

Hybrydowe technologie w wytwarzaniu narzędzi do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych

Raport z projektu pt.: Mikrohydrauliczne narzędzie do nagniatania wykończeniowego powierzchni 3D na centrach obróbkowych – część 1

Szczecin 2016

Spis treści

1	Zapotrzebowanie na produkcję narzędzi w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych	3
1.1	Zapotrzebowanie rynku krajowego na narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych..	3
1.2	Zapotrzebowanie na narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych w Europie	6
1.3	Europejski rynek przetwórstwa tworzyw sztucznych	7
2	Technologie i narzędzia do produkcji narzędzi w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych	9
2.1	Hybrydowe technologie kształtowania powierzchni części	9
2.2	Mikrohydrauliczne narzędzia do nagniatania powierzchni.....	9
3	Obróbka przez frezowanie i nagniatanie na twardo	11
4	Zmiany struktury geometrycznej powierzchni i stopnia izotropowości.....	13
4.1	Badania zmiany stanu struktury powierzchni	15
4.2	Zmiany stopnia izotropii powierzchni	16
5	Podsumowanie i wnioski	20

1 Zapotrzebowanie na produkcję narzędzi w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych

Opisując rynek opakowań, jego rozmiary, strukturę i zachodzące zmiany, trzeba pamiętać – w szczególności przy porównaniach z rynkami w innych krajach - iż rynek ten jest ściśle powiązany z poziomem rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego danego kraju lub regionu. Im bardziej rozwinięty gospodarczo jest kraj oraz odpowiadający temu poziom zamożności jego obywateli, tym większy i bogatszy jest rynek opakowań, wyrażany ilością zużytych opakowań, tak w obrocie towarowym, jak i w gospodarstwach domowych

1.1 Zapotrzebowanie rynku krajowego na narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych

Na podstawie: „Rynek opakowań w Polsce w 2009 r.” (rok pub. 2009 - Plastech). Można zauważyć coraz wyższą dynamikę rozwoju na rynku opakowań produkowanych z tworzyw sztucznych

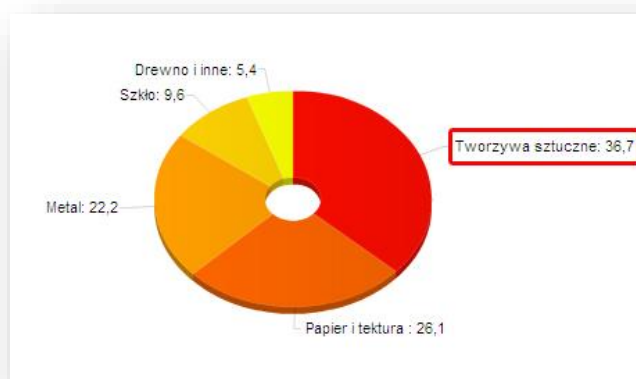
Tabela 1.1. Dynamika sprzedaży opakowań w latach 1995-2000.

Lata	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Dynamika [%]	100	126,9	157,7	184,6	211,5	238,6

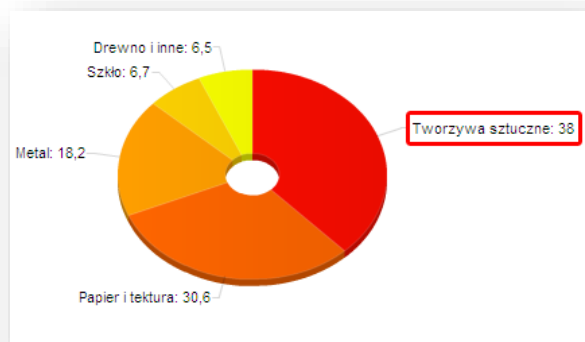
Dzięki tak wysokiej dynamice rozwoju rynku opakowań w 2000 r. zużycie opakowań w Polsce wynosiło ok. 70 euro per capita, osiągając wartość ok. 110 euro w 2008 r.

Tabela 1.2. Zużycie opakowań w Polsce w ujęciu wartościowym w latach 1995-2008.

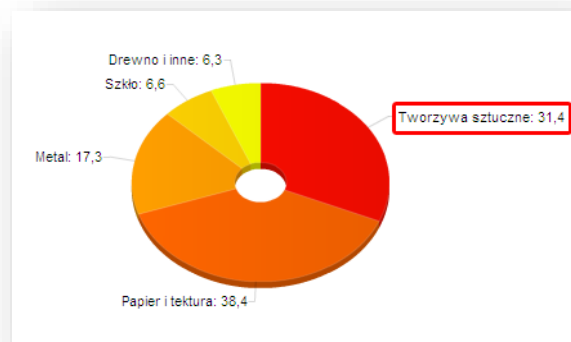
Lata	1995	2000	2005	2008
zużycie ogółem [mld euro]	1,42	2,64	3,64	4,18
zużycie per capita [euro]	37,2	69,1	95,5	109,4
udział w rynku światowym [%]	0,62	0,83	0,96	1,03



Rysunek 1.1. Struktura rynku opakowań w Polsce z punktu widzenia wykorzystanego materiału konstrukcyjnego.



Rysunek 1.2. Struktura rynku opakowań w Europie z punktu widzenia wykorzystanego materiału konstrukcyjnego.



Rysunek 1.3. Struktura rynku opakowań na świecie z punktu widzenia wykorzystanego materiału konstrukcyjnego

Również z punktu widzenia przeznaczenia opakowań, struktura krajowego rynku opakowań nie odbiega znacząco od struktury rynku wysoko rozwiniętych krajów Europy Zachodniej. *Na podstawie „Przemysł tworzyw sztucznych w Polsce” (rok pub. 2011 - PlasticsEurope)*. Branżę tworzyw sztucznych w Polsce tworzą producenci tworzyw sztucznych, producenci mieszanek i kompozytów (komponenty), przetwórcy tworzyw (wytwórcy wyrobów rynkowych z tworzyw sztucznych), a także producenci maszyn do przetwórstwa tworzyw. Do branży należy również zaliczyć przedstawicieli całego łańcucha dostaw (importerzy, dystrybutorzy, hurtownicy) oraz przedsiębiorców zajmujących się recyklingiem. W naszym kraju wytwarzane są podstawowe tworzywa masowe, jak poliolefiny (Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.), polichlorek winylu (Anwil S.A.), polistyren (Sythos S.A.), politereftalan etylenu PET (Indorama), a także niektóre tworzywa techniczne, takie jak poliamidy i poliacetale (Azoty Tarnów, Rhodia). Poza tym na rynku polskim obecni są – poprzez lokalnych przedstawicieli – wszyscy wiodący światowi producenci tworzyw sztucznych.

Firm działających jako komponenty, czyli przygotowujących specjalistyczne mieszanki tworzyw, często na specjalne zamówienie klienta, jest w Polsce niewiele, dodatkowo część z nich przygotowuje swoje mieszanki z materiałów pochodzących z recyklingu tworzyw sztucznych.

