

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

---



**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA**  
**WYDZIAŁ MECHANICZNY**

**KATEDRA INŻYNIERII**  
**PRODUKCJI**

**mgr inż. Marta KORDOWSKA**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**ANALIZA PRZEMIESZCZENIA MATERIAŁU**  
**W STREFIE MIKRO– I NANOSKRAWANIA**  
**DIAMENTOWYM ZIARNEM ŚCIERNYM**

Promotor:

prof. dr hab. inż. **Jarosław PLICHTA**

Promotor pomocniczy:

dr inż. **Wojciech MUSIAŁ**

**Słowa kluczowe:** mikroobróbka, nanoobróbka, materiały kruche, szkło, kruche pękanie,  
plastyczne płynięcie, diamentowe ziarno ściernie, ściernica diamentowa, mikroskopia skaningowa,  
profilometria optyczna

KOSZALIN 2021

## SPIS TREŚCI

<b>1. WSTĘP</b> .....	8
<b>2. ANALIZA LITERATURY</b> .....	13
2.1. <i>CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW SZKLANYCH</i> .....	13
2.2. <i>PROCESY MIKRO– I NANOBRÓBKI ŚCIERNEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH</i> .....	16
2.3. <i>ODKSZTAŁCENIA W STREFIE MIKRO– I NANOBRÓBKI ŚCIERNEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH</i> .....	22
2.4. <i>METODY MIKRO– I NANOBRÓBKI SZKŁA</i> .....	25
2.4.1. <i>Mikro– i nanoskrawanie</i> .....	26
2.4.2. <i>Mikro– i nanoszlifowanie</i> .....	30
2.4.3. <i>Polerowanie z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej MRF</i> .....	36
2.5. <i>ULTRA PRECYZYJNE SYSTEMY OBRÓBKOWE MATERIAŁÓW KRUCHYCH</i> .....	42
2.6. <i>MONITOROWANIE WARUNKÓW W STREFIE MIKROBRÓBKI PRZY WYKORZYSTANIU ZJAWISKA EMISJI AKUSTYCZNEJ</i> .....	51
2.7. <i>WNIOSKI Z ANALIZY LITERATURY</i> .....	53
<b>3. CELE, PROBLEM BADAWCZY, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY</b> .....	56
3.1. <i>CELE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ</i> .....	56
3.2. <i>PROBLEM BADAWCZY</i> .....	57
3.3. <i>HIPOTEZA PRACY</i> .....	58
3.4. <i>ZAKRES PRACY</i> .....	58
<b>4. ANALIZA ODKSZTAŁCENÍ I PRZEMIESZCZEŃ MATERIAŁÓW SZKLANYCH W STREFIE MIKRO– I NANOSKRAWANIA</b> .....	60
<b>5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESÓW OBRÓBKI MATERIAŁÓW SZKLANYCH</b> .....	70
5.1. <i>WARUNKI I ZAKRES REALIZOWANYCH BADAŃ</i> .....	70
5.2. <i>BADANIA PROCESU MIKRO– I NANOSKRAWANIA POJEDYNCZYM DIAMENTOWYM ZIARNEM ŚCIERNYM</i> .....	78
5.2.1. <i>Metodyka badań</i> .....	78

# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

---

5.2.2. Charakterystyka materiałów obrabianych .....	84
5.2.3. Charakterystyka ziaren ściernych stosowanych w mikro– i nanoobróbce.....	84
5.2.4. Stanowisko do realizacji procesu mikro– i skrawania.....	87
5.2.5. Stanowiska pomiarowe.....	89
5.2.5.1. Profilometr optyczny.....	89
5.2.5.2. Elektronowy mikroskop skaningowy.....	91
5.2.6. Analiza przemieszczania materiału szklanego w strefie mikro– i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym .....	94
5.2.6.1. Badania rozpoznawcze .....	94
5.2.6.2. Badania zasadnicze .....	97
5.2.6.3. Analiza formy wiórów powstałych w procesie mikroskrawania.....	135
5.2.6.4. Przyczynowo–skutkowa analiza zjawisk zachodzących w strefie mikro– i nanoskrawania diamentowym ziarnem materiału szklanego .....	137
5.2.7. Wnioski z procesu mikro– i nanoskrawania .....	145
5.3. BADANIA PROCESU MIKRO – I NANOSZLIFOWANIA ŚCIERNICAMI DIAMENTOWYMI.....	147
5.3.1. Metodyka badań.....	147
5.3.2. Przebieg procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału w strefie obróbki ścierniej ściernicą diamentową o wielkości ziaren D126 .....	153
5.3.3. Przebieg procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału w strefie obróbki ścierniej ściernicą diamentową o wielkości ziaren D54 .....	159
5.3.4. Przebieg procesu inicjacji mikroszlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki ścierniej ściernicą diamentową o wielkości ziaren D126 .....	165
5.3.5. Wnioski z procesu mikro– i nanoszlifowania .....	169

# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

5.4. BADANIA PROCESU POLEROWANIA CIECZĄ MAGNETO–REOLOGICZNĄ (MRF) W POLU ELEKTROMAGNETYCZNYM.....	172
5.4.1. <i>Metodyka badań</i> .....	172
5.4.2. <i>Przebieg procesu polerowania cieczą magneto–reologiczną w polu elektromagnetycznym</i> .....	175
5.4.3. <i>Wnioski z procesu polerowania (MRF)</i> .....	191
<b>6. PROJEKT KONCEPCJI SEKWENCYJNEGO PROCESU TECHNOLOGICZNEGO DO ULTRA PRECYZYJNEJ OBRÓBK POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH</b> .....	194
<b>7. WNIOSKI KOŃCOWE</b> .....	198
<b>8. POTWIERDZENIE HIPOTEZY</b> .....	202
<b>9. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ</b> .....	206
<b>10. LITERATURA</b> .....	207
<b>11. SPIS RYSUNKÓW</b> .....	217
<b>12. SPIS TABEL</b> .....	231
<b>13. STRESZCZENIE</b> .....	232
<b>14. SUMMARY</b> .....	234
<b>15. ZAŁĄCZNIK (WERSJA ELEKTRONICZNA)</b> .....	235
15.1. <i>ZAŁĄCZNIK 1 – WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH PROCESU SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM DIAMENTOWYM SZKŁA INTERFERENCYJNEGO</i> .....	235
15.2. <i>ZAŁĄCZNIK 2 – WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH PROCESU SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM SZKŁA SODOWEGO (METODA 1)</i> .....	260
15.3. <i>ZAŁĄCZNIK 3 – WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH PROCESU SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM SZKŁA SODOWEGO (METODA 2)</i> .....	314
15.4. <i>ZAŁĄCZNIK 4 – WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH PROCESU SZLIFOWANIA ŚCIERNICAMI DIAMENTOWYMI SZKŁA SODOWEGO</i> .....	349



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$a_c$	– krytyczna długość pęknięcia,
$AE$	– absorbowane elektrony tworzące negatywy obrazów odbitych elektronów,
$a_e$	– odległość pomiędzy rysami,
$A_f$	– obszar kruchego pęknięcia,
$AFM$	– mikroskop sił atomowych (ang. Atomic Force Microscope),
$a_p$	– dosuw,
$B$	– pole magnetyczne,
$b$	– współczynnik zależny od geometrii ziarna (kąt natarcia) i warunków procesu,
$BC$	– faza krucha,
$BSE$	– elektrony które uległy częściowemu rozproszeniu,
$CBN$	– regularny azotek boru,
$CNC$	– komputerowe sterowanie numeryczne (ang. Computer Numerical Control),
$d$	– głębokością dosuwu ziarna ściernego,
$d'$	– stała piezoelektryczna,
$D$	– wektor indukcji elektrycznej,
$DBT$	– faza plastyczna/krucha,
$DC$	– faza plastyczna,
$d_c$	– krytyczna grubość wióra,
$E$	– moduł sprężystości podłużnej,
$E'$	– moduł sprężystości wzdłużnej,
$E''$	– wektor pola elektrycznego,
$EA$	– sygnału emisji akustycznej,
$EBSD$	– emisję sygnału dyfrakcji elektronów,
$E_f$	– energia kruchego pęknięcia,
$E_p$	– energia plastycznego płynięcia,
$F^*$	– obciążenie progowe,
$F^*ni$	– wartość progowa obciążenie normalne wywierane na materiał,
$Fn$	– obciążeniem normalnym,
$Fn'$	– siły wiązania magnetycznych cząstek ściernych generowanej przez pole magnetyczne,

$F_{ni}$	– obciążenie normalne wywierane na materiał,
$F_t$	– siły skrawania wynikającej z ruchu obrotowego narzędzia,
$G$	– współczynnika Griffitha,
$g_r$	– zidentyfikowane głębokości rys,
$H$	– natężenie pola elektromagnetycznego,
$H'$	– twardość materiału,
$h_c$	– krytyczna głębokość wnikania ziarna ściernego,
$h_{cw}$	– zmiana głębokości,
$h_m$	– nieodkształcona grubość wióra,
$I_b$	– wskaźnik kruchości,
$K$	– współczynnik sprzężenia,
$K_c$	– ciągliwość (odporność na kruche pękanie),
$K_{Ic}$	– krytyczny współczynnik intensywności naprężeń materiału obrabianego,
$l_n$	– długość zmiany głębokości,
$l_o$	– stała geometryczna,
$l_s$	– średnie odległości między przekrojami,
$m$	– moduł Weibulla,
$MRF$	– polerowanie magneto–reologiczne w polu elektromagnetycznym, (ang. Magneto–Rheological Finishing)
$N$	– biegun magnetyczny północny,
$n$	– prędkość obrotowa,
$P$	– pęknięcia poprzeczne o wymiarze ( $a_P$ ),
$P_f$	– prawdopodobieństwo wystąpienia kruchego pęknięcia materiału szklanego,
$PZT$	– ceramika piezoelektryczna (tytaniań cyrkonianu ołowiu),
$R$	– pęknięcia promieniowe o wymiarze ( $a_R$ ),
$RMS$	– wartość skuteczna sygnału, średnia kwadratowa (ang. Root Mean Square),
$S$	– biegun magnetyczny południowy,
$S'$	– tensor odkształcenia,
$S_a$	– średnia arytmetyczna wysokość,
$SE$	– wtórne elektrony,
$SEM$	– skaningowy mikroskop elektronowy (ang. Scanning Electron Microscope),

$S_{ku}$	– współczynnik nachylenia powierzchni,
$S_p$	– maksymalna wysokość szczytu,
$S_q$	– średnie kwadratowe odchylenie powierzchni,
$SSD$	– głębokość uszkodzeń podpowierzchniowych,
$S_{sk}$	– współczynnik skośności powierzchni (asymetria),
$STM$	– skaningowy mikroskop tunelowy (ang. Scanning Tunneling Microscope),
$S_v$	– maksymalna wysokość wgłębienia,
$S_z$	– wysokość chropowatości wg 10 punktów,
$t$	– czas,
$T$	– tensor naprężenia,
$V_p$	– objętość materiału odkształconego plastycznie,
$v_s$	– prędkość skrawania,
$v_w$	– prędkość,
$V_{wi}$	– objętość materiału, która podlega usunięciu w procesie skrawania przez pojedyncze ziarno,
$WE$	– energia elektryczna,
$WEM$	– energia elektromechaniczna,
$WM$	– energia mechaniczna,
$X, Y, Z$	– osie sterownicze obrabiarki sterowanej numerycznie
$\alpha$	– kąt mocowania próbki badanej,
$\alpha'$	– stała, niezależna od rodzaju materiału,
$\delta_f$	– naprężenia pęknięcia,
$\delta_{max}$	– naprężenia maksymalne,
$\delta_n$	– naprężenia nominalne.
$\sigma$	– przyłożone naprężenie rozciągające
$\sigma_0$	– współczynnik normalizujący
$\sigma_u$	– naprężenie przy $P_f = 0$

## 1. WSTĘP

Materiały szklane są powszechnie stosowane w zespołach konstrukcyjnych wielu zaawansowanych maszyn i urządzeń technicznych, można do nich zaliczyć soczewki optyczne, czujniki termiczne i kondensatory o wysokiej przenikalności. W procesach produkcyjnych części szklanych, stosuje się operacje szlifowania, zwykle wykonywane w celu uzyskania wymaganego przez dokumentację techniczną kształtu i tolerancji wymiarowej. Ponieważ szkło należy do grupy materiałów kruchych, szlifowanie często powoduje pęknięcia na obrabianej powierzchni i w jej warstwie wierzchniej. Aby zapobiegać tym zjawiskom, wprowadza się wykończeniowe procesy polerowania. Są to na ogół procesy długotrwałe i wymagające specjalistycznych urządzeń technologicznych.

W celu uniknięcia konieczności polerowania materiałów kruchych, w tym także materiałów szklanych, prowadzi się badania mające na celu szlifowanie tych materiałów w warunkach plastycznego odkształcania w strefie mikroobróbki. W tych warunkach, występuje mechanizm plastycznego przemieszczania materiału, przy jednoczesnym znaczącym ograniczeniu jego kruchego pęknięcia z lokalnymi obszarami destrukcji. W wyniku tego typu obróbki, kształtowana powierzchnia charakteryzuje się wysokim poziomem gładkości oraz dużą dokładnością wymiarowo–kształtową. Warunkiem realizacji takich procesów jest jednak konieczność spełnienia podstawowego warunku, aby głębokość wnikania ziaren ściernych znajdujących się na czynnej powierzchni narzędzia ściernego w powierzchnię materiału obrabianego, nie przekraczała wartości krytycznej. Jest to głębokość, przy której następuje przejście procesu obróbki z mechanizmu odkształceń plastycznych, do mechanizmu kruchego pęknięcia.

Stąd niezbędnym jest prowadzenie badań typu podstawowego, obejmujących mikro– i nanoskrawanie pojedynczymi ziarnami ściernymi, zwłaszcza z diamentu syntetycznego, z którego wykonywane są powierzchnie robocze spojonych narzędzi ściernych. Wyniki tych badań powinny określić krytyczne głębokości wnikania ziaren dla danych typów i gatunków materiałów obrabianych. Ponadto, powinny wskazać odpowiedni dobór parametrów i warunków obróbki, przy danej kinematyce procesu szlifowania.

Ponieważ jak wskazują autorskie badania rozpoznawcze, krytyczne głębokości wnikania ziaren mieszczą się w zakresie nanometrycznym, niezbędne też staje się

opracowanie specjalnych układów dosuwowych narzędzi do powierzchni obrabianych. Układy takie powinny posiadać możliwości monitorowania procesu obróbki, w celu niedopuszczenia do przekroczenia założonych wartości krytycznych.

Wobec powyższego, w niniejszej pracy podjęto badania, w celu analizy przemieszczania materiału szklanego w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczymi ziarnami diamentu oraz procesu szlifowania z zastosowaniem ściernic zbudowanych na bazie tego typu ziaren. Istotą tych badań, było opracowanie podstaw do identyfikacji warunków, przy których zachodzi niepożądany mechanizm kruchego pęknięcia materiałów szklanych. Wynikiem realizowanej pracy jest opracowanie doświadczalnych podstaw do prowadzenia procesu technologicznego obróbki materiałów szklanych w taki sposób, aby kontrolować i minimalizować mechanizm kruchego pęknięcia, z możliwością dominacji mechanizmu plastycznych odkształceń w strefie obróbki.

Wyniki tych badań zostały uwzględnione i zastosowane w procesie czołowego szlifowania szklanych powierzchni płaskich z zastosowaniem ściernic diamentowych, jako narzędzi wielostrzowych. Chodziło między innymi o sprawdzenie, czy analizowane procesy mikro- i nanoobróbki jednostrzowej, będą miały przełożenie i możliwości zastosowania w obróbce narzędziami wielostrzowymi. To z aplikacyjnego punktu widzenia, ma istotne znaczenie w praktyce technologicznej, by procesy skrawania materiałów szklanych prowadzone były w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki i zapewniały powtarzalne wyniki obróbki. Ponadto proces szlifowania postawiono przeprowadzić w warunkach kruchego pęknięcia, stosując dosuw wykraczający ponad granice plastycznej obróbki materiału szklanego, a było to podyktowane kolejnym etapem badawczym sprawdzającym możliwość cofnięcia defektów powstałych w skutek fazy kruchego pęknięcia, przy wykorzystaniu cieczy magneto-reologicznej o określonej charakterystyce pracującej w polu elektromagnetycznym.

W drugim rozdziale pracy przedstawiono charakterystykę techniczną materiałów szklanych z uwzględnieniem ich właściwości technicznych i właściwości skrawnych. Omówiono i przeanalizowano procesy mikroobróbki ścierniej materiałów szklanych, z uwzględnieniem ich specyfiki oraz warunków panujących w strefie mikroobróbki.

Na podstawie wniosków z tych analiz, opracowano cele, problemy badawcze oraz wynikającą z nich hipotezę badawczą i szczegółowy zakres pracy, co zostało zamieszczone w rozdziale trzecim.

W kolejnym rozdziale, czwartym przedstawiono analizą teoretyczną dotyczącą odkształceń i przemieszczeń materiałów szklanych w strefie mikro– i nanoskrawania, gdzie wyznaczono przybliżony przedział teoretycznej krytycznej wartości głębokości skrawania na podstawie analizy literatury oraz własności materiałów szklanych.

W rozdziale piątym przedstawiono autorską metodykę, realizację i wyniki badań eksperymentalnych nano– i mikroobróbki jednostrzowej wybranych materiałów szklanych, z zastosowaniem pojedynczych diamentowych ziaren ściernych. Do oceny warunków w strefie mikroobróbki, ze szczególnym uwzględnieniem odkształceń i przemieszczeń materiałów obrabianych, wykonano pomiary z zastosowaniem mikroskopu skaningowego i profilometru optycznego. Na tej podstawie określono mechanizmy występujące w procesie nano– i mikroskrawania oraz krytyczne głębokości wnikania ziaren ściernych, zapewniające przebieg procesu obróbki w warunkach plastycznych odkształceń materiału szklanego.

W drugiej części tego rozdziału, przedstawiono przeprowadzone badania procesu nano– i mikroszlifowania płaskich powierzchni szklanych w kinematyce szlifowania czołowego. Zastosowano specjalne narzędzia ścierne z ziarnami diamentu syntetycznego, opracowane i wykonane w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie. Procesy badawcze prowadzono przy zróżnicowanych głębokościach dosuwu narzędzia, wyznaczając mechanizmy towarzyszące odkształceniom i przemieszczeniom materiału w strefie obróbki.

Mając na uwadze powyższe, tak przygotowane powierzchnie ukształtowane w warunkach kruchego pęknięcia, poddano innowacyjnej obróbce polerskiej z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym.

Na podstawie wiedzy zgromadzonej w trakcie realizacji pracy, wzbogaconej wiedzą techniczną, w końcowej części przedstawiono projekt ciągu technologicznego kompleksowej obróbki powierzchni szklanej. Projekt ten wskazuje konieczność stosowania układów umożliwiających precyzyjne sterowanie wielkością dosuwu wgłębnego w procesie mikro– i nanoszlifowania, zapewniając możliwość obróbki w warunkach plastycznych odkształceń materiałów kruchych. To powinno umożliwiać kształtowanie gładkich i bez

objawów kruchego pęknięcia powierzchni, ułatwiających obróbkę polerską z zastosowaniem metod mechanicznych, jak i z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznych.

Podsumowując należy podkreślić, że wyniki niniejszej pracy poszerzają wiedzę w zakresie procesów nano– i mikroobróbki ścierniej materiałów szklanych, w szczególności realizowanej w warunkach odkształceń plastycznych. Wiedza ta ujmuje w sposób systemowy opis procesów kształtowania tych materiałów metodami: mikro– i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, mikro– i nanoszlifowania spojonym narzędziem ściernym i precyzyjnego mikropolerowania magneto–reologicznego. Tworzy to podstawy projektowania procesów technologicznych sekwencyjnej obróbki elementów szklanych, od których wymagana jest szczególnie wysoka jakość powierzchni obrabianych.

# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Opracowany zakres prac badawczych otrzymał stypendium w ramach projektu:  
„Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie – III edycja”

Działanie 8.2 Transfer wiedzy

Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji



Badania eksperymentalne przeprowadzono dzięki uprzejmości

**Oddziału Obróbki Mechanicznej**

znajdującego się w firmie Bumar–Koszalin



Opracowany zakres prac badawczych w formie analizy struktury powierzchni był możliwy dzięki uprzejmości **Regionalnego Centrum Badawczo-Rozwojowe w PWSZ Wałcz**

której przedstawicielem jest Pan dr inż. Wojciech Musiał

*Dyrektor Regionalnego Centrum Badawczo–Rozwojowego*



Opracowany zakres prac badawczych w formie analizy struktury powierzchni był możliwy dzięki uprzejmości firmy **OPTOTOM** której przedstawicielem

jest Pan Mariusz Włodowski *specjalista ds. mikroskopii*



Opracowany zakres prac badawczych w formie wykonania zdjęć skaningowych był możliwy dzięki uprzejmości **Politechniki Koszalińskiej** której przedstawicielem

jest Pan Ryszard Gritzman *specjalista ds. mikroskopii*





## 2. ANALIZA LITERATURY

### 2.1. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW SZKLANYCH

Szkło jest to bezpostaciowe ciało charakteryzujące się właściwościami mechanicznymi podobnymi do ciała stałego. Powstaje poprzez przechłodzenie stopionych surowców, w dużej mierze mineralnych, a także surowców nieorganicznych bez krystalizacji składników. W tym procesie otrzymuje się produkt pozostający w swojej masie w stanie nieskrystalizowanym, który został otrzymany ze stopionych oraz ostudzonych poniżej temperatury wykrywalnej krystalizacji składników. Nieuporządkowana struktura przestrzenna szkła upodabnia je do cieczy, natomiast sztywność oraz kruchość do ciał stałych [56,57]. Tego typu materiały nazywa się amorficznymi (bezpostaciowymi), nie mają uporządkowanej struktury cząstek [58].

Istnieje wiele materiałów oraz tworzyw, stosowanych zarówno w przemyśle, jak i w życiu codziennym, jednak trzeba przyznać, że to właśnie szkło znajduje w nich wyjątkowe miejsce. Wynika to z jego specyficznych cech, takich jak [59]:

- przezroczystość,
- bezbarwność,
- izotropowość właściwości optycznych,
- jednorodna budowa, polegająca na braku naprężeni, smug, czy pęcherzy,
- niewielka zmienność właściwości optycznych, przy zmianie temperatury,
- twardość,
- duża odporność na wpływ wilgotnej atmosfery,
- dobre właściwości elektryczne i dielektryczne,
- niezdefiniowana jednoznacznie temperatura topnienia,
- pełna odwracalność zarówno procesu twardnienia, jak i topnienia (bez krystalizacji).

W obecnej dobie, zarówno w technice i życiu codziennym, nie można sobie wyobrazić życia bez obecności szkła. Bez niego nie byłoby: okien, szklanych opakowań, szkła stołowego, współczesnej chemii, farmacji, optyki, oświetlenia czy elektroniki. W potocznym rozumieniu szkło kojarzy się z oknem, szklanką, czy butelką w tych przypadkach są to przykłady masowego zastosowania tworzywa jakim jest szkło. W języku budowlanym oknem, nazywamy przegrodę budowlaną, w przypadku tego

zastosowania jest wykorzystana podstawowa zaleta szkła, czyli przezroczystość, a więc możliwość przepuszczania światła, przy czym stanowi barierę wnętrza budynku, od zewnętrznych warunków. Poza tym podstawowym zastosowaniem, szkło w budownictwie stosowane jest również na: kształtki budowlane, szkło profilowe, szkło hartowane, szkło o selektywnej przepuszczalności promieniowania, czy szklane płytki mozaikowe. Przykładem zastosowania kolejnej podstawowej właściwości szkła jest opakowanie szklane, jakim jest butelka, a mianowicie mowa tu o odporności na oddziaływanie czynników chemicznych oraz obojętność, co do przechowywanych w jej wnętrzu produktów. Te cechy odnoszą się zarówno do produktów spożywczych takich jak butelki, słoiki oraz opakowania leków (fiolki, ampułki), opakowania produktów chemicznych oraz kosmetyków. Najszerzej znanym wyrobem, ze szkła codziennego użytku, jest szklanka która, jest stosowana zarówno do celów użytkowych oraz dekoracyjnych. W tym przypadku wykorzystano właściwość szkła, jaką jest przezroczystość, trwałość, odporność na zabrudzenie, możliwość barwienia oraz zdobienie [59].

Poza tymi wyżej wymienionymi zastosowaniami, jakże oczywistymi dla każdego człowieka, szkło posiada wiele innych zastosowań, oto niektóre z nich[59]:

- optyka – dla rozwoju współczesnej nauki oraz inżynierii, stanowią podstawowy element przyrządów optycznych (mikroskopy, lunety, teleskopy), w tym przypadku szkło przybiera postać soczewek, płytek, pryzmatów, filtrów optycznych, czy zwierciadeł. Przy czym warto zauważyć, że wielkości tych wyrobów szklanych przyjmują gabaryty od milimetra do nawet kilkunastu metrów,
- chemia – szkło jest podstawowym materiałem stosowanym w tej gałęzi przemysłu, ponieważ laboratoria są wyposażane w szklany sprzęt: kolby, zlewki, pipety, chłodnice. W przypadku przemysłowych instalacji w dużej mierze korzysta się ze szkła: rury, wzierniki, reaktory,
- elektrotechnika i radiotechnika – w przemyśle elektronicznym szkło odgrywa kluczową rolę już na etapie rozwoju, np. technika próżniowa (lampy radiowe, lampy oscyloskopowe). Dla elektroniki jest to również tworzywo podstawowe, są z niego wytwarzane następujące elementy: kineskopy, szkła półprzewodnikowe, światłowody z włókna szklanego, szkło do wskaźników ciekłokrystalicznych,

- oświetlenie – baloniki żarówkowe, rury świetlówkowe, czy jarzeniówki. Poza elementami stanowiącymi źródło światła, szeroko stosowane z tworzywa szklanego są osłony tych źródeł,
- elektrotechnika – w tym przypadku wykorzystuje się taką właściwość szkła jak elektroizolacyjność, dzięki czemu wytwarza się izolatory o różnych gabarytach oraz kształtach. Ponadto szerokie zastosowanie ma do celów izolacyjnych włókno szklane stosowane na taśmy, tkaniny, sznury czy oploty,
- transport – w tym przypadku szerokie zastosowanie ma szkło hartowane o podwyższonej wytrzymałości oraz szkło klejone, stosowane do środków transportu (samochody, samoloty, wagony),
- inne zastosowania – szkło przybierające postać włókna szklanego oraz szkła piankowego znalazło swoje zastosowanie w ciepłownictwie oraz kriogenice, gdzie pełni rolę materiału przeznaczonego do izolacji cieplnej. Tworzywo szklane w tej postaci charakteryzuje się dobrymi właściwościami dźwiękowymi. W wielu gałęziach inżynierii możemy spotkać szkło pod postacią: szkła światłoczułego, przepuszczającego, bądź pochłaniającego różnego rodzaju promieniowanie (podczerwone, ultrafioletowe, rentgenowskie, czy wysokoenergetyczne), ponadto występuje jeszcze szkło do zastosowań laserowych.

Podsumowując, trzeba przyznać, że obecnie jest niemożliwym znaleźć dziedzinę wiedzy gdzie szkło nie miałoby zastosowania, świadczy to o jego niewątpliwym ogromnym znaczeniu gospodarczym. Szacuje się, że asortyment należący do przemysłu szklarskiego może obejmować 20÷30 tysięcy odmian wyrobów [59].

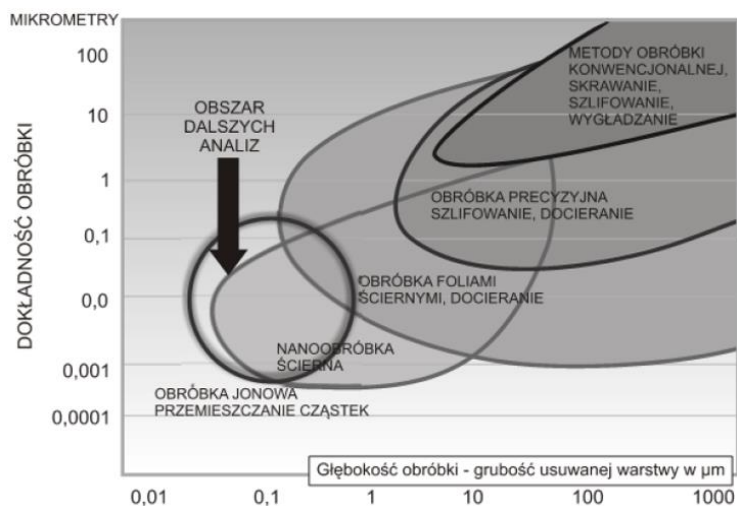
## 2.2. PROCESY MIKRO– I NANOBRÓBK I ŚCIERNEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH

Obecnie wszelkie procesy związane z technologią wytwarzania są bardzo prężnie rozwijane, co przyczynia się bezpośrednio do powstawania możliwości uzyskiwania coraz to większych dokładności wymiarowo–kształtowych powierzchni obrabianych metodami skrawania oraz obróbki ścierniej [1–2]. W przypadku obróbki bardzo dokładnej, należy wziąć pod uwagę szereg czynników, mających bezpośredni lub pośredni wpływ na wiele specyficznych zjawisk występujących podczas tego procesu, a co najważniejsze mających bezpośrednie przełożenie na wynik obróbki. Z tego powodu wynika zapotrzebowanie na rozwój badań dotyczących kształtowania materiału obrabianego w procesie mikro– i nanoskrawania, które dostarczają wielu informacji o zjawiskach fizycznych zachodzących w obszarze na styku narzędzie, a materiał obrabiany [3].

Stosowane obecnie założenia związane z procesami precyzyjnego mikroskrawania pojedynczym ziarnem, czy szlifowania przy wykorzystaniu ściernic, nie do końca odpowiadają operacjom obróbkowym realizowanym w skali mikro, czy nano. Naukowcy zdają sobie sprawę, iż stosowanie możliwie niewielkich głębokości obróbki, wiązałoby się z nieograniczonymi korzyściami i rozwojem technologicznym w zakresie mikro– i nanoskali szczególnie materiałów kruchych. Niestety opracowanie mechanizmów tego procesu jest skomplikowane. Obecnie podstawowymi celami badań prowadzonych w makro– i nanoskali, jest opracowanie podstaw teoretycznych oraz doświadczalnych nowoczesnych technologii, wytyczających kierunki dalszego rozwoju. W szczególności chodzi o uzyskanie nowych możliwości [4]:

- kształtowania wysokiej jakości powierzchni,
- obróbki mikroelementów,
- precyzyjnej obróbki materiałów o dużej twardości.

Wszystko to jest niezwykle ważne dla szybkiego rozwoju nowej dziedziny nauki, a mianowicie nanoinżynierii. Analizując obecnie rozwijane metody dotyczące obróbki, można zauważyć, że zakres precyzyjnego szlifowania, docierania, wygładzania foliami ściernymi (rys. 2.1), coraz bardziej zmierza w kierunku nanoobróbki ścierniej i zaczyna wchodzić w tak zwany obszar zastosowań przyszłych technologii [4,5,6,7,8].



**Rys. 2.1.** Granice dokładności obróbki

**Źródło:** [4]

Zawsze będzie tak, że rozwój zagadnień teoretycznych, przenikał się będzie ze znajdowaniem nowych rozwiązań technologicznych procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem, czy procesem mikro- i nanoszlifowania. Rozwój podstaw teoretycznych, wymusza potrzebę ich sprawdzania, potwierdzania oraz weryfikacji w początkowych fazach rozwojowych realizowanych w warunkach laboratoryjnych, a później w rzeczywistości produkcyjnej. Dzięki zainicjowanym nowym rozwiązaniom, tworzone są nowe obszary do kolejnych analiz na temat zjawisk zachodzących w mikro- i nanoskali w procesach technologicznych [4,9,10,11].

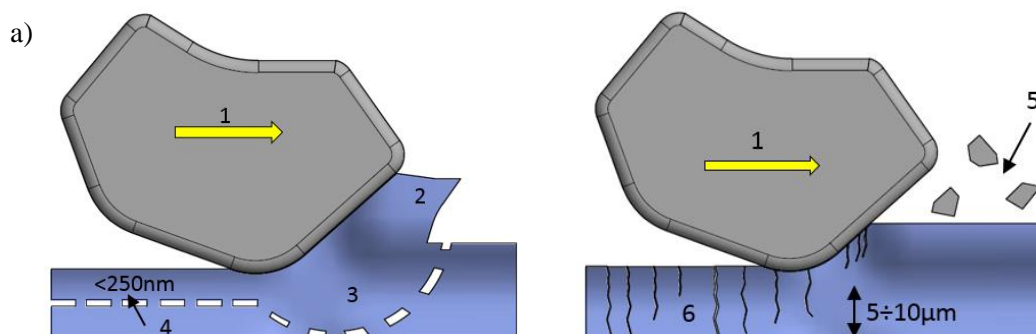
Od dłuższego czasu wzrasta zainteresowanie materiałami kruchymi, w celach nowoczesnych zastosowań, takimi jak ulepszone materiały szklane, materiały ceramiczne, czy węgliki spiekane. Materiały te stanowią ciągle duże wyzwanie dla precyzyjnych procesów obróbki skrawaniem, co zawdzięczają swoim specyficznym właściwościom taki jak twardość oraz kruchość [12,13].

Obecnie stosowane metody kształtowania gładkiej oraz wolnej od uszkodzeń powierzchni materiałów kruchych, za pomocą metod obróbki ścierniej, można sklasyfikować w trzech podstawowych grupach [14]:

- szlifowanie,
- docieranie,
- polerowanie.

Takie procesy technologiczne są kosztowne i czasochłonne [18,19]. Dodatkowo, niektóre z nich, wprowadzają odchylenia płaskości obrabianych powierzchni, czego powodem jest niekontrolowane usuwanie materiału, a konsekwencją tego są niejednorodności i odchyłki w strukturze geometrycznej powierzchni [18,15]. Z tych powodów rozwój obróbki materiałów szklanych w trybie plastycznego płynięcia materiału, stwarza możliwość na uzyskanie powierzchni obrabianej, charakteryzującej się wysoką jakością oraz wolną od wszelkiego rodzaju pęknięć. Aby zniwelować wady powierzchniowe po przeprowadzonych procesach szlifowania i docierania, stosuje się często polerowanie chemiczno–mechaniczne, które umożliwia usunięcie warstwy podpowierzchniowej uszkodzonej przez ziarna ściernie, przez co proces ten staje się bardziej kosztowny [18,16]. Procesy chemiczne są bardzo czasochłonne, jednak niezbędne, gdyż proces ścierny powoduje powstawanie uszkodzeń podpowierzchniowych, co przyczynia się znacznie do pogorszenia stanu powierzchni [18,17]. Poprawa owego stanu powierzchni materiałów szklanych, staje się możliwa dzięki prowadzeniu ich obróbki w trybie plastycznego płynięcia materiału. Z tej przyczyny w ostatnich dziesięcioleciach, prowadzone są badania nad tym zagadnieniem (rys. 2.2). Wiadomym jest, że prowadzenie obróbki materiałów szklanych w trybie plastycznego płynięcia materiału, spowoduje kształtowanie powierzchni bez uszkodzeń, konsekwencją czego będzie możliwość rezygnacji z procesu polerowania lub znaczne skrócenie jego czasu, co wpłynie pozytywnie na zmniejszenie czasu i kosztów produkcji. Zalety tej nie można bagatelizować, gdyż nawet nieznaczna poprawa wydajności w procesie wytwarzania, ma ogromny wpływ w masowej produkcji elementów wytwarzanych z materiałów kruchych [14].

Obróbka materiałów kruchych, w tym szkła, odbywa się na granicy odkształceń plastycznych w strefie obróbki na styku diamentowego ziarna ściernego z materiałem szklanym zachodzącym przy minimalnym dosuwie, nie przekraczającej krytycznej głębokości skrawania, a kruchymi odkształceniami materiału przy wzrastającej głębokości skrawania. Zależność ta występuje bez względu na twardość oraz kruchość obrabianego materiału. W momencie prowadzenia procesu skrawania poniżej krytycznej głębokości, energia która jest potrzebna do propagacji pęknięć (poprzecznych, bocznych, środkowych) będzie mniejsza, aniżeli energia przeznaczona na plastyczną deformację. W tym przypadku, obróbka skrawaniem materiałów kruchych będzie prowadzona w trybie plastycznym [18].



**Rys. 2.2.** Dwie fazy obróbki materiałów kruchych a) faza plastycznego płynięcia, b) kruchego pęknięcia (1 – ziarno ściernie, 2 – usuwanie wiórów w fazie plastycznego płynięcia, 3 – faza plastycznego płynięcia, 4 – warstwa po obróbce skrawaniem w fazie plastycznego płynięcia, 5 – usuwanie wiórów w fazie kruchego pęknięcia, 6 – mikropęknięcia propagujące na  $5\div 10\mu\text{m}$  (wyniki dla krzemu)

**Źródło:** [14]

Można przyjąć założenie, iż materiał szklany poddany obróbce będzie charakteryzowany przez granicę płynięcia ( $\sigma_y$ ) jako odporność na plastyczne płynięcie, a energia niezbędna do odkształcenia określonej objętości materiału ( $V_p$ ), zdefiniowana zostanie jako ( $E_p$ ), wówczas warunek ten zapisać można w formie zależności (1) [107]:

$$E_p = \sigma_y V_p \quad (1)$$

W przypadku gdy dodatkowo założymy, iż w przypadku każdego materiału można dokonać jego charakterystyki przy zastosowaniu współczynnika Griffitha ( $G$ ), który wyraża odporność na propagację kruchego pęknięcia w materiale, jak również definiuje zależność polegającą na tym, że energia niezbędna do inicjacji kruchego pęknięcia ( $E_f$ ) stanowi funkcję obszaru ( $A_f$ ) nowo utworzonej powierzchni w wyniku rozchodzących się pęknięć, co wyraża poniższa zależność (2) [107]:

$$E_f = G A_f \quad (2)$$

Powstała objętość materiału który w wyniku przejścia ziarna ściernego uległ uplastycznieniu ( $V_p$ ) i obszar powierzchni szczeliny powstały w wyniku propagacji kruchego pęknięcia, należy powiązać z głębokością dosuwu ziarna ściernego ( $d$ ) zagłębionego w materiale skrawanym (3)(4) [107]:

$$V_p \sim d^3 \quad (3)$$

$$A_f \sim d^2 \quad (4)$$



Wynika z tych zależności twierdzenie, iż stosunek energii materiału skrawanego, będzie wyznaczał mechanizm usuwania materiału (w trybie plastycznym, bądź kruchym) w funkcji głębokości dosuwu ziarna ściernego pracującego w materiale obrabianym (5) [107]:

$$\frac{\text{Energia plastycznego płynięcia}}{\text{Energia kruchego pęknięcia}} \sim \frac{E_p}{E_f} \propto d \quad (5)$$

Szkło jako materiał kruchy, podobnie jak większość materiałów stosowanych w obróbce skrawaniem, ulega odkształceniom plastycznym. Taki stan utrzymuje się tylko do pewnej głębokości zagłębienia ziaren ściernych, poniżej ściśle określonej wartości krytycznej. Prowadząc obróbkę w określonym przedziale głębokości skrawania, można uniknąć kruchego pęknięcia [12,19]. Dzięki rozwojowi badań nad prowadzeniem obróbki szkła oraz materiałów kruchych w obszarze odkształceń plastycznych bez kruchego pęknięcia, tworzą się szerokie możliwości dla rozwoju nowatorskich metod wykończenia szkła, umożliwiające eliminowanie lub skrócenie wtórnych procesów wykończeniowych [12].

Szkło jest materiałem twardym i jednocześnie kruchym, co powoduje, że jest dużym wyzwaniem w dziedzinie obróbki mechanicznej. W przypadku elementów szklanych stosowanych w optyce, kształtowanie ich powierzchni odbywa się przez szlifowanie, a później przez serię procesów polerowania, aby w jak najlepszym stopniu usunąć mikrouszkodzenia powstałe w procesie szlifowania. Mimo bardzo złożonych i zaawansowanych procesów technologicznych, i tak nie udaje się uzyskać korzystnej oraz satysfakcjonującej struktury powierzchni szkła, a dodatkowo cały proces jest długotrwały, mozolny oraz kosztowny. W celu optymalizacji procesu wytwarzania materiałów szklanych ważnym jest, aby nowoczesne badania nad procesem obróbki szkła, zostały skierowane w stronę fotolitografii oraz metod trawienia chemicznego. Szkło charakteryzujące się izotropowymi własnościami, można je wytrawiać na mokro przy zastosowaniu kwasu fluorowodorowego w strategii bezkierunkowej. Możliwe jest również wytrawianie na sucho przy użyciu plazmy, niemniej proces ten jest długotrwały [22]. Minusem tego typu obróbki wykańczającej szkła, są zagrożenia związane z substancjami trawiącymi, które w swoim składzie mają ołów czy sód, co w konsekwencji prowadzi do wytwarzania nielotnych związków halogenowych. W związku z tym, procesy trawienne szkła na sucho, czy mokro przy wykorzystaniu plazmy, charakteryzują się wieloma ujemnymi własnościami w porównaniu do uzyskanych efektów i obecnie nie są rozwijane



w sposób wystarczający, aby mogły być stosowane w masowej produkcji w procesie wykończeniowym szkła [12].

W literaturze można znaleźć również metody obróbki szkła przy użyciu wiązki laserowej. Niestety metoda ta charakteryzuje się dużym ryzykiem powstawania mikropęknięć, wiórów oraz innych uszkodzeń powierzchniowych [23]. Znane są również techniki obróbki szkła związane z obróbką strumieniowo-ścierną, ale charakteryzuje się one wieloma ograniczeniami związanymi z gabarytami obrabianych elementów [24,25].

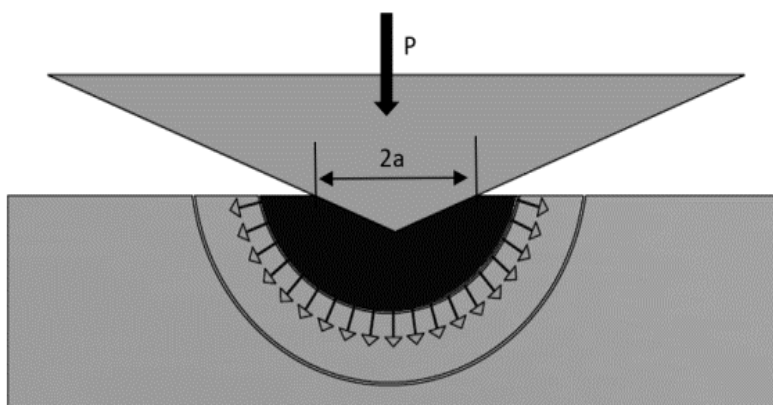
Niedogodności tych nie wykazuje innowacyjna grupa metod polerskich szkła, wykorzystujących ciecz magneto-reologiczną (MRF) pracującą w polu elektromagnetycznym. Ciecz ta jest układem dyspersyjnym, składającym się z cieczy bazowej (np. oleje), mikro- i nanocząstek ferromagnetycznych (np. żelazo karbonylkowe), cząstek ściernych oraz dodatków redukujących sedymentację cząstek magnetycznych (np. kwas oleinowy, lecytyna sojowa). Jako mikroziarna ściernie stosuje się  $\text{CeO}_2$  (tlenek ceru),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (tritylenek diglinu),  $\text{SiC}$  (węgiel krzemu) i  $\text{B}_4\text{C}$  (węgiel boru) o wymiarach 1–9  $\mu\text{m}$ . W polu magnetycznym ciecz ta zmienia swoją konsystencję, następuje uporządkowanie drobin ferromagnetycznych wzdłuż linii działania pola magnetycznego, ciecz ta zagęszcza i usztywnia się. W kontakcie z powierzchnią szkła cząstek ściernych, następuje proces usuwania mikronierówności i wygładzania.

Ze względu na fakt szybkiego wzrostu zapotrzebowania materiałów niemetalicznych takich jak szkło, następuje konieczność rozwoju obróbek wykończeniowych materiałów kruchych w trybie plastycznego płynięcia. Zauważono, że od wielu lat badania dotyczące wykończenia powierzchni szklanych skupiają się głównie na obróbce skrawaniem. W dotychczasowych źródłach literaturowych istnieje wiele badań nad tą tematyką, głównie przy zastosowaniu pojedynczego ostrza skrawającego w postaci ziarna diamentowego. Jednak w przypadku obróbki skrawaniem jednoostrzowym narzędziem mówi się wówczas o procesie toczenia, a obecnie przemysł stawia przed naukowcami coraz większe wymagania i oczekiwałby obróbki elementów o asymetrycznej budowie oraz skomplikowanych kształtach i zminiaturyzowanych gabarytach. Wiadomym jest, że proces obróbki narzędziami wielostrzowymi jest utrudniony pod względem zapewnienia w pełni kontrolowanego przebiegu obróbki w warunkach plastycznych odkształceń materiału w strefie obróbki [12].

## 2.3. ODKSZTAŁCENIA W STREFIE MIKRO– I NANOBRÓBKI ŚCIERNEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH

Przemysł obecnie stawia wymagania tworzenia elementów precyzyjnych, charakteryzujących się wąskim zakresem tolerancji, co otwiera szereg możliwości do rozwoju procesów mikro– i nanoskrawania materiałów szklanych, w warunkach dominujących odkształceń plastycznych w strefie obróbki. Od wielu lat prowadzi się podstawowe badania w zakresie precyzyjnej obróbki mechanicznej, celem rozwoju wiedzy w zakresie plastycznych odkształceń materiałów kruchych w strefie mikro– i nanoszlifowania, w tym i szkła, w szczególności dotyczących określenia parametrów oraz warunków obróbki [12].

Po raz pierwszy idea prowadzenia procesu skrawania dla materiałów kruchych w warunkach odkształceń plastycznych, została opisana w 1954 roku przez Kinga oraz Tabora. Proces ich obróbki polegał na zastosowaniu soli kamiennej, jako środka ściernego w celu mikroobróbki materiału, jednak w procesie tym otrzymano powierzchnie charakteryzującą się wyraźnymi mikropęknięciami [18,52]. W roku 1976 Huert oraz Malkin opublikowali przełomowe badania, w których pokazali powtarzalne wyniki procesu szlifowania ziarnami diamentowymi materiału szklanego, a proces prowadzony był w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki. Uzyskali w tym procesie znaczącą poprawę jakości uzyskanej powierzchni [18,53]. Zespół Dovlev’a wykonywał próby związane z obserwacją zjawisk mikroplastyczności szkła przy skoncentrowanym obciążeniu [26]. Finnie opisywał, że przy zastosowaniu węgelnika o małych wymiarach, można zaobserwować przejście z trybu plastycznego płynięcia materiału, do kruchego pęknięcia, a obciążenie (przyłożona siła) przy wartości której pojawia się kruche pęknięcia, wykazywał stosunek liniowo proporcjonalny do średnicy stosowanego węgelnika [18,27]. Zespół Lawn’a przeprowadził badania na szkle sodowo–wapniowym przy użyciu piramidy Vickersa jako węgelnika (rys. 2.3), przy użyciu którego wywierano zmienne obciążenie na materiał badany. Badania te ujawniły pewien powtarzalny mechanizm, mówiący o tym że faza kruchego pęknięcia pojawia się po przekroczeniu pewnego krytycznego obciążenia, co prowadzi do wniosku, że obróbka materiałów kruchych jest możliwa w trybie plastycznego płynięcia materiału, ale przy określonej wartości obciążenia [28].



**Rys. 2.3.** Test wgłębnika przeprowadzany dla materiałów kruchych w celu określenia granicy pomiędzy fazą plastyczną, a kruchym pękaniem (1 – rdzeń hydrostatyczny (czarny), 2 – strefa plastyczna (szara), 3 – elastyczna matryca (czarne strzałki))

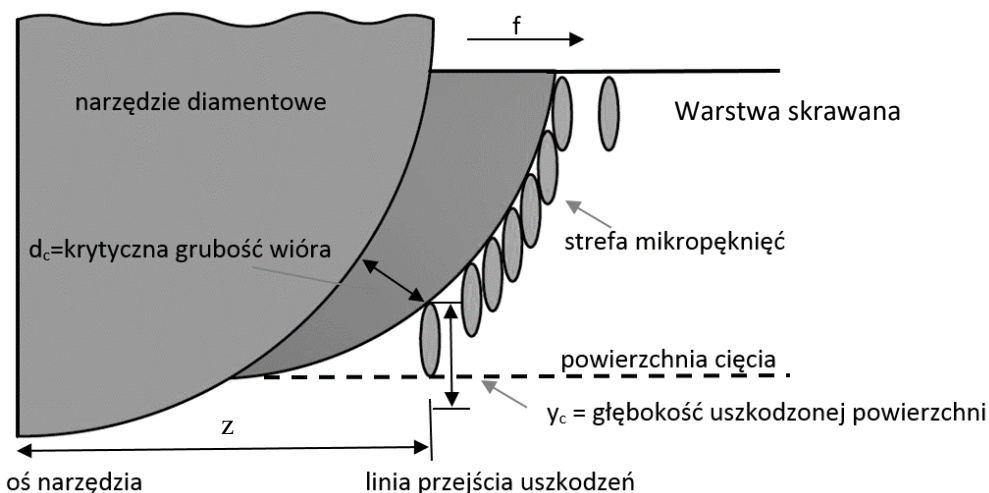
**Źródło:** [12,20,21]

Giovanola oraz Finnie w roku 1980 prowadzili badania związane z plastycznością szkła, twierdząc że można stosować jego obróbkę w sposób tożsamy do materiałów metalowych, czyli wykorzystując zjawisko ciągliwości, z tym że głębokość skrawania należy utrzymywać na niskim poziomie [29].

Bifano prowadząc badania procesu mikroskrawania na materiałach ceramicznych odkrył, że w procesie ma znaczenie krytyczna nieodkształcona grubość wiórów i dzięki tej zależności, można regulować przejście od plastycznego płynięcia do kruchego pękania, a na ten proces mają wpływ właściwości materiału takie jak moduł sprężystości, twardość i odporność na kruche pęknięcie [30].

Blackely w roku 1991 podjął się opracowania analitycznego modelu procesu toczenia narzędziem diamentowym szkła, który umożliwia określenie zakresu parametrów obróbki skrawaniem w warunkach plastycznych odkształceń w strefie obróbki (rys. 2.4).

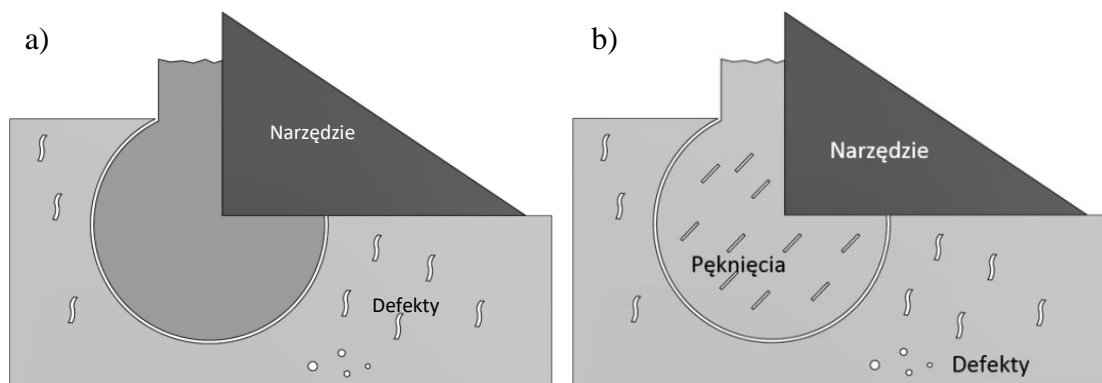
W tych badaniach również zauważono ważność zjawiska mówiącego o zalecanym obszarze uzyskiwania krytycznej wartości nieodkształconej grubości wiórów, która będzie charakteryzować się wartościami z zakresu mikrometrów. Dodatkowo zauważono możliwość połączenia obu trybów plastycznego i kruchego, pod warunkiem, że mikropęknięcia są utworzone z dala od powierzchni końcowej (czyli w obszarze przeznaczonym do usunięcia).



**Rys. 2.4.** Model procesu skrawania ukazujący krytyczną głębokość skrawania  
**Źródło:** [12,19]

Aby osiągnąć takie warunki, należy zastosować mniejszą prędkość posuwu, co spowoduje pojawienie się mikropęknięć podpowierzchniowych daleko od granicy krytycznej. Przy zastosowaniu krytycznej prędkości posuwu, krytycznie nieodkształcona grubość wiórów będzie występować powyżej powierzchni nieobrabananej, dzięki czemu wszelkie mikropęknięcia podpowierzchniowe, nie osiągną wartości powierzchni końcowej. Stosując te zalecenia, obróbka mikroskrawaniem będzie prowadzona w połączeniu trybu plastycznego oraz kruchego, ale finalnie powierzchnia końcowa będzie wolna od mikro- i nanopęknięć. W przypadku, gdy konieczne jest zastosowaniu większej prędkości posuwu, należy się liczyć z tym, że spowoduje to rozprzestrzenianie się uszkodzeń podpowierzchniowych, przez co obróbka będzie prowadzona w trybie kruchego pęknięcia [19]. Mechanizm przejścia między plastycznym płynięciem materiału, a kruchym pękaniem w strefie mikroskrawania, można analizować przy porównaniu głębokości skrawania (rys. 2.5), która wpływa na defekty, wielkość wiórów oraz wielkość pola naprężeń [12,31].

Podsumowując, w mikroskrawaniu materiałów kruchych, występują dwie podstawowe formy usuwania materiału: w trybie odkształceń plastycznych i kruchego pęknięcia. Odkształcenia plastyczne występują wówczas, gdy warstwa skrawana pokrywa się z płaszczyzną maksymalnego naprężenia ścinającego, w następstwie płaszczyzna poślizgu pokrywa się z płaszczyzną maksymalnego naprężenia rozciągającego.



**Rys. 2.5.** Porównanie otrzymanych defektów oraz wiórów w procesie skrawania materiału kruchego: a) mała głębokość skrawania, b) duża głębokość skrawania

**Źródło:** [12,31]

W momencie, gdy krytyczne naprężenie ścinające jest zastąpione przez naprężenie rozciągające, które występuje w kierunku zgodnym z kierunkiem poślizgu, wówczas proces przebiega w trybie plastycznym i generowane jest małe pole naprężeń, związane z małą głębokością skrawania. Natomiast kruche pęknięcie pojawi się w momencie, gdy naprężenie rozciągające normalne do płaszczyzny skrawanej, przekroczy krytyczne naprężenia rozciągające jeszcze przed pojawieniem się fazy plastycznego płynięcia materiału [12,32].

## 2.4. METODY MIKRO– I NANOOBRÓBKI SZKŁA

Przedstawione zostaną trzy procesy obróbki materiałów szklanych, do których z całą pewnością można zaliczyć mikroskrawania. Obróbka ta jest najszerzej opisaną metodą, raczej pozostającą w strefie badawczej, niż mającą zastosowanie przemysłowe. Jej popularność w tym zakresie wynika z łatwiejszego sterowania przebiegiem procesu, w porównaniu do kolejnej możliwości obróbki szkła, czyli mikroszlifowania. Proces ten jest bardziej nieprzewidywalny i mniej sterowalny z uwagi na budowę narzędzia ściernego. Niemniej szeroko stosowany w przemyśle i wykorzystywany w produkcjach gdzie ważną rolę odgrywa wykończenie powierzchni. Ostatnią omawianą metodą będzie dość innowacyjna, lecz już publikowana w światowej literaturze obróbka polerska wykorzystująca właściwości cieczy magneto–reologicznej, która swoje właściwości ujawnia pod wpływem działania pola elektromagnetycznego.

## 2.4.1. Mikro– i nanoskrawanie

Duża kruchość szkła jest wynikiem jego nieregularnej budowy atomowej, natomiast atomy metalu charakteryzują się w swojej budowie statycznym regularnym ułożeniem, czego poparciem jest wskaźnik Millera, w przeciwieństwie do materiałów amorficznych [12,33]. Stąd wynikają różnice polegające na konieczności zmiany podejścia do obróbki tych dwóch typów materiałów, ale wykorzystując pozytywne cechy obróbki w trybie plastycznym. Wnioskiem jest, iż na mechanizm obróbki wpływają znacząco wiązania atomowe [12,34,35]. Dzięki regularnej budowie metali ich obróbka przebiega w przeważającej części w trybie plastycznym, natomiast obróbka szkła prowadzona w trybie kruchego pęknięcia uwarunkowanego amorficzną budową atomową prowadzić będzie do nieodwracalnych defektów w postaci pęknięć bocznych i środkowych struktury materiału. Z dotychczas przeprowadzonych analiz wynika, że aby tego uniknąć, należy stosować możliwie małą głębokość skrawania. Blackley opublikował wyniki swoich badań gdzie opracował, że gdy warstwa skrawana szkła nie przekroczy 10nm wówczas obróbka będzie prowadzona w trybie plastycznym. Niemniej należy pamiętać, iż obróbka skrawaniem charakteryzuje się jeszcze dodatkowymi cechami wpływającymi na przebieg procesu, takimi jak powstające obciążenia oraz właściwości materiału obrabianego. Cały proces można podzielić na trzy podstawowe etapy występujące podczas procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym oraz w procesie szlifowania przy wykorzystaniu ściernic diamentowych [12,19]:

- inicjacja procesu,
- bruzdowanie,
- tworzenie wióra.

Teoria dotycząca procesów obróbkowych w trybie plastycznego płynięcia materiałów obrabianych, mówi że każdy rodzaj materiału, bez względu na stopień plastyczności będzie charakteryzować się zarówno odkształceniami w trybie plastycznym oraz kruchym pękaniem. Niemniej, aby prowadzić proces w trybie plastycznego płynięcia materiału należy prowadzić proces skrawania poniżej krytycznej głębokości ustalonej dla konkretnego materiału. W momencie prowadzenia procesu obróbki poniżej krytycznej głębokości skrawania, energia potrzebna na rozwój propagacji pęknięć występujących w trybie kruchego pęknięcia przyjmuje mniejszą wartość, aniżeli energia potrzebna

do odkształceń plastycznych, stąd wynika fakt, że w takim procesie mechanizm odkształceń plastycznych jest dominujący [12,36]. W momencie prowadzenia obróbki przy zastosowaniu diamentowych ziaren ściernych (czy to pojedynczych, czy wielu) w obszarze styku ziarna ściernego z materiałem obrabianym dochodzi do akumulacji ciepła w strefie obróbki. Jest to spowodowane słabym rozpraszaniem ciepła oraz powstającymi dużymi naprężeniami ściskającymi co prowadzi do powstania odkształceń plastycznych [12,37]. Wynika z tego, że na przebieg procesu w trybie odkształceń plastycznych wpływają następujące elementy [12]:

- kształt narzędzia,
- prędkość posuwu,
- krytyczna głębokość dosuwu.

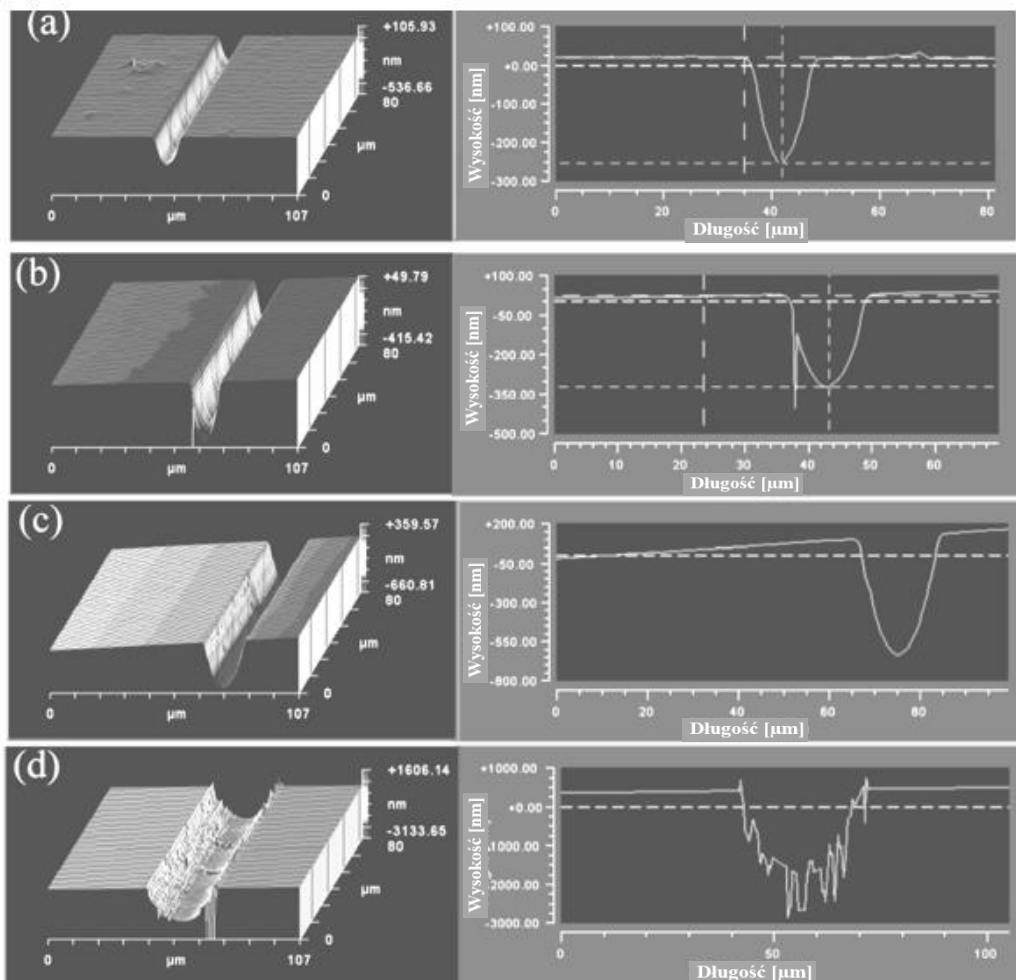
Dodatkowo plastyczne odkształcenia analizowanego procesu występują jedynie wzdłuż wierzchołka ziarna skrawającego, ponieważ głębokość rzeczywista procesu skrawania jest niższa, aniżeli wartość głębokości krytycznej [12,38]. Badając fazę przejścia pomiędzy plastycznym płynięciem materiału, a kruchym pękaniem zauważono, że pole naprężeń powstających podczas procesu można podzielić na cztery obszary [12]:

- I obszar – występuje mieszanka wpływu chemicznego oraz termicznego na usuwany materiał (obróbka prowadzona poniżej  $10^{-6}$ mm),
- II obszar – materiał obrabiany zachowuje się jak kryształ idealny, nie występują żadne przemieszczenia, moment pojawienia się dyslokacji pojawia się tuż przed fazą kruchego pęknięcia (obróbka prowadzona pomiędzy  $10^{-6}$ mm i  $10^{-4}$ mm),
- III obszar – występują odkształcenia plastyczne oraz zaczyna pojawiać się kruche pęknięcie (obróbka prowadzona pomiędzy  $10^{-4}$ mm i  $10^{-2}$ mm),
- IV obszar – dominującą fazą jest kruche pęknięcie (obróbka prowadzona powyżej  $10^{-2}$ mm).

W procesie toczenia pojedynczym ziarnem diamentowym (obróbka jednostrzowa) SPDT (ang. Single Point Diamond Turning) mamy do czynienia z ultraprecyzyjnym procesem skrawania stosowanym do obróbki nanopowierzchni wykonanej z submikrometrycznym poziomem dokładności wymiarowej [12,39]. Technika ta została dobrze przyjęta przez przemysł optyczny, jako możliwość obróbki powierzchni optycznych pracujących w podczerwieni oraz w obszarze światła widzialnego [12,40].



Prowadzone są badania jakości powierzchni rysy po skrawaniu szkła narzędziem diamentowym w celu scharakteryzowania warunków kształtowania powierzchni, przy zmiennej głębokości obróbki, natomiast chropowatość powierzchni mierzono wzdłuż dna rowka (rys. 2.6). Niska wartość chropowatości powierzchni oznacza gładką powierzchnię z minimalnymi pęknięciami lub złamaniami [126].

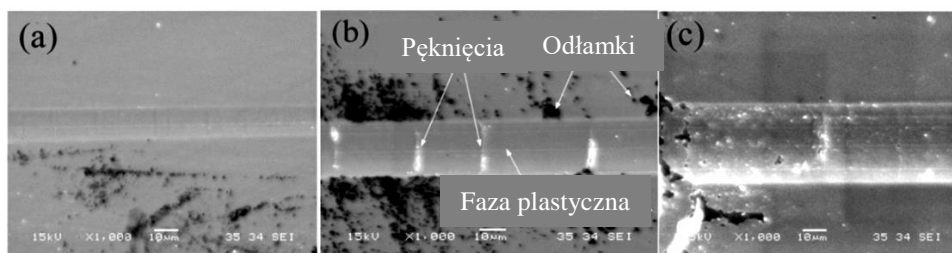


**Rys. 2.6.** Morfologia i profile rowka w zależności od głębokości wnikania wierzchołka narzędzia: a) 272nm, b) 320nm, c) 800nm, d)2100nm

**Źródło:** [126]

W dolnej części rys zidentyfikowano trzy podstawowe mechanizmy pracy narzędzia, a mianowicie w warunkach plastycznego, plastyczno–kruchego i kruchego odkształcania materiału w strefie obróbki (rys. 2.7).

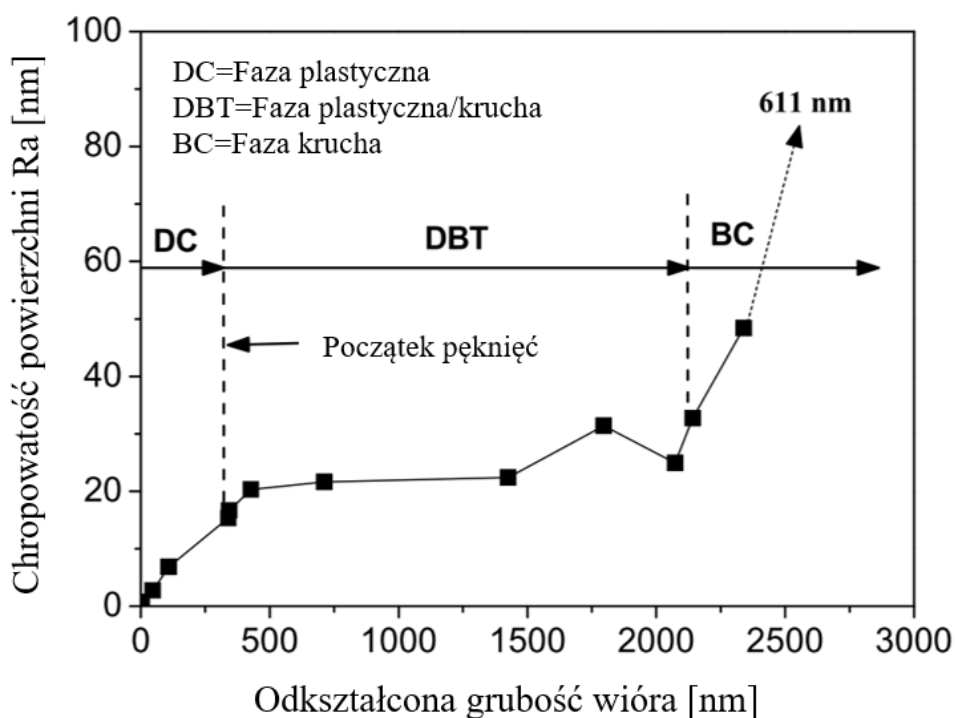




**Rys. 2.7.** Obrazy SEM rysy ukształtowanej na powierzchni szkła w procesie mikroskrawania: a) w warunkach odkształceń plastycznych, b) w warunkach odkształceń plastyczne–kruche, c) w warunkach odkształceń kruchych

**Źródło:** [126]

Dla przedstawionych powyżej wyników badań określono zmiany chropowatości powierzchni dna analizowanej rysy, przy założonej grubości wnikania ostrza, w odniesieniu do trzech omawianych wyżej warunków odkształceń obrabianego materiału (rys. 2.8).



**Rys. 2.8.** Wpływ głębokości mikroskrawania na postać odkształceń szkła na dnie rysy ukształtowanej ostrzem diamentowym przy prędkości skrawania 300 mm/min

**Źródło:** [126]

Wyniki tych badań wskazują, że tylko przy bardzo małych zagłębieniach ostrza w materiale obrabianym (do ok. 320nm) występuje w pełni postać odkształceń plastycznych. Powyżej tej wartości w przedziale 320÷2100[nm], występuje postać odkształceń

mieszanych plastycznie–kruchych, zaś powyżej mamy do czynienia jedynie z fazą kruchego pęknięcia [126].

Ultra precyzyjne urządzenia obróbkowe, które zapewniają dużą dokładność oraz sztywność procesu, są wykorzystywane do obróbki skrawaniem prowadzonej w trybie plastycznym, a proces prowadzony jest z małą głębokością skrawania i małą wartością posuwu. Z tego względu owe badania dotyczące prowadzenia procesu obróbki szkła w trybie odkształceń plastycznych szkła okazują się nieoptymalne oraz niepraktyczne, ze względu na czas obróbki oraz duży stopień zużycia narzędzi skrawających. Aby zoptymalizować te procesy postanowiono zastosować w badaniach procesu toczenia szkła zjawisko wibracji w celu podniesienia krytycznej głębokości dosuwu, otrzymane wyniki wstępnie potwierdzały możliwość skrawania materiałów kruchych w trybie odkształceń plastycznych, przy zastosowaniu wibracji. Udało się uzyskać satysfakcjonujące wyniki w postaci lustrzanego wykończenia szkła sodowo–wapniowego, ale niestety nie udało się zniwelować dużego zużycia narzędzia, w porównaniu z konwencjonalną obróbką metali lekkich [12,41,42,43].

## **2.4.2. Mikro– i nanoszlifowanie**

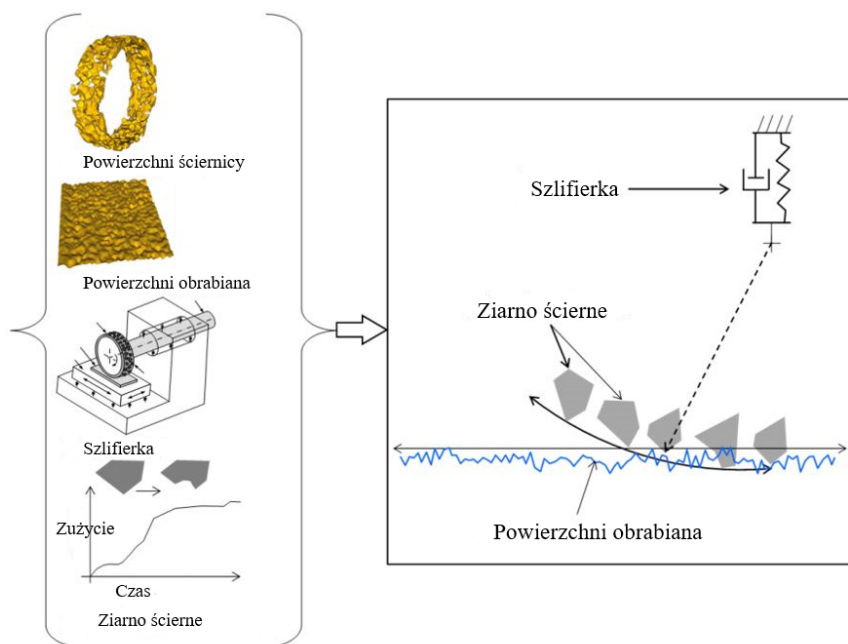
Proces mikro– i nanoszlifowania jest jednym z podstawowych procesów umożliwiających obróbkę materiałów szklanych (np. soczewek optycznych). W czasie procesu kolejne warstwy materiału kruchego są usuwane przy udziale narzędzia ściernego w postaci ściernicy diamentowej lub na bazie CBN, przez wielokrotne przejścia narzędzia po powierzchni podlegającej obróbce. Proces szlifowania stanowi około 20÷30% całościowych wydatków na operacje skrawania w krajach uprzemysłowionych, jest on bardzo często stosowany przy obróbce materiałów kruchych, takich jak ceramika techniczna, szkło oraz oczywiście do obróbki materiałów metalowych charakteryzujących się bardzo dokładnym wykończeniem powierzchni [122].

Podczas procesu obróbki ścierniej jakim jest szlifowanie ziarna ściernie (np. CBN, diament, węgiel krzemu) które są materiałami bardzo twardymi i kruchymi zarazem, osadzone są na tarczy szlifierskiej i pozwalają przy małych dosuwach usunąć w zwielokrotnionych przejściach narzędzia wymaganą ilość materiału obrabianego [122÷125]. Różne rodzaje ziaren ściernych charakteryzują się podobnym zużyciem,

wynikającym z pojawiających się pęknięć na poziomie mikro- i nanostruktury ziarna podczas obróbki, przyczyniając się do nagłych pęknięć, czy utraty krawędzi skrawających, czego konsekwencją są ubytki i zużycie. Ponadto dochodzi do tego nierównomierny rozmiar oraz rozkład ziaren na powierzchni czynnej ściernicy [122,124]. Wypadkowa tych elementów które charakteryzują ściernicę składa się na potencjalny przebieg procesu szlifowania (rys. 2.9).

Niemniej na ów proces oddziałują dodatkowo takie elementy jak [122]:

- chropowatość powierzchni obrabianej,
- wibracje generowane przez maszynę,
- sztywność ściernicy,
- oddziaływania termiczne, sprężyste, plastyczne zarówno przedmiotu obrabianego, jak i ściernicy.

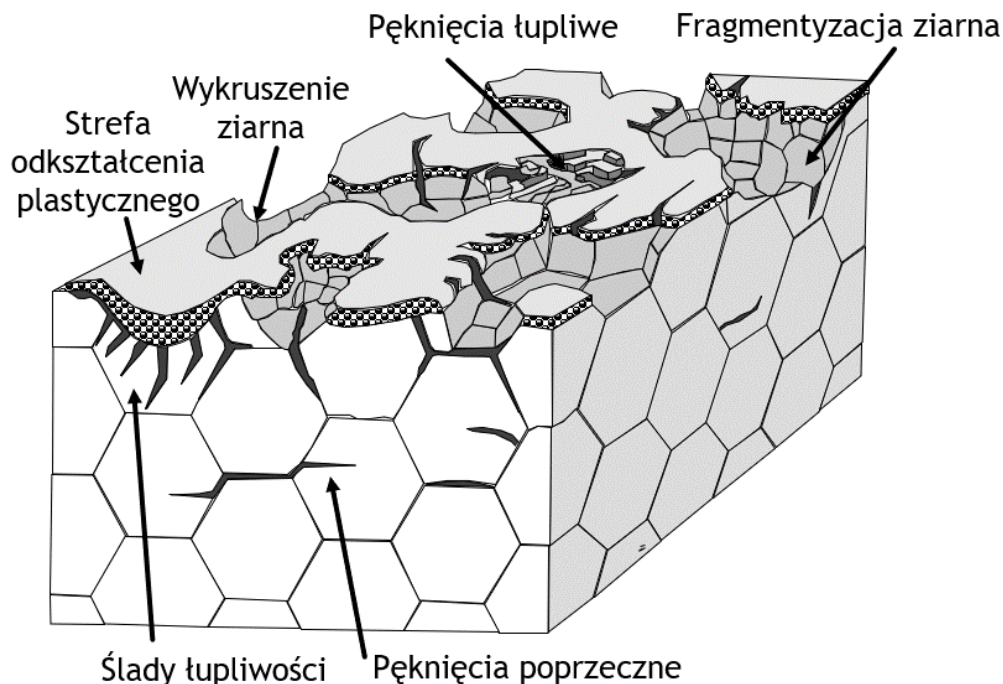


**Rys. 2.9.** Elementy oddziałujące na proces szlifowania  
**Źródło:** [122]

Badacze Malkin oraz Hwang opracowali informacje dotyczące dwóch głównych układów kruchej pęknięcia (rys. 2.10) [12,44]:

- I – boczne pęknięcia, charakterystyczne dla usuwanego materiału celem wytworzenia nowej powierzchni,

- II – pęknięcia zlokalizowane promieniowo oraz w pozycji środkowej, co powoduje degradację wytrzymałościową struktury materiału.



**Rys. 2.10.** Model warstwy wierzchniej materiału kruchego (szkło, ceramika) po szlifowaniu  
**Źródło:** [107]

Niemniej, pojawienie się ulepszonych precyzyjnych obrabiarek CNC umożliwiło wytłumienie tych pęknięć, przy zastosowaniu odpowiednich parametrów obróbkowych [12]. Gdy proces szlifowania, jest prowadzony w granicach wartości krytycznej dosuwu ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia ściernego, wówczas proces pozostaje w fazie obróbki plastycznej, spowodowane jest to niższą energią, której wartość okazuje się niewystarczająca do wygenerowania pęknięć. Ten mechanizm procesu szlifowania, nazywany jest reżimowym. Obecnie przemysłowi, zależy aby badania procesów szlifowania i procesów pokrewnych materiałów kruchych były rozwijane [12,34].

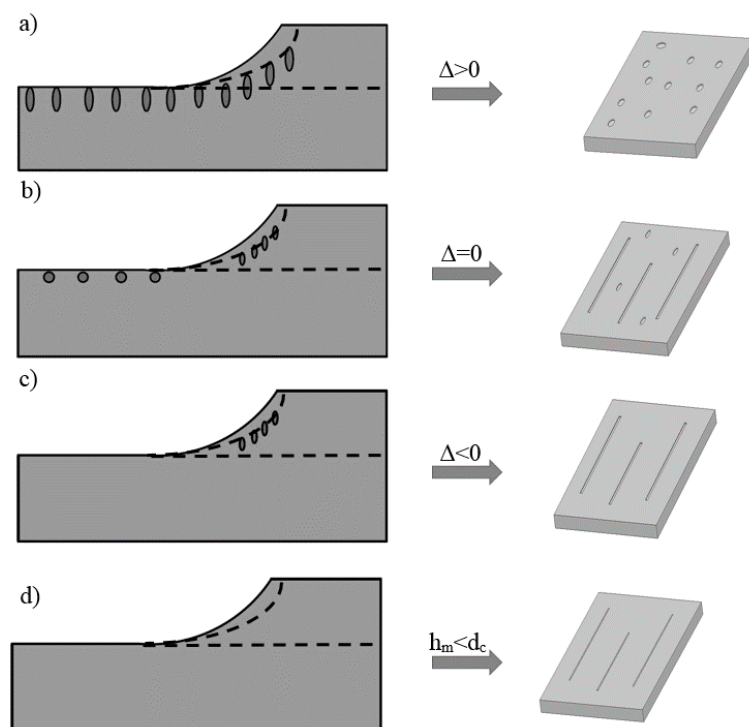
Grupa badaczy pod przewodnictwem Chen wykonała serię badań polegających na przeprowadzeniu procesu szlifowania dla szkieł optycznych oraz szkieł mikrokrystalicznych, przy różnych wartościach zagłębienia ściernicy, aby zaobserwować proces przejścia od fazy kruchej do plastycznej. Stwierdzono, że wybitnie gładką powierzchnię udało się uzyskać przy szlifowaniu tarczą diamentową o gradacji ziaren powyżej  $10\mu\text{m}$  [12,45].

Zespół badaczy pod przewodnictwem Brinksmeier'a stwierdził, że na rodzaj trybu szlifowania (kruchy, czy plastyczny) wpływa [12,46]:

- głębokość szlifowania,
- ułamek prędkości posuwu w stosunku do głębokości skrawania.

Grupa badaczy pod przewodnictwem Stephenson'a prowadziła badania na szkłe Bk7 szlifując je w sposób krzyżowy oraz równoległy, co wykazało że chropowatość powierzchni oraz głębokość uszkodzeń podpowierzchniowych są w sposób bezpośredni uzależnione od trybu szlifowania. Powierzchnie szkła były szlifowane w poziomej płaszczyźnie, a pęknięcia indukowane, zostały przeanalizowane przy zastosowaniu strategii kinematycznych [12,47]. Otrzymane wyniki nasuwają wniosek, że można wymienić cztery różne tryby (rys. 2.11) [12,48]:

- kruchy,
- półkruchy,
- półplastyczny,
- plastyczny.



**Rys. 2.11.** Cztery tryby szlifowania: a) faza krucha, b) faza półkrucha, c) faza półplastyczna, d) faza plastyczna

**Źródło:** [12,46]

Zhong oraz Venkatesh opisywali tendencje przemysłowe w kierunku wzrostu zapotrzebowania na wiedzę w zakresie metod szlifowania szkła w trybie obróbki przy plastycznym płynięciu materiału. Spowodowane jest to bardzo szybko rosnącymi wymaganiami w procesie przemysłu obróbki szkła [12,49].

Natomiast grupa badaczy pod wodzą Perveen [44] prowadziła badania dotyczące wpływu różnych rodzajów geometrii narzędzia w procesie obróbki szkła Bk7 [12,50]:

- kształt okrągły,
- kształt litery D,
- kształt trójkątny,
- kształt kwadratowy.

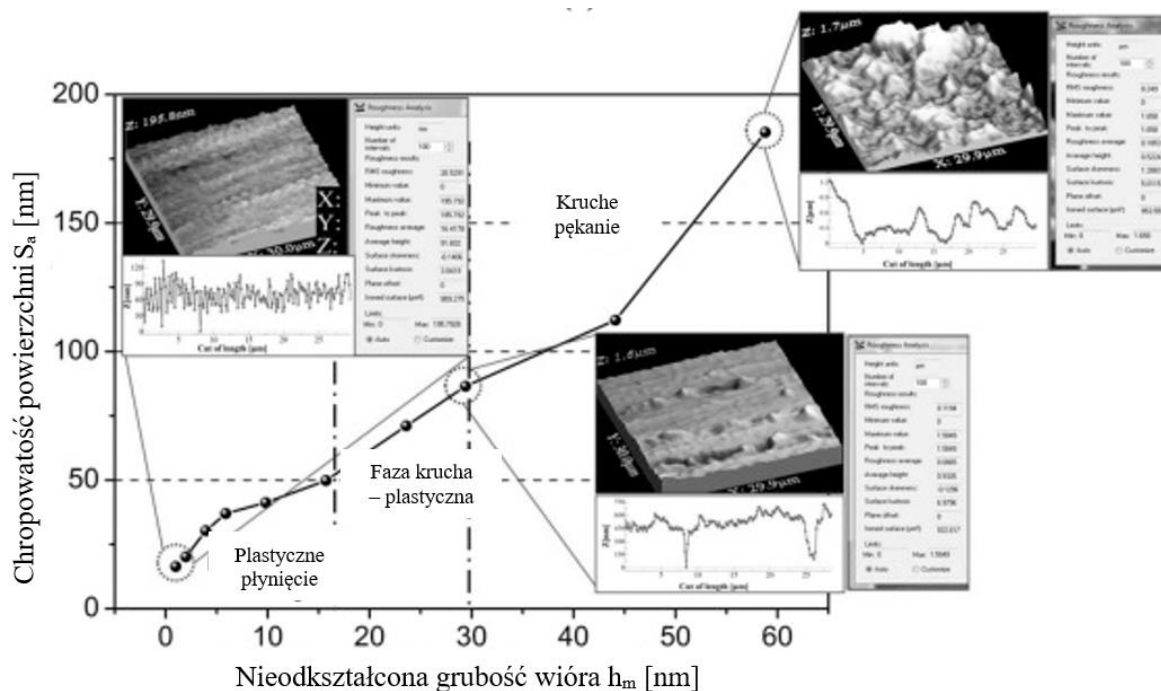
Okazało się, że najlepszą wydajność obróbkową wykazywały mikroszlifierki w których zastosowano narzędzie o geometrii D, wynik procesu charakteryzował się lepszym wykończeniem obrabianej powierzchni, dzięki ograniczonemu zużyciu narzędzia oraz siły skrawania [12,51].

