCZNA%20%20%20%20%20%20%2032X5RX3%2C5%20%20%20%20%20%20%20\(T5\)&display=catalog](https://www.boschrexroth.com/irj/portal/anonymous/eShop?GSAMaterialnumber=rNp58jz%2B3U4dC8TDMUYGjA%3D%3D&productid_encrypted=YES&searchtype=M&destination=catalog&mktx=%C5%9ARUBA%20TOCZNA%20%20%20%20%20%20%2032X5RX3%2C5%20%20%20%20%20%20%20(T5)&display=catalog) (dostęp: luty 2020).
131. <https://www.boschrexroth.com/pl/pl/produkty/grupy-produktow/technika-przemieszczen-liniowych/systemy-szyn-profilowanych/ball-rail-systems/ball-rail-systems-4> (dostęp: styczeń 2020).
132. <https://www.flt24.pl>, (dostęp: styczeń 2020).
133. https://www.harmonicdrive.de/mage/media//catalog/category/2014_11_ED_1015770_CPU_M_H_S_2.pdf (dostęp: luty 2020).
134. <https://www.industrysourcing.com/article/machine-knives-blades-food-processing> (dostęp: styczeń 2020).
135. https://www.inter-diamet.com.pl/sciernice_borazonowe_o_spoiwie_ceramicznym/poradnik_doboru_sciernic (dostęp: marzec 2020).
136. <https://www.lutz-blades.com/pl/najlepsze-ciecie/najlepsze-ciecie.html> (dostęp: styczeń 2020).
137. <https://www.steen.be/product/automatic-fish-skinner-st600v-long-model> (dostęp: czerwiec 2021).

Spis rysunków

Rys. 1.	Linia do skórowania ryb płaskich w przedsiębiorstwie Espersen Poland Sp. z o.o. (Koszalin, Polska): a) widok ogólny linii technologicznej; b) maszyna skórująca ST600 firmy Steen F.P.M. International (Kalmthout, Belgia); c) obszar roboczy w procesie skórowania (Zieliński i Nadolny, 2019; Zieliński i inni, 2020; Gibson i inni, 2014).....	10
Rys. 2.	Przykłady ostrzy technicznych firmy Lutz Blades (www.lutz-blades.com , 2020) .	14
Rys. 3.	Przykładowe ostrza techniczne stosowane w przemyśle przetwórstwa spożywczego (www.industrysourcing.com , 2020).....	14
Rys. 4.	Czynniki wpływające na zdolność tnącą (Karpiński i Stępień, 1987)	16
Rys. 5.	Kształty ostrzy technicznych: a) jednościenne symetryczne; b) dwuścienne symetryczne; c) trójściennie symetryczne; d) dwuścienne asymetryczne (Karpiński i Stępień, 1987).....	16
Rys. 6.	Współczynnik BSI w funkcji promienia krawędzi tnącej i stałym promieniu 25° (McCarthy i inni, 2010)	17
Rys. 7.	Współczynnik BSI w funkcji zmiany kąta ostrza i stałym promieniu 1 μm (McCarthy i inni, 2010)	17
Rys. 8.	Model budowy krawędzi ostrza (Karpiński i Stępień, 1987)	18
Rys. 9.	Typowe uszkodzenie korozyjne: a) korozja równomierna; b) korozja wżerowa; c) korozja selektywna; d) korozja międzykrystaliczna; e) pęknięcie korozyjne (Dobrzański, 1999)	19
Rys. 10.	Schemat korozji międzykrystalicznej: 1 – wnętrze ziarna, 2 – wydzielona faza, 3 – obszar zubożony (Surowska, 2002).....	20
Rys. 11.	Ideowy schemat oskórzarki z nożem nieruchomym: 1 – suport nożowy wraz z nożem, 2 – bęben operacyjny, 3 – wałek dociskowy, 4 – przenośnik podający (Kawka i Dutkiewicz, 1986).....	23
Rys. 12.	Czynniki związane z technologią szlifowania wpływające na jakość ostrzy technicznych (Karpiński i Stępień, 1987).....	24
Rys. 13.	Podział warstwy skrawanej przy szlifowaniu ostrzy technicznych: a) obwodowa prostopadła do krawędzi ostrza (kierunek prędkości skierowany na ostrze); b) obwodowa wzdłuż krawędzi ostrza; c) obwodowa prostopadła do krawędzi ostrza (kierunek prędkości skierowany od krawędzi ostrza) (Karpiński i Stępień, 1987).....	24
Rys. 14.	Kolejność obróbki ostrza: a) jednoczesna obróbka obu stron; b) obróbka kolejno jednej a potem drugiej strony (Karpiński i Stępień, 1987).....	25
Rys. 15.	Odmiany kinematyczne procesu szlifowania ściernicami małogabarytowymi w zależności od pozycji osi ściernicy względem strefy obróbki: a) oś ściernicy usytuowana poniżej fazy ostrza; b) oś ściernicy usytuowana w obszarze fazy ostrza; c) oś ściernicy usytuowana powyżej fazy ostrza (Plichta, 1996).....	27
Rys. 16.	Ogólny model procesu docierania (Karpiński i Kukielka, 1993).....	31
Rys. 17.	Model stanowiska badawczego do realizacji procesu docierania ostrzy technicznych (Karpiński i Kukielka, 1993).....	32