Branża przetwórców tworzyw sztucznych w Polsce jest dość liczna, przy czym zdecydowanie wyróżniają się grupy producentów rur i profili PCW – Polska w tym zakresie znajduje się w czołówce europejskiej. W pozostałych sektorach duże znaczenie mają również producenci opakowań, kabli i folii. W zakresie dostaw urządzeń do przetwórstwa tworzyw sztucznych na rynku dominują zagraniczni dostawcy światowych marek. Mniej liczni polscy producenci skupiają się na osprzęcie i urządzeniach pomocniczych.

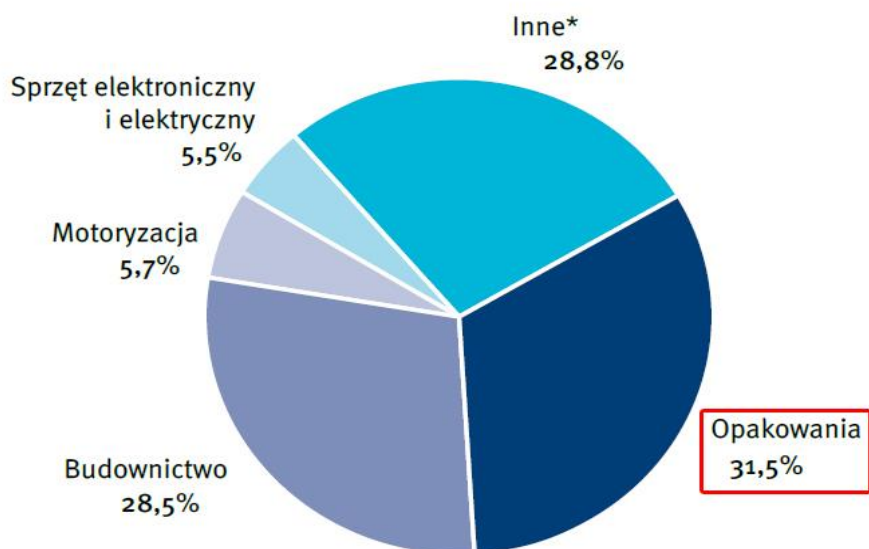
Od kilkunastu lat w Polsce obserwowana jest tendencja do szybszego niż w Europie Zachodniej wzrostu zużycia tworzyw sztucznych, co niewątpliwie związane jest z modernizacją całej gospodarki polskiej



po okresie zmian ustrojowych oraz ze wzrostem poziomu życia. Potencjał rozwoju branży jest więc duży, choć jest ona narażona na liczne zagrożenia. Szacuje się, że branża tworzyw sztucznych to ponad 8 000 zakładów zatrudniających ponad 130 000 pracowników. Zarówno liczba zatrudnionych jak i obroty branży w Polsce, szacowane w 2010 r. na ponad 14 mld €, systematycznie i dynamicznie rosną od kilkunastu lat. Świadczy to o zwiększającym się zapotrzebowaniu polskiej gospodarki na tworzywa sztuczne i produkowane z nich wyroby. Krajowa produkcja tworzyw tylko w części zaspokaja potrzeby rynku i Polska jest dużym importem netto tworzyw sztucznych. Ze statystyk wynika, że nadwyżka importu nad eksportem to prawie 1,4 mln ton, co wpływa na pogorszenie bilansu handlowego Polski o ponad 2,2 mld €.

Zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne w Polsce w 2010 roku wynosiło ok. 2,4 mln ton. Z wartością tą Polska zajmuje szóstą pozycję w Europie. Jednocześnie zużycie tworzyw na jednego mieszkańca naszego kraju wynosi ok. 66 kg, co ciągle jeszcze jest znacznie poniżej poziomu zużycia w najwyżej rozwiniętych krajach europejskich (wynoszącego ponad 100 kg). Największe ilości tworzyw trafiły do przemysłu produkującego opakowania (31,5%) oraz do budownictwa (29%). Z kolei, spośród rodzajów tworzyw sztucznych, jakie były przetwarzane, największy udział miały poliolefiny (HDPE, LDPE i PP) – 46% i polichlorek winylu (16%).

Segmenty zastosowań tworzyw sztucznych w Polsce (2010)

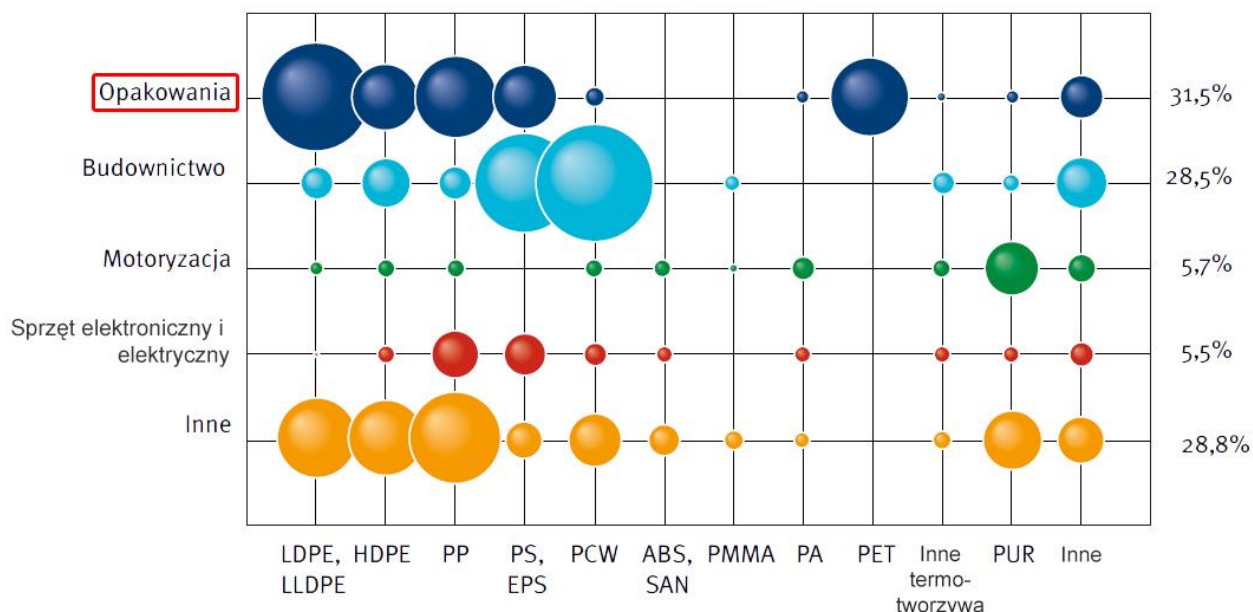


*) wyroby powszechnego użytku, sprzęt gospodarstwa i wyposażenia domowego, rolnictwa, medycyny, itp.)



Zużycie tworzyw sztucznych w Polsce wg segmentów zastosowań (2010)

Zapotrzebowanie 2,4 mln t



1.2 Zapotrzebowanie na narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych w Europie

„Produkcja przemysłu tworzyw sztucznych to jeden z ważniejszych sektorów portugalskiej gospodarki, silnie rozwijający się przy zastosowaniu nowoczesnych technologii i odgrywający znaczącą rolę na międzynarodowych rynkach. Portugalia jest obecnie jednym z największych na świecie producentów form wtryskowych, szczególnie form do tworzyw sztucznych. Większość produkcji, tj. 80% jest przeznaczona dla odbiorców zagranicznych.