Podstawowa teoria dotycząca mechanizmu skrawania materiału kruchego w trybie plastycznym jest możliwa wówczas, gdy krytyczna nieodkształcona grubość wiórów przyjmuje wartość poniżej krytycznej. Mechanizm ten najczęściej w procesie skrawania odbywa się metodą przesuwno-wcięciową [18,54,55]. W tym procesie możemy wyróżnić cztery główne etapy [14]:

- materiał skrawany pod narzędziem (wgłębniakiem, ostrzem) w momencie inicjacji procesu podlega znacznemu odkształceniu plastycznemu, tworzy się niewielki obszar elastycznej deformacji spowodowanej dużym ciśnieniem hydrostatycznym pod narzędziem,
- pojawiają się pęknięcia promieniowe oraz środkowe które tworzą się na przejściu faz sprężysto-plastycznej przy zwiększeniu obciążenia,
- pojawianie się pęknięć bocznych promieniujących w kierunku na zewnątrz od strefy deformacji,
- w momencie zastosowania dużego obciążenia, pęknięcia rozchodzą się ku górze, a następnie przecinają wolną powierzchnię materiału, co powoduje powstawanie odprysków.

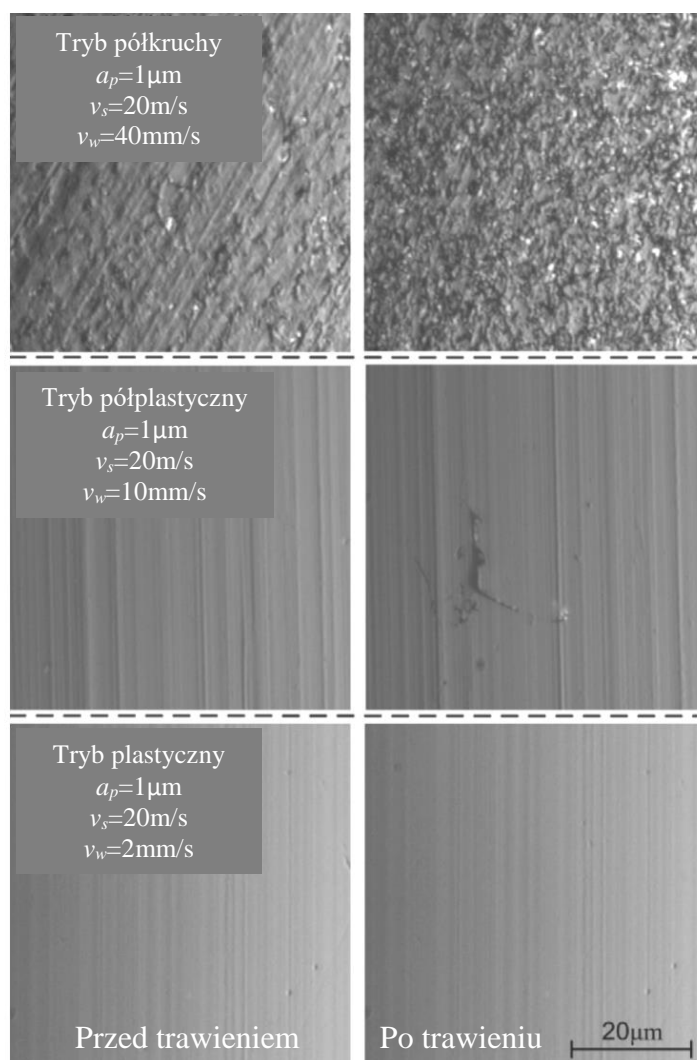


Prawidłowość dotycząca zmienności postaci odkształceń, została również potwierdzona w przypadku obwodowego szlifowania szkła optycznego BK7. Pomimo interakcji pomiędzy zbiorem ziaren jednocześnie uczestniczących w procesie mikroskrawania na obrabianej powierzchni można obserwować trzy charakterystyczne postaci odkształceń materiału obrabianego, w zależności od prędkości posuwu wzdłużnego przedmiotu. Od tego parametru zależy bowiem przekrój warstwy skrawanej i ciepło–mechaniczne obciążenie strefy skrawania, które wzrasta wraz ze wzrostem posuwu (rys. 2.12).



**Rys. 2.12.** Wpływ głębokości szlifowania szkła BK7 na postać odkształceń w strefie obróbki  
**Źródło:** [90]

Obecnie trwają dalsze prace dotyczące obróbki materiałów kruchych w postaci odkształcenia plastycznego, ponieważ jego charakter nie jest do końca poznany. Toczące się badania nad tym zjawiskiem o podłożu teoretycznym, czy praktycznym rzucają nowe światło na ten mechanizm (rys. 2.13) [128].



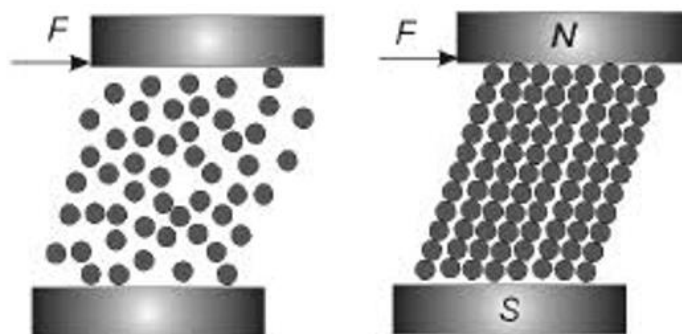
**Rys. 2.13.** Widok powierzchni szkła optycznego BK7 po szlifowaniu ze wzrastającą prędkością posuwu

**Źródło:** [90]

#### 2.4.3. Polerownie z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej (MRF)

Polerowanie magneto–reologiczne MRF (ang. Magneto–Rheological Finishing) jest metodą ultra precyzyjnej obróbki ścierniej, stosowaną przede wszystkim do wykończeniowej obróbki powierzchni optycznych. W metodzie tej stosuje się ciecze magneto–reologiczne stanowiące medium ściernie. Ciecze te są zawiesiną ściernych cząstek ferromagnetycznych o wielkości  $0,05 \div 10 \mu\text{m}$  w oleju. Stosowane są cząstki żelaza, stopów metali lub ceramiki, które mają właściwości ferromagnetyczne, tzn. możliwość polaryzacji pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego (rys. 2.14) [92].

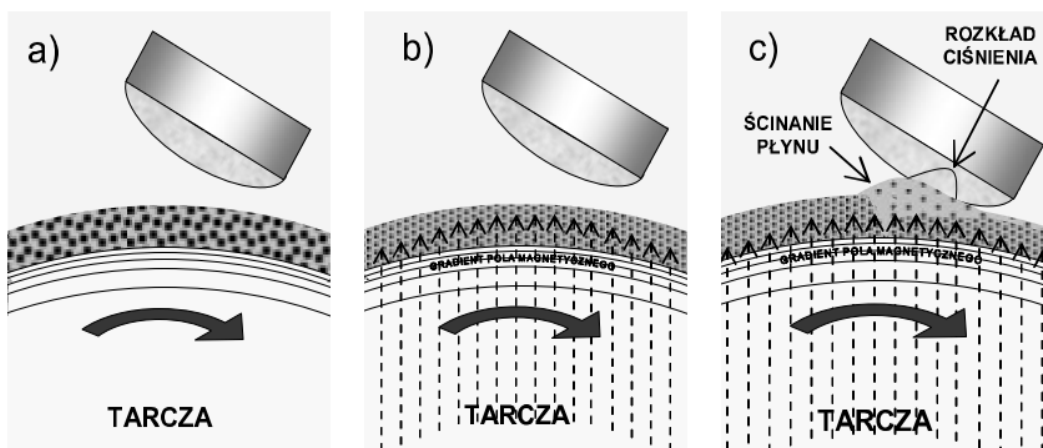




**Rys. 2.14.** Schemat zachowania się cząstek cieczy MR w układzie bez pola magnetycznego ( $B=0$ ) i z polem magnetycznym ( $B>0$ )

**Źródło:** [92]

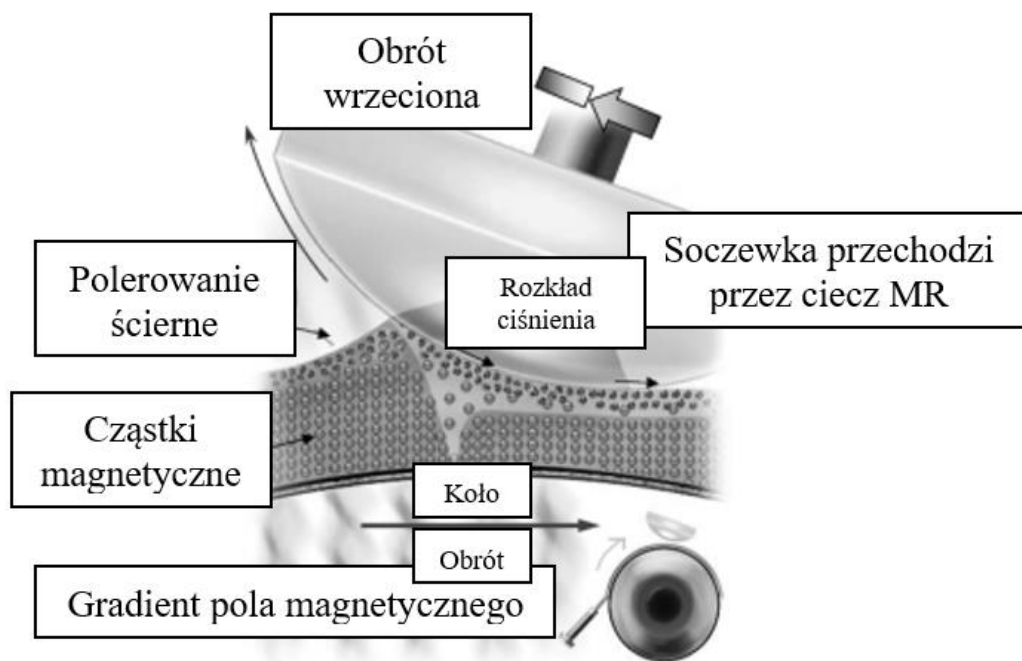
W procesie polerowania stosuje się medium obróbkowe składające się z cieczy bazowej (np. oleju), mikro- lub nanocząstek ferromagnetycznych będących drobinami żelaza, stanowiącymi materiał ścierny oraz dodatków redukujących sedimentację cząstek magnetycznych, np. kwas oleinowy, kwas cytrynowy, lecytynę sojową. Pod wpływem pola magnetycznego medium obróbkowe zmienia konsystencję ze stanu ciekłego do prawie stałego. Podczas kontaktu z powierzchnią obrabianą, następuje proces polerowania (rys. 2.15) [92].



**Rys. 2.15.** Wpływ pola magnetycznego na kształtowanie się cieczy MRF: a) przed włączeniem pola magnetycznego, b) po jego włączeniu, c) podczas kontaktu z obrabianą soczewką szklaną

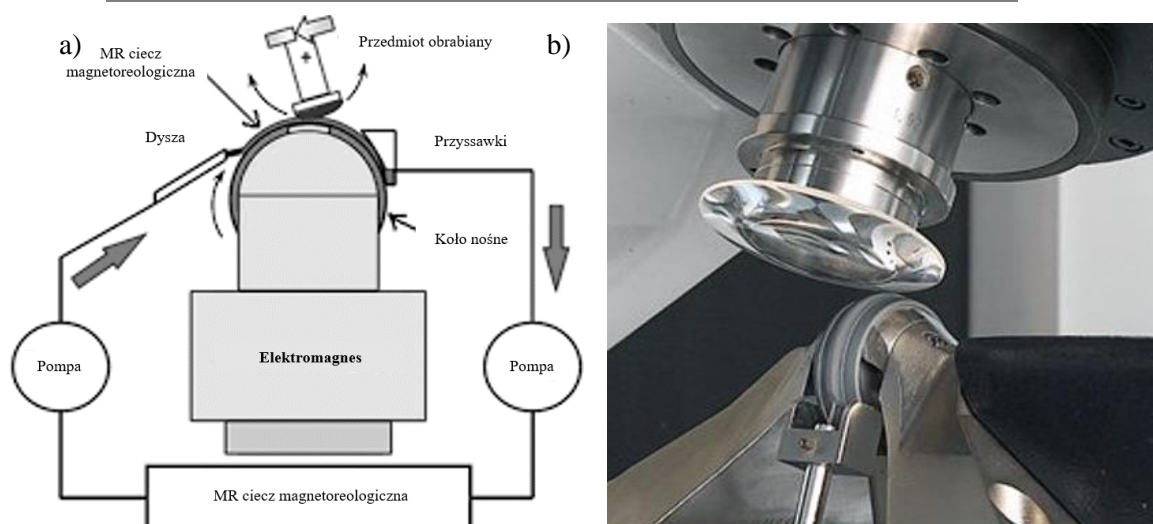
**Źródło:** [92]

Zmieniając własności cieczy MRF poprzez natężenie pola magnetycznego, regulując prędkość przesuwu podłoża oraz nacisk na obrabiany element, można uzyskać super gładkie powierzchnie. Metoda jest obecnie wciąż udoskonalana i stopniowo wypiera dotychczas stosowane metody (rys. 2.16) [92].



**Rys. 2.16.** Schemat strefy obróbki z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej  
**Źródło:** [92]

Urządzenia technologiczne do realizacji procesu polerowania szkieł optycznych z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznych, składają się ze zbiornika tej cieczy, pompy, elektromagnesu, tarczy obróbkowej oraz dyszy podającej i zasysającej. Na obracającą się tarczę prowadzącą podawana jest ciecz MRF. Strefa nanoszlifowania jest zlokalizowana w obszarze działania pola magnetycznego [34]. Przedmiot obrabiany, który stanowi np. soczewka szklana umocowana we wrzecionie obraca ze stałą prędkością, kontaktując się z usztywnioną strefą cieczy, co w wyniku kontaktu z cząstkami ściernymi powoduje usuwanie mikronierówności powierzchniowych, ukształtowanych w poprzedzającej operacji szlifierskiej z zastosowaniem narzędzi z ściernymi ziarnami diamentowymi (rys. 2.17) [92].



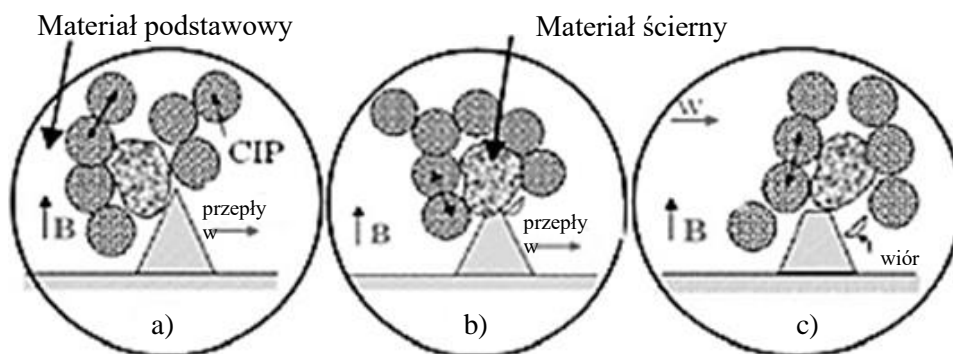
**Rys. 2.17.** Urządzenie do polerowania soczewek z zastosowaniem cieczy MRF: a) schemat budowy, b) widok strefy obróbki

**Źródło:** [92]

W tej metodzie następuje usuwanie mikronierówności powierzchni, podczas procesu obróbki siła magnetyczna pomiędzy ziarnami ściernymi wiąże je razem przy użyciu płynu magneto-reologicznego. Głowica polerska wykonuje ruch względem obrabianego przedmiotu, a cząstki ściernie usuwają mikrocząstki materiału z wierzchołków nierówności. W mechanizmie usuwania materiału można zasadniczo wyróżnić trzy podstawowe zjawiska (rys. 2.18) [92]:

- cząstka ścierna zintegrowana razem tworzy łańcuchy cząstek żelaza który nachodzi na wierzchołek nierówności,
- w wyniku ruchu stycznego, poruszające się zintegrowane wiązki żelaza i cząstki ściernie zaczynają oddzielać bardzo małe objętości materiału z wierzchołków nierówności powierzchni,
- w dalszej kolejności wiązka cząstek żelaza i ścierniwa oddziela wiórki o wymiarach nanometrycznych.

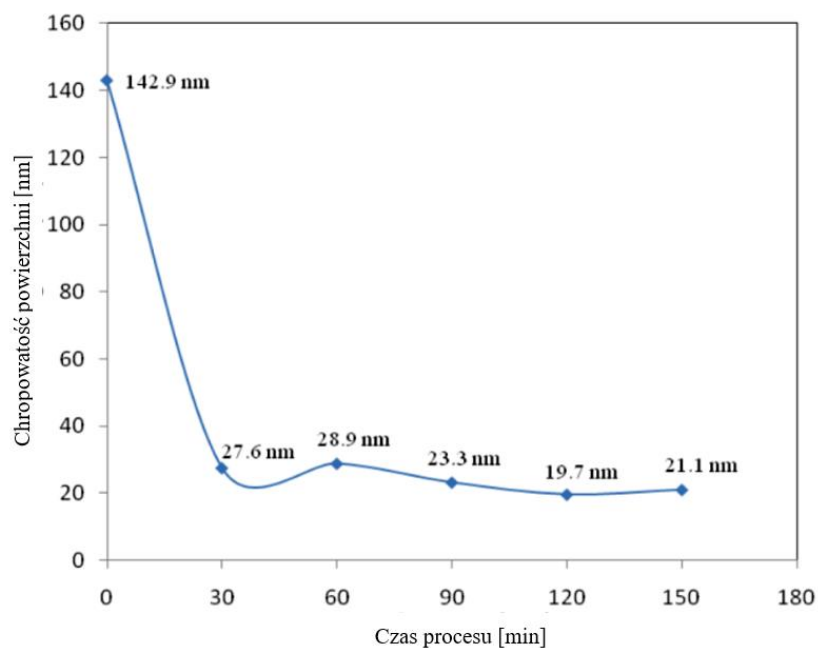
Ilość materiału usuniętego z powierzchni przedmiotu obrabianego zależy od siły wiązania magnetycznych cząstek ściernych ( $F_n$ ) generowanej przez pole magnetyczne i siły skrawania ( $F_t$ ) wynikającej z ruchu obrotowego narzędzia. Po tego typu mikroobróbce, powierzchnie charakteryzują się wysoką gładkością i jednorodnością, bez defektów będących skutkiem kruchego pęknięcia i wysokim poziomem izotropowości.



**Rys. 2.18.** Mechanizm usuwania nierówności powierzchni w procesie polerowania cieczą MRF: a) etap pierwszy, b) etap drugi, c) etap trzeci

**Źródło:** [92]

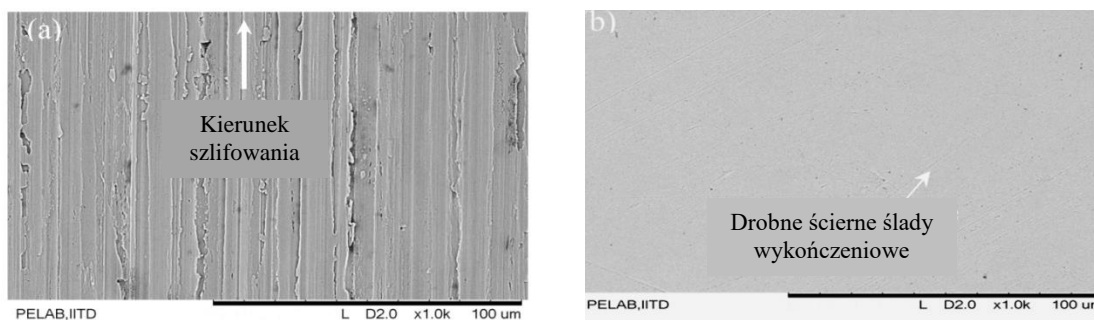
Badania eksperymentalne polerowania z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej szkła, potwierdzają znaczące zmniejszenie chropowatości z wartości wyjściowej po szlifowaniu  $R_a=142,9\text{nm}$  do  $R_a=19,7\text{nm}$  w czasie trwania procesu polerowania przy wykorzystaniu cieczy magneto–reologicznej  $t=120\text{ min}$  (rys. 2.19) [92].



**Rys. 2.19.** Zmiany chropowatości powierzchni szkła w funkcji czasu polerowania cieczą magneto–reologiczną

**Źródło:** [92]

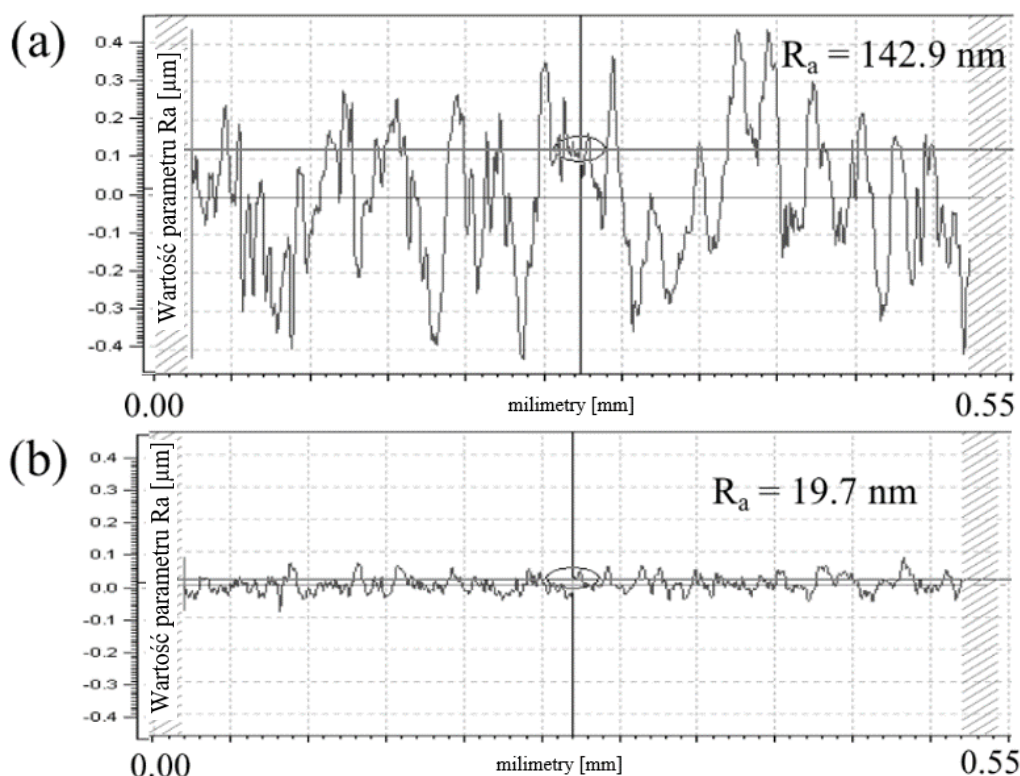
W wyniku postępującego procesu wygładzania, na obrabianej powierzchni stopniowo zanikają ślady obróbkowe z poprzedniej operacji, wzrasta jej izotropowość i niemal w całości takie powierzchnie stają się przezroczyste (rys. 2.20).



**Rys. 2.20.** Powierzchnia szkła optycznego: a) po szlifowaniu, b) po wygładzaniu ciecżą magneto-reologiczną

**Źródło:** [92]

Następują znaczące zmiany profilu w kierunku wysokościowym i horyzontalnym. Następuje obniżenie wysokości profilu powierzchni, jego wygładzenie i ujednocnienie strukturalne (rys. 2.21).



**Rys. 2.21.** Zmiany chropowatości powierzchni szkła w funkcji czasu polerowania ciecżą magneto-reologiczną: a) profil powierzchni wyjściowej, b) profil powierzchni po wygładzaniu ciecżą MRF

**Źródło:** [92]

## 2.5. ULTRA PRECYZYJNE SYSTEMY OBRÓBKOWE

### MATERIAŁÓW KRUCHYCH

W ostatnich latach osiągnięto bardzo wysoki postęp w wielu dziedzinach techniki, ale należy tu wyróżnić szczególnie inżynierię materiałową. Dużą rolę odgrywa tu rozwój materiałów inteligentnych oraz elektroaktywnych, do których zalicza się [70]:

- materiały piezoelektryczne,
- ceramiki elektrostrykcyjne,
- stopy magnetystrykcyjne,
- stopy z pamięcią kształtu.

W roku 1880 Jakub oraz Piotr Curie odkryli zjawisko piezoelektryczne [64,98,65]. Odkrycie to mówi o tym, iż na powierzchni określonych kryształów które zostaną poddane działaniu naprężeń mechanicznych zewnętrznego pochodzenia, będą indukowały się ładunki elektryczne, a ich wartości będą wprost proporcjonalne do wartości naprężeń na nich działających [65,66,67]. Stąd pochodzi, również nazwa tego zjawiska, ponieważ z greckiego słowo piezo oznacza ciśnienie. Niedługo po tym inny badacz o nazwisku Lippman domniemywał w roku 1881, że istnieje zjawisko odwrotne, do zjawiska opisywanego przez braci Curie, nazwano je prostym. Zjawisko to polegało na deformacji kryształów piezoelektrycznych znajdujących się w zewnętrznym polu elektrycznym. Bracia Curie udowodnili na drodze eksperymentu o słuszności rozważań Lippmana. Bardzo duże znaczenie w rozwoju badań nad zjawiskiem piezoelektryczności miały otrzymane wyniki mówiące o tym, że współczynniki piezoelektryczne, które służą do określenia że indukowana w określonym kryształce polaryzacja elektryczna jest zależna od wartości naprężeń mechanicznych pochodzących z zewnątrz w prostym zjawisku piezoelektrycznym będzie równa co do wartości współczynnikom które w zjawisku odwrotnym określają zależność deformacji danego kryształu od wartości zewnętrznego natężenia pola elektrycznego. Wybuch II wojny światowej przyczynił się do wzmożonych badań prowadzących do udoskonalenia materiałów pojemnościowych. Spowodowało to odkrycie niezawodnych materiałów ceramicznych. Dzięki dość prostej technologii, jak również niewysokim kosztom produkcji, podjęto próby wykorzystania ceramiek piezoelektrycznych w masowej skali. Dodatkowo pojawiły się też pewne ograniczenia w zastosowaniu tego materiału [65]:



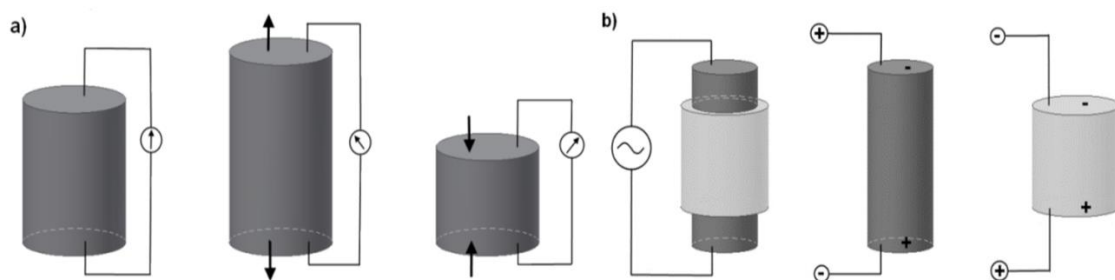
- trudności otrzymywania ceramiek charakteryzujących się powtarzalnymi parametrami,
- trudności w utrzymywaniu stabilności parametrów podczas pracy (efekt starzenia),
- efekty nieliniowości,
- wysokie wartości współczynnika temperatury,
- duże tłumienie fal ultradźwiękowych.

Materiały charakterystyczne dla początkowych zastosowań w dziedzinie piezoelektryczności takie jak kwarc, turmalin czy sól Rochelle, posiadały bardzo przeciętne właściwości piezoelektryczne. W momencie zaistnienia konieczności zastosowań materiałów o dużo większych właściwościach udało się odkryć polikrystaliczne materiały ceramiczne, do których można zaliczyć tytanian baru oraz cyrkonian–tytanian ołowiu (skrót ang. PZT). W chwili obecnej w technice ceramika PZT jest najpowszechniej stosowanym materiałem elektroaktywnym w budowie siłowników piezoelektrycznych używanych w serwonapędach nowej generacji [70,71,72].

Natomiast nieustanny rozwój branży przemysłowej umożliwia coraz szersze zastosowanie ceramiek piezoelektrycznych, a nowoczesne technologie umożliwiają ich miniaturyzację oraz poprawę właściwości. Obecnie materiały te znajdują zastosowanie w badaniach w dziedzinie fizyki, chemii, biologii oraz co za tym idzie są wykorzystywane do budowy dużej grupy ultra precyzyjnych urządzeń technicznych [65].

Proste zjawisko piezoelektryczne mówi, że w momencie zadziałania mechanicznych naprężeń na powierzchni kryształu dochodzi do indukcji ładunków elektrycznych. Natomiast odwrotne zjawisko piezoelektryczne głosi, iż podczas wpływu pola elektrycznego w płytce piezoelektrycznej dochodzi do powstania naprężeń oraz odkształceń mechanicznych (rys. 2.22). Kierunek powstałych naprężeń mechanicznych jest zależny od kierunku działającego pola elektrycznego natomiast odkształcenia mechaniczne przyjmują wartości proporcjonalne do natężeń pola elektrycznego. Dodatkowo powstające drgania mechaniczne płytki piezoelektrycznej przyjmują identyczną częstotliwość jak przyłożone do niej napięcie zmienne [70,73,74,75].





**Rys. 2.22.** Zobrazowanie a) efekt piezoelektryczny, odwrotny efekt piezoelektryczny  
**Źródło:** [93]

Zjawisko piezoelektryczne jest najczęściej opisywane przy zastosowaniu równania konstytutywnego (6 i 7), odzwierciedlającego sprzężenie zarówno oddziaływań mechanicznych jak również elektrycznych [70,76]:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kkl} + d_{kij} E_k \quad (6)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (7)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$T$  – tensor naprężenia [ $N/m^2$ ],

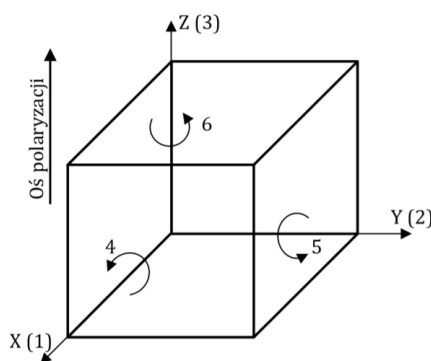
$S$  – tensor odkształcenia [m],

$E$  – wektor pola elektrycznego [V/m]

$D$  – wektor indukcji elektrycznej [ $C/m^2$ ]

$d$  – stała piezoelektryczna [m/V lub C/N].

Ceramika piezoelektryczna charakteryzująca się anizotropowością powoduje, iż właściwości PZT będą uzależnione od kierunków elektrycznych oraz mechanicznych właściwości (rys. 2.23).



**Rys. 2.23.** Prostokątny układ współrzędnych który przedstawia tryby pracy materiału piezoelektrycznego  
**Źródło:** [80, 93]

W przypadku stałych które charakteryzują odwrotne zjawisko piezoelektryczne będą złożone z dwóch indeksów. Indeks pierwszy opisuje przyczynę odkształceń, czyli wielkość elektryczną. Drugi indeks opisuje skutek, a więc wielkość mechaniczną. Przy wykorzystaniu owych indeksów można opisać tryby pracy dotyczące piezoelektrycznego materiału do których zaliczamy odkształcenia [70,77,78]:

- podłużne,
- poprzeczne,
- wyginające,
- ścinające.

Rodzaj odkształcenia z jakim mamy do czynienia będzie zależał w dużej mierze od kształtu, czy orientacji opisywanego ciała pod względem osi kryształów piezoelektrycznych, jak również lokalizacji elektrod [70,77,78].

Wszelkie zależności przetwornika którego zadaniem jest konwersja energii będzie cechował współczynnik sprzężenia ( $k$ ) [70,79]. Jego rola polega na charakterystyce jakości konwersji elektromechanicznej która zachodzi w materiale piezoelektrycznym, a należy przez to rozumieć możliwość przekształcenia energii elektrycznej w energię mechaniczną, proces ten wyraża wzór (8)[70]:

$$k = \sqrt{\frac{W_{EM}^2}{W_E * W_M}} \quad (8)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$k$  – współczynnik sprzężenia,

$W_M$  – energia mechaniczna,

$W_E$  – energia elektryczna,

$W_{EM}$  – energia elektromechaniczna.

Badania wskazują, że do grona piezoelektryków należy zaliczyć wybrane materiały krystaliczne, polimerowe oraz ceramiczne. W celu charakteryzacji materiałów krystalicznych, takich jak kryształ piezoelektryczny, należy wspomnieć, że w tym przypadku mamy do czynienia, z układami w których nie występuje środek symetrii. W przypadku materiałów organicznych również możemy się spotkać z efektem piezoelektrycznym, jest on potwierdzony badaniami w przypadku niektórych gatunków drewna, jedwabiu, a nawet ścięgnach niektórych zwierząt. Niestety efekt piezoelektryczny

występujący w określonych materiałach organicznych jest dość słaby, w porównaniu do wybranych tworzyw sztucznych, na przykład syntetycznych polimerów, z których tworzone są cienkie folie produkowane jako prasowane elementy wykorzystywane do budowy stosów piezoelektrycznych. Natomiast końcowy efekt piezoelektryczny syntetycznych polimerów może ulec wzrostowi przez wykonanie dodatkowych operacji, do których można zaliczyć wyciąganie folii w wysokiej temperaturze oraz przy zastosowaniu wysokiego pola elektrycznego. Można również wzbogacać tworzywo sztuczne przez dodanie domieszki ceramiki piezoelektrycznej. Na chwilę obecną najbardziej rozpowszechnionym materiałem piezoelektrycznym stosowanym w technice, jest ceramika piezoelektryczna. Zawdzięcza to swoim właściwościom związanym z silnym efektem piezoelektrycznym oraz dużą wartością charakteryzującą stałą dielektryczną w niektórych rodzajach ceramiki. Dodatkowo ceramika piezoelektryczna jest otrzymywana w łatwej i nieskomplikowanej technologii, dlatego jest chętnie stosowana w masowej produkcji. Elementy piezoelektryczne są obecnie coraz częściej stosowane w wszelkich dziedzinach nauki oraz techniki, takich jak [68]:

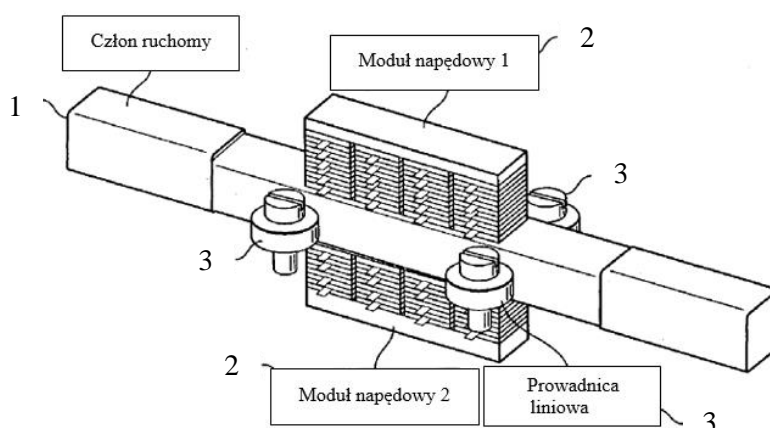
- zespoły elektroniczne (filtry, rezonatory),
- transformatory piezoelektryczne,
- wagi o dużej precyzji,
- elementy sterujące pomiarem w mikroskopach STM oraz AFM.

Stosy (siłowniki) piezoelektryczne (rys. 2.24) są to elementy napędowe elektryczno–mechaniczne, konstruowane na bazie półprzewodnikowej (piezoceramiczne, czy PZT – tytanian cyrkonianu ołowiu). Zespoły te charakteryzują się nieskończenie dużą względną czułością pozycjonowania oraz dużą sprężystością i rozwojem mocy. Ich podstawową zaletą jest najwyższa dynamika uruchamiania do czasu reakcji liczona w zakresie mikrosekund. Przy zastosowaniu siłowników piezoelektrycznych jesteśmy w stanie osiągać obecnie najwyższe wydajności mechatronice, na potrzeby wielu dziedzin innowacji przemysłowych takich jak na przykład nanopozycjonowanie [69].



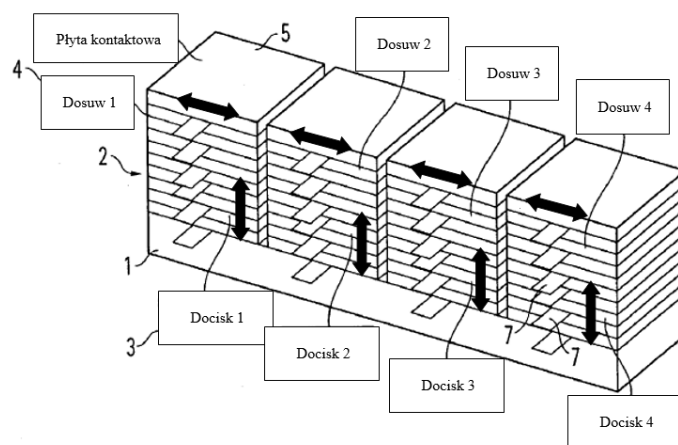
**Rys. 2.24.** Przykładowe siłowniki piezoelektryczne  
**Źródło:** [88]

Prowadzona analiza literaturowa wskazuje istnienie określonych rozwiązań wykorzystujących w swojej konstrukcji zasadę działania elementów piezoelektrycznych. Jednym z przykładów może być konstrukcja piezoelektrycznego napędu liniowego będąca elementem urządzenia z precyzyjnym dosuwem oraz modułami napędowymi które wykorzystują materiały i zjawisko piezoelektryczne. Wynalazek ten został opatentowany, a jego celem była realizacja liniowego napędu przy zastosowaniu piezoelektrycznych elementów wykonawczych, aby możliwy był ruch liniowy członu znajdującego się we wnętrzu urządzenia, przy założeniu ruchu o małym zakresie, w krótkim czasie, ale z zachowaniem dużej dokładności i zarazem utrzymując sztywność całej konstrukcji. W skład opatentowanego rozwiązania wchodzi dwa moduły napędowe, pręt kwadratowy pełniący rolę członu ruchomego i łożyska których rolę pełni zespół prowadnic liniowych jako miejsce ruchu członu (rys. 2.25) [93,94].



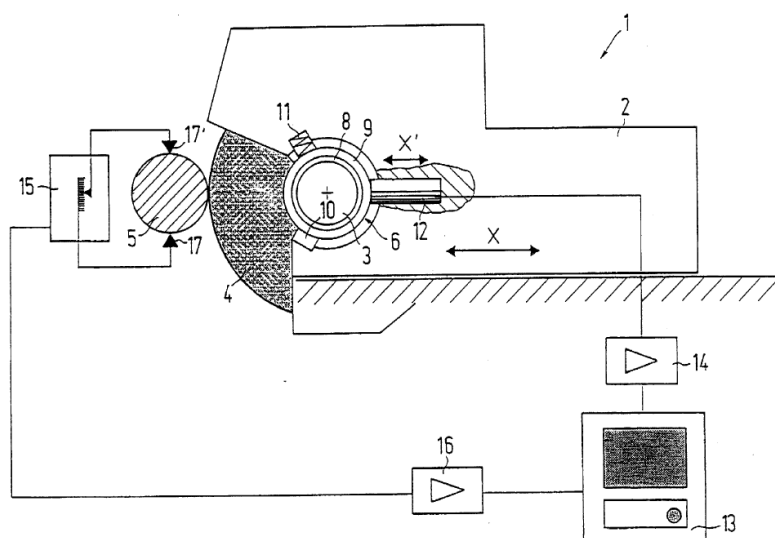
**Rys. 2.25.** Liniowy napęd z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – człon ruchomy napędu; 2 – moduły napędowe; 3 – prowadnice liniowe członu ruchomego  
**Źródło:** [93,94]

Każdy z dwóch zastosowanych w omawianym rozwiązaniu modułów napędowych w swojej budowie zawiera cztery grupy stosów piezoelektrycznych, które są ułożone równoległe względem siebie w hybrydowy sposób. Pod pojęciem hybrydowego ułożenia należy rozumieć zgrupowanie zastosowanych elementów piezoelektrycznych pod względem rodzaju ruchu. Każda z określonych grup elementów piezoelektrycznych wykonuje następujące rodzaje ruchu: dociskowy prostopadły (3) oraz dosuwowy (4) względem członu ruchomego. Aby umożliwić pobudzenie lub zmianę wymiarową elementów piezoelektrycznych są one podłączone do źródła prądu (rys. 2.26) [93,94].



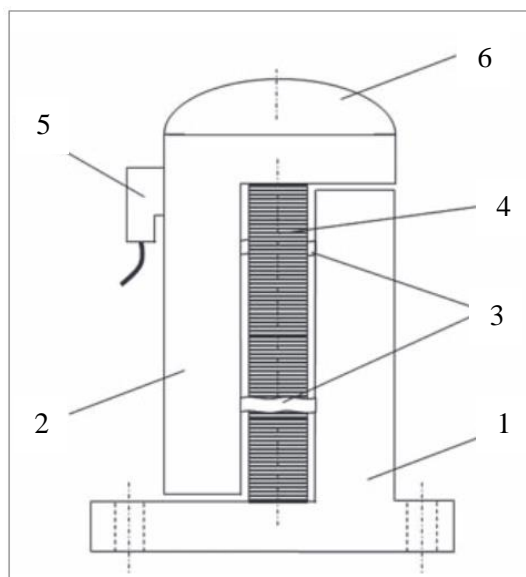
**Rys. 2.26.** Schemat modułu napędowego urządzenia składającego się ze stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – podstawa modułu; 2 – pojedyncza grupa stosów piezoelektrycznych; 3 – stosy dociskające; 4 – stosy dosuwowe; 5 – płyta kontaktowa; 7 – styki elektryczne  
**Źródło:** [93,94]

Innym przykładem wykorzystującym zjawisko piezoelektryczne, tym razem w procesie szlifowania jest opatentowany wynalazek opisujący układ maszyny szlifującej w której wał szlifujący jest osadzony w korpusie i razem układ ten realizuje ruch dosuwowy w kierunku obrabianego elementu z kompensacją położenia. Rozwiązanie to jest dedykowane dla szlifierek przeznaczonych do obróbki obwodowej elementów cylindrycznych realizujących ruch obrotowych na kłach szlifierskich, w przypadkach gdy występują określone niedokładności podczas szlifowania (rys. 2.27). Zastosowany system kompensacyjny zbudowany został ze stosów piezoelektrycznych oraz systemu sterowania, jego celem jest zredukowanie niewłaściwego pozycjonowania wałka szlifującego względem elementu obrabianego [93,95].



**Rys. 2.27.** Budowa maszyny szlifierskiej wzbogacona o sterowanie z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – szlifierka; 2 – korpus szlifierki; 3 – wał szlifierski; 4 – ściernica; 5 – przedmiot obrabiany; 6 – łożysko pozycjonujące wał; 8 – wewnętrzna część łożyska; 9 – zewnętrzna część łożyska; 10 – element podporowy wału; 11 – sprężyna dociskowa; 12 – aktuator piezoelektryczny; 13 – źródło zasilania; 14 – wzmacniacz; 15 – system pomiarowy; 16 – wzmacniacz sygnału pomiarowego; 17, 17' – czujniki pomiarowe  
**Źródło:** [93,95]

Kilka lat temu zaproponowano rozwiązanie patentowe konstrukcji przeznaczonej do realizacji systemu pozycjonowania. Urządzenie to umożliwia precyzyjny dosuw podczas ultra precyzyjnej obróbki. Wyposażone jest w elementy diagnostyczne które monitorują realizację kontaktu elastycznego narzędzia ściernego wraz z obrabianym elementem. Na stole obróbkowym maszyny należy zamontować korpus który jest elementem nośnym (1). Do korpusu (1) jest zamontowana od wewnętrznej strony belka (2) przy użyciu elementów sprężystych (3). Belka (2) jest elementem popychającym i podpierającym głowicę pomiarową (6) która jest wymienna, a w jej skład wchodzi czujnik emisji akustycznej (AE) (5). Belka (2) od strony wewnętrznej jest podparta stosem piezoelektrycznym (4) który jest przymocowany do belki nośnej (1). Zadanie stosu piezoelektrycznego polega na wywieraniu przemieszczenia wewnętrznej belki (2) na belkę nośną (1) (rys. 2.28) [96,97].



**Rys. 2.28.** Urządzenie przeznaczone do precyzyjnego pomiaru narzędzi elastycznych. Zasada działania polega na wykorzystaniu odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego. Budowa: 1 – belka nośna, 2 – belka wewnętrzna, 3 – elementy sprężyste, 4 – stos piezoelektryczny, 5 – czujnik emisji akustycznej, 6 – wymienna głowica pomiarowa

**Źródło:** [96,97]

Działanie tego precyzyjnego systemu dosuwu jest realizowane poprzez jednoosiowy ruch dosuwowy głowicy pomiarowej polegający na kontakcie z narzędziem ściernym w sprężeniu z głowicą czujnika emisji akustycznej (AE). Ruch dosuwowy jest możliwy do realizacji dzięki zastosowaniu siłownika piezoelektrycznego w kierunku pracującego narzędzia (możliwość ruchy wzdłużnego lub poprzecznego względem stołu roboczego). Zastosowanie stosu piezoelektrycznego umożliwia wydłużenie rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów z rozdzielczością nanometryczną. Wzbogacenie konstrukcji o czujnik emisji akustycznej (AE), powoduje że po zainicjowaniu kontaktu głowicy pomiarowej z powierzchnią czynną narzędzia ściernego, a dokładniej jednego z najbardziej wysuniętych ziaren na powierzchni ściernicy pojawi się sygnał w postaci fali sprężystej. Analizując charakterystykę siłownika piezoelektrycznego (napięcie do wydłużenia) jest możliwość określenia wartości wydłużenia stosu, a co za tym idzie podanie intensywności z jaką przebiega kontakt ziarna ściernego w funkcji elastycznego ugięcia ściernicy [96,97].



## 2.6. MONITOROWANIE WARUNKÓW W STREFIE MIKRO- I NANOBRÓBKII PRZY WYKORZYSTANIU ZJAWISKA EMISJI AKUSTYCZNEJ

Wykonując proces skrawania, obrabiany materiał kruchy (np. szkło) jest narażony zarówno na odkształcenia plastyczne oraz kruche pękanie podczas styku obrabianego elementu z narzędziem skrawającym, w przypadku opisywanych badań narzędziem jest pojedyncze diamentowe ziarno ściernie. W tym obszarze mamy do czynienia ze strefą zgniotu spowodowanego przez ruchy dyslokacyjne, przez co uwalniania zostaje energia, a wiązania występujące w materiale obrabianym zostają naruszone. W konsekwencji tego procesu uwalniana energia jest określana w formie sygnału emisji akustycznej. Dodatkowymi źródłami sygnału emisji akustycznej będą [60,61]:

- przemiany fazowe zachodzące w materiale obrabianym,
- tarcie występujące w momencie styku narzędzia skrawającego, a przedmiotem obrabianym,
- inicjacja oraz rozprzestrzenianie się wszelkiego rodzaju pęknięć.

Zjawisko emisji akustycznej jest ściśle powiązane z wszelkimi rodzajami zjawisk występującymi w obróbce skrawaniem [62]. Można wyróżnić kilka stref obróbki skrawaniem w których ulega zmianie zjawisko emisji akustycznej [60]:

- I strefa – przestrzeń ta znajduje się jeszcze przed narzędziem skrawającym, w tym momencie ma miejsce inicjacja procesu przez delikatne muskanie diamentowego ziarna ściernego, materiału kruchego w postaci płytki szklanej,
- II strefa – w chwili powstawania odkształceń plastycznych na styku ziarna skrawającego,
- III strefa – dotyczy powstawania odkształceń w fazie kruchego pęknięcia wraz z oddzielaniem się materiału w formie mikrowiórów.

W przypadku prowadzenia rejestracji procesów skrawania o charakterze nieciągłym pracy narzędzia, sygnał emisji akustycznej może być wzbogacony o dodatkowe hałasy [60]:

- fala uderzeniowa powstająca w momencie wejścia ziarna skrawającego w materiał obrabiany,
- nagłe przerwanie procesu w momencie wyjścia ziarna ściernego z materiału obrabianego powodujące nagły spadek obciążenia.

Na wartości w przypadku tych dwóch składowych procesu ma znaczący wpływ prędkość ziarna skrawającego oraz szybkość usuwanego materiału co bezpośrednio rzutuje na wartości sygnału emisji akustycznej. W przypadku analizowania sygnałów emisji akustycznej możemy wyróżnić jego dwa typy [60]:

- ciągły – charakteryzujący się tak bogatym spektrum dźwięków z obszaru obróbki, że ich rozróżnienie jest bardzo trudne,
- wybuchowy – charakteryzuje się zbiorem dźwięków o odmiennym natężeniu, łatwych do wyodrębnienia i klasyfikacji poszczególnych zdarzeń w sygnale emisji akustycznej.

Miejsce zamocowania czujnika emisji akustycznej jest niezwykle ważne, ponieważ powinien on znajdować się jak najbliżej miejsca gdzie generowany jest sygnał [62] który występuje podczas trwania obróbki skrawaniem, wówczas stosunek generowanego sygnału, do występujących zakłóceń wypada najkorzystniej [63]. Gdy proces jest przeprowadzany na obrabiarce najlepszym miejscem będzie strefa skrawania. Celem detekcji generowanego sygnału emisji akustycznej można stosować różne typy czujników, gdzie można się spotkać z wieloma typami mechanizmów przetwarzania. W praktyce przemysłowej wykorzystuje się przetworniki [62]:

- piezoelektryczne,
- pojemnościowe,
- przemieszczeń,
- interferometry laserowe.

Wyniki dotychczas prowadzonych badań wskazują jednoznacznie, że technika wykrywania emisji akustycznej może być stosowana jako skuteczna metoda do monitorowania procesu ultra precyzyjnego skrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym oraz szlifowania ściernicami diamentowymi, celem identyfikacji różnych faz przebiegu procesu (stanu ziarna ściernego, procesu, wartości zagłębienia). Stosowanie metod monitorowania oraz wykrywania procesu obróbki w czasie rzeczywistym, umożliwia kontrolę wymaganego stanu procesu, a przez to odpowiedniej jakości elementu obrabianego [81,82].

Proces ultra precyzyjnej obróbki na szkle jest prowadzony z bardzo małą szybkością, a uzyskiwane wióry są na poziomie nanometrów w celu osiągnięcia powierzchni obrabianej wolnej od wszelkich uszkodzeń. W przypadku monitorowania procesów precyzyjnej

obróbki materiałów kruchych rejestrowane sygnały zużycia narzędzia, energia procesu, wibracje oraz powstające siły wykazują bardzo niską czułość, a powstały sygnał, czyli szum obróbczy jest bardzo subtelny dla małych głębokości skrawania, spowodowane jest to niewielkimi siłami generowanymi w procesie skrawania. Z tego względu monitorowanie procesu mikro- i nanoskrawania jest dość dużym wyzwaniem przy wykorzystywaniu niektórych czujników, które znajdują zastosowanie w obróbkach konwencjonalnych. Natomiast okazuje się, iż sygnał emisji akustycznej (AE) charakteryzuje się odpowiednią czułością z powodzeniem znajduje zastosowanie do monitorowania procesu precyzyjnego skrawania, czy szlifowania, a jego dużą zaletą jest możliwość monitorowania zdarzeń realizowanych z dużą szybkością [81,83,84,85].

Fale sygnału emisji akustycznej (AE) rozprzestrzeniają się z częstotliwościami rzędu od 100kHz do 1MHz, a więc dużo powyżej częstotliwości naturalnych, z czego wynika, iż wibracje maszyny nie powinny mieć negatywnego wpływu na wartości pomiaru sygnału emisji akustycznej [81,84].

Dzięki tym cechom emisja akustyczna jest powszechnie uważana za doskonałą metodę stosowania celem prowadzenia charakterystyki dla wszelkich czynności związanych z usuwaniem materiału kruchego w ultra precyzyjnym skrawaniu lub szlifowaniu. Dodatkowo dostarcza informacji zarówno o stanie narzędzia oraz jakości uzyskanej powierzchni [81].

## **2.7. WNIOSKI Z ANALIZY LITERATURY**

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w zakresie precyzyjne obróbki materiałów kruchych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów szklanych, umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

1. Obróbka materiałów kruchych należy do obróbki trudnej ze względu na ich podatność na mechanizm kruchego pęknięcia, zachodzący w wyniku oddziaływań cieplno-mechanicznych obciążeń w strefie obróbki.
2. Mechanizm kruchego pęknięcia w materiałach kruchych charakteryzuje się łatwą propagacją pęknięć, ukierunkowaną w głąb materiału, nawet niewielka głębokość wnikania ziarna ściernego może spowodować zwielokrotnienie efektu propagacji

kruchego pęknięcia, nawet w stosunku 1:100 ( $1\mu\text{m}$  – zagłębienia, to nawet  $100\mu\text{m}$  propagacji).

3. Dla materiałów kruchych następuje krótki czas narastania naprężeń sprężystych, szybko następuje przejście do następnej fazy zniszczenia, przez propagację kruchego pęknięcia. Przybierają one postać łupliwych wykruszeń oraz eliptycznych, stosunkowo płytkich defragmentacji struktury przy powierzchni obrabianego materiału. Powierzchnia po obróbce ubytkowej charakteryzuje się znaczą liczbą pęknięć, kraterów (eliptyczne wykruszenia).
4. Analiza stanu wiedzy w zakresie obróbki materiałów kruchych wskazuje, że możliwe jest zagłębienie ziarnem ściernych w materiale obrabianym poniżej wartości naprężeń umożliwiających propagację kruchego pęknięcia. Dzięki temu, można uzyskać oddzielenie niewielkiej ilości materiału kruchego w sposób przypominający plastyczne (ciągliwe) usuwanie materiału charakterystyczne dla materiałów o dużej ciągliwości.
5. Doprowadzenie do zainicjowania mechanizmu plastycznego płynięcia w strefie skrawania, pozwala uzyskać strukturę po obróbce wolną od eliptycznych wykruszeń oraz głębokich defektów w postaci pęknięć promieniowych względem głównej siły składowej oddziałującej na materiał obrabiany poprzez pracę ziarna ściernego na skutek jego przejścia względem materiału.
6. Prowadzenie obróbki z głębokością wnikania ziaren poniżej wartości progu kruchego pęknięcia, sprzyja redukcji defektów zarówno na powierzchni, jak i w warstwie wierzchniej obrabianego materiału. Realizacja mikroobróbki materiałów szklanych z zapewnieniem tego warunku, może prowadzić do otrzymania wysokich właściwości użytkowych materiałów szklanych, ze względu na redukcje defektów na powierzchni i w warstwie przypowierzchniowej, co sprzyja zmniejszeniu rozproszeniu i lepszemu przenikaniu światła przez strukturę materiałową.
7. Istotne kierunki badań poznawczych i rozwojowych, w zakresie precyzyjnej obróbki ścierniej materiałów szklanych, powinny być ukierunkowane na:
  - wyznaczenie zakresu głębokości mikroskrawania określonych gatunków materiałów szklanych, zapewniających ich obróbkę w warunkach odkształceń plastycznych, co umożliwi opracowanie wytycznych do realizacji tego procesu z zagłębieniami

ziaren poniżej progu kruchego pęknięcia, celem zredukowania eliptycznych i promieniowych pęknięć,

- opracowanie sposobu prowadzenia procesu technologicznego obróbki materiałów szklanych w taki sposób, aby kontrolować mechanizmy pęknięcia i plastycznego płynięcia w strefie obróbki w procesie szlifowania ściernicami z ziarnami diamentowymi, aby w konsekwencji przygotować powierzchnie szklane w taki sposób, aby możliwe było zastosowanie ich efektywnej obróbki wykańczającej, z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznych w polu magnetycznym.
- poszerzenie zakresu wiedzy, dotyczącej możliwości prowadzenia wysoce precyzyjnej sekwencyjnej obróbki gładkościowej materiałów szklanych.

## 3. CELE, PROBLEM BADAWCZY, HIPOTEZA

### I ZAKRES PRACY

#### 3.1. CELE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury z zakresu mikro- i nanoobróbki materiałów kruchych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów szklanych wynika, że istotnym warunkiem jej stosowania jest realizacja procesu w warunkach plastycznego odkształcania materiału w strefie skrawania. Jest to podstawowym warunkiem uzyskiwania powierzchni o dużej gładkości i wolnej od śladów kruchego pęknięcia. W celu zapewnienia tego warunku, konieczne jest zagłębianie ziaren ściernych poniżej krytycznego progu kruchego pęknięcia materiału w procesie skrawania.

Na podstawie powyższego, w niniejszej pracy wytyczono trzy główne cele o charakterze poznawczym i użytkowym oraz wdrożeniowym, mające następujące brzmienie:

#### *Cel poznawczy*

1. Badania mechanizmu usuwania materiału szklanego w procesie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym oraz określenie (identyfikacja) warunków w strefie skrawania sprzyjających mechanizmowi plastycznego płynięcia i mechanizmowi kruchego pęknięcia materiału w strefie obróbki.

#### *Cel użytkowy*

1. Określenie granicznej głębokości dosuwu przy której możliwe jest osiągnięcie dla przyjętej kinematyki skrawania efektu plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Na tej podstawie wskazanie przedziału głębokości skrawania, umożliwiającego realizację obróbki w warunkach nie rozprzestrzeniania się pęknięć środkowych i rozległych defektów promieniowych, których ograniczenie umożliwi osiągnięcie odpowiedniej charakterystyki mikrostruktury powierzchni materiału szklanego. Dodatkowo badanie w procesie szlifowania czołowego ściernicami z diamentu syntetycznego, umożliwi wskazanie korelacji między skrawaniem pojedynczym ziarnem diamentowym, a spojonym narzędziem ściernym w kierunku odkształceń i przemieszczeń materiału w strefie obróbki oraz identyfikacji zmian mechanizmu plastyczny/kruchy.

2. Sprawdzenie, w jaki sposób powierzchnia po szlifowaniu będzie podatna na super dokładną obróbkę przy zastosowaniu cieczy magneto–reologicznej pracującą w polu elektromagnetycznym w funkcji czasu.

### *Cel aplikacyjny (wdrożeniowy)*

1. Propozycja projektu procesu technologicznego, składającego się z trzy etapowej sekwencyjnej ultra dokładnej obróbki materiałów szklanych.

## **3.2. PROBLEMY BADAWCZE**

Po przeprowadzeniu pełnej analizy rozważanej tematyki sformułowano następujące problemy badawcze:

1. W jakim stopniu pojedyncze ziarno ściernie zagłębiając się w strukturę materiału szklanego w kinematyce czołowego mikro– i nanoskrawania umożliwi identyfikację zmian mechanizmu usuwania materiału szklanego w strefie obróbki z plastycznego na kruchy.
2. Czy zastosowanie długiego odcinka kontaktu ziarna ściernego z materiałem szklanym obrabianym w procesie czołowego mikro– i nanoskrawania w połączeniu z imadłem kątowym warunkującym niewielkie pochylenie próbki, umożliwi identyfikację zmian mechanizmu usuwania materiału szklanego w strefie obróbki z plastycznego na kruchy oraz określenie (identyfikacja) korzystnych warunków w strefie skrawania sprzyjających plastycznemu płynięciu materiału.
3. Czy analizy przemieszczania materiału szklanego w strefie mikro– i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym umożliwią wyznaczenie granicznej głębokości skrawania przy której możliwe jest osiągnięcie dla przyjętej kinematyki, efektu plastycznego płynięcia badanego materiału obrabianego, co umożliwi na tej podstawie badanie przedziału wartości głębokości skrawania, pozwalających realizować obróbkę w warunkach nie rozprzestrzeniania się pęknięć środkowych i rozległych promieniowych, których ograniczenie, będzie pożądane dla uzyskania odpowiedniej charakterystyki mikro – i nanostruktury powierzchni materiału szklanego.
4. Czy badania procesu mikro– i nanoszlifowania czołowego ściernicami z diamentu syntetycznego, odzwierciedli korelację między mikro– i nanoskrawaniem pojedynczym



ziarnem diamentowym w kierunku odkształceń i przemieszczeń materiału w strefie obróbki oraz identyfikacji zmian mechanizmu plastyczny/kruchy.

5. Jaki jest wpływ obróbki polerskiej (wygładzającej) z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej w polu elektromagnetycznym na proces cofania się defektów charakteryzujących proces mikroszlifowania szkła.

### 3.3. HIPOTEZA PRACY

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy naukowo-technicznej oraz własnych analiz i badań rozpoznawczych, sformułowano następującą hipotezę naukową:

*Należy oczekiwać, że realizacja procesu mikro– i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym szkła sodowego w kinematyce czołowego skrawania z określonym kątem pochylenia powierzchni obrabianej, umożliwi ukształtowanie ciągłego śladu obróbkowego o zmiennej głębokości, co pozwoli na identyfikację i analizę mechanizmów odkształceń i przemieszczeń materiału w strefie obróbki oraz określenie krytycznej głębokości wnikania ziaren ściernych, zapewniającej przebieg obróbki w warunkach plastycznych odkształceń materiału szklanego, przy ograniczonym rozprzestrzenianiu się pęknięć środkowych i rozległych defektów promieniowych w jego strukturze powierzchniowej.*

### 3.4. ZAKRES PRACY

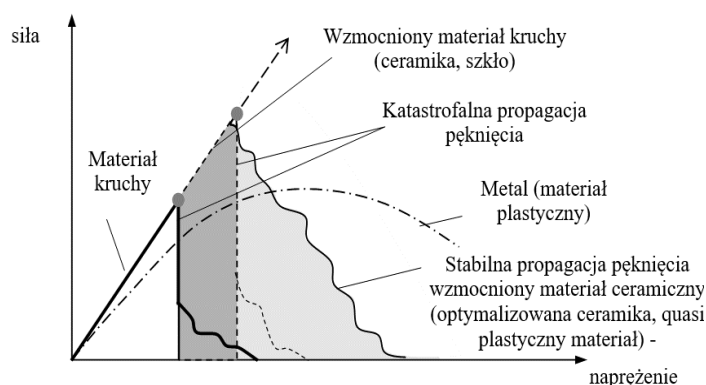
Zakres prac analitycznych i eksperymentalnych został w taki sposób przyjęty, aby ich realizacja umożliwiła odpowiednio, uzasadnione przyjęcie lub odrzucenie sformułowanej hipotezy. Obejmuje on:

1. Zapoznanie się z doniesieniami literatury zarówno krajowej, jak i światowej na temat obróbki materiałów kruchych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów szklanych.
2. Opracowanie metodyki badań eksperymentalnych mikroobróbki jednostrzowej wybranych materiałów szklanych, z zastosowaniem pojedynczych ziaren diamentowych. Do oceny warunków w strefie mikroobróbki, ze szczególnym uwzględnieniem odkształceń i przemieszczeń materiałów obrabianych.

3. Opracowanie metodyki pomiarów z zastosowaniem mikroskopu skaningowego i profilometrii, odkształceń i przemieszczeń materiału obrabianego podczas mikro- i nanoskrawania.
4. Badania procesu mikroskrawania pojedynczymi ziarnami płaskich powierzchni szklanych w dwóch etapach obejmujących badania rozpoznawcze i badania zasadnicze. W tych warunkach określano udziały mechanizmów kruchego pęknięcia i odkształceń plastycznych, wyznaczając technologiczne pracę narzędzi, zapewniające ich dominację.
5. Badania procesu mikroszlifowania czołowego ściernicami z ziarnami diamentu syntetycznego przy zróżnicowanych głębokościach dosuwu narzędzia, opisując i analizując mechanizmy towarzyszące odkształceniom i przemieszczeniom materiału w strefie obróbki.
6. Badania efektywności procesu polerowania z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznych działającej w polu elektromagnetycznym na powierzchni materiału szklanego ukształtowanych w procesie mikroszlifowania o zróżnicowanych stopniach zdefektowania.
7. Opracowanie koncepcyjnego projektu ciągu technologicznego wyposażonego w układ realizujący dosuw nanometryczny wraz z układem monitorowania, przeznaczony do realizacji precyzyjnego dosuwu wgłębnego w procesie mikroszlifowania, w celu zapewnienia możliwości obróbki w warunkach plastycznych odkształceń materiałów kruchych.
8. Opracowanie wniosków końcowych.
9. Wytyczenie ewentualnych kierunków dalszych prac o charakterze naukowym i technicznym.

#### 4. ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ I PRZEMIESZCZEŃ MATERIAŁÓW SZKLANYCH W STREFIE MIKRO- I NANOSKRAWANIA

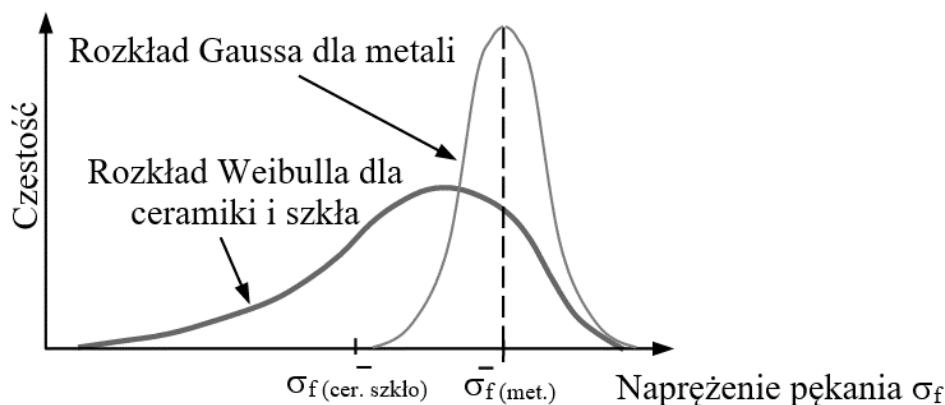
Istnieją znaczące różnice w obróbce metali oraz materiałów kruchych (szkło, ceramika) w czasie przyłożonego naprężenia zewnętrznego, wywieranego przez aktywne ziarna na powierzchni czynnej ściernicy (rys. 4.1).



**Rys. 4.1.** Porównawcza charakterystyka siły do naprężenia dla materiałów kruchych i metali  
**Źródło:** [98]

Na ilustracji przedstawiona jest charakterystyka materiałów kruchych (szkło, ceramika) w zastawieniu z materiałami metalowymi, która przedstawia zależność wielkości przyłożonej siły do otrzymanych naprężeń. Widoczna jest różnica w narastaniu naprężeń dla tych dwóch typów materiałów. Można stwierdzić, że materiały kruche wykazują dużo mniejszą odporność na wzrost naprężeń w zakresie odkształceń sprężystych, które umożliwiają powrót do struktury wyjściowej po cofnięciu się oddziaływań. Dla metali zakres ten jest dużo większy dla poszczególnych etapów odkształceń i naprężeń. Dla materiałów kruchych następuje katastroficzne rozprzestrzenianie się defektów w postaci pęknięć bez wyraźnie wykształconego etapu plastycznego płynięcia.

Ważnym zagadnieniem w obróbce materiałów szklanych, jest unikanie zjawiska kruchego pęknięcia materiału obrabianego lub takie prowadzenie obróbki, aby poziom propagacji kruchego pęknięcia powierzchni obrabianej nie zmniejszał wytrzymałości mechanicznej elementu obrabianego. Przy tych rozważaniach ważnym jest moduł Weibulla (rys. 4.2), który pozwala na określenie stopnia rozrzutu wartości naprężenia w powiązaniu z gęstością prawdopodobieństwa wystąpienia pęknięcia, czyli defektów o określonych wielkościach [99,100].



**Rys. 4.2.** Rozkład częstości występowania naprężenia pęknięcia w materiałach kruchych w porównaniu z materiałami metalowymi  
**Źródło:** [99,100]

Powyższy wykres przedstawia dwa rozkłady Gaussa oraz Weibulla. Rozkład Gaussa charakteryzuje się symetrycznością, co powoduje, że materiały należące do tej grupy są przewidywalne w swoich właściwościach na działanie naprężeń i odkształceń. Zaliczyć do nich można wszelkiego rodzaju materiały konstrukcyjne stosowane w budowie maszyn, urządzeń i w budownictwie. Natomiast rozkład Weibulla jest niesymetryczny, czego przyczyną jest dużo mniejsza przewidywalność osiągnięcia maksymalnych naprężeń powodujących pęknięcia, niż materiały metalowe. W związku z czym, materiały kruche uchodzą za trudniejsze w obróbce.

Wartość modułu Weibulla dla materiałów kruchych, w tym szkła, waha się w granicach od 6 do 25. Duża wartość tego modułu powoduje, że zawęża się przedział związany z wielkością pęknięć, a co za tym idzie, mniejszy jest również rozrzut prawdopodobieństwa kruchego pęknięcia materiału szklanego. Istnieje zależność (9), na podstawie której, można obliczyć prawdopodobieństwo wystąpienia oznak kruchego pęknięcia w materiale szklanym [99,100]:

$$P_f = 1 - \exp\left[-V\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad \text{Dla } \sigma > \sigma_u \quad (9)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

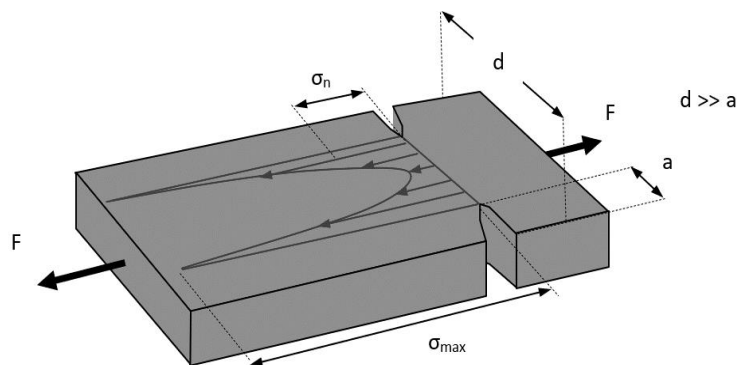
$\sigma$  – przyłożone naprężenie rozciągające,

$\sigma_u$  – naprężenie przy  $P_f = 0$ ,

$\sigma_0$  – współczynnik normalizujący,

$m$  – moduł Weibulla.

Prowadzenie procesu skrawania jest podstawowym źródłem powstawania i propagacji pęknięć w warstwie wierzchniej materiału szklanego, pęknięcia te mają istotny wpływ na obniżenie wytrzymałości na rozciąganie materiałów kruchych oraz szkła [101,102]. Zjawisko to bardzo dobrze charakteryzuje teoria karbu, czyli teoria Griffithsa, która umożliwia uzasadnienie zmniejszenia się wytrzymałości materiału szklanego pod wpływem działania pęknięć w warstwie wierzchniej (rys. 4.3) [103÷105].



**Rys. 4.3.** Model obrazujący teorię Griffithsa, opisujący spiętrzenie naprężeń wywołane działaniem karbu w materiale kruchym poddanym rozciąganiu  
**Źródło:** [103÷105]

Przedstawiona ilustracja nawiązuje do tematu dysertacji, dotyczącej analizy przemieszczania materiału w wyniku skrawania materiału szklanego diamentowym ziarnem ściernym na różnych głębokościach skrawania, co będzie przyczyną inicjacji propagacji kruchego pęknięcia zgodnie z teorią Griffithsa.

Teoria wpływu karbu (teorię Griffithsa) udowadnia, że na dnie szczeliny będą występować naprężenia ( $\delta_{max}$ ) o wartości kilkukrotnie większej od naprężeń nominalnych ( $\delta_n$ ), występujących w materiale poddanym próbom na rozciąganie. Skupienie powstałych naprężeń na dnie karbu, bądź u jego wierzchołka, może powodować zainicjowanie propagacji różnego rodzaju pęknięć. Krytyczne naprężenia rozciągające pojawiające się u wierzchołka pęknięcia, będą stanowiły naprężenie pęknięcia ( $\delta_f$ ) i to one zapoczątkują katastroficzne rozprzestrzenianie się pęknięcia występującego w materiale kruchym. Naprężenie krytyczne wyraża zależność (10), która ukazuje, że wartość ta jest uzależniona zarówno od wielkości oraz geometrii pęknięcia inicjującego (pierwotnego), zależna jest od odporności na kruche pęknięcie, czy krytyczny współczynnik intensywności naprężeń ( $K_{Ic}$ ) szlifowanego materiału kruchego [103÷105]:

$$\sigma_f = \frac{1}{Y} \cdot \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a_c}} \quad (10)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

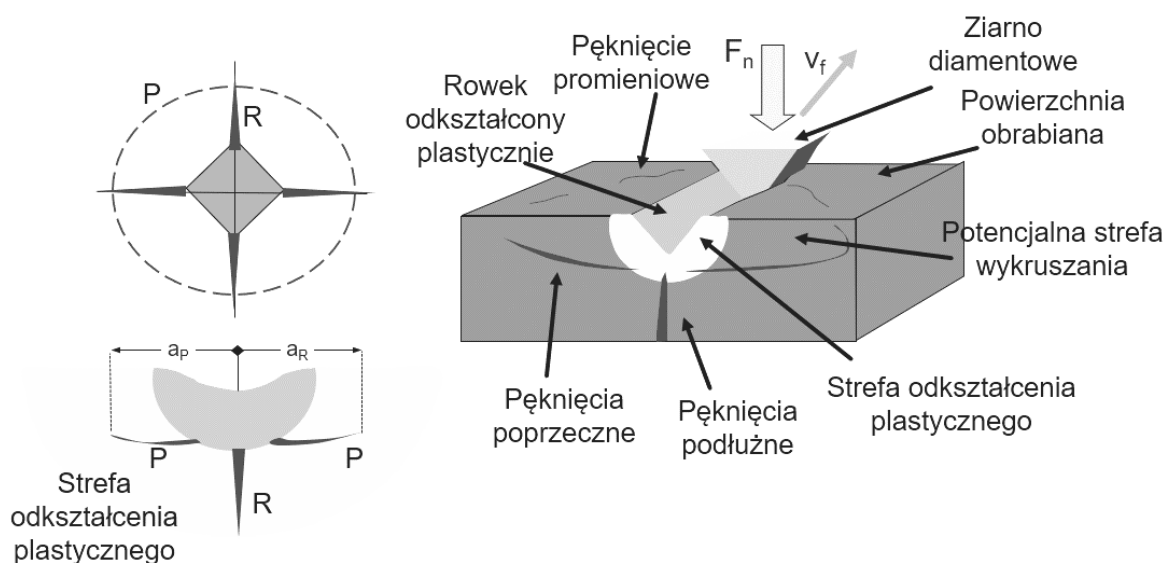
$Y'$  – współczynnik geometryczny ( $Y < 2$ ), np. dla niewielkich, powierzchniowych, ostrych

pęknięć w płytkach o małej grubości  $Y = 1,12 \sqrt{\pi}$ ,

$K_{Ic}$  – krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (dla sposobu pęknięcia I – przez rozwarcie),

$a_c$  – krytyczna długość pęknięcia.

Podczas obróbki ścierniej materiałów szklanych, ważnym aspektem jest proces powstawania uszkodzeń w warstwie wierzchniej, który jest ściśle związany z mechanizmem odkształcania i oddzielania materiału w postaci wiórów i odłamków. Konsekwencje tego procesu bardzo dobrze ukazują modelowe wciskanie diamentowego wgłębnika w kształcie ostrosłupa (rys. 4.4) [106,107]. Jest to praktyczne wykorzystanie teorii Griffithsa.



**Rys. 4.4.** Model strefy odkształcenia plastycznego oraz kruchego pęknięcia z rodzajami pęknięć materiału kruchego powstających na skutek: a) wciskania wgłębnika, b) zarysowania ziarnem ściernym pod obciążeniem normalnym ( $F_n$ );  $R$  – pęknięcia promieniowe o wymiarze ( $a_R$ ),  $P$  – pęknięcia poprzeczne o wymiarze ( $a_P$ )

**Źródło:** [107]

Wykonywane próby wciskania oraz zarysowania, w sposób modelowy prezentują specyfikę obróbki materiałów szklanych, w których dużą rolę odgrywa mechanizm pęknięcia oraz usuwania materiału. Tego typu testy ukazują spektrum przebiegu procesu skrawania

materiałów szklanych, gdzie można dostrzec zależność mechanizmu pęknięcia i usuwania materiału od wartości zagłębienia, czy zarysowania. Dzięki czemu można wnioskować, czy w procesie obróbki przekroczony został poziom krytycznych naprężeń rozciągających, które są inicjatorem propagacji pęknięć i decydują o tym, czy szlifowanie przebiega w warunkach odkształceń plastycznych. Degradacje wytrzymałościowe materiału kruchego, są powodowane przede wszystkim na skutek propagacji i rozwoju pęknięć środkowych (wzdłużnych) oraz promieniowych. W przypadku mechanizmu usuwania materiału kruchego w procesach obróbki ścierniej, jest to wynikiem propagacji i rozwoju pęknięć poprzecznych zlokalizowanych wzdłuż toru przejścia ziarna skrawającego. Przy uwzględnieniu objętości ( $V_{wi}$ ) materiału, który podlega usunięciu w procesie skrawania przez pojedyncze ziarno, generujące obciążenie ( $F_{ni}$ ) wywierane na materiał, jest proporcjonalne względem tworzonych się pęknięć poprzecznych oraz długości utworzonego śladu obróbkowego (11), co można zapisać w postaci równania [107,108,109]:

$$V_{wi} = \alpha_i \frac{F_{ni}^{9/8}}{K_c^{1/2} H^{5/8}} \left(\frac{E}{H}\right)^{4/5} l \quad (11)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$\alpha$  – stała, niezależna od rodzaju materiału,

$K_c$  – odporność na kruche pęknięcie,

$H$  – twardość materiału,

$E$  – moduł sprężystości podłużnej.

Badania dotyczące analiz usuwania materiałów kruchych wskazują jednoznacznie, iż do rozwoju poprzecznych pęknięć przyczynia się obciążenie normalne ( $F_{ni}$ ), które dotyczy czynnego ziarna ściernego i przewyższa wartość progową ( $F_{ni}^*$ ). Wartość ta ściśle zależy od odporności materiału na kruche pęknięcie ( $K_c$ ) oraz twardości materiału ( $H$ ). Zależność tą opisuje równanie (12) [107,108,109]:

$$F_{ni}^* = \xi \left(\frac{K_c^4}{H^3}\right) f\left(\frac{E}{H}\right) \quad (12)$$

W przypadku obróbki materiałów kruchych, wartość obciążenia progowego ( $F_{ni}^*$ ) przyjmuje nieduże wartości. Dążąc do prowadzenia procesu szlifowania przy zapewnieniu obróbki w warunkach ciągłego usuwania materiału szklanego, należy nie przekraczać wartości progowej obciążenia ( $F_{ni}^*$ ), bądź odpowiadającej jej głębokości penetracji ziarna



skrawanego. Natomiast przekroczenie tych wartości, spowoduje przekroczenie powstałych krytycznych naprężeń rozciągających w strefie obróbki, co będzie skutkowało inicjacją, rozwojem i propagacją pęknięć. Jest to duże wyzwanie w przypadku materiałów szklanych, które cechują się dużą wrażliwością na uszkodzenia i pęknięcia, które mogą w konsekwencji prowadzić do przedwczesnego zniszczenia powierzchni poddanej obróbce, prowadzonej przy zbyt dużym poziomie naprężeń mechanicznych [107,110÷116].

Podstawowe wiadomości dotyczące mechanizmów obróbki skrawania materiałów szklanych, zostały opisane pod koniec wieku XIX i w 20. latach XX wieku [107] przez następujących badaczy:

- Hertz – matematyczny opis dotyczący przestrzennego pola powstałych naprężeń odcisku wgłębnikiem kulistym [112],
- Boussinesy – matematyczny opis dotyczący przestrzennego pola powstałych naprężeń odcisku wgłębnikiem ostrym [112],
- Griffith – opracowanie warunku hydrostatycznego stanu naprężeń, aby ograniczyć propagację pęknięcia, w momencie, gdy określone atomy będą opuszczać przypisane im pozycje równowagowe.

Z tych badań wynika, iż zerwanie ciągłości materiału kruchego, następuje w wyniku rozwoju karbu, na dnie którego pojawiają się naprężenia, których wartości są większe, niż naprężenia normalne w elemencie poddanym rozciąganiu. Koncentracja tego typu naprężeń występujących na dnie karbu lub na wierzchołkach szczelin, będzie powodem do powstania rozwoju pęknięć. Występujące krytyczne naprężenia rozciągające zlokalizowane na wierzchołkach pęknięć, stanowią naprężenia pęknięcia, które są początkiem do katastroficznego rozwijania się i rozprzestrzenienia pęknięć w materiale szklanym. Uzależnione to będzie od [107]:

- wielkości pęknięć,
- geometrii pęknięcia,
- odporności na kruche pęknięcie,
- krytycznego współczynnika intensywności naprężeń ( $K_{Ic}$ ) materiału obrabianego.

W procesie oddzielania materiału szklanego metodą szlifowania, może przebiegać w warunkach:

- ciągłego usuwania materiału – ma to miejsce, gdy obciążenie wywołane przez ziarna ściernie nie będzie przekraczać wartości progowej lub głębokości progowej,
- kruchego usuwania materiału – w momencie przekroczenia tych wartości.

Energia wydatkowana w fazie kruchego pęknięcia, będzie miała wartość proporcjonalną do kwadratu wartości zagłębienia ziarna, a energia potrzebna do plastycznego odkształcenia materiału, będzie proporcjonalna do potęgi trzeciej głębokości wnikania ziarna. Z tego wynika, że stosunek energii plastycznych odkształceń do energii kruchego pęknięcia, jest wprost proporcjonalny do wartości zagłębienia ziarna skrawającego w materiał. Wobec tego, momencie zmniejszenia głębokości obróbki, odkształcenie plastyczne staje się energetycznie korzystniejsze (tabl. 4.1) [107,116].

**Tabl. 4.1.** Porównanie właściwości materiałów – stal i szkło; (odkształcenie – pęknięcie)

Źródło: [118,119]

<i>Material</i>	<i>Twardość materiału</i> <i>H</i>	<i>Odporność na kruche pęknięcie</i> <i>K<sub>c</sub></i>	<i>Wskaźnik kruchości</i> <i>I<sub>b</sub></i>	<i>Obciążenie progowe</i> <i>F*</i>
	<i>GPa</i>	<i>MPa·m<sup>1/2</sup></i>	<i>1000m<sup>-1/2</sup></i>	<i>N</i>
Stal (o średniej wytrzymałości)	5,0	50,0	0,1	800000,0
Szkło	5,5	0,79	6,9	0,023

Podatność materiału szklanego na mechanizm kruchego pęknięcia, można wyrażać za pomocą twardości oraz ciągliwości. Lawn i Marshal [117] wyznaczyli wskaźnik kruchości ( $I_b$ ) jako zależność (13):

$$I_b = \frac{H}{K_c} \quad (13)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$H$  – twardość (opór odkształcenia),

$K_c$  – ciągliwość (odporność na kruche pęknięcie).