Rys. 18.	Tory ruchu punktu ostrza względem docieraka (Karpiński i Kukielka, 1993)	32
Rys. 19.	Pomiar wielkości zużycia w przekroju poprzecznym ostrza: a) ostrze nowe; b) ostrze zużyte (Adamovsky, 2015).....	39
Rys. 20.	Stanowisko do pomiaru stosunku naprężenia rzeczywistego do rozciągania w kierunku wzdłużnym i poprzecznym na próbce modelowej imitującej skórę – poliuretanie o twardości 40A wg Shore’a (Gilchrist i inni, 2007; Gilchrist i inni, 2008).....	41
Rys. 21.	Poziom wgłębienia ostrza i punkt powstania nacięcia w podłożu (McCarthy i inni, 2007)	42
Rys. 22.	Widok ogólny (a) oraz strefa cięcia (b) specjalnego stanowiska badawczego do pomiaru siły cięcia (McGorry i inni, 2005).....	43
Rys. 23.	Schemat prezentujący logiczne powiązanie trzech głównych etapów badań doświadczalnych wraz z ich celami.....	43
Rys. 24.	Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań rozpoznawczych – etap I.....	50
Rys. 25.	Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań rozpoznawczych – etap II	51
Rys. 26.	Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań właściwych.....	52
Rys. 27.	Schemat obiektu badań obejmujący czynniki wejściowe stałe i zmienne, czynniki wyjściowe oraz zakłócenia dla badań eksploatacyjnych.....	53
Rys. 28.	Widok strefy roboczej dla szlifowania obwodem (a), czołem (b) i powierzchnią stożkową ściernicy (c)	55
Rys. 29.	Widok ogólny strefy obróbki (a) oraz umiejscowienia obciążaczy diamentowych (b) stosowanych do obciążania i kształtowania powierzchni stożkowej ściernicy ...	55
Rys. 30.	Schemat ustawienia kąтового ściernicy w trzech płaszczyznach względem obrabianego noża planarnego dla metody szlifowania ściernicą ze stożkowym kształtem czynnej powierzchni: a) widok z boku; b) widok z przodu (wartościami kątów zastosowane w opisywanych badaniach: $\alpha_s = 85^\circ$, $\beta_s = 5^\circ$, $\chi_s = 20^\circ$).....	56
Rys. 31.	Widok przestrzeni roboczej szlifierki w trakcie obciążania powierzchni czołowej (a) i obwodowej (b) ściernicy oraz przy kształtowaniu na niej nakroju stożkowego (c).....	56
Rys. 32.	Widok ogólny przemiennika częstotliwości Danfoss VLT 500 oraz parametrów pracy wrzeciona szlifierskiego w czasie rzeczywistym	58
Rys. 33.	Widok ogólny (a) oraz wymiary geometryczne przekroju poprzecznego (b) ostrza noża planarnego stanowiącego przedmiot obrabiany w opisywanych badaniach...	59
Rys. 34.	Mikroanaliza ilościowa EDS dwóch obszarów noża planarnego: a, c) obrazy mikroskopowe SEM dwóch wybranych obszarów ($11,07 \times 8,27 \mu\text{m}$) noża, dla których przeprowadzono mikroanalizę; b, d) uzyskane widma EDS z pierwiastkami zidentyfikowanymi w analizowanych obszarach oraz obliczone procentowe udziały masowe i atomowe pierwiastków	61
Rys. 35.	Widok specjalnego uchwytu (wraz z zamocowanym ostrzem) opracowanego w celu unieruchomienia wiotkiego ostrza planarnego w przestrzeni roboczej szlifierki.....	61