Firmy portugalskie były jednymi z pierwszych, które zrozumiały, że na obecnych rynkach międzynarodowych nie poszukuje się już tylko standardowych form wtryskowych, ale kompletne i zintegrowane rozwiązania. Oferują one swoim klientom kompleksową obsługę oraz nowe, innowacyjne produkty, począwszy od pomysłu i projektu po produkcję. Firmy portugalskie są również pionierami w użyciu technologii umożliwiającej na przykład wtryskiwanie produktów z ruchomymi częściami z jednej formy, etykietowanie i dekorowanie form oraz formowanie produktów łącząc różne materiały, takie jak twarde i gumowane tworzywa sztuczne, przy pomocy jednego narzędzia. Wartość całkowita produkcji form wtryskowych w Portugalii w 2009r. została oszacowana na 402,4 mln euro. Portugalia eksportuje większość swojej produkcji na rynki zagraniczne, takie jak Niemcy, Francja, Hiszpania, Polska, Wielka Brytania i USA. W 2009 roku eksport w tym sektorze wyniósł 321,9 mln euro. Niemal wszyscy najważniejsi producenci, jak BMW, Mercedes, Volvo, Renault, Honda, Peugeot, Citroen, Volkswagen i Opel stosują portugalskie formy

w produkcji swoich samochodów. Niektóre samochody zawierają więcej niż 36 form wyprodukowanych w Portugalii - od zderzaków po spojler, deski rozdzielcze, schowki itp. Dlatego też nie dziwi fakt, że w 2008 r. około 72% całkowitej produkcji form wtryskowych była przeznaczona na cele przemysłu motoryzacyjnego.

Sektor form wtryskowych zawdzięcza swoją bardzo dobrą międzynarodową reputację innowacjom technologicznym, jakości, konkurencyjnym cenom i praktykowanym terminom dostaw. Doświadczenie Portugalczyków w tej dziedzinie wykracza także poza sektor motoryzacyjny. Wiele produktów codziennego użytku, takie jak telefony komórkowe, czy walizki, są wykonywane przy użyciu portugalskich form, np. niektóre telefony komórkowe Nokia lub walizki Samsonite. Sektor konsekwentnie poszerza swoje pole działania w takich dziedzinach jak aeronautyka, urządzenia elektryczne, energia, ochrona środowiska, opieka zdrowotna i opakowania.

1.3 Europejski rynek przetwórstwa tworzyw sztucznych

Na podstawie (Plastech rok pub. 2012): „Produkcja w branży tworzyw sztucznych”. Przedstawia rynek z roku 2010 i 2011. W 2011 r. europejska branża tworzyw sztucznych kontynuowała proces wychodzenia z gospodarczej recesji, zwłaszcza w zakresie wyrobów z tworzyw sztucznych – wg autorów raportu PlasticsEurope, dokumentu, który podsumowuje europejski rynek tworzyw sztucznych. Z końcem wiosny 2011 r. tempo wychodzenia z kryzysu uległo jednak spowolnieniu na skutek zmniejszenia zapasów oraz niepewności co do dalszego rozwoju sytuacji ekonomicznej w Europie. Od drugiej połowy 2010 r. tempo wychodzenia z kryzysu różniło się w poszczególnych sektorach. Produkcja tworzyw sztucznych - tworzyw pierwotnych i przetworzonych – rosła aż do początku 2011 r., jednak od marca 2011 r. zaczęła maleć. Natomiast od początku roku 2011 r. utrzymywał się ciągły wzrost zapotrzebowania na urządzenia do przetwórstwa tworzyw sztucznych. W branży urządzeń elektrycznych oraz w motoryzacji od wielu miesięcy trwa tendencja wzrostowa w zakresie zużycia tworzyw sztucznych. W budownictwie, po miesiącach zmniejszającego się w 2010 r. zapotrzebowania na tworzywa sztuczne, na początku 2011 r. nastąpił znaczny wzrost, który w chwili obecnej już się ustabilizował. Popyt ze strony bardziej stabilnej branży spożywczej utrzymywał się na stałym poziomie. W drugiej połowie 2010 r. eksport tworzyw sztucznych zaczął wzrastać, osiągając maksimum pod koniec roku. Najnowsze dane podawane przez PlasticsEurope, a dotyczące wyrobów z tworzyw sztucznych wskazują na stabilizację eksportu i wzrost importu, można więc spodziewać się zmniejszenia nadwyżki handlowej w porównaniu z rokiem wcześniejszym. Wzrasta również eksport materiałów do recyklingu, i to na tyle dynamicznie, że europejskie firmy zajmujące się recyklingiem zaczynają mieć kłopoty z pozyskaniem surowca, a to spora rzadkość. Po okresie silnego wzrostu zapotrzebowania na początku 2011 r., zarówno na tworzywa sztuczne, jak i na wyroby z tworzyw sztucznych, pojawiły się oznaki zmiany tego trendu.

Na podstawie (Plastech rok pub. 2011): „Wzrost światowy popyt na tworzywa sztuczne”. Przedstawia rynek z roku 2010. Z opublikowanego rocznego raportu, przez Stowarzyszenie Plastics Europe, podsumowującego rok w przemyśle tworzyw sztucznych, wynika, że na świecie produkuje się obecnie 265 mln ton tworzyw. Autorzy raportu zauważają, że branża tworzyw sztucznych odgrywa ważną rolę z punktu widzenia globalnego wzrostu gospodarczego dzięki innowacjom w wielu sektorach gospodarki, m.in. w motoryzacji, przemyśle elektrycznym i elektronicznym, budownictwie oraz produkcji żywności i napojów. Autorzy raportu określają tworzywa sztuczne mistrzami pod względem oszczędności zasobów, ponieważ są to materiały pozwalające zaoszczędzić więcej surowców kopalnych, niż zużywa się do ich produkcji. Podają przykład, że zastąpienie tworzyw materiałami alternatywnymi spowodowałoby wzrost zużycia energii o 46 proc., wzrost emisji dwutlenku węgla również o 46 proc., a także oznaczałoby wzrost ilości odpadów w całej Unii Europejskiej o 100 mln ton rocznie. W 2010 r. światowa produkcja tworzyw sztucznych wzrosła w stosunku do roku 2009 o 15 mln ton osiągając wielkość 265 mln ton. Jest to potwierdzenie długoterminowej prognozy wzrostu produkcji tworzyw, kształtującego się na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat na poziomie 4,5 proc. rocznie. W 2010 r. produkcja tworzyw sztucznych w Europie osiągnęła 57 mln ton i było to 22 proc. światowej produkcji.