Aby określić odporności materiału szklanego na mechanizm kruchego pęknięcia, wraz z tak zwanym wskaźnikiem kruchości, należy podać wartość obciążenia progowego ( $F^*$ ), powyżej której, na skutek punktowego działania obciążenia, będzie rozwijała się propagacja pęknięć, co spowoduje w konsekwencji wykruszenia materiału szklanego. Dla ostrza wglębniaka, takie obciążenie progowe  $F^*$  wyznacza zależność (14) [118,119]:

$$F^* = \lambda_0 K_c \left( \frac{K_c}{H} \right)^3 \quad (14)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$\lambda_0 = 1,6 \cdot 10^4$  (stała geometryczna)

Posługując się badaniami własnymi, jak również analizą dokonań poprzedników, Bifano opracował model krytycznej głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany w procesie mikroszlifowania, wykorzystując wiedzę o ich podatności na odkształcenie plastyczne. Model ten wyznacza graniczną głębokość dosuwu, zapewniającą prowadzenie szlifowania w fazie plastycznego płynięcia materiału, przy założeniu, iż uszkodzenia powierzchniowe nie przekroczą 10% [120,121].

$$h_c = b \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (15)$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

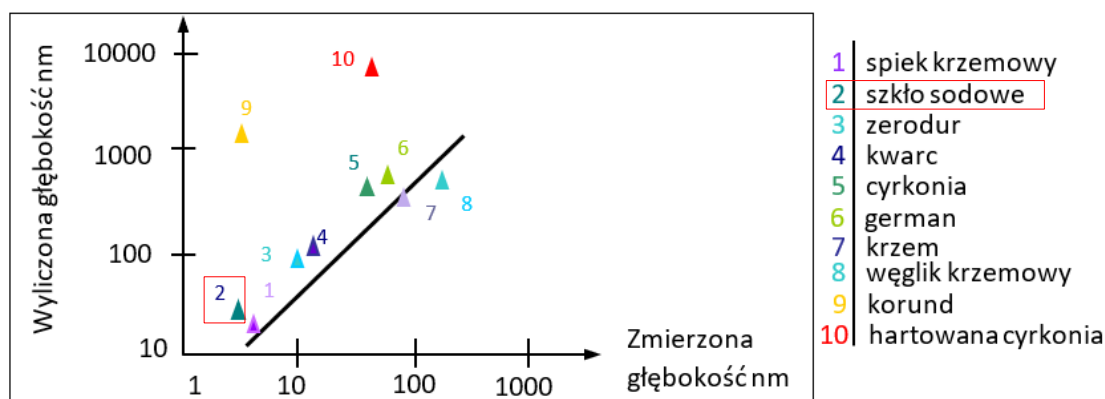
$h_c$  – krytyczna głębokość wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany,

$b$  – współczynnik zależny od geometrii ziarna (kąta natarcia) i warunków procesu,

$E$  – moduł sprężystości wzdłużnej.

Model ten umożliwia wykonanie obliczeń krytycznej głębokości wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał, przy znajomości jego własności. Własności te Bifano (1988) określał przez pomiar twardości ( $H$ ), współczynników ( $K_c$ ) i ( $E$ ). W przypadku wykonania pomiaru twardości, współczesna technika dysponuje wieloma możliwościami, jednak już określenie współczynnika ( $K_c$ ) i ( $E$ ), jest nie w pełni możliwe i nadal trwają prace badawcze. Jednak na podstawie obliczeń teoretycznych, uwzględniających własności materiałowe, określa się przybliżone wartości krytycznej głębokości wnikania ziaren ściernych w procesie szlifowania, która mają bezpośrednie przełożenie na wartość dosuwu wglębnego (rys. 4.5)[120,121].

Na wykresie uwzględniono 10 różnych gatunków materiałów, dla których określono graniczną wartość zagłębienia ostrza skrawającego, przy której następuje zmiana procesu obróbki przebiegającego w warunkach odkształceń plastycznych, na obróbkę przebiegającą w warunkach kruchych odkształceń materiału w strefie obróbki. Wartości doświadczalne, porównano z wartościami wyznaczonym z teoretycznych obliczeń na podstawie zależności  $(E/A) (K_c/H)^2$  [120].



**Rys. 4.5.** Przykład możliwości opracowania korelacji pomiędzy głębokością pochodzącą z wyliczenia, głębokością pomiaru dla wgłębego szlifowania, na granicy zmiany fazy plastyczny–kruchy (zobrazowana względem wielkości  $(E/H)(K_c/H)^2$ )

**Źródło:** [120,121]

Na podstawie przedstawionych powyżej analiz dotyczących mechanizmów i zjawisk związanych z obróbką materiałów kruchych, sformułowano następujące wnioski, które posłużyły do opracowania metodyki badań zastosowanych w pracy doktorskiej:

1. Przeprowadzona analiza w oparciu o dostępne analizy literaturowe, dotyczące prób wciskania oraz zarysowania materiału kruchego z wykorzystaniem wgłębniaka, jako modelu ziarna ściernego wykazała, że ze względu na twardość i odporność na ścieranie, najlepszym do tego celu jest ostrze diamentowe. Parametry określające warunki skrawania wynikają z wartości charakteryzujących analizowany materiał: twardość wnosząca  $H=5,5\text{GPa}$ , odporność na kruche pękanie  $K_c=0,79\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , wskaźnik kruchości  $Ib=1000\text{m}^{-1/2}$ , obciążenie progowe wynoszące  $F^*=0,023\text{N}$ .
2. Przeprowadzone analizy teoretyczne pozwoliły na oszacowanie krytycznych głębokości wnikania ziarna ściernego, dla których można się spodziewać zmiany mechanizmu odkształceń materiału w strefie obróbki kruchy/plastyczny. Dla analizowanego materiału, model krytycznej głębokości  $h_c$  – wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, zależy od współczynnika  $b$ -zależnego od geometrii ziarna (kąt natarcia) i warunków procesu oraz modułu sprężystości wzdłużnej  $E$ .
3. Na podstawie powyższych analiz, praca badawcza ukierunkowana została na poszerzenie wiedzy teoretycznej i jej praktyczne zastosowanie w ultra precyzyjnej obróbce materiałów szklanych, w celu określenia rzeczywistych wartości głębokości wnikania ziaren, powodującego zmiany mechanizmu odkształceń materiału w strefie

obróbki kruchy/plastyczny, które na podstawie obliczeń i analiz teoretycznych należy pozycjonować w zakresie  $h_c$  = (od 50 do blisko 200 nm).

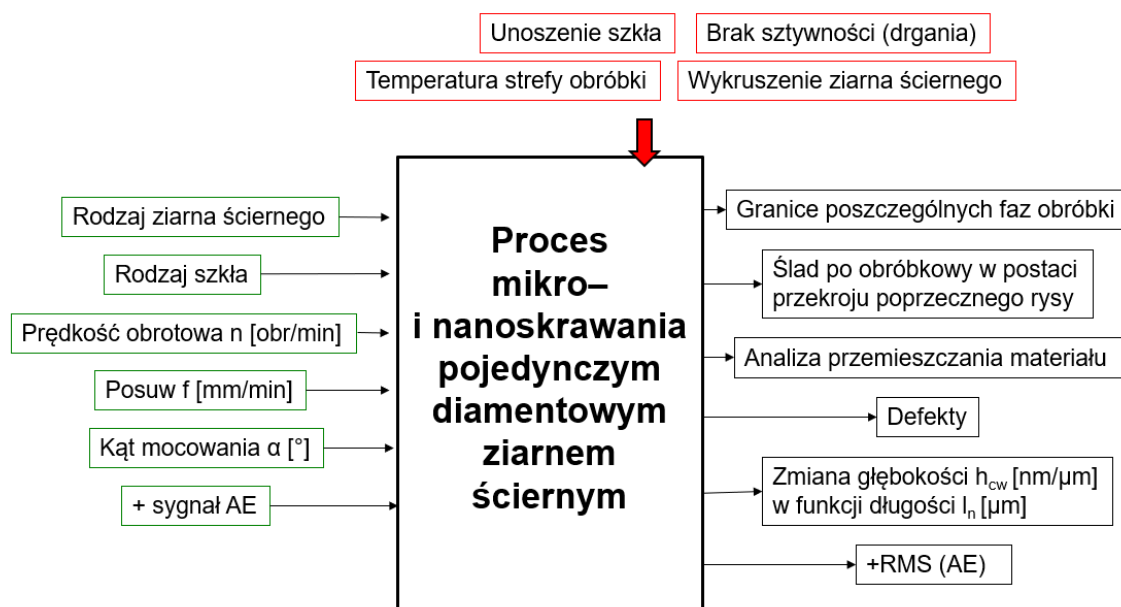
4. Badania eksperymentalne umożliwią oszacowanie granic występowania defektów, będących skutkiem kruchego pękania, a co za tym idzie, ustalenie wartości dosuwów granicznych, umożliwiających realizację procesu obróbkowego szkła o zadanej charakterystyce.

## 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESÓW OBRÓBKI MATERIAŁÓW SZKLANYCH

### 5.1. WARUNKI I ZAKRES REALIZOWANYCH BADAŃ

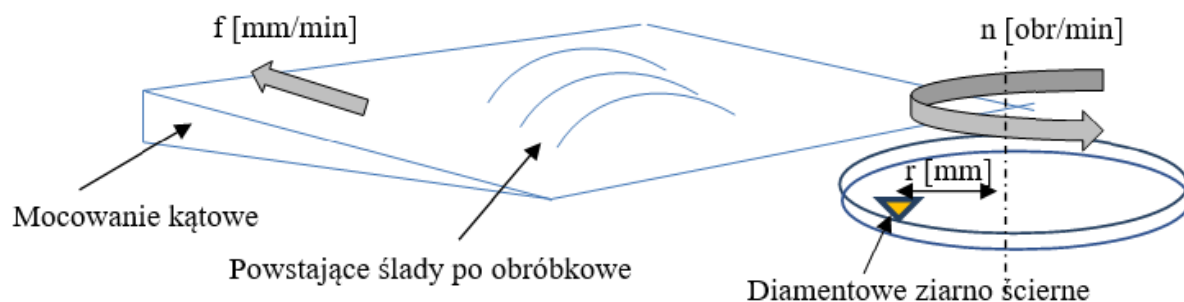
Badania zasadnicze zostały zrealizowane według harmonogramu badawczego, który podzielono na trzy etapy. Pierwszy etap badawczy dotyczy procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym na płytkach szklanych. Drugi etap badawczy opisuje realizację procesu mikro- i nanoszlifowania z wykorzystaniem spojonego narzędzia ściernego w postaci ściernicy diamentowej. Trzeci etap badawczy realizował polerowanie zdefektowanej powierzchni szklanej podanej wcześniejszemu szlifowaniu. Wszystkie trzy etapy mają w konsekwencji stworzyć projekt ciągu technologicznego do obróbki materiałów szklanych.

Cały proces realizacji mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym (etap 1), składa się z danych wejściowych, które umożliwiają realizację procesu obróbki oraz danych wyjściowych, stanowiących otrzymane w wyniku procesu informacje, które należy odpowiednio zinterpretować oraz listy zakłóceń, wpływających na wartość, czy jakość otrzymanych informacji. Cały schemat procesu mikro- i nanoskrawania przedstawiono poglądowo w formie czarnej skrzynki (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Schemat badań dla mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym (etap 1)

Badanie procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym wykonano zgodnie z określoną kinematyką (rys. 5.2).

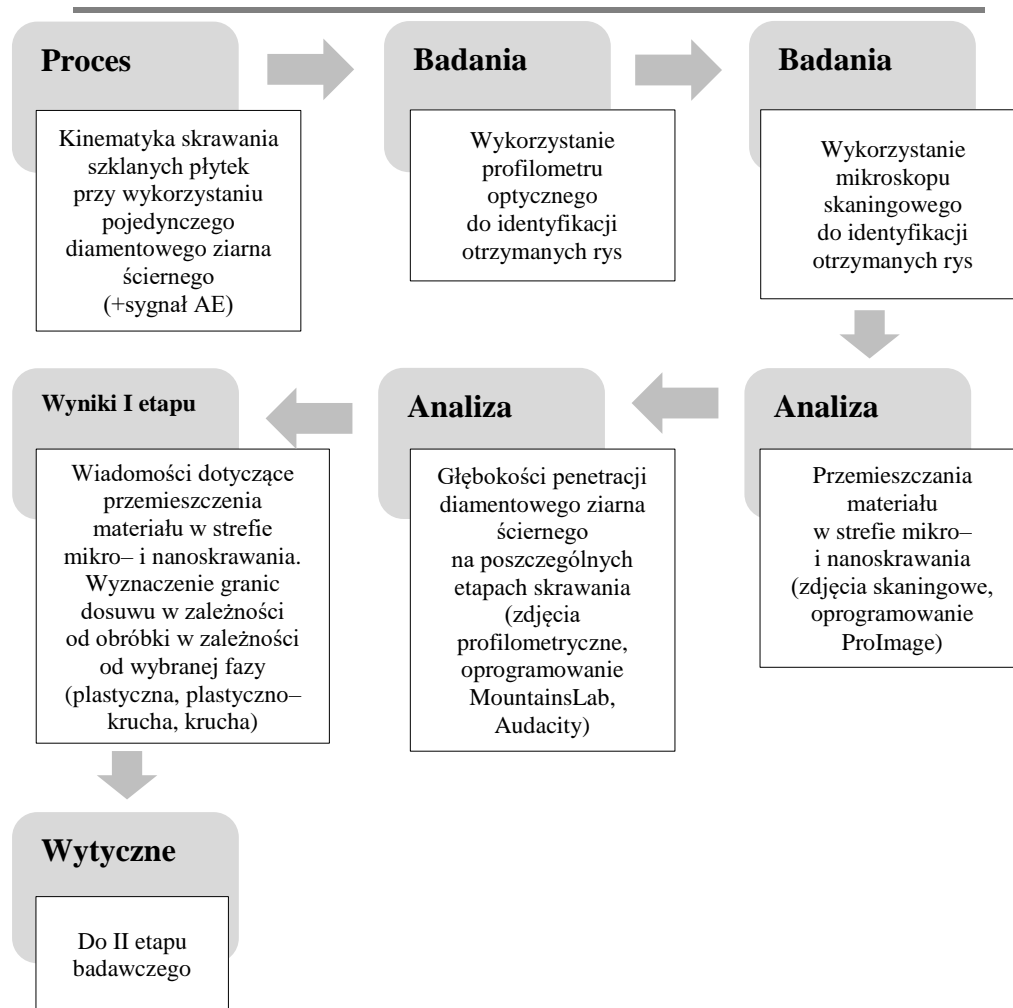


**Rys. 5.2.** Schemat kinematyczny badania mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym osadzonym na tarczce obracającej się z prędkością obrotową ( $n$ ), przemieszczającej się względem szklanej płytki z posuwem ( $f$ ), zamocowanej pod kątem ( $\alpha$ ) do kierunku posuwu

Przeprowadzony proces mikro- i nanoskrawania materiału kruchego w postaci płytek szklanych został zrealizowany w ściśle określonej kinematyce. Narzędzie skrawające stanowiła aluminiowa tarczka z osadzonym na stałe pojedynczym diamentowym ziarnem skrawającym na określonym promieniu, natomiast materiał skrawany został zamocowany w imadle kątowym, co umożliwiło uzyskanie zmiennej głębokości wnikania ziarna skrawającego.

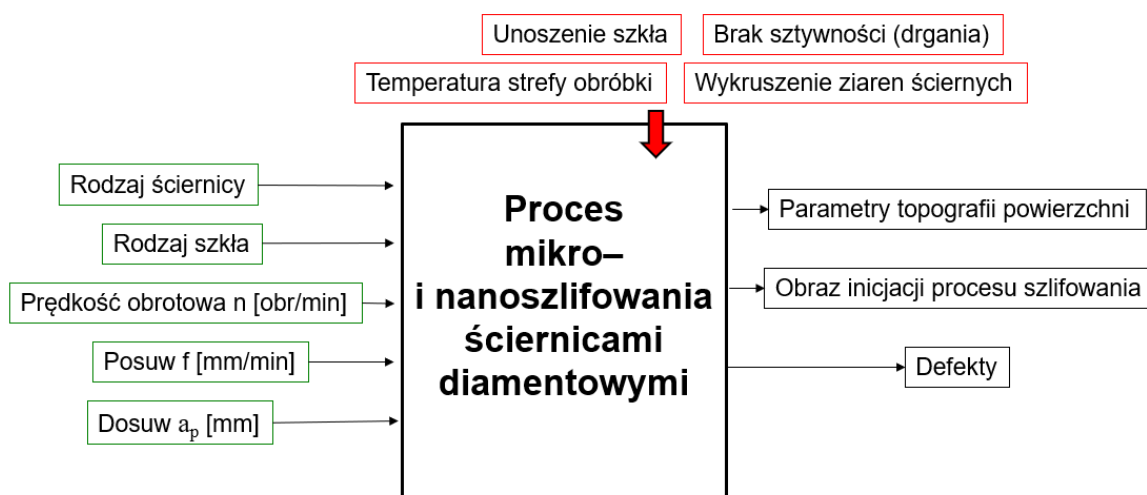
Tak uzyskany materiał badawczy w postaci półkolistych pojedynczych rys o zmiennej głębokości, poddano wnikliwej analizie przy wykorzystaniu profilometru optycznego w celu określenia wartości uzyskanych głębokości na wybranych etapach rozwoju rys. Następnie wykonano zdjęcia na mikroskopie skaningowym celem przeprowadzenia analizy przemieszczania materiału w strefie mikro- i nanoskrawania. Główny cel badań stanowiło również, wyznaczenie granic dosuwu przy obróbce materiałów szklanych w określonych fazach (faza plastyczna, faza plastyczno-krucha, faza krucha). Badania te stanowiły również materiał pomocniczy do dodatkowej analizy potwierdzający korelacje i przynoszący odpowiedź na pytanie, czy badania realizowane przy wykorzystaniu jednego ostrza skrawającego w obróbce jednopunktowej, gdzie sterownie tym procesem jest o wiele łatwiejsze, aniżeli prowadzenie obróbki przy użyciu narzędzia w postaci ściernicy diamentowej, gdzie pracujemy losową liczbą ostrzy skrawających na powierzchni czynnej ściernicy, mogą mieć przełożenie, gdyż w warunkach produkcyjnych prowadzony jest obróbka materiałów szklanych metodą szlifowania (rys. 5.3).





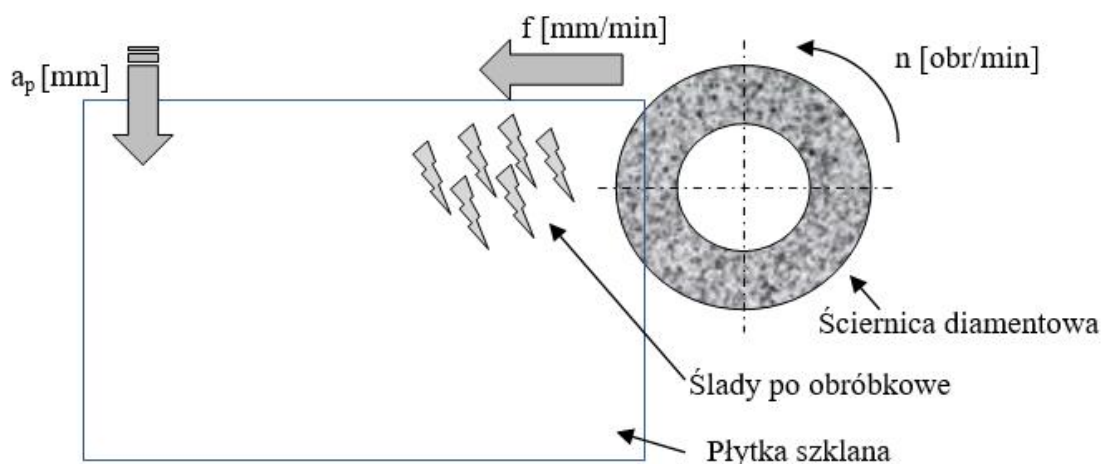
Rys. 5.3. Metodyka badań procesu mikro – i nanoskrawania pojedynczym diamentowym (etap 1)

Na tej podstawie możliwe było przejście do kolejnego etapu realizacji procesu mikro– i nanoszlifowania płytek szklanych zgodnie z przyjętą metodyką. Kolejny proces realizacji mikro– i nanoszlifowania przy wykorzystaniu spojonego narzędzia ściernego, będącego ściernicą diamentową (etap 2), również składa się z określonych danych wejściowych, które umożliwiają realizację procesu obróbki oraz danych wyjściowych, stanowiących otrzymane w wyniku procesu informacje, które należy odpowiednio zinterpretować oraz listy zakłóceń, wpływających na wartość, czy jakość otrzymanych informacji. Cały schemat procesu mikro – i nanoszlifowania przedstawiono poglądowo w formie czarnej skrzynki (rys. 5.4).



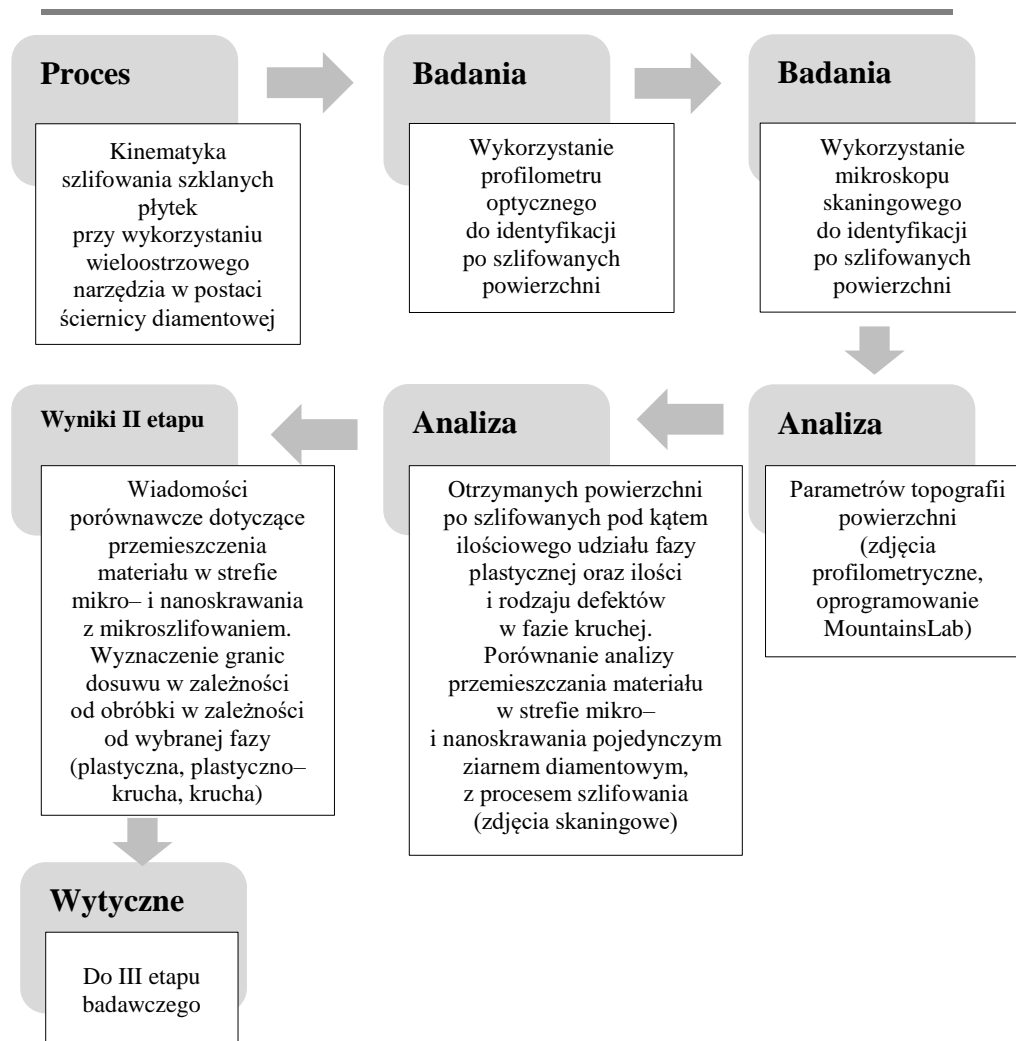
Rys. 5.4. Schemat badań dla mikro- i nanoszlifowania ściernicą diamentową (etap 2)

Badanie procesu mikro- i nanoszlifowania ściernicą diamentową wykonano zgodnie z określoną kinematyką (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Schemat kinematyczny badania mikro- i nanoszlifowania ściernicą diamentową obracającą się z prędkością obrotową ( $n$ ), przemieszczającej się względem szklanej płytki z posuwem ( $f$ ), oraz dosuwem ( $a_p$ )

Po przeprowadzonej obróbce zostały wykonane badania po szlifowanych płytek szklanych z wykorzystaniem profilometru optycznego oraz mikroskopu skaningowego. Dzięki temu uzyskano informacja o przebiegu procesu i rodzajach oraz rozłożeniu defektów na powierzchni i w warstwie przypowierzchniowej szlifowanych płytek szklanych (rys. 5.6).



**Rys. 5.6.** *Metodyka badań procesu mikro- i nanoszlifowania ściernicą diamentową*

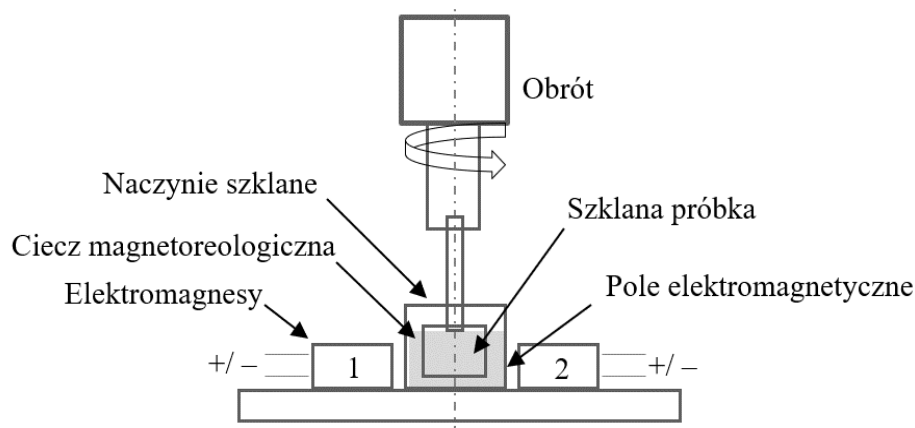
Na podstawie przeprowadzonych wcześniejszych dwóch etapów badawczych i po przeprowadzeniu analizy otrzymanych wyników zrealizowano ostatni trzeci etap badania z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej. Polegający na próbie mikro- i nanowygładzania płytek wcześniej po szlifowanych przy zastosowaniu dosuwu umożliwiającego szlifowanie w warunkach pełnej fazy kruchego pęknięcia.

Ponadto etap trzeci rozszerzono o proces mikro- i nanowygładzania uzyskanych pojedynczych śladów uzyskanych w wyniku mikro- i nanoskrawania płytek szklanych ściernicami diamentowymi (rys. 5.7).



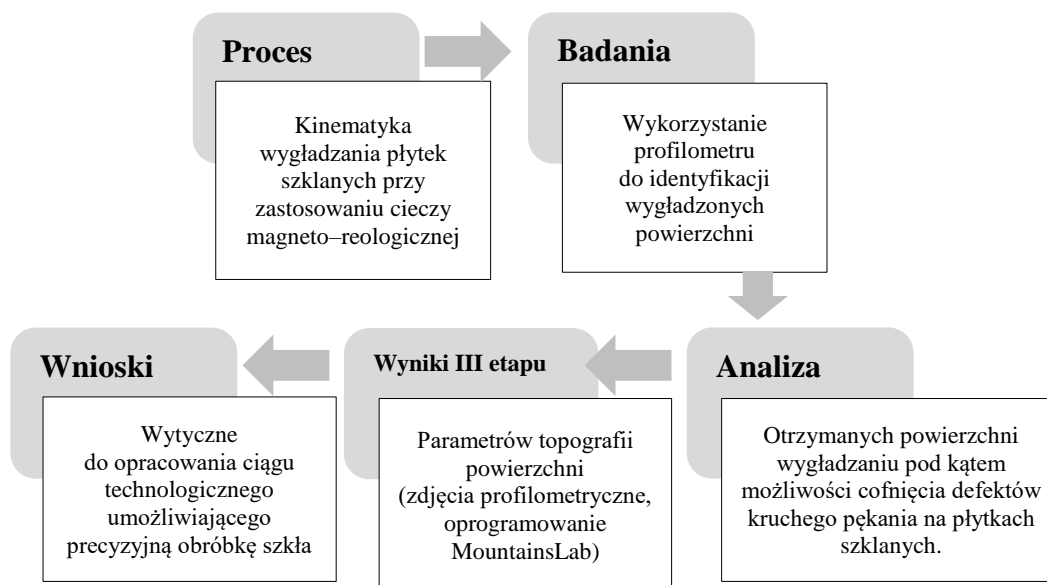
**Rys. 5.7.** Schemat badań mikro- i nanowygładzania przy wykorzystaniu cieczy magneto-reologicznej

Badanie procesu mikro- i nanowygładzania przy zastosowaniu obróbki w cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym wykonano zgodnie z określoną kinematyką (rys. 5.8).



**Rys. 5.8.** Schemat kinematyczny badań z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym

Po przeprowadzeniu badania polerowania płytek szklanych przeprowadzono analizy badawcze z wykorzystaniem profilometru uzyskując informację o przebiegu procesu i ewentualnej redukcji defektów na powierzchni i w warstwie przypowierzchniowej szlifowanych płytek szklanych (rys. 5.9).



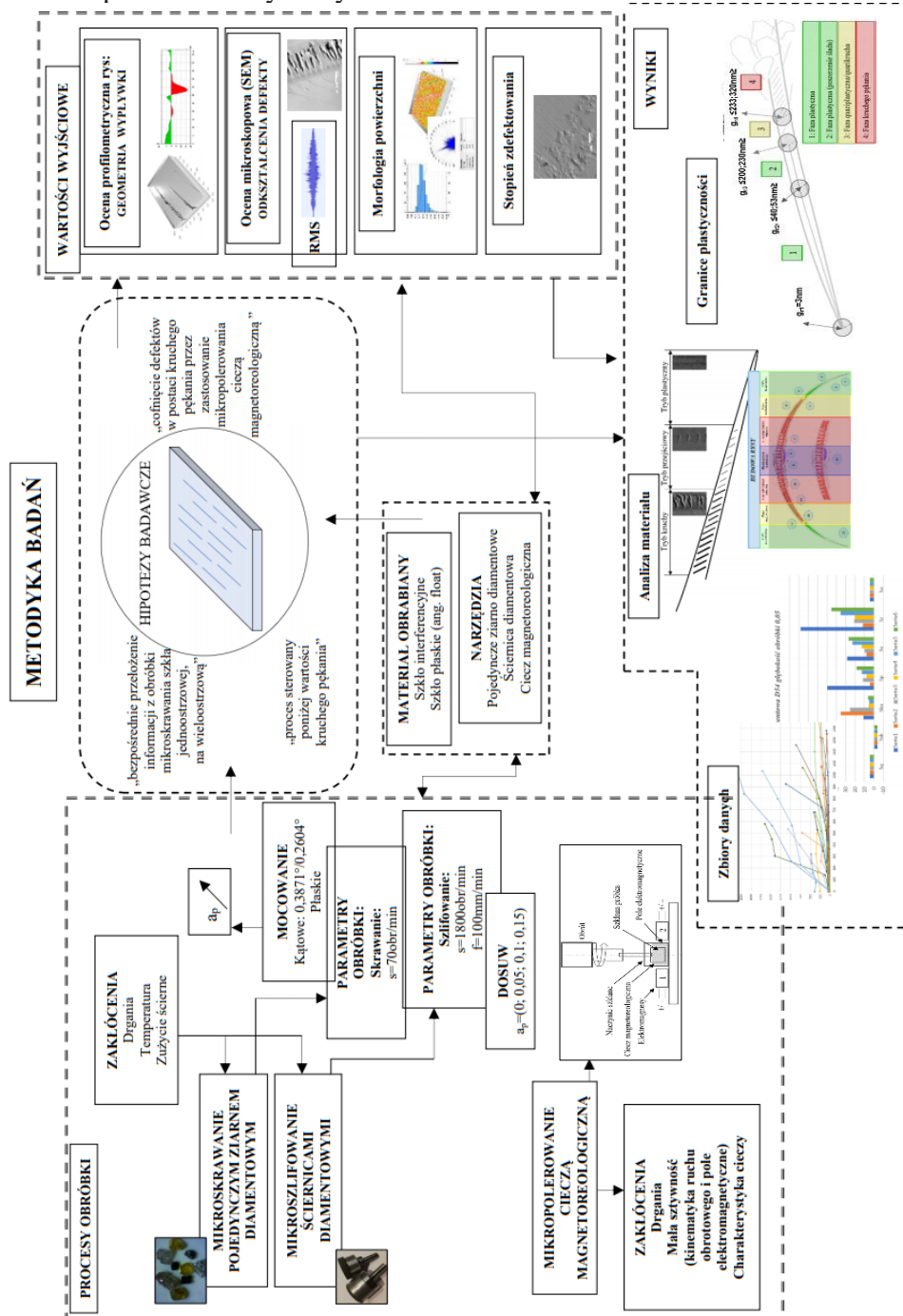
*Rys. 5.9. Metodyka badań z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym*

Przyjęty program prac badawczych ma procesową strukturę sekwencyjną, składającą się z trzech postępujących po sobie następujących etapów:

1. **Badania procesu mikro- i nanoskrawania ziarnami diamentowymi materiałów szklanych**, które mają na celu określenie krytycznej głębokości wnikania ziaren, z uwagi na realizację tego procesu w warunkach plastycznego odkształcania materiału ze zminimalizowaną ilością defektów będących skutkiem kruchego pęknięcia obrabianego materiału.
2. **Badania procesu mikro- i nanoszlifowania ściernicami diamentowymi materiałów szklanych** w warunkach wnikania ziaren poniżej głębokości krytycznej, w celu zapewnienia realizacji obróbki z dominującym rozwojem odkształceń plastycznych w strefie obróbki i zapewnienia wysokiej gładkości powierzchni obrabianej ze zminimalizowaną ilością defektów będących skutkiem mechanizmu kruchego pęknięcia w celu porównania inicjacji i rozwoju rysy pochodzącej z obróbki jednostrzowej, z obróbką wielostrzową. Niemniej etap ten będzie się skupiał na prowadzeniu procesu szlifowania w fazie kruchego pęknięcia, jako przygotowanie próbek do mikropolerowania w etapie trzecim.

## 3. Badania procesu polerowania z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznych (MRF) powierzchni po szlifowaniu w warunkach dominujących defektów kruchej pęknięcia w celu określenia efektywności obróbki.

Pełne spektrum czynności i zakresy prowadzonych badań w pracy przedstawia poniższy schemat przedstawiony na rys. 5.10.

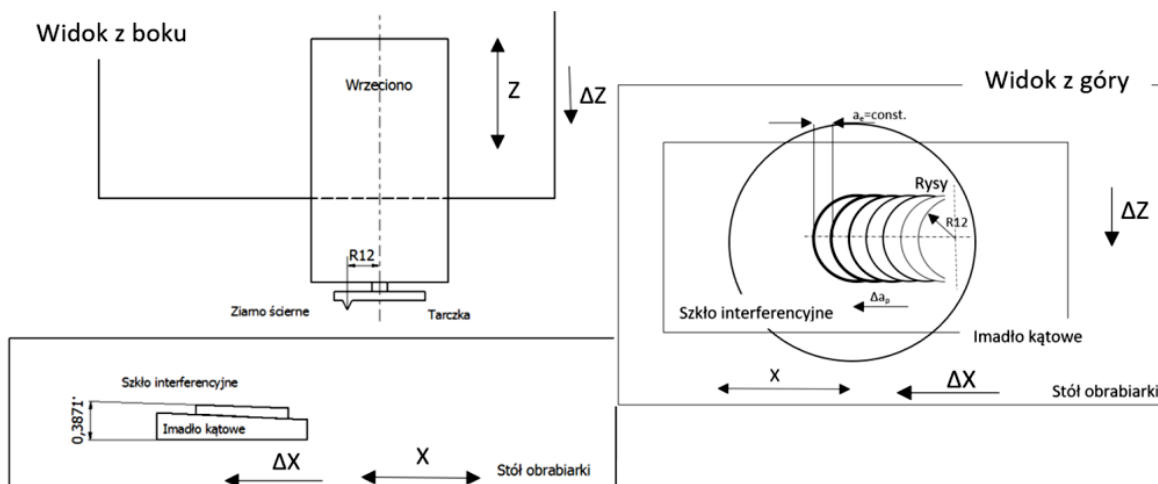


Rys. 5.10. Pełny schemat metodyki badań

## 5.2. BADANIA PROCESU MIKRO– I NANOSKRAWANIA POJEDYNCZYM DIAMENTOWYM ZIARNEM ŚCIERNYM

### 5.2.1. Metodyka badań

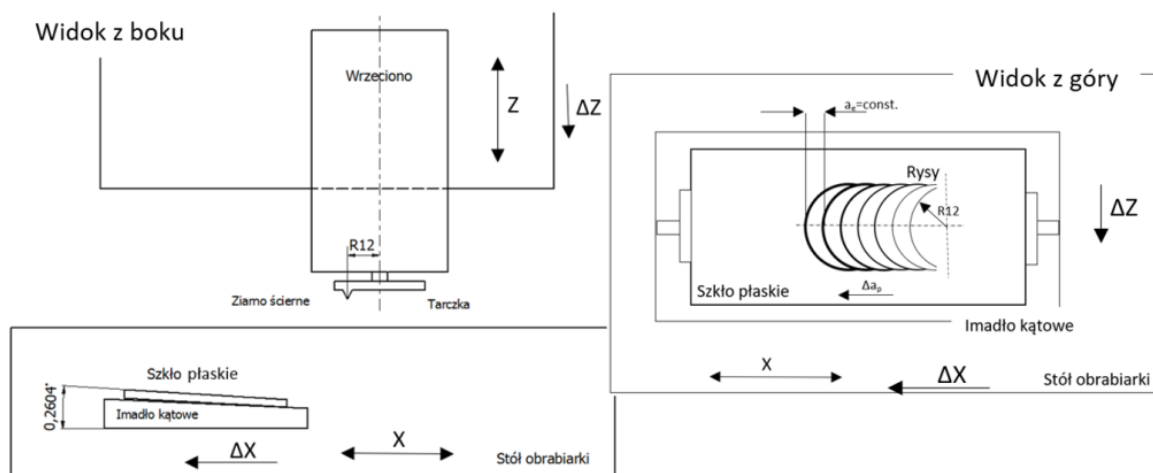
Badania przeprowadzono w warunkach czołowego mikro– i nanoskrawania szkła przy wykorzystaniu pojedynczych ziaren diamentowych i z regularnego azotku boru (CBN), umieszczonymi na powierzchni czołowej tarczki zamocowanych w kątowym uchwycie mocującym, na 3–osiowym centrum obróbkowym CNC OKUMA Genos M560R–V (rys. 5.11). Próbki na których przeprowadzono badania wykonane były ze szkła interferencyjnego (badania wstępne) i szkła sodowego (badania zasadnicze).



**Rys. 5.11.** Schemat układu kinematycznego procesu mikro– i nanoskrawania na szkło interferencyjnym (badania wstępne)

W takim układzie kinematycznym ślady obróbkowe posiadają kształt łukowy nacięć o dość długim przebiegu odzwierciedlającym ślad po skrawaniu ziarna. W celu uzyskania zmiennej głębokości mikro– i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, umożliwiającej obserwację i analizę pracy ziarna w warunkach kruchego i plastycznego mikro– i nanoskrawania, za pomocą specjalnie wykonanych uchwytów pochylano próbki pod niewielkimi kątami w celu zmiany głębokości skrawania wzdłuż drogi mikro– i nanoskrawania (rys. 5.12).



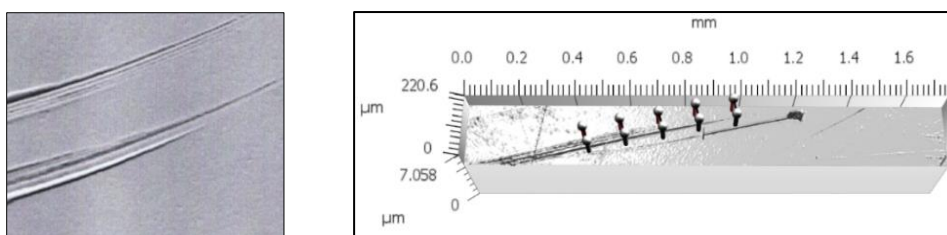


Rys. 5.12. Schemat układu kinematycznego procesu mikro- i nanoskrawania na szkłe sodowym (badania zasadnicze)

W odniesieniu do poszczególnych etapów obróbki zastosowano następujące pochylenia:

- badania rozpoznawcze (szkło interferencyjne):  $0,3871^\circ$ ,
- badania zasadnicze (szkło sodowe):  $0,2604^\circ$ .

Taka kinematyka obróbki zapewnia uzyskiwanie śladów obróbkowych o zmiennych głębokościach wzdłuż ich długości (rys. 5.13).

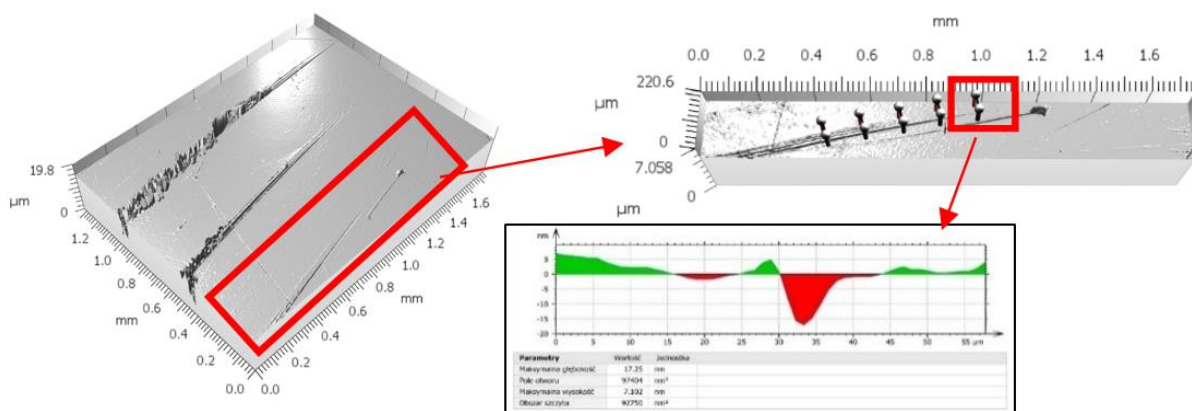


Rys. 5.13. Przykładowe kształty śladów mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym

W takich warunkach obróbki, ziarno ściernie wykonujące ruch z określoną prędkością obrotową zbliżało się do powierzchni próbki, inicjowało rysę, a wzdłuż drogi skrawania po określonym promieniu i rosnącym kącie zamocowanej próbki skrawało z przyrastającą głębokością, aż po przejściu maksymalnego zagłębienia wychodziło ze strefy obróbki. Na początku drogi głębokość ta przybierała wartość minimalną bliską zera, natomiast w okolicy środkowej długości śladu, głębokość ta osiągała wartości największe, po czym znowu jej wartość spadała do zera. Dzięki temu możliwe było zaobserwowanie i zarejestrowanie fragmentów śladu mikro- i nanoskrawania powstających w warunkach odkształceń plastycznych i warunkach kruchego pęknięcia oraz stanu przejściowego. Możliwa

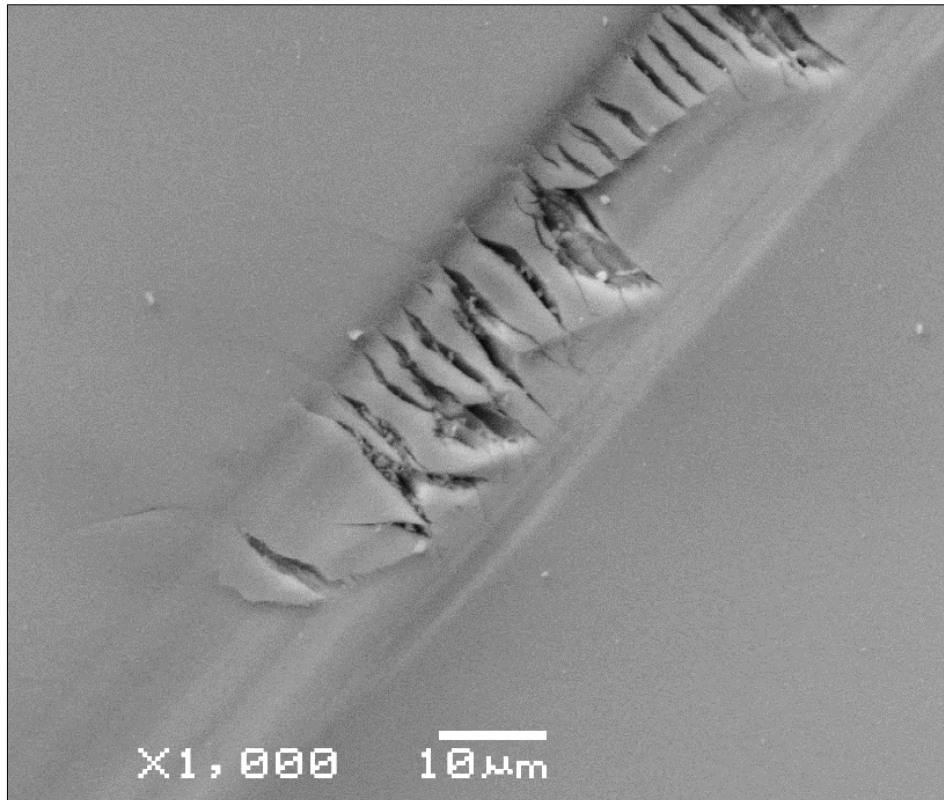
była również podwójna identyfikacja przejścia z warunków pracy ziarna z plastyczno–kruchego do krucho–plastycznego, z wyznaczeniem strefy quasi–plastycznego płynięcia materiału i quasi–kruchego pęknięcia. To pozwala również na precyzyjne zidentyfikowanie granic zmian mechanizmu plastycznego płynięcia i kruchego pęknięcia materiału oraz określenie krytycznej głębokości skrawania dla badanych materiałów.

Analizy kształtu geometrycznego i struktury śladów obróbkowych, zostały przeprowadzone z wykorzystaniem profilometru optycznego Sensofar i mikroskopu skaningowego 512JEOL-5500L. Metodą profilometrii optycznej wyznaczono przekroje poprzeczne śladów obróbkowych w obszarach gdzie proces zachodzi w warunkach plastycznego płynięcia materiału i przechodzi w fazę kruchego pęknięcia, pozwoliło to na identyfikację głębokość zarejestrowanych rys i pola ich przekrojów, a także pola przekrojów wypływek bocznych (rys. 5.14).



**Rys. 5.14.** Przykładowy widok rysy wraz z przekrojami poprzecznymi

Natomiast za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM), zarejestrowano obrazy wybranych obszarów badanych rys, charakteryzujące się odkształceniami powstałymi w warunkach plastycznego płynięcia materiału szklanego i defektów charakterystycznych dla fazy kruchego pęknięcia (rys. 5.15).

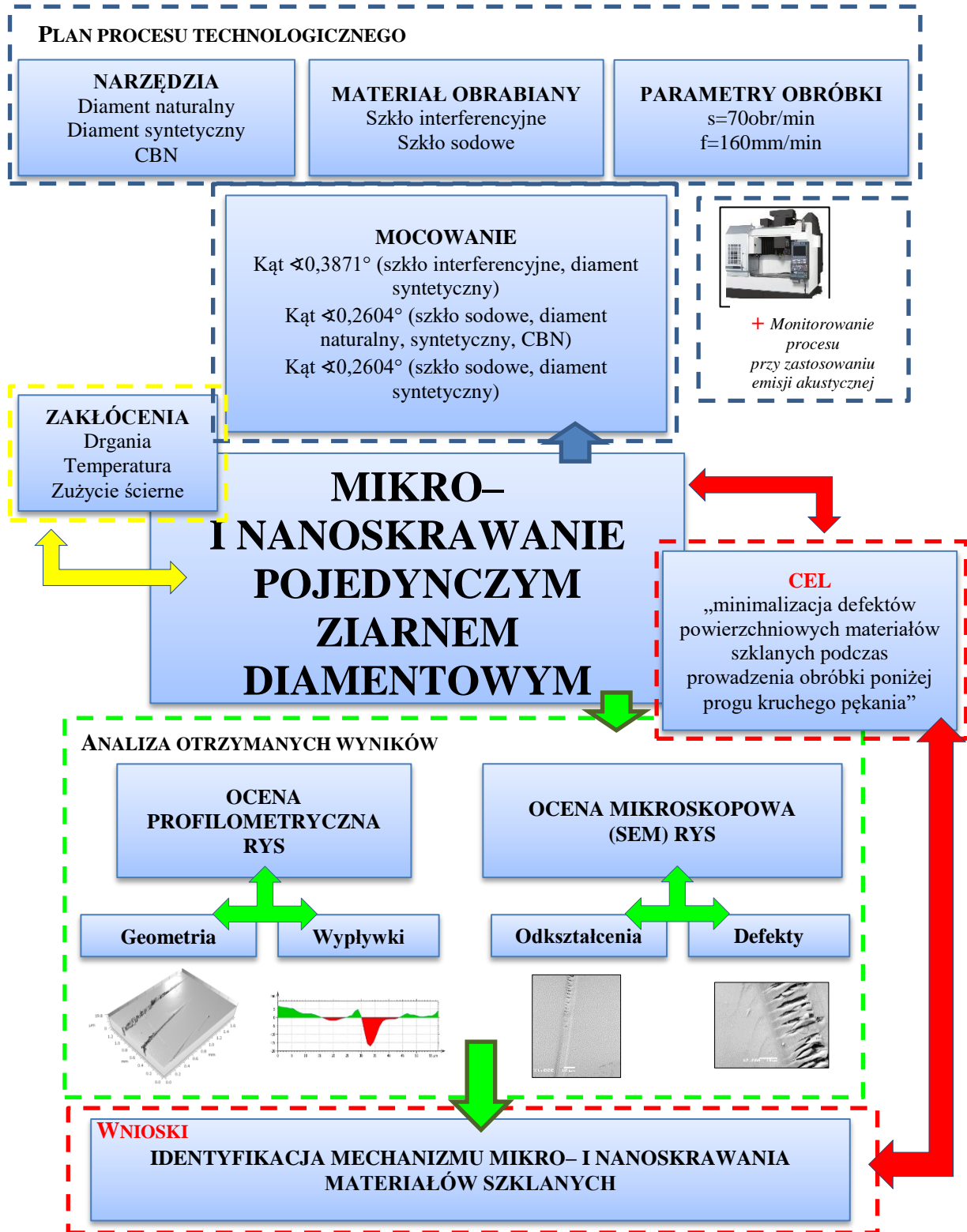


**Rys. 5.15.** Przykładowy obraz SEM rysy ze strefa przejściową między stanem odkształceń plastycznych i kruchego pęknięcia

Przyjęta metodyka badawcza procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym materiałów szklanych, umożliwia wieloaspektową ocenę warunków jego przebiegu ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk występujących na powierzchni śladu skrawania. Dotyczą one przemieszczenia materiału w strefie obróbki i analizy stanu powierzchni obrobionej.

Schemat metodyki i zakresu badań z uwzględnieniem warunków procesu mikro- i nanoskrawania oraz zakresu analizowanych wielkości wynikowych, przedstawiono na rys. 5.16.

SCHEMAT METODYKI BADAŃ: MIKRO- I NANOSKRAWANIE



Rys. 5.16. Metodyka badań procesu mikro- nanoskrawania materiałów szklanych pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym

Taki program badań umożliwia określenie granicznych wartości głębokości wnikania ziaren ściernych w poszczególnych strefach obróbki i na tej podstawie oszacowanie zakłóceń, jakie są dopuszczalne w układzie obróbkowym dla realizacji ultra precyzyjnej obróbki materiału szklanego. Pozwala też na oszacowanie maksymalnych głębokości wnikania ziaren ściernych w materiał obrabiany, przy których nie występują defekty charakterystyczne dla mechanizmu kruchego pęknięcia. Ma to istotne znaczenie dla efektywności operacji polerowania, w których zminimalizowana ilość defektów będących skutkiem kruchego pęknięcia, znacząco usprawnia ten proces obróbkowy, przy zachowaniu dobrej jakości powierzchni.

Wartości przyjętych parametrów (tj. kąt pochylenia próbek, posuw, prędkość obrotowa), umożliwiła otrzymanie odpowiednio przestrzennie ukształtowanych rys, oddalonych od siebie i umożliwiających ich analizę z zastosowaniem techniki profilometrii optycznej oraz mikroskopu skaningowego (SEM). Celem badań było uzyskanie jak najdłuższego śladu obróbkowego, aby możliwa była identyfikacja zmiany mechanizmu między plastycznym a kruchym mechanizmem usuwania materiału obrabianego. Wejście ziarna ściernego w materiał obrabiany. Kinematyka ta umożliwiła inicjację jego kontaktu narzędzia skrawającego z próbką szklaną w warunkach plastycznego płynięcia, aby następnie zarejestrować zmiany mechanizmu w fazę kruchego pęknięcia i całe spektrum przemieszczania materiału, zaniku mechanizmu kruchego pęknięcia, aż do momentu wyjścia ziarna ściernego. Chodziło o zarejestrowanie wszystkich możliwych warunków formowania rysy w procesie mikro- i nanoskrawania.

Przeprowadzone badania pozwalają na oszacowanie toru ruchu ziaren ściernych po długości i względem głębokości ich wnikania, dzięki temu możliwe jest opracowanie wytycznych do realizacji dosuwu wgłębnego umożliwiającego realizację procesu szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału szklanego w strefie szlifowania. Na tej podstawie zostaną podane przedziały dosuwu, które mają być zastosowane w projektowaniu i budowie zespołu dosuwu manometrycznego urządzenia obróbkowego.

Badania te mają charakter podstawowy, którego głównym celem jest poznanie warunków i zjawisk występujących w procesie mikro- i nanoskrawania materiałów kruchych na przykładzie szkła. Jest to szczególnie przypadek materiału kruchego, o budowie amorficznej i właściwościach izotropowych.



## 5.2.2. Charakterystyka materiałów obrabianych

Badania rozpoznawcze były przeprowadzane na szklanym krążku interferencyjnym o średnicy  $\varnothing 60\text{mm}$  oraz grubości  $15\text{mm}$ . Próbki zostały pozyskane z mikroskopu optycznego i należały do laboratorium pomiarowego Politechniki Koszalińskiej.

Badania zasadnicze były przeprowadzane na szklanych płytkach, o wymiarach  $50 \times 100 \times 2$  [mm]. Szkło w postaci płytek szklanych, to szkło sodowe. Próbki wykonane z tafli szkła, która charakteryzuje się dużą gładkością, przejrzystą powierzchnią, wolną od zniekształceń, czy wad optycznych.

## 5.2.3. Charakterystyka ziaren ściernych stosowanych w mikro- i nanoobróbce

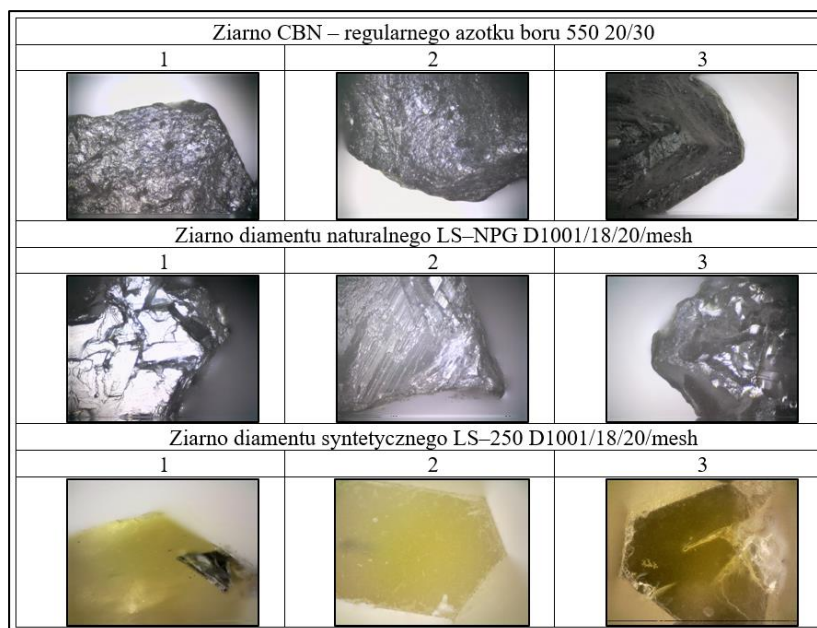
Zastosowano pojedyncze supertwarde ziarna skrawające, przeznaczone do wykonania badań rozpoznawczych oraz zasadniczych. Wybrano dziewięć sztuk ziaren, po trzy sztuki z każdego gatunku (rys. 5.17):

- grupa I: Ziarno CBN – regularnego azotku boru CBN 550 20/30 (3szt),
- grupa II: Ziarno diamentu naturalnego LS–NPG D1001/18/20/mesh (3szt),
- grupa III: Ziarno diamentu syntetycznego LS–250 D1001/18/20/mesh (3szt).



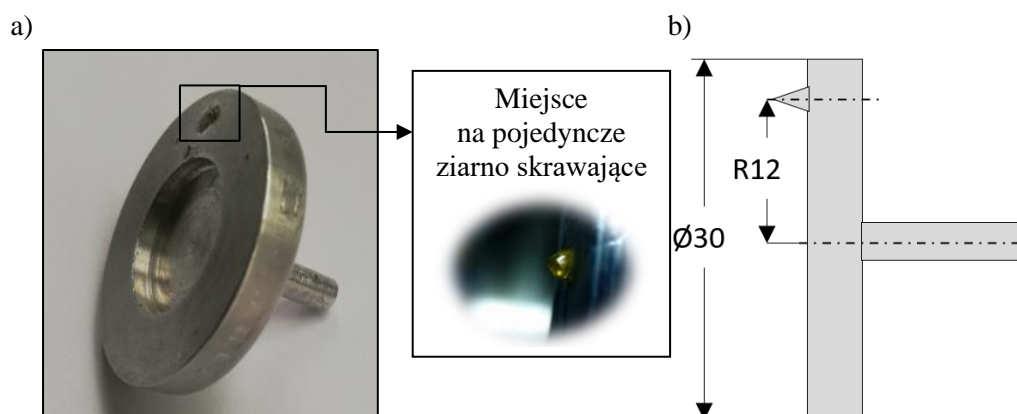
Rys. 5.17. Widok rzeczywisty ziaren skrawających (pow.  $\times 100$ )

Badania kształtu wybranych krawędzi skrawających wytypowanych ziaren, przeprowadzono za pomocą mikroskopu optycznego w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej (rys. 5.18).



**Rys. 5.18.** Widok krawędzi skrawających ziaren (pow.  $\times 100$ )

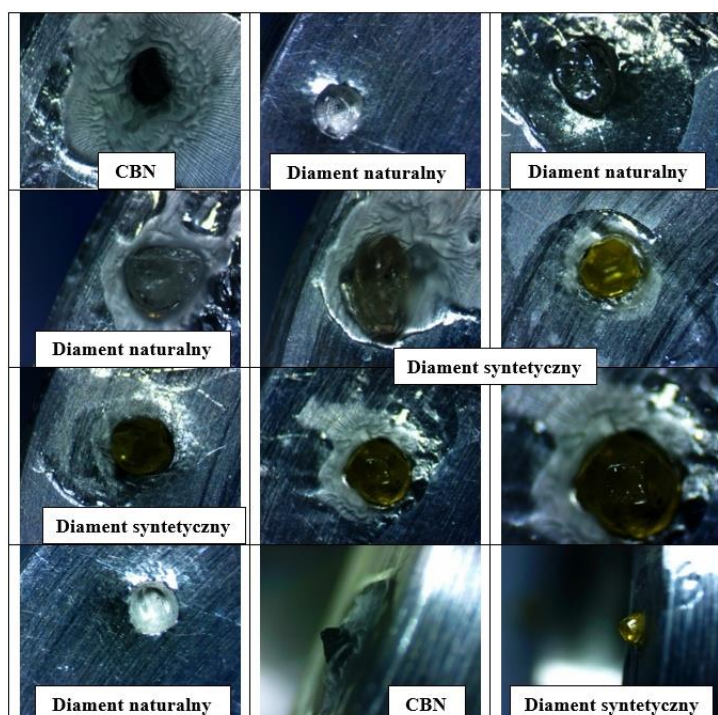
Ziarna te zostały zorientowane i zamocowane w specjalnych tarczach, które spełniały rolę uchwytu jednoostrzowych narzędzi obróbkowych. Tarcze o średnicy  $\text{Ø}30\text{mm}$  wraz z jednolitym uchwytem mocującym, zostały wykonane ze stopu aluminium o oznaczeniu 6060-T66. Wykonano je metodą toczenia w jednym zamocowaniu, w celu zapewnienia współosiowości mocowania. Natomiast ziarna skrawające zostały zorientowane i wklejone w odpowiednio ukształtowane zagłębienia, za pomocą kleju epoksydowego do metalu (rys. 5.19).



**Rys. 5.19.** Tarcza z zamocowanym ziarnem ściernym: a) widok rzeczywisty, b) rysunek 2D z wymiarami



Widok zamocowanych ziaren na czołowych powierzchniach tarcz przedstawia rys. 5.20.



**Rys. 5.20.** Widok ziaren ściernych zamocowanych na powierzchni czołowej tarczy

Poszczególne etapy badań eksperymentalnych zostały zrealizowane następującym zbiorem ziaren ściernych (tabl. 5.1).

**Tabl. 5.1.** Zakres zastosowania pojedynczych ziaren ściernych w programie badań rozpoznawczych i badań zasadniczych

<b>BADANIA ROZPOZNAWCZE (SZKŁO INTERFERENCYJNE)</b>	
<b>Lp</b>	Nazwa ziarna skrawającego
1	Diamant syntetyczny (LS-250 D1001/18/20/mesh)
<b>BADANIA ZASADNICZE (SZKŁO SODOWE)</b>	
<b>Etap 1</b>	
<b>Lp</b>	Nazwa ziarna skrawającego
1	Z2 – Ziarno CBN – regularnego azotku boru 550 20/30
2	Z4 – Ziarno diamentu naturalnego LS-NPG D1001/18/20/mesh
3	Z5 – Ziarno diamentu naturalnego LS-NPG D1001/18/20/mesh
4	Z6 – Ziarno diamentu naturalnego LS-NPG D1001/18/20/mesh
5	Z7 – Ziarno diamentu syntetycznego LS-250 D1001/18/20/mesh
<b>Etap 2</b>	
<b>Lp</b>	Nazwa ziarna skrawającego
1	Diamant syntetyczny (LS-250 D1001/18/20/mesh)

## 5.2.4. Stanowisko do realizacji procesu mikro- i nanoskrawania

Badania rozpoznawcze oraz zasadnicze procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ostrzem diamentowym zostały przeprowadzone na 3-osiowej frezarce numerycznej OKUMA GenosM560R-V ze sterowaniem OSP-P300L-R (rys. 5.21), rok produkcji 2015. Stanowisko to znajduje się w firmie M.B. Bumar-Koszalin.



Rys. 5.21. Frezarka numeryczna CNC OKUMA Genos M560R-V

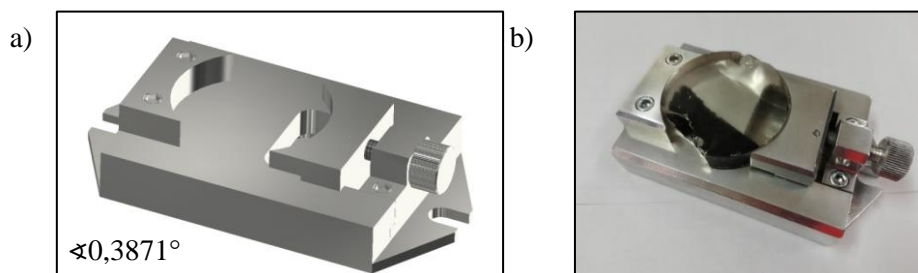
Jest to frezarka o konstrukcji bramowej i podwyższonej sztywności, sterowana nowoczesnym układem CNC (tabl. 5.2).

Tabl. 5.2. Charakterystyka techniczna frezarki numerycznej OKUMA Genos M560R-V

Specyfikacja techniczna Frezarka numeryczna OKUMA Genos M560R-V	
Sterowanie:	OSP-P300L-R
Rok produkcji:	2015
Gabaryty maszyny D x Sz x W [mm]:	2550x1800x1740
Ciężar maszyny [kg]:	4000
Powierzchnia robocza stołu X, Y [mm]:	1300 x 560
Przesuw pionowy wrzeciona Z [mm]:	650
Zakres obrotów [obr./min]:	40 – 15.000

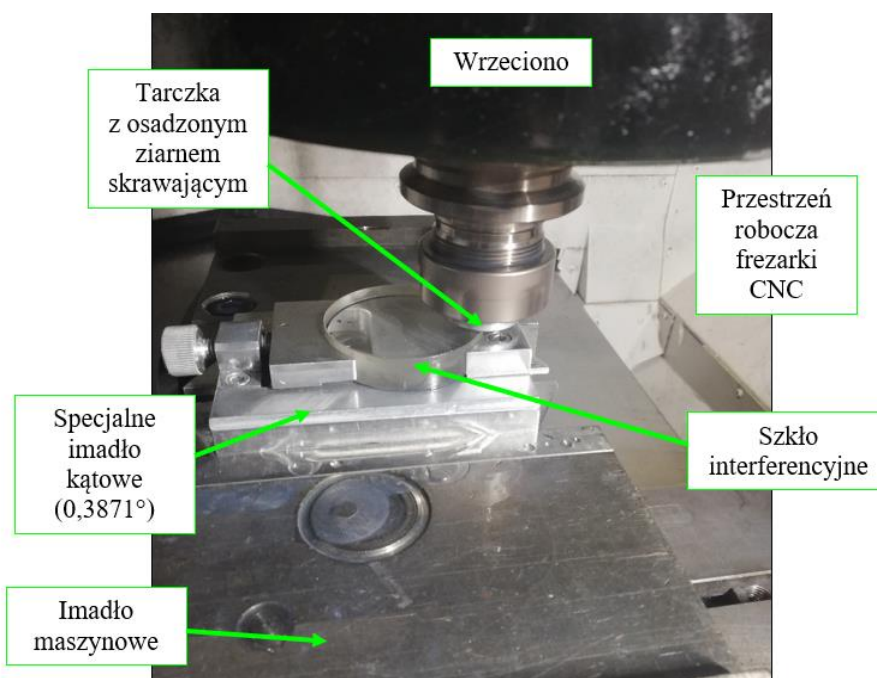
W celu przeprowadzenia badań rozpoznawczych, zaprojektowano specjalny uchwyt do mocowania próbek badawczych ze szkła interferencyjnego o średnicy  $\varnothing 60$  mm na stole frezarki. Charakteryzował się on katową powierzchnią bazową, aby zapewnić w jednym przejściu wnikanie pojedynczego ziarna ze zmienną głębokością. Pochylenie

wynosiło 1mm na 148mm długości, co daje kąt pochylenia równy  $\approx 0,3871^\circ$ . Uchwyt został wykonany ze stopu aluminium gat. 6060-T66 (rys. 5.22).



**Rys. 5.22.** Uchwyt mocujący próbki ze szkła interferencyjnego: a) model trójwymiarowy b) widok uchwytu wraz z zamocowaną próbką badawczą ze szkła interferencyjnego

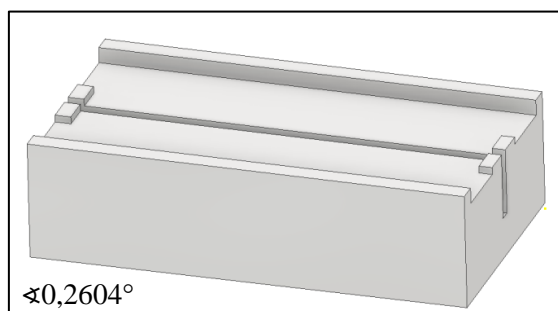
Sposób orientacji i mocowania uchwytu na stole frezarki OKUMA Genos M560R-V przedstawiono na rys. 5.23.



**Rys. 5.23.** Widok uchwytu kąтового wraz z zamocowanym szkłem interferencyjnym na frezarce numerycznej CNC OKUMA Genos M560R-V

Badania zasadnicze były przeprowadzane z zastosowaniem płytek szkła sodowego wymiarach 100x50x2mm. W tym celu zaprojektowano uchwyt mocujący, charakteryzujący się katową powierzchnią bazową, aby zapewniający w jednym przejściu wnikanie pojedynczego ziarna ściernego z różną głębokością. Uchwyt ten posiadał kąt pochylenia powierzchni bazowej przeznaczonej do ustalania i mocowania próbki równy  $0,2604^\circ$

(rys. 5.24). Ten sposób mocowania kąтового został wykorzystane przy badaniach doświadczalnych procesu mikro- i nanoskarawania pojedynczym ziarnem diamentowym.



**Rys. 5.24.** Uchwyt do mocowania i kątowej orientacji badanych próbek w badaniach zasadniczych

## 5.2.5. Stanowiska pomiarowe

Analizę kształtu i struktury powierzchniowej otrzymanych rys, ukształtowanych w procesie mikro- i nanoskrawania, przeprowadzono z zastosowaniem metody profilowania profilometrem optycznym i mikroskopu skaningowego.

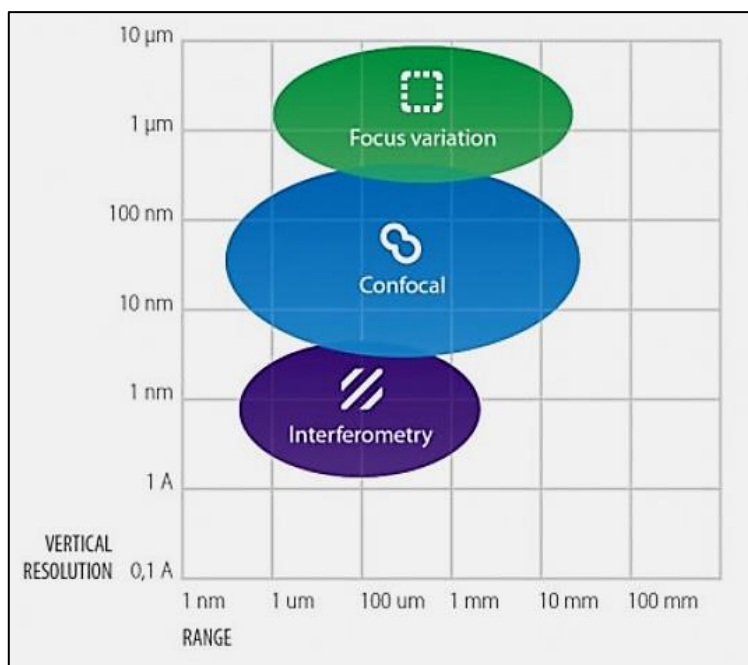
### 5.2.5.1. Profilometr optyczny

Profilometr optyczny Sensofar jest wyposażony w wysokiej klasy głowicę pomiarową o nazwie Sensofar Metrology. Umożliwia bezstykowy pomiar trzema optycznymi metodami: konfokalną, interferometryczną i fokus variation. Takie możliwości pomiarowe umożliwiają pomiary wykonywane bezdotykowo, wykonywane w przestrzeni trójwymiarowej oraz pozwalają na błyskawiczną analizę przetwarzanych danych (rys. 5.25) [86,87].

Główne zastosowania tego typu profilometru to: pomiary chropowatości powierzchni 2D i 3D, ocena struktury geometrycznej powierzchni, pomiary wysokości/wgłębień, wizualizacja 3D powierzchni, obliczanie pól i objętości powierzchni.

- technika konfokalna (ang. confocal) – przeznaczona jest przede wszystkim do wykonywania pomiarów powierzchni charakteryzujących się dużym kątem nachylenia. Umożliwia pomiary struktury geometrycznej powierzchni od bardzo gładkich, do wykazujących dużą chropowatość, przy próbkowaniu przestrzennym o wartości  $0,10\mu\text{m}$ . Profilometry konfokalne charakteryzują się dużym powiększeniem obrazu (150x),

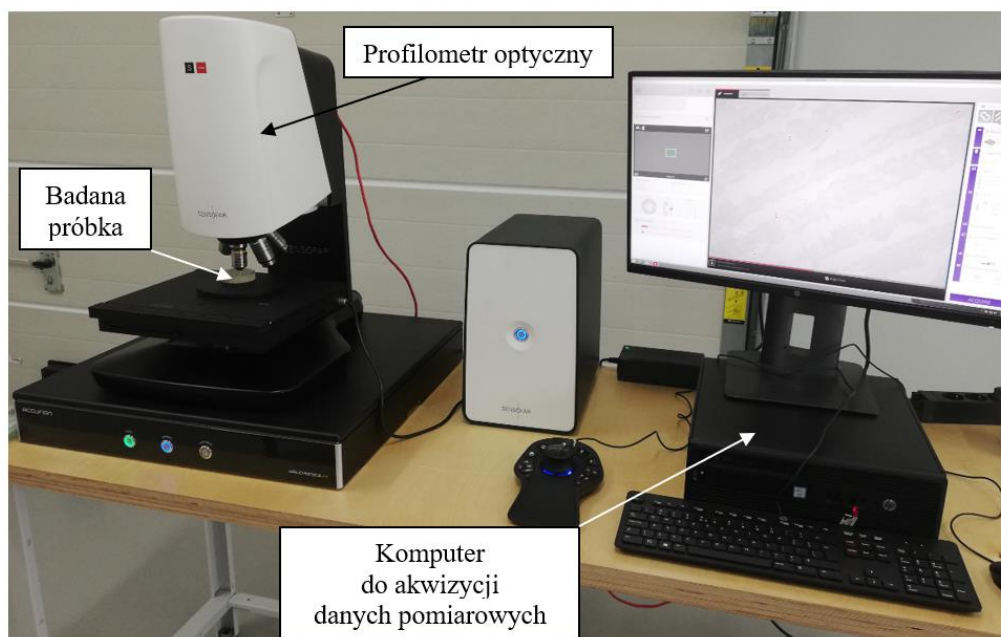
- technika interferometryczna (ang. interferometry) – umożliwia otrzymanie największej pionowej rozdzielczości. Ta technika jest oparta na wykorzystaniu białych pionowych próżków interferencyjnych i skanowaniu. Sprawdza się przy pomiarze zarówno powierzchni gładkich, jak i umiarkowanej chropowatości, przy zapewnieniu dokładności nanometrycznej w kierunku wertykalnym.
- technika zmiennej ostrości (ang. Focus Variation) – zapewnia możliwość prowadzenia pomiaru kształtu powierzchni w bardzo krótkim czasie (kilka sekund). Jest techniką przeznaczoną do pomiaru kształtu powierzchni charakteryzujących się dużą nierównością. Metoda ta została specjalnie opracowana, aby stanowić uzupełnienie pomiarów wykonywanych metodą konfokalną wykonywaną przy zastosowaniu małego powiększenia. Charakteryzuje się dużą szybkością i zakresem pomiarowym.



**Rys. 5.25.** Metody pomiarowe dostępne w profilometrze optyczny firmy Sensofar  
**Źródło:** [86,87]

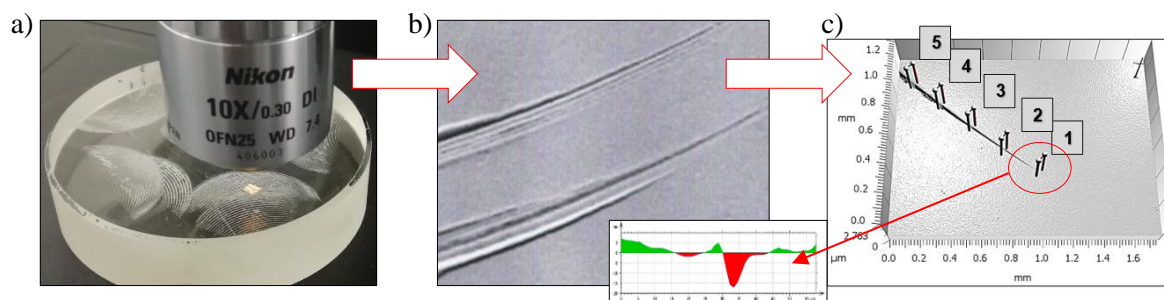
Przeprowadzona identyfikacja śladów obróbkowych przy wykorzystaniu profilometru optycznego (rys. 5.26), umożliwia zobrazowanie początkowej fazy wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał nawet dla głębokości kilku nanometrów.





*Rys. 5.26. Profilometr optyczny firmy Sensofar*

Realizowane badania umożliwiły zobrazowanie kształtu rysy powstałej na skutek przejścia ziarna ściernego zgodnie z zaprojektowaną trajektorią i identyfikacje zmiany tego kształtu w wybranych obszarach. Dzięki temu uzyskano zdjęcia profilometryczne analizowanych obszarów i na tej podstawie oceniono geometrię przekroju analizowanego śladu w funkcji głębokości penetracji ziarna ściernego na wybranym obszarze płytki szklanej (rys. 5.27).



*Rys. 5.27. Przykładowy moment inicjacji rysy powstałej w procesie nanoskrawania: a) widok ogólny, b) miejsca analizowanych przekroi poprzecznych, c) przekrój poprzeczny rysy*

## 5.2.5.2. Elektronowy mikroskop skaningowy

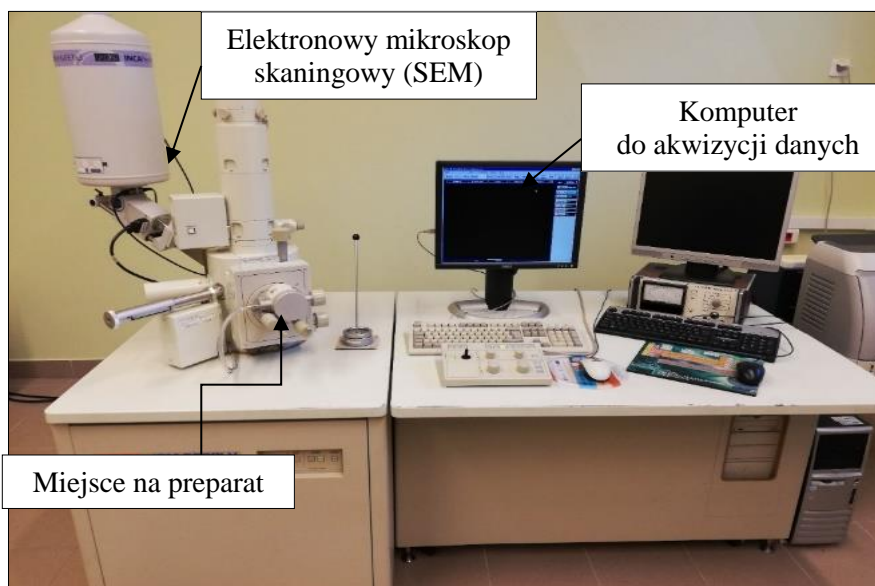
W elektronowym mikroskopie skaningowym (rys. 5.28) do badani obiektów, wykorzystywana jest wiązka elektronowa zapewniająca uzyskanie obrazu o parametrach (powiększenie, rozdzielczość) znacznie większych, niż dla klasycznej mikroskopii świetlnej. Techniki transmisyjnej mikroskopii elektronowej umożliwiają uzyskiwanie

obrazów z rozdzielczością rzędu  $0,1 \div 0,05 \text{ nm}$ . Jest to jednocześnie zdolność rozdzielcza około 4 000 000 razy lepsza, niż rozdzielczość, z jaką widzi nieuzbrojone oko ludzkie. Swoją nazwę skaningowe mikroskopy elektronowe (SEM) wzięły od metody tworzenia obrazu, przy wykorzystaniu skokowego ruchu wiązki elektronów po analizowanej powierzchni materiału badawczego. Stosowana wiązka o napięciu w zakresie  $1 \div 30 \text{ kV}$  nie przenika przez badany preparat. Wiązka pierwotnych elektronów jest emitowana przez katodę. Zastosowane soczewki elektromagnetyczne służą do skupiania wiązki, natomiast cewki odpowiadają za odchylenie wiązki, nadając jej ruch skokowy. Przy wykorzystaniu możliwości odchylenia wiązki elektronów jest możliwość regulacji obrazu przez jego oddalenie bądź powiększenie. Wytworzone elektrony które padają na badaną powierzchnię ulegają częściowemu rozproszeniu (elektrony BSE) oraz częściowo wnikają do badanego obiektu, co przyczynia się do emisji wtórnych elektronów (SE), jak również światła widzialnego i promieni rentgenowskich. Zamontowane w urządzeniu detektory umożliwiają przetworzenie sygnałów elektronowych na sygnał cyfrowy, co umożliwia uzyskanie obrazu. Aby cały ten proces mógł się odbyć w kolumnie skaningowego mikroskopu elektronowego jest wytworzona i utrzymana próżnia. Jeżeli chodzi o możliwości do uzyskania określonej zdolności rozdzielczej mikroskopu to zależy ona ściśle od średnicy wiązki (do kilkuset tysięcy razy). Powstające obrazy przy wykorzystaniu technologii SEM mają formę przestrzenną i przypominają obrazy które może zarejestrować oko ludzkie, a pozostałe informacje o analizowanym preparacie są otrzymywane przy wykorzystaniu sygnałów które pochodzą wprost z odbitych elektronów (BSE), przez co uzyskujemy informacje o zróżnicowaniu obiektu pod względem chemicznym. Zdolność mikroskopu do odbijania elektronów jest zawsze wprost proporcjonalna do kwadratu liczby atomowej. W takim przypadku największa ilość informacji jest dostarczana przez kontrast topograficzny który powstaje w trakcie emisji wtórnych elektronów (SE). Aby umożliwić charakterystykę struktury wewnętrznej należy wykorzystać wiązki które ulegają ugięciu dzięki czemu umożliwiają emisję sygnału dyfrakcji elektronów (EBSD). Elektrony które są absorbowane (AE) tworzą negatywy obrazów odbitych elektronów. Najczęściej analizowane są te dwa typy uzyskanych obrazów razem. Natomiast wytwarzane rentgenowskie promieniowanie umożliwia dostarczenie informacji o chemicznym składzie badanego preparatu. Elektronowy mikroskop skaningowy jest stosowany jako urządzenie pomiarowo-badawcze



# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

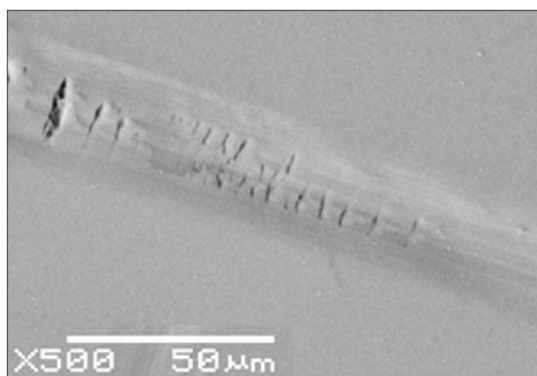
w celu przeprowadzenia analiz stanu powierzchni oraz oceny morfologicznej. Mikroskopy tego typu stosowane są z powodzeniem w celu prowadzenia obserwacji zarówno cząstek należących do materii żywej oraz nieżywej. Są powszechnie stosowane w takich dyscyplinach nauki jak: biologia, chemia, fizyka, medycyna, materiałoznawstwo, czy inżynieria. Przy ich użyciu można uzyskać informacje dotyczące oceny powierzchni, wewnętrznej budowy, czy składu chemicznego. Badany preparat powinien charakteryzować się grubością do 2,5cm, a jego pozostałe gabaryty są ograniczone przestrzenią przeznaczoną na badaną próbkę w komorze próżniowej mikroskopu. W przypadku obiektów z powodzeniem przewodzących prąd elektryczny przygotowanie próbki ogranicza się tylko do wstępnego oczyszczenia, w przeciwnym przypadku istnieje możliwość napylenia cienkiej warstwy jednego z określonych metali szlachetnych na powierzchnię przeznaczoną do badania [89].