Rys. 36.	<u>Oznaczenia wymiarów charakterystycznych ściernicy</u> (www.inter-diament.com.pl , 2020)	62
Rys. 37.	Widok ogólny planarnego ostrza technicznego zastosowanego w badaniach (a) oraz rysunki zarysu geometrii przekroju poprzecznego ostrzy poddanych próbom: a) ostrze o geometrii 1; b) ostrze o geometrii 2; c) ostrze o geometrii 3; d) ostrze o geometrii 4	64
Rys. 38.	Widok ogólny próbki testowej wykonanej z poliuretanu (a), którego charakterystykę wytrzymałościową (c) wyznaczono w próbie osiowego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z400 8306 wyposażonej w szczęki 10 kN (Zwick Roell Group, Ulm, Niemcy) (b) (Zieliński i inni, 2021).....	65
Rys. 39.	Wizualizacja procesu przecinania próbki testowej wykonanej z poliuretanu: a) etap początkowy – ostrze zbliża się ruchem jednostajnym z daną prędkością do próbki testowej; b) etap drugi – przecinanie próbki; c) etap trzeci – zakończenie testu po przemieszczeniu noża poniżej strefy cięcia (Zieliński i inni, 2021).....	66
Rys. 40.	Wizualizacja toku postępowania podczas demontażu zużytego ostrza na maszynie Steen Skinning ST 600: a) zatrzymanie urządzenia; b) otwarcie części roboczych maszyny; c) opłukanie z pozostałości przetwarzanego surowca i zanieczyszczeń; d) odkręcenie śrub mocujących narzędzie i wyjęcie zużytego noża planarnego	75
Rys. 41.	Wizualizacja sposobu montażu nowego noża i uruchomienia maszyny Steen Skinning ST 600: a) osadzenie noża w suporcie maszyny; b) dokręcenie śrub mocujących nóż; c) zamknięcie części roboczej i osłony bezpieczeństwa; d) włączenie urządzenia do pracy.....	75
Rys. 42.	Widok narzędzi pomocniczych: a) pojemnik do gromadzenia przetworzonego surowca (filetów po skórowaniu); b) waga platformowa do określenia masy obrobionej ryby dla każdego z testowanych noży planarnych	76
Rys. 43.	Widok fileta rybnego po prawidłowo przeprowadzonym procesie skórowania	76
Rys. 44.	Widok ogólny maszyny do skórowania Steen ST 600 na linii produkcyjnej w zakładzie produkcyjnym Espersen Poland Sp. z. o.o.	79
Rys. 45.	Widok maszyny do skórowania Steen ST600 – sekcja robocza w czasie pracy	79
Rys. 46.	Widok maszyny do skórowania Steen ST600 – uniesione rolki dociskowo transportowe oraz opis głównych elementów roboczych.....	79
Rys. 47.	Stanowisko do pomiaru profili chropowatości oraz mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH (Kapłonek i inni, 2017)	80
Rys. 48.	Ogólny widok stanowiska do akwizycji obrazów cyfrowych wyposażonego w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. (Nadolny i inni, 2020; Nadolny i inni, 2021; Nadolny i inni, 2021a; Nadolny i inni, 2022).....	81
Rys. 49.	Rys. B.8. Elektronowy mikroskop skaningowy JSM-5500LV firmy JEOL Ltd. wyposażony w moduł energodispersyjnego spektrometru rentgenowskiego (EDS) INCAPentaFET-x3 firmy Oxford Instruments (Kapłonek i Nadolny, 2013; Kapłonek i Nadolny, 2013a; Nadolny i Kapłonek 2015; Nadolny i inni, 2017).....	83
Rys. 50.	Specjalna pięcioosiowa szlifierka CNC do kształtowania ostrzy noży technicznych: a) widok szlifierki w trakcie budowy; b) widok urządzenia gotowego do pracy; c) widok strefy obróbki; d) widok elektrowrzeciona szlifierskiego wraz	