Na podstawie (Plastech rok pub. 2012): „Światowy rynek opakowań”. Przedstawia prognozę PIRA na rok 2016. Agencja Pira International, zajmująca się badaniami trendów w przemyśle, przewiduje, że światowy rynek opakowaniowy będzie rósł w ciągu czterech najbliższych lat, tak by w 2016 r. osiągnął wartość 820 mld dolarów. Roczne globalne tempo wzrostu branży opakowaniowej szacowane jest na 3 proc. Największy przyrost mają notować tzw. sztywne opakowania z tworzyw sztucznych oraz opakowania tekturowe. Popyt na jedną i drugą grupę opakowań ma być napędzany przez szereg czynników cywilizacyjnych, wśród których na czele znajdują się zwłaszcza te, które nie są na pierwszy rzut oka zbyt mocno skojarzone z sektorem opakowaniowym. W raporcie Pira mówi się o znaczeniu jakie odegra urbanizacja w krajach rozwijających się, inwestycje w budownictwie mieszkaniowym oraz przemyśle medycznym. Jeśli chodzi o tempo wzrostu wedle poszczególnych państw, to dominować mają Chiny, Indie i Brazylia, a także region Europy Wschodniej. Silny wzrost zapotrzebowania na opakowania sztywne zgłaszany jest przede wszystkim przez branżę napojową, kosmetyczną, gospodarstwa domowego, a także pielęgnacji ciała. Poza tym opakowania z elastycznych tworzyw sztucznych będą coraz mocniej wykorzystywane przez sektor żywnościowy, gdzie zwiększają długość życia produktu. Z przywoływanego raportu wynika, że największym użytkownikiem opakowań wedle kryterium państwowego są Stany Zjednoczone, w których to popyt oceniany jest na 317 mld dolarów w ciągu roku. O 80 mld dolarów mniej wyceniany jest on w Chinach. Jednak autorzy badania są pewni, że do 2017 r. Chińczycy w tej statystyce osiągną wynik lepszy od USA. Na Polskę we wszystkich danych odnoszących się do rynku opakowaniowego przypada mniej niż 2 proc. udziałów.

2 Technologie i narzędzia do produkcji narzędzi w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych

Do największych problemów we współczesnych technikach wytwarzania należy zaliczyć możliwość świadomego kształtowania warstwy wierzchniej części dostosowanej do warunków w jakich będzie eksploatowana. Skala problemu rośnie wraz ze wzrostem wymagań funkcjonalnych stawianych wytwarzanym przedmiotom oraz ze stopniem skomplikowania opracowanej technologii. Za wartości pionowych i poziomych parametrów otrzymanej struktury geometrycznej powierzchni w dużej mierze odpowiedzialne są parametry technologiczne zrealizowanych zabiegów. Jednak za końcową teksturę powierzchni oprócz parametrów technologicznych w dużej mierze odpowiada strategia prowadzenia narzędzi i oraz warunki kinematyczno- geometryczne ich pracy.

2.1 Hybrydowe technologie kształtowania powierzchni części

Coraz częściej powszechne staje się łączenie w jednej operacji zabiegów technologicznych przynależnych różnym technikom produkcyjnym. Częstym dziś połączeniem występującym na obrabiarkach skrawających jest integracja kształtującej obróbki wiórowej z wykończeniową obróbką plastyczną powierzchni.

Na tym tle nagniatanie powierzchni złożonych na centrach frezarskich napotyka na znaczne trudności. Dotychczasowe wzmianki w literaturze ukazują się nieliczne przykłady zastosowania hybrydowej technologii (kształtującego frezowania zintegrowanego z wykończeniowym nagniataniem) do produkcji narzędzi wykorzystywanych w przemyśle tworzyw sztucznych. Nieliczne wzmianki na tym polu obrazują najczęściej wykorzystanie handlowych narzędzi firmy ECOROLL

2.2 Mikrohydrauliczne narzędzia do nagniatania powierzchni

Od kilku lat prowadzone są prace nad nagniataniem powierzchni przestrzennych złożonych w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Zbudowano specjalny układ zasilania narzędzia cieczą chłodząco smarującą, skonstruowano kilka odmian nagniataków, przeprowadzono próby nagniatania elementów form wtryskowych dla wyrobów z tworzyw sztucznych. Na rysunku 2.1. przedstawiono frezarskie centrum obróbkowe DMG DMU

60 MONOBLOK w trakcie wykończeniowej obróbki formy wtryskowej. Narzędzie do nagniatania w pięciu osiach zasilane jest poprzez giętkie przewody wysokiego ciśnienia.



Rysunek 2.1. Nagniatak z zewnętrznym źródłem zasilania energią hydrauliczną (podczas obróbki powierzchni formy na obrabiarkie)

Efekty stosowania narzędzi do nagniatania w znacznym stopniu zależne są od stanu SGP po frezowaniu, oraz rodzaju materiału i twardości powierzchni obrabianego wyrobu. Podstawowym technologicznym parametrem narzędzia jest średnica kulki nagniatającej d_k , w zależności od niej dobierane są technologiczne parametry obróbki, tj. siła nagniatania F_N . Prędkość nagniatania v_b jest parametrem, który nie wpływa istotnie na wartości końcowych parametrów SGP. W celu uzyskania wysokiej wydajności zasadne jest stosowanie maksymalnych wartości prędkości posuwowych dostępnych na obrabiarkach CNC. Nagniatanie powierzchni przestrzennych złożonych po frezowaniu umożliwia uzyskanie gładkich powierzchni o średniej wartości parametru $Ra=0.15$ [μm], dla materiałów C45 (20HRC), 42CrMo4 (35HRC) bez względu na zastosowaną średnicę kulki nagniatającej $d_k = 10, 20mm$. W szczególnych przypadkach odpowiednio dobierając warunki obróbki można osiągnąć powierzchnie na których średnia wartość parametru Ra wynosić będzie nawet $0.1\mu m$.

Często w trakcie obróbki powierzchni przestrzennych złożonych przez nagniatanie objawiają się niedogodności. Mianowicie przewody hydrauliczne mogą ograniczać możliwość bezpiecznego

sterownia narzędziem



Rysunek 2.2. Mikrohydrauliczny nagniatak opracowany w ITM ZUT w Szczecinie

(możliwość swobodnego programowania symultanicznego pięcioosiowego nagniatania).

W nowoczesnych centrach obróbkowych powszechnie stosowane są układy doprowadzające ciecz chłodząco smarującą do narzędzia przez wrzeciono, którą to można wykorzystać w konstrukcji narzędzia gdzie, dotychczasowy zewnętrzny układ zasilania zastąpiony zostanie przez umieszczony w korpusie narzędzia układ mikrohydrauliczny zawierający filtr, zawór redukcyjny ciśnienia, zawór bezpieczeństwa, zawór przelewowy, zawór zwrotno- dławiący. Widok tego narzędzia – rysunek 2.2.

Do zalet nagniataków z zintegrowanym mikrohydraulicznym układem zasilania należy zaliczyć:

- brak potrzeby stosowania specjalnego (drogiego) zasilacza,
- brak przewodów podłączeniowych utrudniających swobodę ruchów,
- możliwość automatycznej wymiany narzędzia.

Opisane narzędzie pozwala na niespotykaną dotychczas integrację nagniatania na obrabiarkach skrawających do metali (do minimum ograniczając czas potrzebny na przebrojenie pomiędzy skrawaniem a nagniataniem).