**Rys. 5.28.** Mikroskop skaningowy Jeoll 512JEOL Jsm-5500LV

Wykonane zdjęcia skaningowe w określonym powiększeniu, umożliwiły przeprowadzenie analizy ślady powierzchniowej poszczególnych fragmentów rys, uzyskanych w procesie mikro- i nanoskrawania. Badania przeprowadzono w sposób analogiczny, jak na profilometrze optycznym, poszukując obszaru inicjacji kontaktu diamentowego ziarna ściernego z powierzchnią płytki szklanej oraz prowadząc analizę powstałej struktury powierzchniowej wzdłuż długości rysy. Dokonano serię zdjęć wzdłuż rysy przechodząc od najmniejszej do największej głębokości wnikania ziarna ściernego

w materiał obrabiany. Na podstawie przeprowadzonych analiz zidentyfikowano kilka obszarów o zmiennej charakterystyce (rys. 5.29).



*Rys. 5.29. Obraz skaningowy mikrorzysy otrzymanej w procesie mikro- i nanoskrawania próbki szklanej pojedynczym ziarnem diamentowym*

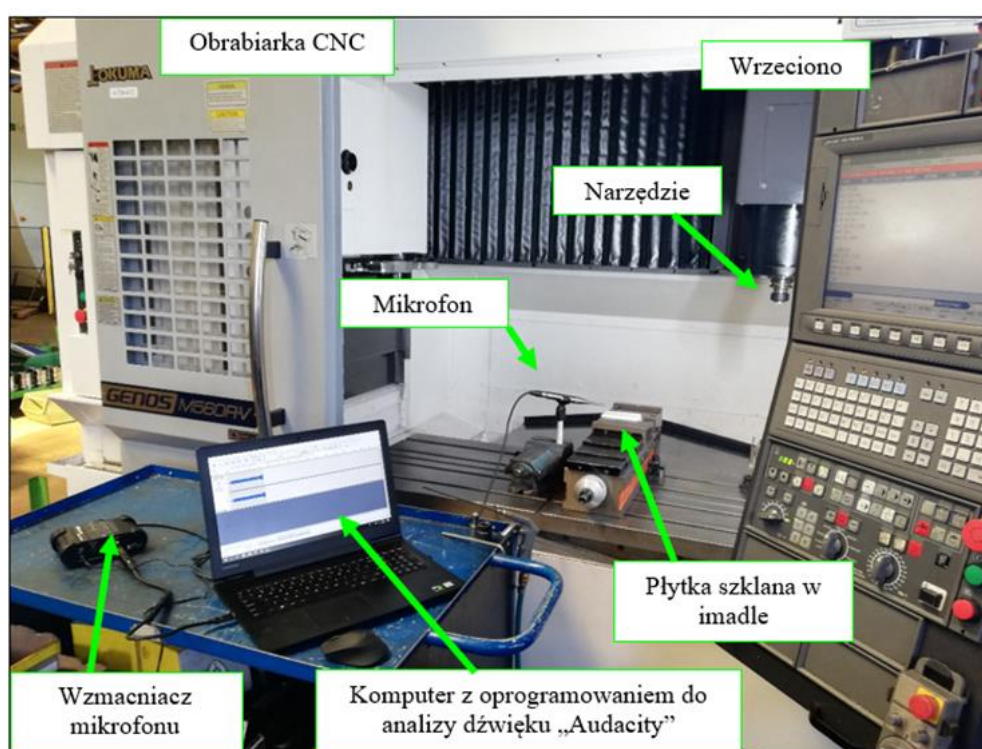
## **5.2.6. Analiza przemieszczania materiału szklanego w strefie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym**

### **5.2.6.1. Badania rozpoznawcze**

Badania rozpoznawcze procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentu syntetycznego LS-250 D1001/18/20/mesh, obrabiając materiał kruchy w postaci szkła interferencyjnego. Badania rozpoznawcze zostały wykonane na frezarce CNC OKUMA Genos M560R-V, przy wykorzystaniu specjalnie skonstruowanego i wykonanego uchwytu mocującego. Proces ten został przeprowadzony przy prędkości  $v_s=70$  obr/min i posuwie  $f=160$  mm/min, przy kątovej orientacji próbki skrawanej o kącie pochylenia równym  $\approx 0,3871^\circ$ . Wraz z postępującym ruchem ziarna diamentowego, uzyskiwano stałe zwiększanie głębokości jego wnikania w strukturę materiału skrawanego, aż do osiągnięcia maksymalnej głębokości, po osiągnięciu której, ziarno zostawało wyprowadzane ze struktury szkła po trajektorii ruchu będącej wypadkową ruchu obrotowego i posuwowego. Dzięki temu, możliwe było uzyskanie efektu umożliwiającego płynne przejście między stanem plastycznego płynięcia materiału, obszarem przejścia między plastycznym, a kruchym mechanizmem usuwania materiału, aby w obszarze największego zgłębienia ziarna ściernego w materiał obrabiany, uzyskać efekt absolutnego mechanizmu kruchego pęknięcia w postaci występowania wszystkich defektów występujących w tej fazie. A następnie kontynuowanie przejścia ziarna ściernego po ustalonej trajektorii zmniejszającej głębokość wnikania ostrza w materiał obrabiany,

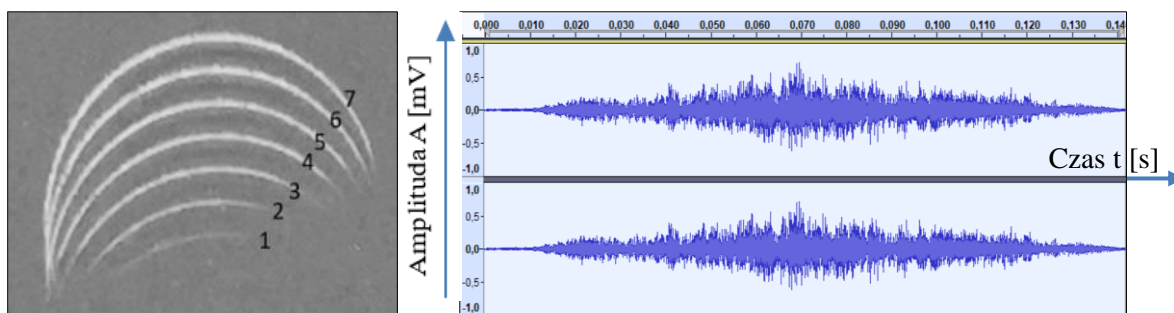
aż do całkowitego wyprowadzenia ziarna ściernego nad powierzchnię skrawania. Stasując taką kinematykę procesu uzyskano zidentyfikowane granice zmian mechanizmu plastycznego płynięcia i kruchego pęknięcia zarówno na etapie wejścia ziarna ściernego w materiał badany, jak i jego wyjście ze strefy obróbki.

Celem badań rozpoznawczych była stabilizacja warunków kształtowania rys na całej ich długości w taki sposób, aby obszar wejściowy i wyjściowy narzędzia, był kształtowany w możliwie maksymalnie zbliżonych warunkach. W tym celu pozycjonowano położenia próbki pomiarowej z zastosowaniem mikrofonu akustycznego firmy Earthworks® High Definition Microphones™, Model M30, o numerze seryjnym 5646I (czułość przy 1kHz: 26,3 mV/Pa,) (rys. 5.30).



**Rys. 5.30.** Sposób pomiaru sygnału emisji akustycznej z zastosowaniem mikrofonu pomiarowego na frezarce numerycznej CNC OKUMA Genos M560R-V

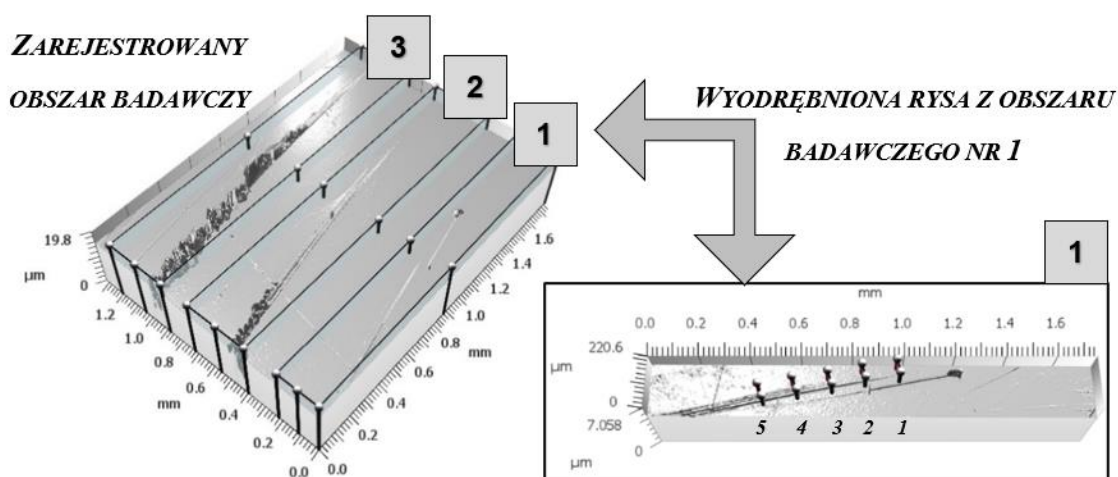
Jego zastosowanie pozwoliło do rejestracji sygnału emisji akustycznej w obszarze roboczym, umożliwiło przeprowadzenia rozpoznawczych analiz warunków pracy ziarna a) w procesie w kolejnych etapach przejściach pracy, według zaprojektowanej trajektorii ruchu roboczego (rys. 5.31).



**Rys. 5.31.** Zdjęcia przedstawiające a) widok zespołu rys powstających w ustabilizowanych warunkach, b) symetryczne przebiegi sygnału emisji akustycznej

Otrzymane przebiegi świadczyły o ustabilizowanych warunkach procesu mikro- i nanoskrawania oraz symetrii śladu obróbkowego wzdłuż jego długości.

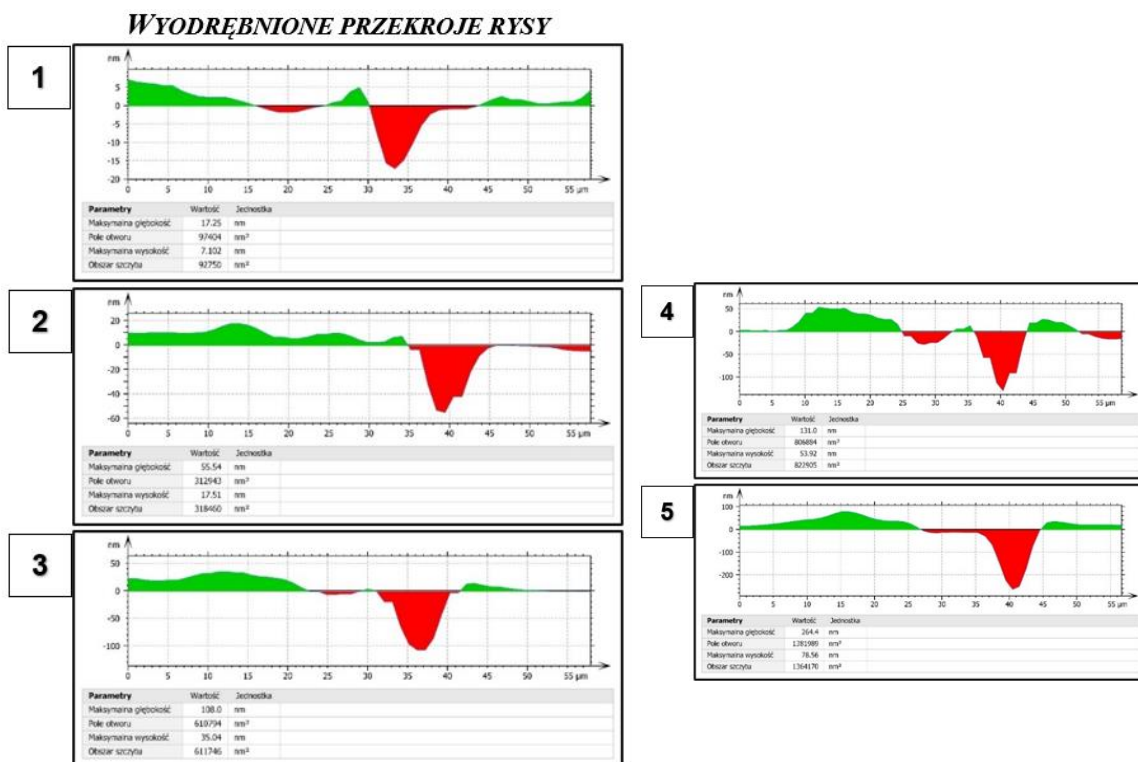
W celu określenia parametrów geometrii śladu przejścia ziarna ściernego na płycie szklanej, zastosowano badanie profilometryczne, umożliwiające rejestrację topografii powierzchni rysy. Otrzymane rysy zostały wyodrębnione z danego obszaru badawczego i poddane analizie w określonych przekrojach (rys. 5.32).



**Rys. 5.32.** Sposób wyodrębniania pojedynczych rys z obszaru pomiarowego

Szczególną uwagę zwrócono na możliwości analizy właściwości rys we wstępnym obszarze ich inicjacji oraz w obszarze wyjścia ziarna skrawającego. Wynika to ze stworzenia możliwości analizy rysy przy najmniejszych zagłębieniach ziarna, w celu obserwacji plastycznych odkształceń kruchego materiału szklanego w strefie obróbki. Zbiór

kolejnych przekroji rysy w jej początkowej fazie przedstawiono na rys. 5.33



**Rys. 5.33.** Etapy procesu analizy rys przy wykorzystaniu oprogramowanie MountainsLab Premium 8.0

Taki sposób prowadzenia badań zapewnia możliwości ilościowej analizy charakterystycznych cech geometrycznych badanych rys oraz ich przebiegu w funkcji zmian głębokości wnicania ziaren ściernych. Cechami tymi są:

- kształt i pole przekroju rys,
- głębokość rys,
- wielkość i rozkład wypływek bocznych.

### 5.2.6.2. Badania zasadnicze

Po weryfikacji otrzymanych wyników w badanych rozpoznawczych, przeprowadzono badania właściwe procesu mikro– i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym w dwóch etapach. Materiał skrawany w każdym z tych sposobów stanowiło szkło sodowe, proces mikro– i nanoskrawania przeprowadzono przy stałych parametrach obróbkowych  $s=70$ obr/min oraz  $f=160$ mm/min, na maszynie numerycznej CNC OKUMA Genos M560R–V. Poszczególne etapy charakteryzowały się następującymi warunkami badań:



**Etap 1:** zastosowano różne ziarna ściernie, różniące się właściwościami skrawnymi oraz różną geometrią (diament naturalny, syntetyczny oraz CBN). Badane próbki mocowanie w imadle o kącie pochylenia  $\alpha 0,2604^\circ$ , dzięki czemu uzyskano w każdym przejściu przyrost głębokości wnikania pojedynczego ziarna. Wykonano badania doświadczalne dla dziewięciu próbek szkła płaskiego (nie wszystkie próby nadawały się do dalszych analiz). Na profilometrze optycznym przeanalizowano po jednej rysie z pięciu próbek (przeanalizowano mniej próbek niż wykonano, z różnych powodów: wykruszenie ziarna, niedokładność mocowania). W tym etapie przeanalizowano 22 rysy.

**Etap 2:** zastosowano pojedyncze ziarna ściernie z diamentu syntetycznego i zastosowano mocowanie w imadle o kącie pochylenia  $\alpha 0,2604^\circ$ , uzyskując w każdym przejściu przyrost głębokości wnikania pojedynczego ziarna diamentowego. Wykonano badania doświadczalne dla pięciu próbek szkła płaskiego. W tym etapie przeanalizowano 10 rys.

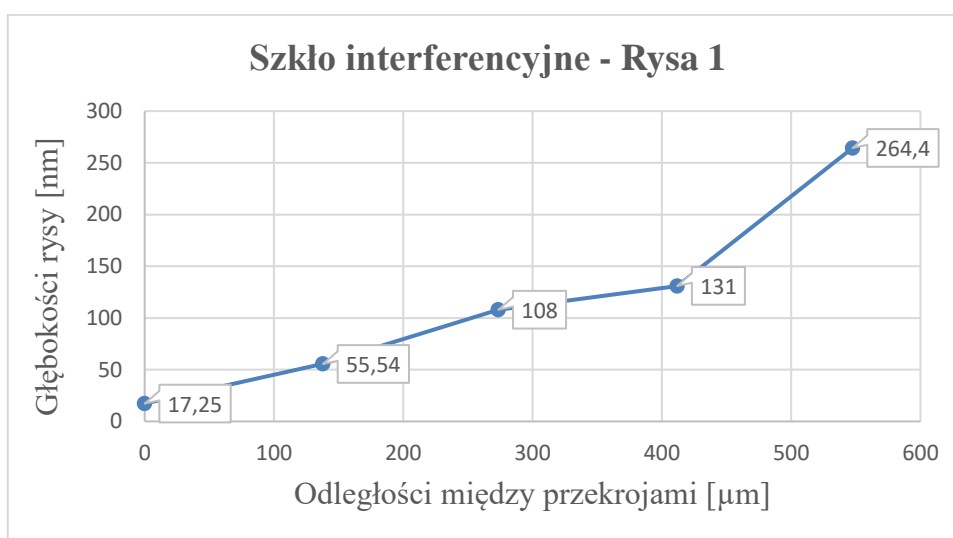
Z wykorzystaniem profilometru optycznego Sensofar wykonano pomiary otrzymanych mikro- i nanorys wykonanych w poszczególnych etapach badań. Przy wykorzystaniu oprogramowania MountainsLab Premium 8.0 dla każdej z analizowanych mikro- i nanorys, wykonano modele trójwymiarowe. Następnie utworzono po pięć przekrojów każdej z rys, w celu uzyskania informacji o minimalnej głębokości inicjacji procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym, która w sposób niebudzący wątpliwości, mogła zostać uchwycona w badaniach przy wykorzystaniu profilometrii optycznej. Ponadto uzyskano dodatkowe informacje istotne w analizie procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Są to dane dotyczące: głębokości wnikania ziarna ściernego pod kątem identyfikacji granicy zmiany procesu plastycznego płynięcia, a kruchego pęknięcia, korelacji objętości zagłębienia rysy do objętości wypływek, która niesie z informację o zmianie charakteru analizowanego procesu.

Przy wykorzystaniu profilometru optycznego firmy Sensofar udało się zarejestrować rysy które powstały na szkłe interferencyjnym zamocowanym w uchwycie kątowym ( $\alpha 0,3871^\circ$ ). Następnie w programie służącym do analizy topografii powierzchni, uzyskano dane które posłużyły do dalszych identyfikacji faz obróbki (plastyczny-kruchy). Tym sposobem przeanalizowano 10 rys, pozyskane dane stabelaryzowano, a następnie utworzono na ich podstawie wykresy i utworzono zestawienie porównawcze dotyczące wszystkich rys (tabl. 5.3).

**Tabl. 5.3.** Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle interferencyjnym

Numer przekroju	Maksymalna głębokość rysy	Maksymalna głębokość rysy	Odległości między przekrojami	Odległości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Calkowita odległość między przekrojami	Calkowita odległość między przekrojami	Calkowity przyrost głębokości między przekrojami	Calkowity przyrost głębokości między przekrojami
Lp.	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]
<b>SZKŁO INTERFERENCYJNE (kąt <math>0,3871^\circ</math>)</b>										
1	g <sub>1</sub>	17,25	l <sub>1</sub>	137,92	g <sub>1-2</sub>	38,29	lc <sub>1-5</sub>	547,51	gc <sub>1-5</sub>	247,15
2	g <sub>2</sub>	55,54	l <sub>2</sub>	135,63	g <sub>2-3</sub>	52,46	-	-	-	-
3	g <sub>3</sub>	108	l <sub>3</sub>	138,33	g <sub>3-4</sub>	23	-	-	-	-
4	g <sub>4</sub>	131	l <sub>4</sub>	135,63	g <sub>4-5</sub>	133,4	-	-	-	-
5	g <sub>5</sub>	264,4	-	-	-	-	-	-	-	-

Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.34), na którym zaobserwować można zarejestrowane metodą profilometrii optycznej głębokości rysy utworzonej przez pojedyncze diamentowe ziarno ściernie. Oznaczone głębokości pochodzą z pięciu przekrojów analizowanej rysy w funkcji przebytej przez ziarno ściernie drogi.

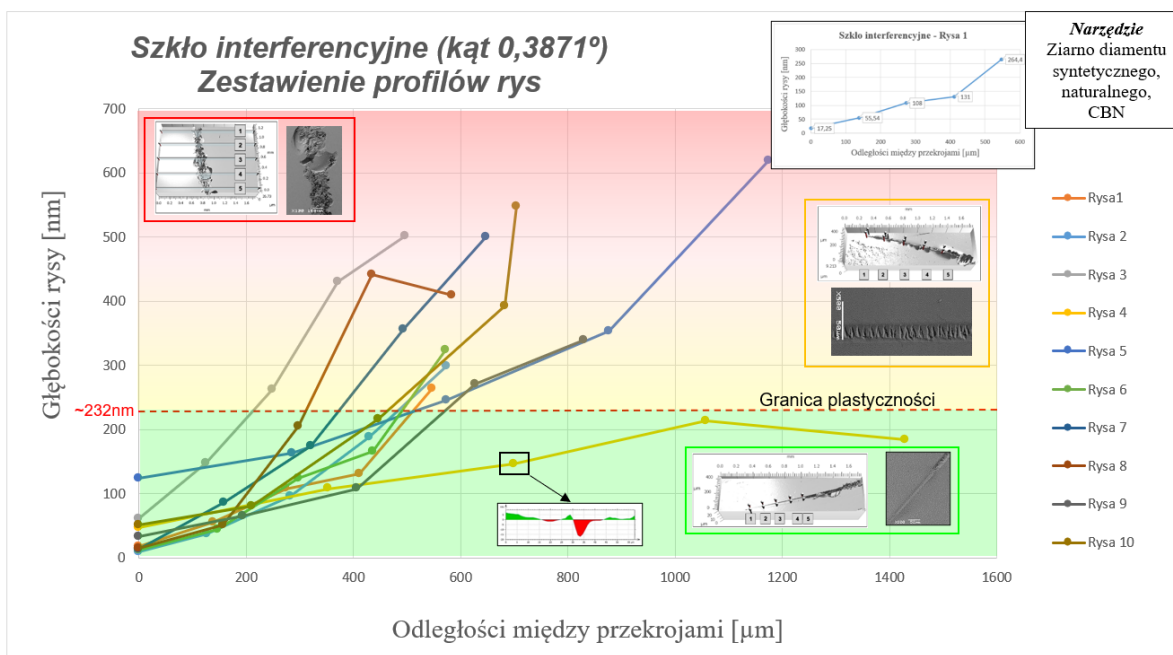


**Rys. 5.34.** Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkle interferencyjnym

Na podstawie tak przeprowadzonego procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym dla szkła interferencyjnego zebrano następujące dane (rys. 5.35):

- zidentyfikowane głębokości rys:  $g_r = \langle 8,722\text{nm}; 619\text{nm} \rangle$
- średnie odległości między przekrojami:  $l_s = 189\text{nm}$
- ilość przeanalizowanych rys:  $i_r = 10\text{szt}$





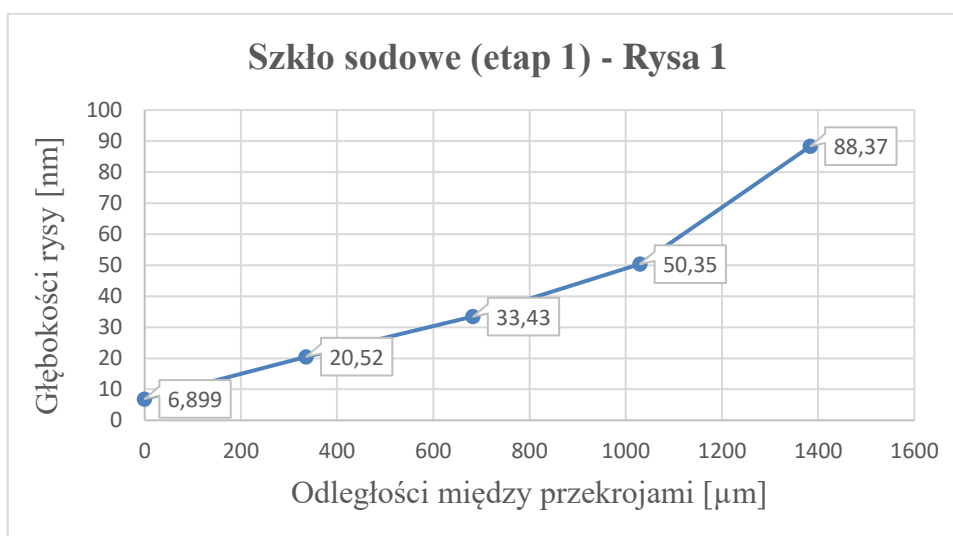
**Rys. 5.35.** Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkle interferencyjnym

Przy wykorzystaniu profilometru optycznego firmy Sensofar udało się zarejestrować rysy które powstały na szkle sodowym (etap 1), zamocowanym w uchwycie kątowym ( $\approx 0,2604^\circ$ ). Następnie w programie służącym do analizy topografii powierzchni, uzyskano dane które posłużyły do dalszych identyfikacji faz obróbki (plastyczny–kruchy). Tym sposobem przeanalizowano 22 rysy, pozyskane dane stabelaryzowano, a następnie utworzono na ich podstawie wykresy i utworzono zestawienie porównawcze dotyczące wszystkich rys (tabl. 5.4).

**Tabl. 5.4.** Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle sodowym (etap 1)

Numer przekroju	Maksymalna głębokość rysy	Maksymalna głębokość rysy	Odległości między przekrojami	Odległości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Całkowita odległość między przekrojami	Całkowita odległość między przekrojami	Całkowity przyrost głębokości między przekrojami	Całkowity przyrost głębokości między przekrojami
Lp.	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]
<b>SZKŁO PŁASKIE METODA 1 (kąt 0,2604°)</b>										
1	g <sub>1</sub>	6,899	l <sub>1</sub>	336,09	g <sub>1-2</sub>	13,621	lc <sub>1-5</sub>	1384,05	gc <sub>1-5</sub>	81,471
2	g <sub>2</sub>	20,52	l <sub>2</sub>	346,64	g <sub>2-3</sub>	12,91	-	-	-	-
3	g <sub>3</sub>	33,43	l <sub>3</sub>	346,79	g <sub>3-4</sub>	16,92	-	-	-	-
4	g <sub>4</sub>	50,35	l <sub>4</sub>	354,53	g <sub>4-5</sub>	38,02	-	-	-	-
5	g <sub>5</sub>	88,37	-	-	-	-	-	-	-	-

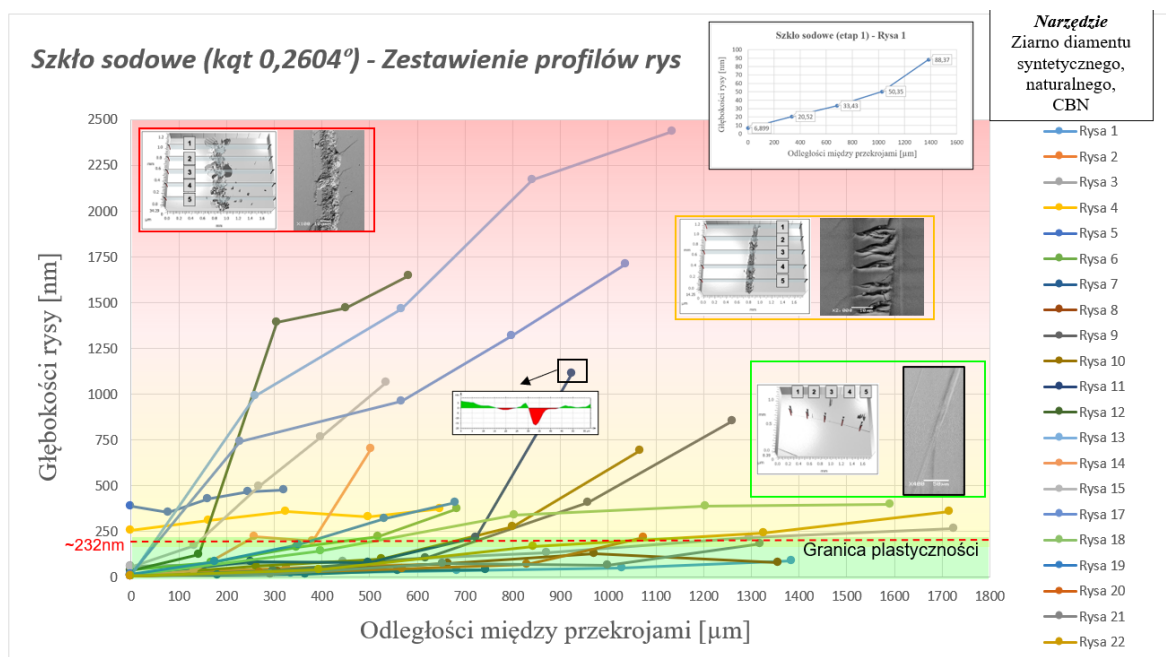
Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.36), na którym zaobserwować można zarejestrowane metodą profilometrii optycznej głębokości rysy utworzonej przez pojedyncze ziarno ściernie. Oznaczone głębokości pochodzą z pięciu przekrojów analizowanej rysy w funkcji przebytej przez ziarno ściernie drogi.



**Rys. 5.36.** Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkle sodowym (etap 1)

Na podstawie tak przeprowadzonego procesu zebrano następujące dane (rys. 5.37):

- zidentyfikowane głębokości rys:  $g_r = \langle 5,828\text{nm}; 12530\text{nm} \rangle$
- średnie odległości między przekrojami:  $l_s = 250\text{nm}$
- ilość przeanalizowanych rys:  $i_r = 22\text{szt}$



**Rys. 5.37.** Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkle sodowym (etap 1)

Następnie, również przy wykorzystaniu profilometru optycznego firmy Sensofar udało się zarejestrować rysy które powstały na szkle sodowym (etap 2), zamocowanym w uchwycie kątowym ( $\approx 0,2604^\circ$ ). Następnie w programie służącym do analizy topografii powierzchni, uzyskano dane które posłużyły do dalszych identyfikacji faz obróbki (plastyczny–kruchy). Tym sposobem przeanalizowano 10 rys, pozyskane dane stabelaryzowano, a następnie utworzono na ich podstawie wykresy i utworzono zestawienie porównawcze dotyczące wszystkich rys (tabl. 5.5).

**Tabl. 5.5.** Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle sodowym (etap 2)

Numer przekroju	Maksymalna głębokość rysy	Maksymalna głębokość rysy	Odległości między przekrojami	Odległości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Przyrost głębokości między przekrojami	Całkowita odległość między przekrojami	Całkowita odległość między przekrojami	Całkowity przyrost głębokości między przekrojami	Całkowity przyrost głębokości między przekrojami
Lp.	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]	oznaczenie	$\mu\text{m}$	oznaczenie	[nm]
<b>SZKŁO PŁASKIE METODA 2 (kąt 0,2604°)</b>										
1	g <sub>1</sub>	5,569	l <sub>1</sub>	307,29	g <sub>1-2</sub>	27,421	lc <sub>1-5</sub>	1300,21	gc <sub>1-5</sub>	155,231
2	g <sub>2</sub>	32,99	l <sub>2</sub>	331,04	g <sub>2-3</sub>	26,72	-	-	-	-
3	g <sub>3</sub>	59,71	l <sub>3</sub>	333,75	g <sub>3-4</sub>	41,79	-	-	-	-
4	g <sub>4</sub>	101,5	l <sub>4</sub>	328,13	g <sub>4-5</sub>	59,3	-	-	-	-
5	g <sub>5</sub>	160,8	-	-	-	-	-	-	-	-

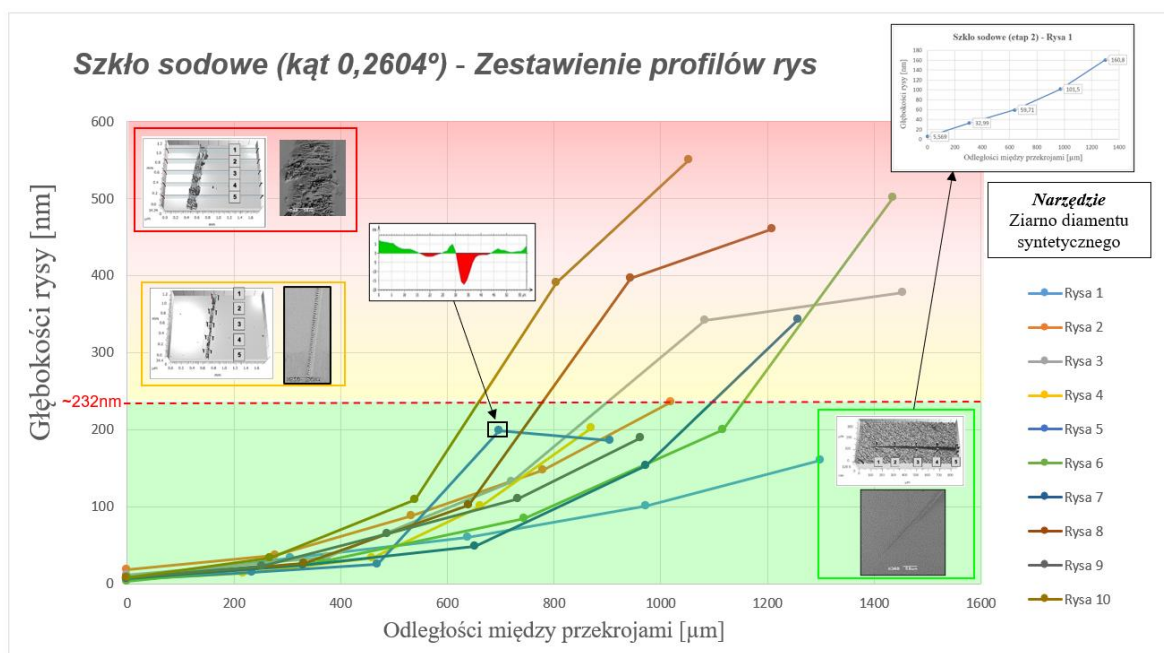
Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.38), na którym zaobserwować można zarejestrowane metodą profilometrii optycznej głębokości rysy utworzonej przez pojedyncze diamentowe ziarno ściernie. Oznaczone głębokości pochodzą z pięciu przekrojów analizowanej rysy w funkcji przebytej przez ziarno ściernie drogi.



Rys. 5.38. Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkłe sodowym (etap 2)

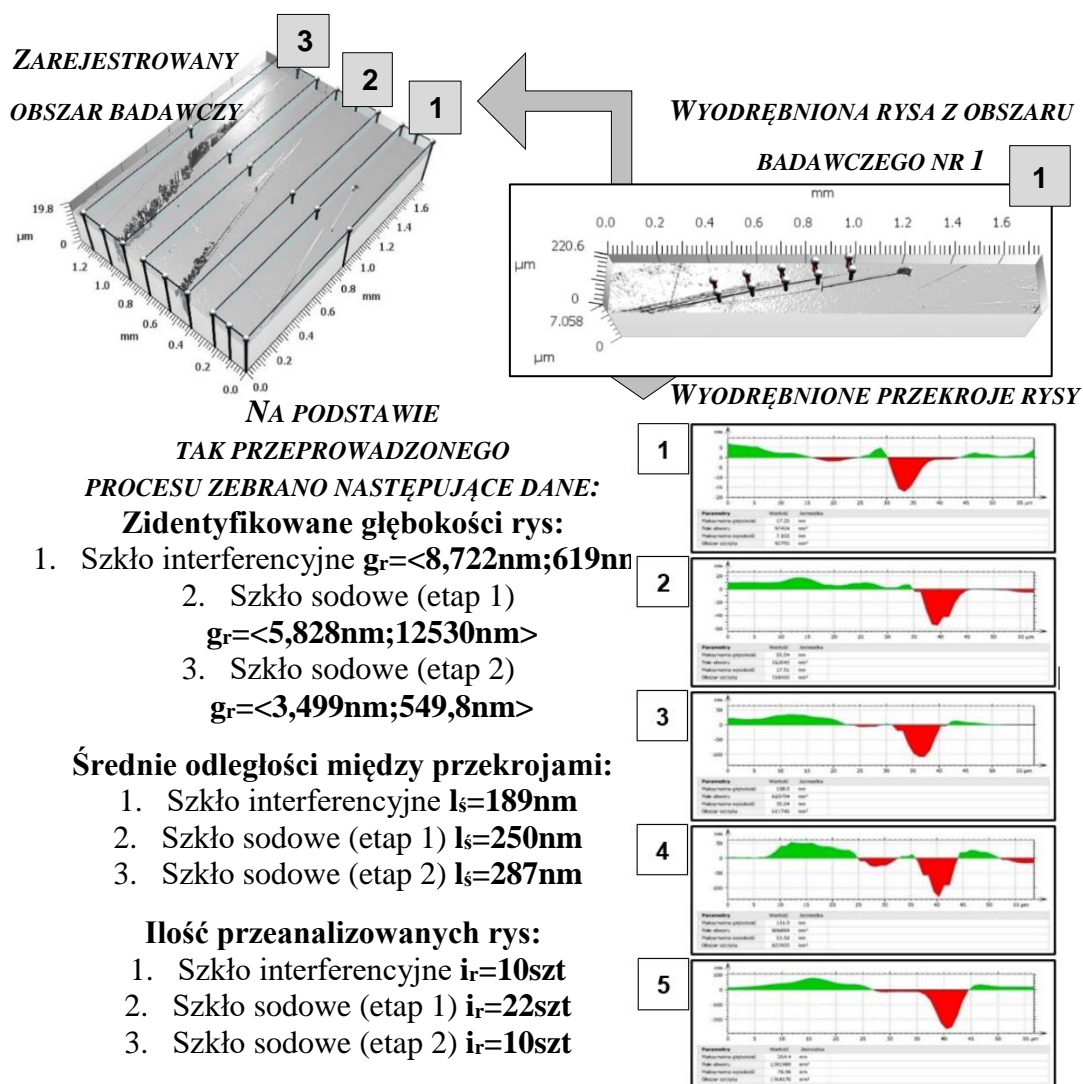
Na podstawie tak przeprowadzonego procesu zebrano następujące dane (rys. 5.39):

- zidentyfikowane głębokości rys:  $g_r = \langle 3,499\text{nm}; 549,8\text{nm} \rangle$
- średnie odległości między przekrojami:  $l_s = 287\text{nm}$
- ilość przeanalizowanych rys:  $i_r = 10\text{szt}$



Rys. 5.39. Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkłe sodowym (etap 2)

Na podstawie przeprowadzonego w ten sposób programu badawczego, uzyskano zbiór danych odnoszący się do kształtu rys w jej poszczególnych przekrojach, leżących w obszarze rozpoczynania pracy ziaren (rys. 5.40).

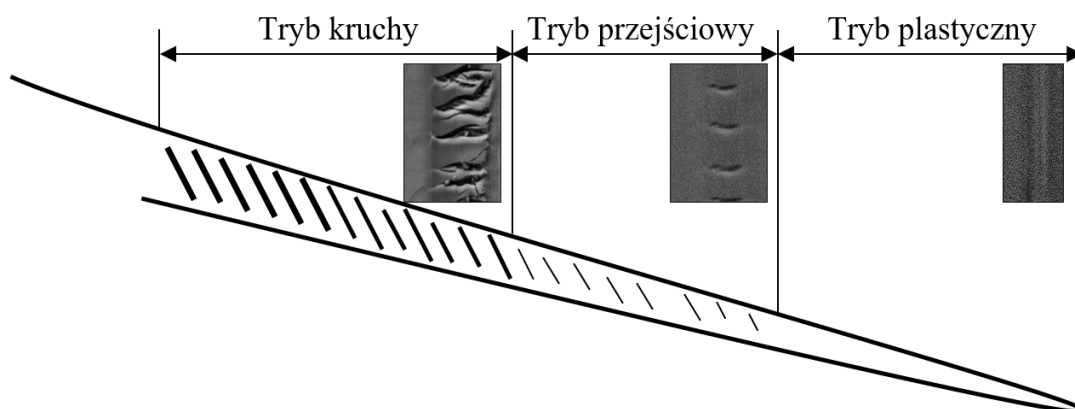


**Rys. 5.40.** Etapy procesu analizy rys przy wykorzystaniu oprogramowanie MountainsLab Premium 8.0

Przeprowadzona identyfikacja śladów po obróbkowych, umożliwia zobrazowanie początkowej fazy wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał nawet dla głębokości kilku nanometrów. Realizowane badania umożliwiły zobrazowanie struktury powstałej na skutek przejścia ziarna ściernego zgodnie z zaprojektowaną trajektorią i identyfikację zmiany tej struktury w wybranych obszarach. Badania wykonano analizując przejścia ziarna ściernego w początkowej fazie kontaktu z płytką szklaną, a następnie w kolejnych etapach w funkcji zagłębiania się ziarna ściernego. Dzięki zastosowaniu ultra precyzyjnego profilometru optycznego, możliwe było identyfikowanie śladu początkowego na skutek przejścia ziarna ściernego już na głębokości kilku nanometrów. Jednocześnie możliwe było

uzyskiwanie informacji o strukturze geometrii największego zagłębienia wynikającego z przyjętej kinematyki ziarna ściernego na płycie szklanej. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego oprogramowania MountainLab Premium 8.0, możliwa była parametryczna identyfikacja i wizualizacja zmian przekroju rysy powstałej na skutek przejścia ziarna ściernego od początkowej fazy inicjacji tego kontaktu z powierzchnią płytki szklanej, aż do wyjścia ziarna ściernego z materiału. Od inicjacji rysy do osiągnięcia maksymalnej głębokości, przeprowadzone badania wykazały szereg stopniowych zmian jej geometrii pomiędzy plastycznym, a kruchym mechanizmem usuwania materiału.

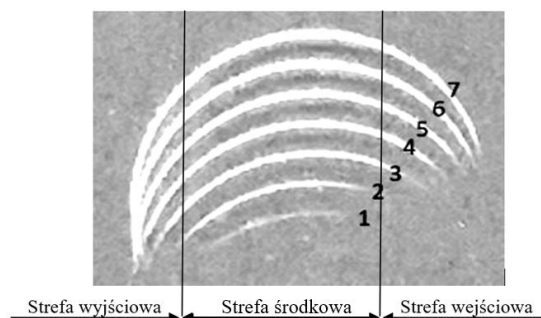
Na podstawie przeprowadzonych analiz przeprowadzonych przy wykorzystaniu profilometru optycznego oraz wstępnych zdjęć pochodzących z mikroskopu skaningowego, wytypowano wstępnie trzy reprezentatywne etapy budowy rys, charakteryzujące się występowaniem podstawowych stanów odkształceń, zachodzących w procesie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego ziarnem ściernym (rys. 5.41). W dalszej części pracy, stan powierzchni tych rys został również wnikliwie przeanalizowany za pomocą mikroskopu skaningowego.



**Rys. 5.41.** Podstawowe stany odkształceń występujące na powierzchni rysy w procesie mikro- i nanoskrawania materiału szklanego

W pierwszej kolejności zostały przeanalizowane warunki w strefie nanoskrawania, tj. w obszarze wejścia i wyjścia ziarna skrawającego, ze szczególnym uwzględnieniem odkształceń plastycznych materiału obrabianego. Następnie analizie poddano fragmenty środkowe rys, w których występują relatywnie największe głębokości skrawania i obciążenia cieplno-mechaniczne wynikające z przyjętej kinematyki procesu (rys. 5.42).

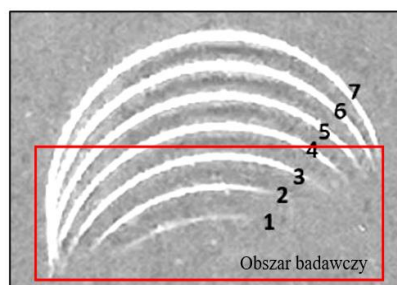




**Rys. 5.42.** Strefy rys poddane analizie i ocenie za pomocą profilometru optycznego i mikroskopu skaningowego

Taka metodyka umożliwiła poznanie i analizę wpływu procesów mikro- i nanoskrawania, na sposób oddzielania materiału kruchego, odkształcenia w formie wypływek w strefie obróbki, kształt rys i ich strukturę powierzchniową.

Do tych analiz wytypowano następujące trzy rysy ukształtowane przy kolejnych zagłębieniach ziarna z coraz większą głębokością, zdjęcia skaningowe zawierać będą oczekiwane zmiany ich stanu w funkcji głębokości mikro- i nanoskrawania. Rysy te powstały w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentu syntetycznego (LS-250 D1001/18/20/mesh), przy kącie pochylenia mocowania próbki wynoszącym  $\alpha 0,2604^\circ$  i stałych parametrach obróbki:  $s=70\text{obr}/\text{min}$ ,  $f=160\text{mm}/\text{min}$  (rys. 5.43).



**Rys. 5.43.** Widok rys poddanych szczegółowej analizie

Przeprowadzone analizy poznawcze procesu mikro- i nanoskrawania, bazowały na:

- profilach rys w określonych jej przekrojach,
- obrazach mikroskopowych SEM,
- fizyce procesu mikroskrawania,
- analizie związków przyczynowo-skutkowych.

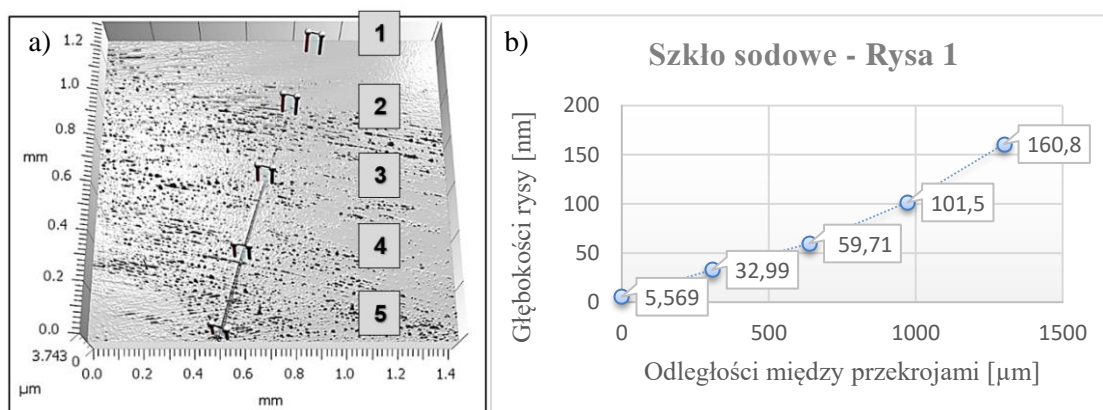


## Analiza stanu struktury powierzchniowej rysy nr 1

Pierwsza rysa poddana analizie przemieszczenia materiału w strefie mikro- i nanoskrawania charakteryzuje się najmniejszą głębokością ze zbioru trzech kolejnych rys. Powstała ona przy najmniejszej głębokości wnikania ziarna ściernego w powierzchnię próbki szklanej.

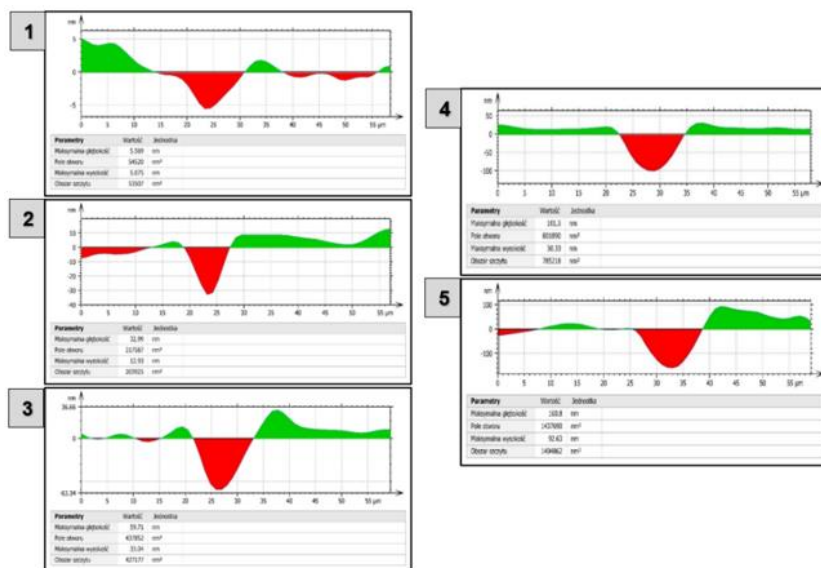
Analizy materiału badawczego zgromadzone przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego, udało się połączyć z wynikami z profilometru optycznego. Dzięki czemu analiza zdjęciowa mogła zostać wzbogacona o bardzo precyzyjne wyniki głębokość wnikania ziarna ściernego na poszczególnych etapach rozwoju rysy.

Tym samym w pierwszym etapie zarejestrowano moment inicjacji rysy oraz jej rozwój przy zwiększającym się zagłębieniu jeszcze w fazie plastycznego płynięcia materiału szklanego (rys. 5.44).



**Rys. 5.44.** Rysa 1: a) widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów

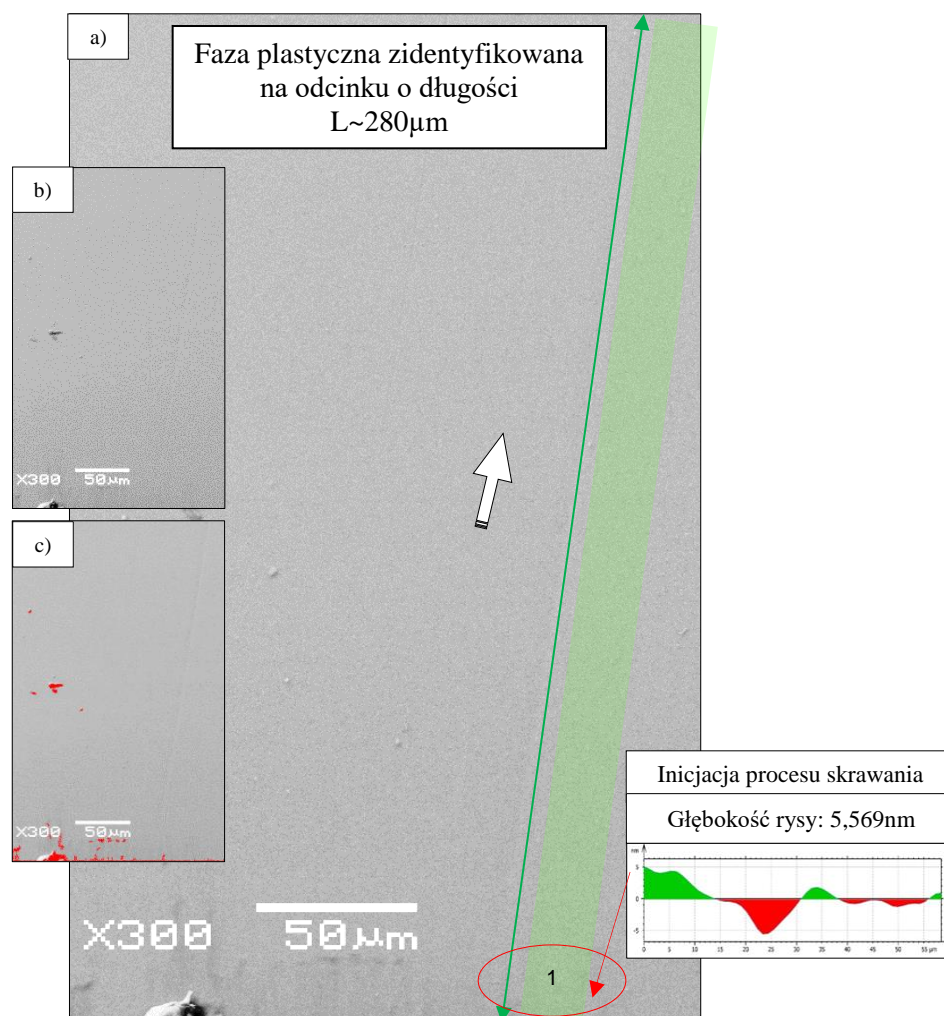
Odległości pomiędzy poszczególnymi przekrojami wynosiły ok. 363 $\mu\text{m}$ . Ich zbiorczy widok przedstawia rys. 5.45.



Rys. 5.45. Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie

Na podstawie kształtu tych przekrojów i obrazów skaningowych SEM, przeprowadzono analizy zmian stanu powierzchni rys w poszczególnych ich fragmentach wzdłuż kierunku ruchu ziarna ściernego.

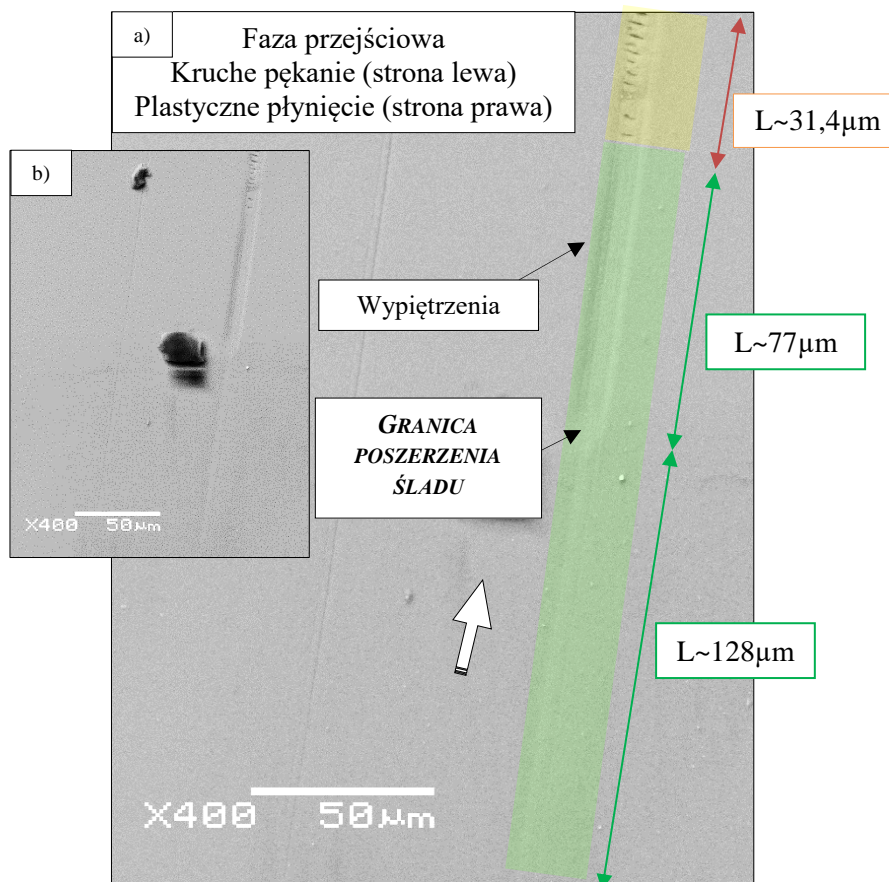
Przeprowadzone analizy obrazów cyfrowych przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego, ujawniły w analizowanej próbce obszar inicjacji rysy w postaci zagłębienia wierzchołka ściernego ziarna diamentowego (LS-250 D1001/18/20/mesh) w szklanej płytce płaskiej. Na odcinku wynoszącym około 300 $\mu\text{m}$  zaobserwowano plastyczny mechanizm odkształcenia materiału kruchego pod wpływem pracy wierzchołka ziarna ściernego (rys. 5.46a). Program służący do identyfikacji defektów, w fazie plastycznej nie zidentyfikował żadnych zmian (rys. 5.46c).



**Rys. 5.46.** Rysa 1 inicjacja zagłębienia, pełna faza plastyczna: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny, c) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

Po osiągnięciu większej głębokości skrawania, zauważono poszerzenie szerokości rysy. W tym obszarze zaobserwować można wyraźną przewagę mechanizmu plastycznego płynięcia z widocznymi odkształceniami krawędzi bocznych w postaci delikatnych wypiętrzeń. W dolnej części rysy zaobserwować można delikatne odkształcenia, powstałe na skutek przejścia wierzchołka ziarna ściernego odwzorowujące jego kształt geometryczny. W tym obszarze nie widać wyraźnych charakterystycznych dla mechanizmu kruchego pęknięcia defektów, ani w postaci pęknięć poprzecznych do kierunku ruchu ziarna, ani pęknięć środkowych propagujących w głąb materiału obrabianego. Po przebyciu przez ziarno ściernie drogi szacowanej na  $L \sim 205 \mu\text{m}$ , zaczynają się poprzeczne pęknięcia, charakterystyczne dla inicjacji mechanizmu kruchego pęknięcia. Odległości pomiędzy

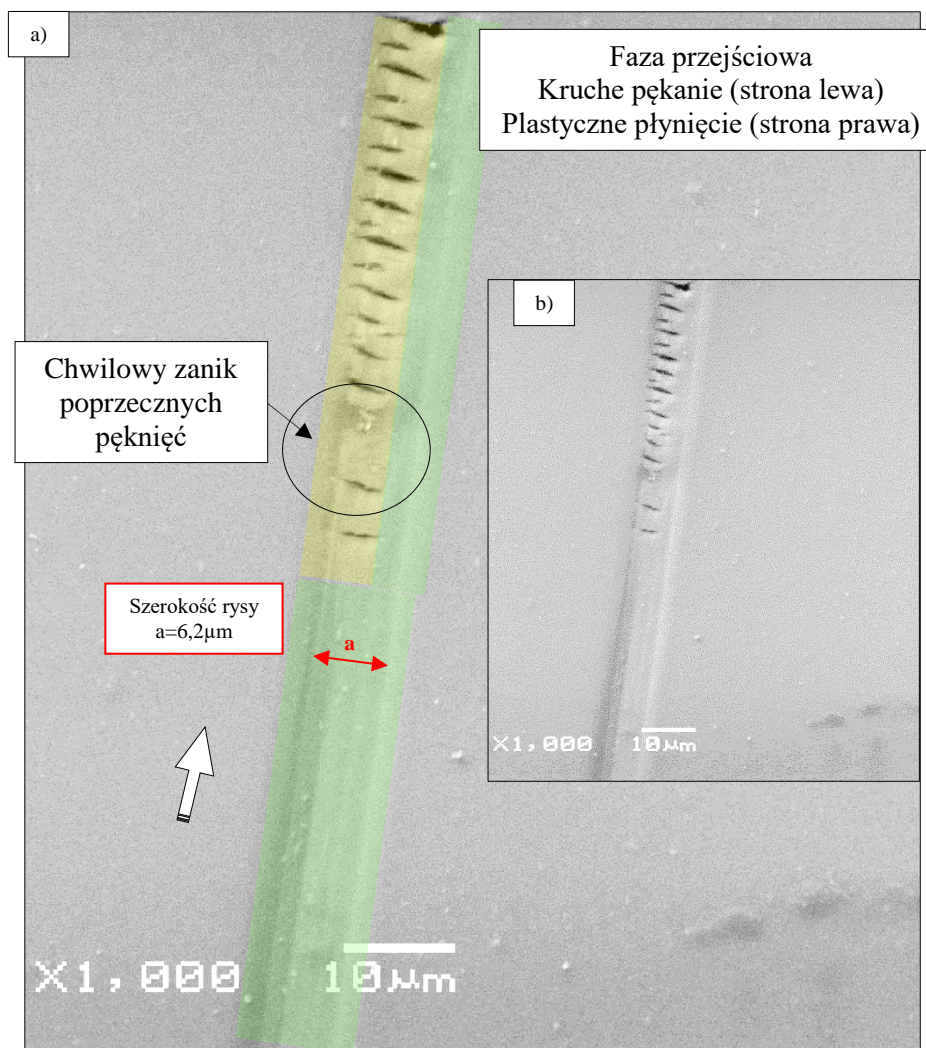
defektami mieszczą się w przedziale  $\langle 1,5\mu\text{m}; 8,9\mu\text{m} \rangle$ , natomiast szerokości poszczególnych defektów wynosi  $\langle 1,6\mu\text{m}; 3,8\mu\text{m} \rangle$  (rys. 5.47).



**Rys. 5.47.** Rysa 1 dalszy rozwój rysy faza plastyczna, poszerzenie śladu i pojawienie się regularnych pęknięć o malej intensywności: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

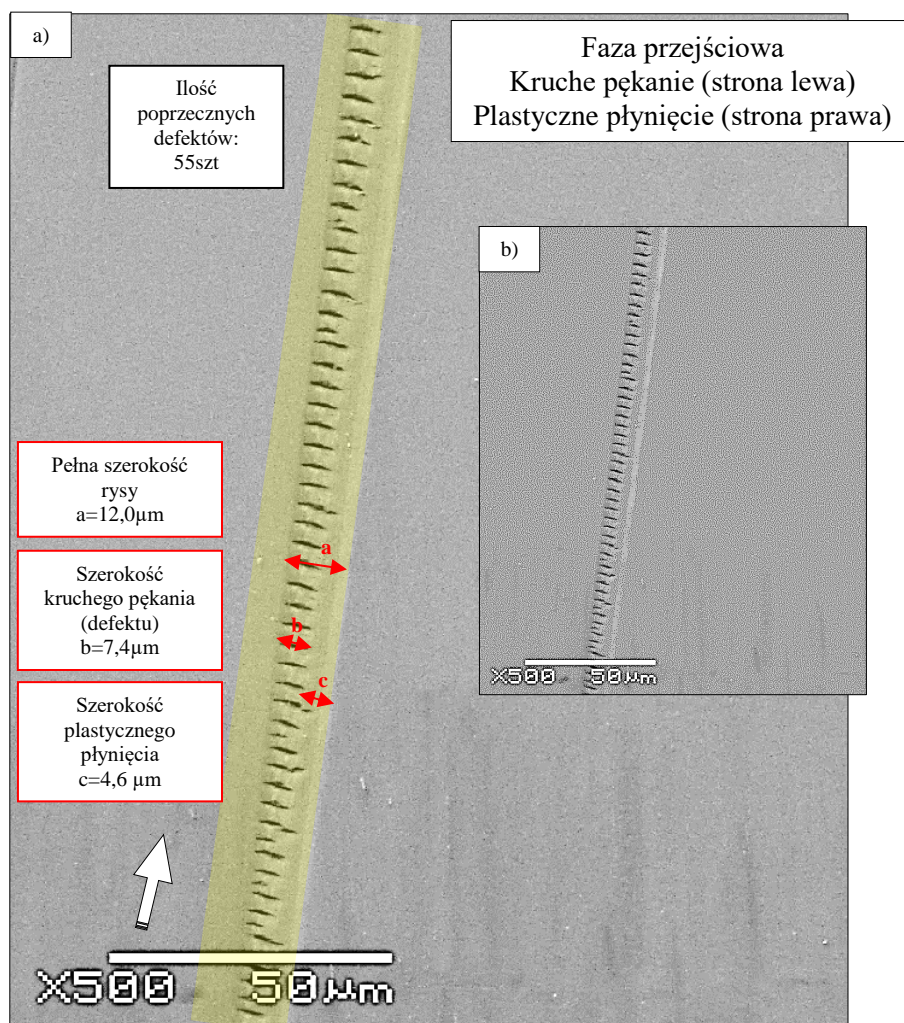
Wartość zagłębienia ziarna ściernego zbliża się do wartości krytycznej, ujawnia się mechanizm, który zaliczyć można do obszaru quazi–krucho pękania. W tym obszarze zaobserwować można zarówno fragmenty uplastycznione (odkształcenie plastyczne krawędzi po prawej stronie), znaczne obszary ciągłego, plastycznego płynięcia materiału w dolnej części rysy oraz wyraźne krótkie poprzeczne pęknięcia o wartości  $\langle 1,6\mu\text{m}; 5,48\mu\text{m} \rangle$ , oddalone od siebie  $\langle 1,24\mu\text{m}; 8,9\mu\text{m} \rangle$ , na długości  $45,09\mu\text{m}$ , na której zidentyfikowano 17szt poprzecznych pęknięć. Natomiast w tej fazie szerokość rysy dochodzi do  $10\mu\text{m}$  (rys. 5.48).





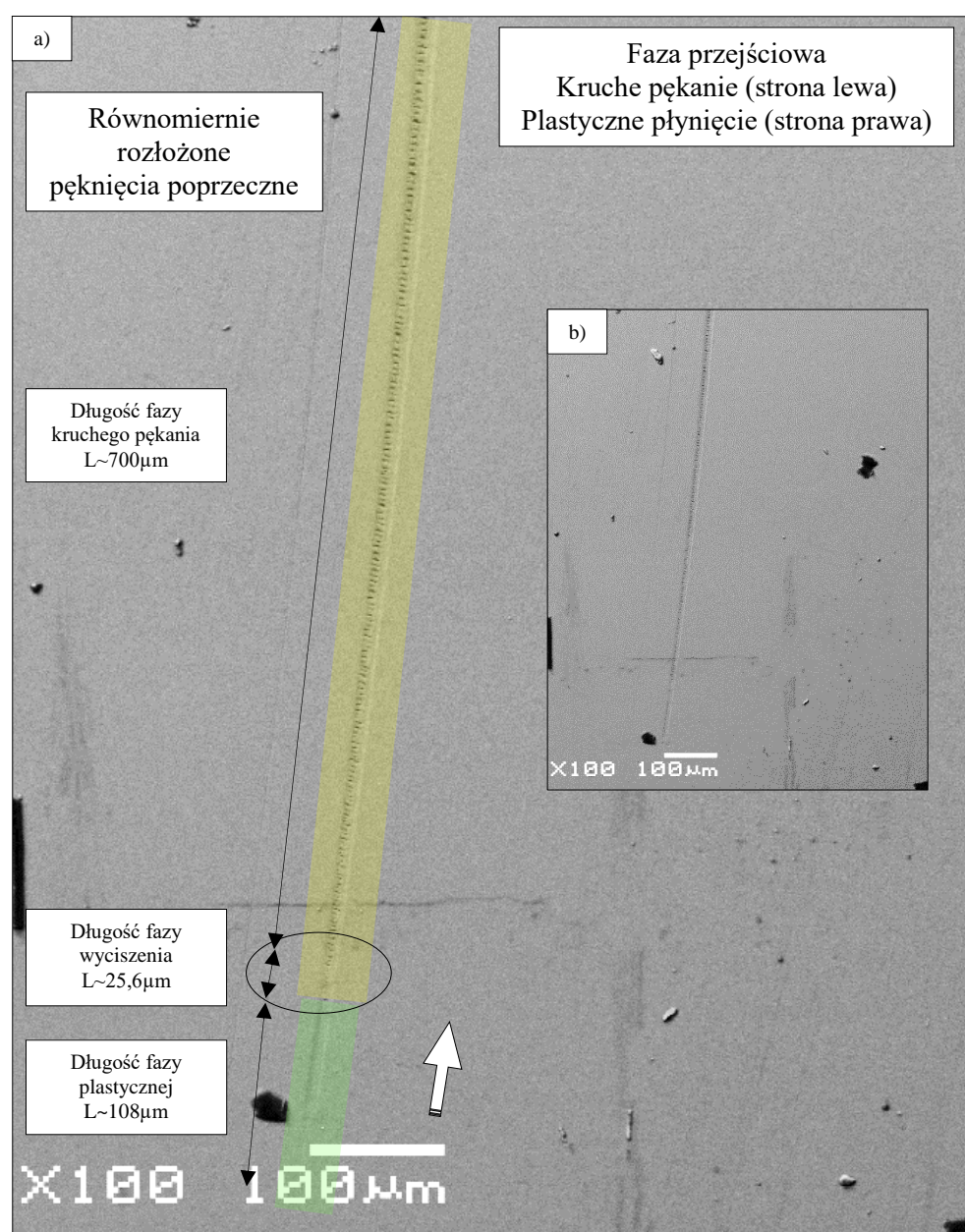
**Rys. 5.48.** Rysa 1 dalszy rozwój rysy: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

Wzdłuż struktury rysy rozwija się mechanizm krucho pęknięcia w postaci regularnie pojawiających się pęknięć poprzecznych, przy jednoznacznym kształtowaniu się w dolnej części rysy obszaru o charakterystyce zbliżonej do plastycznego (ciągliwego) płynięcia materiału. Przeprowadzona analiza ujawnia mechanizm quazi-plastycznego i krucho usuwania materiału. Na zdjęciu skaningowym ujawnia się wpływ pracy ziarna ściernego w warunkach efektu krucho pęknięcia, w stosunku do prawej strony rysy (rys. 5.49).



**Rys. 5.49.** Rysa 1 przejście pracy ziarna z plastycznego płynięcia materiału w fazę kruchego pęknięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

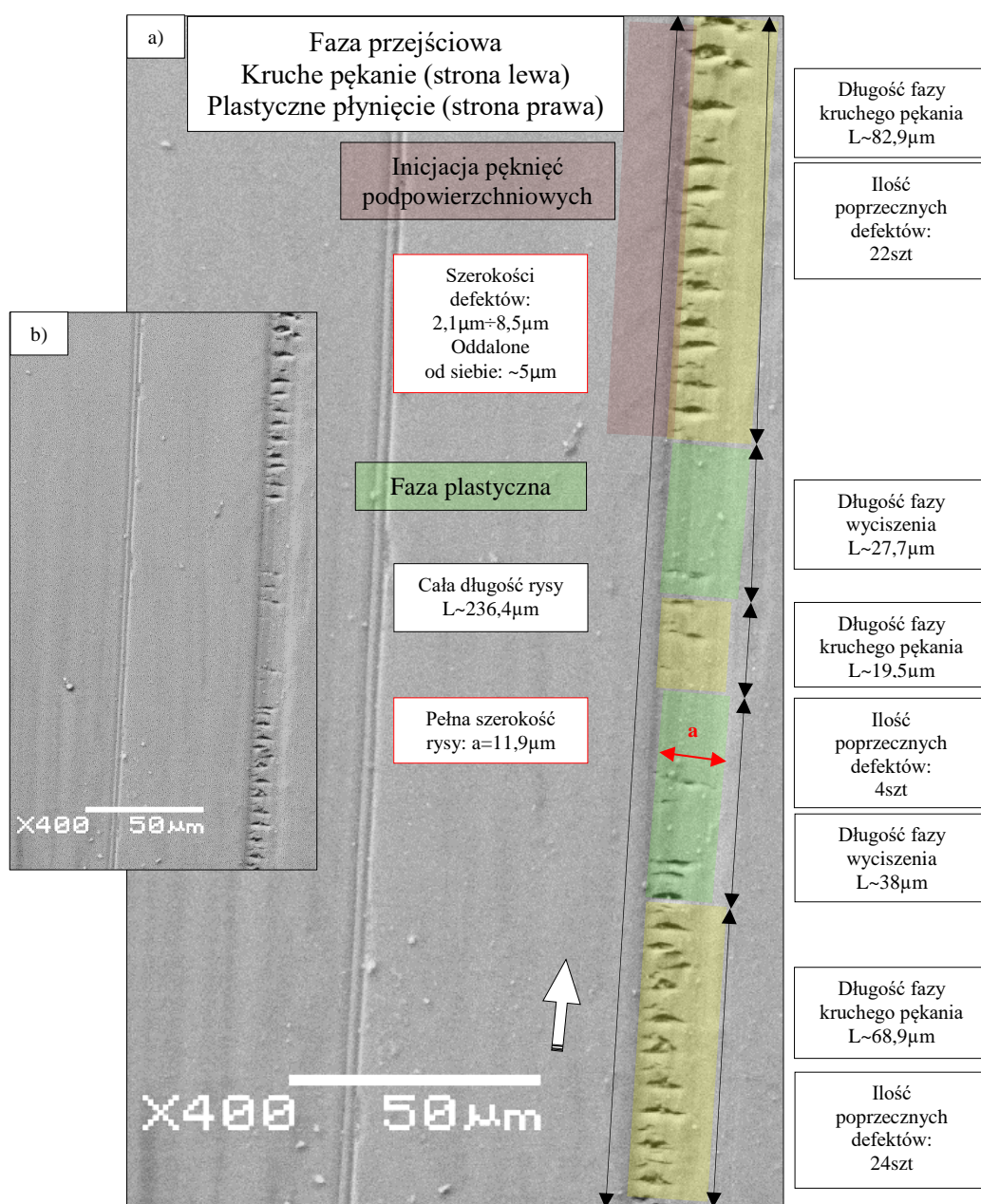
Opisany mechanizm plastycznego płynięcia materiału po prawej stronie rysy oraz obszar kruchego pęknięcia w postaci poprzecznych pęknięć, zidentyfikowano na znacznej długości szacowanej na około 650µm. Natomiast moment inicjacji rysy w której zidentyfikowano jedynie fazę plastyczną szacuje się na około 200µm (rys. 5.50).



**Rys. 5.50.** Rysa 1 przejście pracy ziarna z plastycznego płynięcia materiału w fazę krucho pęknięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

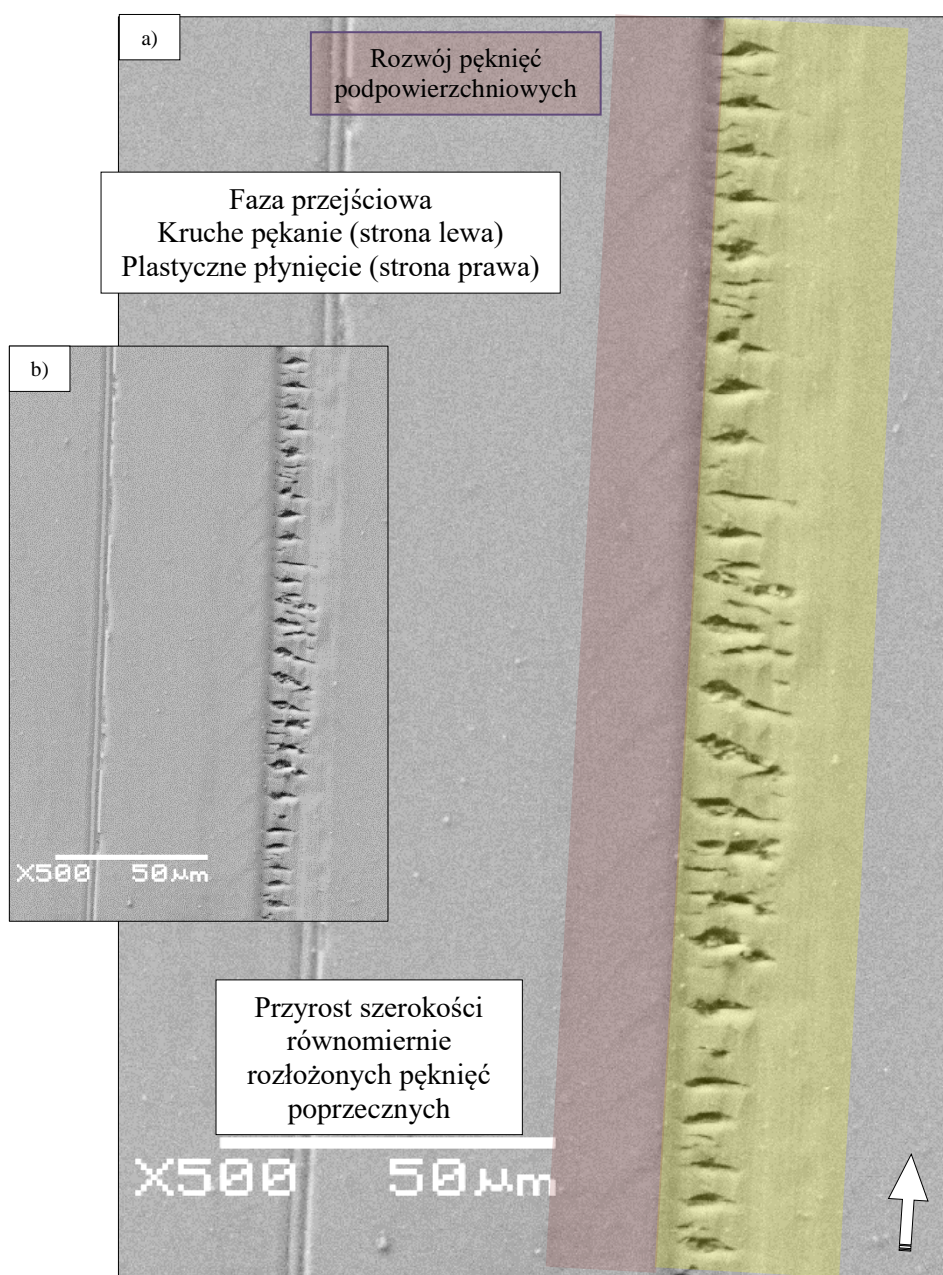
Zaobserwowane zjawisko pojawiające się podczas krucho pęknięcia materiału, zanika chwilowo, aby się znów pojawić. Zjawisko to może wynikać z lokalnie zmiennej głębokości wnikania ziarna ściernego, przy którym jest przewaga plastycznego, bądź krucho pęknięcia. Już w tej fazie procesu widać wzdłuż rysy delikatne pęknięcia podpowierzchniowe, które są coraz bardziej widoczne w momencie zwiększania głębokości wnikania ziarna ściernego (rys. 5.51).





Rys. 5.51. Rysa 1 obrazuje fazę plastyczną (strona prawa) i przerywaną fazę kruchego pęknięcia po lewej stronie: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

Dla fragmentu rysy osiągającej szerokość ponad  $20 \mu\text{m}$ , zaobserwować można zwiększanie się szczeliny pęknięć poprzecznych, osiągające w lewej części rysy nieco większą szerokość, a zanikają po prawej stronie, gdzie jeszcze przeważa plastyczne płynięcie materiału (rys. 5.52).

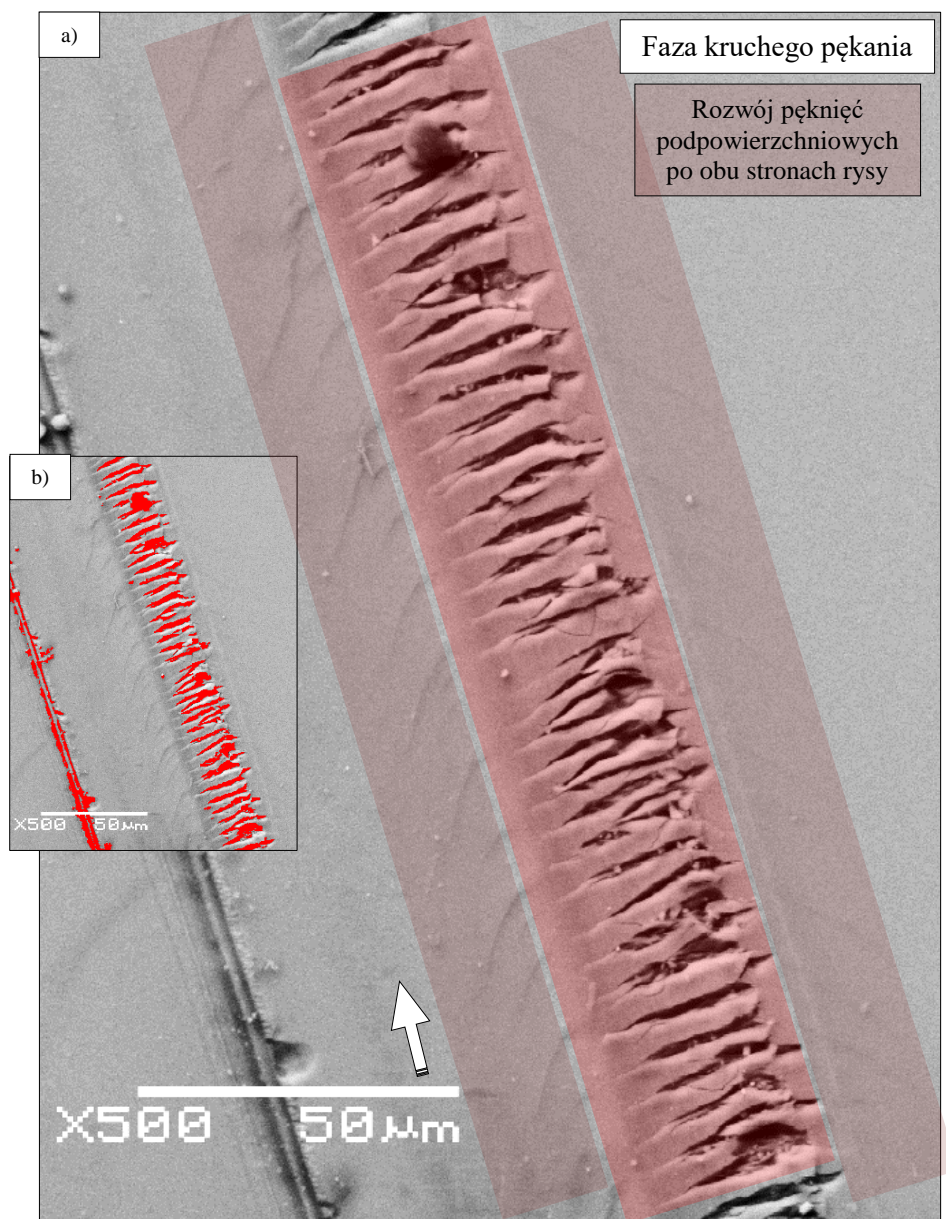


**Rys. 5.52.** Rysa 1 w fazie plastycznej (strona prawa) oraz z przerywaną fazą kruchego pęknięcia (lewa strona), pojawiające się pęknięcia powierzchniowe (lewa strona): a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

W przypadku, gdy rysa osiąga ponad  $30\mu\text{m}$  szerokości, ujawnia się wyraźny efekt mechanizmu kruchego pęknięcia również po prawej stronie rysy. Szerokość pęknięć poprzecznych dolnej części rysy, intensyfikuje się w jej środkowej części z tendencją do przesuwania w prawo. Po lewej stronie rysy uwidaczniają się wyraźne okresowe pęknięcia półeliptyczne, rozchodzące się od lewej strony rysy prostopadle do krawędzi bocznej rysy i ukierunkowane przeciwnie do ruchu ziarna ściernego. Analiza tego obszaru

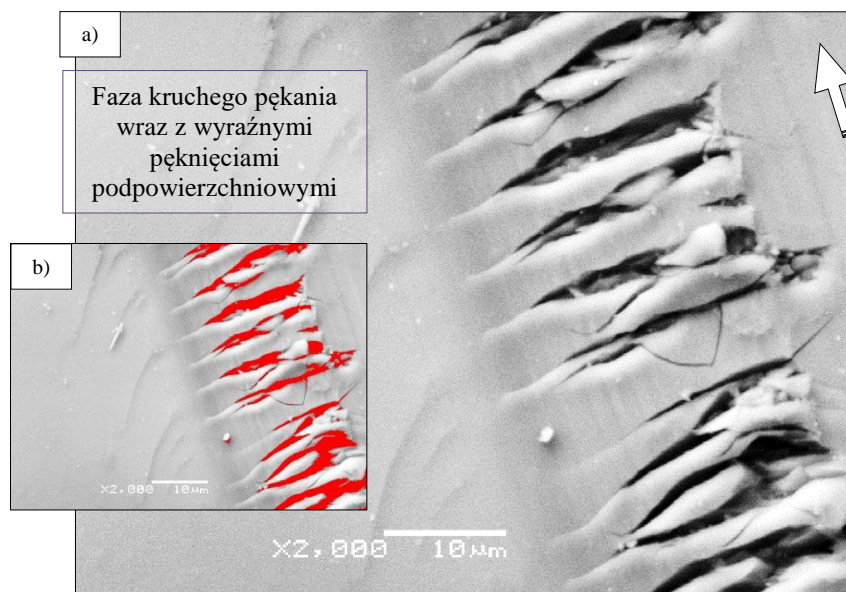


rysy ujawnia również podobne defekty po jej prawej stronie, jednak z nieco mniejszą intensywnością (rys. 5.53).