	z uchwytem przedmiotu obrabianego oraz systemem podawania chłodziwa (Zieliński i inni, 2018; Zieliński i inni, 2019; Zieliński i inni, 2019a).....	84
Rys. 51.	Widok modelu 3D pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z naniesionymi wymiarami gabarytowymi w mm.....	85
Rys. 52.	Schemat kinetyczny szlifierki z zaznaczonymi kierunkami ruchów osi X, Y, Z oraz kierunek obrotów osi A i C	86
Rys. 53.	Widok modelu CAD 3D (a) oraz fotografia (b) korpusu dolnego	87
Rys. 54.	Główny korpus górny: a) widok aksonometryczny modelu drutowego 3D; b) widok połączenia belki górnej i bocznej korpusu; c) widok ogólny korpusu z zamontowanymi korpusami pomocniczymi	88
Rys. 55.	Widok pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych z zamontowaną kłatką osłonową: a) widok ogólny z otwartymi drzwiami; b) widok z zamkniętymi drzwiami	88
Rys. 56.	Korpus pomocniczy osi Z: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami.....	89
Rys. 57.	Korpus pomocniczy osi C: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami.....	90
Rys. 58.	Korpus pomocniczy osi A: a) widok aksonometryczny modelu CAD 3D; b) widok ogólny wykonanego korpusu z zamontowanymi podzespołami.....	91
Rys. 59.	Widok elektrowrzeciona typu PTShPp-30-36Km120 produkcji FŁT Kraśnik SA zamontowanego w korpusie pomocniczym osi A.....	92
Rys. 60.	<u>System smarowania typu UDL-5 EP produkcji FŁT Kraśnik SA: a) schemat systemu (www.flt24.pl, 2020); b) widok systemu zamontowanego w stanowisku badawczym</u>	93
Rys. 61.	Układ typu EP-18-150K do chłodzenia elektrowrzeciona szlifierskiego.....	94
Rys. 62.	Układ prowadnic i wózków zamontowanych w specjalnej szlifierce CNC do kształtowania ostrzy technicznych: a) dla osi X; b) dla osi Y; c) dla osi Z.....	95
Rys. 63.	<u>Karta katalogowa prowadnic liniowych typu SNS firmy Bosh Rexroth zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)</u>	96
Rys. 64.	<u>Karta katalogowa wózków liniowych typu FNS firmy Bosh Rexroth zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)</u>	96
Rys. 65.	<u>Charakterystyka serwosilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020).....</u>	98
Rys. 66.	Widok układu napędowego dla osi obrotowej A	99
Rys. 67.	Widok pulpitu sterującego (a) oraz interfejsu operatorskiego programu Mach 3 (b)	101
Rys. 68.	Widok wnętrza szafy sterowniczej pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych	102