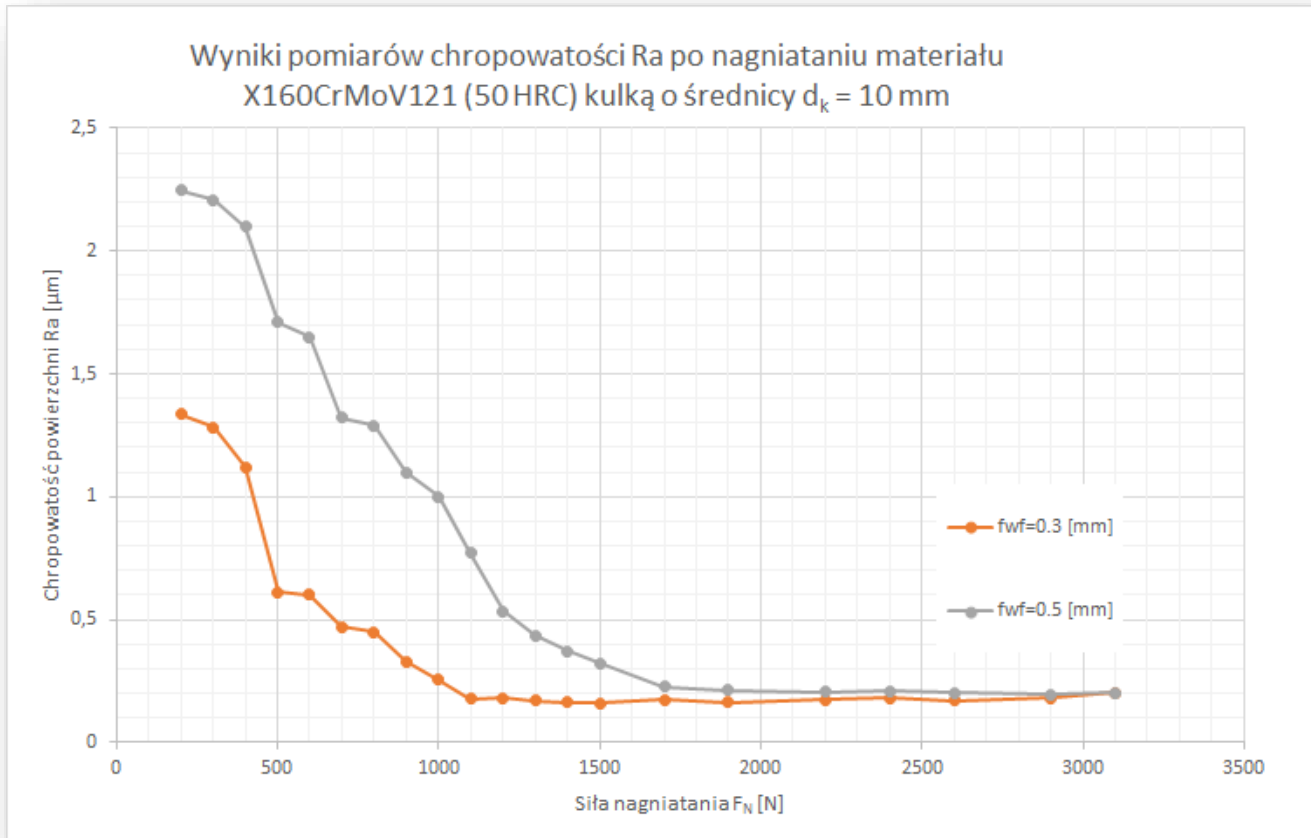
Opracowana konstrukcja narzędzia z mikrohydraulicznym układem sterowania została zgłoszona do ochrony w Europejskim Urzędzie Patentowym (zgłoszenie nr EP13461560.8 z dnia 13.11.2013)

3 Obróbka przez frezowanie i nagniatanie na twardo

Hybrydowe technologie kształtowania powierzchni części maszyn są coraz bardziej powszechne w coraz to szerszym obszarze technologii części maszyn. Narzędzia takie jak formy wtryskowe matryce czy tłoczniki bardzo często są obrabiane w stanie ulepszonym cieplnie nie rzadko przekraczając stan ponad 40HRC. materiału powszechnie używanego w konstrukcji tłoczników. Taki stan materiału nie stanowi jeszcze większych problemów przy obróbce skrawaniem jednak przy zintegrowanym nagniataniu może być znacznym utrudnieniem w osiągnięciu wymaganego stanu gładkościowego (wysoka twardość w połączeniu z małym wydłużeniem względnym obrabianego materiału).

Nagniatanie polega na siłowym oddziaływaniu twardym narzędziem na chropowatą powierzchnię przedmiotu obrabianego. Ze względu na twardość przedmiotu obrabianego problematyczne staje się dobranie odpowiedniej siły nagniatania F_N . Prace prowadzone

w Instytucie Technologii Mechanicznej ZUT w Szczecinie dowodzą, że użycie odpowiednio dużej siły nagniatania F_N umożliwia usunięcie dowolnie dużej pierwotnej chropowatości pozostawionej po frezowaniu – rysunek 3.1.



Rysunek 3.1. Wykres przebiegu parametru R_a w funkcji siły nagniatania F_N po nagniataniu materiału X160CrMoV121 (52HRC) kulką o średnicy $d_k=10$ mm po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i $f_{wf}=0.5$ mm

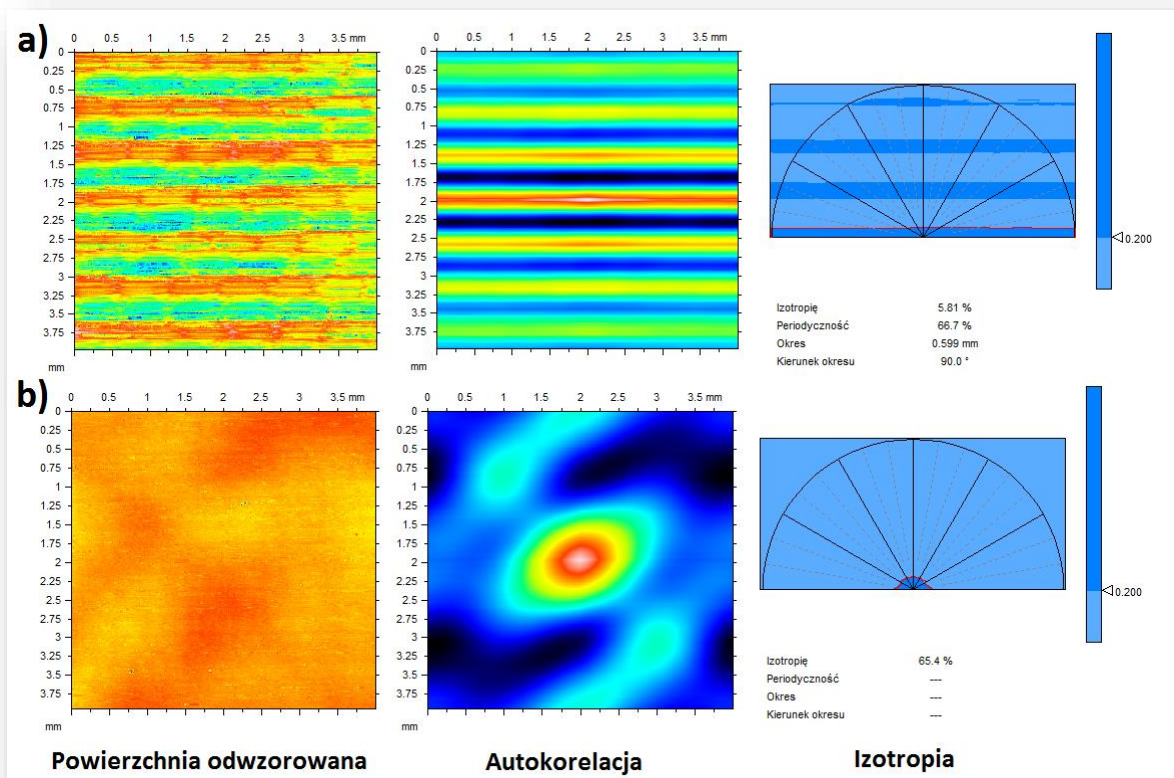
Łączone w jednej operacji zabiegi frezowania i nagniatania oprócz optymalizacji pod kątem wartości wysokościowych parametrów chropowatości należy również łączyć w sposób dający odpowiednio długi okres trwałości pracy narzędzi podczas skrawania i nagniatania. Nadmierne wartości siły nagniatania F_N (rysunek 3.1.) mogą być niebezpieczne bo oprócz skrócenia okresu pracy ceramicznych elementów nagniatających prowadzić mogą do wytworzenia potencjalnie niebezpiecznego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej (pękanie i łuszczenie się powierzchni nagniatanej podczas eksploatacji części).