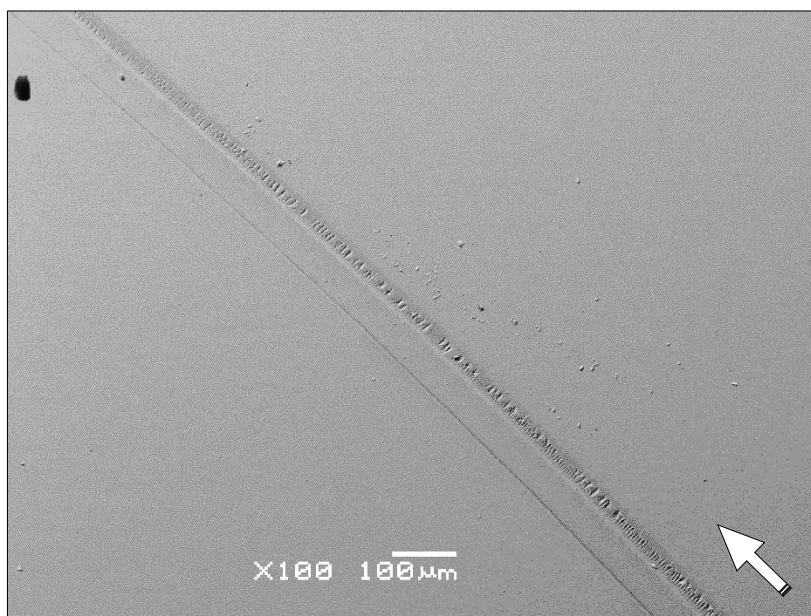
**Rys. 5.53.** Rysa 1 w fazie kruchego pęknięcia z wyraźnymi pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

Zaobserwowane defekty rozbudowujące się głównie w warstwie przypowierzchniowej rysy, są oznaką defektów propagujących poprzecznie i w głąb struktury (rys. 5.54).



**Rys. 5.54.** Rysa 1 w fazie kruchego pęknięcia z wyraźnymi pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

Analizowana rysa po osiągnięciu swojej największej głębokości, zaczyna zakrzywiać się zgodnie z przyjętym kierunkiem obróbki. Po osiągnięciu szerokości około  $40\mu\text{m}$ , ujawnia defekty w postaci poprzecznych pęknięć ułożonych w sposób niezwykle regularny. Dotyczy to zarówno głębokości, jak i pęknięć bocznych względem krawędzi rysy (rys. 5.55).

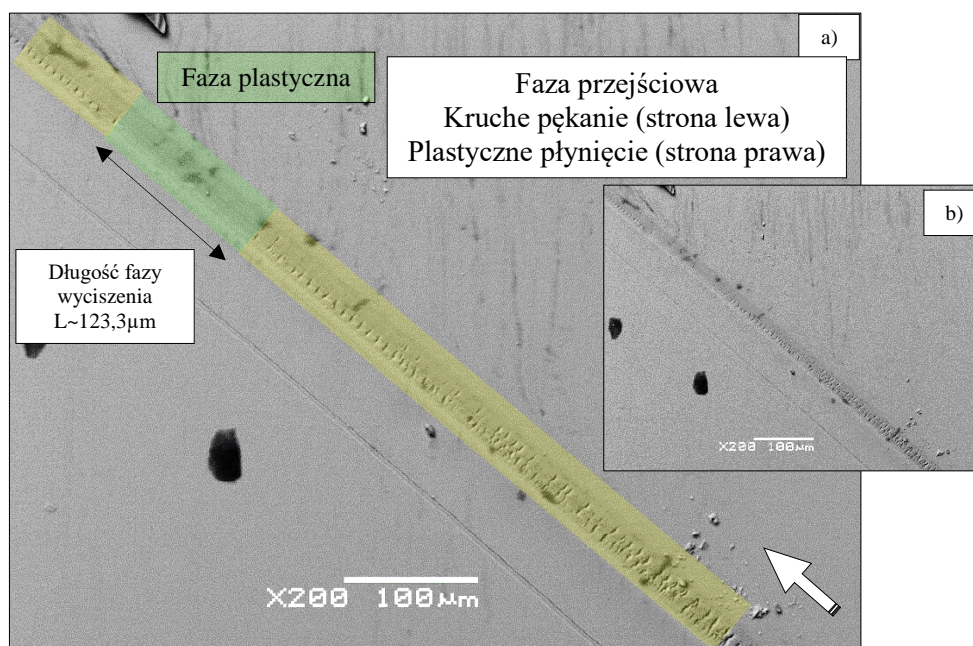


**Rys. 5.56.** Rysa 1 w momencie wyciszania fazy kruchego pęknięcia i płynnego przechodzenia w fazę plastyczną

Interesujący jest fakt, że podobne zjawiska można obserwować na początku i końcu rysy. Otóż pojawia się kruche pęknięcie materiału, zanika chwilowo, aby się znów pojawić.

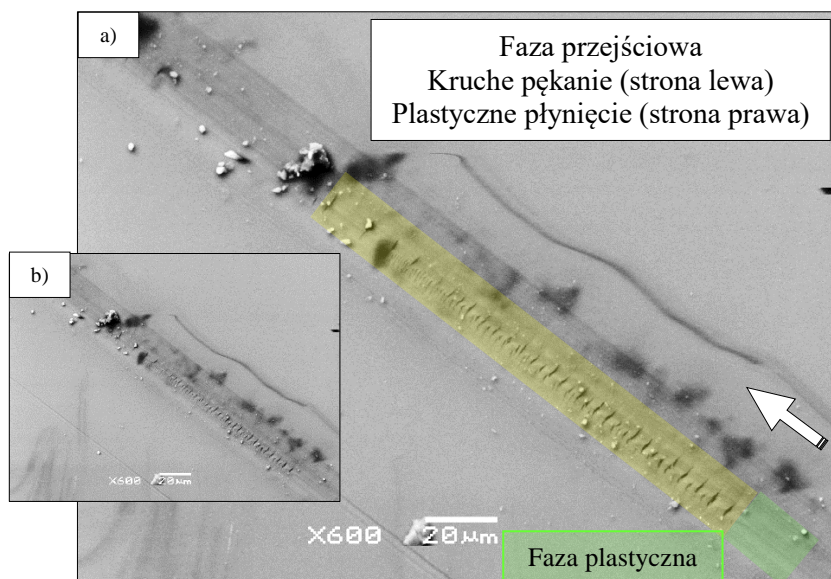


Zjawisko to może wynikać z chwilowo zmiennej głębokości ziarna ściernego, przy której jest przewaga plastycznego, bądź kruchego pęknięcia. Przeprowadzona analiza strefy wyjściowej ziarna, ujawniła mechanizm odwrotny, gdzie można wyróżnić wszystkie fazy zaobserwowane w strefie wejściowej, tj. faza plastycznego płynięcia, faza przejściowa i faza kruchego pęknięcia. Jest silnie uzależnione od lewej lub prawej strony rysy. Może to być wynikiem niesymetryczności kształtu wierzchołka ziarna skrawającego (rys. 5.57).



**Rys. 5.57.** Rysa 1 w fazie przejściowej w momencie wychodzenia ziarna ściernego ze strefy obróbki  
a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

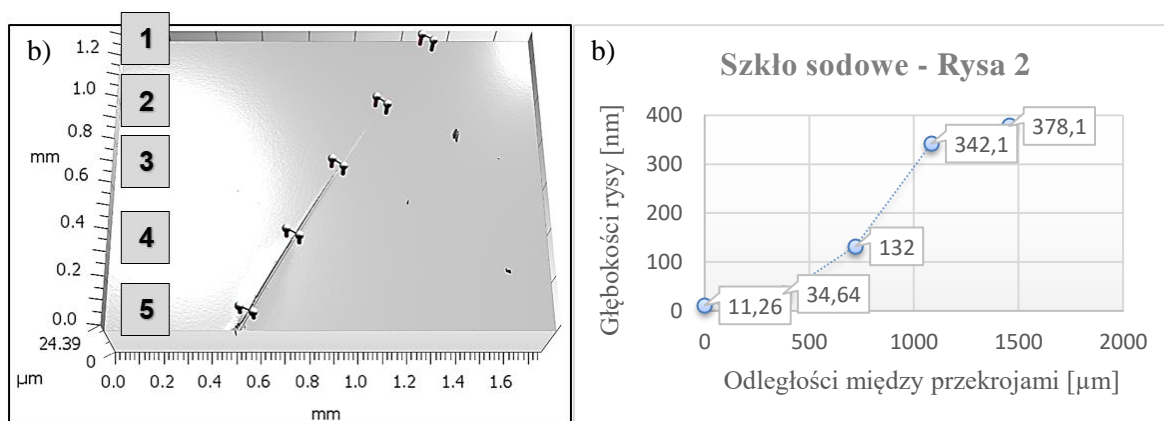
Wierzchołek ziarna ściernego wychodzi z materiału obrabianego, następuje równomierne zmniejszanie pęknięć poprzecznych, aż do ich całkowitego zniknięcia. Niestety nie widać wyjścia ziarna ściernego w postaci śladu obróbkowego w fazie plastycznego płynięcia (rys. 5.58).



Rys. 5.58. Rysa 1 zakończenie pracy ziarna a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

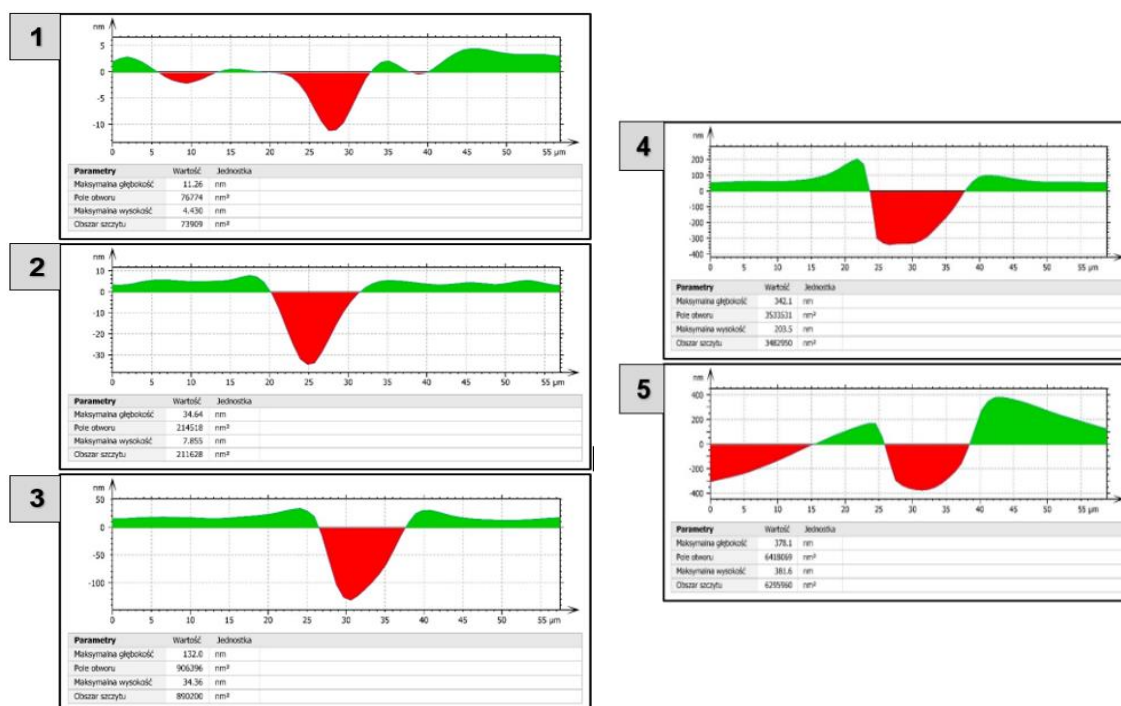
**Analiza stanu struktury powierzchni rysy nr 2**

Rysa 2 została ukształtowana w kolejnym przejściu ziarna ściernego po pochylonej pod kątem  $\approx 0,2604^\circ$  powierzchni roboczej próbki. Charakteryzuje się ona większymi głębokościami, w stosunku do rysy 1. Wynika to z wymuszeń kinematycznych drogi ruchu ziarna w kierunku głębokościowym (rys. 5.59).



Rys. 5.59. Rysa 2: a) widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów

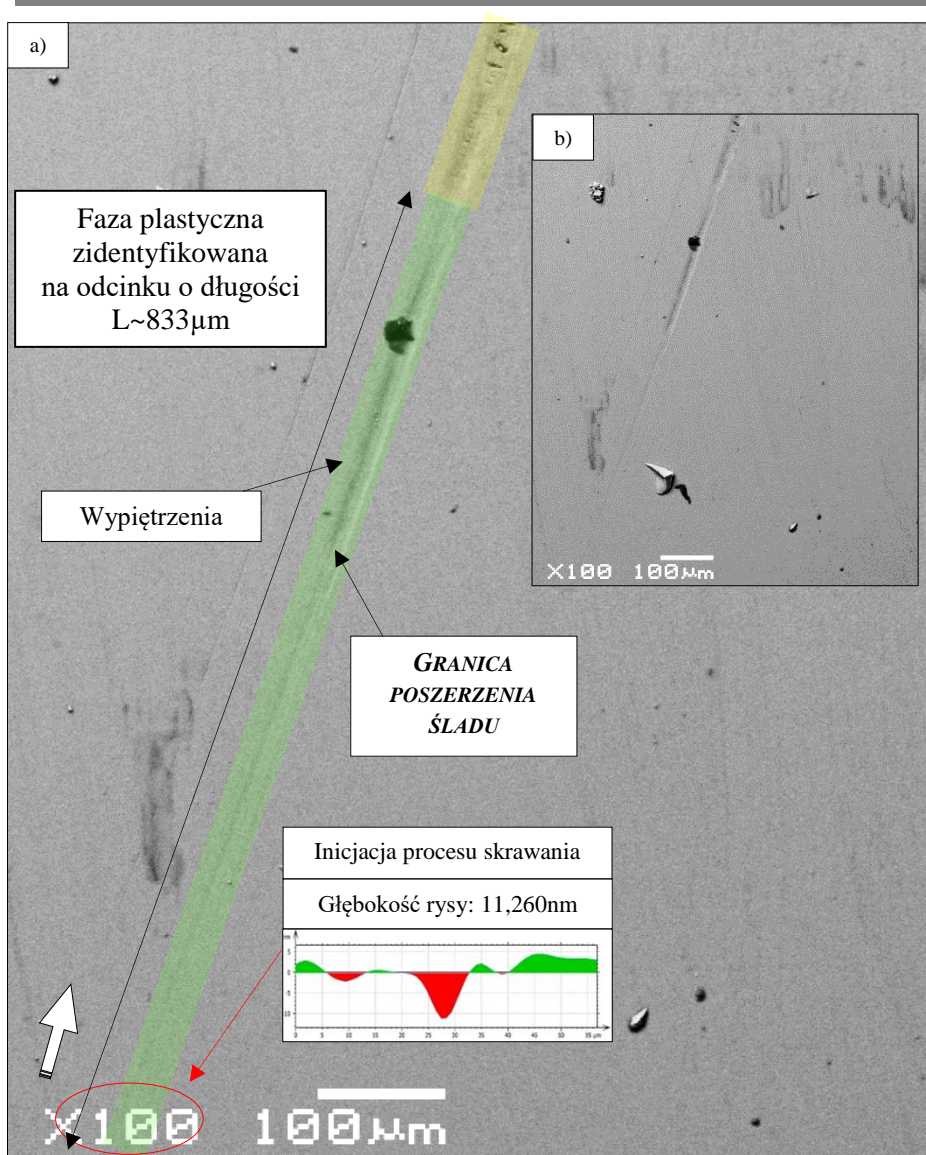
Odległości pomiędzy poszczególnymi przekrojami wynosiły ok.  $290\mu\text{m}$ . Ich zbiorczy widok przedstawia rys. 5.60.



Rys. 5.60. Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie

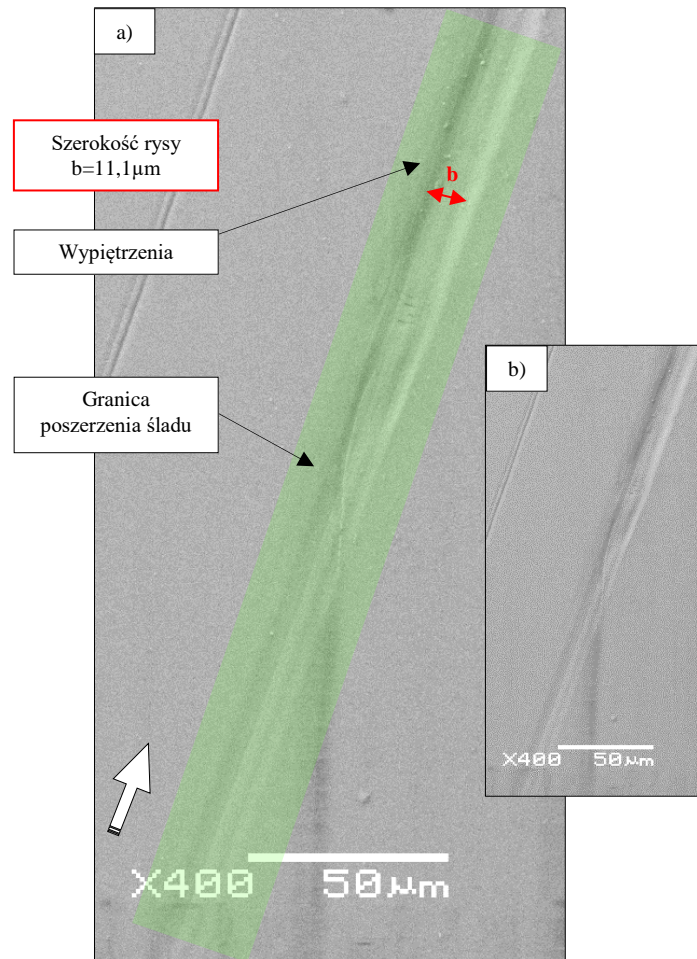
Przeprowadzone analizy obrazów cyfrowych wykonanych przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego, ujawniły w analizowanej próbce szklanej obszar inicjacji rysy w postaci zagłębienia wierzchołka ściernego ziarna diamentowego. Po momencie inicjacji rysy na odcinku wynoszącym około 833 $\mu$ m można obserwować plastyczne płynięcie materiału, natomiast od momentu inicjacji po przebyciu 533 $\mu$ m nastąpiło poszerzenie śladu pozostawionego przez ziarno ściernie, które później przebyło jeszcze w fazie plastycznej około 300 $\mu$ m. W tym obszarze zaobserwować można wyraźną przewagę mechanizmu plastycznego płynięcia, z widocznymi odkształceniami krawędzi bocznych w postaci delikatnych wypiętrzeń. W dolnej części rysy zaobserwować można delikatne odkształcenia powstałe na skutek przejścia wierzchołka ziarna ściernego odwzorowujące jego kształt geometryczny. W tym obszarze nie widać wyraźnych charakterystycznych dla mechanizmu kruchego pęknięcia defektów. Dopiero po przebyciu przez ziarno drogi skrawania o długości około 960 $\mu$ m, zaczynają się pojawiać defekty w postaci regularnych poprzecznych pęknięć, co świadczy o fazie przejściowej między plastycznym płynięciem materiału, a kruchym pękaniem (rys. 5.61).





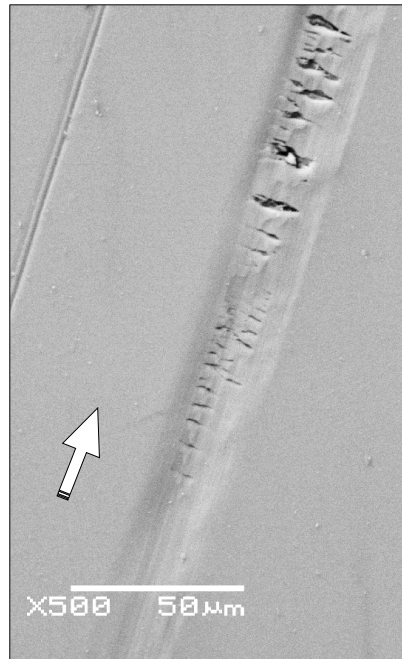
**Rys. 5.61.** Rysa 2 widok inicjacji procesu mikro- i nanoskrawania: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

Wyraźnie widoczna jest tu faza plastycznego płynięcia materiału kruchego w postaci szkła sodowego, występująca po inicjacji rysy i chwilowym jej rozwoju. Jako kolejny etap można wyróżnić poszerzenie śladu obróbkowego w trybie plastycznego płynięcia oraz odwzorowany kształt geometryczny wierzchołka ziarna skrawającego, co w konsekwencji powoduje wypiętrzenia boczne materiału w postaci wypływek (rys. 5.62).



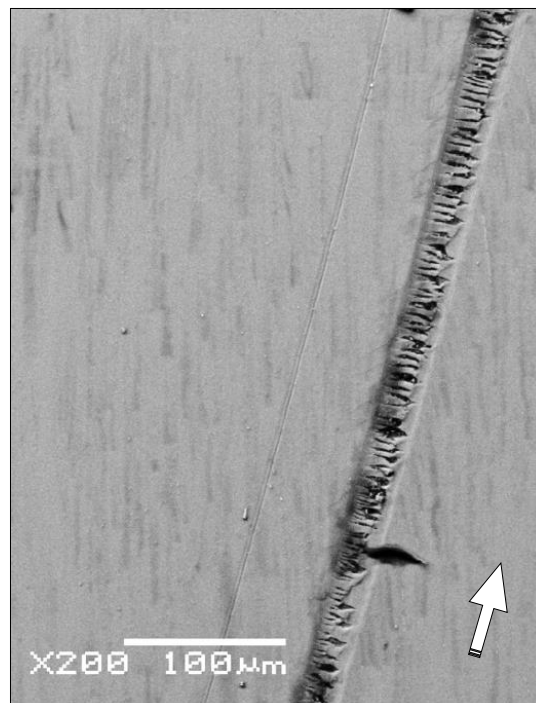
**Rys. 5.62.** Rysa 2 widok inicjacji procesu mikro- i nanoskrawania: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

W kolejnym etapie rozwoju rysy, po czystej fazie plastycznego płynięcia materiału, pojawiają się miejscowe delikatne, ale równomierne poprzeczne pęknięcia po lewej stronie rysy. Natomiast strona prawa nadal charakteryzuje się fazą plastyczną. Jednak z rozwojem osiąganą przez ziarno głębokości, poprzeczne pęknięcia zaczynają stopniowo się rozwijać (rys. 5.63).



**Rys. 5.63.** Rysa 2 widok przejścia między fazami plastyczną, a kruchą

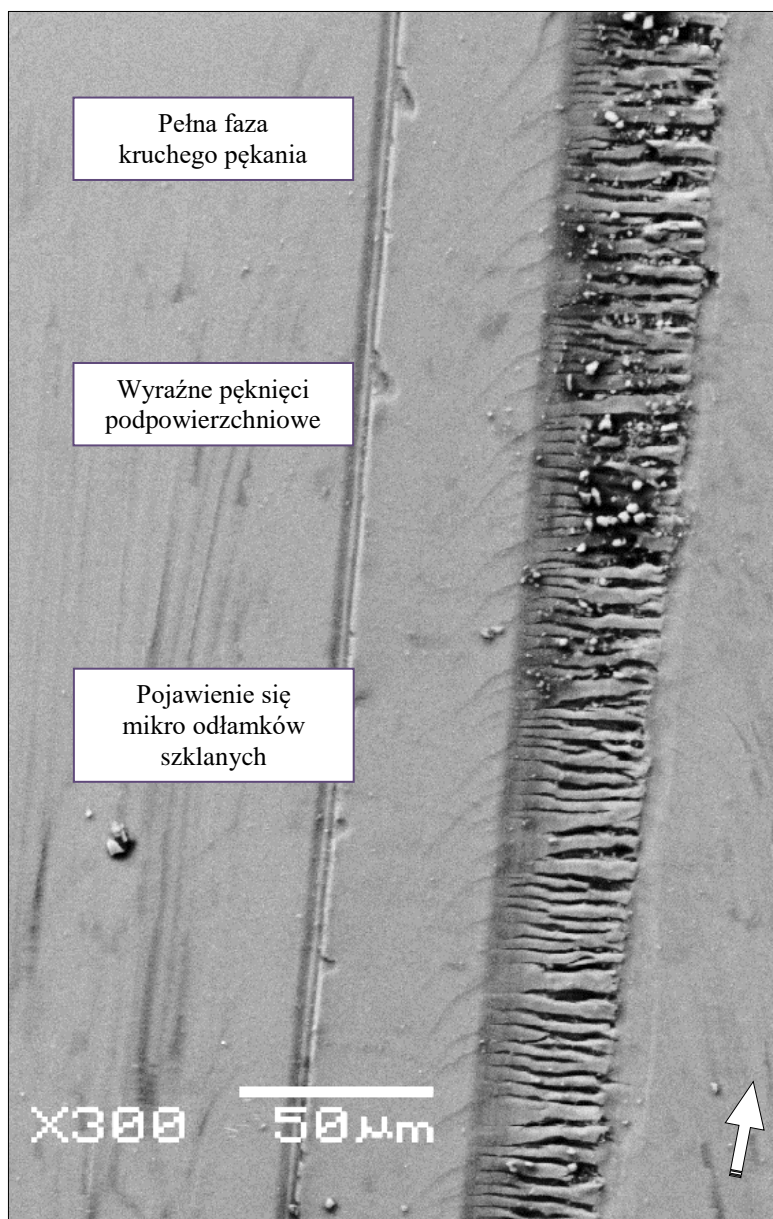
Wraz z dalszym rozwojem rysy, spowodowanym wzrostem głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, następuje zdecydowane przejście do fazy kruchego pęknięcia, poprzez sukcesywny rozwój poprzecznych pęknięć materiału w kierunku ruchu ziarna. Faza plastycznego płynięcia po prawej stronie właściwie zanikła (rys. 5.64).



**Rys. 5.64.** Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej

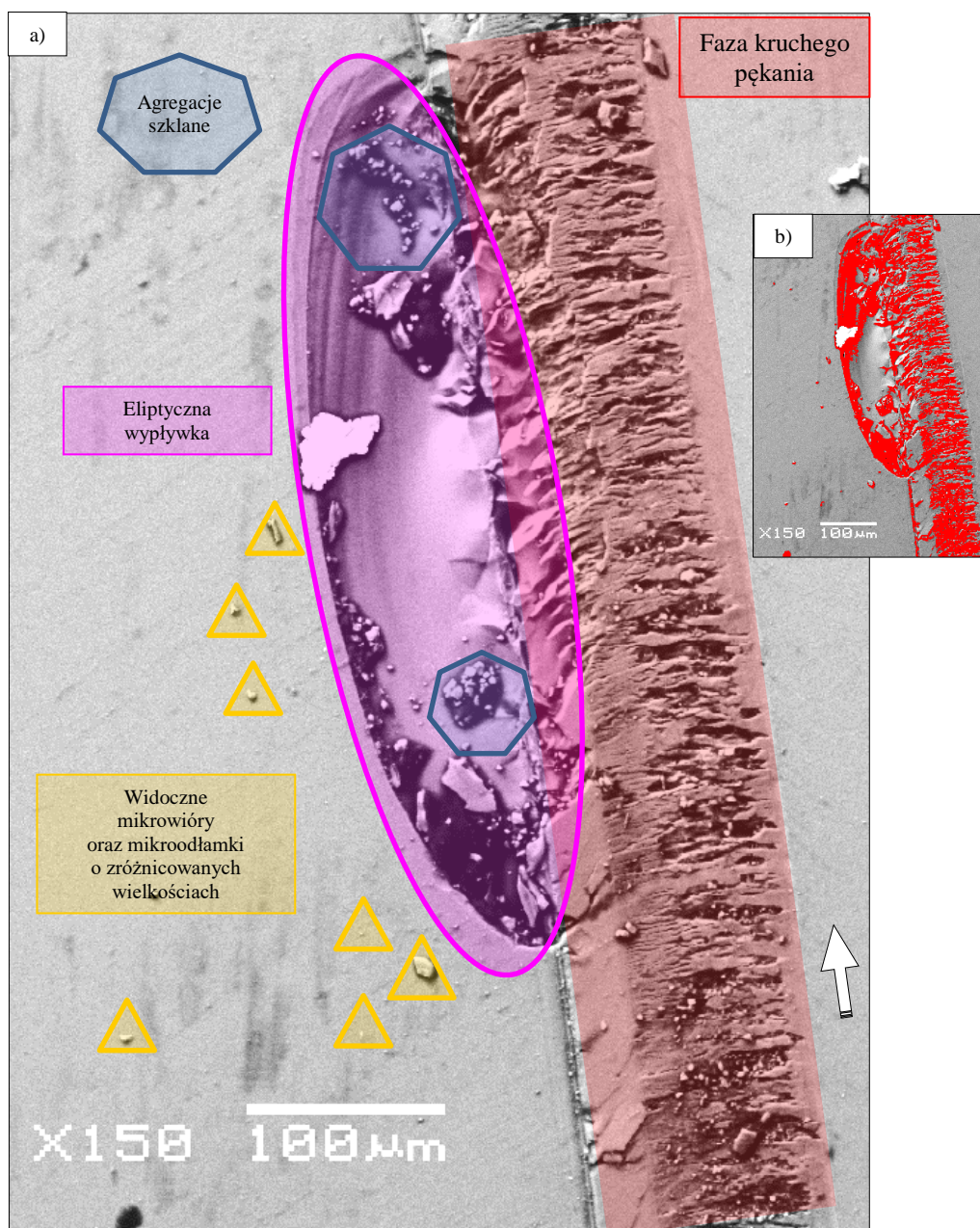


W momencie całkowitej dominacji zjawiska kruchego pęknięcia, można również zauważyć wysyp mikroodłamków, będących odpadem procesu skrawania, zaczynają pojawiać się po lewej stronie rysy pęknięcia przypowierzchniowe (rys. 5.65).



**Rys. 5.65.** Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej z defektami

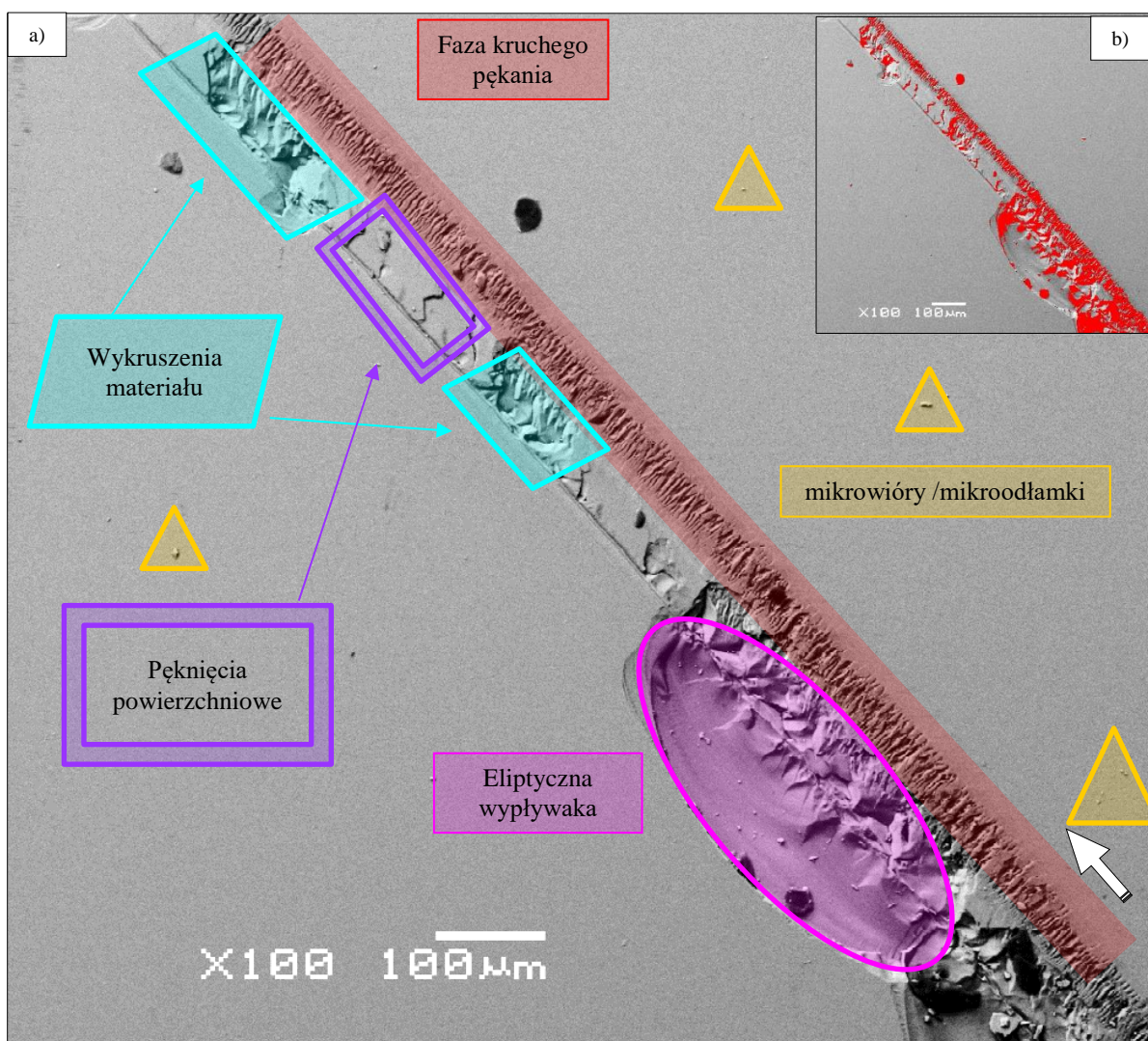
Po osiągnięciu szerokości rysy około 100  $\mu\text{m}$ , zaobserwowano różne rodzaje defektów materiału szklanego świadczące o mechanizmie kruchego pęknięcia, przechodzące w eliptyczne wypłytki, którym towarzyszą agregacje szklane w postaci wiórów mających wielkość od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów (rys. 5.66).



**Rys. 5.66.** Rysa 2 widok pełnego spektrum defektów charakterystycznych dla fazy kruchego pęknięcia, będącej już fazą destrukcji powierzchni szklanej: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

Ziarno skrawające osiągnęło największej głębokości wnikania w materiał skrawany, w przyjętej kinematyce obróbki, przy której proces mikroskrawania znajduje się w fazie kruchego pęknięcia. Widoczny jest bardzo wyraźnie defekt w postaci eliptycznej wypływki, jak również pojawiły się pęknięcia powierzchniowe promieniujące od rysy w kierunku dalszej struktury materiału. Zaobserwować można również pojedyncze wykruszenia materiału (rys. 5.67).

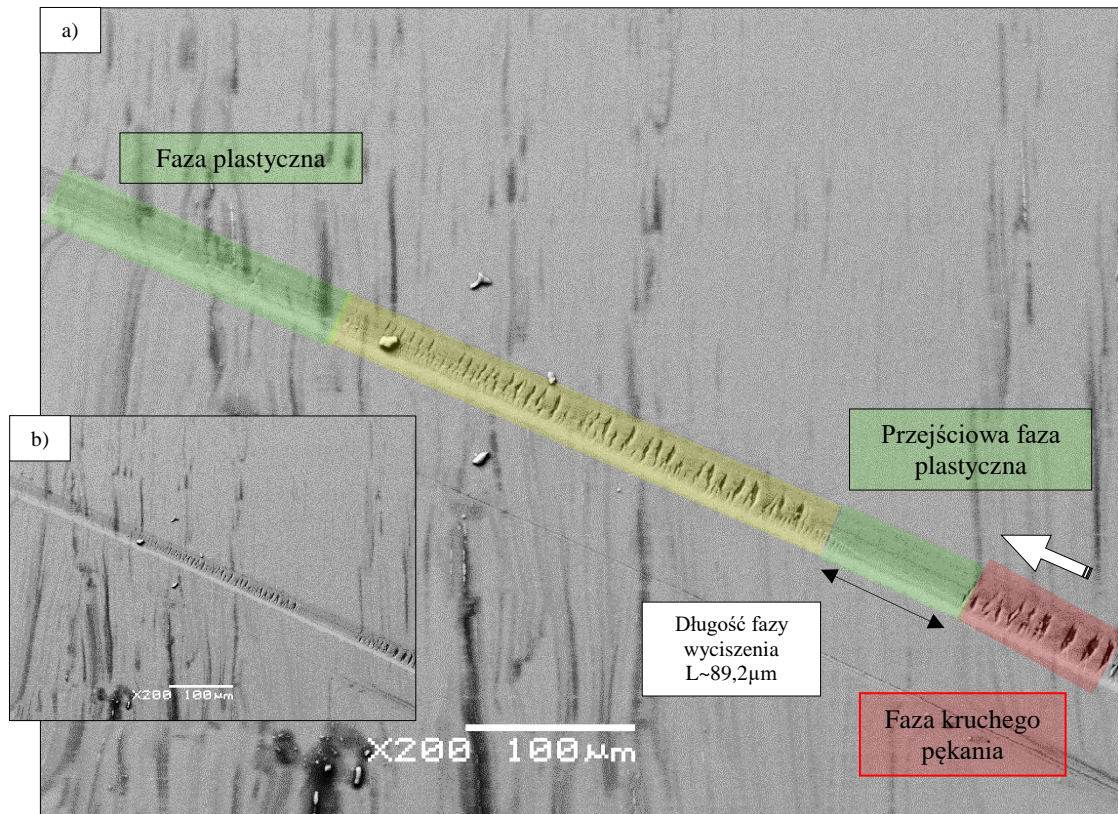




**Rys. 5.67.** Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej z defektami po przejściu granicznej głębokości: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

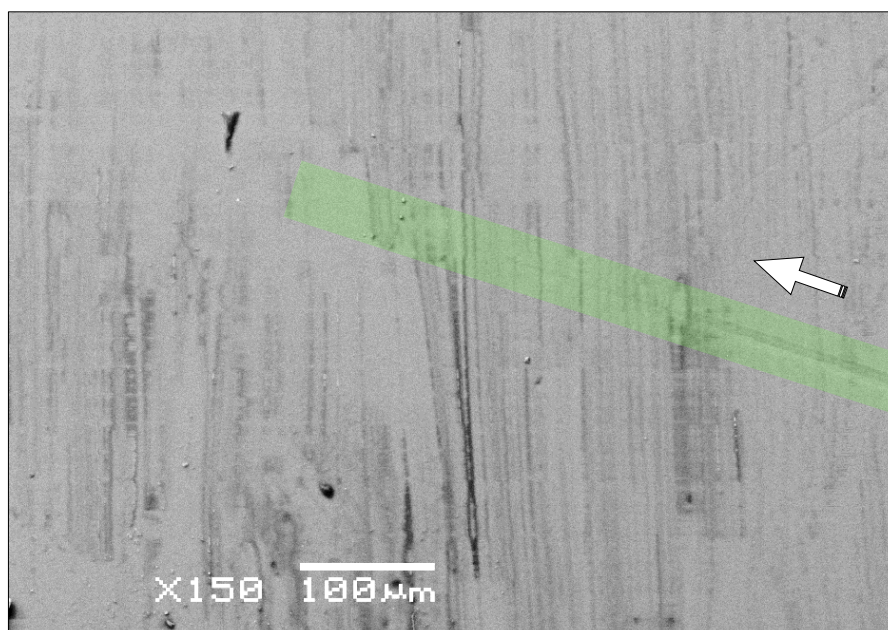
Następnie ziarno ściernie zmniejsza głębokość penetracji materiału, ściadczy o tym bezsprzecznie zmniejszająca się szerokość rysy, jak również zmiana warunków pracy. Mechanizm kuchej pękania powoli zanika, przechodząc w fazę plastycznego odkształcania materiału. Widoczne są odkształcenia krawędzi bocznych w postaci delikatnych wypiętrzeń i odwzorowaną geometrię ziarna, aby się znowu odnowić, przy czym poprzeczne pęknięcia są znacznie delikatniejsze, stopniowo zmniejszają się, aż do całkowitego wygaszenia. Na wyjściu ziarna ściernego z kontaktu z materiałem, postępuje faza plastycznego płynięcia (rys. 5.68).





Rys. 5.68. Rysa 2 obrazująca wychodzenie ziarna ściernego z przestrzeni roboczej

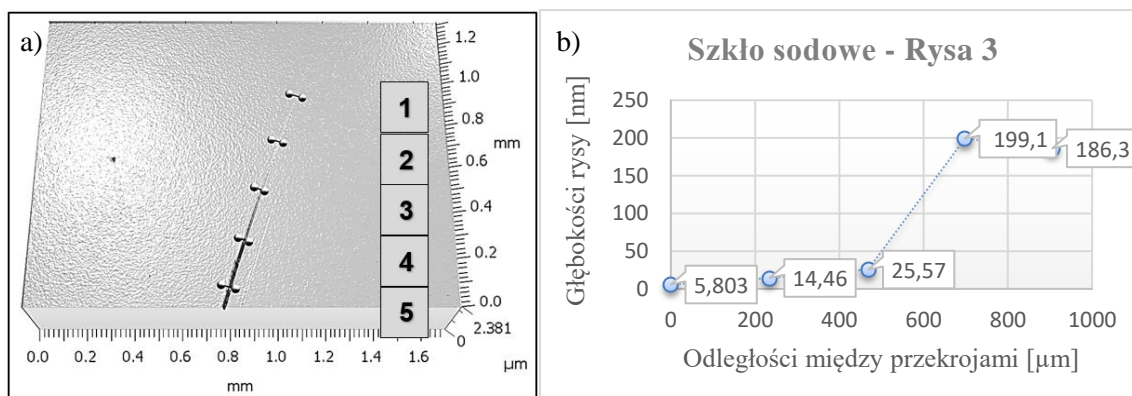
Zjawisko obserwowane na początku rysy, teraz przy jej zakończeniu znów się pojawia, kruche pęknięcie materiału zanika chwilowo, aby się znów po chwili się pojawić. Zjawisko to może wynikać z lokalnych chwilowych zmian głębokości wnikania ziarna ściernego, przy którym jest przewaga plastycznego, bądź kruchego pęknięcia. Analiza strefy wyjściowej pracy ziarna, ujawniła mechanizm odwrotny, gdzie można wyróżnić wszystkie fazy zaobserwowane w strefie wejściowej. Wierzchołek ziarna ściernego płynnie wychodzi materiału obrabianego, następuje równomierne zmniejszanie pęknięć poprzecznych, aż do ich całkowitego ich zniknięcia (rys. 5.69).



Rys. 5.69. Rysa 2 zakończenie procesu (faz plastyczna)

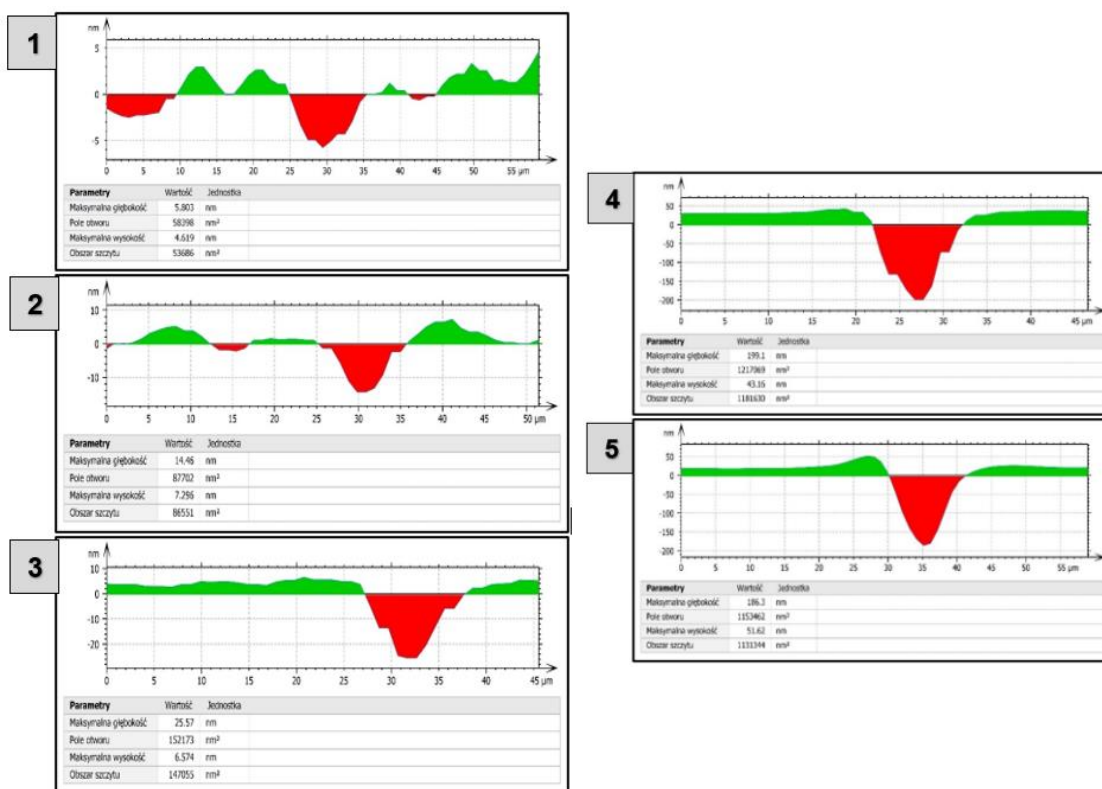
### Analiza stanu struktury powierzchni rysy nr 3

Rysa 3 została ukształtowana w kolejnym trzecim już przejściu ziarna ściernego po pochylonej pod kątem  $\approx 0,2604^\circ$  powierzchni roboczej próbki. Charakteryzuje się ona największymi głębokościami, w stosunku do rysy 1 i 2. Wynika to z wymuszeń kinematycznych drogi ruchu ziarna w kierunku głębokościowym (rys. 5.70).



Rys. 5.70. Rysa 2: a) widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów

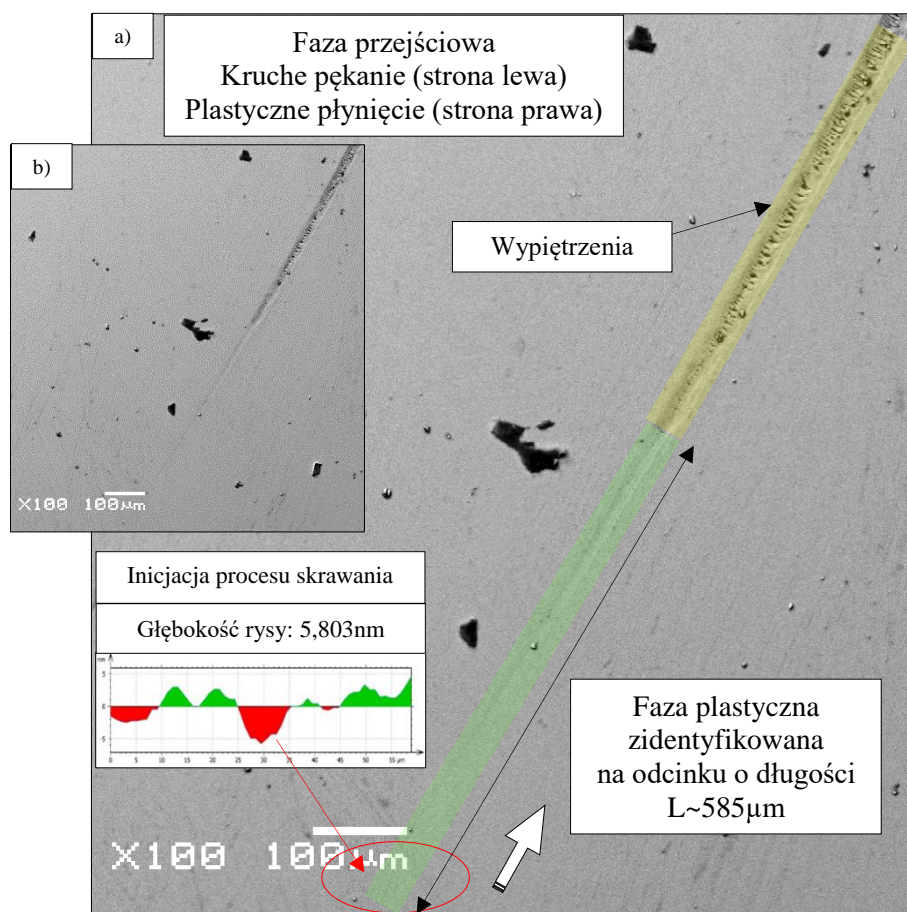
Odległości pomiędzy poszczególnymi przekrojami wynosiły ok.  $181\mu\text{m}$ . Ich zbiorczy widok przedstawia rys. 5.71.



Rys. 5 71. Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie

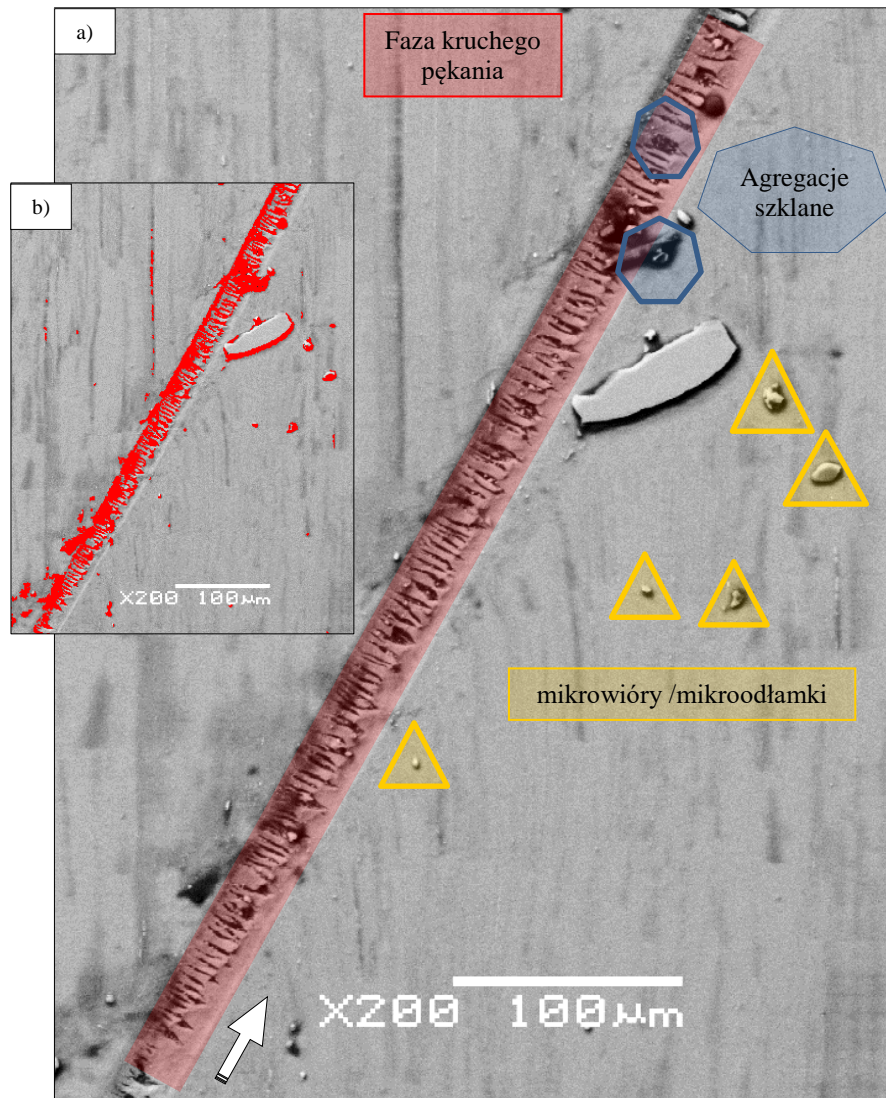
Przeprowadzona analiza obrazów skaningowych, ujawniła obszar inicjacji rysy, w postaci początkowego zagłębienia wierzchołka ściernego ziarna diamentowego. Po inicjacji rysy fazę plastycznego płynięcia zaobserwowano na odcinku wynoszącym około 585 $\mu$ m. Natomiast na odcinku wynoszącym około 330 $\mu$ m zauważono intensywne poszerzanie się szerokości rysy. W tym obszarze zaobserwować można wyraźną przewagę mechanizmu plastycznego płynięcia z widocznymi odkształceniami krawędzi bocznych, w postaci delikatnych wypiętrzeń. W dolnej części rysy zaobserwować można delikatne odkształcenia powstałe na skutek przejścia wierzchołka ziarna ściernego, odwzorowujące kształt geometryczny jego wierzchołka. W tym obszarze nie widać wyraźnych charakterystycznych dla mechanizmu kruchego pęknięcia defektów. Dopiero po przejściu drogi skrawania przez ziarno ściernie około 666 $\mu$ m, zaczynają się pojawiać defekty w postaci regularnych poprzecznych pęknięć, co świadczy o fazie przejściowej między plastycznym płynięciem materiału, a kruchym pękaniem (rys. 5.72).





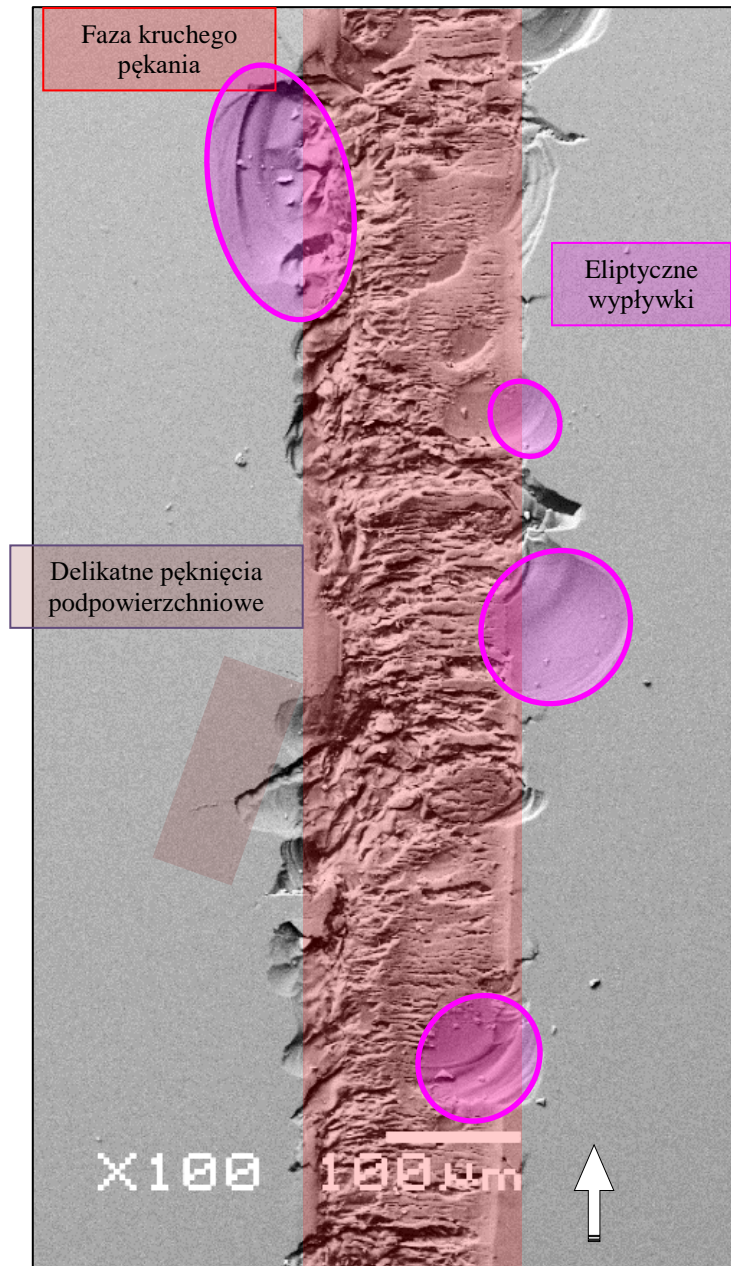
**Rys. 5.72.** Rysa 3 moment inicjacji i faza plastycznego płynięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny

Przejście z fazy plastycznej, początkowo do delikatnego poszerzenia rysy, objawia się pojawianiem pojedynczych subtelných pęknięć poprzecznych, ich intensywność rośnie wraz z rozwojem rysy, żeby ostatecznie faza kruchego pęknięcia zaczęła dominować nad fazą plastyczną. Wraz z rozwojem rysy spowodowanym wzrostem głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, następuje zdecydowane przejście do fazy kruchego pęknięcia. Faza plastycznego płynięcia po prawej stronie właściwie zanikła. Pojawiły się również mikrowykruszenia materiału o różnej wielkości. Niektóre z nich przypominają kształtem wióry znane z makroobróbki. Pojawiają się również agregacje szklane, złożone z kilku mikroodłamków (rys. 5.73).



Rys. 5.73. Rysa 3 obrazująca fazę kruchego pękania

W momencie, gdy ziarno ściernie znajduje się w swoim maksymalnym zagłębieniu, rysa osiąga szerokość przekraczająca  $150\mu\text{m}$ . W tym momencie rysa jest całkowicie zdegradowana i zdeformowana. Jest to krytyczny poziom kruchego pękania materiału szklanego. Można zauważyć również powtarzające się defekty w postaci pęknięć eliptycznych. Pojawiają się również delikatne pęknięcia podpowierzchniowe (rys. 5.74).



**Rys. 5.74.** Rysa 3 obrazująca całkowitą degradację struktury materiału

Po fazie zupełnej degradacji struktury powierzchni, przy zmniejszaniu się głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, nastąpiło gwałtowne zmniejszenie szerokości rysy, a proces przeszedł z fazy krytycznego kruchego pęknięcia, do fazy kruchego pęknięcia, charakteryzującej się regularnymi pęknięciami poprzecznymi o dużej intensywności. W momencie zmniejszania się głębokości penetracji materiału kruchego przez ziarno diamentowe, obserwuje się zmianę mechanizmu obróbki z całkowitej



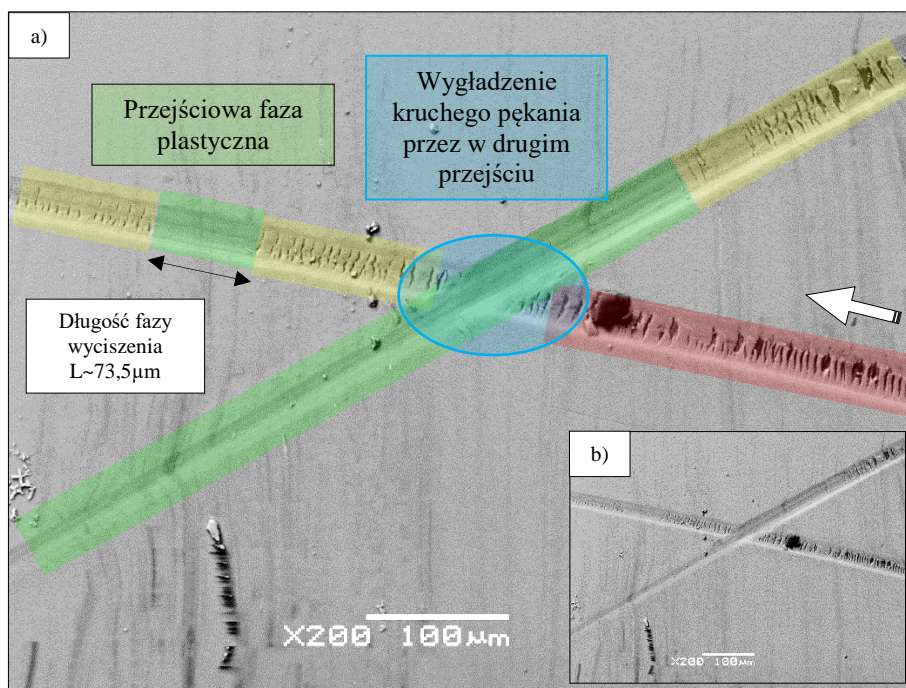
degradacji struktury, w fazę regularnego zagęszczenia pęknięć poprzecznym. Nadal pęknięcia te pojawiają się z dużą intensywnością (rys. 5.75).



*Rys. 5.75. Rysa 3 faza kruchego pęknięcia*

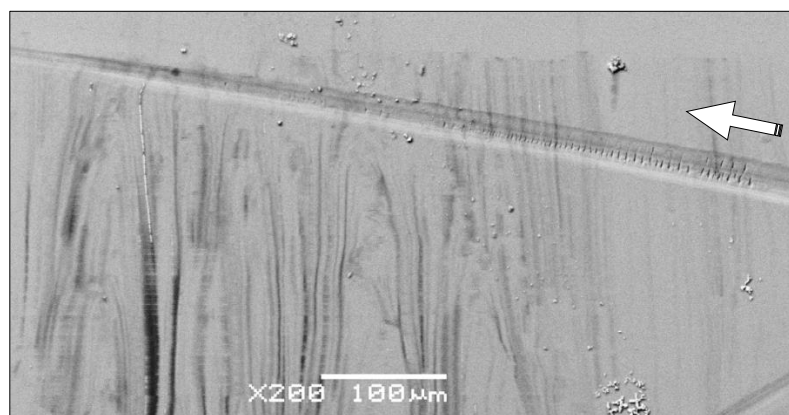
W miarę zmniejszania głębokości zagłębienia ziarna ściernego, obserwuje się zmniejszanie szerokości rysy, przejście z całkowitej fazy kruchego pęknięcia, na fazę przejściową (quazi), gdzie kruche pęknięcie w postaci poprzecznych pęknięć sukcesywnie zanika, a pojawia się coraz wyraźniej faza plastyczna. Znowu następuje zanikanie kruchego pęknięcia, żeby po chwili pojawiły się z mniejszym nasileniem znów poprzeczne pęknięcia.

Na analizowanym zdjęciu z mikroskopu skaningowego można dojrzeć jeszcze jeden ciekawy mechanizm, polegający na wygładzeniu rysy kolejną rysą, co świadczyłoby o tym, że zmiany struktury materiału spowodowane obróbką w fazie kruchego pęknięcia, można cofnąć, przechodząc do fazy plastycznych odkształceń (rys. 5.76).



**Rys. 5.76.** Rysa 3 zmniejszenie głębokości wnikanía ziarna ściernego

Kolejny raz powtórzyła się taka sama sekwencja: chwilowa faza plastyczna, pojawienie się kruchego pęknięcia poprzecznych pęknięć o tendencji malejącej, aż do uzyskania pełnej fazy plastycznego płynięcia materiału (rys. 5.77).



**Rys. 5.77.** Rysa 3 zakończenie śladu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym

Analizy te mają charakter poznawczy o znaczeniu podstawowym, umożliwiając obserwację i ocenę zjawisk występujących w strefie mikro- i nanoskrawania, wpływających na stan struktury geometrycznej rysy powstającej w określonych warunkach technologicznych. Są one ściśle związane z głębokością wnikanía ziarna ściernego w materiał obrabiany charakteryzujący się dużym stopniem kruchości. Są to zjawiska

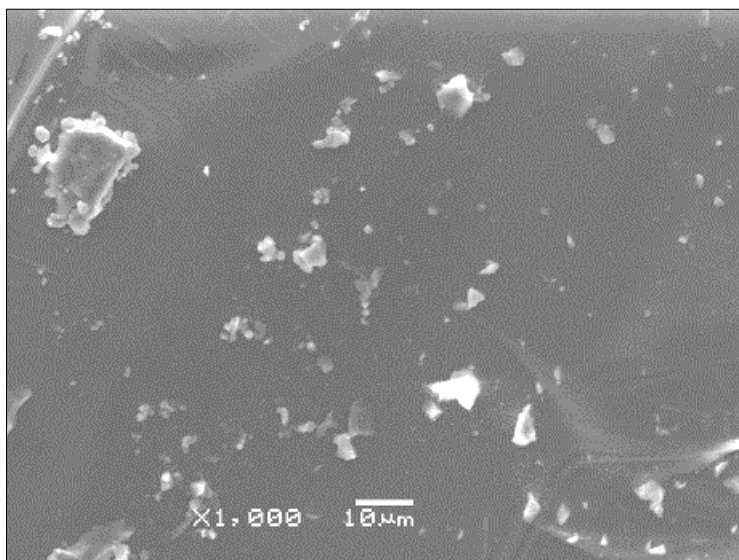
okresowe, występujące na określonych odcinkach pracy ziarna i ulegają zmianie wraz ze wzrostem głębokości obróbki.

W celu rozszerzenia zakresu informacji o zjawiskach zachodzących w analizowanym procesie mikroskrawania materiału szklanego, w dalszej kolejności przeprowadzono analizę postaci wyizolowanych wiórów.

### 5.2.6.3. Analiza formy wiórów powstałych w procesie mikroskrawania

Analizę formy wiórów powstałych i ukształtowanych w wyniku mikroskrawania płaskiej powierzchni próbki szklanej diamentowym ziarnem ściernym, przeprowadzono z zastosowaniem obrazów uzyskanych przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego. Dla zidentyfikowanych warunków pracy ziarna, zaobserwowano charakterystyczne wióry, które można przyporządkować do określonych etapów obróbki.

Dla mechanizmu kruchego pęknięcia o wysokiej intensywności przy stosunkowo szerokiej rysie i dużej głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, zaobserwowano wyraźne deformacje szklanego materiału w postaci dużych kruchych defragmentacji materiału pod wpływem pracy ziarna ściernego. Widoczne są również wyraźnie mniejsze wielkości tak uformowanych odprysków materiału szklanego, które ukształtowane zostają w wyniku przejścia ziarna ściernego na nieco mniejsze głębokości (rys. 5.78).

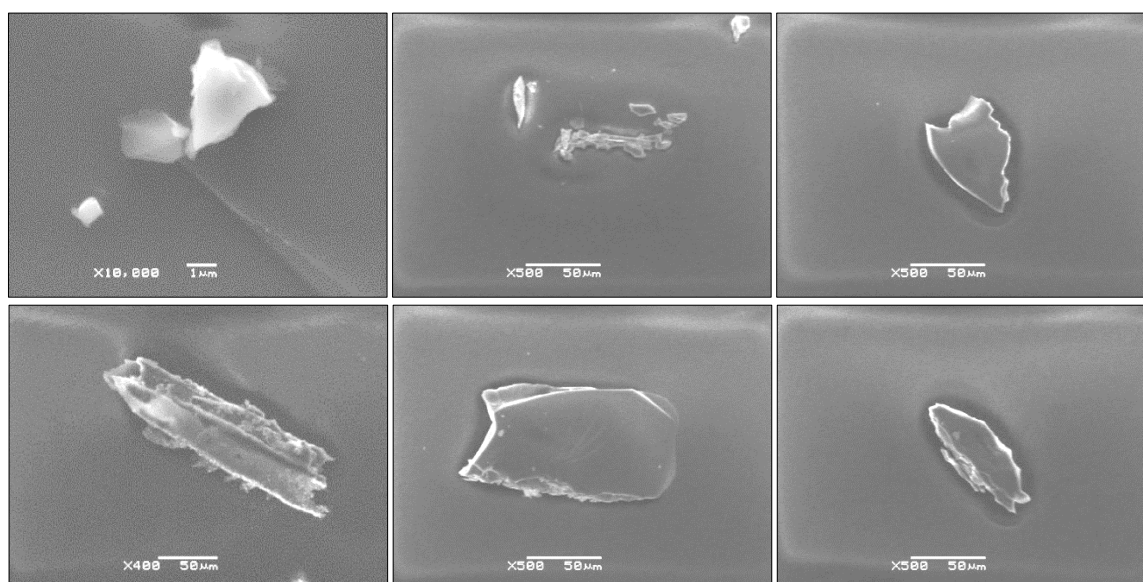


**Rys. 5.78.** Obraz skaningowy mikro- i nanowiórków otrzymanych w procesie mikro- i nanoskrawania materiału kruchego pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym

Na obrazach skaningowych, na których zidentyfikowano obszary z przewagą udziału mechanizmu plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki, zaobserwowano struktury o stosunkowo małych gabarytach (poniżej  $1\mu\text{m}$ ), o wydłużonych kształtach i stosunkowo niewielkiej grubości, struktura płaska, cienika, wydłużona. Struktury te można charakteryzować jako płatki szklane. Ich powierzchnie w stosunku do grubości są bardziej rozwinięte i w mniejszym stopniu przypominają formy bryłowe, uformowane w warunkach kruchego pęknięcia. Gdy ziarno ściernie przemieszcza się przy głębokościach nanometrycznych, w obszarze powstającej rysy można zaobserwować mikrostruktury trudne do analizy optycznej z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Niemniej jednak możliwe było zidentyfikowanie struktury mikrowiórów charakteryzujących się wielkością poniżej  $1\mu\text{m}$ , a najmniejsze zarejestrowane deformacje materiału szklanego poddanego obróbce oszacowano na struktury dochodząc (od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów). Analizowane zdjęcia mikroskopowe podparte zostały analizą profilometryczną, na podstawie której można przyjąć, że wstępna inicjacja ziarna ściernego w kontakcie z płytką szklaną, powoduje bruzdowanie powierzchni szklanej przez wierzchołek ziarna względem badanej próbki. Powoduje to stosunkowo długie odcinki penetracji ziarna ściernego w materiale szklanym na głębokości kilku nanometrów. W tym obszarze powstające wióry oraz struktury je przypominające charakteryzują się bardzo małymi wymiarami, odpowiednio do głębokości zagłębienia wierzchołka skrawającego. Można przyjąć, że na stosunkowo długim obszarze przejścia ziarna ściernego, proces formowania wióra zachodzi według mechanizmu plastycznego płynięcia, gdyż w tym obszarze nie obserwowano dużej liczby struktur o wielkości powyżej kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów. Można założyć, że dla głębokości  $3\div 4\text{nm}$ , uformowana postać wióra przyjmuje podobne gabaryty. Są one jednak zbyt małe, aby można je było identyfikować metodą skaningową. Jednakże przeprowadzona analiza przy różnych powiększeniach oraz wspomniana wcześniej analiza z wykorzystaniem profilometru, pozwala wysnuć wniosek, że ziarno ściernie po osiągnięciu głębokości  $5\div 6\text{nm}$  w materiale obrabianym, uzyskuje warunki podobne do tych, jakie powstają w wyniku formowania się wióra w skali makro. Po wstępnym kontakcie i pracy ziarna ściernego etapie bruzdowania następuje spiętrzenie materiału, a następnie formowanie się wióra w postaci cienkiej warstwy wypiętrzonej przez ziarno ściernie. Tak powstała struktura po osiągnięciu odpowiedniej długości, ulega



zapoczątkowaniu quazi–kruchemu pęknięciu, w wyniku czego powstaje wiele mikroodprysków charakterystycznych dla łamania i rozpraszaniu się mikrostruktury materiału szklanego. Na tej podstawie można przypuszczać, że podczas pracy ziarna ściernego w materiale obrabianym, następuje mikrohartowanie szkła. W wyniku tego, uplastyczniony wiór ulega nano– i mikrorozproszeniu, podobnie jak zachodzi to w szkle hartowanym (rys. 5.79).



**Rys. 5.79.** Obraz skaningowy mikro– i nanowiórków otrzymanych w procesie mikro– i nanoskrawania materiału kruchego pojedynczym ziarnem diamentowym

#### 5.2.6.4. Przyczynowo–skutkowa analiza zjawisk zachodzących w strefie mikro– i nanoskrawania diamentowym ziarnem materiału szklanego

Na podstawie przeprowadzonych w poprzednich rozdziałach analiz, można sformułować opisowy model przemieszczania ziarna ściernego w strefie obróbki materiału szklanego i formowania struktury powierzchniowej powstającej rysy. W ujęciu sekwencyjnym, poszczególne etapy pracy ziarna, można charakteryzować w następujący sposób:

1. Pojedyncze diamentowe ziarno ściernie inicjuje proces skrawania zgłębiając się w materiał obrabiany zamocowanym w uchwycie kątowym, pod małym pochyleniem wynoszącym  $\alpha 0,3871^\circ$  (szkło interferencyjne)  $\alpha 0,2604^\circ$  (szkło sodowe), takie ustawienie próbki w procesie skrawania pozwala na określonym odcinku zagłębiać się w materiał obrabiany z przyrostem głębokości. Dla początkowej fazy wejścia ziarna ściernego w obrabiany materiał (inicjacja procesu skrawania), nie występują cechy



charakterystyczne dla mechanizmu kruchego pęknięcia w postaci defektów promieniowych, środkowych ani prostopadłych, jak również eliptycznych. Wierzchołek ziarna ściernego rozpoczyna skrawanie przy bardzo małych głębokościach wnikania w materiał, dla której wektor naprężeń rozciągających jest poniżej wartości progowej inicjującej mechanizm kruchego pęknięcia. Dzięki temu ziarno ściernie przemieszcza bardzo małą objętość materiału obrabianego. Na tym początkowym etapie wnikania ziarna ściernego w obrabiany materiał, naprężenia wewnątrz warstwy przypowierzchniowej narastają zgodnie z teorią trójosiowego ściskania, które pozostają w równowadze i prowadzą do lokalnego uplastycznienia materiału. Świadczyć o tym mogą krawędzie powstającej rysy, jako wynik przejścia ziarna ściernego wzdłuż toru ruchu wyznaczonego przez kinematykę tarczki z osadzonym na niej ziarnem skrawającym. Krawędzie te są nieco wzniesione, co świadczy o szybkim narastaniu odkształceń, jednak nie pojawiają się na ich krawędziach ani w bezpośredniej ich sąsiedztwie ani dalszym, defekty w postaci pęknięć. Można stwierdzić, że materiał w tym miejscu odkształcił się plastycznie (rys. 5.80).



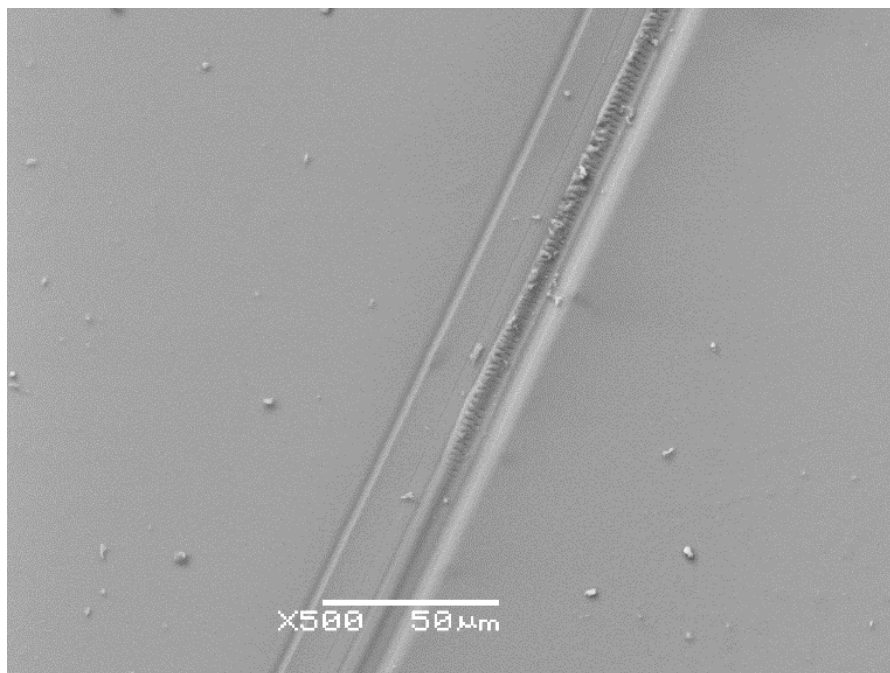
Wióry (odłamki szklane)

**Rys. 5.80.** Przebieg rysy w fazie plastycznego płynięcia materiału wraz z pojawiającymi się mikrowiórami

Analiza geometryczna wiórów, które powstały na skutek przejścia diamentowego ziarna ściernego pozwalają sądzić, że dla nanometrycznego zagłębienia wierzchołka ziarna

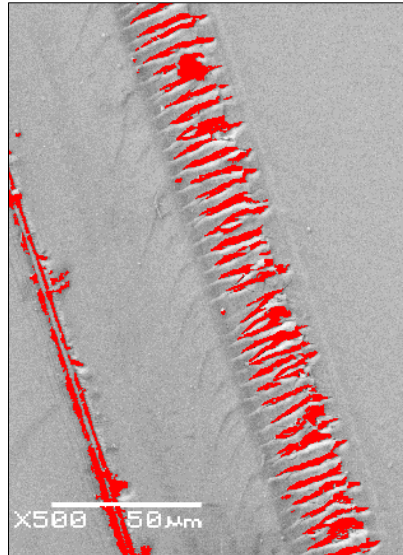
ściernego, powstaje plastycznie odkształcony wiór o grubości nie przekraczającej kilku nanometrów. Tak małych fragmentów w postaci ostro odciętych wiórów szklanych o nanometrycznej wielkości nie udało się zaobserwować w początkowej części rysy. Tego typu wiór, jeśli nawet osadziłby się na powierzchni lub w dolnej części rysy, nie mógłby być zaobserwowany na mikroskopie skaningowym. Dodatkowo ich osiadanie blisko miejsca ich powstawania (w początkowej strefie powstającej rysy) jest ograniczone tym, że na skutek oddziaływania ziarna ściernego po oddzieleniu nanowióra od struktury materiału skrawanego, najprawdopodobniej mogą unosić się w powietrzu. Przeprowadzona analiza wykazała, że dopiero w kolejnych etapach przemieszczania się ziarna ściernego względem powierzchni obrabianej, można zaobserwować większe wióry, których wielkość oscyluje między 500÷1000 nm. Dla zastosowanej techniki pomiaru, jest to najprawdopodobniej granica identyfikacji tych cząstek powstałych na skutek oddzielania się i defragmentacji wióra.

2. Ziarno ściernie kontynuując zagłębianie w materiał obrabiany formuje coraz większą objętość materiału obrabianego dalej w warunkach trójosiowego ściskania w warunkach plastycznego płynięcia materiału szklanego. Jednak narastająca głębokość wnikania ziarna, powoduje znaczne obciążenia termiczne ziarna i materiału, co intensyfikuje spiętrzenie plastycznie odciętego materiału skrawanego. Powstające w objętości tak formowanego wióra naprężenia termiczne oraz postępujące na skutek narastających bardzo szybko odkształceń plastycznych materiału, powodują dalsze deformacje i pierwotnie uplastyczniony wiór ulega defragmentacji i ponownemu kruszeniu. Jest to skutkiem wzrastającej temperatury oraz dyslokacji inicjujących się w objętości powiększającego się wióra. O takim mechanizmie przemieszczeń wewnątrz wióra wypychanego przez wierzchołek ziarna ściernego może świadczyć to, że na dalszych etapach tworzenia rysy, obserwowano nieco większe fragmenty odłamków szkła pochodzących z wiórów, przy jednoczesnym ciągle prowadzonym w warunkach plastycznego płynięcia formowaniu się rysy po obróbkowej. Na jej bocznych powierzchniach i w dolnej części rysy nie obserwowano defektów w postaci dobrze wykształconych nieciągłości w postaci pęknięć i wykruszeń (rys. 5.81).



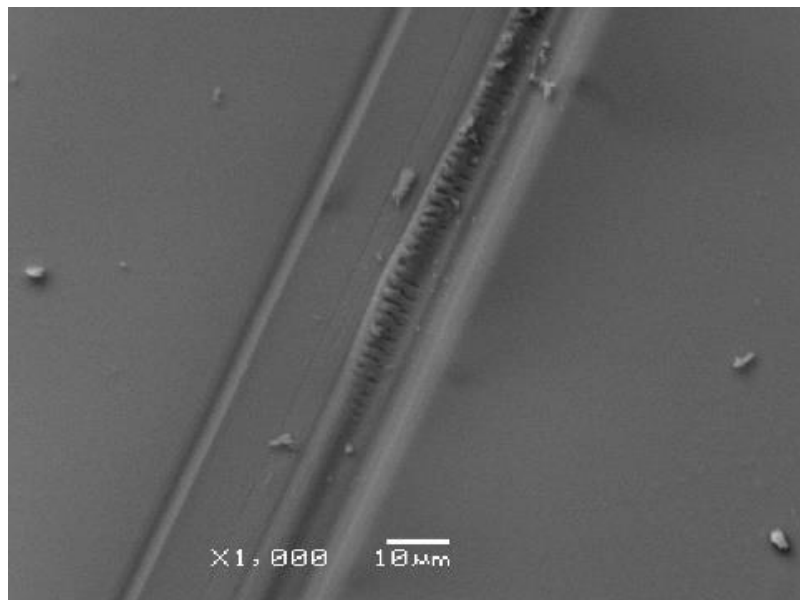
**Rys. 5.81.** Fragment rysy z mechanizmem plastycznego usuwania materiału (prawa strona rysy) oraz pojawiającymi się poprzecznymi pęknięciami (lewa strona rysy) wraz z mikrowykruszeniami

3. Przy dalszym przemieszczaniu się ziarna w strukturze powierzchniowej rys można zaobserwować zmianę mechanizmu usuwania materiału, gdzie dominującym staje się mechanizm kruchego pęknięcia. Dla tego etapu ziarno ściernie skrawając materiał osiąga już głębokość powodującą, że objętość usuwanego materiału i siły oddziaływujące między wierzchołkiem ziarna, a przedmiotem obrabianym są na tyle duże, że wartość krytyczna energii koniecznej do usunięcia określonej objętości materiału obrabianego jest wystarczająca, aby zainicjować mechanizm oddzielania i usuwania materiału na drodze kruchego pęknięcia. Na zdjęciach skaningowych oraz na wybranych analizach profilometrycznych i po analizie defektów z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania graficznego, widoczne są defekty w postaci pojedynczych (najczęściej) prostopadłych szczelin, usytuowanych prostopadle do kierunku ruchu ziarna ściernego (rys. 5.82).