Rys. 69.	Widok układu do podawania płynu chłodząco-smarującego: a) widok zbiornika, pompy typu ZV 35 i zaworu regulującego wydatek PCS w procesie szlifowania; b) widok układu powrotu PCS ze strefy obróbki do zbiornika	103
Rys. 70.	Widok dysz podających płyn chłodząco-smarujący do strefy szlifowania	104
Rys. 71.	Widok układu do podawania do strefy szlifowania aerozolu powietrzno-olejowego ze zminimalizowanym wydatkiem (zgodnie z założeniami metody MQL).....	104
Rys. 72.	Elementy funkcjonalne dyszy typu Vortec 610 (Kieraś, 2018).....	105
Rys. 73.	Widok uchwytu mocującego przedmiot obrabiany: a) bez zamocowanego ostrza; b) z zamontowanym ostrzem (przedstawiono sposób unieruchomienia ostrza) ...	106
Rys. 74.	Widok fragmentu dokumentacji wykonawczej (rysunku złożeniowego) zaprojektowanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego.....	107
Rys. 75.	Widok modelu 3D zaprojektowanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego: a) widok ogólny; b-e) widoki szczegółów konstrukcji	108
Rys. 76.	Widok ogólny stanowiska badawczego do oceny siły cięcia ze wskazanymi najważniejszymi modułami funkcjonalnymi (a) oraz widok sposobu zamocowania ocenianego ostrza (b) (Zieliński i inni, 2021).....	109
Rys. 77.	Widok szczegółów konstrukcyjnych wykonanego stanowiska do określenia ostrości ostrza technicznego (w trakcie prac kalibracyjnych): a) widok górnego mocowania śruby napędowej i jej napędu; b) widok uchwytu noża technicznego oraz szczęk mocujących przecinaną próbkę; c) widok szafy sterowniczej; d) widok ekranu pomiarowego; e) widok ekranu manualnego sterowania pracą urządzenia	111
Rys. 78.	Widok stanowiska do usuwania elementów materiału z krawędzi ostrza powstałego w procesie szlifowania: a-c) widok ogólny stanowiska w trakcie zabiegu usuwania przewinięcia z ostrza po szlifowaniu; d) widok części roboczej narzędzia – pasa skóry bydlęcej osadzonej na płaskim drewnianym podkładzie.....	114
Rys. 79.	Zbiór wszystkich wyników pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania obwodowego, czołowego oraz powierzchnią stożkową, ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu $v_f = 100 \text{ mm/s}$; 150 mm/s i 200 mm/s	116
Rys. 80.	Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania obwodowego ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s ; 150 mm/s i 200 mm/s	117
Rys. 81.	Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania czołowego ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s ; 150 mm/s i 200 mm/s	117
Rys. 82.	Wyniki pomiarów siły cięcia ostrzami ukształtowanymi w procesie szlifowania powierzchnią stożkową ściernicy zbudowanej z ziaren cBN o numerze B126, B181 i B251 z prędkością posuwu v_f wynoszącą 100 mm/s ; 150 mm/s i 200 mm/s	117
Rys. 83.	Wartości średnie siły cięcia wyznaczone z pomiarów trzech ostrzy ukształtowanych przy takich samych parametrach procesu szlifowania ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251 (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)	117
Rys. 84.	Wartości średnie siły cięcia wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych ściernicami z ziarnami cBN o numerze B126, B181 i B251: a) dla tej samej	

- odmiany kinematycznej procesu szlifowania; b) dla jednakowej wartości prędkości posuwu v_f ; c) wyniki średnie ze wszystkich prób z podziałem na wielkość ziarna ściernego cBN (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)..... 118
- Rys. 85. Widok mikrotopografii powierzchni o wymiarach 1,0 × 1,0 mm zarejestrowanych dla dziewięciu wytypowanych noży planarnych (opisanych w tabeli 29) na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5; f) ostrze nr 6; g) ostrze nr 7; h) ostrze nr 8; i) ostrze nr 9 120
- Rys. 86. Wykres zmian wartości średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych powierzchni Sa : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 122
- Rys. 87. Wykres zmian wartości całkowitej wysokości nierówności powierzchni St : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)..... 122
- Rys. 88. Wykres zmian wartości średniej objętości pustek powierzchni $Smvr$: a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 123
- Rys. 89. Wykres zmian gęstości wierzchołków nierówności powierzchni Sds : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów Sds ; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 123
- Rys. 90. Wykres zmian wskaźnika tekstury powierzchni Str : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)..... 123
- Rys. 91. Wykres zmian wartości średniego kwadratowego nachylenia powierzchni Sdq : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)..... 124
- Rys. 92. Wykres zmian wartości rozwinięcia powierzchni Sdr : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 124
- Rys. 93. Wykres zmian wartości wskaźnika nośności powierzchni Sbi : a) wyniki dla dziewięciu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie

- wyznaczone z podziałem na wielkość ziaren ściernych cBN zastosowanej ściernicy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 124
- Rys. 94. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B126 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 1); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 2); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 3) 126
- Rys. 95. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B181 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 4); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 5); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 6) 127
- Rys. 96. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza noży planarnych ukształtowanych w procesie szlifowania ściernicą z ziarnami cBN o numerze B251 zarejestrowane z użyciem cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) powierzchnia po szlifowaniu obwodowym (ostrze nr 7); b) powierzchnia po szlifowaniu czołowym (ostrze nr 8); c) powierzchnia po szlifowaniu ściernicą z powierzchnią stożkową (ostrze nr 9) 128
- Rys. 97. Zestawienie wyników badań doświadczalnych siły cięcia F (trzech powtórzeń) noży o czterech odmiennych zarysach poprzecznych ostrza: a) nóż o geometrii 1; b) nóż o geometrii 2; c) nóż o geometrii 3; d) nóż o geometrii 4 130
- Rys. 98. Zestawienie zarejestrowanych wykresów siły cięcia F dla czterech ocenianych geometrii ostrzy – próby z maksymalnymi wartościami F dla każdego ostrza (a) oraz wykres wartości maksymalnych siły F_{max} (b) 131
- Rys. 99. Widok strefy szlifowania w konfiguracji umożliwiającej zastosowanie: a) metody zalewowej (WET); b) smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL); c) chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG); d) metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) 144
- Rys. 100. Wartości średnie (z 5 powtórzeń) przyrostu mocy szlifowania ΔP wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy obróbki: chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL), chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 145
- Rys. 101. Wartości średnie (z 5 powtórzeń) siły cięcia F wyznaczone z pomiarów ostrzy ukształtowanych przy zastosowaniu czterech metod doprowadzania czynników chłodząco-smarujących do strefy szlifowania: chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL), chłodzenia z użyciem

schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek)..... 145

- Rys. 102. Widok mikrotopografii powierzchni o wymiarach 1,0 × 1,0 mm noży planarnych zmierzonych na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH: a) ostrze nr 1 szlifowane w warunkach metody WET; b) ostrze nr 2 szlifowane w warunkach metody WET; c) ostrze nr 3 szlifowane w warunkach metody WET; d) ostrze nr 4 szlifowane w warunkach metody MQL; e) ostrze nr 5 szlifowane w warunkach metody MQL; f) ostrze nr 6 szlifowane w warunkach metody MQL; g) ostrze nr 7 szlifowane w warunkach metody CAG; h) ostrze nr 8 szlifowane w warunkach metody CAG; i) ostrze nr 9 szlifowane w warunkach metody CAG; j) ostrze nr 10 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG; k) ostrze nr 11 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG; l) ostrze nr 12 szlifowane w warunkach metody MQL+CAG..... 147
- Rys. 103. Wykres zmian wartości średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych powierzchni *Sa*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 148
- Rys. 104. Wykres zmian wartości całkowitej wysokości nierówności powierzchni *St*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 149
- Rys. 105. Wykres zmian wartości średniej objętości pustek powierzchni *Smvr*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 149
- Rys. 106. Wykres zmian gęstości wierzchołków nierówności powierzchni *Sds*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów *Sds*; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 149
- Rys. 107. Wykres zmian wskaźnika tekstury powierzchni *Str*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 150
- Rys. 108. Wykres zmian wartości średniego kwadratowego nachylenia powierzchni *Sdq*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 150

- Rys. 109. Wykres zmian wartości rozwinięcia powierzchni *S_{dr}*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 150
- Rys. 110. Wykres zmian wartości wskaźnika nośności powierzchni *S_{bi}*: a) wyniki dla dwunastu ostrzy wytypowanych do pomiarów SGP; b) wartości średnie wyznaczone z podziałem na metody chłodzenia i smarowania strefy szlifowania zastosowane podczas kształtowania ostrzy (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 151
- Rys. 111. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5 153
- Rys. 112. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5 154
- Rys. 113. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu chłodzenia z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (CAG) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5 155
- Rys. 114. Widoki mikroskopowe powierzchni ostrza pięciu noży planarnych ukształtowanych przy zastosowaniu metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) zarejestrowane cyfrowym mikroskopem pomiarowym Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. w powiększeniu około 700×: a) ostrze nr 1; b) ostrze nr 2; c) ostrze nr 3; d) ostrze nr 4; e) ostrze nr 5 156
- Rys. 115. Schemat ideowy ciągu technologicznego obróbki filetów z gładzicy (*Peuronectes Platessa*) i flądry (*Platichthys Flesus*) z oznaczonym kierunkiem przepływu surowca 160
- Rys. 116. Widok poszczególnych etapów obróbki surowca rybnego w trakcie badań eksploatacyjnych planarnych noży technicznych: a) filety ryby po obróbce w maszynie Baader 176; b) ręczne trzymowanie filetów; c) podawanie ryby do transportera maszyny odskórzającej; d) ransport fletów do sekcji odskórzania ... 161
- Rys. 117. Widok surowca rybnego (gładzicy *Peuronectes Platessa*) przed procesem filetowania (a) oraz widok fileta tej ryby po prawidłowo wykonanym procesie odskórzania (b) 162
- Rys. 118. Widok fileta gładzicy *Peuronectes Platessa* (a-c) oraz flądry *Platichthys Flesus* (d-f) po odskórzaniu z widocznymi charakterystycznymi wadami tego procesu . 163
- Rys. 119. Średni czas pracy noży w procesie skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) w warunkach przemysłowych (wyznaczony na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą

w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 165

Rys. 120. Średnia masa obrobionego surowca rybnego podczas procesu skórowania gładzicy (*Peuronectes Platessa*) w warunkach przemysłowych (wyznaczona na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 166

Rys. 121. Średni czas pracy noży w procesie skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) w warunkach przemysłowych (wyznaczony na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 168

Rys. 122. Średnia masa obrobionego surowca rybnego podczas procesu skórowania flądry (*Platichthys Flesus*) w warunkach przemysłowych (wyznaczona na podstawie 3 powtórzeń pomiarów) dla narzędzi referencyjnych oraz szlifowanych zgodnie z metodyką przyjętą w badaniach właściwych przy zastosowaniu chłodzenia zalewowego (WET), smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem (MQL) oraz metody hybrydowej polegającej na jednoczesnym zastosowaniu dyszy MQL i CAG (MQL+CAG) (słupki błędów przedstawiają błąd standardowy = σ / pierwiastek kwadratowy całkowitej liczby próbek) 168

Spis tabel

Tab. 1.	Skład chemiczny i właściwości regularnego azotku boru (Klocke, 2009; Rowe, 2009; Nadolny, 2012).....	26
Tab. 2.	Rodzaje czynników chłodząco-smarujących oraz metody ich doprowadzenia do strefy szlifowania (Nadolny, 2019)	35
Tab. 3.	Zestawienie parametrów i warunków badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy	57
Tab. 4.	Wymiary gabarytowe oraz mikrotwardość przykładowych siedmiu noży planarnych wykonanych ze stali X39Cr13	59
Tab. 5.	Właściwości fizyczne i skład chemiczny stali X39Cr13, z której wykonano noże planarne stanowiące przedmiot obrabiany w opisywanych badaniach	60
Tab. 6.	Wykaz oznaczeń i głównych parametrów technicznych ściernic zastosowanych w badaniach rozpoznawczych (www.inter-diamet.com.pl, 2020)	62
Tab. 7.	Zestawienie oznaczeń i wymiarów charakterystycznych mikroziaren ściernych wg różnych norm branżowych (www.inter-diamet.com.pl, 2020)	63
Tab. 8.	Najważniejsze parametry mechaniczne poliuretanu zastosowanego w przeprowadzonych badaniach siły cięcia (Eko Industrie, 2021)	65
Tab. 9.	Zestawienie parametrów i warunków badań właściwych	69
Tab. 10.	Plan eksperymentów wykonanych w ramach badań właściwych	70
Tab. 11.	Oznaczenie i główne parametry techniczne ściernic zastosowanych w badaniach właściwych (www.inter-diamet.com.pl, 2020)	73
Tab. 12.	Parametry procesu skórowania oraz warunki otoczenia	76
Tab. 13.	Charakterystyka noży planarnych wytypowanych do badań eksploatacyjnych w procesie cięcia tkanek miękkich (skórowania) na podstawie wyników badań właściwych	77
Tab. 14.	Charakterystyka przetwarzanego surowca rybnego	78
Tab. 15.	Parametry techniczne cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7515MT8A firmy AnMo Electronics Corp. (Nadolny i inni, 2020; Nadolny i inni, 2021; Nadolny i inni, 2021a; Nadolny i inni, 2022)	82
Tab. 16.	Parametry techniczne pięcioosiowej specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych	85
Tab. 17.	Parametry techniczne elektrowrzeciona typu PTShPp-30-36Km120 (DTR elektrowrzeciona)	91
Tab. 18.	Zalecany przez producenta elektrowrzeciona wydatek czynnika smarującego (DTR elektrowrzeciona)	93
Tab. 19.	Parametry techniczne systemu typu UDL-5 EP produkcji FŁT Kraśnik SA do smarowania elektrowrzeciona szlifierskiego (www.flt24.pl, 2020).....	94
Tab. 20.	Parametry techniczne wózków liniowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)	95