Podobnie jak przy obróbce materiałów miękkich również przy frezowaniu i nagniataniu na twardo można osiągnąć dobre efekty gładkościowe nawet przy znacznie obniżonych wartościach siły nagniatania F_N . Podstawowym warunkiem jest poprowadzenie obróbki w kilku przejściach

i przy odpowiedniej trajektorii narzędzia nagniatającego w stosunku do śladów pozostawionych przez frez. Dodatkowym warunkiem oceny wytworzonej w takich warunkach powierzchni oprócz wartości wysokościowych parametrów SGP powinna być jej izotropowość.

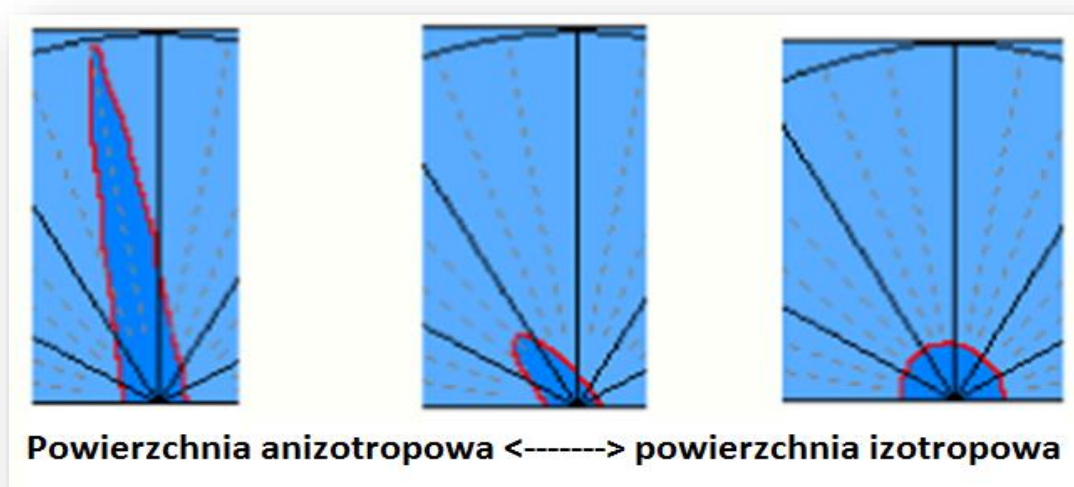
4 Zmiany struktury geometrycznej powierzchni i stopnia izotropowości

Sposób rozmieszczenia charakterystycznych śladów pozostawionych na powierzchni w skutek zastosowanej obróbki nazywany jest stopniem izotropowości struktury. Powierzchnie, które są obrabiane skrawaniem a następnie poddawane nagniataniu mają istotną składową zdeterminowaną, która wynika z odwzorowania kształtu ostrzy, posuwu na ostrze f_r i posuwu wierszowania f_{wf} freza, a później ze średnicy d_k i zastosowanego wierszowania f_{wn} podczas pracy narzędzia nagniatającego. Na tak ukształtowanej powierzchni, oprócz składowej zdeterminowanej zaobserwować można również nierówności o charakterze losowym. Udział w ogólnej wysokości chropowatości nierówności będących efektem frezowania i nagniatania może się bardzo różnić, w głównej mierze różnice te zależne są od przyjętej strategii pracy freza i nagniataka. Izotropowość SGP oznacza jednakową strukturę powierzchni we wszystkich kierunkach. Jednocześnie jest to struktura idealnie symetryczna względem wszystkich możliwych osi symetrii. Istnieją różne możliwości określenia stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni. Najpowszechniejszym sposobem wyznaczenia stopnia izotropowości SGP jest analiza funkcji autokorelacji przy poziomie autokorelacji wynoszącym 0.2. Powierzchnie anizotropowe mają kształt funkcji autokorelacji asymetryczny, wydłużony oraz smukły w jednym kierunku – rysunek 4.1a, natomiast w przypadku powierzchni izotropowych kształt ten jest bardziej owalny, czasami okrągły i symetryczny – rysunek 4.1b.



Rysunek 4.1. Określanie stopnia izotropowości a) anizotropowa powierzchnia frezowana z $f_{wf}=0.3\text{mm}$ - 5.81 %, b) izotropowa - 65.4% powierzchnia po nagniataniu z posuwem wierszowania $f_{wn}=0.02\text{ mm}$

Izotropię wyraża się w procentach w przedziale od 0% do 100 %. Umownie przyjmuje się, że powierzchnie anizotropowe odznaczają się stopniem izotropowości mniejszym od 20%. Natomiast powierzchnie anizotropowe mają stopień izotropowości wyższy od 80% - rysunek 4.2.