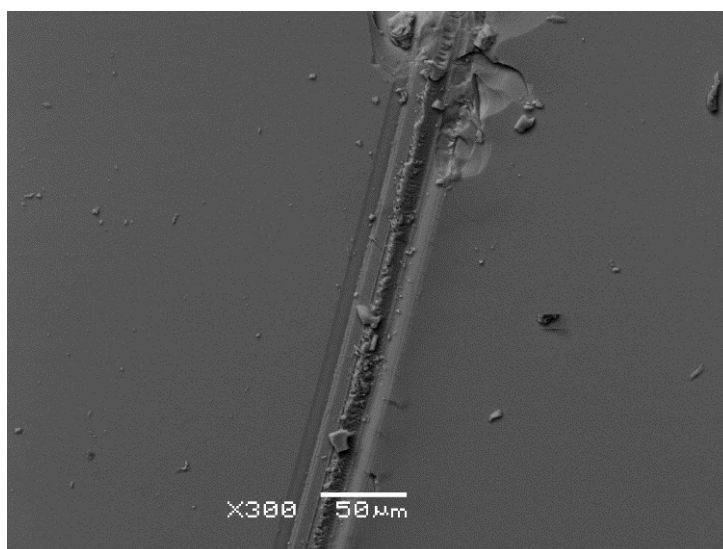
**Rys. 5.82.** Faza kruchego pęknięcia wraz z pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy, identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus

Inaczej, miało to miejsce w fazie wcześniejszej, w której energia kruchego pęknięcia była zbyt mała, aby zainicjować mechanizm kruchego pęknięcia, a dominującym mechanizmem było plastyczne płynięcie, czyli energia konieczna do formowania stosunkowo małej objętości materiału obrabianego odpowiednio przemieszczonego i uplastycznionego. Na tym etapie (rys. 5.83) można stwierdzić, że równoległe przebiega zarówno mechanizm kruchego pęknięcia, jak i zanikający mechanizm plastycznego płynięcia.



**Rys. 5.83.** Początek fazy kruchego pęknięcia

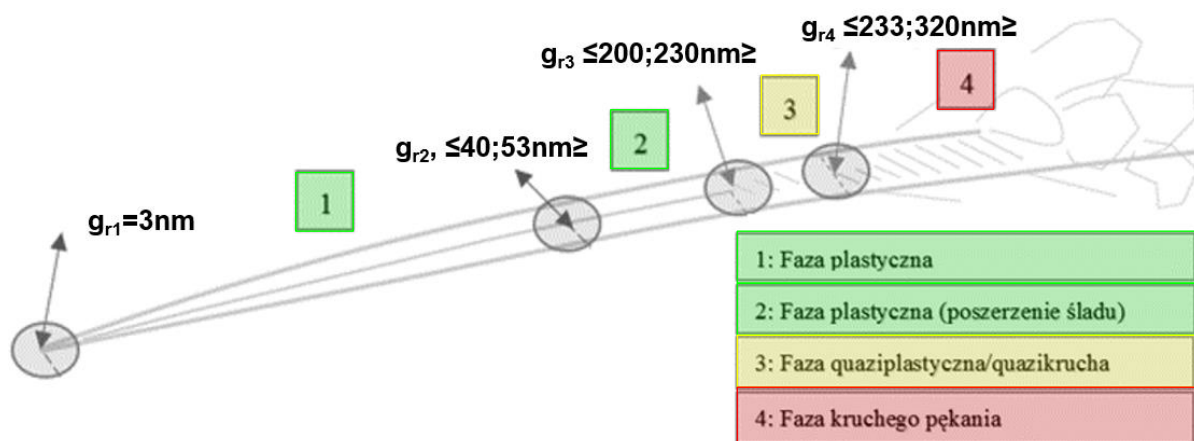
4. Przy postępującym przemieszczeniu się ziarna ściernego intensyfikują się zainicjowane mechanizmy, występujące w strefie obróbki. Rysa coraz lepiej się kształtuje wyraźne stają się wypływki i wypiętrzenia materiału, które narastają ze względu na przejście coraz bardziej zagłębionego ziarna, które poszerza i pogłębia ślad w postaci rysy po obróbkowej. Objętość usuwanego materiału wzrasta oraz narastają dyslokacje i równolegle pojawiają się coraz większe defekty w dolnej części rysy aby w kolejnych etapach rozprzestrzenić się w postaci pęknięć bocznych, środkowych, a w konsekwencji eliptycznych charakterystycznych dla wyłupywania znacznych fragmentów powierzchni obrabianej w procesie skrawania materiałów kruchych (rys. 5.84).



**Rys. 5.84.** Faza kruchego pęknięcia materiału szklanego

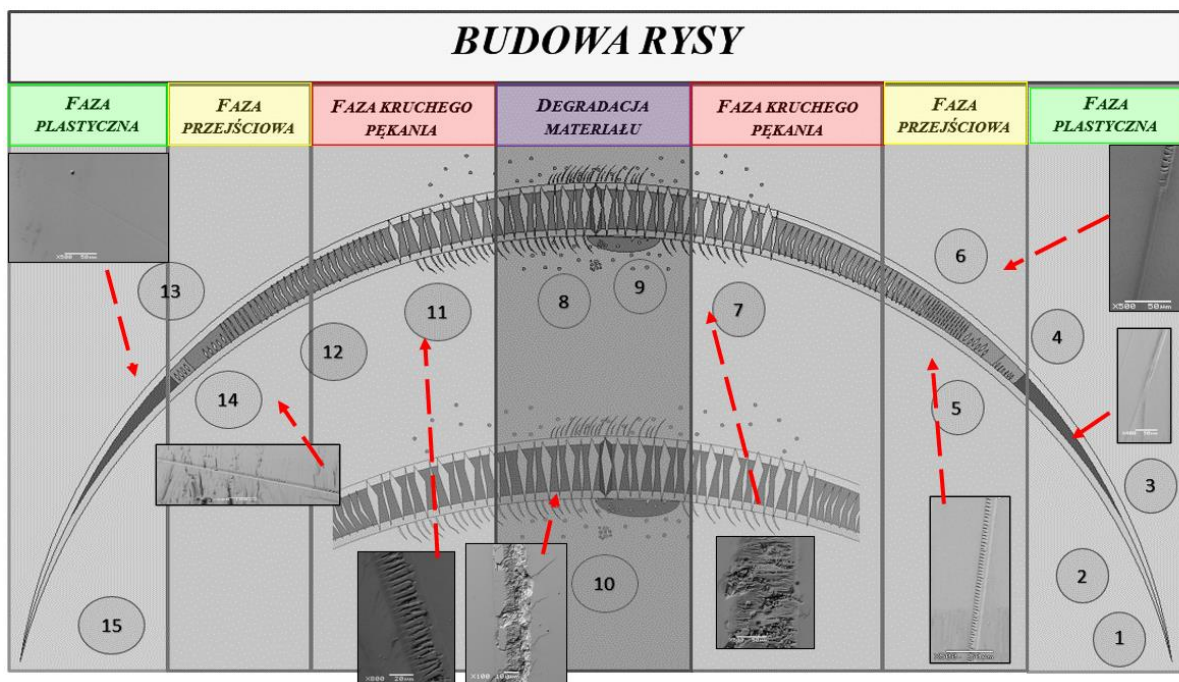
Poddając szczegółowej analizie uzyskane wyniki badań realizowanych z zastosowaniem mikroskopu skaningowego (materiał zdjęciowy) oraz profilometru optycznego (materiał parametryczny) procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z diamentu syntetycznego, w sposób ilościowy określono granice poszczególnych faz występujących w obróbce materiałów kruchych (rys. 5.85).





Rys. 5.85. Granice wyznaczonych faz określających odkształcenia materiału w strefie obróbki wzdłuż początkowej drogi ziarna podczas mikro- i nanoskrawania materiałów kruchych

Po wnikliwej analizie powierzchni próbek szklanych przy użyciu mikroskopu skaningowego, odwzorowano modelową rysę ukształtowaną w kinematyce szlifowania czołowego. Dzięki tej analizie można wysnuć wnioski, że przemieszczenie materiału kruchego w strefie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym, charakteryzują następujące uszczegółowione etapy (rys. 5.86):



Rys. 5.86. Model rysy stworzony na podstawie obrazów skaningowych otrzymanych podczas procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym, ukazujący analizę przemieszczania materiału kruchego strefie obróbki

- 1) inicjacja zagłębienia ziarna – **faza plastycznego płynięcia materiału obrabianego w strefie mikroobróbki,**
- 2) rozwój rysy – **dalszy rozwój fazy plastycznego płynięcia materiału,**
- 3) zwiększanie się szerokości rysy - **kontynuacja rozwoju fazy plastycznego płynięcia materiału,** delikatne boczne wypiętrzenie materiału, odwzorowanie geometrii wierzchołka ziarna ściernego,
- 4) pojawienie się równomiernych poprzecznych pęknięć o małej intensywności po jednej stronie rysy, a druga strona rysy pozbawiona defektów, **faza plastycznego płynięcia materiału połączona z fazą kruchego pęknięcia** (quazi)
- 5) pojawienie się defektów w postaci poprzecznych pęknięć o większej intensywności oraz wzrost ich szerokości – **faza kruchego pęknięcia,**
- 6) pęknięcia przypowierzchniowe – **faza kruchego pęknięcia,**
- 7) wzrastający stopień destrukcji materiału obrabianego mikroodłamki, mikrowióry, agregacje szklane - **faza intensyfikacji kruchego pęknięcia,**
- 8) eliptyczne wykruszenia – **faza dalszej intensyfikacji kruchego pęknięcia,**
- 9) całkowita degradacja struktury materiału – **destrukcyjna faza kruchego pęknięcia,**
- 10) pęknięcia powierzchniowe,
- 11) zmniejszenie szerokości rysy – **faza kruchego pęknięcia,**
- 12) regularne deformacje struktury materiału w postaci poprzecznego pęknięcia o dużej intensywności – **faza kruchego pęknięcia,**
- 13) pojawienie się równomiernych poprzecznych pęknięć o małej intensywności – **faza plastyczna połączona z fazą kruchego pęknięcia** (quazi),
- 14) stopniowy zanik delikatnych defektów w postaci poprzecznych pęknięć – **faza plastyczna połączona z fazą kruchego pęknięcia** (quazi),
- 15) zmniejszanie przekroju rysy, aż do całkowitego zaniku – **faza plastycznych odkształceń materiału w strefie obróbki,**

Informacje te mają istotne znaczenie dla doboru wartości dosuwu przy obróbce materiałów szklanych, które zapewnią kształtowanie ich powierzchni o zminimalizowanej ilości defektów powierzchniowych.

## 5.2.7. Wnioski z realizacji procesu mikro– i nanoskrawania

Po przeprowadzeniu wnikliwej analizy literaturowej i teoretycznej procesu mikro– i nanoskrawania, jak i przeprowadzeniu autorskich badań, można wyciągnąć następujące wnioski:

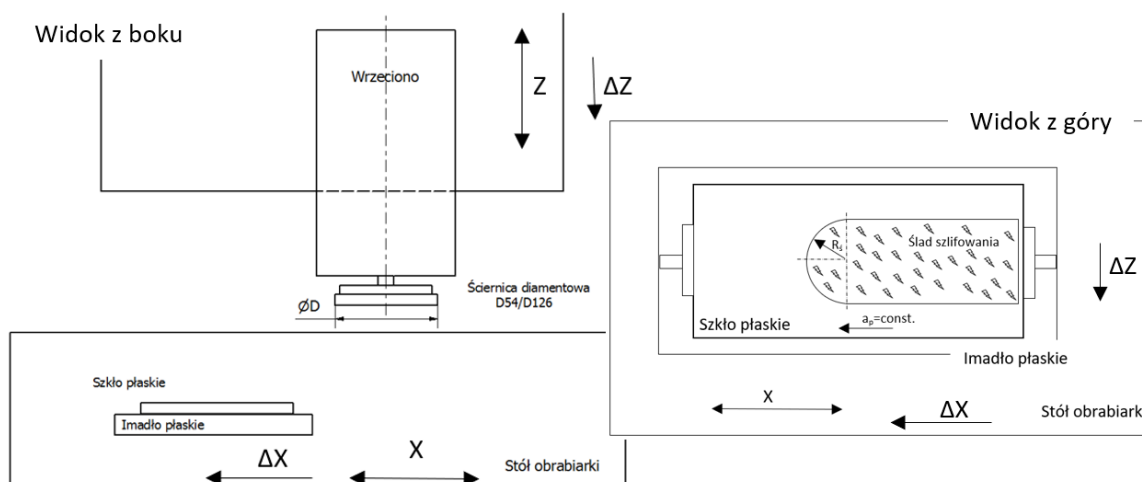
1. Zastosowanie mocowania kąowego ( $\alpha 0,3871^\circ$  oraz  $\alpha 0,2604^\circ$ ), w połączeniu ruchem obrotowym ( $s=70\text{obr/min}$ ) ziarna ściernego osadzonego na promieniu (R12) i posuwu ( $f=160\text{mm/min}$ ), umożliwiło otrzymanie łukowych, oddalonych od siebie przejść ziarna, co umożliwiło łatwiejszą identyfikację śladu po obróbkowego. Dzięki kąowemu ( $\alpha 0,3871^\circ$  oraz  $\alpha 0,2604^\circ$ ) ustawieniu próbki otrzymano długi ślad w postaci rysy o pełnym spektrum zachodzących zjawisk w procesie skrawania materiałów szklanych.
2. Zastosowanie profilometru optycznego i mikroskopu skaningowego umożliwiło pełną identyfikację śladu po przejściu ziarna ściernego. Umożliwiło analizę przemieszczania materiału w strefie mikro– i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym w zakresie  $\langle 3,499\text{nm}; 12530\text{nm} \rangle$ .
3. Zastosowanie sygnału emisji akustycznej w obszarze roboczym umożliwiło weryfikację, czy przyjęta kinematyka obróbki przebiega w sposób stabilny oraz czy jest możliwe jej monitorowanie w czasie rzeczywistym.
4. Potwierdzono istnienie trzech głównych trybów obróbki materiałów szklanych: plastyczny, quazi–plastyczny, guazi–kruchy i kruchy.
5. Określono granice dosuwu narzędzia ściernego który zapewni obróbkę w fazie plastycznego płynięcia materiału szklanego które wynoszą  $\leq 0; 230\text{nm} \geq$ , faza przejściowa mieści się w granicach  $\langle 230\text{nm}; 233\text{nm} \rangle$ , w zakresie wartości  $\leq 230\text{nm}; 320\text{nm} \geq$  zidentyfikowano początkowe efekty kruchego pęknięcia.
6. Opracowano rysę modelową, na podstawie powtarzających się zjawisk zidentyfikowanych w strukturze śladu po przejściu ziarna ściernego, gdzie wyróżniono:
  - inicjacja zagłębienia ziarna,
  - rozwój rysy,
  - zwiększanie szerokości rysy,
  - pojawienie się równomiernych poprzecznych pęknięć o małej intensywności po stronie wewnętrznej rysy, natomiast po stronie zewnętrznej nie zidentyfikowano defektów,

- wzrost intensywności defektów w postaci poprzecznych pęknięć oraz wzrost ich szerokości,
  - pęknięcia przypowierzchniowe,
  - wzrastający stopień destrukcji materiału,
  - całkowita degradacja struktury materiału.
7. Wykonane badania potwierdzają zmiany mechanizmu usuwania materiału obrabianego w strefie skrawania kruchy/plastyczny oraz zmiany geometrii i struktury w warstwie wierzchniej materiału szklanego na skutek oddziaływania ziarna ściernego na materiał obrabiany wykonany ze szkła sodowego. Zmiany mechanizmu kruchy/plastyczny powstają na skutek narastającego naprężenia ścinającego rozprzestrzeniając się w materiale szklanym zgodnie z teorią Griffithsa. Jeśli wektor naprężenia osiągnie wartość graniczną dochodzi do pęknięcia propagującego w głąb materiału obrabianego. Energia konieczna do rozprzestrzeniania kruchego pęknięcia pochodzi od ziarna, a jej wartość jest ściśle skorelowana z głębokością jego wnikania. Jeśli natomiast ziarno ściernie zgłębia się jedynie na głębokość kilkunastu (granicznie kilkuset nm), energia konieczna do propagacji kruchego pęknięcia jest zbyt mała. Następuje spiętrzanie materiału pod ziarnem, następuje przemieszczenie materiału szklanego zgodnie z teorią trójosiowego ściskania (taki mechanizm jest możliwy tylko w ograniczonej objętości pod ziarnem i przed nim). Wówczas energia plastycznego płynięcia materiału umożliwia jego usuwanie bez powstawania ostro odciętych kruchych fragmentów materiału szklanego. Mechanizm ten jest ściśle skorelowany z głębokością wnikania ziarna ściernego (wyrażoną w nm).

### 5.3. BADANIA PROCESU MIKRO – I NANOSZLIFOWANIA ŚCIERNICAMI DIAMENTOWYMI

#### 5.3.1. Metodyka badań

Badania przeprowadzono w warunkach czołowego szlifowania materiałów szklanych ściernicami z ziarnami diamentu syntetycznego (rys. 5.87).



Rys. 5.87 Schemat układu kinematycznego procesu mikro- i nanoszlifowania

Proces mikro- i nanoszlifowania został przeprowadzony na 3-osiowym centrum obróbkowym WEMAS VZ 1250 Quick ze sterowaniem Heidenhain High-Speed-Cutting iTNC 530 (rys. 5.88).



Rys. 5.88. Centrum obróbkowe 3-osiowe WEMAS VZ 1250-Quick



# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Poniżej przedstawiono specyfikację techniczną (tabl. 5.6) urządzenia wykorzystanego do przeprowadzenia badań zasadniczych procesu mikro- i nanoszlifowania ściernicami diamentowymi.

**Tabl. 5.6.** Charakterystyka techniczna frezarki numerycznej WEMAS VZ 1250-Quick

Specyfikacja techniczna Frezarka numeryczna WEMAS VZ 1250-Quick	
Sterowanie:	Heidenhain High-Speed-Cutting Itnc 530
Rok produkcji:	2014
Gabaryty maszyny D x Sz x W [mm]:	2550x1800x1740
Ciężar maszyny [kg]:	4000
Powierzchnia robocza stołu X, Y [mm]:	1350 x 600
Przesuw pionowy wrzeciona Z [mm]:	650
Zakres obrotów [obr/min]:	40 – 10.000

Proces mikro- i nanoszlifowania przeprowadzono przy użyciu dwóch ściernic z ziarnami diamentowymi o wielkości D54 oraz D126 (rys. 5.89) i określonej charakterystyce. Ściernice te zostały zaprojektowane i wykonane w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie.



**Rys. 5.89.** Widok rzeczywisty dwóch ściernic diamentowych D126 oraz D54

Były to narzędzia prototypowe, ze spoiwem żywicznym o stałej koncentracji ziaren C100 i średnicy powierzchni roboczej D=35 mm (tabl. 5.7).

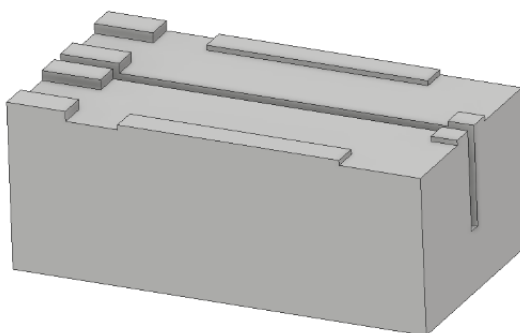
**Tabl. 5.7.** Charakterystyka ściernic diamentowych D126 oraz D54

ŚCIERNICE DIAMENTOWE		
Oznaczenie ściernicy diamentowej	D126	D54
Kształt ściernicy	6A2	6A2
Średnica zewnętrzna ściernicy D	35	35
Szerokość warstwy ścierniej W	5	5
Grubość warstwy ścierniej X	4	4
Średnica otworu H	10	10
Rodzaj ziarna	D	D

## POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

<b>Wielkość ziarna</b>	126	54
<b>Koncepcja</b>	C100	C100
<b>Rodzaj spoiwa</b>	B/V	B/V
<b>ISO R 6106 DIN 848 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	125/106	53/45
<b>US-Standard ASTM-E-11-70 (meshes per inch)</b>	120/140	270/325

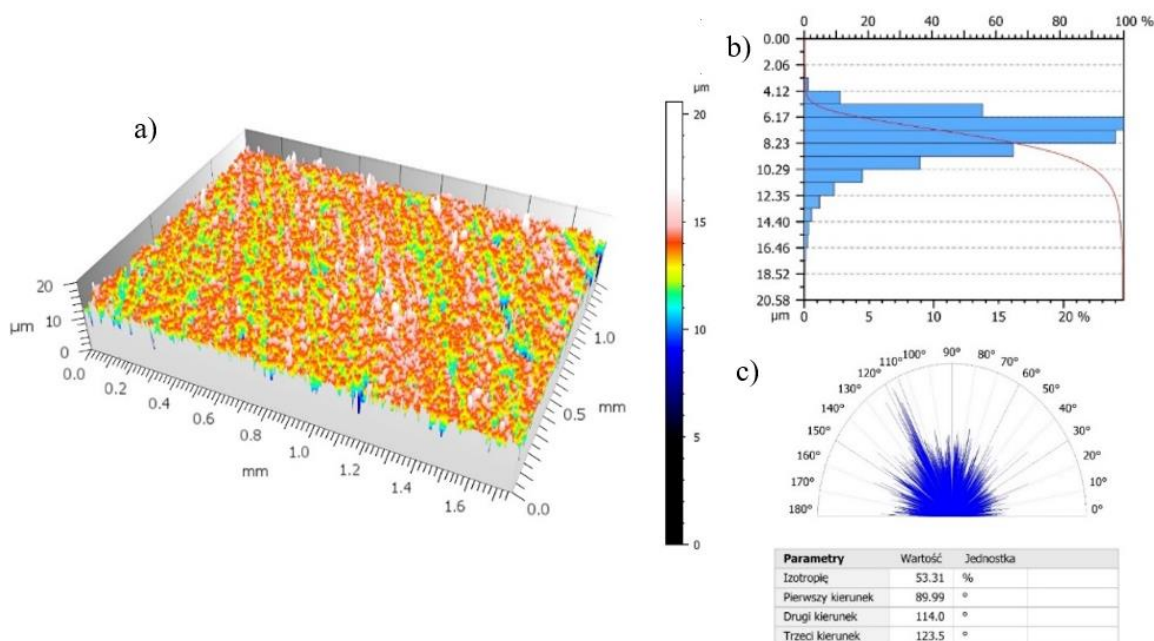
Każdą ze ściernic wykonano próby szlifowania z trzema następującymi głębokościami: 0,05mm, 0,1mm oraz 0,15mm, wykonano również analizę badań inicjujących mechanizm inicjacji procesu nanoszlifowania. Każda w prób została przeprowadzona podwójnie. Badania przeprowadzono wykonując proces szlifowania szklane płytki o wymiarach 2x50x100mm, przy następujących parametrach obróbki:  $s=1800\text{obr/min}$  i  $f=100\text{mm/min}$ . Próbkki były mocowane w uchwycie posiadającym prostopadłą powierzchnię bazową w specjalnie wykonanym uchwycie (rys. 5.90).



**Rys. 5.90.** Model uchwytu do mocowania próbek szklanych w procesie mikro- i nanoszlifowania

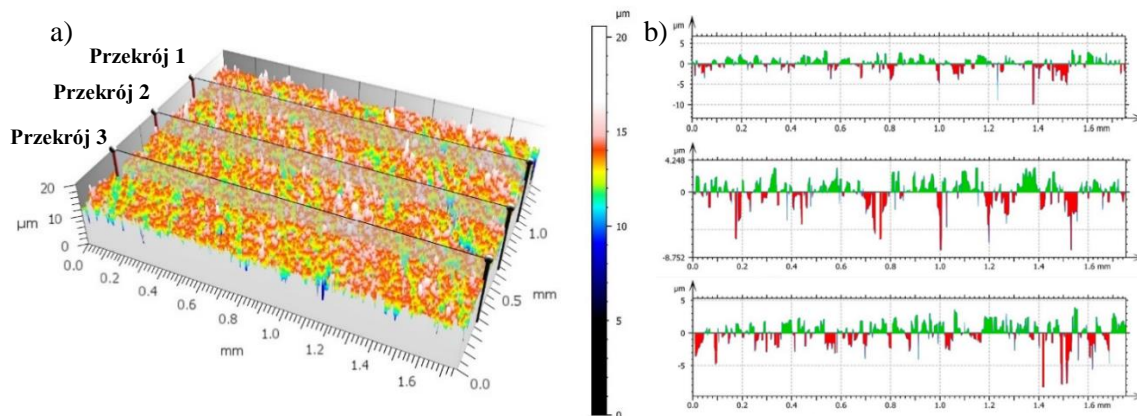
Do oceny jakości powierzchni obrabianych, podobnie jak w poprzednim etapie badań, zastosowano profilometr optyczny firmy Sensofar oraz mikroskop skaningowy Jeoll 512JEOL Jsm-5500LV.

Przy wykorzystaniu profilometru optycznego zrealizowane badania umożliwiły zobrazowanie struktury geometrycznej obrabianych powierzchni szlifowanych z określoną głębokością (rys. 5.91).



**Rys. 5.91.** Graficzna charakterystyka struktury geometrycznej szlifowanych powierzchni: a) mapa konturowa, b) krzywa udziału materiałowego, c) izotropia

Do oceny ilościowej zastosowano zbiór parametrów wysokościowych, wyznaczonych na bazie zarejestrowanych profili trójwymiarowej powierzchni (rys. 5.92), wyznaczonych w określonych jej przekrojach.

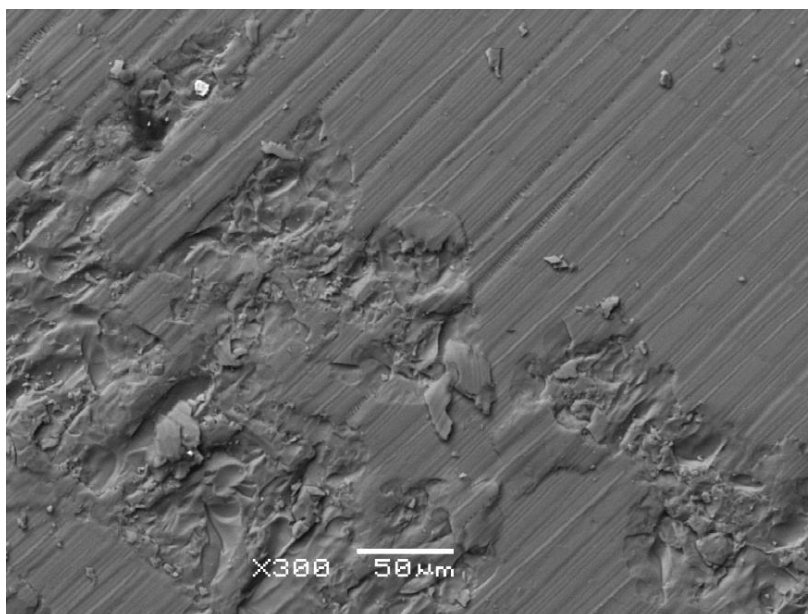


**Rys. 5.92.** Przykładowy profil powierzchni materiału szklanego po procesie mikroszlifowania

Dzięki zastosowaniu badań przy wykorzystaniu profilometru optycznego możliwym stało się wyznaczenie parametrów wysokościowych stosowanych w ocenie trójwymiarowej topografii powierzchni szklanych poddanych procesowi mikro- i nanoszlifowania do których zaliczyć należy:

- $Sq$  – średnie kwadratowe odchylenie powierzchni [ $\mu\text{m}$ ],
- $Ssk$  – współczynnik skośności powierzchni (asymetria),
- $Sku$  – współczynnik nachylenia powierzchni,
- $Sp$  – maksymalna wysokość szczytu [ $\mu\text{m}$ ],
- $Sv$  – maksymalna wysokość wgłębienia [ $\mu\text{m}$ ],
- $Sz$  – wysokość chropowatości wg 10 punktów [ $\mu\text{m}$ ],
- $Sa$  – średnia arytmetyczna wysokość [ $\mu\text{m}$ ].

Natomiast za pomocą mikroskopii skaningowej oceniano morfologię obrobionej powierzchni, stopień jej zdefektowania i jednorodności (rys. 5.93).

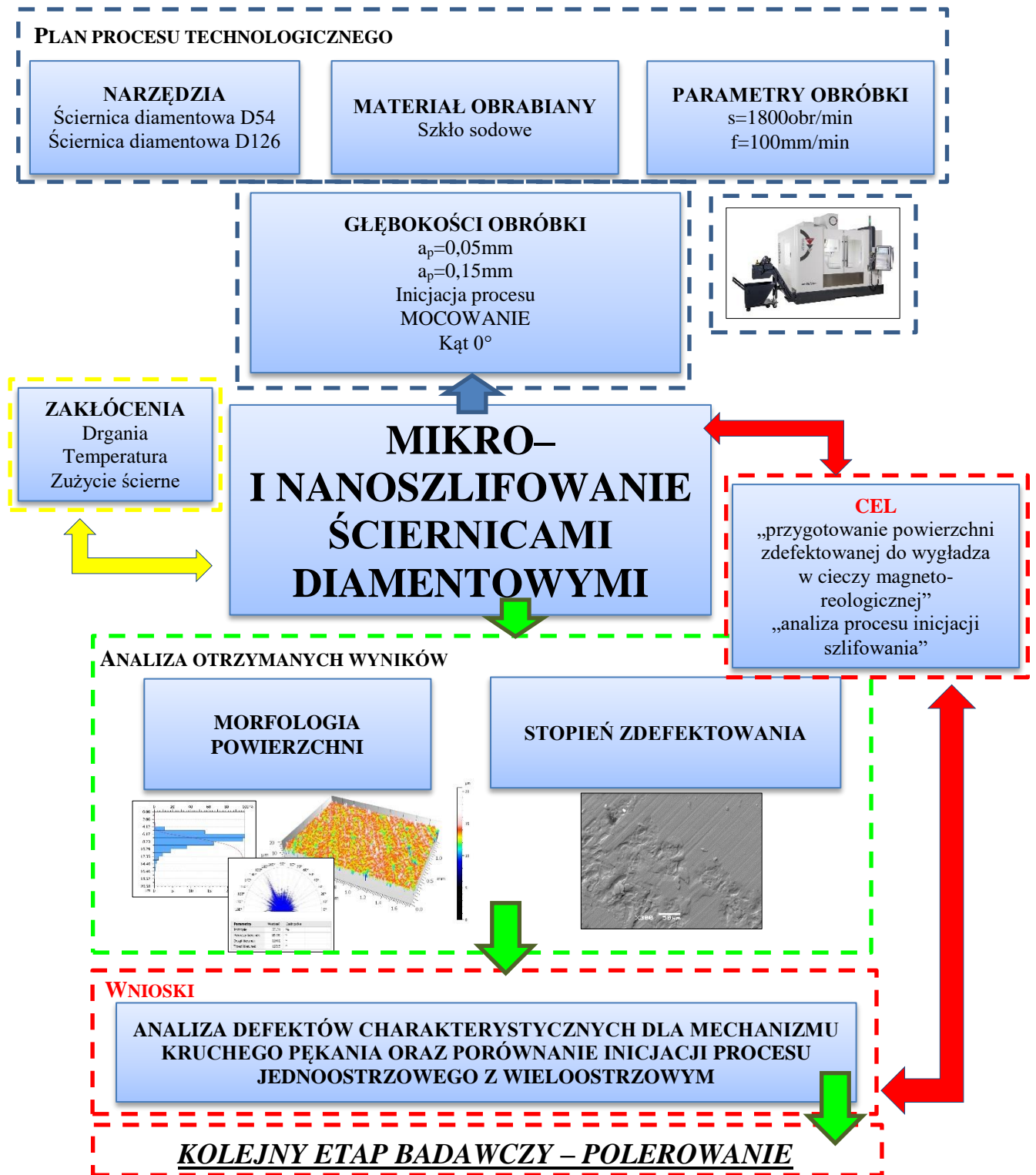


**Rys. 5.93.** Widok mikroskopowy SEM powierzchni materiału szklanego w momencie inicjacji procesu mikro- i nanoszlifowania

Przyjęta metodyka badawcza procesu mikro- i nanoszlifowania, umożliwia wieloaspektową ocenę kształtowania materiału w strefie obróbki i jakości technologicznej powierzchni obrobionej. Dotyczą one przemieszczenia materiału w strefie obróbki i analizy stanu powierzchni obrobionej.

Schemat metodyki i zakresu badań z uwzględnieniem warunków procesu mikro- i nanoszlifowania oraz zakresu analizowanych wielkości wynikowych, przedstawiono na rys. 5.94.

SCHEMAT METODYKI BADAŃ: MIKRO- I NANOSZLIFOWANIE



Rys. 5.94. Metodyka badań procesu mikro- i nanoszlifowania materiału szklanego ściernicami z ziarnami diamentu syntetycznego



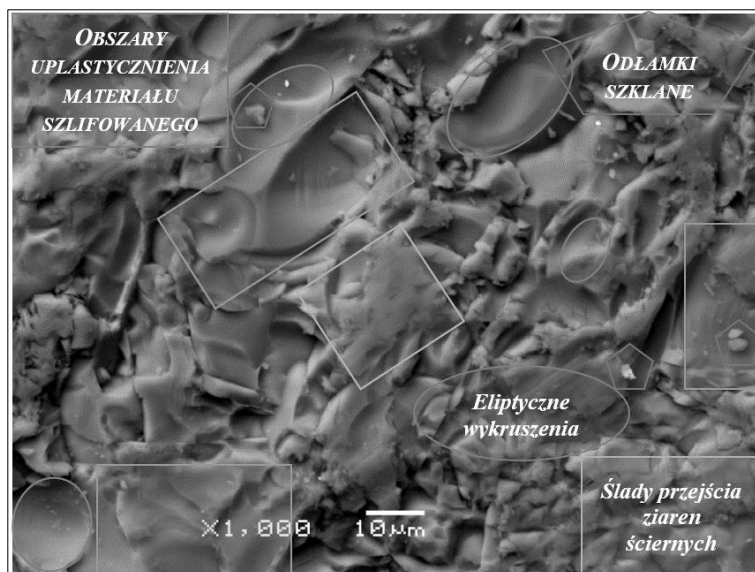
Proces szlifowania był tak zaprogramowany, aby uzyskać kontrolowany stan struktury powierzchniowej materiału szklanego, w postaci plastycznego płynięcia (inicjacja mechanizmu szlifowania) oraz kruchego pęknięcia w strefie obróbki. W przyjętym programie badawczym, analizowano dwa przypadki procesu szlifowania z zastosowaniem ściernic o wielkości ziaren D54 i D126, przy tych samych parametrach obróbki, różniące się odmiennymi warunkami obciążenia cieplno–mechanicznego strefy szlifowania.

### **5.3.2. Przebieg procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziaren D126**

W tym etapie wykonano badania procesu mikroszlifowania materiału kruchego w postaci płytek szklanych (szkło sodowe) z zastosowaniem ściernic diamentowych o wielkości ziaren D126. W porównaniu do ściernic o wielkości ziaren D54, ściernica ta charakteryzuje się większym wysokościowym rozproszeniem ziaren ściernych, co wpływa na zwiększenie głębokości wnikania ziaren w materiał obrabiany przy porównywalnej zadanej głębokości szlifowania. Wpływa to na rozwój kruchego pęknięcia materiału szklanego w strefie obróbki. Stąd w tym przypadku, równoległe będą zachodzić przypadki mikroszlifowania w warunkach kruchych i plastycznych odkształceń materiału szklanego w strefie obróbki, z dominującym mechanizmem kruchego pęknięcia.

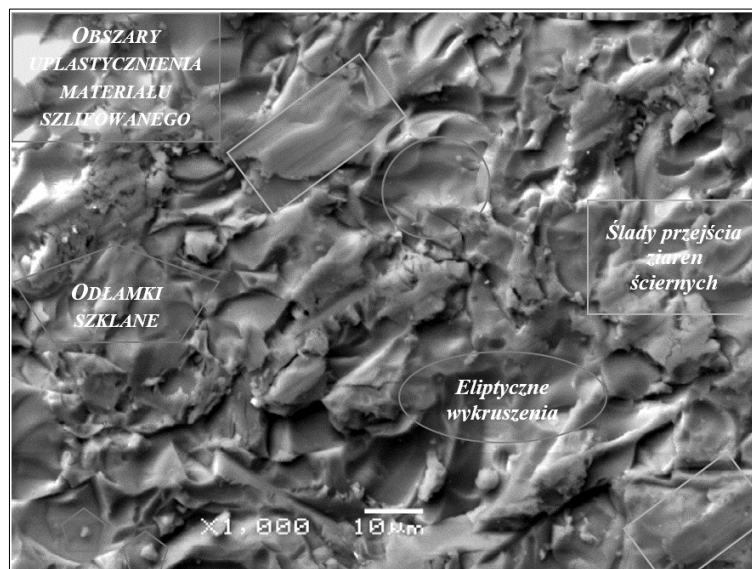
Przyjęto następujące parametry i warunki obróbki: głębokość szlifowania  $a_p=0,05\text{mm}$  i  $a_p=0,15\text{mm}$  prędkość obrotową ściernicy  $n=1800\text{obr/min}$  oraz posuw  $v_f=100\text{mm/min}$ .

Wykonane badania procesu mikroszlifowania materiału kruchego w postaci płytek szklanych z zastosowaniem ściernicy diamentowej o wielkości ziaren D126, potwierdziły, iż na analizowanej powierzchni po szlifowaniu z dosuwem  $a_p=0,05$ , można zauważyć wiele śladów obróbki pozostawionych przez aktywne ziarna ściernicy diamentowej. Widoczne są również obszary charakterystyczne dla fazy odkształceń plastycznych oraz eliptyczne wykruszenia materiału kruchego (rys. 5.95).



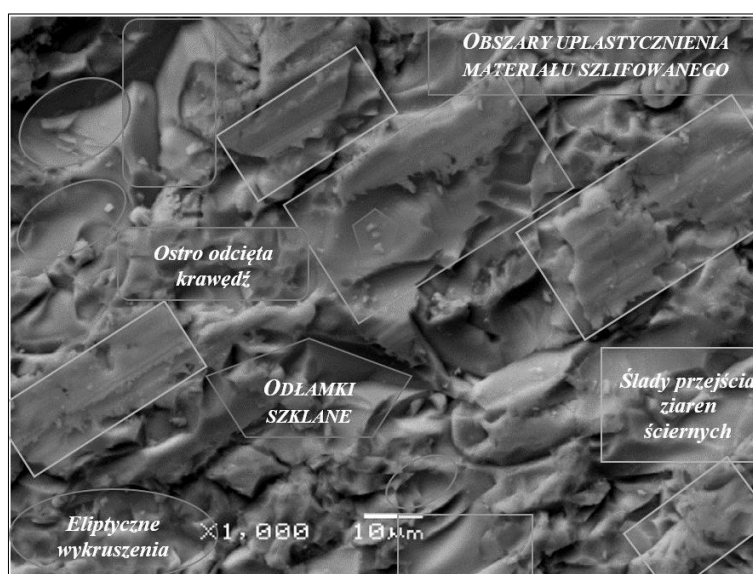
**Rys. 5.95.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,05\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie  $\times 1000$

Tu także widać, że mimo przewagi fazy kruchego pęknięcia dla przypadku szlifowania materiału kruchego z dosuwem  $a_p=0,15\text{mm}$ , nadal można zidentyfikować obszary odkształceń plastycznych w materiale obrabianym. Widoczne są również odłamki szklane i eliptyczne wykruszenia materiału oraz widoczne się również ślady przejścia ziaren ściernych (rys. 5.96).



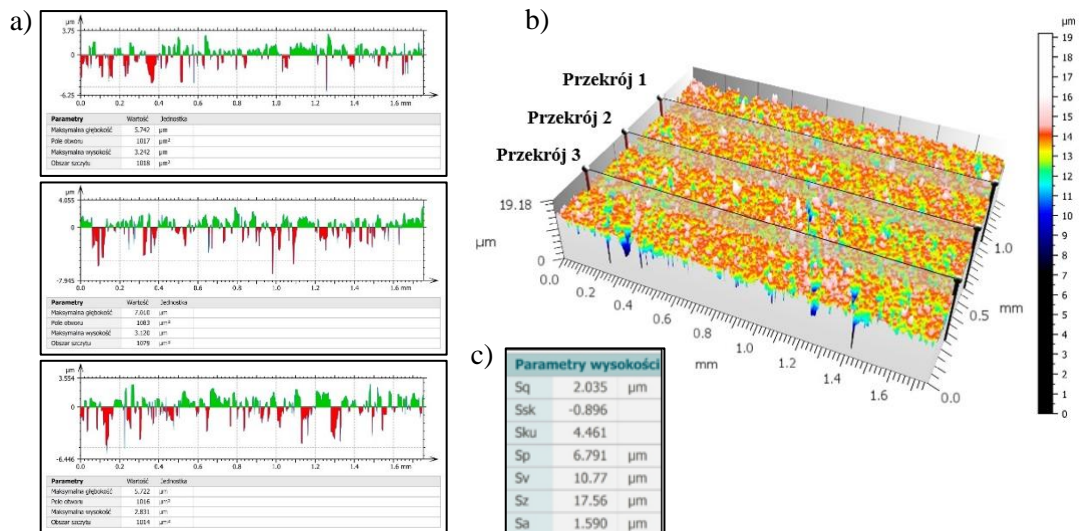
**Rys. 5.96.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,15\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie  $\times 1000$

Interesujący jest także fakt, że dla największej wartości dosuwu  $a_p=0,15\text{mm}$ , pomimo dominującego mechanizmu kruchego pęknięcia, nadal można zidentyfikować obszary odkształceń plastycznych. Dominują jednak odłamki szklane oraz eliptyczne wykruszenia materiału. Widoczne są też zanikające ślady przejścia aktywnych ziaren ściernych. Jednak kształtowana w tych warunkach powierzchnia jest mocno zdefektowana i niejednorodna. Jest jednak wyraźnie ukierunkowana zgodnie z kierunkiem ruchu ziaren ściernych. Występują na niej wszystkie możliwe stany odkształceń zachodzących w strefie obróbki, które zostały zidentyfikowane podczas mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Na taki stan nakładają się także różnego rodzaju zakłócenia procesu obróbki o charakterze trybologicznym, energetycznym i kinematycznym (np. drgania) (rys. 5.97).



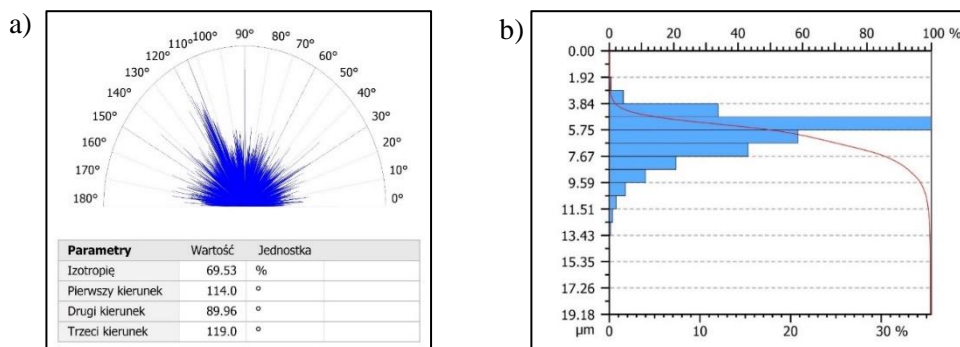
**Rys. 5.97.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,15\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie  $\times 1000$

Dla omawianego przebiegu procesu mikroszlifowania, zachodzącego w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału obrabianego, przy jednoczesnym plastycznym odkształcaniu w strefie obróbki, struktura geometryczna powierzchni obrobionej charakteryzuje się wysokim stopniem rozwinięcia i dużymi wartościami parametrów wysokościowych. Charakteryzują to uśrednione wartości parametrów struktury geometrycznej, wyznaczone na podstawie analizy trzech profili (rys. 5.98).



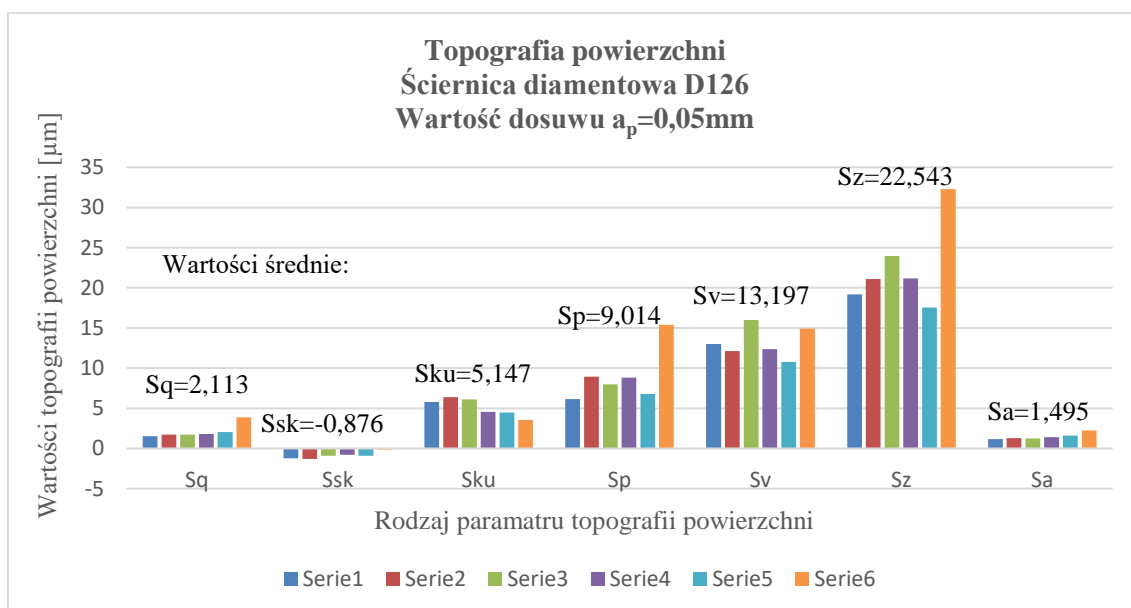
**Rys. 5.98.** Graficzna prezentacja powierzchni tzw. mapa konturowa (widok w pseudokolorach) widok 3D; przedstawiający powierzchnię po szlifowaniu płytki szklanej ściernicą diamentową **D126**. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr}/\text{min}$   $f_{const}=100\text{mm}/\text{min}$ : a) profile chropowatości powierzchni, b) mapa konturowa, c) parametry topografii powierzchni

W strukturze poszczególnych profili tak ukształtowanej powierzchni, występują duże zagłębienia ( $S_v$  – kolor czerwony), będące wynikiem propagacji kruchych pęknięć. Są one odzwierciedlone także w rozkładzie krzywej udziału materiałowego (rys. 5.99b). Wyraźnie widoczne jest także nieznaczne ukierunkowanie struktury powierzchniowej, na poziomie anizotropowości losowej (rys. 5.99a). To sumaryczny obraz skutków geometrycznych jednocześnie występujących zjawisk kruchego pęknięcia i odkształceń plastycznych w strefie obróbki. Bez wątpienia na taki obraz profilu nakładają się różnego rodzaju zakłócenia o charakterze dynamicznym, trybologicznym i energetycznym, związane z niejednorodnością struktury materiałowej, rodzajem odkształceń i drganiami.



**Rys. 5.99.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni), b) krzywa Abbott-Firestone'a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126 w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr}/\text{min}$   $f_{const}=100\text{mm}/\text{min}$

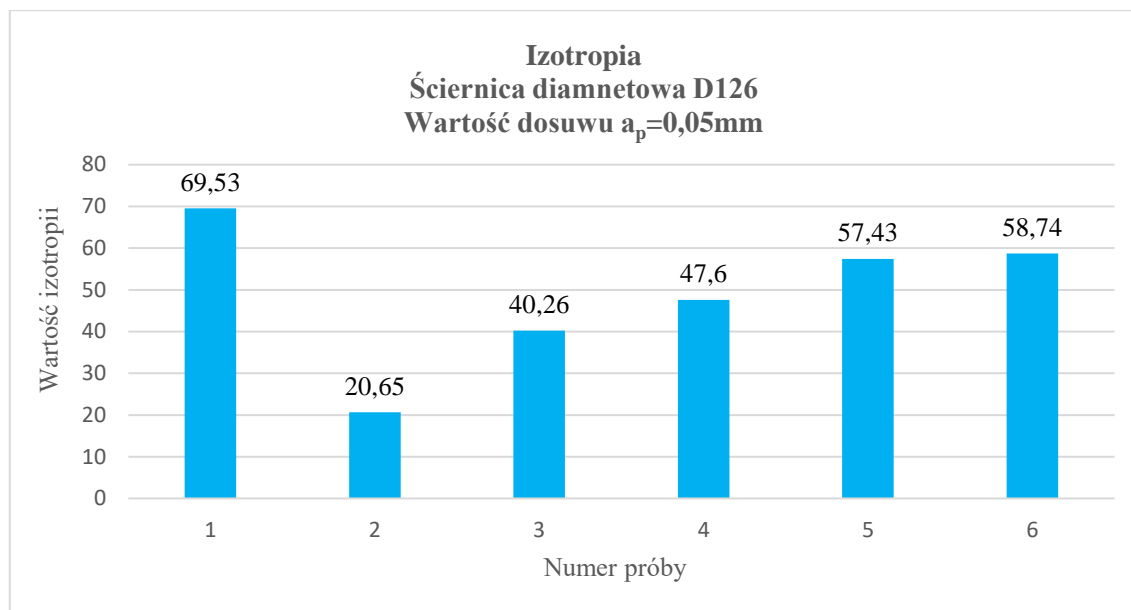
Te informacje zostały potwierdzone w sześciu powtórzonych kolejnych seriach badawczych realizowanych w tych samych warunkach technologicznych dla wartości dosuwu  $a_p=0,05\text{mm}$  dla ściernicy D126 (rys. 5.100).



**Rys. 5.100.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$

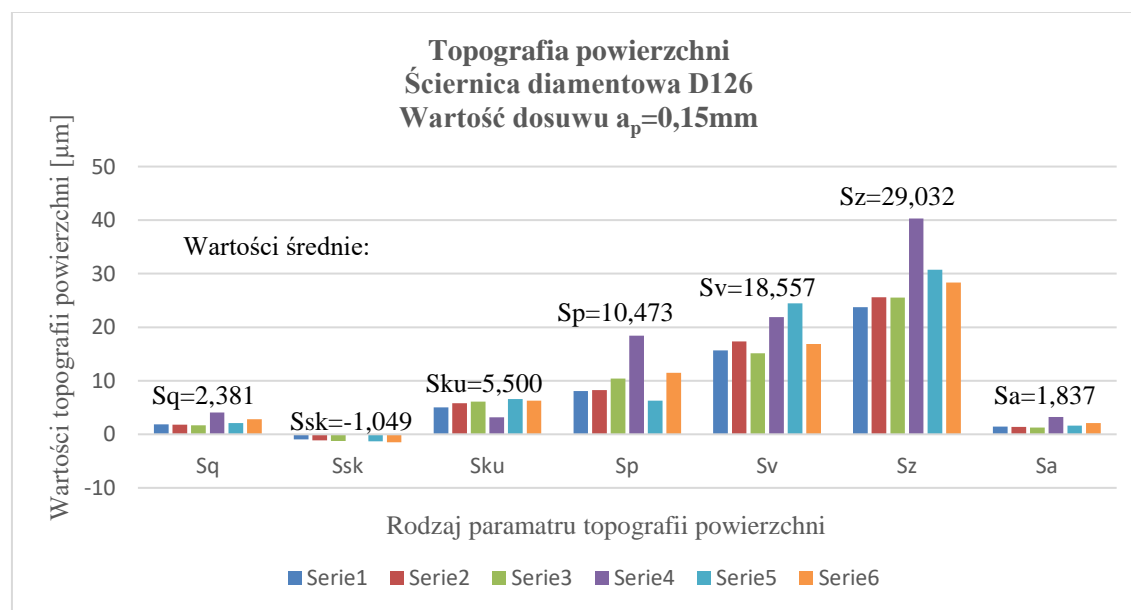
Jednakże ze względu na wspomniane zakłócenia występujące w procesie szlifowania, występują istotne różnice w poziomie izotropii struktury geometrycznej szlifowanej powierzchni. Wartości wskaźnika izotropii wahają się w zakresie ok. 20÷70, w odniesieniu do poszczególnych serii badań przy dosuwie  $a_p=0,05\text{mm}$  dla ściernicy diamentowej D126 (rys. 5.101).





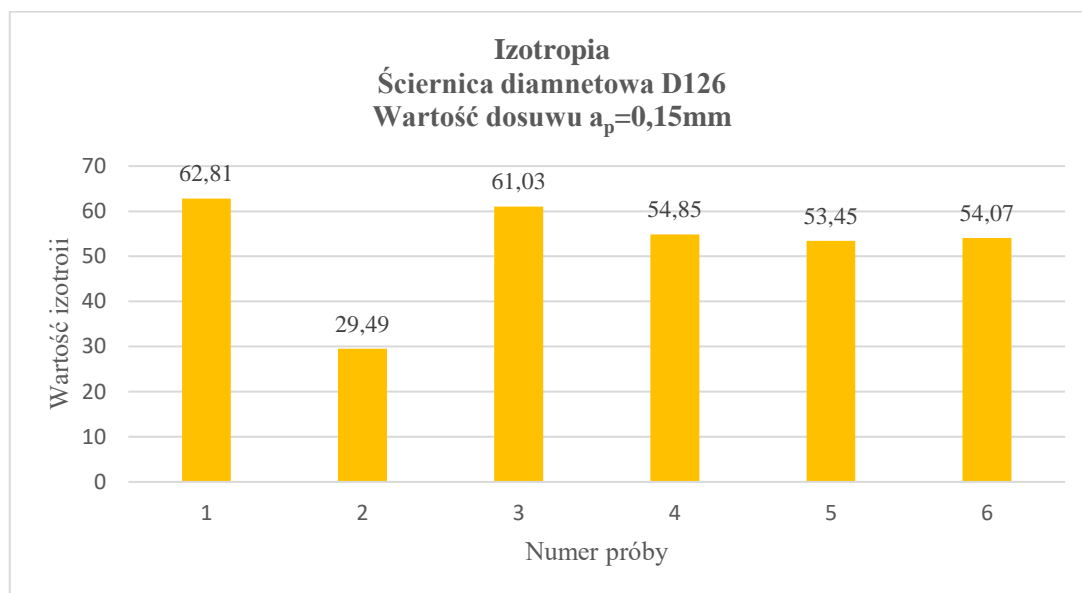
**Rys. 5.101.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$

Zgromadzono również informacje pochodzące z sześciu powtórzeń w kolejnych seriach badawczych realizowanych w tych samych warunkach technologicznych dla wartości dosuwu  $a_p=0,15\text{mm}$  dla ściernicy D126 (rys. 5.102).



**Rys. 5.102.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$

Wyznaczona w sześciu kolejnych próbach została również izotropia powierzchni badanej ukształtowana przy dosuwie  $a_p=0,15\text{mm}$  dla ściernicy diamentowej D126 (rys. 5.103).



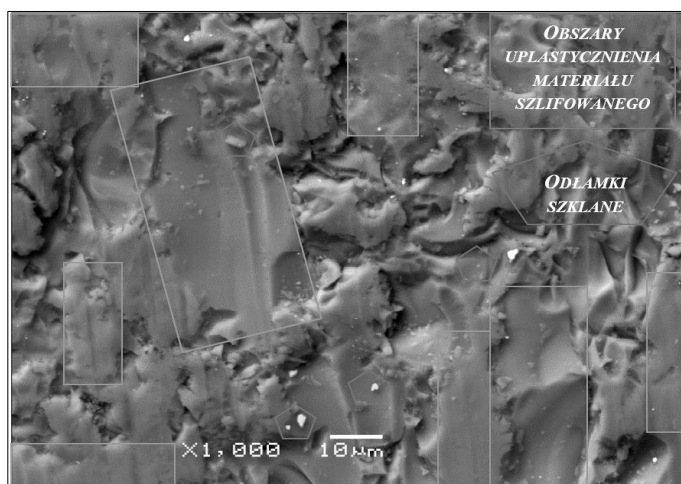
**Rys. 5.103.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$

### 5.3.3. Przebieg procesu mikroszlifowania w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziaren D54

W tym etapie wykonano badania procesu mikro- i nanoszlifowania materiału kruchego w postaci płytek szklanych (szkło sodowe) z zastosowaniem ściernic diamentowych o wielkości ziaren D54. Przyjęto następujące parametry i warunki obróbki: głębokość szlifowania  $a_p=0,05\text{mm}$  i  $a_p=0,15\text{mm}$  prędkość obrotową ściernicy  $n=1800\text{obr/min}$  oraz posuw  $v_f=100\text{mm/min}$ .

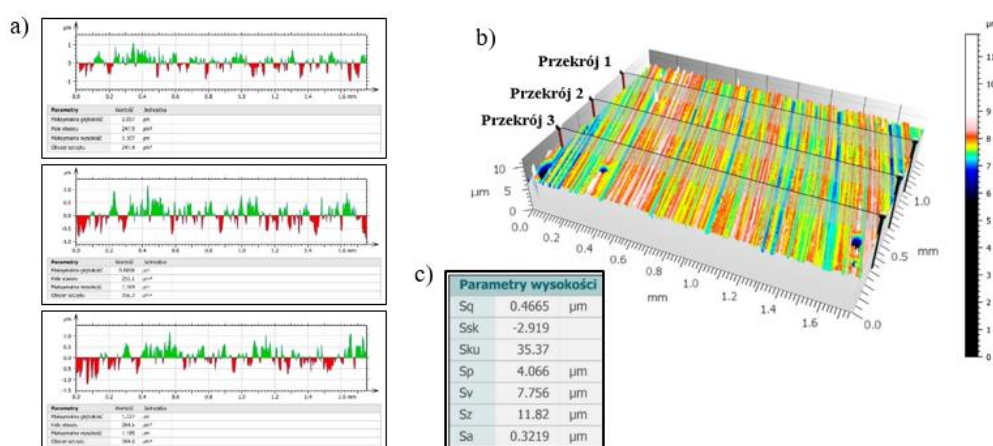
Mimo zastosowanie niedużego dosuwu narzędzia skrawającego ( $a_p=0,05\text{mm}$ ), zdjęcia skaningowe w badanym obszarze ujawnia, że udział mechanizmu kruchego pęknięcia jest znaczący na badanej powierzchni i warstwie przypowierzchniowej materiału obrabianego. Mimo to występują miejscowo mikroobszary wyraźnego uplastycznienia charakterystyczne dla plastycznego płynięcia materiału kruchego, w tym przypadku szkła w strefie obróbki (rys. 5.104). Zaobserwować można również długie ślady po obróbkowe które powstałe w wyniku przejścia ziaren ściernych ułożonych na powierzchni czynnej ściernicy diamentowej D54. Której praca spowodowała fragmentaryczne uplastycznienie powierzchni materiału kruchego w postaci szklanych płytek. Owe ślady po obróbkowe

charakterystyczne są dla mechanizmu plastycznego płynięcia. Można je zaobserwować na stosunkowo długich odcinkach analizowanej powierzchni w przedziale od około  $50\mu\text{m}$  do  $220\mu\text{m}$ .



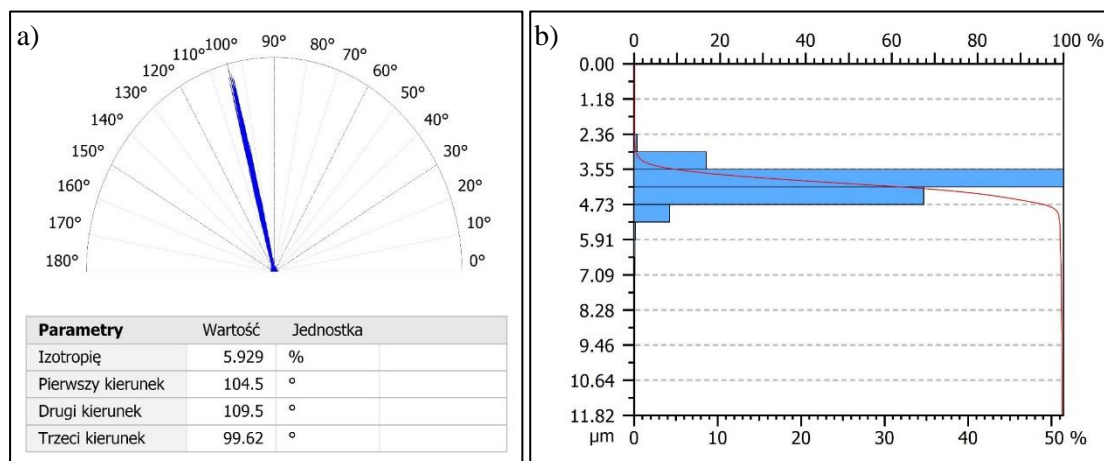
**Rys. 5.104.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D54 ( $a_p=0,05\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie  $\times 1000$

Dla omawianego przebiegu procesu mikroszlifowania, zachodzącego w warunkach dominującego kruchego pęknięcia materiału obrabianego, przy jednoczesnym plastycznym odkształcaniu w strefie obróbki, struktura geometryczna powierzchni obrobionej charakteryzuje się wysokim stopniem rozwinięcia i dużymi wartościami parametrów wysokościowych. Charakteryzują to uśrednione wartości parametrów struktury geometrycznej, wyznaczone na podstawie analizy trzech profili (rys. 5.105).



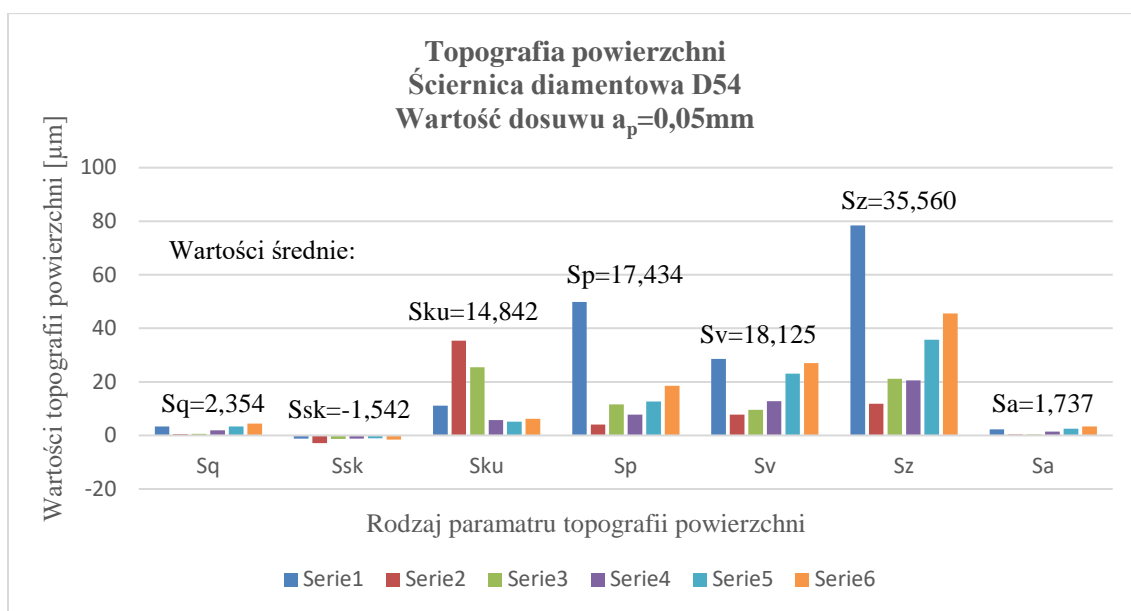
**Rys. 5.105.** Graficzna prezentacja powierzchni tzw. mapa konturowa (widok w pseudokolorach) widok 3D; przedstawiający powierzchnię po szlifowania płytki szklanej ściernicą diamentową D54. Głębokość obróbki  $0,05\text{mm}$ . Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr/min}$   $f_{const}=100\text{mm/min}$ : a) profile chropowatości powierzchni, b) mapa konturowa, c) parametry topografii powierzchni

W strukturze poszczególnych profili tak ukształtowanych powierzchni, występują niewielkie zagłębienia ( $S_v$ -kolor czerwony), będące wynikiem propagacji kruchych pęknięć. W zasadzie nie są one odzwierciedlone w rozkładzie krzywej udziału materiałowego, o czym świadczy jej wyraźne skupienie w strefie powierzchniowej (rys. 5.106b). Wyraźnie widoczne jest natomiast znaczne ukierunkowanie struktury powierzchniowej, na poziomie wysokiej anizotropowości. To bez wątpienia skutki geometryczne intensywnych zjawisk odkształceń plastycznych w strefie obróbki, których wynikiem są ukształtowane ukierunkowane ślady obróbkowe (rys. 5.106a). W tym przypadku w ujęciu ilościowym widoczne są różnego rodzaju zakłócenia o charakterze dynamicznym, trybologicznym i energetycznym, związane z niejednorodnością struktury materiałowej, rodzajem i intensywnością odkształceń.



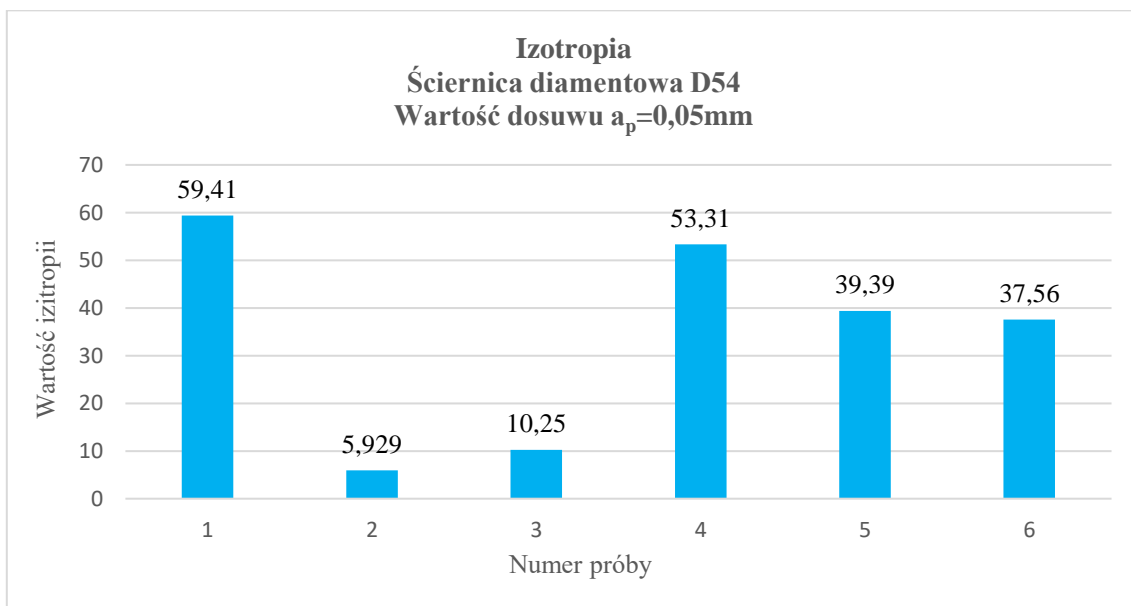
**Rys. 5.106.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta-Firestone'a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D54 w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr}/\text{min}$   $f_{const}=100\text{mm}/\text{min}$

Te informacje zostały potwierdzone w sześciu powtórzonych kolejnych seriach badawczych realizowanych w tych samych warunkach technologicznych (rys. 5.107).



**Rys. 5.107.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materialu szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$

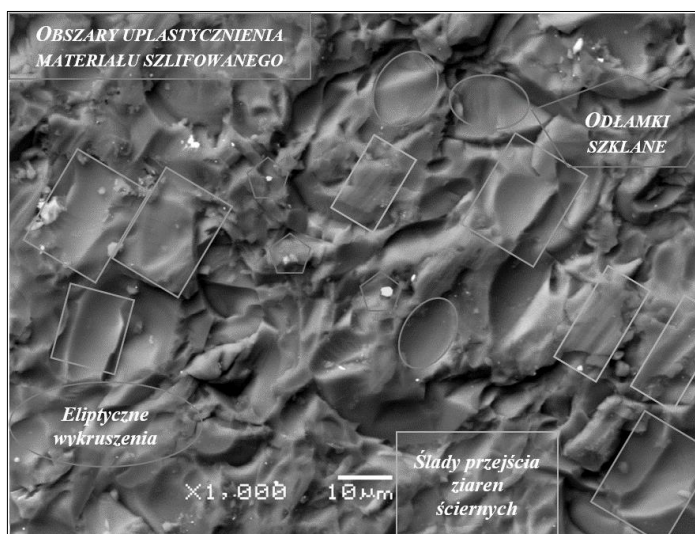
Jednakże ze względu na wspomniane zakłócenia występujące w procesie szlifowania, występują istotne różnice w poziomie izotropii struktury geometrycznej szlifowanej powierzchni. Wartości wskaźnika izotropii wahają się w zakresie ok.  $20 \div 70$ , w odniesieniu do poszczególnych serii badań (rys. 5.108).



**Rys. 5.108.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materialu szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materialu szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$

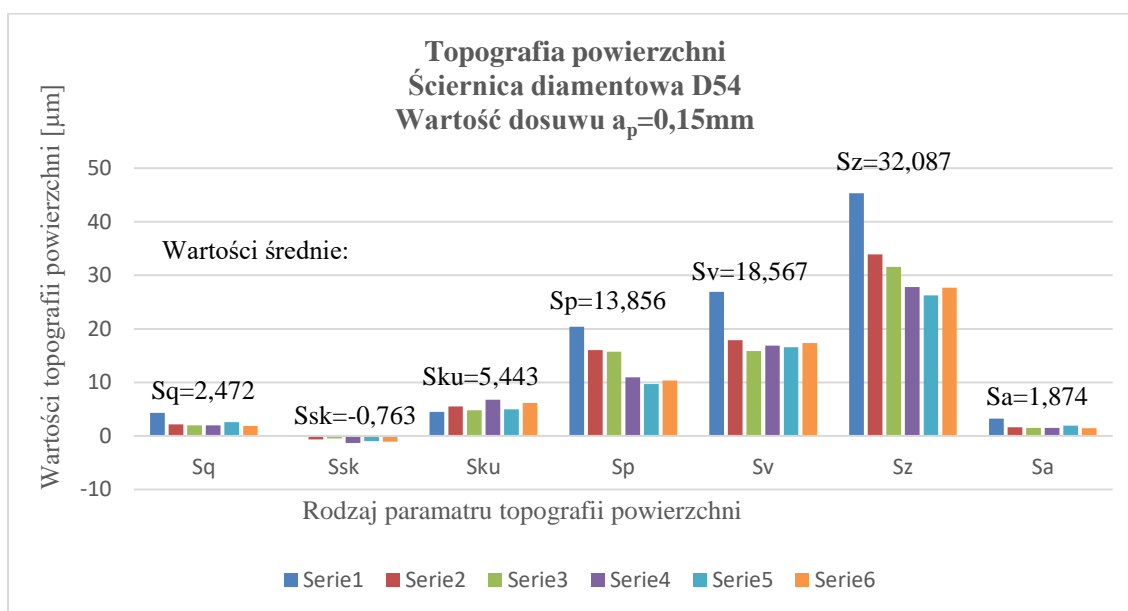


Badania przeprowadzone przy największej wartości dosuwu ( $a_p=0,15\text{mm}$ ) w procesie szlifowania według przyjętej metodyki, ujawniły że mimo przewagi fazy kruchego pęknięcia, nadal można zidentyfikować obszary plastyczne (rys. 5.109).



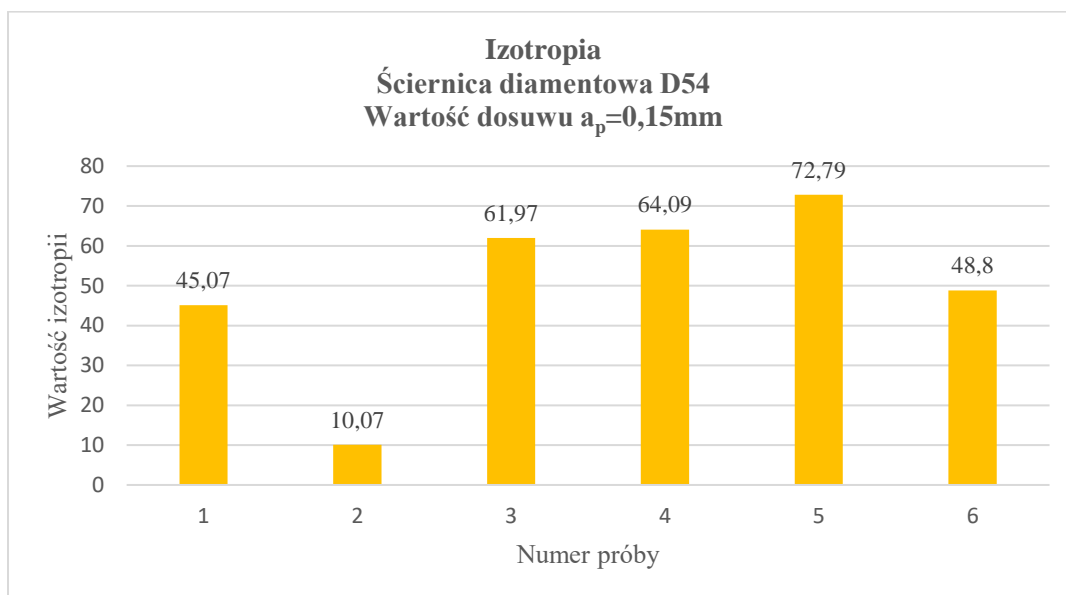
**Rys. 5.109.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D54 ( $a_p=0,15\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie  $\times 1000$

Zgromadzono również informacje pochodzące z sześciu powtórzeń w kolejnych seriach badawczych realizowanych w tych samych warunkach technologicznych dla wartości dosuwu  $a_p=0,15\text{mm}$  dla ściernicy D54 (rys. 5.110).



**Rys. 5.110.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$

Wyznaczona w sześciu kolejnych próbach została również izotropia powierzchni badanej ukształtowana przy dosuwie  $a_p=0,15\text{mm}$  dla ściernicy diamentowej D54 (rys. 5.111)



**Rys. 5.111.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$

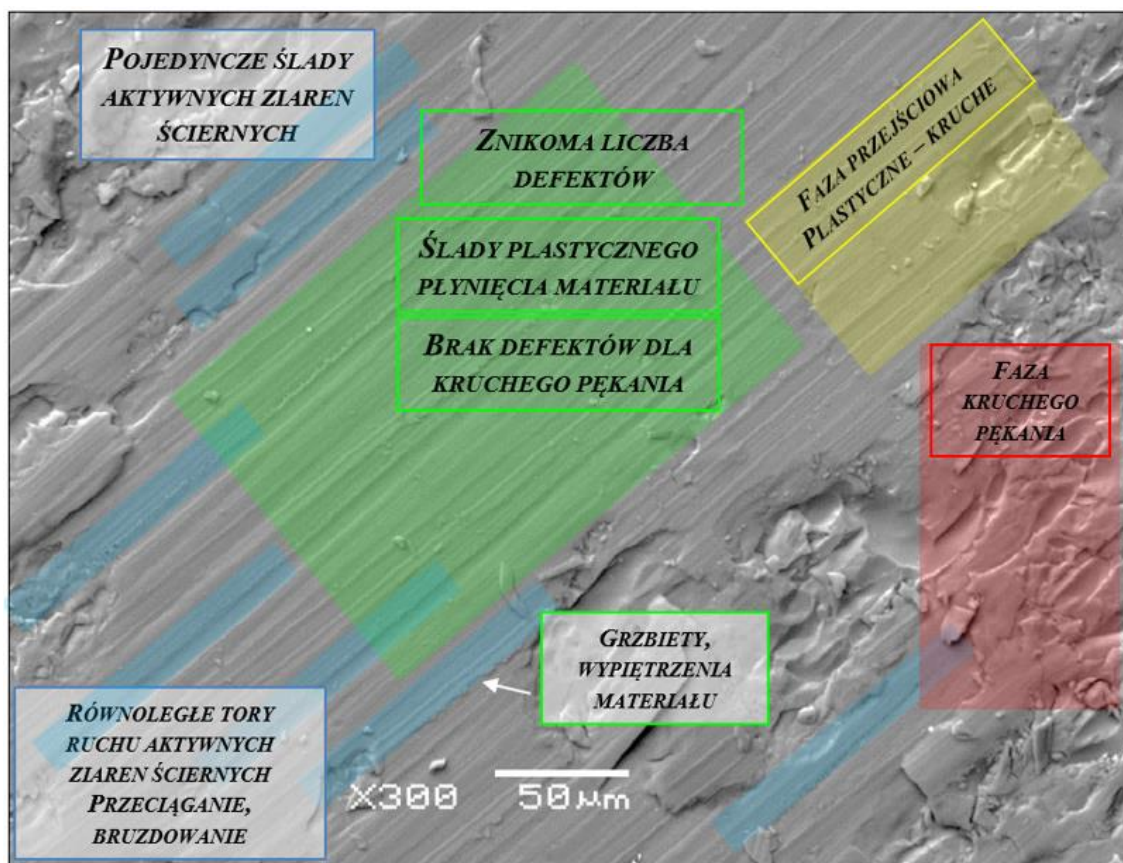
Z powyższych analiz ilościowych wynika, że przebieg procesu mikroszlifowania materiału szklanego (szkło sodowe) przy zastosowanych dosuwach spowodował uzyskanie struktury szlifowanej charakteryzującej się zdefektowaniem określającej w sposób jednoznaczny otrzymanie fazy kruchego pęknięcia. A zdarzające się odkształcenia plastyczne mają charakter lokalny i chwilowy. Tak przygotowany materiał badawczy posłużył do kolejnego etapu badań, który polegał na sprawdzeniu sprawności cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym, której zadaniem będzie cofnięcie defektów szkła w postaci kruchego pęknięcia materiału szklanego, a miarą sprawdzenia przydatności tego procesu były badania profilometryczne. Jest to ważne zagadnienie w obróbce materiałów kruchych, ponieważ ze względu na ich właściwości należy zapewnić określone warunki obróbki. Powinna być ona prowadzona w fazie plastycznego płynięcia materiału, co zapewnić może kontrolowany dosuw narzędzia ściernego poniżej progu kruchego pęknięcia. Jednak nie jest to warunek łatwy do spełnienia, ze względu na dużą złożoność procesu, a wartości krytyczne o których mowa przyjmują wartości do  $\leq 200; 230\text{nm} \geq$  (graniczna określona w pierwszym etapie badań).

W przyjętych warunkach obróbki, wprowadzenie odkształceń plastycznych na całej powierzchni obrabianej, jest ograniczone możliwościami technicznymi systemu obróbkowego. Stąd niezbędne jest zastosowanie procesu nanoszlifowania z głębokościami wnikania narzędzia na poziomie nanometrycznym z zastosowaniem systemu monitorowania i diagnostyki oraz ultra precyzyjnego sterowania wartościami dosuwowymi przy zastosowaniu stosów piezoelektrycznych.

#### **5.3.4. Przebieg procesu inicjacji mikroszlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki ściernicą diamentową o wielkości ziaren D126**

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że istnieje możliwość uzyskania efektu plastycznego płynięcia materiału szklanego w procesie nanozagłębienia wierzchołków ziaren ściernych. Zaobserwowano wyraźne ślady plastycznego płynięcia materiału obrabianego na skutek przejścia ziaren ściernych znajdujących się na powierzchni czynnej ściernicy w taki sposób i w takich warunkach, że nastąpiło wyraźne płynięcie struktury przypowierzchniowej materiału obrabianego. Na analizowanym obszarze, widoczne są bardzo wyraźne ślady charakterystyczne dla obróbki materiałów plastycznych.

Analizując obraz w dużym powiększeniu, można zauważyć, jak poszczególne tory ruchu aktywnych ziaren ściernych penetrujących strukturę materiału obrabianego, kształtują się w układzie równoległym. Jednak ze względu na minimalne różnice w wysokości ich osadzenia na powierzchni czynnej ściernicy, występują ich wzajemne interakcje w czasie pracy, polegające na okresowych zmianach geometrii poszczególnych śladów i kształtowaniu w ten sposób geometrii powierzchni po szlifowaniu w charakterystyczny dla procesu plastycznego płynięcia w strefie obróbki (rys. 5.112).



Rys. 5.112. Inicjacja procesu mikroszlifowania ściernicą diamentową D126

Na analizowanym obrazie widoczne jest przeciąganie oraz bruzdowanie materiału szklanego w taki sposób, że na dużych obszarach nie zidentyfikowano defektów charakterystycznych dla mechanizmów kruchego pęknięcia, a przypominające wyraźne plastyczne płynięcie materiału obrabianego, na którym wyraźnie ukształtowały się pojedyncze ślady najbardziej aktywnych ziaren ściernych rozmieszczonych na powierzchni czynnej ściernicy.

Pogłębiona analiza uzyskanych śladów obróbkowych w procesie szlifowania wskazuje, że kształty tych śladów upodobią się do śladów ukształtowanych po mikro- i nanoskrawaniu pojedynczymi wyselekcjonowanymi ziarnami ściernymi. Dotyczy to zarówno kształtu geometrycznego śladów obróbkowych, jak i ich struktury powierzchniowej. Na analizowanych obszarach powierzchni materiału po nanoszlifowaniu, widoczne są również bruzdy powstałe w wyniku pracy ziaren ściernych osadzonych na powierzchni czynnej ściernicy stosunkowo blisko siebie. W wyniku pracy tych ziaren powstaje charakterystyczny grzbiet uformowany wzdłuż przejścia ziaren w warunkach

plastycznego płynięcia, który przypomina wypiętrzenie materiału szklanego w postaci struktury cienkościennej.