Tab. 21.	Parametry techniczne prowadnic liniowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)	95
Tab. 22.	Parametry techniczne nakrętek kulowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)	97
Tab. 23.	Parametry techniczne śrub kulowych zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.boschrexroth.com, 2020)	97
Tab. 24.	Dane techniczne serwosilników zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020) ...	97
Tab. 25.	Dane techniczne serwosilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020).....	98
Tab. 26.	<u>Parametry elektryczne i mechaniczne serwosilników typu BSM63N-275 firmy Baldor zastosowanych w budowie osi X, Y i Z specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (www.baldor.com, 2020).....</u>	99
Tab. 27.	Podstawowe informacje dotyczące bezluzowych przekładni falowych zastosowanych w budowie osi C i A specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (harmonicdrive.de, 2020).....	100
Tab. 28.	Szczegółowe dane techniczne bezluzowych przekładni falowych typu CPU-25A firmy Harmonic Drive AG zastosowanych w budowie osi C i A specjalnej szlifierki CNC do kształtowania ostrzy technicznych (harmonicdrive.de, 2020) .	100
Tab. 29.	Dane producenta dotyczące wybranych parametrów dyszy Vortec 610	105
Tab. 30.	Najważniejsze parametry techniczne stanowiska do pomiaru siły cięcia	112
Tab. 31.	Wykaz oznaczeń skrótowych ściernicy przyjętych na potrzeby prezentacji i analizy wyników badań rozpoznawczych mających na celu wybór ściernicy....	115
Tab. 32.	Oznaczenie oraz opis warunków, w jakich realizowany był proces szlifowania dziewięciu ostrzy wytypowanych do analizy struktury geometrycznej powierzchni	119
Tab. 33.	Zestawienie wartości wybranych parametrów SGP dziewięciu noży, wyznaczonych na podstawie pomiarów mikrotopografii powierzchni ostrza ukształtowanego w procesie szlifowania zrealizowanym w warunkach podanych w tabeli 32	121
Tab. 34.	Zestawienie wyników pomiarów czynników wyjściowych w badaniach właściwych	136
Tab. 35.	Zestawienie modeli matematycznych obiektu badań (MMOB) opisujących zmiany przyrostu mocy szlifowania ΔP w funkcji naddatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f	139
Tab. 36.	Zestawienie modeli matematycznych obiektu badań (MMOB) opisujących zmiany siły cięcia F w funkcji naddatku na przejście wyiskrzające $a_{e\ wy}$ i prędkości posuwu v_f	141
Tab. 37.	Zestawienie wartości wybranych parametrów SGP noży planarnych ukształtowanych w badaniach właściwych wyznaczonych na podstawie pomiarów mikrotopografii powierzchni ostrza	148

Tab. 38.	Zestawienie wyników pomiaru czasu poprawnej pracy narzędzi w procesie odskórzania gładzicy (<i>Peuronectes Platessa</i>) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych	164
Tab. 39.	Zestawienie wyników pomiaru masy obrobionego surowca w procesie odskórzania gładzicy (<i>Peuronectes Platessa</i>) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych	165
Tab. 40.	Zestawienie wyników pomiaru czasu poprawnej pracy narzędzi w procesie odskórzania flądry (<i>Platichthys Flesus</i>) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych	167
Tab. 41.	Zestawienie wyników pomiaru masy obrobionego surowca w procesie odskórzania flądry (<i>Platichthys Flesus</i>) realizowanym w warunkach przemysłowych dla czterech grup noży planarnych uwzględnionych w badaniach eksploatacyjnych.	167
Tab. 42.	Zestawienie liczby zużytych ostrzy o geometrii oraz średnich wartości czasu wynikających z ich wymiany (wg. danych Espersen Poland Sp. z.o.o. za lata 2020-2021)	170
Tab. 43.	Zestawienie liczby zużytych ostrzy o geometrii 1-4 oraz średnich wartości czasu wynikających z ich wymiany (wg. danych Espersen Poland Sp. z.o.o. za lata 2020-2021)	170