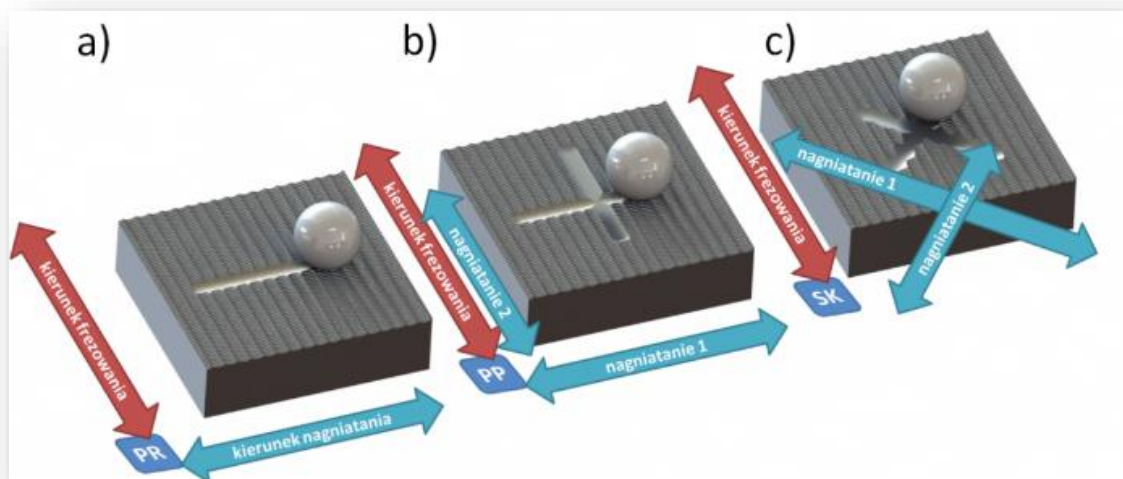


Rysunek 4.2. Zmiana stopnia izotropii powierzchni

Prawidłowo zrealizowany proces obróbki łączący kształtujące frezowanie z wykończeniowym nagniataniem oprócz zmniejszenia wysokościowych parametrów SGP powinien prowadzić do zmiany otrzymanej tekstury powierzchni z tekstury typowej dla powierzchni anizotropowych (równoległa kierunkowość) do tekstury powierzchni izotropowej (struktura bezkierunkowa). Stosowanie nadmiernej siły podczas nagniatania FN owocować będzie ponownym przejściem od tekstury izotropowej do anizotropowej przy zmniejszeniu nierówności powierzchni pozostaną widoczne głębokie bruzdy powstałe w wyniku odtaczania się w dwóch kolejnych równoległych przejściach kulki nagniatającej.

4.1 Badania zmiany stanu struktury powierzchni

W Instytucie Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie przeprowadzono serie badań, których celem było określenie wpływu wzajemnej trajektorii kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania na izotropię powierzchni. Do analizy włączono również wybrane wysokościowe parametry struktury geometrycznej powierzchni 3D. Przygotowano próbki o wymiarach 100x100x20mm z materiału X160CrMoV121, które następnie ulepszone cieplnie do twardości 52 ± 2 HRC. Do badań wytypowano trzy strategie nagniatania – rysunek 4.3.



Rysunek 4.3. Strategie nagniatania, a) ortogonalna - z jednym przejściem nagniatającym PR; b) podwójnie ortogonalna z dwoma przejściami nagniatającymi PP, c) krzyżowo skośna z dwoma przejściami nagniatającymi SK

Wartość siły nagniatania $F_N=800$ N przyjęto w taki sposób aby był widoczny znaczny spadek wysokości nierówności powierzchni frezowanej (o około 50% - rysunek 3.1), przy którym nie dojdzie jeszcze do całkowitej deformacji plastycznej nierówności powierzchni po frezowaniu. Dla

każdej z trzech badanych strategii przygotowano próbki zawierające po dwa warianty powierzchni frezowanej z wierszowaniem f_{wf} $A=0.3$ mm i $B=0.5$ mm, na każdym z otrzymanych pól przeprowadzono nagniatanie z czterema wytypowanymi posuwami wierszowania $f_{wn}=0.02$ mm; 0.08 mm; 0.14 mm oraz 0.2 mm, co dało łącznie 24 pola pomiarowe.

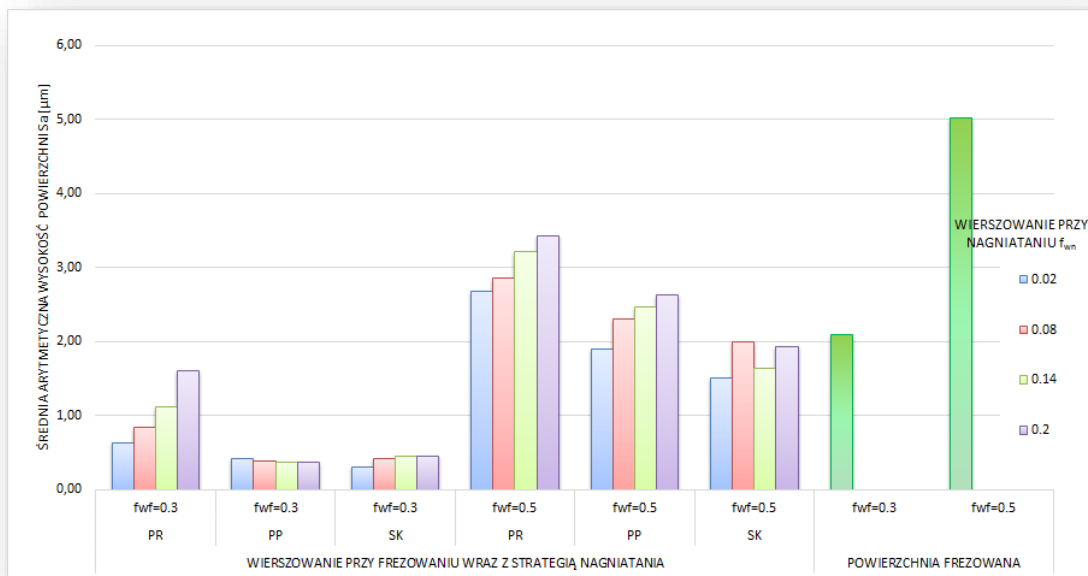
4.2 Zmiany stopnia izotropii powierzchni

Pomiary SGP prowadzono z wykorzystaniem multisensorycznej maszyny do badań topografii powierzchni AltiSurf A520. Analizę zebranych danych i opracowanie topografii powierzchni (zgodnie z normą ISO 25178) prowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Altimap PREMIUM 6.2. Każdorazowo dla zarejestrowanej chmury punktów mierzonej powierzchni stosowano metodykę analizy topografii powierzchni, która obejmowała wyznaczenie wartości progowej celem usunięcia błędnie zebranych punktów powierzchni (punkty usuwane ustawiono jako wartości niemierzone). Następnie powierzchnię poziomowano (płaszczyznę średnią aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów LS). Na koniec wyznaczono parametry topograficzne wykorzystywane w opisie izotropii oraz wybrane wartości stereometrycznych parametrów chropowatości wg ISO 25178 – tabela 1.