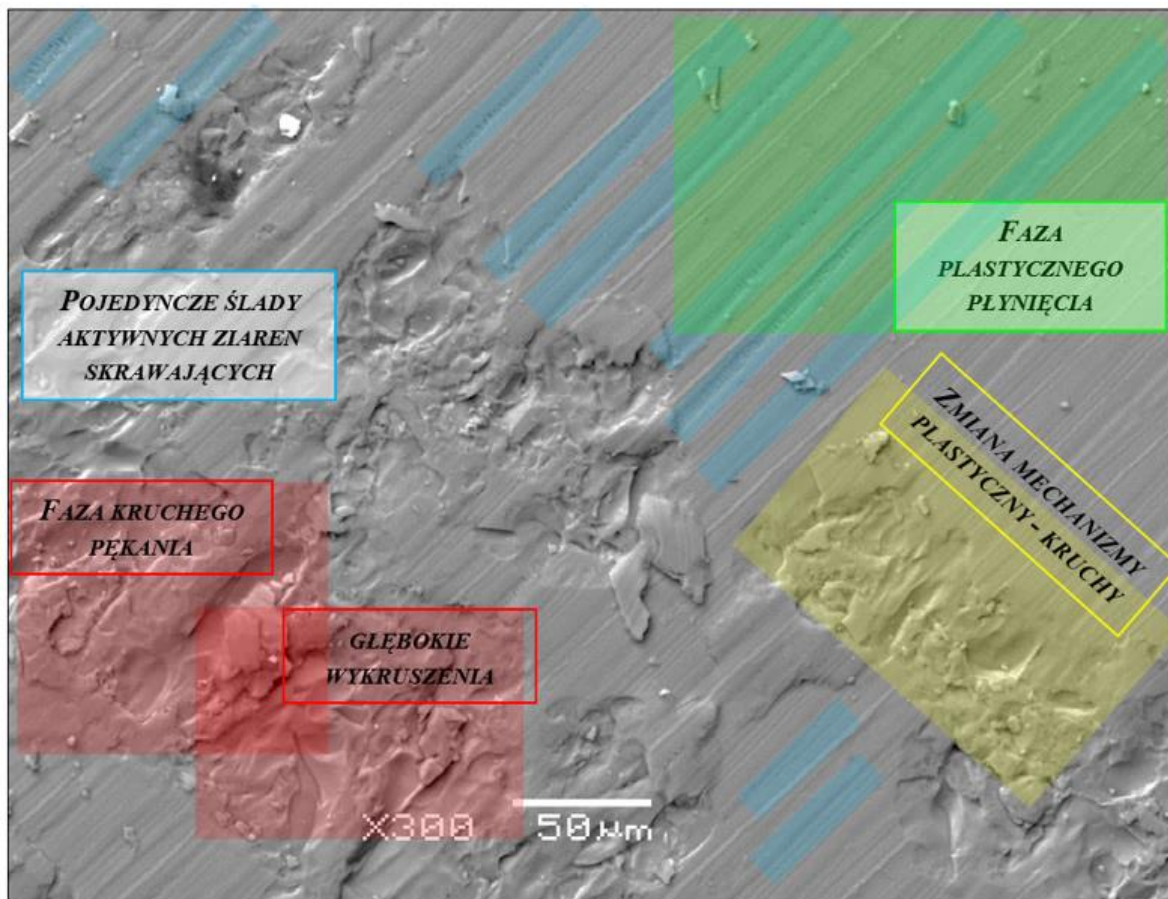
Analiza obrazu skaningowego pozwala na wytypowania kilku charakterystycznych śladów, powstałych po przejściu poszczególnych ziaren ściernych, Ślady te powstały w wyniku zmiennej wysokości (głębokości) osadzenia ziaren na powierzchni czynnej ściernicy. W wyniku tego zaobserwować można stosunkowo głębokie ślady (rysy) obróbkowe, na dnie których nie zidentyfikowano wyraźnych defektów w postaci kruchego pęknięcia. Zaobserwowano jednak, że występujące obok siebie głębokie ślady wypiętrzają strukturę materiału obrabianego do postaci wąskiego grzbietu lekko postrzępionego u wierzchołków, na których obserwuje się znaczną liczbę defektów charakterystycznych dla fazy pośredniej między kruchym i plastycznym płynięciem materiału. Można przyjąć, że w ten sposób formuje się nieodcięty wiór (struktura materiału), którego dwie sąsiadujące ziarna ściernie nie zdołały ukształtować do postaci odciętego wióra. Na analizowanej powierzchni widać przeważającą charakterystyczną powierzchnię po szlifowaniu, na której wyraźnie ziarna ściernie skrawały w warunkach plastycznego płynięcia, a granice przejścia między poszczególnymi ziarnami ściernymi, wypiętrzały się w znacznie mniejszym stopniu.

Na powierzchni analizowanej po obróbce, zauważyć można różnej wielkości pojedyncze wióry, w dużej przewadze powstałe w warunkach plastycznego płynięcia materiału. Analiza parametrów obróbkowych zastosowanych w procesie nanoszlifowania wskazuje, że proces plastycznego płynięcia zachodzi w bardzo wąskiej tolerancji wielkości dosuwu. Zwiększanie głębokości dosuwu w procesie szlifowania materiału szklanego, skutkuje natychmiastowym przekroczeniem progu plastyczny–kruchy i proces wchodzi w obszar kruchego pęknięcia. Okresowe zmiany mechanizmu mogą występować równolegle przy głębokości dosuwu realizowanym na granicy mechanizmu plastyczny–kruchy, ewentualnie ustabilizowany proces szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia, może być zakłócony na skutek drgań, bądź innych czynników okresowo zwiększających głębokość penetracji ziaren ściernych znajdujących się na powierzchni czynnej ściernicy.

Można zauważyć zmianę mechanizmu plastycznego płynięcia materiału szklanego, w mechanizm kruchego pęknięcia, zaobserwowany podczas realizacji procesu szlifowania. Widoczne są bardzo wyraźne dwa obszary charakteryzujące się odmienną strukturą materiału. W prawym górnym narożu obrazu skaningowego widoczna jest bardzo dobrze



ukształtowana struktura materiału odkształconego warunkach plastycznego płynięcia. Natomiast w lewym dolnym narożu, widoczna jest dominacja mechanizmu kruchego pęknięcia. Granica między plastycznym, a kruchym mechanizmem usuwania materiału w strefie szlifowania przechodzi po przekątnej obrazu (rys. 5.113).



Rys. 5.113. Inicjacja procesu mikroszlifowania ściernicą diamentową D126

Dobrze widoczne jest również ukształtowanie śladów ziaren ściernych rozmieszczonych na powierzchni czynnej ściernicy, tuż przed zmianą mechanizmu plastyczny–kruchy. Zaznaczone przykładowe rysy ukształtowane wierzchołkami ziarna ściernego, wyraźnie powiększają swoją szerokość. Analizując przebieg procesu w kierunku zmiany progu mechanizmu kruchy–plastyczny wraz ze wzrostem głębokości wnikania ziaren ściernych w materiał obrabiany, wzrasta głębokość oraz szerokość rys, aż do momentu, gdy następuje gwałtowne urwanie śladu przejścia ziarna ściernego w materiał obrabiany. Zagłębienie ziaren ściernych wnikających w materiał szklany, przekracza głębokość krytyczną umożliwiając realizację mechanizmu obróbki

w warunkach plastycznego płynięcia materiału. Przekroczenie tej krytycznej głębokości, generuje wysoko zdefektowaną strukturę materiału obrabianego. W tym obszarze dominują głębokie wykruszenia rozprzestrzeniające się na dużych powierzchniach, wyraźnie odsłaniając ostro odciętą (wykruszoną, łupliwie zdefektowaną) strukturę.

Można zauważyć, że zarejestrowana zmiana mechanizmu kształtowania materiału w procesie szlifowania między plastycznym a kruchym, potwierdza i koreluje z wynikami badań pojedynczym ziarnem diamentowym wybranego materiału szklanego. Na dowód korelacji w stosunku do badań pojedynczym ziarnem ściernym może świadczyć struktura powierzchni wytypowanego śladu w wyniku przejścia wierzchołka ziarna ściernego pracującego na powierzchni czynnej ściernicy kształtowanego na długości około 150µm. Można w nim zaobserwować wyraźny obszar odkształceń plastycznych, a następnie odcinek charakterystyczny dla inicjacji mechanizmu kruchego pęknięcia, taki jak zaobserwowano przy badaniach mikro- i nanoskrawania materiału szklanego pojedynczym ziarnem ściernym. Obszar ten charakteryzuje się nieciągłościami w postaci wielu poprzecznych pęknięć usytuowanych w dolnej części rysy. Ich liczba zwiększa się wraz z głębokością pracy ziarna ściernego i narasta, aż do momentu zerwania struktury materiału szklanego i propagacji pęknięcia poprzecznego i środkowego.

Stąd płynie zasadniczy wniosek poznawczy, że nanoszlifowanie materiału szklanego w warunkach plastycznych odkształceń materiału w strefie obróbki w kinematyce szlifowania czołem ściernicy, jest możliwe jedynie przy zapewnieniu zminimalizowanych głębokości szlifowania. Takie nanodosuwy są możliwe do realizacji z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych z liniowymi układami sterowania, w połączeniu z układami monitorowania i diagnostyki warunków w strefie obróbki.

### **5.3.5. Wnioski z procesu mikro- i nanoszlifowania**

Podsumowując powyższe analizy można stwierdzić, że w trakcie realizacji czołowego szlifowania materiału szklanego ściernicą diamentową D54 oraz D126, obserwuje się wszystkie te mechanizmy odkształceń, które zidentyfikowano w procesie skrawania pojedynczym ziarnem diamentowym w funkcji głębokości i długości śladu przejścia. W odniesieniu do powyższego, można sformułować następujące wnioski o charakterze poznawczym:

1. Na analizowanych obrazach powierzchni po szlifowaniu, widoczne są obszary struktury charakterystyczne dla kruchego pęknięcia oraz mikroobszary dla mechanizmu plastycznego płynięcia materiału. Proces szlifowania jest niezdeterminowany, ponieważ charakteryzuje się stochastycznym rozkładem wierzchołków ziaren ściernych na czynnej powierzchni ściernicy i to zarówno w kierunku wysokościowym, jak i koncentracja i wielkość ziaren. Z tego względu, część ziaren ściernych pracuje w obszarze plastycznego płynięcia materiału przy małej głębokości wnikania wierzchołków w materiał obrabiany. Natomiast część ziaren leżących najwyżej na powierzchni czynnej ściernicy, głębiej penetruje warstwę wierzchnią, przekraczając głębokość progu kruchego pęknięcia. W efekcie, przy nieoptymalnym doborze parametrów obróbkowych, uzyskiwać można stosunkowo mocno zdefektowane powierzchnie materiału szklanego. Jedynie niewielki procent powierzchni obrabianej, który znajduje się poniżej progu kruchego pęknięcia, zapewnia uzyskiwanie gładkich fragmentów powierzchni, kształtowanych w warunkach odkształceń plastycznych.
2. Można zatem wnioskować, że w procesie szlifowania materiałów szklanych za pomocą diamentowych narzędzi ściernych o wielkości ziaren D54 oraz D126, przy zastosowanych parametrach obróbkowych, istnieje możliwość uzyskania efektu plastycznego płynięcia materiału szklanego w procesie mikro- i nanozagłębienia wierzchołków ziaren ściernych. Zaobserwowano wyraźne ślady plastycznego płynięcia materiału obrabianego na skutek przejścia ziaren ściernych znajdujących się na powierzchni czynnej ściernicy w taki sposób i w takich warunkach, że nastąpiło wyraźne plastyczne odkształcanie struktury przypowierzchniowej materiału obrabianego. Widoczne są bardzo wyraźne ślady charakterystyczne dla obróbki materiałów plastycznych. Analizując obrazy powierzchni obrabianej można zauważyć, że poszczególne tory ruchu aktywnych ziaren ściernych penetrujących strukturę materiału obrabianego, układają się w układzie równoległym. Jednak ze względu na różnice w ich rozkładzie wysokościowym na powierzchni czynnej ściernicy, zauważyć można ich wzajemne interakcje, wpływające na zmiany geometrii poszczególnych śladów i kształtowaniu w ten sposób geometrii powierzchni po szlifowaniu w charakterystyczny dla procesu plastycznego płynięcia. Na analizowanych obrazach skaningowych, widoczne jest bruzdowanie materiału

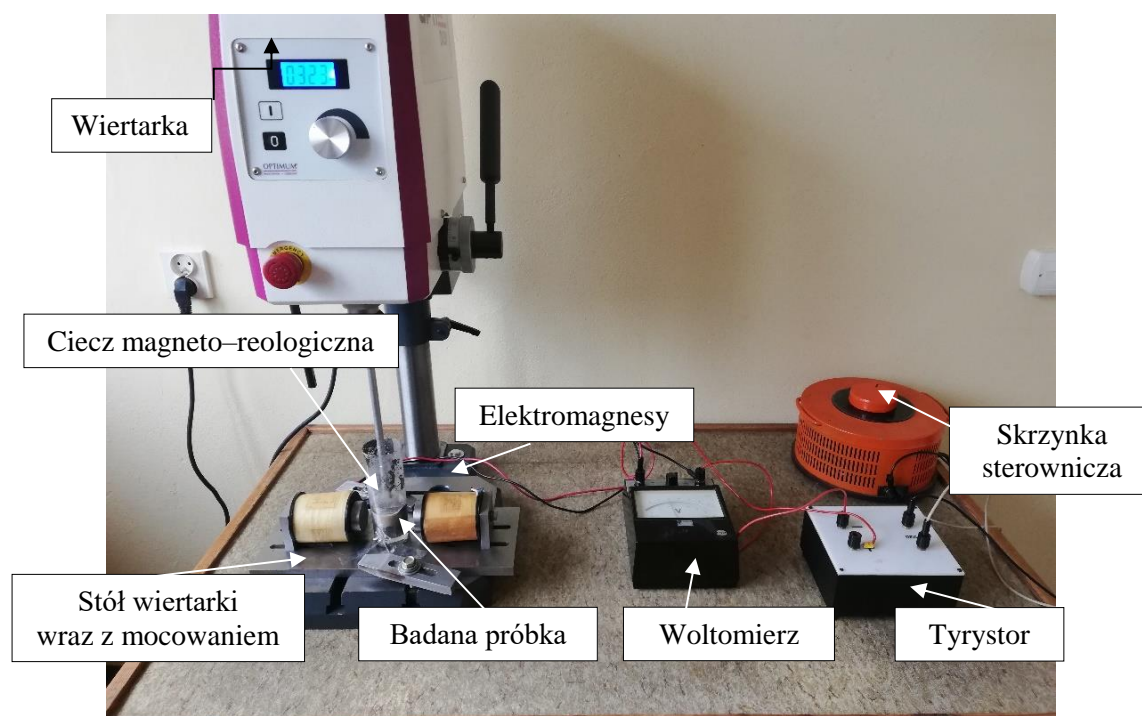
szklanego w taki sposób, że na niektórych obszarach powierzchni nie zidentyfikowano defektów charakterystycznych dla mechanizmów kruchego pęknięcia. Są one charakterystyczne dla plastycznych odkształceń materiału obrabianego.

3. Analiza obrazu zdjęć skaningowych pozwala na wytypowanie kilku charakterystycznych śladów powstałych po przejściu poszczególnych ziaren ściernych. Ślady te zostały ukształtowane wierzchołkami ziaren o zróżnicowanym rozkładzie wysokościowym na powierzchni czynnej ściernicy. W wyniku tego zaobserwować można stosunkowo głębokie ślady obróbkowe, na dnie których nie zidentyfikowano wyraźnych defektów w postaci kruchego pęknięcia. Zaobserwowano jednak, że występujące obok siebie głębokie ślady wskazujące na wypiętrzenia struktury materiału obrabianego do postaci grzbietów, o dużym rozwinięciu powierzchniowym, na których występuje znaczna liczba defektów charakterystycznych dla fazy pośredniej między kruchym i plastycznym płynięciem materiału. Można przyjąć, że w ten sposób formułuje się wiór. Na analizowanej powierzchni widać przeważające charakterystyczne powierzchnie po szlifowaniu, na których wyraźnie widoczne są obszary pracy ziaren w warunkach plastycznego płynięcia materiału, a granice przejścia między poszczególnymi ziarnami ściernymi wypiętrzały się w znacznie mniejszym stopniu. Te fragmenty powierzchni po szlifowaniu charakteryzują się bardzo dużą gładkością.
4. Analiza parametrów obróbkowych zastosowanych w procesie szlifowania wskazuje, że proces plastycznego płynięcia zachodzi w bardzo wąskiej tolerancji głębokości szlifowania. Zwiększanie głębokości dosuwu ściernicy, skutkuje natychmiastowym przekroczeniem progu dla fazy plastyczny–kruchy i proces wchodzi w obszar kruchego pęknięcia. Okresowe zmiany mechanizmu mogą występować równoległe przy głębokości szlifowania na granicy mechanizmu dla fazy plastyczny–kruchy. Ustabilizowany proces szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału, może być zakłócony na skutek drgań, bądź innych czynników okresowo zwiększających głębokość penetracji ziaren ściernych znajdujących się na powierzchni czynnej ściernicy.

## 5.4. BADANIA PROCESU POLEROWANIA CIECZĄ MAGNETO–REOLOGICZNĄ (MRF) W POLU ELEKTROMAGNETYCZNYM

### 5.4.1. Metodyka badań

Badania procesu polerowania przeprowadzono na eksperymentalnym stanowisku badawczym znajdującym się w Katedrze Inżynierii Produkcji, które pozwoliło na realizację wygładzania próbek szklanych w polu elektromagnetycznym przy udziale aktywnej cieczy magneto–reologicznej (rys. 5.114).



**Rys. 5.114.** Stanowisko badawcze do polerowania szkła z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym: a) widok rzeczywisty, b) schemat kinematyczny

Procesy wygładzania powierzchni płytek szklanych ukształtowanych w procesach mikroskrawania pojedynczymi ziarnami ściernymi oraz mikroszlifowania ściernicami diamentowymi, zostały przeprowadzone przy następujących parametrach ustawczych: parametry pola elektromagnetycznego:

- ✓ napięcie stałe  $I=120V$ ,
- ✓ prędkość obrotowa 400obr/min.
- ciecz magneto–reologiczna (200ml) o składzie:
  - ✓  $13,155 \text{ cm}^3 \text{ Al}_2\text{O}_3$  (tritylenek diglinu),

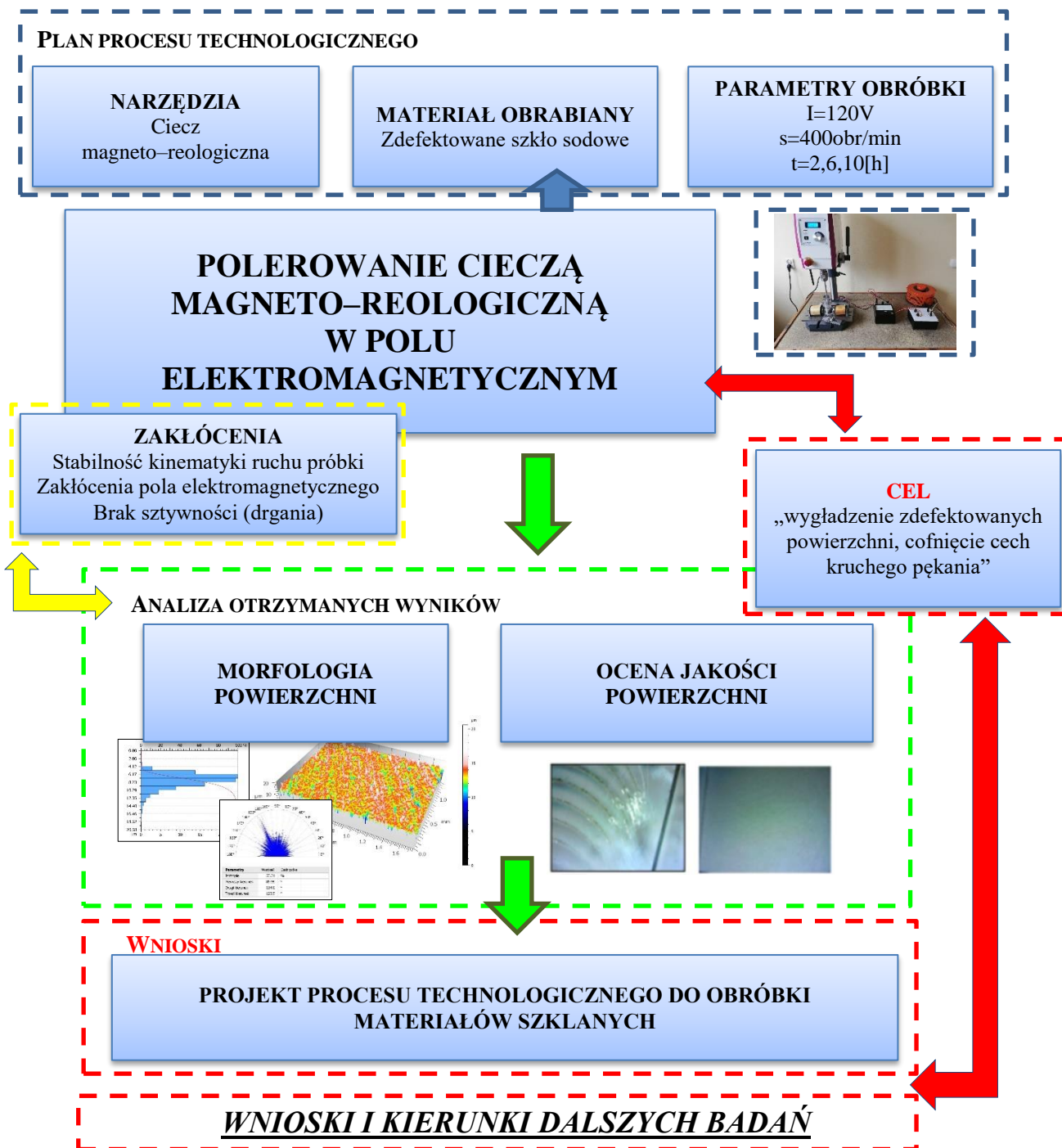


- ✓ 54,375 Fe (opilki żelaza),
  - ✓ 78,9 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O (woda),
  - ✓ 3,42 cm<sup>3</sup> B<sub>4</sub>C (węglik boru) o wymiarach 1–9μm,
  - ✓ 0,15 cm<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (węglan sodu).
- czas ekspozycji próbki [h]: 2, 6, 10

Przyjęta metodyka badawcza procesu polerowania, umożliwi wieloaspektową ocenę możliwości ściernych cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym materiałów szklanych, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości cofnięcia defektów charakteryzujących fazę kruchego pęknięcia. Dotyczą one przemieszczenia materiału w strefie obróbki i analizy stanu powierzchni obrabianej. Informacje te posłużą do potwierdzenia możliwości zastosowania tego typu obróbki polerskiej w procesie wytwarzania powierzchni szklanych w projekcie procesu technologicznego.

Schemat metodyki i zakresu badań z uwzględnieniem warunków procesu polerowania oraz zakresu analizowanych wielkości wynikowych, przedstawiono na rys. 5.115.

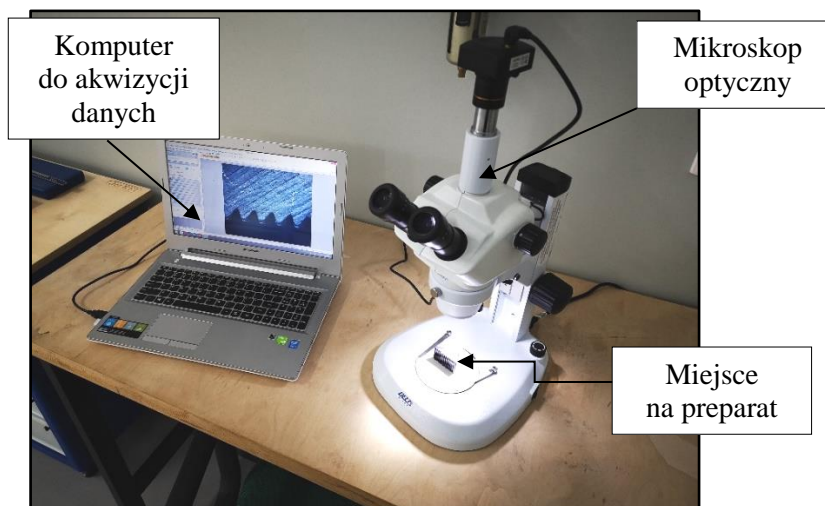
SCHEMAT METODYKI BADAŃ: POLEROWANIE (MRF)



Rys. 5.115. Metodyka badań procesu polerowania materiałów szklanych o zdefektowanej strukturze po obróbkowej

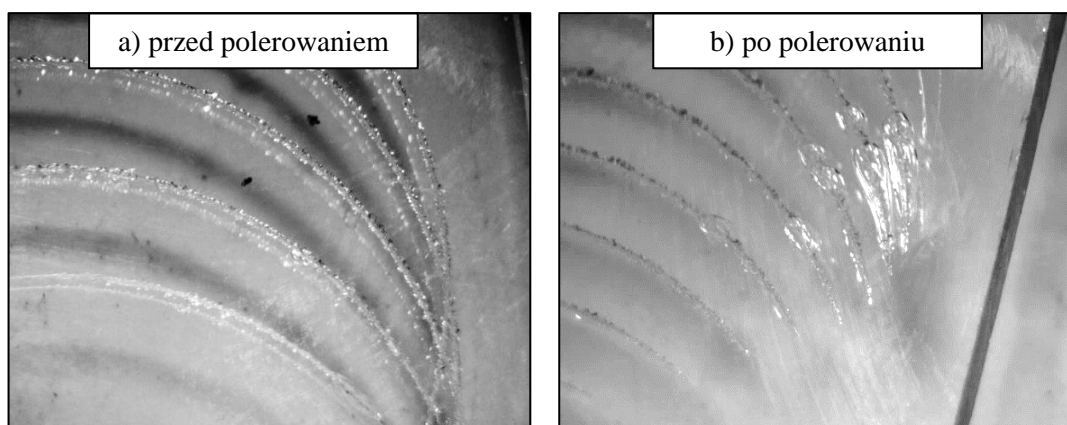
## 5.4.2. Przebieg badań polerowania cieczą magneto–reologiczną w polu elektromagnetycznym

Po wykonaniu serii badań procesu polerowania, przeprowadzono analizę wstępne analizy struktur powierzchniowych, z zastosowaniem mikroskopu optycznego, znajdującego się w Regionalnym Centrum Badawczo-Rozwojowym w PWSZ Wałcz (rys. 5.116).



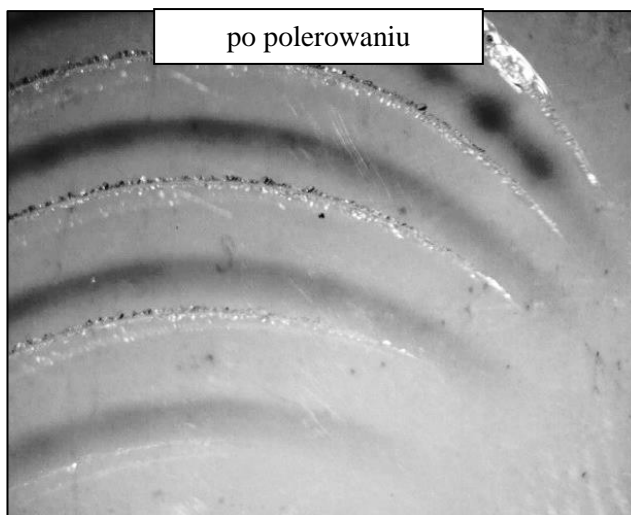
*Rys. 5.116. Stanowisko badawcze wyposażone w mikroskop optyczny wraz z komputerem służącym do akwizycji danych*

W wyniku przeprowadzonych analiz, uzyskano informację o zmianach zachodzących w strefie obróbki, powstałych na skutek oddziaływania cieczy magneto–reologicznej w polu elektromagnetycznym, na powierzchni ukształtowane we wcześniejszych etapach badań, obejmujących skrawaniu pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym oraz szlifowanie ściernicami diamentowymi. Przeprowadzone badania ujawniły zmiany w strukturze śladów obróbkowych, zarówno w odniesieniu do rys powstałych na skutek penetracji pojedynczego ziarna ściernego w materiale obrabianym, jak powstałych w procesie szlifowania z zastosowaniem ściernicy z ziarnami diamentowymi. Po przeprowadzeniu procesu wygładzania z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej, widoczne jest stępienie krawędzi rys (rys. 5.117). Zastosowanie cieczy magneto–reologicznej, pozwoliło na wygładzenie ostrych fragmentów ukształtowanych rys, powstałych na skutek zainicjowanego mechanizmu kruchej pęknięcia.



**Rys. 5.117.** Obraz mikroskopowy rys ( $\times 100$ ): a) przed procesem (zdjęcia referencyjne) polerowania b) po procesie polerowania

Przeprowadzona analiza wykazała, że wygładzeniu uległy wszystkie ostre fragmenty struktury rys, w wyniku oddziaływania aktywnych cząstek cieczy magneto–reologicznej. Można przyjąć, że ta mało inwazyjna metoda obróbki, nie powoduje mechanizmu kruchego pęknięcia w odniesieniu do szkła. Mechanizm oddziaływania cieczy magneto–reologicznej na powierzchni szkła, zachodzi poniżej progu kruchego pęknięcia. Zaobserwowano, że w przypadku obróbki rys, usuwane są fragmenty najbardziej podatne na jej oddziaływanie, czyli boczne krawędzie rysy oraz lokalne wypływkę. Zwarta nie naruszona przez ziarno ściernie struktura płytki szklanej, nie wykazuje istotnych zmian oddziaływania cieczy magneto–reologicznej. Można przyjąć, że zastosowanie cieczy magneto–reologicznej, może sprzyjać wygładzaniu mikro– i nanostruktury materiału szklanego po wstępnej obróbce, nawet na poziomie nanometrycznym. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie cieczy o strukturze umożliwiającej penetrację materiału również na poziomie nanometrycznym, tak jak to ma miejsce w odniesieniu do nanocząstek tlenku żelaza, znajdujących się w składzie cieczy magneto–reologicznej (rys. 5.118).



**Rys. 5.118.** Obraz mikroskopowy rys po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną (x100)

Zastosowana ciecz magneto-reologiczna charakteryzuje się większymi cząstkami żelaza (wielkości mikrometryczne), co skutkuje większą intensywnością oddziaływania na fragmenty uszkodzeń na próbkach szklanych, za to posiada mniejszą zdolność penetracji defektów na poziomie nanometrycznym. Co skutkować, może mniejszym efektywnym wygładzaniem początku zainicjowanej rysy.

Struktura powierzchni płytki szklanej po skrawaniu pojedynczym ziarnem ściernym oraz po wygładzaniu z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej, wykazuje jedynie nieznaczne zmiany na krawędziach rysy. Zagłębienie ziarna narasta szybko a powstająca struktura, charakteryzuje się znacznymi odkształceniami mechanicznymi, które w początkowej fazie, można zakwalifikować do odkształceń i przemieszczeń materiału nie wywołujących mechanizmu kruchej pęknięcia, a co za tym idzie, zachodzących w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Dla takich warunków, struktura szkła ulega wzmocnieniu i zmniejsza się jego podatność na oddziaływanie cieczy magneto-reologicznej. Można wyciągnąć wniosek, że skrawanie pojedynczym ziarnem nie jest najlepszym odzwierciedleniem zjawisk zachodzących w strefie szlifowania, gdzie wiele ziaren ściernych skrawa pierwotnie ukształtowaną strukturę płytki szklanej. Dlatego struktura powierzchni dla płytki szklanej poddanej działaniu pojedynczego ziarna ściernego, nie wykazuje istotnej podatności do zmian w procesie wygładzania (utrudniona identyfikacja). Takie zjawisko jednak zachodzi i należy uznać, że jego badanie dałoby interesującą informację co do zmian struktury inicjacji rysy. Jednak z punktu widzenia



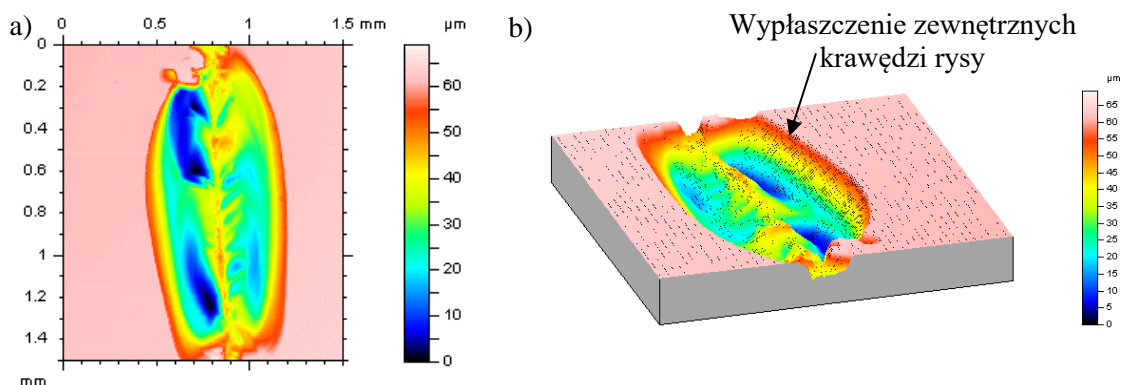
praktycznego, nie ma istotnego znaczenia dla procesu wygładzania, który realizowany jest po procesie szlifowania szkła i występuje jako obróbka wygładzająca.

Natomiast obrazy profilometryczne przedstawione poniżej, otrzymano przy wykorzystaniu profilometru Homelwerke 800 (rys. 5.119), przy analizie plików graficznych korzystano z komputerowego oprogramowania MountainsLab.



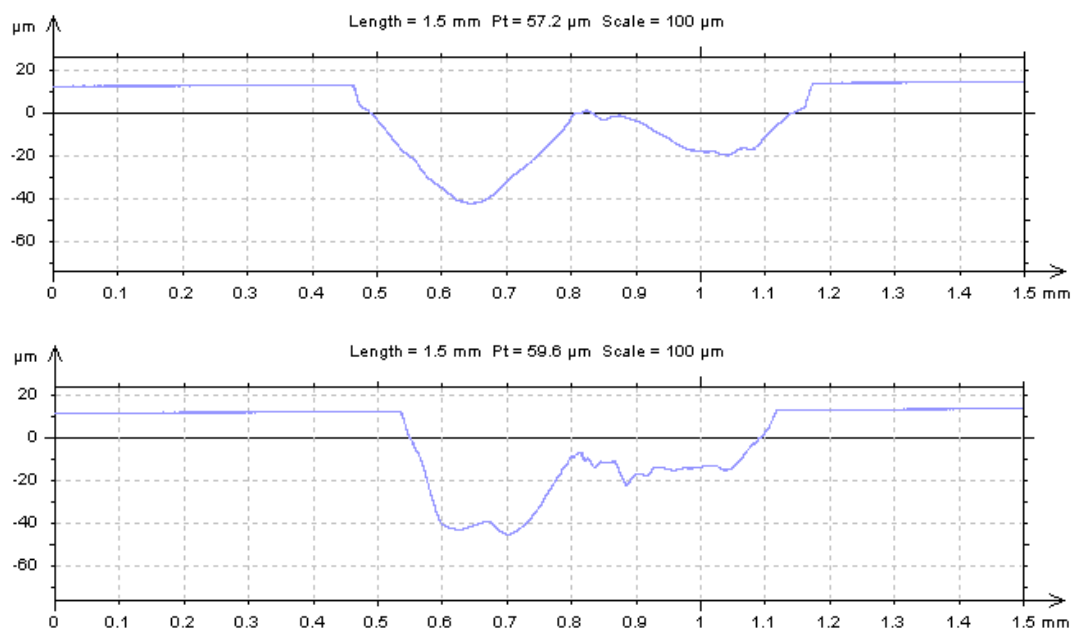
**Rys. 5.119.** Stanowisko badawcze wyposażone w profilometr Homelwerke 800 wraz z komputerem służącym do akwizycji danych wyposażonym w oprogramowanie MountainsLab

Próbki szklane z naciętymi pojedynczymi rysami były poddane polerowaniu przy parametrach  $t=10h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ , co pozwoliło na przeprowadzenie analizy geometrycznej i uzyskanie danych geometrycznych świadczących o zmianie struktury na skutek obróbki wygładzającej z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej (rys. 5.120).



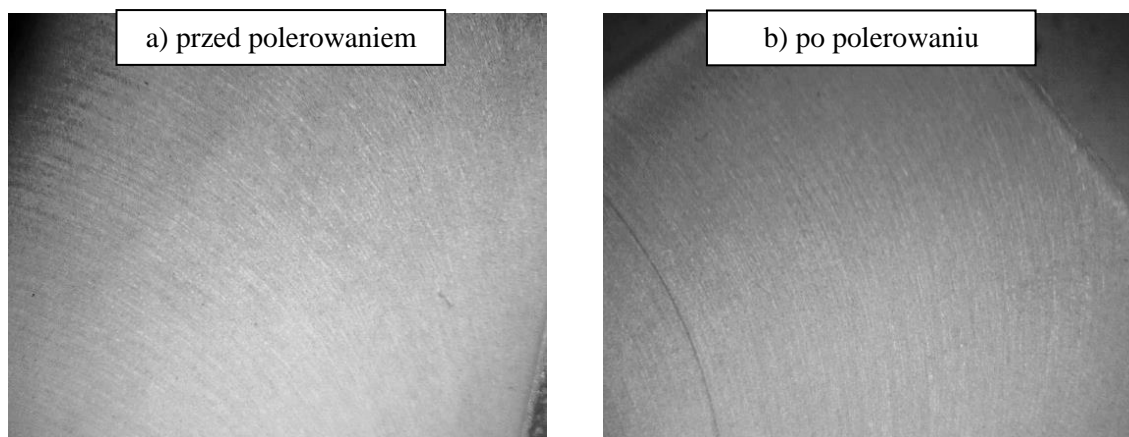
**Rys. 5.120.** Geometria struktury powierzchni szklanej po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=10h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ ) po realizacji wstępnego skrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym: a) widok 2D, b) widok 3D

Wykonano również przykładowe analizy wybranych profili składających się na topografie powierzchni po wygładzaniu (rys. 5.121). Widać na nich wyraźnie, że badane wypływki charakteryzują się płynnością przekrojów.



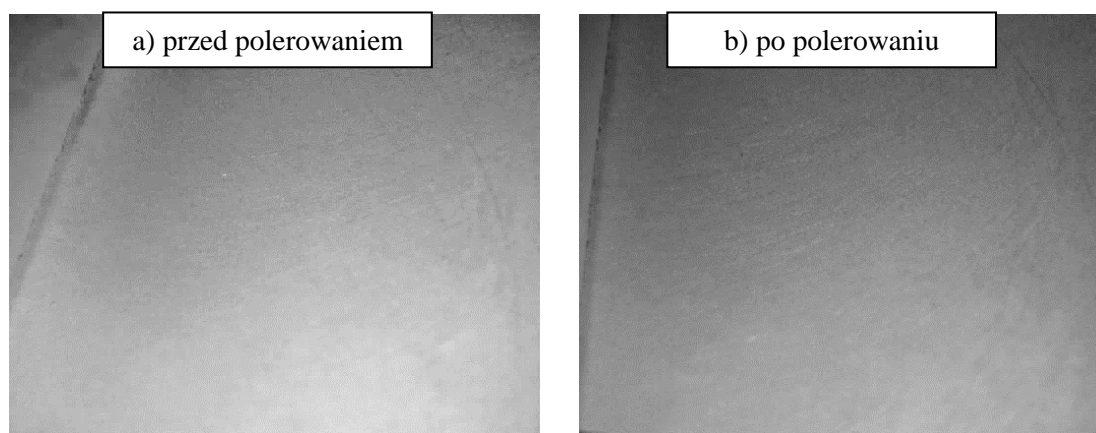
**Rys. 5.121.** Profile chropowatości powierzchni ( $t=10h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ )

Następnie analizie poddano powierzchnie szlifowane, mierząc topografię owych powierzchni oraz analizując strukturę geometryczną w funkcji czasu ekspozycji próbki na wybrane fragmenty powierzchni szklanej poddanej oddziaływaniu cieczy magneto-reologicznej poprzez podanie pola elektromagnetycznego o wartości napięcia  $I=120V$ . Do analizy wybrano płytki charakteryzujące się wyraźnymi śladami po obróbkowymi. Wszystkie próbki poddano wstępnemu oddziaływaniu cieczy przez okres  $t=2h$ . W wyniku obróbki stopniowo obserwowano zmniejszenie nierówności na badanych powierzchniach w funkcji czasu (rys. 5.122).



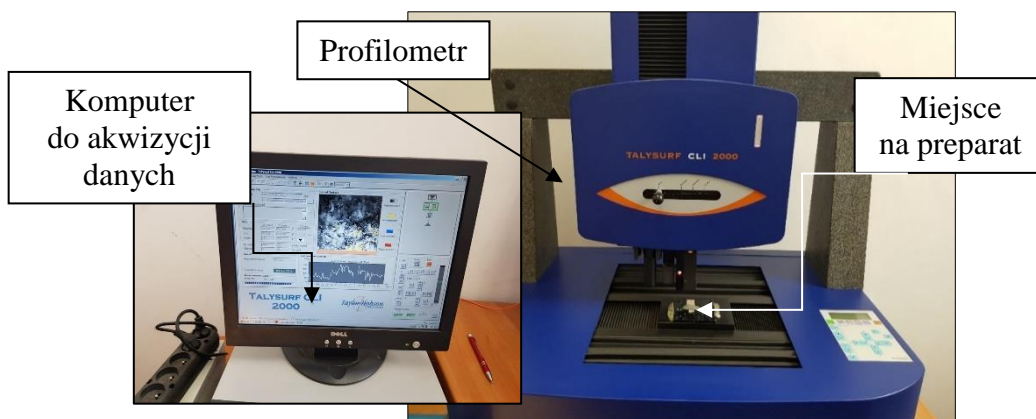
**Rys. 5.122.** Obrazy mikroskopowe powierzchni materiału szklanego: a) po szlifowaniu ściernicą diamentową przed procesem (zdjęcia referencyjne), b) po wygładzaniu z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej (x100)

Przeprowadzona analiza wykazała, że powierzchnie po obróbce z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej, charakteryzują się wzrastającym poziomem wygładzenia i stopniowym zanikaniem śladów obróbkowych (rys. 5.123).



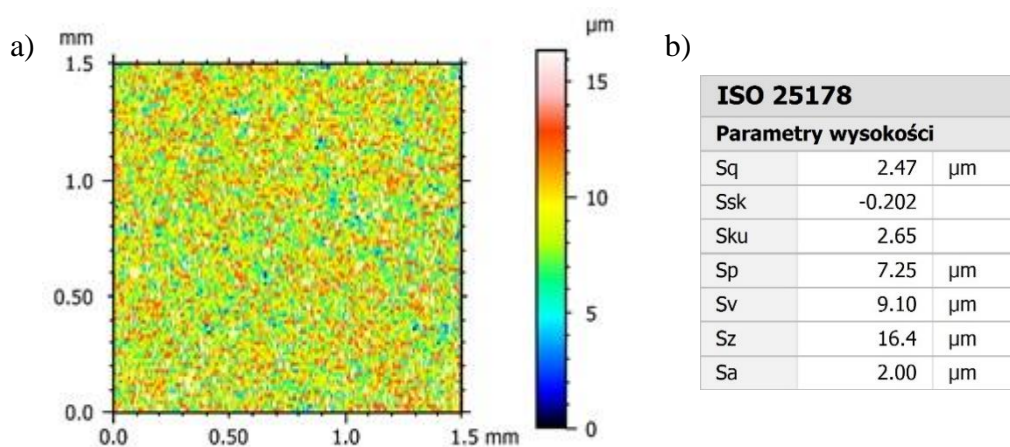
**Rys. 5.123.** Obrazy mikroskopowe powierzchni materiału szklanego; a) po szlifowaniu ściernicą diamentową, b) po przeprowadzeniu procesu polerowanie z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej (x100)

Badania profilometryczne powierzchni badanych próbek, przed procesem (badania ponowne, za względu na zmianę sprzętu pomiarowego) i po przeprowadzeniu procesu wygładzania z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym, zostały wykonane na profilometrze Talysurf CLI 2000 (rys. 5.124).



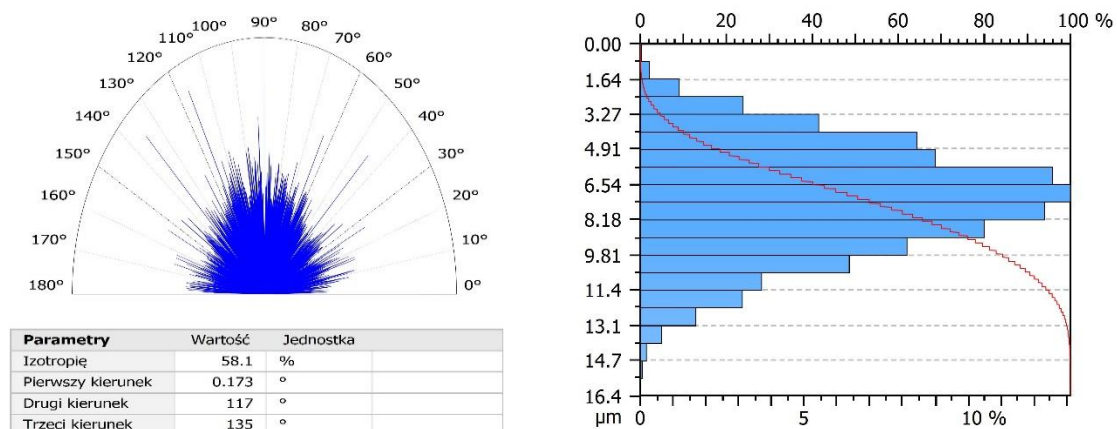
**Rys. 5.124.** Stanowisko badawcze wyposażone w profilometr Talysurf CLI 2000 wraz z komputerem służącym do akwizycji danych wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie

Analiza powierzchni obejmowała wykonanie obrazu struktury geometrycznej (rys. 5.125), powierzchni po szlifowaniu i każdym następnym etapie wygładzania z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej.



**Rys. 5.125.** Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni

Przeprowadzono również analizę kierunku struktury powierzchni, jak również przedstawiono Krzywą Abbotta–Firestone’a dla każdej analizowanej powierzchni (rys. 5.126).



**Rys. 5.126.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta-Firestone'a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126  $a_p=0,15\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr/min}$   $f_{const}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6\text{h}$

Przeprowadzone analizy wskazują, że proces wygładzenia z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej po 6h mikropolerowania, umożliwia uzyskanie powierzchni charakteryzujących się zanikiem wyraźnego ukierunkowania struktury powstałej w wyniku obróbki z wykorzystaniem ściernicy diamentowej, świadczą o tym parametry zaprezentowane na rysunkach co do rozkładu kierunku powierzchni, topografii powierzchni. Dla wybranej próbki w funkcji czasu obserwowano dalszą redukcję nierówności geometrii po realizowaniu kolejnych 4h mikropolerowania, łączny czas to  $t=10\text{h}$ .

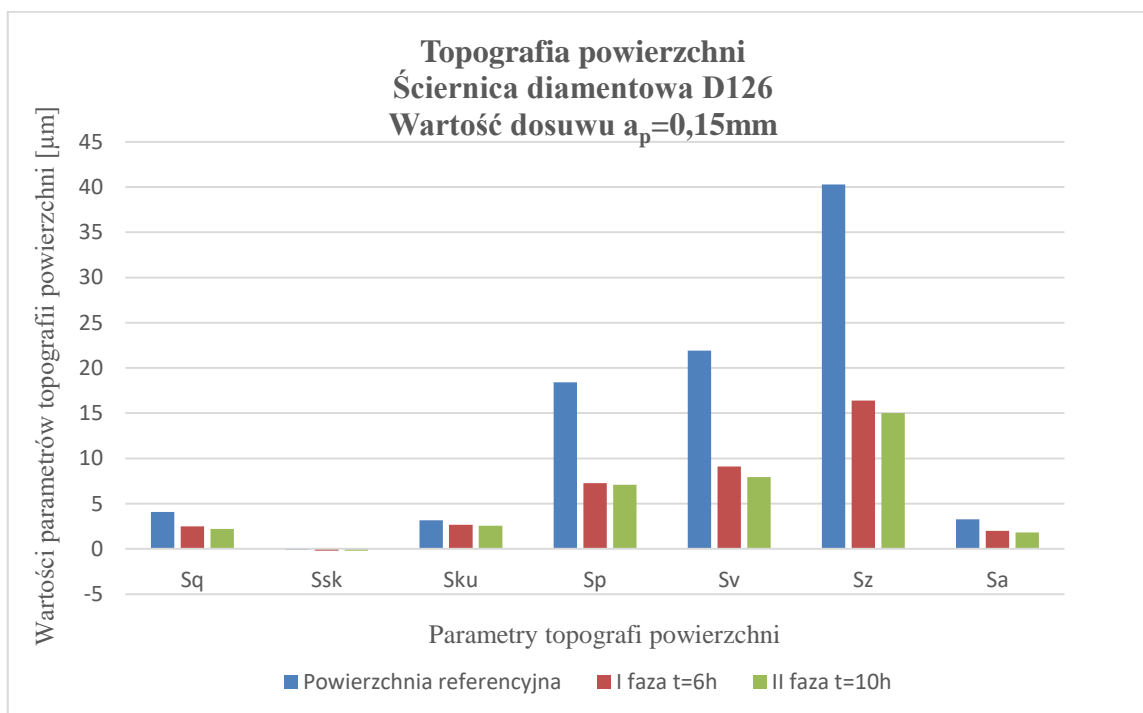
Otrzymane dane topografii powierzchni stabilizowano i porównano dla dwóch prób mikropolerowania przy użyciu cieczy magneto-reologicznej procującej w polu elektromagnetycznym, szlifowanych próbek szklanych ściernicą diamentową D126 dla wartości dosuwu  $a_p=0,15\text{mm}$  (tab. 5.8).



**Tabl. 5.8.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$  oraz  $t=10h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$

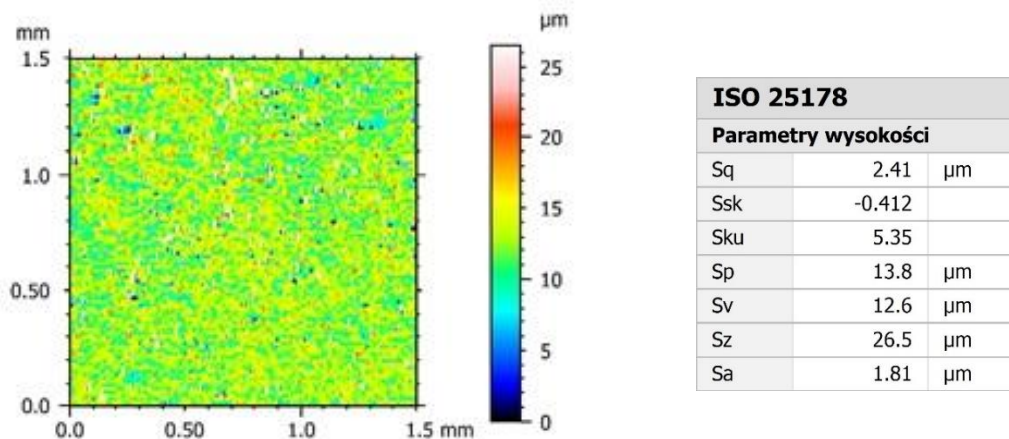
Próbka I D126 $a_p=0,15\text{mm}$			
Parametry topografii powierzchni	Powierzchnia referencyjna	I faza	II faza
		$t=2h+4h=6h$	$t=2h+4h+4h=10h$
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	4,09	2,47	2,21
Ssk	-0,103	-0,202	-0,198
Sku	3,17	2,65	2,54
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	18,4	7,25	7,08
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	21,9	9,1	7,92
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	40,3	16,4	15
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	3,26	2	1,81

Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.127). Gdzie wyraźnie widać tendencję malejącą dotyczącą parametrów topografii powierzchni wraz z wydłużeniem czasu mikropolerowania cieczą magneto-reologiczną pracującą w polu elektromagnetycznym.



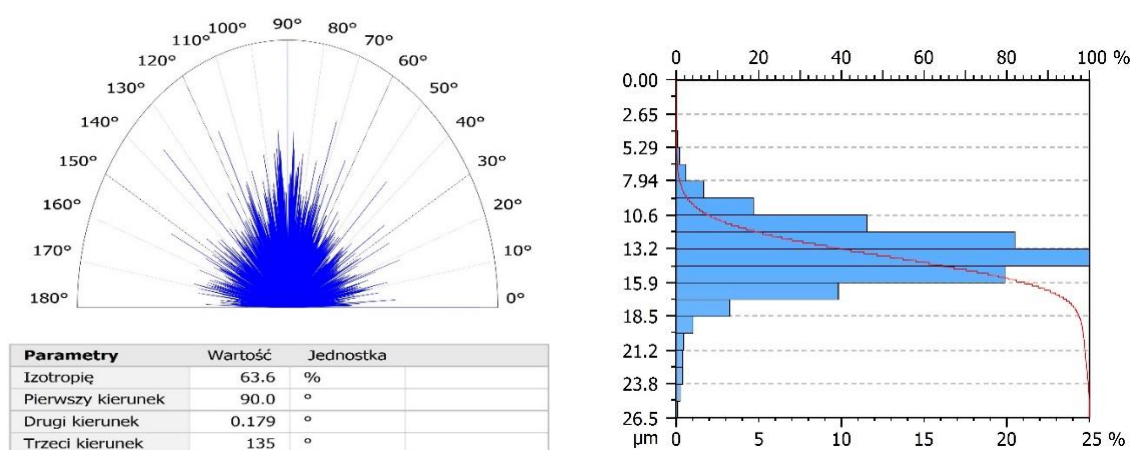
**Rys. 5.127.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$  oraz  $t=10h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$

Kolejna próbka ukształtowana przy napięciu pola elektromagnetycznego  $I=120V$  i prędkości obrotowej  $n=400\text{obr/min}$  dla ściernicy D126, dosuw  $a_p=0,05\text{mm}$ . Po analizie geometrycznej można uznać, że nastąpiła zmiana struktury na skutek obróbki wygładzającej z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej po  $2h+4h=6h$  wykonano analizę struktury geometrycznej (rys. 5.128).



**Rys. 5.128.** Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,05\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni

Przeprowadzono również analizę kierunku struktury powierzchni, jak również przedstawiono Krzywą Abbotta–Firestone’a dla wybranej analizowanej powierzchni (rys. 5.129).



**Rys. 5.129.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta–Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126  $a_p=0.05\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr/min}$   $f_{const}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6h$

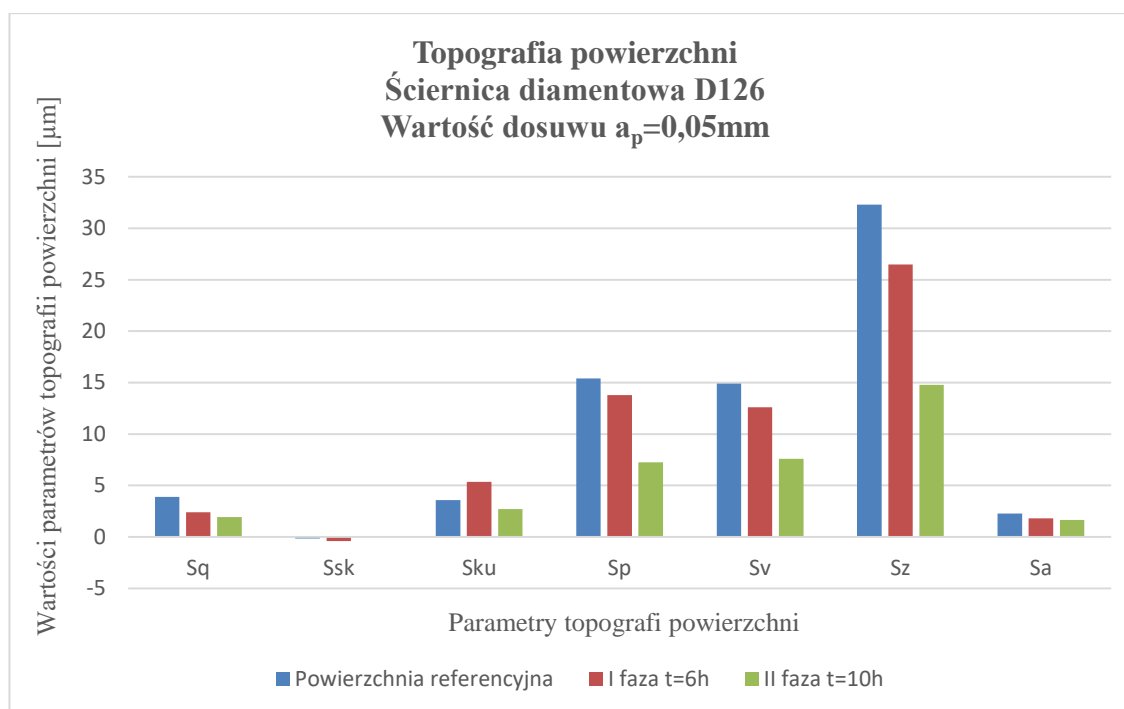
Kontynuowanie analizy struktury powierzchni po uwzględnieniu oddziaływania cieczy magneto-reologicznej (o kolejne 4h razem 10h) na powierzchnię obrabianą pozwalało na wykrycie zmian w jej parametrach amplitudowych bez zaobserwowanych istotnych zmian w innych parametrach (rozkład wielkości wierzchołków czy zmian kierunku struktury geometrycznej powierzchni szklanych. Przeprowadzone analizy wskazują, że proces wygładzenia umożliwia uzyskanie powierzchni charakteryzujących się zanikiem wyraźnego ukierunkowania struktury powstałej w wyniku obróbki z wykorzystaniem ściernicy diamentowej świadczą o tym otrzymane parametry.

Otrzymane dane topografii powierzchni stabilizowano i porównano dla dwóch prób mikropolerowania przy użyciu cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym, szlifowanych próbek szklanych ściernicą diamentową D126 dla wartości dosuwu  $a_p=0,05\text{mm}$  (tab. 5.9).

**Tabl. 5.9.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6\text{h}$  oraz  $t=10\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,05\text{mm}$

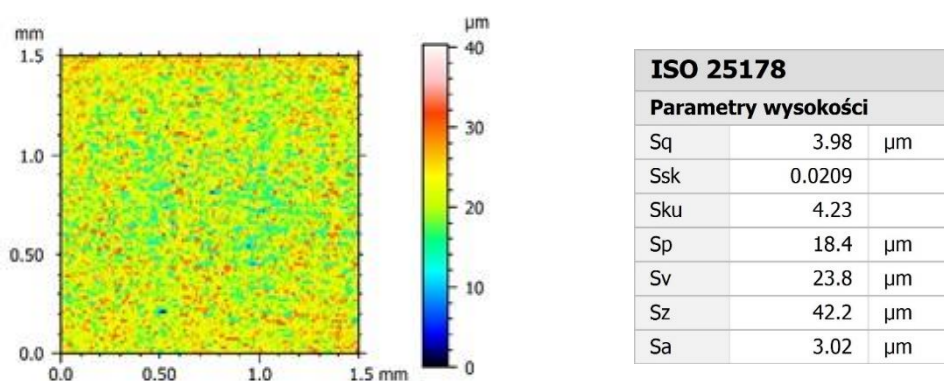
Próbka II D126 $a_p=0,05\text{mm}$			
Parametry topografii powierzchni	Powierzchnia referencyjna	I faza	II faza
		$t=2\text{h}+4\text{h}=6\text{h}$	$t=2\text{h}+4\text{h}+4\text{h}=10\text{h}$
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	3,89	2,41	1,93
Ssk	-0,155	-0,412	0,00267
Sku	3,57	5,35	2,72
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	15,4	13,8	7,25
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	14,9	12,6	7,59
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	32,3	26,5	14,8
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	2,26	1,81	1,65

Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.130). Gdzie wyraźnie widać tendencję malejącą dotyczącą parametrów topografii powierzchni wraz z wydłużeniem czasu mikropolerowania cieczą magneto-reologiczną pracującą w polu elektromagnetycznym.



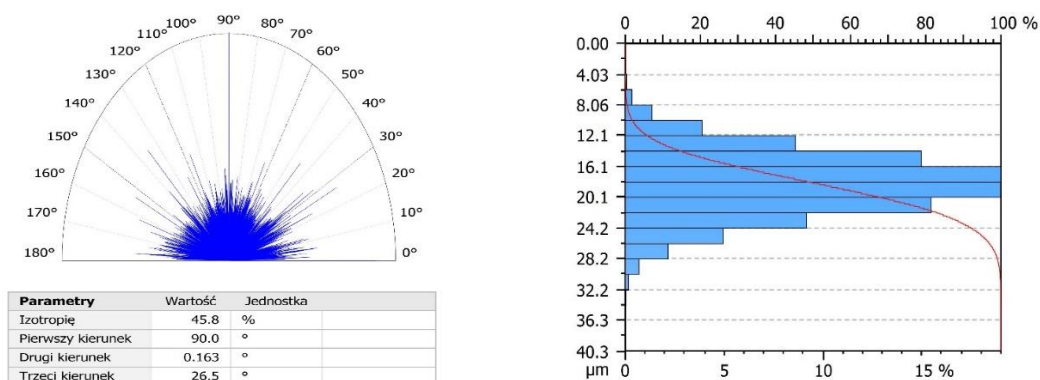
Rys. 5.130. Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$  oraz  $t=10h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,05\text{mm}$

Kolejna próbka charakteryzowała się widocznymi śladami po obróbkowymi powstałymi na skutek szlifowania ściernicą diamentową D54 przy dosuwie  $a_p=0,15\text{mm}$  i przy wstępnej obróbce w cieczy magneto-reologicznej  $2h+4h=6h$ . Uzyskano dane geometryczne świadczące o minimalnej zmianie struktury powierzchni na skutek obróbki wygładzającej z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej (rys. 5.131).



Rys. 5.131. Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni

Przeprowadzono również analizę kierunku struktury powierzchni, jak również przedstawiono Krzywą Abbotta–Firestone’a dla wybranej analizowanej powierzchni (rys. 5.139).



**Rys. 5.132.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta–Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D54  $a_p=0.15\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $S_{const}=1800\text{obr/min}$   $f_{const}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6\text{h}$

Otrzymane dane topografii powierzchni stabilizowano i porównano dla dwóch prób mikropolerowania przy użyciu cieczy magneto–reologicznej procuającej w polu elektromagnetycznym, szlifowanych próbek szklanych ściernicą diamentową D126 dla wartości dosuwu  $a_p=0,05\text{mm}$  (tab. 5.10).

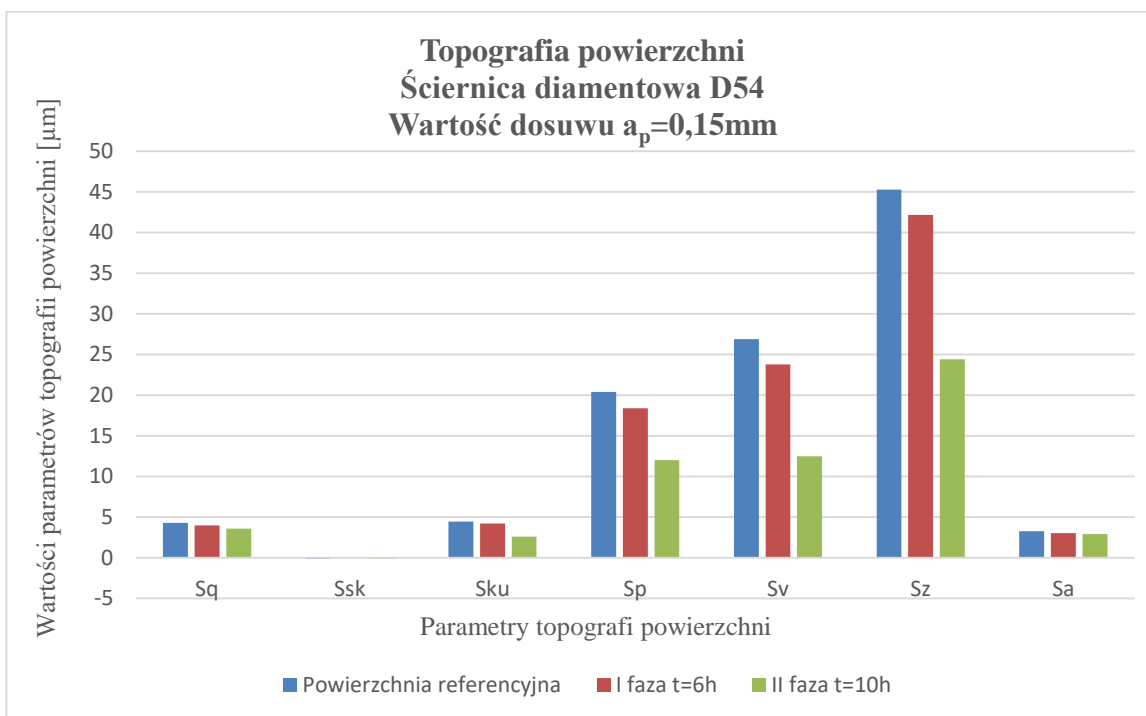
**Tabl. 5.10.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$  oraz  $t=10\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$

Próbka II D54 $a_p=0,15\text{mm}$			
Parametry topografii powierzchni	Powierzchnia referencyjna	I faza	II faza
		$t=2\text{h}+4\text{h}=6\text{h}$	$t=2\text{h}+4\text{h}+4\text{h}=10\text{h}$
<b>Sq</b> [ $\mu\text{m}$ ]	4,29	3,98	3,57
<b>Ssk</b>	-0,123	0,0209	-0,11
<b>Sku</b>	4,47	4,23	2,6
<b>Sp</b> [ $\mu\text{m}$ ]	20,4	18,4	12
<b>Sv</b> [ $\mu\text{m}$ ]	26,9	23,8	12,5
<b>Sz</b> [ $\mu\text{m}$ ]	45,3	42,2	24,4
<b>Sa</b> [ $\mu\text{m}$ ]	3,26	3,02	2,91

Zebrane dane przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.133). Gdzie wyraźnie widać tendencję malejącą dotyczącą parametrów topografii powierzchni wraz z wydłużeniem



czasu mikropolerowania cieczą magneto–reologiczną pracującą w polu elektromagnetycznym.



**Rys. 5.133.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$  oraz  $t=10\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$

W procesie szlifowania powierzchnia czynna ściernicy usuwa strukturę pierwotną warstwy wierzchniej materiału szklanego (zwykle gładko ukształtowanego ze względu na proces produkcji szkła) i w swoisty sposób otwiera taką strukturę, umożliwiając realizację procesu obróbkowego w warunkach plastycznego, jak i kruchego mechanizmu usuwania materiału obrabianego. Powstająca na skutek obróbki ściernej warstwa przypowierzchniowa, jest bardziej podatna na oddziaływanie cieczy magneto–reologicznej.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki, potwierdzają taki mechanizm wygładzania struktury szkła, które jest wówczas bardziej podatne na proces wygładzania. Ważnym aspektem w realizacji procesu wygładzania, jest uzyskanie odpowiedniej struktury wyjściowej w trakcie realizacji obróbki ściernej. Jeśli struktura ta powstaje na drodze kruchego pęknięcia lub udział mechanizmu kruchego pęknięcia jest dominujący, to proces wygładzania za pomocą cieczy magneto–reologicznej, może nie przynieść odpowiedniego rezultatu. Powstające znaczne nierówności charakterystyczne dla mechanizmu kruchego pęknięcia (lub z dominującym jego wpływem), nie pozwalają

na zniwelowanie tych nierówności w kolejnym etapie obróbki wykończeniowej z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej. Jeśli natomiast proces szlifowania odbywa się przy znacznym udziale mechanizmu plastycznego płynięcia (lub przy ograniczonym mechanizmie kruchego pęknięcia), istnieje większe prawdopodobieństwo uzyskania powierzchni, odpowiednio przygotowanej do realizacji procesu wygładzania z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej. Zaobserwowane odkształcenia i przemieszczenia materiału obrabianego są na tyle małe, że proces wygładzania z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej odbywać się powinien z większą intensywnością. Należy zauważyć, że gładka powierzchnia powstała po obróbce ścierną, może być wygładzana również w sposób równomierny. Duże nierówności wyjściowe po obróbce ścierną, ze względu na penetrację cieczy w objętości struktury warstwy przypowierzchniowej, mogą degradować tę strukturę w sposób nieproporcjonalny a nawet, można przewidywać, że struktura taka może charakteryzować się większymi lokalnymi nierównościami (ze względu na stan wyjściowy i lokalne zintensyfikowanie degradacji struktury materiału szklanego).

Przeprowadzone badania potwierdzają taki stan, ponieważ dla próbek poddanych szlifowaniu z większymi głębokościami, obserwowano mikro nierówności w postaci rys, powstałych na skutek oddziaływań ziaren ściernych o największych zagłębieniach. Przeprowadzona analiza mikroskopowa oraz z wykorzystaniem profilometru, potwierdziła powstałe zniekształcenia na powierzchni obrobionej. Dla takich parametrów obróbkowych obserwowano dość wysoką wartość parametrów wysokościowych, opisujących strukturę geometryczną badanych powierzchni wyrażonych parametrami topografii powierzchni, takimi jak:  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_t$ .

Dla mniejszych głębokości szlifowania obserwowano zmniejszenie ilości defektów na powierzchni obrabianej, występujących w obszarze głębokich rys, ukształtowanych ziarnami ściernymi. Analiza mikroskopowa potwierdziła jednak występowanie śladów obróbkowych, charakterystycznych dla procesu szlifowania. Dla mniejszych głębokości szlifowania, struktura powierzchni po obróbce charakteryzowała się większym poziomem wygładzania, jednak wartości parametru  $S_a$  i w tym przypadku wynosiła blisko  $3\mu\text{m}$ .

Zastosowanie cieczy magneto-reologicznej i wymuszonego ruchu obrotowego próbki wynoszącego ok.  $400\div 500\text{obr/min}$  oraz ekspozycji na pole elektromagnetyczne,

umożliwiające oddziaływanie cieczy magneto–reologicznej na powierzchnie próbki, pozwalało obniżyć wartość średnią parametru  $Sa$  do wartości około  $1,6 \mu\text{m}$ . Zastosowana metodyka badań, umożliwiła zmniejszenie średnich nierówności powierzchni obrabianej (w kilku etapach obróbki polerskiej) na około  $200\div 300\text{nm}$ , dochodząc do najniższej wartości około  $0,9 \mu\text{m}$ . Można stwierdzić, że dla otwartej struktury materiału szklanego (po obróbce ścierniej), podatność na redukcję chropowatości powierzchni opisanej parametrem  $Sa$ , wynosi ok.  $0,3\mu\text{m}$  na każde  $4\div 7\text{h}$  obróbki z wykorzystaniem zadanych parametrów obrotowych oraz wartości pola elektromagnetycznego.

Dzięki temu dla badanych powierzchni materiału szklanego po szlifowaniu, możliwe było ich wygładzenie i zwiększenie stopnia izotropowości ich struktury.

Dla rysy powstałej na skutek przejścia pojedynczego ziarna ściernego, ta wartość jest trudna do oszacowania ze względu na inny charakter odkształceń i mało otwartą strukturę powierzchni szklanej (na początkowym etapie skrawania pojedynczym ziarnem ściernym materiał jest uplastyczniany na małej głębokości, a później głębokość ta raptownie się zwiększa i dochodzi do pojawiania się mechanizmu kruchego pęknięcia, którego wygładzenie cieczą nie jest możliwe. Można jednak przyjąć, że wygładzenie struktury powierzchniowej rysy, zachodzi o intensywności podobnej, jak w przypadku powierzchni po szlifowaniu.

Przeprowadzone badania wskazują, że proces wygładzania powinien odbywać się przy intensyfikacji oddziaływania pola elektromagnetycznego w funkcji czasu. Intensyfikacja taka, może nastąpić poprzez zwiększenie prędkości obrotowej próbki, jak i zmianie jej kinematyki, a także liczby i sposobu rozmieszczenia źródeł pola elektromagnetycznego.

Należy zauważyć, że proces wygładzania z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej nie zmienia charakteru odkształceń (kruchy/plastyczny). Może wpływać jedynie na wygładzenie struktury przypowierzchniowej, bez zmiany przemieszczeń materiału w jego objętości. Odkształcenia materiału obrabianego wygenerowane przez ziarno ściernie, pozostają nienaruszone poprzez oddziaływanie cieczy magneto–reologicznej przy przyjętych parametrach i warunkach obróbki. Dlatego można przyjąć, że odkształcenia i defekty materiału szklanego, można zniwelować w ograniczonym zakresie.

Obserwacja wyników badań nasuwa wniosek, że warto prowadzić dalsze badania w celu oszacowania intensywności wygładzania powierzchni po szlifowaniu (redukcji rys

i nierówności powierzchni), z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej o zróżnicowanym składzie i mocy pola elektromagnetycznego. Takie badania umożliwiłyby optymalizację procesu wygładzania oraz jego intensyfikację. Pozwoliłyby również na analizy objętościowego usuwania materiału w zależności od stanu struktury geometrycznej powierzchni wyjściowej.

Przeprowadzone badania, umożliwiły jednak zaproponowanie sekwencyjnego procesu technologicznego, umożliwiającego synergiczną obróbkę szkła w warunkach minimalizacji mechanizmu kruchego pęknięcia, jak i procesu wygładzania z zastosowaniem odpowiednio skonfigurowanego systemu wygładzania z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej i odpowiednio zaprojektowany system intensyfikujący proces wygładzania.

### 5.4.3. Wnioski z procesu polerowania (MRF)

Po analizie wyników przeprowadzonych badań, dotyczących możliwości zastosowania obróbki wygładzającej z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej w polu elektromagnetycznym powierzchni szklanych, można stwierdzić:

1. Zastosowanie cieczy magneto-reologicznej w polu magnetycznym, wymaga ustalenia optymalnych parametrów umożliwiających wygładzenie powierzchni materiałów szklanych po szlifowaniu.
2. Pole elektromagnetyczne powinno obejmować całą powierzchnię wygładzaną tak, aby intensywność oddziaływania cieczy magneto-reologicznej mogło być równomierne.
3. Proces wygładzania jest długi i nie powinien być zbyt intensyfikowany ze względu na to, że wygładzanie z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej, odbywa się na poziomie mikro- i nanometrycznym. To z kolei może sprzyjać modyfikacji struktury powierzchni i warstwy przypowierzchniowej w taki sposób, że w mikro- i nanoobszarach, może dochodzić do intensywnych zmian jej struktury, podczas gdy w innych bardziej zwartych i uplastycznionych (bez wyraźnych defektów) proces będzie zachodzić z mniejszą intensywnością. Badania pokazują, że zmniejszono chropowatość powierzchni szklanej wyrażanej parametrem  $Sa$  średnio o wartość  $1,18\mu\text{m}$  po 10h polerowania.
4. Dlatego istotne jest to, aby powierzchnia poddana wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną charakteryzowała się stosunkowo mało zdefektowaną strukturą, zaś proces

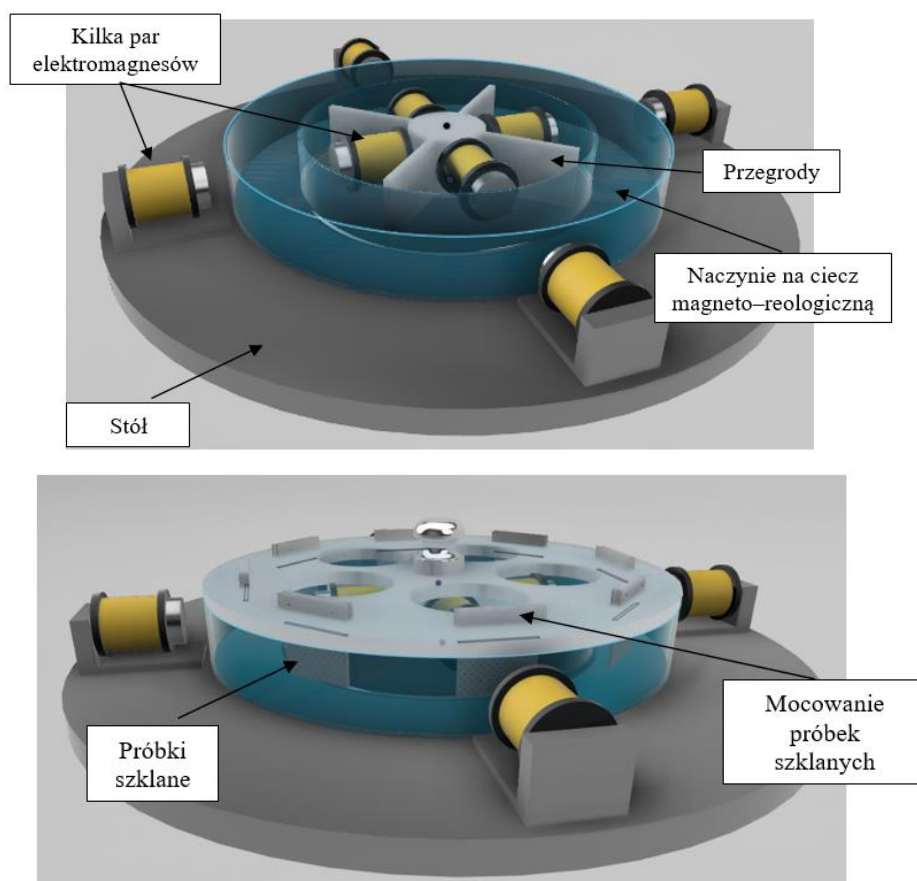
wygładzania mógł się odbywać w zakresie usuwania tylko nieznacznych defektów charakterystycznych dla ograniczonego mechanizmu kruchego pęknięcia. Zbyt duże defekty nie będą mogły być niwelowane z wykorzystaniem proponowanej metody.

5. Dla obszernych pęknięć w postaci eliptycznych defektów, można jedynie zaobserwować wygładzenie ich krawędzi i bocznych fragmentów szczelin, powstałych na skutek propagacji mechanizmu kruchego pęknięcia.
6. Wydaje się zasadnym zastosowanie cieczy magneto-reologicznej do wygładzania powierzchni szklanych po wstępnej obróbce metodą szlifowania. Jednak konieczne jest prowadzenie tego procesu przy zachowaniu odpowiednich parametrów obróbkowych, aby głębokość dosuwu nie przekraczała progu kruchego pęknięcia, a mechanizm usuwania materiału obrabianego zachodził w warunkach plastycznego płynięcia i był mechanizmem dominującym. W innym przypadku, zastosowanie cieczy magneto-reologicznej nie przyniesie oczekiwanego rezultatu, nawet dla większych cząstek aktywnych i stosunkowo silnego pola elektromagnetycznego. Wydaje się zasadne zaprojektowanie cieczy magneto-reologicznej w której będą występowały cząstki o większej twardości podatne na pole elektromagnetyczne, które pod wpływem pola silnego pola elektromagnetycznego umożliwią intensywną obróbkę szkła. Warto również rozważyć realizację badań, umożliwiających analizę wpływu wielkości takich cząstek na jakość realizacji procesu wygładzania szkła.
7. Na tej podstawie można założyć, że opracowanie sekwencji procesu technologicznego do obróbki materiałów szklanych, powinno uwzględniać wszystkie etapy realizacji obróbki w taki sposób, aby jego realizacja umożliwiała realizację obróbki powierzchni szklanych w trybie plastycznego płynięcia materiału lub w przypadku pojawiania się defektów charakterystycznych dla fazy kruchego pęknięcia ich cofnięcia.
8. W przypadku badanego procesu, stosowanie cieczy magneto-reologicznej do procesu wygładzania, nie pozwala na eliminację wszystkich rodzajów defektów powstałych w etapach poprzednich.
9. Proces mikro- i nanoobróbki jest w związku z tym zależny od wielkości mikro- i nanodosuwów stosowanych w poprzedzającym procesie szlifowania. Od poprawności jego realizacji zależy, czy proces wygładzenia może być skuteczny i czy na skutek jego kontynuowania, uzyskane powierzchnie będą charakteryzowały się



wysoką jakością i brakiem defektów na powierzchni, jak i w warstwie przypowierzchniowej.

10. Aby intensyfikować prowadzenie dalszych prac badawczych nad analizowanym procesem wygładzania materiałów szklanych z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej, zaprojektowano wstępne rozwiązanie konstrukcyjne urządzenia do realizacji tego procesu (rys. 5. 143).



**Rys. 5.135.** Wstępna koncepcja projektu urządzenia do wygładzania płytek szklanych w cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym w celu intensyfikacji procesu

## 6. PROJEKT KONCEPCYJNY SEKWENCYJNEGO PROCESU TECHNOLOGICZNEGO DO ULTRA PRECYZYJNEJ OBRÓBKII POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW SZKLANYCH

Zrealizowane badania oraz przeprowadzona analiza teoretyczna, a także literaturowa wskazała, że istnieje zapotrzebowanie na realizację obróbki szkła z wykorzystaniem zarówno procesu wygładzania na drodze obróbki ścierniej realizowanej przy mikro- i nanodosuwach zapewniających obróbkę poniżej progu kruchego pęknięcia, a więc w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego jak i z wykorzystaniem ultra precyzyjnej obróbki bez wykorzystywania spojonego narzędzia ściernego np. za pomocą cieczy magneto-reologicznej. Przeprowadzone badania dają wiedzę, co do mechanizmu zachodzącego w strefie obróbki poprzez realizację obróbki ścierniej z dosuwem nanometrycznym. Jednocześnie dzięki zastosowaniu odpowiedniej metodyki badań w realizowanej pracy doktorskiej udało się zidentyfikować mechanizm usuwania materiału od głębokości kilku nanometrów do kilkuset mikrometrów. Dla tak przyjętych parametrów określono zakres dosuwu jako najbardziej optymalny dla mechanizmu plastycznego płynięcia. Przeprowadzone badania wykazały, że takiego mechanizmu można spodziewać się od 0 do kilkuset nanometrów. Po przekroczeniu  $\leq 233; 320\text{nm} \geq$  obserwowano mechanizm kruchego usuwania materiału obrabianego.

W procesie szlifowania ultra precyzyjnego należy zastosować stos piezoelektryczny, w takim przypadku uzyskujemy dwie możliwości sterowanie ultra precyzyjnym dosuwem:

- w sposób naprzemienny (krokowy) w zakresie do 10mm z krokiem  $2\mu\text{m}$ ,
- w sposób analogowy w zakresie do  $2,5\mu\text{m}$  z krokiem od 1nm.

W przypadku mikro- i nanoobróbki powierzchni szklanych najlepszym sposobem będzie analogowe sterowanie przesunięcia członu ruchomego za pośrednictwem stosu piezoelektrycznego. Ponadto, zastosowanie sygnału emisji akustycznej (EA) umożliwi kontrolowanie głębokości osiągananej przez aktywne ziarna ściernie osadzone na powierzchni czynnej ściernicy diamentowe. Przeprowadzone badania rozpoznawcze potwierdziły możliwości praktycznego wykorzystania sygnału emisji akustycznej (EA) do tego typu obróbki ścierniej. Prowadzenie tego typu rejestracji sygnału EA pozwoli również na podzielenie procesu szlifowania na etapy zgrubnego usuwania materiału szklanego

w warunkach niepełnego mechanizmu kruchego pęknięcia, aż do etapu wykończeniowego powierzchni szklanej w mechanizmie plastycznego płynięcia materiału. Oczywiście tak prowadzony proces może utracić swoją wydajność, ale spowoduje to w konsekwencji zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie defektów struktury materiału kruchego charakterystycznych dla mechanizmu kruchego pęknięcia. Zakłada się, że satysfakcjonującym rozwiązaniem będzie prowadzenie obróbki materiału szklanego w dwóch etapach przy zastosowaniu dosuwu zgrubnego realizowanego przez stół obrabiarki CNC (dokładność pozycjonowania  $2\div 3\mu\text{m}$ ) oraz w drugim etapie dosuwu ultra precyzyjnego realizowanego za pomocą stosu piezoelektrycznego (dokładność pozycjonowania  $0,1\text{nm}$ ). W rzeczywistości cały przejazd polegałby na szybkim dojeździe ściernicy diamentowej do punktu referencyjnego w obszarze roboczym szlifierki CNC, następnie następowałaby zmiana ruchu dosuwowego narzędzia na posuw roboczy (do ustalenia w dalszych badaniach) w kilku przejściach skokowych na określonym dystansie, aż do osiągnięcia dystansu od powierzchni szklanej około  $2\mu\text{m}$  (zakładana wartość błędów mocowania). Dodatkowo zastosowanie sygnału emisji akustycznej pomoże w zarejestrowaniu pierwszego styku ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą. Planowane jest kilka przejść ściernicy w ruchu posuwisto zwrotnym na głębokościach w zakresie początkowej fazy kruchego pęknięcia (celem intensyfikacji procesu), aż do przejścia wykańczającego (max. dosuw  $\leq 200; 230\text{nm}$ ) w celu uzyskania powierzchni bez oznak kruchego pęknięcia. Jeżeli jednak ze względów trybologicznych, niedokładności mocowania, drgań, defekty powierzchniowe będą się pojawiały, wówczas rekomenduje się zastosowanie trzeciego etapu ciągu technologicznego jakim jest obróbka polerska z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym.

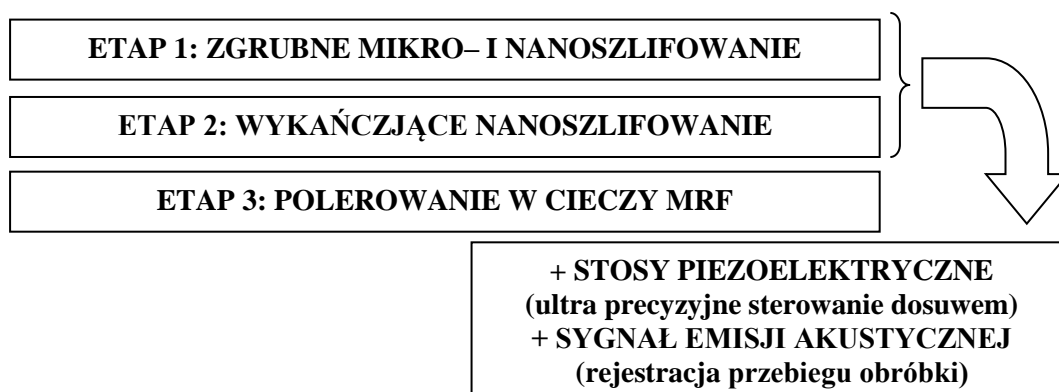
Przeprowadzone bowiem badania ujawniły możliwości wygładzenia już powstałych śladów po obróbkowych powstałych dla większych głębokości skrawania. Realizacja procesu mikro i nanoobróbki pozwala na realizację obróbki w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego i w związku z tym wygładzenie struktury przypowierzchniowej oraz zlikwidowanie zdefektowanej warstwy powstałej w skutek obróbki zgrubnej. Po zrealizowaniu wygładzania poniżej mechanizmu kruchego pęknięcia, powierzchnia obrabiana powinna charakteryzować się minimalną liczbą defektów na powierzchni jak i w warstwie przypowierzchniowej. Na tym etapie wskazane byłoby

zastosowanie odpowiednio zaprojektowanej cieczy magneto–reologicznej, której oddziaływanie w polu magnetycznym może zapewnić dodatkową redukcję defektów powstałych na powierzchni jak i w warstwie wierzchniej obrabianego materiału.

Jednocześnie ten etap realizacji procesu wygładzania polega jedynie na niwelowaniu nierówności i redukcji defektów które nie zostały usunięte na etapie mikro– i nanoobróbki. Takie defekty mogą się pojawiać ze względu na zastosowanie w procesie mikro– i nanoszlifowania spojonych narzędzi ściernych, które podlegają zakłóceniom w wyniku swojej pracy. Zaleca się zastosowanie ściernic diamentowych o różnym gradiencie i wielkości ziaren ściernych. Odpowiednio dla obróbki ściernicy diamentowej D54, a dla obróbki wykańczającej ściernicy diamentowej D126. Zaproponowana metoda obróbki szkła z wykorzystaniem obróbki ściernicy dla etapu mikro– i nanoobróbki zapewnić ma uzyskanie odpowiedniego ukształtowania struktury obrabianej powierzchni. Przy założeniu, że obróbka zgrubna ma na celu efektywne kształtowanie powierzchni do zadanych wymiarów, natomiast obróbka w zakresie nanometrycznym ma na celu wygładzenie odpowiednio ukształtowanej struktury elementu szklanego. Należy założyć, że na tych dwóch etapach realizacji procesu obróbkowego konieczne będzie zastosowanie sygnału emisji akustycznej (EA) ze względu na identyfikację położenia narzędzia ściernego względem przedmiotu obrabianego. Dlatego zaproponowano aby dojazd ściernicy do próbki szklanej odbywał się za pomocą ruchu szybkiego, a następnie w obszarze kilku mikrometrów z posuwem roboczym należy realizować dosuw aż do kontaktu powierzchni czynnej ściernicy, który identyfikowany powinien być sygnałem EA. Taki sposób szlifowania wzbogacony o diagnozowanie i kontrolowanie procesu obróbkowego umożliwia realizowanie procesu wygładzania nawet dla powierzchni krzywoliniowych (np. soczewki optyczne). Mechanizm realizacji procesu obróbkowego jest możliwy po zastosowaniu siłowników piezoelektrycznych, które z dużą dokładnością i sztywnością pozwalają utrzymywać realizowany dosuw względem powierzchni obrabianej. Ich rola tym bardziej wzrasta dla etapu nanoszlifowania. W ten sposób możliwe jest zapewnienie prowadzenie obróbki poniżej progu kruchego pęknięcia. Po tym etapie proponuje się przeprowadzić obróbkę ultra wykończeniową z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej. Jej zadaniem jest usunięcie defektów powstałych w poprzednich etapach realizacji procesu szlifowania i wygładzania. Proces polegać będzie na wykonywaniu ruchu rotacyjnego

w polu elektromagnetycznym w cieczy w której znajdują się cząstki podatne na oddziaływanie pola elektromagnetycznego. Tego typu obróbka może zniwelować defekty powstałe na skutek oddziaływania spojonego narzędzia ściernego na powierzchni obrabianej. Zaproponowany ciąg technologiczny składa się będzie z następujących etapów (rys. 5.134):

- ETAP 1: Mikroobróbka z wykorzystaniem sygnału EA oraz identyfikacją kontaktu narzędzia ściernego z przedmiotem obrabianym w celu minimalizacji kruchego pęknięcia w pierwszej fazie obróbki, efektem będzie uzyskanie struktury wstępnie ukształtowanej o zredukowanej liczbie defektów. Przy określonej wartości dosuwu oraz poziomie sygnału EA,
- ETAP 2: Nanoobróbka z wykorzystaniem sygnału EA oraz identyfikacją kontaktu narzędzia ściernego z przedmiotem obrabianym w drugiej fazie obróbki w celu zapewnienia plastycznego płynięcia w strefie obróbki z kompensacją dosuwu jako mechanizmu adaptacyjnego dla powierzchni płaskich i krzywoliniowych z wykorzystaniem aktuatorów piezoelektrycznych, efektem będzie uzyskanie struktury o zredukowanej liczbie defektów, otrzymanie powierzchni ukształtowanej w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Przy określonej wartości dosuwu oraz poziomie sygnału EA,
- ETAP 3: Ultra wygładzająca obróbka z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznych w celu usunięcia defektów powstałych na skutek obróbki powstałej w wyniku pracy ściernic diamentowych, efektem będzie uzyskanie struktury o całkowicie zredukowanej liczbie defektów powierzchni powstałych na skutek obróbki spojonym narzędziem ściernym, przy określonych parametrach obróbki.



Rys. 5.134. Schemat ultra precyzyjnego procesu obróbki szkła



## 7. WNIOSKI KOŃCOWE

Po przeprowadzeniu wnikliwej analizy literaturowej dotyczącej podstaw teoretycznych obróbki materiałów szklanych, jak i aktualnego stanu wiedzy dotyczącej ultra precyzyjnych systemów umożliwiających dużo wydajniejszą i dokładniejszą obróbkę tychże materiałów, wyznaczono cele niniejszej rozprawy doktorskiej, zakres realizacji poszczególnych etapów oraz hipotezę. Po wykonaniu wszystkich zakładanych etapów pracy oraz ich późniejsza analiza ich wyników, umożliwiła sformułowanie następujących wniosków:

1. Ustalono graniczne głębokości wnikania diamentowego ziarna ściernego w materiał szklany, przy których następują zmiany mechanizmu mikroskrawania w warunkach dominujących plastycznych odkształceń materiału, dominujących odkształceń krucho–plastycznych oraz dominujących odkształceń kruchych. Jednocześnie przeprowadzone badania umożliwiają określenie parametrów dosuwu wgłębnego oraz zakłóceń w postaci drgań w kierunku wrażliwym dla realizacji precyzyjnego dosuwu. Przeprowadzone do tej pory badania wskazują, że zakres spodziewanych zakłóceń, które inicjują mechanizm kruchego pęknięcia, może pojawiać się na głębokości powyżej 230nm. Po przekroczeniu tej głębokości, obserwowano pojawienie się pęknięć, które bezsprzecznie były efektem zwiększającej się głębokości i coraz większego obciążenia wierzchołków ziaren ściernych, a w konsekwencji narastających odkształceń i naprężeń oraz pól termicznych.
2. W strefie przejściowej, gdzie okresowo pojawiają się defekty w postaci pęknięć poprzecznych, a następnie okresowo zanikają na dystansie około 13 $\mu$ m, przewiduje się możliwość trwałej redukcji tych defektów, poprzez zastosowanie procesu wygładzania z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej. Po przekoszeniu tej granicy, zaobserwowano lawinowy i nagły wzrost defektów w strefie obróbki, których już nie będzie można zredukować w tym procesie.
3. Uchwycone zmiany naprzemiennego pojawiania się i zanikania poprzecznych defektów, są bardzo charakterystyczne dla mechanizmu kruchego pęknięcia materiałów szklanych, i świadczą o prawidłowo przyjętej metodyce badania pojedynczym ziarnem ściernym. Badania wskazują na dużą czułość układu na zmiany zachodzącego mechanizmu w procesie skrawania. Takie zmiany obserwowano dla zakresu głębokości

w granicach <230nm;230nm>, powyżej wartości 233nm zidentyfikowano efekty kruchego pęknięcia.

4. Oszacowano warunki odkształceń materiału szklanego wzdłuż toru ruchu ziaren ściernych z uwzględnieniem głębokości ich wnikania, dzięki temu możliwe jest opracowanie wytycznych do realizacji dosuwu wgłębnego dla realizacji procesu szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia.
5. Przeprowadzona analiza przemieszczania materiału w strefie mikro- i nanoskarawania diamentowym ziarnem ściernym, przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego, umożliwiła zidentyfikowanie poszczególnych faz rozwoju śladu obróbkowego od inicjacji, przez rozwój rysy, aż do jej zakończenia. Rozpoznano i opisano każdą z nich, oraz pojawiające się defekty, świadczące o fazie kruchego pęknięcia. Analizę tą uzupełniono o profile przekroju rysy na poszczególnych etapach jej rozwoju, wyznaczone przy użyciu profilometru optycznego.
6. Z analizy literaturowej wynika, iż prowadzenie analizy mechanizmów występujących podczas obróbki ścierniej materiałów szklanych, jest łatwiejsze przy prowadzeniu badań skrawania przy wykorzystaniu jednego ostrza skrawającego, ze względu na łatwiejsze sterowanie i kontrolowanie owego procesu. Prowadzone badania udowodniły, że mechanizm skrawania pojedynczym ziarnem w warunkach plastycznego płynięcia materiału, jest identyczny jak w procesie precyzyjnego szlifowania.
7. Badania przedstawione w dysertacji mogą być z powodzeniem wykorzystane do prowadzenia obróbki jednoostrzowej zdeteminowanym ostrzem w procesie mikro- i nanotoczenia materiałów szklanych.
8. Dodatkowo, zrealizowane badania potwierdzają, że zasadnym jest zastosowanie sygnału emisji akustycznej (EA) do monitorowania i nadzorowania procesu mikroszlifowania na etapie kontaktu narzędzia ściernego z przedmiotem obrabianym w celu minimalizacji defektów w pierwszej zgrubnej fazie obróbki. Analiza literatury oraz badania wykazują, że dla fazy plastycznego płynięcia wskazane byłoby zastosowanie czujników o wyższych częstotliwościach przenoszenia sygnałów pomiarowych.
9. Kolejnym etapem badawczym było przeprowadzenie procesu szlifowania, przy zastosowaniu dwóch ściernic diamentowych o różnych gradacjach ziaren ściernych.

Wykonano porównawcze próby szlifowania dla dwóch głębokości dosuwu. Z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego, scharakteryzowano i omówiono zdefektowane powierzchnie, które ujawniały obszary plastycznego płynięcia materiału. Natomiast badania struktury geometrii szkła po obróbce umożliwiły ilościowe scharakteryzowanie dotyczące parametrów SG obrabianej powierzchni oraz stopnia jej izotropii, tj.  $S_a$ ,  $S_q$ .

10. W kolejnym etapie, przeprowadzono badania procesu wygładzenia rys ukształtowanych pojedynczymi ziarnami diamentowymi oraz powierzchni ukształtowanych w procesie szlifowania, wykorzystując do tego celu ciecz magneto–reologiczna. Umożliwiło częściową redukcję defektów powstałych w kontakcie powierzchni czynnej ściernicy z materiałem obrabianym.
11. Opracowano propozycję realizacji sekwencyjnego procesu technologicznego do realizacji procesu mikroszlifowania szkła w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Wykonane badania potwierdziły, że istnieje możliwość kształtowania powierzchni szklanych z wyraźną redukcją defektów na powierzchni, jak i w warstwie wierzchniej obrabianego materiału szklanego. Istnieje możliwość otrzymania wysokiej jakości powierzchni, dzięki odpowiednio dobranym parametrom technologicznym. Przebadano i określono warunki, przy których możliwa jest minimalizacja defektów na powierzchni obrabianej, poprzez zmniejszenie dosuwu wgłębnego w obróbce ścierniej z wykorzystaniem stosów piezoelektrycznych. oraz wygładzenie powierzchni szklanych poprzez zastosowanie na etapie końcowym cieczy magneto–reologicznej.
12. Dalsze prace badawcze, powinny zmierzać w kierunku zbadania głębokości wnikania ziarna ściernego w procesie ultra precyzyjnej obróbki z wykorzystaniem diamentowych ściernic i zespołu dosuwu nanometrycznego, przy których możliwe jest zredukowanie efektu kruchego pęknięcia i uzyskanie powierzchni, charakteryzujących się minimalną lub całkowitą redukcją defektów charakterystycznych dla mechanizmu kruchego pęknięcia. Badania te powinny być prowadzone dwutorowo i dotyczyć analizy struktury geometrycznej powstałej na skutek przejścia pojedynczego ziarna ściernego (analiza głębokości i długości toru ruchu wierzchołka ziarna ściernego), przy którym obserwuje się formowanie granicy z okresowym pojawianiem i zanikaniem mechanizmu kruchego

pęknięcia (uchwycenie równoległego mechanizmu plastycznego i kruchego usuwania materiału obrabianego). Drugi typ badania powinien być odniesiony do procesu szlifowania i zbadania, przy jakich parametrach szlifowania, możliwa jest redukcja mechanizmu kruchego pęknięcia na rzecz plastycznego płynięcia materiału obrabianego, ułatwiając i zwiększając intensywność procesu wygładzania cieczą magneto-reologiczną.

13. Biorąc pod uwagę powyższe wyniki badań można postawić wniosek, że zrealizowane badania potwierdziły sformułowaną hipotezę o możliwości określenia mechanizmu przemieszczeń materiału w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość precyzyjnego ustalenia warunków zmiany mechanizmu kruchego pęknięcia i plastycznego płynięcia materiału obrabianego w procesie szlifowania. Natomiast zastosowanie obrazów skaningowych i analizy topograficznej do oceny intensywności odkształceń materiału szklanego od postaci kruchego pęknięcia otrzymanego w procesie mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym do warunków plastycznego płynięcia, umożliwiło identyfikację progu przejścia między poszczególnymi fazami, W konsekwencji może to zapewnić zmniejszenie liczby defektów w warstwie wierzchniej oraz wysoką gładkość powierzchni obrobionych z wykorzystaniem spojonych narzędzi ściernych i zapewnić optymalne warunki obróbki materiałów wykonanych szklanych.

## 8. POTWIERDZENIE HIPOTEZY

Można stwierdzić, iż zaproponowana w dysertacji hipoteza badawcza poparta wnikliwą analizą literaturową i analizą teoretyczną, znalazła swoje potwierdzenie na drodze przyjętej metodyki badawczej, późniejszych badań doświadczalnych, ich analizy i weryfikacji. Realizowany temat dotyczył analizy przemieszczenia materiału w strefie mikro- i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym. Pierwszy etap badań doświadczalnych przeprowadzono na szkłe (interferencyjne, sodowe) wykonując skrawanie pojedynczym diamentowym ostrzem skrawającym pod określonym kątem mocowania próbki szklanej, aby uzyskać pełne spektrum zmian strukturalnych utworzonej rysy: od inicjacji procesu, fazę plastycznego płynięcia materiału, początek i rozwój kruchego pęknięcia, aż do osiągnięcia pełnej destrukcji materiału kruchego. Dzięki analizie zdjęć skaningowych, można było poddać analizie wszystkie te fazy i dokładnie określić ich cechy charakterystyczne na wszystkich etapach rozwoju. Nałożenie na to informacji pochodzących z profilometru optycznego, umożliwiło precyzyjne wskazanie wartości nanometrycznych poszczególnych granic wszystkich faz obróbki materiału szklanego (dla szkła sodowego).

W celu potwierdzenia hipotezy zastosowano warunek logiczny w którym można przyjąć, że istnieje wartość graniczna wyrażona głębokością wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany, poniżej której możliwe jest prowadzenie obróbki w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Przekroczenie wartości granicznej skutkuje zmianą mechanizmu usuwania materiału obrabianego z plastycznego na kruchy. Przeprowadzone badania umożliwiły identyfikację obszaru przejściowego (quazi plastycznego).

W literaturze Bifano [120,121] opracował model krytycznej głębokości wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany w procesie mikroszlifowania, wykorzystując wiedzę o ich podatności na odkształcenie plastyczne:

$$h_c = b \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_c}{H} \right)^2$$

oznaczenia stosowane we wzorze:

$h_c$  – krytyczna głębokość wnikania ziarna ściernego w materiał obrabiany,

$b$  – współczynnik zależny od geometrii ziarna (kąt natarcia) i warunków procesu,

$E$  – moduł sprężystości wzdłużnej.



W przypadku prowadzony badań doświadczalnych przy zastosowaniu próbek ze szkła sodowego zastosowano ten wzór do obliczeń teoretycznych teoretycznej głębokości krytycznej wnikania ziarna ściernego. Głębokość granicy plastycznego płynięcia (wartość teoretyczna) wyniosła  $h_{cT} \sim 200$  nm, (wartość wyliczeniowa przyjęta dla współczynnika  $b$  od 0,15 do 0,5 odnoszącego się do zmiennej geometrii ostrza skrawającego). Natomiast otrzymane wyniki otrzymane na podstawie wykonanych badań doświadczalnych oraz ich weryfikacji doprowadziły do otrzymania następujących wyników:

$h_{cb}$  – głębokość granicy plastycznego płynięcia (wartość badana i weryfikowana z wykorzystaniem technik badawczych zaprezentowanych w pracy doktorskiej)  
 $h_{cb} \leq 200;230\text{nm} \geq$ ,

$h_{cq}$  – granica quaziplastycznego płynięcia (przedział wartości badanych i weryfikowanych z wykorzystaniem technik badawczych zaprezentowanych w pracy doktorskiej)  
 $h_{cq} = \langle 230 \div 320 \rangle \text{nm}$ ,

$h_{ck}$  – głębokość przy której zachodzi mechanizm kruchego pęknięcia materiału szklanego (wartość badana i weryfikowana z wykorzystaniem technik badawczych zaprezentowanych w pracy doktorskiej)  $h_{ck} \geq 320\text{nm}$ ,

Zestawienie przedziałów i wartości badanych oraz teoretycznych wskazuje, że istnieje związek przyczynowo–skutkowy warunkujący zmiany mechanizmu usuwania materiału obrabianego w strefie skrawania z plastycznego na kruchy. Sformułowana hipoteza pozwoliła na weryfikację postawionych problemów badawczych zgodnie z opracowaną metodyką. Jeśli uwzględni się, że:

$$h_{cT} \sim 200\text{nm}$$

$$h_{cb} \leq 200;230\text{nm} \geq$$

$$h_{cq} = \langle 230 \div 320 \rangle \text{nm},$$

$$h_{ck} \geq 320\text{nm}$$

To należy przyjąć, że  $h_{cb}$  zawiera się w przedziale  $h_{cT}$  jako wartości teoretycznej, tylko nieznacznie ją przekraczając.

Jednocześnie badania wykazały zakres zrównoleglenia mechanizmu kruchego i plastycznego mechanizmu usuwania materiału, który może być wykorzystywany w ultra precyzyjnej obróbce i który może być stosunkowo łatwo cofany ze względu na defekty quazi kruche na korzyść odkształceń plastycznych  $h_{cq} = 230 \div 320\text{nm}$ .

Przekroczenie wartości:  $h_{ck} \geq 320$  nm, należy uznać za kruche pękanie i definitywną zmianę mechanizmu (z plastycznego na kruchy).

**Wobec powyższego należy uznać, że hipoteza badawcza jest prawdziwa co potwierdziły zrealizowane badania oraz zidentyfikowane i zweryfikowane badawczo zakresy głębokości granicznych, które mogą posłużyć do opracowania wytycznych technologicznych dla prawidłowej realizacji procesów obróbki materiałów szklanych.**

W celu potwierdzenia i ewentualnego przeniesienia otrzymanych wyników badań w strefę zastosowań przemysłowych, zdecydowano się wykonać uzupełniające badania, przeprowadzając procesy mikro – i nanoszlifowania spojonymi narzędziami ściernymi w postaci ściernic z ziarnami diamentu syntetycznego. W celu analizy otrzymanych wyników, również wykorzystano połączenie obu technik badawczych, czyli mikroskopii skaningowej i profilometrii, aby otrzymać pełny zbiór wyników określający poszczególne fazy szlifowania przy zastosowaniu zmiennej wartości dosuwu. Mimo, że udało się pozyskać zdjęcia skaningowe doskonale ukazujące fazę plastycznego odkształcenia materiału szklanego w strefie obróbki, przy zastosowaniu minimalnego dosuwu, to do dalszych badań posłużyły płytki o wyraźnej deformacji i charakteryzujące się pełną fazą kruchą.

A do wykonania trzeciej fazy badań, wykorzystano stanowisko mikroszlifowania cieczą magneto–reologiczną pracującą w polu elektromagnetycznym, gdzie wyraźnie otwarta struktura płytki w fazie kruchego pękania, w funkcji czasu ulega wygładzeniu. Tego typu rozwiązanie może stanowić dobrą alternatywę w procesie obróbki materiałów kruchych.

Podczas badań ujawniono, że aby w sposób precyzyjny sterować dosuwem narzędzia ściernego, na poziomie nanometrycznym, proponuje się stosowanie urządzeń wyposażonych w stopy piezoelektryczne, umożliwiające sterowanie posuwem w sposób ultra precyzyjny.

Można stwierdzić, iż zaproponowana w dysertacji hipoteza badawcza poparta wnikliwą analizą literaturową oraz teoretyczną książek i publikacji badawczych o tematyce materiałów szklanych, należących do grupy materiałów kruchych, znalazła swoje potwierdzenie na drodze przyjętej metodyki badawczej, późniejszych badań doświadczalnych, ich analizy i weryfikacji. Realizowany temat dotyczył analizy przemieszczenia materiału w strefie mikro– i nanoskrawania diamentowym ziarnem ściernym. Przez co pierwsze badania doświadczalne przeprowadzono na szkle (interferencyjne, sodowe) wykonując skrawanie pojedynczym diamentowym ostrzem

skrawającym pod określonym kątem mocowania próbki szklanej, aby uzyskać pełne spektrum budowy utworzonej rysy od inicjacji procesu, fazę plastycznego płynięcia materiału, początek i rozwój kruchego pęknięcia, aż do osiągnięcia pełnej destrukcji materiału kruchego. Dzięki analizie zdjęć skaningowych, można było poddać analizie wszystkie fazy i dokładnie określić jej cechy charakterystyczne na wszystkich etapach rozwoju. Nałożenie na to informacji pochodzących z profilometru optycznego umożliwiło precyzyjne wskazanie wartości nanometrycznych poszczególnych granic wszystkich faz obróbki materiału szklanego (dla szkła sodowego).

W celu potwierdzenia i ewentualnego przeniesienia otrzymanych wyników badań w strefę zastosowań przemysłowych zdecydowano się wykonać uzupełniające badania, wykonując mikro – i nanoszlifowanie przy wykorzystaniu spojonego narzędzia ściernego jakim są ściernice na bazie diamentu. W celu analizy otrzymanych wyników również wykorzystano połączenie obu technik badawczych, czyli mikroskopii skaningowej i profilometrii optycznej, aby otrzymać pełny zbiór wyników określający poszczególne fazy szlifowania przy zastosowaniu zmiennej wartości dosuwu. Mimo, że udało się pozyskać zdjęcia skaningowe doskonale ukazujące fazę plastycznego szlifowania materiału szklanego przy zastosowaniu minimalnego dosuwu. To do dalszych badań posłużyły płytki o wyraźnej deformacji i charakteryzujące się pełną fazą kruchą.

A do wykonania trzeciej fazy badań wykorzystano stanowisko mikroszlifowania cieczą magneto–reologiczną pracującą w polu elektromagnetycznym, gdzie wyraźnie otwarta struktura płytki w fazie kruchego pęknięcia, w funkcji czasu ulega wygładzeniu. Tego typu rozwiązanie może stanowić dobrą alternatywę w procesie obróbki materiałów kruchych.

Podczas badań ujawniono, że aby w sposób dostateczny sterować dosuwem narzędzia ściernego, na poziomie nanometrycznym, proponuje się stosowanie urządzeń wyposażonych w stopy piezoelektryczne umożliwiające sterowanie posuwem w sposób ultra precyzyjny.

## 9. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Mimo, że przebieg realizacji obróbki materiałów szklanych jest badany na całym świecie, nie wyczerpano wszystkich problemów wpływających na warunki szlifowania. Problemy z którymi spotkano się przy realizacji rozprawy doktorskiej i postanowiono rozwijać w dalszych badaniach, to:

1. Badania dotyczące określenia maksymalnych dosuwów dla obróbki zgrubnej procesu szlifowania szkła, w którym istnieje możliwość otrzymania w sposób kontrolowany zdefektowanej powierzchni, która po obróbce wykańczającej umożliwi otrzymanie powierzchni szklanej wolnej od defektów.
2. Wykonanie urządzenia mechatronicznego do realizacji precyzyjnego dosuwu w procesie obróbki materiałów szklanych, z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych.
3. Przeprowadzenie dalszych badań w celu podniesienia wydajności urządzenia do polerowania przy wykorzystaniu cieczy magneto–reologicznej, przez zróżnicowanie składu cieczy, zmiany mocy pola elektromagnetycznego, zwiększenie ilości elektromagnesów, co prowadziłyby do określenia granic możliwości cofnięcia defektów kruchego pęknięcia.

## 10. LITERATURA

- [1] Gołąbczak A., Świącik R., Galant M.: Modelowanie i weryfikacja doświadczalna temperatury w procesie szlifowania AEDG stopu tytanu. *Mechanik* 8/9/2013, str. 136–143.
- [2] Gołąbczak A., Świącik R.: Wpływ warunków szlifowania AEDG stopów tytanu na temperaturę i stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. *Problemy i tendencje rozwoju obróbki ścierniej*. Praca pod redakcją Piotra Cichosza. Wrocław 2012, str. 100–106.
- [3] Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł.: Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z wykorzystaniem środowiska Ansys część II. *Mechanik* 9/2014, str. 171–175.
- [4] Kacalak W., Bałasz B., Tomkowski R., Lipiński D., Królikowski T., Szafraniec F., Tandecka K., Rypina Ł.: Problemy naukowe i kierunki rozwoju procesów mikroobróbki ścierniej. *Mechanik* 9/2014, str. 157–170.
- [5] De Chiffre L., Kunzmann H., Peggs G. Lucca D. A.: Surface In Precision Engineering, Microengineering nad Nanotechnology, *Annals of the CIRP*, 52/2 2003, str. 561–577.
- [6] Liu X., DeVor R., Kapoor S.G., Ehmann K.F.: The Mechanics of Machining AT the Microscale: Assessment of the Current State of the Science, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME*, 126/4/2004, str. 666–678.
- [7] Masuzawa T., State of the Art. Of Mircomachining, *CIRP Annals*, 49/2/2000, str. 472–488.
- [8] Zhang B., Liu., Brown C. A. Bergstrom T. S.: Microgrinding of Nanostructured Material Coating, *Annals of the CIRP*, 51/1/2002, str. 251–254.
- [9] Shimada S. Ikawa N., Tanaka H., Ohmori G., Uchikoshi J., Yoshinaga H.: Feasibility Studyon Ultimate Accuracy In Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation, *CIRP Annals*, 42/1/1993, str. 91–94.
- [10] Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Uchikoshi J.: Struktura of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis, *CIRP Annals*, 43/1/1994, str. 51–54.

- [11] Vogler M. P., DeVor R. E. Kapoor S. G.: On the Modelig and Analysis of Machinig Performance In Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 126/4/2004, str. 685–694.
- [12] Perveen A., Molardi C.: Machining of Glass Materials: An Overview. Advanced Manufacturing Technologies. Moder Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing 2017. Springer ISBN: 978–3–319–56098–4, str.26–47.
- [13] Agarwal S, Rao PV (2008) Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. Int J Mach Tools Manuf 48 (6):698–710.
- [14] Antwi K.E., Wang H., Liu K.: A review on ductile mode cutting of brittle materials. Frontiers of Mechanical Engineering 2018. DOI: 10.1007/s11465-018-0504-z. (str. 1–14).
- [15] Tönshoff H K, Schmieden W V, Inasaki I, et al. Abrasive machining of silicon. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1990, 39(2): 621–635.
- [16] Pei Z J, Fisher G R, Liu J. Grinding of silicon wafers: A review from historical perspectives. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12–13): 1297–1307.
- [17] Liu K, Zuo D W, Li X P, et al. Nanometric ductile cutting characteristics of silicon wafer using single crystal diamond tools. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2009, 27(3): 1361–1366.
- [18] Fang F Z, Chen L J. Ultra-precision cutting for ZKN7 glass. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 17–20.
- [19] Blackley WS, Scattergood RO (1991) Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. Prec Eng 13(2):95–103.
- [20] Yan J, Yoshino M, Kuriagawa T, Shirakashi T, Syoji K, Komanduri R (2001) On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (MEMS), opto-electronic and optical applications. Mater Sci Eng A 297(1–2):230–234.
- [21] Johnson KL (1970) The correlation of indentation experiments. J Mech Phys Solids 18 (2):115–126.



- [22] Li X, Abe T, Esashi M (2001) Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF<sub>6</sub> plasma. *Sens Actuat A Phys* 87(3):139–145.
- [23] Nikumb S, Chen Q, Li C, Reshef H, Zheng HY, Qiu H, Low D (2005) Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers. *Thin Solid Films* 477(1–2):216–221.
- [24] Plaza JA, Lopez MJ, Moreno A, Duch M, Cane C (2003) Definition of high aspect ratio glass columns. *Sens Actuat A Phys* 105(3):305–310.
- [25] Slikkerveer PJ, Bouten PCP, de Haas FCM (2000) High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting. *Sens Actuat A Phys* 85(1–3):296–303.
- [26] Dolev D (1983) A note on plasticity of glass. *J Mater Sci Lett* 2(11):703–704.
- [27] Finnie I, Dolev D, Khatibloo M (1981) On the Physical Basis of Auerbach’s Law. *J Eng Mater Technol* 103(2):183–184.
- [28] Lawn BR, Jensen T, Arora A (1976) Brittleness as an indentation size effect. *J Mater Sci* 11 (3):573–575.
- [29] Giovanola JH, Finnie I (1980) On the machining of glass. *J Mater Sci* 15(10):2508–2514.
- [30] Bifano TG (1988) PhD Thesis. North Caroline State University, Raleigh.
- [31] Nakasuji T, Kodera S, Hara S, Matsunaga H, Ikawa N, Shimada S (1990) Diamond turning of brittle materials for optical components. *CIRP Ann Manuf Technol* 39(1):89–92.
- [32] Shimada S, Ikawa N, Inamura T, Takezawa N, Ohmori H, Sata T (1995) Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micromachining. *CIRP Ann Manuf Technol* 44 (1):523–526.
- [33] Fielder KH (1988) Precision grinding of brittle materials. In: *Ultra precision in manufacturing engineering*. Springer, Berlin, pp 72–77.
- [34] Bifano TG, Dow TA, Scattergood RO (1992) Ductile-regime grinding. A new technology for machining brittle materials. *J Eng for Indus* 113:184–189.
- [35] Bifano TG, Yi Y (1992) Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining. *Prec Eng* 14(4):219–228.
- [36] Nakasuji T, Kodera S, Hara S, Matsunaga H, Ikawa N, Shimada S (1990) Diamond turning of brittle materials for optical components. *CIRP Ann* 39(1):89–92.

- [37] König W, Cronjäger L, Dortmund U, Spur G, Tonshoff HK, Vigneau M, Zdeblick WJ (1990) Machining of new materials. *CIRP Ann* 39(2):673–681.
- [38] Yuan YJ, Geng L, Dong S (1993) Ultra-precision machining of SiCw/Al composites. *CIRP Ann* 42(1):107–109.
- [39] Yuan ZJ, Zhou M, Dong S (1996) Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. *J Mater Process Technol* 62(4):327–330 (2nd International Conference on Production Engineering).
- [40] Ueda K, Amano A, Ogawa K, Takamatsu H, Sakuta S, Murai S, Kobayashi A (1991) Machining high-precision mirrors using newly developed CNC machine. *CIRP Ann Manuf Technol* 40(1):555–558.
- [41] Weber H, Herberger J, Pilz R (1984) Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool. *CIRP Ann Manuf Technol* 33(1):85–87.
- [42] Takeyama H, Iijima N (1988) Machinability of glassfiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining. *CIRP Ann Manufac Technol* 37(1):93–96.
- [43] Moriwaki T, Shamoto E, Inoue K (1992) Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *CIRP Ann Manuf Technol* 41(1):141–144.
- [44] Malkin S, Hwang TW (1996) Grinding mechanisms for ceramics. *CIRP Ann Manuf Technol* 45(2):569–580.
- [45] Chen M, Zhao Q, Dong S, Li D (2005) The critical conditions of brittle–ductile transition and the factors influencing the surface quality of brittle materials in ultra-precision grinding. *J Mater Process Technol* 168(1):75–82.
- [46] Gu W, Yao Z, Li H (2011) Investigation of grinding modes in horizontal surface grinding of optical glass BK7. *J Mater Process Technol* 211(10):1629–163.
- [47] Perveen A, Wong Y, Rahman M (2011) Characterisation and online monitoring of wear behaviour of on-machine fabricated PCD micro-tool while vertical micro-grinding of BK7 glass. *Int Abras Technol* 4(4):304–324.
- [48] Suratwala T, Wong L, Miller P, Feit MD, Menapace J, Steele R, Davis P, Walmer D (2006) Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica. *J Non-Cryst Solids* 352(52–54):5601–5617.

- [49] Takeuchi Y, Sawada K, Sata T (1996) Ultraprecision 3D micromachining of glass. CIRP Ann Manuf Technol 45(1):401–404.
- [50] Perveen A, San W Y, Rahman M (2012) Fabrication of different geometry cutting tools and their effect on the vertical micro-grinding of BK7 glass. Int J Adv Manuf Tech 61(1–4):101–115.
- [51] Matsumura T, Ono T (2008) Cutting process of glass with inclined ball end mill. J Mater Process Technol 200(1–3):356–363.
- [52] King R F, Tabor D. The strength properties and frictional behaviour of brittle solids. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1954, 223 (1153): 225–238.
- [53] Huerta M, Malkin S. Grinding of glass: The mechanics of the process. Journal of Engineering for Industry, 1976, 98(2): 459–46.
- [54] Lawn B R, Evans A G. A model for crack initiation in elastic/ plastic indentation fields. Journal of Materials Science, 1977, 12 (11): 2195–2199.
- [55] Lawn B R, Wilshaw R. Indentation fracture: Principles and applications. Journal of Materials Science, 1975, 10(6): 1049–1081.
- [56] Szwedowski A., Romaniuk R.: Szkle optyczne i fotoniczne”. WNT, 2009.
- [57] Legun Z.: Technologia elementów optycznych. WNT, 1982.
- [58] Woźniak W.A.: Pomiar optyczne. Wykład 6. Szkło. Prezentacja: [http://www.if.pwr.wroc.pl/~wozniak/pomiary\\_optyczne\\_1\\_pliki/wyklad%20Pomiar%20Optyczne%2006.pdf](http://www.if.pwr.wroc.pl/~wozniak/pomiary_optyczne_1_pliki/wyklad%20Pomiar%20Optyczne%2006.pdf). Katedra Optyki i Fotoniki Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechnika Wroclawska. Plik aktywny na dzien 26.03.2020.
- [59] Dziura M., Hilgertner A., Jabłkowski J., Jaworowicz A., Karkosza A., Stoch Z., Unisławski E., Werstler J., Ziemia B.: „Technologia SZKŁA”. Warszawa 1987.
- [60] Skoczyński W.: Sensory w obrabiarkach CNC. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2018. ISBN 978–83–01–19948–7.
- [61] Dimla D.E. Snr.: Sensor Signals for Tool–wear Monitoring in Metal Cutting Operations – a Review of Methods. Int. JMTDR, Vol. 40, 2000, pp. 1073–1098.
- [62] Xiao Qi C., Hao Z., Wildermuth D.: In–Process Tool Monitoring through Acoustic Emission Sensing. SIMTech Technical Report (AT/01/014/AMP). Singapore Institute of Manufacturing Technology, Automation Technology Division, 2001.

- [63] Acoustic Emission Sensors for Grinding Machines. (MARPOSS)  
[http://www.marposs.com/DownLOADFileUrl\\_New.php/FilePosizione=ftp@@library@@D6I02400G0.pdf/nomeFile=D6I02400G0.pdf](http://www.marposs.com/DownLOADFileUrl_New.php/FilePosizione=ftp@@library@@D6I02400G0.pdf/nomeFile=D6I02400G0.pdf) (dostęp 18.04.2017).
- [64] Muc A., Barski M.: Ciecze magnetoreologiczne i ich zastosowanie praktyczne. Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Z 1–M/2007. ISSN 0011–4561. ISSN 1897–6328.
- [65] <http://www.gdp.pwr.edu.pl/pliki/iid/zp/Efektpiezoelektryczny.pdf>  
(dostęp 25.04.2020).
- [66] Krajewski T. „Zagadnienia fizyki dielektryków”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1970.
- [67] Antoniewicz J. „Własności dielektryków”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.
- [68] <http://www-old.wemif.pwr.wroc.pl/ndm/piezoelektryki.pdf> (dostęp 25.04.2020).  
Politechnika Wrocławska. Laboratorium Nowoczesna Diagnostyka Materiałowa. Materiały piezoelektryczne: pomiar prostego i odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego.
- [69] [https://www.piezomechanik.com/fileadmin/filestorage/Kataloge/de/PiezoDlomulti2011\\_1\\_\\_2014-04-27.pdf](https://www.piezomechanik.com/fileadmin/filestorage/Kataloge/de/PiezoDlomulti2011_1__2014-04-27.pdf) (dostęp 24.04.2020).
- [70] Randzionek R. Koncepcja, realizacja i analiza aktuatora piezoelektrycznego do sterowania położeniem fotela w samochodzie osobowym. Autoreferat rozprawy doktorskiej. Politechnika Gdańska. Wydział Elektrotechniki i automatyki. Gdańsk 2015.
- [71] Mark Budinger, "Contribution à la conception et la modélisation d'actionneurs piézoélectriques cylindriques à deux degrés de liberté de type rotation et translation," INPT - ENSEEIHT - LEEI, Toulouse, Thesis 2003.
- [72] Wolfram Wersing, Walter Heywang, and Karl Lubitz, Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology.: Springer Series in Materials Science, 2008.
- [73] Robert H. Bishop, The Mechatronics Handbook. Austin: The University of Texas, 2002.
- [74] Mirosław Dąbrowski, "Evolution of the theory and applications of ultrasonic motors," Prace Instytut Elektrotechniki, no. 12, pp. 33-45, 2001.

- [75] Gabriel Lippmann, *Principe de la conservation de l'électricité*. 1881.
- [76] "IEEE Standard on Piezoelectricity," *An American National Standard*. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.
- [77] Marek Krawczuk, Magdalena Palacz, and Żak Arkadiusz, *Materiały o sterowanych właściwościach fizycznych i ich zastosowania*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2009.
- [78] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming, *Piezoelectric Transducer for Vibration Control and Damping*. Springer, 2006.
- [79] Antonio Arnau Vives, *Piezoelectric Transducers and Applications*. Springer, 2008.
- [80] Wojciech Szłabowicz, "Contribution au dimensionnement et a la réalisation d'actionneur piézoeléctrique a rotation de mode fort coupe pour applications aéronautiques," INP-ENSEEIH-T-LEEI, Toulouse, Thesis 2006.
- [81] Stephenson D.J., Sun X., Zervos C.: A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission. School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, Cranfield, Bedford MK43 0AL, UK. *International Journal of Machine Tool & Manufacture* 46 (2006) 1053–1063. Received 16 June 2005; accepted 22 August 2005. Available online 12 October 2005.
- [82] T.W. Hwang, et al., Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride, *Ultrasonics* 38 (2000) 614–619.
- [83] W. Hundt, et al., An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique, *Annals of the ICRP* 43 (1) (1994) 295–298.
- [84] T.G. Bifano, Y. Yi, Acoustic emission as an indicator of materialremoval regime in glass micro-machining, *Precision Engineering* 14 (4) (1992) 219–228.
- [85] D. Dornfeld, H. Cai, An investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission, *Transactions of ASME* 106 (1984) 28–33.
- [86] <https://www.optotom.pl>.
- [87] <https://www.sensofar.com/metrology/technology/>.
- [88] Janusz Rakowiecki, *Podstawy metrologii*, „Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne”, 1974, s. 196.

- [89] Qinglong An, Weiwei Ming and Ming Chen: Experimental Investigation on Cutting Characteristics in Nanometric Plunge-Cutting of BK7 and Fused Silica Glasses. *Materials* 2015, 8, 1428-1441; doi:10.3390/ma8041428.
- [90] Aleksandr A.Dyakonov: Experimental analysis of ductile-brittle transitions for parallel and intersecting micro-slot grinding in BK-7 glass. *Ceramics International*. Volume 45, Issue 8, 1 June 2019, Pages 11013-110.
- [91] Chen Li, Feihu Zhang, Zhaokai Ma: Study on grinding surface deformation and subsurface damage mechanism of reaction-bonded SiC ceramics . First Published December 15, 2016 Research Article.
- [92] Anant Kumar Singh, Sunil Jha, Pulak M. Pandey: Performance Evaluation of Improved Ball End Magnetorheological Finishing Process..*World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. Vol:6, No:1, 2012.
- [93] Schulz K. „Projekt urządzenia mechatronicznego do realizacji precyzyjnego dosuwu w procesie obróbki materiałów trudno skrawalnych”. Praca magisterska. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2020.
- [94] Marth H., Piezo linear drive with a group of piezo actuator stacks as well as method for operating such a drive, *Physik Instrumente (PI)*, Karlsruhe, Niemcy, Opis patentowy, 10/166,660, Opubl. 12.06.2002.
- [95] Berberich P., Grinding machine, NAXOS-UNION, Langen, Niemcy, Opis patentowy 702,930. Opubl, 26.08.1996.
- [96] Musiał W., Kordowska M., Rogowska M.: „Budowa i analiza systemu nanodosuwu z wykorzystaniem komputerowych technik diagnostycznych”. *Mechanik* nr. 05/06/2016.
- [97] Musiał W., Kordowska M., Rogowska M.: Tytuł patentu: Sposób i urządzenie pomiarowe do precyzyjnego szlifowania, zwłaszcza za pomocą ściernicy elastycznej.
- [98] Marinescu Ioan D., Tonshoff Hans K., Inasaki Ichiro: *Handbook of ceramic grinding and polishing*”. Noyes Publications William Andrew Publishing, LLC. Norwich, New York, USA 1998. ISBN 0–8155–1424–7.
- [99] W. Weibull: A statistical Distribution Function of Wide Applicability. *J. Appl. Mechanics*, 18, 1951, 293-297.



- [100] J. Webster, W.P. Dong, R. Lindsay: Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process. *Annals of the CIRP*, vol. 45/1/1996.
- [101] H. Salmang, H. Scholze: *Keramik. Band 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1982.
- [102] J.P. Singh: Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramis: a review. *Adv. Ceram. Materials*, 3 (1988)1, 18-27.
- [103] S.W. Freiman: Brittle fracture behavior of ceramics. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 67(1988)2, 392-402.
- [104] J.P. Singh: Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramis: a review. *Adv. Ceram. Materials*, 3 (1988)1, 18-27.
- [105] K.E. Oczóś: Obróbka ubytkowa ceramiki technicznej. Cz. 1. Istota, znaczenie i zastosowanie ceramiki technicznej. *Mechanik* nr 1/1993, str. 5-13.
- [106] K.E. Oczóś: Obróbka ubytkowa ceramiki technicznej. Cz. 4. Obróbka ścierna spojonym ścierniwem(I). *Mechanik* nr 5-6/1993, str. 163-173.
- [107] K.E. Oczóś: *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 1996. ISBN 83-86705-62-0, str. 192-290.
- [108] H. O. Einsatzverhalten von Diamant in der Keramikbearbeitung, *IDR*, 24 (1990)2, 68-72; Diamond choise for ceramics machining, *Industrial Diamond Review*, 51 (1991)1, 10-13.
- [109] L. M. Sheppard: The challenges of ceramic machining. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 71(1992)11, 1590-1610.
- [110] K. Subramanian, S. Ramanath: Principles of abrasive machining. *Proc. Conf. „Fundamentals of machining ceramics”*, Springfield, 19-20 May 1992, 315-328.
- [111] K. Kitajima, G.Q. Cai, N. Kumagai, Y. Tanaka, H.W. Zheng: Study on mechanism of ceramics grinding. *Anm. CIRP*, 41(1992)1, 367-371.
- [112] B. Lawn, R. Wilshaw: Review identation fracture: principles and applications. *J. Mater. Sci.* 10(1976)6, 1049-1081.
- [113] A. A. Griffith: The phenomena of rapture nad flow in solids. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A221(1920), 163-198.
- [114] S. Malkin, J.E. Ritter: Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. *Trans. ASME, J. Eng. IND.*, 111(1989)2, 167-174.

- [115] T. G. Bifano, T. A. Dow, R. O. Scattergood: Ductile – regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 113(1991)2, 184-189.
- [116] Bi Zhang, T. D. Howes: Material – removal mechanisms in grinding ceramics. *Ann. CIRP*, 43 (1994)1, 305-308.
- [117] B.R. Lawn, D.B. Marshall: Hardness, toughness and brittleness: An indentation analysis. *Journal of the American Ceramic Society*, 62(1979)7/8, 347-350.
- [118] D.W. Richerson: Modern ceramic engineering – properties, processing, and use in design. Marcell Dekker Inc., New York 1992.
- [119] B.R. Lawn, D.B. Marshall: Hardness, toughness and brittleness: An indentation analysis. *Journal of the American Ceramic Society*, 62(1979)7/8, 347-350.
- [120] T.G. Bifano: Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials. PhD Thesis, NC State University, Raleigh, NC, 1988.
- [121] T.G. Bifano, T.A. Dow, R.O. Scattergood: Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 113(1991)2, 184-189.
- [122] Shaif Ullah, Alessandra Caggiano, Akihiko Kubo, M.A.K. Chowdhury: Elucidating Grinding Mechanism by Theoretical and Experimental Investigations. *MDPI Materials*, ISSN 1996-1944; CODEN: MATEG9, 2018, 1-2.
- [123] Zhong, Z.W.; Venkatesh, V.C. Recent developments in grinding of advanced materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2009, 41, 468–480.
- [124] Tamaki, J.; Kubo, A.; Sharif Ullah, A.M.M. Wear Characteristics of Nanopolycrystalline Diamond Tool in Cutting of Tungsten Carbide. *Int. J. Mechatron. Manuf. Syst.* 2014, 7, 227–245.
- [125] Gui, Y.; Zhao, J.; Chen, J.; Jiang, Y. Preparation and Characterization of Ni Spines Grown on the Surface of Cubic Boron Nitride Grains by Electroplating Method. *Materials* 2016, 9, 153.

## 11. SPIS RYSUNKÓW

<b>Rys. 2.1.</b> Granice dokładności obróbki [4] .....	17
<b>Rys. 2.2.</b> Dwie fazy obróbki materiałów kruchych a) faza plastycznego płynięcia, b) kruchego pęknięcia (1 – ziarno ściernie, 2 – usuwanie wiórów w fazie plastycznego płynięcia, 3 – faza plastycznego płynięcia, 4 – warstwa po obróbce skrawaniem w fazie plastycznego płynięcia, 5 – usuwanie wiórów w fazie kruchego pęknięcia, 6 – mikropęknięcia propagujące na $5\div 10\mu\text{m}$ (wyniki dla krzemu) [14] .....	19
<b>Rys. 2.3.</b> Test wgłębnika przeprowadzany dla materiałów kruchych w celu określenia granicy pomiędzy fazą plastyczną, a kruchym pękaniem (1 – rdzeń hydrostatyczny (czarny), 2 – strefa plastyczna (szara), 3 – elastyczna matryca (czarne strzałki)[12,20,21] .....	23
<b>Rys. 2.4.</b> Model procesu skrawania ukazujący krytyczną głębokość skrawania [12,19] ...	24
<b>Rys. 2.5.</b> Porównanie otrzymanych defektów oraz wiórów w procesie skrawania materiału kruchego: a) mała głębokość skrawania, b) duża głębokość skrawania [12,31] .....	25
<b>Rys. 2.6.</b> Morfologia i profile rowka w zależności od głębokości wnikania wierzchołka narzędzia: a) 272nm, b) 320nm, c) 800nm, d)2100nm [126] .....	28
<b>Rys. 2.7.</b> Obrazy SEM rysy ukształtowanej na powierzchni szkła w procesie mikroskrawania: a) w warunkach odkształceń plastycznych, b) w warunkach odkształceń plastyczne–kruche, c) w warunkach odkształceń kruchych [126] .... .....	29
<b>Rys. 2.8.</b> Wpływ głębokości mikroskrawania na postać odkształceń szkła na dnie rysy ukształtowanej ostrzem diamentowym przy prędkości skrawania 300 mm/min [126] .....	29
<b>Rys. 2.9.</b> Elementy oddziałujące na proces szlifowania [122] .....	31
<b>Rys. 2.10.</b> Model warstwy wierzchniej materiału kruchego (szkło, ceramika) po szlifowaniu [107] .....	32
<b>Rys. 2.11.</b> Cztery tryby szlifowania: a) faza krucha, b) faza półkrucha, c) faza półplastyczna, d) faza plastyczna [12,46] .....	33

<b>Rys. 2.12.</b> Wpływ głębokości szlifowania szkła BK7 na postać odkształceń w strefie obróbki [90] .....	35
<b>Rys. 2.13.</b> Widok powierzchni szkła optycznego BK7 po szlifowaniu ze wzrastającą prędkością posuwu [90] .....	36
<b>Rys. 2.14.</b> Schemat zachowania się cząstek cieczy MR w układzie bez pola magnetycznego ( $B=0$ ) i z polem magnetycznym ( $B>0$ ) [92] .....	37
<b>Rys. 2.15.</b> Wpływ pola magnetycznego na kształtowanie się cieczy MRF: a) przed włączeniem pola magnetycznego, b) po jego włączeniu, c) podczas kontaktu z obrabianą soczewką szklaną [92] .....	37
<b>Rys. 2.16.</b> Schemat strefy obróbki z zastosowaniem cieczy magneto–reologicznej [92] ..	38
<b>Rys. 2.17.</b> Urządzenie do polerowania soczewek z zastosowaniem cieczy MRF: a) schemat budowy, b) widok strefy obróbki [92] .....	39
<b>Rys. 2.18.</b> Mechanizm usuwania nierówności powierzchni w procesie polerowania cieczą MRF: a) etap pierwszy, b) etap drugi, c) etap trzeci [92] .....	40
<b>Rys. 2.19.</b> Zmiany chropowatości powierzchni szkła w funkcji czasu polerowania cieczą magneto–reologiczną [92] .....	40
<b>Rys. 2.20.</b> Powierzchnia szkła optycznego: a) po szlifowaniu, b) po wygładzaniu cieczą magneto–reologiczną [92] .....	41
<b>Rys. 2.21.</b> Zmiany chropowatości powierzchni szkła w funkcji czasu polerowania cieczą magneto–reologiczną: a) profil powierzchni wyjściowej, b) profil powierzchni po wygładzaniu cieczą MRF [92] .....	41
<b>Rys. 2.22.</b> Zobrazowanie a) efekt piezoelektryczny, odwrotny efekt piezoelektryczny [93] .....	44
<b>Rys. 2.23.</b> Prostokątny układ współrzędnych który przedstawia tryby pracy materiału piezoelektrycznego [80,93] .....	44
<b>Rys. 2.24.</b> Przykładowe siłowniki piezoelektryczne [88] .....	47
<b>Rys. 2.25.</b> Liniowy napęd z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – człon ruchowy napędu; 2 – moduły napędowe; 3 – prowadnice liniowe członu ruchomego [93,94] .....	47
<b>Rys. 2.26.</b> Schemat modułu napędowego urządzenia składającego się ze stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – podstawa modułu; 2 – pojedyncza grupa	

stosów piezoelektrycznych; 3 – stopy dociskające; 4 – stopy dosuwowe; 5 – płyta kontaktowa; 7 – styki elektryczne [93,94] .....	48
<b>Rys. 2.27.</b> Budowa maszyny szlifującej wzbogacona o sterowanie z zastosowaniem stosów piezoelektrycznych. Budowa: 1 – szlifierka; 2 – korpus szlifierki; 3 – wał szlifierski; 4 – ściernica; 5 – przedmiot obrabiany; 6 – łożysko pozycjonujące wał; 8 – wewnętrzna część łożyska; 9 – zewnętrzna część łożyska; 10 – element podporowy wału; 11 – sprężyna dociskowa; 12 – aktuator piezoelektryczny; 13 – źródło zasilania; 14 – wzmacniacz; 15 – system pomiarowy; 16 – wzmacniacz sygnału pomiarowego; 17, 17' – czujniki pomiarowe [93,95] .....	49
<b>Rys. 2.28.</b> Urządzenie przeznaczone do precyzyjnego pomiaru narzędzi elastycznych. Zasada działania polega na wykorzystaniu odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego. Budowa: 1 – belka nośna, 2 – belka wewnętrzna, 3 – elementy sprężyste, 4 – stos piezoelektryczny, 5 – czujnik emisji akustycznej, 6 – wymienna głowica pomiarowa [96,97] .....	50
<b>Rys. 4.1.</b> Porównawcza charakterystyka siły do naprężenia dla materiałów kruchych i metali [98] .....	60
<b>Rys. 4.2.</b> Rozkład częstości występowania naprężenia pęknięcia w materiałach kruchych w porównaniu z materiałami metalowymi [99,100] .....	61
<b>Rys. 4.3.</b> Model obrazujący teorię Griffithsa, opisujący spiętrzenie naprężeń wywołane działaniem karbu w materiale kruchym poddanym rozciąganiu [103÷105] ....	62
<b>Rys. 4.4.</b> Model strefy odkształcenia plastycznego oraz kruchego pęknięcia z rodzajami pęknięć materiału kruchego powstających na skutek: a) wciskania wgłębnika, b) zarysowania ziarnem ściernym pod obciążeniem normalnym ( $F_n$ ); R – pęknięcia promieniowe o wymiarze ( $a_R$ ), P – pęknięcia poprzeczne o wymiarze ( $a_P$ ) [107] .....	63
<b>Rys. 4.5.</b> Przykład możliwości opracowania korelacji pomiędzy głębokością pochodzącą z wylczenia, głębokością pomiaru dla wgłębnego szlifowania, na granicy zmiany fazy plastyczny–kruchy (zobrazowana względem wielkości ( $E/H$ )( $K_c/H$ ) <sup>2</sup> ) [120,121] .....	68
<b>Rys. 5.1.</b> Schemat badań dla mikro– i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym (etap 1) .....	70

<b>Rys. 5.2.</b> Schemat kinematyczny badania mikro – i nanoskrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym osadzonym na tarczce obracającej się z prędkością obrotową ( $n$ ), przemieszczającej się względem szklanej płytki z posuwem ( $f$ ), zamocowanej pod kątem ( $\alpha$ ) do kierunku posuwu.....	71
<b>Rys. 5.3.</b> Metodyka badań procesu mikro – i nanoskrawania pojedynczym diamentowym (etap 1) .....	72
<b>Rys. 5.4.</b> Schemat badań dla mikro– i nanoszlifowania ściernicą diamentową (etap 2) ....	73
<b>Rys. 5.5.</b> Schemat kinematyczny badania mikro– i nanoszlifowania ściernicą diamentową obracającą się z prędkością obrotową ( $n$ ), przemieszczającej się względem szklanej płytki z posuwem ( $f$ ), oraz dosuwem ( $a_p$ ) .....	73
<b>Rys. 5.6.</b> Metodyka badań procesu mikro– i nanoszlifowania ściernicą diamentową.....	74
<b>Rys. 5.7.</b> Schemat badań mikro– i nanowygładzania przy wykorzystaniu cieczy magneto–reologicznej .....	75
<b>Rys. 5.8.</b> Schemat kinematyczny badań z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym .....	75
<b>Rys. 5.9.</b> Metodyka badań z wykorzystaniem cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym.....	76
<b>Rys. 5.10.</b> Pełny schemat metodyki badań.....	77
<b>Rys. 5.11.</b> Schemat układu kinematycznego procesu mikro– i nanoskrawania na szkle interferencyjnym (badania wstępne) .....	78
<b>Rys. 5.12.</b> Schemat układu kinematycznego procesu mikro- i nanoskrawania na szkle sodowym (badania zasadnicze) .....	79
<b>Rys. 5.13.</b> Przykładowe kształty śladów mikro– i nanoskrawania pojedynczym ziarnem ściernym.....	79
<b>Rys. 5.14.</b> Przykładowy widok rysy wraz z przekrojami poprzecznymi .....	80
<b>Rys. 5.15.</b> Przykładowy obraz SEM rysy ze strefa przejściową między stanem odkształceń plastycznych i kruchego pękania .....	81
<b>Rys. 5.16.</b> Metodyka badań procesu mikro– nanoskrawania materiałów szklanych pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym .....	82
<b>Rys. 5.17.</b> Widok rzeczywisty ziaren skrawających (pow. x100) .....	84
<b>Rys. 5.18.</b> Widok krawędzi skrawających ziaren (pow. x100) .....	85



<b>Rys. 5.19.</b> Tarcza z zamocowanym ziarnem ściernym: a) widok rzeczywisty, b) rysunek 2D z wymiarami .....	85
<b>Rys. 5.20.</b> Widok ziaren ściernych zamocowanych na powierzchni czołowej tarczy .....	86
<b>Rys. 5.21.</b> Frezarka numeryczna CNC OKUMA Genos M560R–V.....	87
<b>Rys. 5.22.</b> Uchwyt mocujący próbki ze szkła interferencyjnego: a) model trójwymiarowy b) widok uchwytu wraz z zamocowaną próbką badawczą ze szkła interferencyjnego .....	88
<b>Rys. 5.23.</b> Widok uchwytu kąтового wraz z zamocowanym szkłem interferencyjnym na frezarce numerycznej CNC OKUMA Genos M560R-V .....	88
<b>Rys. 5.24.</b> Uchwyt do mocowania i kątovej orientacji badanych próbek w badaniach zasadniczych.....	89
<b>Rys. 5.25.</b> Metody pomiarowe dostępne w profilometrze optyczny firmy Sensofar [86,87] .....	90
<b>Rys. 5.26.</b> Profilometr optyczny firmy Sensofar.....	91
<b>Rys. 5.27.</b> Przykładowy moment inicjacji rysy powstałej w procesie nanoskrawania: a) widok ogólny, b) miejsca analizowanych przekroi poprzecznych, c) przekrój poprzeczny rysy .....	91
<b>Rys. 5.28.</b> Mikroskop skaningowy Jeoll 512JEOL Jsm–5500LV .....	93
<b>Rys. 5.29.</b> Obraz skaningowy mikrorysy otrzymanej w procesie mikro– i nanoskrawania próbki szklanej pojedynczym ziarnem diamentowym .....	94
<b>Rys. 5.30.</b> Sposób pomiaru sygnału emisji akustycznej z zastosowaniem mikrofonu pomiarowego na frezarceki numerycznej CNC OKUMA Genos M560R–V ....	95
<b>Rys. 5.31.</b> Zdjęcia przedstawiające a) widok zespołu rys powstających w ustabilizowanych warunkach, b) symetryczne przebiegi sygnału emisji akustycznej .....	96
<b>Rys. 5.32.</b> Sposób wyodrębniania pojedynczych rys z obszaru pomiarowego.....	96
<b>Rys. 5.33.</b> Etapy procesu analizy rys przy wykorzystaniu oprogramowanie MountainsLab Premium 8.0.....	97
<b>Rys. 5.34.</b> Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkłe interferencyjnym .....	99

<b>Rys. 5.35.</b> Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkłe interferencyjnym.....	100
<b>Rys. 5.36.</b> Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkłe sodowym (etap 1) .....	101
<b>Rys. 5.37.</b> Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkłe sodowym (etap 1) .....	102
<b>Rys. 5.38.</b> Przykładowe wartości głębokości pojedynczej rysy wykonanej na szkłe sodowym (etap 2) .....	103
<b>Rys. 5.39.</b> Zestawienie uzyskanych wyników głębokości analizowanych rys wykonanych na szkłe sodowym (etap 2) .....	103
<b>Rys. 5.40.</b> Etapy procesu analizy rys przy wykorzystaniu oprogramowanie MountainsLab Premium 8.0.....	104
<b>Rys. 5.41.</b> Podstawowe stany odkształceń występujące na powierzchni rysy w procesie mikro– i nanoskrawania materiału szklanego .....	105
<b>Rys. 5.42.</b> Strefy rys poddane analizie i ocenie za pomocą profilometru optycznego i mikroskopu skaningowego .....	106
<b>Rys. 5.43.</b> Widok rys poddanych szczegółowej analizie .....	106
<b>Rys. 5.44.</b> Rysa 1: a)widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów .....	107
<b>Rys. 5.45.</b> Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie .....	108
<b>Rys. 5.46.</b> Rysa 1 inicjacja zagłębienia, pełna faza plastyczna: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny, c) identyfikacja defektów w programie Image–Pro Plus .....	109
<b>Rys. 5.47.</b> Rysa 1 dalszy rozwój rysy faza plastyczna, poszerzenie śladu i pojawienie się regularnych pęknięć o malej intensywności: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny.....	110
<b>Rys. 5.48.</b> Rysa 1 dalszy rozwój rysy: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny .....	111
<b>Rys. 5.49.</b> Rysa 1 przejście pracy ziarna z plastycznego płynięcia materiału w fazę kruchego pęknięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ...	112

- Rys. 5.50.** Rysa 1 przejście pracy ziarna z plastycznego płynięcia materiału w fazę kruchego pęknięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ... 113
- Rys. 5.51.** Rysa 1 obrazuje fazę plastyczną (strona prawa) i przerywaną fazę kruchego pęknięcia po lewej stronie: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ..... 114
- Rys. 5.52.** Rysa 1 w fazie plastycznej (strona prawa) oraz z przerywaną fazą kruchego pęknięcia (lewa strona), pojawiające się pęknięcia podpowierzchniowe (lewa strona): a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny..... 115
- Rys. 5.53.** Rysa 1 w fazie kruchego pęknięcia z wyraźnymi pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus ..... 116
- Rys. 5.54.** Rysa 1 w fazie kruchego pęknięcia z wyraźnymi pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus ..... 117
- Rys. 5.56.** Rysa 1 w momencie wyciszania fazy kruchego pęknięcia i płynnego przechodzenia w fazę plastyczną..... 117
- Rys. 5.57.** Rysa 1 w fazie przejściowej w momencie wychodzenia ziarna ściernego ze strefy obróbki a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ..... 118
- Rys. 5.58.** Rysa 1 zakończenie pracy ziarna a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ..... 119
- Rys. 5.59.** Rysa 2: a) widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów ..... 119
- Rys. 5.60.** Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie ..... 120
- Rys. 5.61.** Rysa 2 widok inicjacji procesu mikro- i nanoskrawania: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ..... 121
- Rys. 5.62.** Rysa 2 widok inicjacji procesu mikro- i nanoskrawania: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny ..... 122
- Rys. 5.63.** Rysa 2 widok przejścia między fazami plastyczną, a kruchą ..... 123
- Rys. 5.64.** Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej ..... 123
- Rys. 5.65.** Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej z defektami ..... 124

<b>Rys. 5.66.</b> Rysa 2 widok pełnego spektrum defektów charakterystycznych dla fazy kruchego pęknięcia, będącej już fazą destrukcji powierzchni szklanej: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus.....	125
<b>Rys. 5.67.</b> Rysa 2 widok pełnej fazy kruchej z defektami po przejściu granicznej głębokości: a) widok główny poddany edycji, b) identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus .....	126
<b>Rys. 5.68.</b> Rysa 2 obrazująca wychodzenie ziarna ściernego z przestrzeni .....	127
<b>Rys. 5.69.</b> Rysa 2 zakończenie procesu (faz plastyczna) .....	128
<b>Rys. 5.70.</b> Rysa 2: a) widok rysy wraz z zaznaczonymi miejscami położenia kolejnych przekrojów, b) wykres z głębokościami pochodzącymi z przekrojów .....	128
<b>Rys. 5.71.</b> Zbiór kolejnych przekrojów rys zarejestrowanych w początkowym jej fragmencie .....	129
<b>Rys. 5.72.</b> Rysa 3 moment inicjacji i faza plastycznego płynięcia: a) widok główny poddany edycji, b) widok oryginalny .....	130
<b>Rys. 5.73.</b> Rysa 3 obrazująca fazę kruchego pęknięcia .....	131
<b>Rys. 5.74.</b> Rysa 3 obrazująca całkowitą degradację struktury materiału .....	132
<b>Rys. 5.75.</b> Rysa 3 faza kruchego pęknięcia.....	133
<b>Rys. 5.76.</b> Rysa 3 zmniejszanie głębokości wnikania ziarna ściernego.....	134
<b>Rys. 5.77.</b> Rysa 3 zakończenie śladu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym .....	134
<b>Rys. 5.78.</b> Obraz skaningowy mikro- i nanowiórków otrzymanych w procesie mikro- i nanoskrawania materiału kruchego pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym.....	135
<b>Rys. 5.79.</b> Obraz skaningowy mikro- i nanowiórków otrzymanych w procesie mikro- i nanoskrawania materiału kruchego pojedynczym ziarnem diamentowym...	137
<b>Rys. 5.80.</b> Przebieg rysy w fazie plastycznego płynięcia materiału wraz z pojawiającymi się mikrowiórami.....	138
<b>Rys. 5.81.</b> Fragment rysy z mechanizmem plastycznego usuwania materiału (prawa strona rysy) oraz pojawiającymi się poprzecznymi pęknięciami (lewa strona rysy) wraz z mikrowykruszeniami.....	140

<b>Rys. 5.82.</b> Faza kruchego pęknięcia wraz z pęknięciami podpowierzchniowymi po obu stronach rysy, identyfikacja defektów w programie Image-Pro Plus .....	141
<b>Rys. 5.83.</b> Początek fazy kruchego pęknięcia .....	141
<b>Rys. 5.84.</b> Faza kruchego pęknięcia materiału szklanego .....	142
<b>Rys. 5.85.</b> Granice wyznaczonych faz określających odkształcenia materiału w strefie obróbki wzdłuż początkowej drogi ziarna podczas mikro- i nanoskrawania materiałów kruchych .....	143
<b>Rys. 5.86.</b> Model rysy stworzony na podstawie obrazów skaningowych otrzymanych podczas procesu mikro- i nanoskrawania pojedynczym ziarnem diamentowym, ukazujący analizę przemieszczania materiału kruchego w strefie obróbki .....	143
<b>Rys. 5.87.</b> Schemat układu kinematycznego procesu mikro- i nanoszlifowania .....	147
<b>Rys. 5.88.</b> Centrum obróbkowe 3-osiowe WEMAS VZ 1250-Quick .....	147
<b>Rys. 5.89.</b> Widok rzeczywisty dwóch ściernic diamentowych D126 oraz D54 .....	148
<b>Rys. 5.90.</b> Model uchwytu do mocowania próbek szklanych w procesie mikro- i nanoszlifowania .....	149
<b>Rys. 5.91.</b> Graficzna charakterystyka struktury geometrycznej szlifowanych powierzchni: a) mapa konturowa, b) krzywa udziału materiałowego, c) izotropia .....	150
<b>Rys. 5.92.</b> Przykładowy profil powierzchni materiału szklanego po procesie mikroszlifowania .....	150
<b>Rys. 5.93.</b> Widok mikroskopowy SEM powierzchni materiału szklanego w momencie inicjacji procesu mikro- i nanoszlifowania .....	151
<b>Rys. 5.94.</b> Metodyka badań procesu mikro- i nanoszlifowania materiału szklanego ściernicami z ziarnami diamentu syntetycznego .....	152
<b>Rys. 5.95.</b> Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,05\text{mm}$ , $n=1800\text{obr/min}$ , $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie x1000 .....	154
<b>Rys. 5.96.</b> Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,15\text{mm}$ , $n=1800\text{obr/min}$ , $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie x1000 .....	154

- Rys. 5.97.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D126 ( $a_p=0,15\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie x1000 ..... 155
- Rys. 5.98.** Graficzna prezentacja powierzchni tzw. mapa konturowa (widok w pseudokolorach) widok 3D; przedstawiający powierzchnię po szlifowania płytki szklanej ściernicą diamentową **D126**. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{\text{const}}=1800\text{obr/min}$   $f_{\text{const}}=100\text{mm/min}$ : a) profile chropowatości powierzchni, b) mapa konturowa, c) parametry topografii powierzchni..... 156
- Rys. 5.99.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni), b) krzywa Abbotta-Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126 w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{\text{const}}=1800\text{obr/min}$   $f_{\text{const}}=100\text{mm/min}$  ..... 156
- Rys. 5.100.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$  ..... 157
- Rys. 5.101.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$  ..... 158
- Rys. 5.102.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 158
- Rys. 5.103.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D126 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 159
- Rys. 5.104.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D54 ( $a_p=0,05\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ) powiększenie x1000..... 160



- Rys. 5.105.** Graficzna prezentacja powierzchni tzw. mapa konturowa (widok w pseudokolorach) widok 3D; przedstawiający powierzchnię po szlifowaniu płytki szklanej ściernicą diamentową D54. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr}/\text{min}$   $f_{const}=100\text{mm}/\text{min}$ : a) profile chropowatości powierzchni, b) mapa konturowa, c) parametry topografii powierzchni..... 161
- Rys. 5.106.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta-Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D54 w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Głębokość obróbki 0,05mm. Parametry obróbki:  $s_{const}=1800\text{obr}/\text{min}$   $f_{const}=100\text{mm}/\text{min}$ ..... 162
- Rys. 5.107.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$
- Rys. 5.108.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,05\text{mm}$  ..... 162
- Rys. 5.109.** Widok powierzchni obrabianej z widocznymi efektami kruchego pęknięcia płytki szklanej po szlifowaniu ściernicą diamentową D54 ( $a_p=0,15\text{mm}$ ,  $n=1800\text{obr}/\text{min}$ ,  $v_f=100\text{mm}/\text{min}$ ) powiększenie x1000..... 163
- Rys. 5.110.** Rozkłady wartości poszczególnych parametrów profili chropowatości powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 163
- Rys. 5.111.** Wartości wskaźników izotropii struktury geometrycznej powierzchni materiału szklanego w kolejnych seriach badań procesu szlifowania materiału szklanego w kolejnych seriach badań dla szlifowania ściernicą diamentową D54 i dosuwu narzędzia  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 164
- Rys. 5.112.** Inicjacja procesu mikroszlifowania ściernicą diamentową D126..... 166
- Rys. 5.113.** Inicjacja procesu mikroszlifowania ściernicą diamentową D126..... 168

- Rys. 5.114.** Stanowisko badawcze do polerowania szkła z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym: a) widok rzeczywisty, b) schemat kinematyczny ..... 172
- Rys. 5.115.** Metodyka badań procesu polerowania materiałów szklanych o zdefektowanej strukturze po obróbkowej ..... 174
- Rys. 5.116.** Stanowisko badawcze wyposażone w mikroskop optyczny wraz z komputerem służącym do akwizycji danych ..... 175
- Rys. 5.117.** Obraz mikroskopowy rys (x100): a) przed procesem (zdjęcia referencyjne) polerowania b) po procesie polerowania ..... 176
- Rys. 5.118.** Obraz mikroskopowy rys po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną (x100) ..... 177
- Rys. 5.119.** Stanowisko badawcze wyposażone w profilometr Homelwerke 800 wraz z komputerem służącym do akwizycji danych wyposażonym w oprogramowanie MountainsLab ..... 178
- Rys. 5.120.** Geometria struktury powierzchni szklanej po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=10h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ ) po realizacji wstępnego skrawania pojedynczym diamentowym ziarnem ściernym: a) widok 2D, b) widok 3D ..... 178
- Rys. 5.121.** Profile chropowatości powierzchni ( $t=10h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ ) ..... 179
- Rys. 5.122.** Obrazy mikroskopowe powierzchni materiału szklanego: a) po szlifowaniu ściernicą diamentową przed procesem (zdjęcia referencyjne, b) po wygładzaniu z zastosowaniem cieczy magneto-reologicznej (x100) ..... 180
- Rys. 5.123.** Obrazy mikroskopowe powierzchni materiału szklanego; a) po szlifowaniu ściernicą diamentową, b) po przeprowadzeniu procesu polerowania z wykorzystaniem cieczy magneto-reologicznej (x100) ..... 180
- Rys. 5.124.** Stanowisko badawcze wyposażone w profilometr Talysurf CLI 2000 wraz z komputerem służącym do akwizycji danych wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie ..... 181
- Rys. 5.125.** Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto-reologiczną ( $t=6h$ ,  $n=400obr/min$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym

- szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni ..... 181
- Rys. 5.126.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta–Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126  $a_p=0,15\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $s_{\text{const}}=1800\text{obr/min}$   $f_{\text{const}}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6\text{h}$  ..... 182
- Rys. 5.127.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$  oraz  $t=10\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 183
- Rys. 5.128.** Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,05\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni ..... 184
- Rys. 5.129.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta–Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D126  $a_p=0,05\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $s_{\text{const}}=1800\text{obr/min}$   $f_{\text{const}}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6\text{h}$  ..... 184
- Rys. 5.130.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$  oraz  $t=10\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości  $a_p=0,05\text{mm}$  ..... 186
- Rys. 5.131.** Struktura geometryczna powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6\text{h}$ ,  $n=400\text{obr/min}$ ,  $I=120\text{V}$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$ : a) widok 2D, b) parametry chropowatości powierzchni ..... 186
- Rys. 5.132.** Graficzna prezentacja: a) kierunek struktury powierzchni (izotropowość powierzchni, b) krzywa Abbotta–Firestone’a materiału szklanego po szlifowaniu ściernicą o wielkości ziaren D54  $a_p=0,15\text{mm}$  w warunkach kruchych odkształceń w strefie obróbki. Parametry obróbki:  $s_{\text{const}}=1800\text{obr/min}$   $f_{\text{const}}=100\text{mm/min}$  i polerowaniu  $t=6\text{h}$  ..... 187

- Rys. 5.133.** Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6h$  oraz  $t=10h$ ,  $n=400\text{obr}/\text{min}$ ,  $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości  $a_p=0,15\text{mm}$  ..... 188
- Rys. 5.135.** Wstępna koncepcja projektu urządzenia do wygładzania płytek szklanych w cieczy magneto–reologicznej pracującej w polu elektromagnetycznym w celu intensyfikacji procesu ..... 193
- Rys. 5.134.** Schemat ultra precyzyjnego procesu obróbki szkła ..... 197

## 12. SPIS TABEL

<b>Tabl. 4.1.</b> Porównanie właściwości materiałów – stal i szkło; (odkształcenie – pękanie) [118,119] .....	66
<b>Tabl. 5.1.</b> Zakres zastosowania pojedynczych ziaren ściernych w programie badań rozpoznawczych i badań zasadniczych .....	86
<b>Tabl. 5.2.</b> Charakterystyka techniczna frezarki numerycznej OKUMA Genos M560R–V .....	87
<b>Tabl. 5.3.</b> Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle interferencyjnym .....	99
<b>Tabl. 5.4.</b> Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle sodowym (etap 1) .....	101
<b>Tabl. 5.5.</b> Zestawienie zarejestrowanych parametrów dla wybranych rys wykonanych na szkle sodowym (etap 2) .....	102
<b>Tabl. 5.6.</b> Charakterystyka techniczna frezarki numerycznej WEMAS VZ 1250–Quick .... .....	148
<b>Tabl. 5.7.</b> Charakterystyka ściernic diamentowych D126 oraz D54 .....	148
<b>Tabl. 5.8.</b> Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6h$ oraz $t=10h$ , $n=400obr/min$ , $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości $a_p=0,15mm$ .....	183
<b>Tabl. 5.9.</b> Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6h$ oraz $t=10h$ , $n=400obr/min$ , $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D126 na głębokości $a_p=0,05mm$ .....	185
<b>Tabl. 5.10.</b> Wartości topografii powierzchni materiału szklanego po wygładzeniu cieczą magneto–reologiczną ( $t=6h$ oraz $t=10h$ , $n=400obr/min$ , $I=120V$ ) po wstępnym szlifowaniu ściernicą diamentową D54 na głębokości $a_p=0,15mm$ .....	187

## 13. STRESZCZENIE

Praca doktorska prezentuje zagadnienia związane z mikro- i nanobróbką szkła, które należy do grupy materiałów kruchych. Szkło w obecnych czasach jest powszechnie stosowane w przemyśle, jak i w życiu codziennym. W ostatnich latach ultra precyzyjna obróbka szkła jest prężnie rozwijana, a zapotrzebowanie na elementy wykonane przy jej zastosowaniu ciągle rośnie.

Wobec powyższego, podjęto badania, w celu analizy przemieszczania materiału szklanego w procesie mikro- i nanoskrawania pojedynczymi ziarnami diamentu oraz procesu szlifowania z zastosowaniem ściernic zbudowanych na bazie tego typu ziaren. Celem badań, było opracowanie podstaw do identyfikacji warunków, przy których zachodzi niepożądany mechanizm kruchego pęknięcia materiałów szklanych. Wynikiem realizowanej pracy jest opracowanie doświadczalnych podstaw do prowadzenia procesu technologicznego obróbki materiałów szklanych w taki sposób, aby kontrolować i minimalizować mechanizm kruchego pęknięcia, z możliwością dominacji mechanizmu plastycznych odkształceń w strefie obróbki.

Dodatkowo przeprowadzono próby sprawdzające, czy analizowane procesy mikro- i nanoobróbki jednoostrzowej, będą miały przełożenie i możliwości zastosowania w obróbce narzędziami wieloostrowymi. To z aplikacyjnego punktu widzenia, ma istotne znaczenie w praktyce technologicznej, by procesy skrawania materiałów szklanych prowadzone były w warunkach plastycznego płynięcia materiału w strefie obróbki i zapewniały powtarzalne wyniki obróbki.

W kolejnych etapach proces szlifowania postawiono przeprowadzić w warunkach kruchego pęknięcia, stosując dosuw wykraczający ponad granice plastycznej obróbki materiału szklanego, a było to podyktowane kolejnym etapem badawczym sprawdzającym możliwość cofnięcia defektów powstałych w skutek fazy kruchego pęknięcia, przy wykorzystaniu cieczy magneto-reologicznej o określonej charakterystyce pracującej w polu elektromagnetycznym.

Dostrzeżona możliwość wykorzystania cieczy magneto-reologicznej, pozwoliła na wygładzenie struktury powierzchni i warstwy skrawanej powstałej w procesie mikro- i nanoobróbki. Taki sposób obróbki może zapewnić minimalizację defektów na powierzchni i w warstwie wierzchniej obrabianego materiału. Jednocześnie umożliwiając kształtowanie



geometrii w sposób zdeterminowany wymiarowo w sposób jednoznaczny i o złożonym kształcie.

Przeprowadzone badania oraz analizy pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych będących potwierdzeniem hipotezy postawionych w rozprawie doktorskiej.

## 14. SUMMARY

The doctoral thesis presents issues related to the micro- and nano-processing of glass, which belongs to the group of brittle materials. Nowadays, glass is widely used in industry and in everyday life. In recent years, ultra-precise glass processing has been dynamically developed, and the demand for elements made with its use is constantly growing.

In view of the above, research was undertaken to analyze the movement of glass material in the process of micro- and nano-cutting with single diamond grains and the grinding process with the use of grinding wheels built on the basis of this type of grain. The aim of the research was to develop the basis for identifying the conditions under which the undesirable mechanism of brittle fracture of glass materials occurs. The result of the work is the development of experimental foundations for the technological process of processing glass materials in such a way as to control and minimize the mechanism of brittle fracture, with the possibility of the domination of the plastic deformation mechanism in the processing zone.

In addition, tests were carried out to check whether the analyzed micro- and nano-single-edge machining processes would translate and could be used in machining with multi-edge tools. From the application point of view, it is important in technological practice that the cutting processes of glass materials are carried out under the conditions of plastic flow of the material in the processing zone and ensure reproducible machining results.

In the next stages, the grinding process was to be carried out in brittle fracture conditions, using the infeed exceeding the limits of plastic processing of the glass material, and this was dictated by the next research stage checking the possibility of withdrawing defects resulting from the brittle fracture phase, using a magneto-rheological fluid with specific working characteristics in an electromagnetic field.

The perceived possibility of using magneto-rheological fluid allowed to smooth the surface structure and the cut layer formed in the micro- and nano-machining process. Such a treatment method can minimize defects on the surface and in the top layer of the processed material. At the same time, it enables the geometry to be shaped in a dimensionally determinate manner, unambiguously and with a complex shape.

The conducted research and analyzes allowed for the formulation of final conclusions confirming the hypothesis put forward in the doctoral dissertation.