Tabela 4.1. Wartości wybranych parametrów wysokości SGP i izotropowości zarejestrowane podczas badań

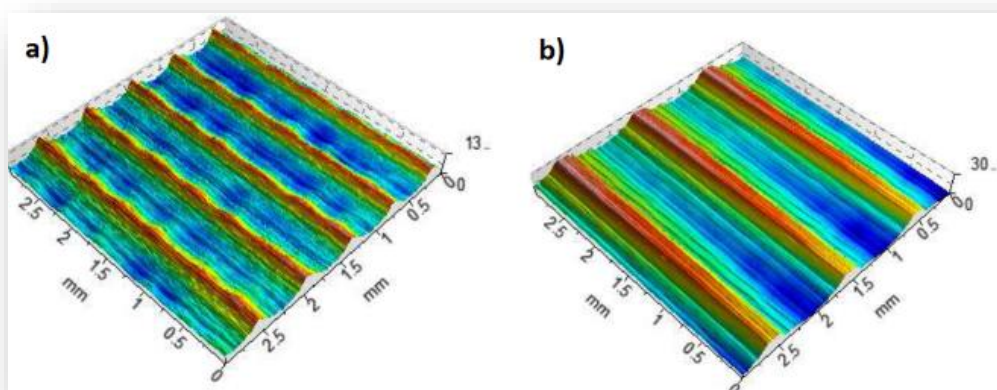
Nazwa parametru [jednostka] opis parametru	Wierszowanie przy nagniataniu f_{wn}	Frezowanie i nagniatanie wg przyjętej strategii						Frezowanie	
		PR	PP	SK	PR	PP	SK	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.5$
		$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.5$
Izotropia powierzchni [%]	0.02	8,935	23,811	26,964	14,578	14,746	16,213	8,07	13,3
	0.08	8,589	10,789	9,553	14,522	14,727	14,906		
	0.14	8,397	16,506	9,416	14,417	14,548	14,933		
	0.2	8,066	10,961	9,981	14,758	14,501	14,696		
Sa [mm] Długość korelacji powierzchni	0.02	0,135	0,360	0,280	0,221	0,224	0,246	0,122	0,2
	0.08	0,129	0,162	0,144	0,220	0,223	0,226		
	0.14	0,127	0,248	0,142	0,219	0,221	0,227		
	0.2	0,121	0,165	0,150	0,224	0,220	0,223		
Std Kierunkowość struktury powierzchni	0.02	90,252	90,249	90,023	90,269	90,030	90,016	90	90
	0.08	90,042	90,252	90,020	90,245	90,242	90,018		
	0.14	90,044	90,028	90,028	90,275	90,029	90,002		
	0.2	90,252	90,034	90,011	90,249	90,037	90,006		
Sa [μ m] Średnia arytmetyczna wysokość powierzchni	0.02	0,635	0,421	0,307	2,679	1,891	1,510	2,1	5,02
	0.08	0,832	0,389	0,423	2,851	2,298	1,999		
	0.14	1,116	0,362	0,453	3,222	2,471	1,641		
	0.2	1,608	0,363	0,443	3,422	2,635	1,926		
Sq [μ m] Wysokość średniokwadratowa powierzchni	0.02	0,756	0,521	0,382	3,014	2,143	1,772	2,48	5,94
	0.08	0,989	0,484	0,507	3,203	2,606	2,321		
	0.14	1,323	0,442	0,543	3,600	2,771	1,906		
	0.2	1,962	0,448	0,540	3,861	2,967	2,219		

W każdym przypadku obróbki znacząco zmalała wartość pozostawionej po frezowaniu chropowatości powierzchni (rys.4.4) średnio o około 70% dla powierzchni frezowanych z posuwem $f_{wf}=0.3$. Nagniatanie powierzchni frezowanych z wartością posuwu wierszowania $f_{wf}=0.5$ było mniej efektywne, dla tego przypadku średni poziom redukcji chropowatości osiągnął blisko 50%. Najlepszą strategią do nagniatania wysokich nierówności po frezowaniu ($f_{wf}=0.5$) była strategia krzyżowo skośna z dwoma przejściami nagniatającymi SK – dla niej zarejestrowano redukcję wysokościowych parametrów chropowatości na średnim poziomie 65%.



Rysunek 4.4. Zależność parametru Sa powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania

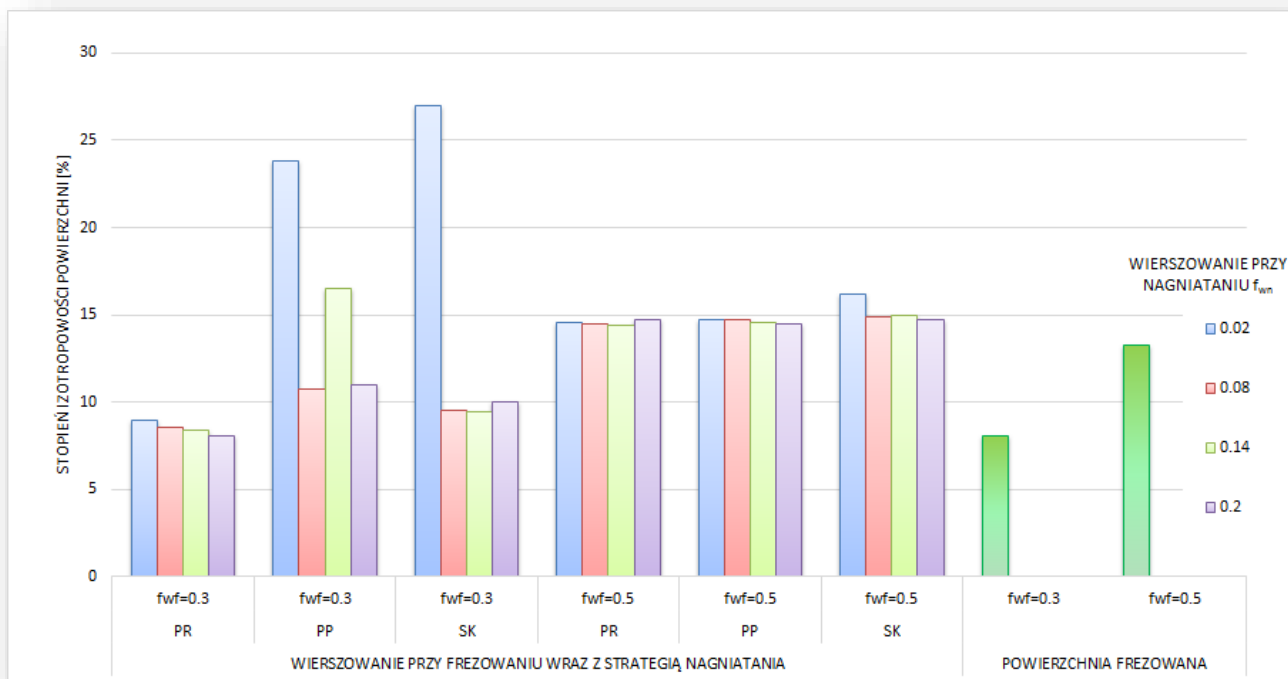
Powierzchnie otrzymane po frezowaniu przedstawiono na rysunku 4.5.



Rysunek 4.5. Anizotropowe powierzchnie próbek po: a) frezowaniu z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.3$ mm, $S_a=2.1$ µm i izotropia=8.07%; b) frezowaniu z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.5$ mm, $S_a=5.02$ µm izotropia=13.3%



Stopień izotropowości powierzchni otrzymany po nagniataniu (rysunek 4.6) wzrósł w nieznacznym stopniu w stosunku do powierzchni frezowanej. Zarejestrowany średni wzrost stopnia izotropowości wynosi około 50% dla powierzchni frezowanych z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.3$ oraz około 15% dla pól frezowanych z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$. W żadnym ze zrealizowanych przypadków obróbki nie udało się przekroczyć stopnia izotropowości powyżej 50%. Podobne zachowanie do stopnia izotropowości wykazują wartości parametrów długość korelacji powierzchni Sal.

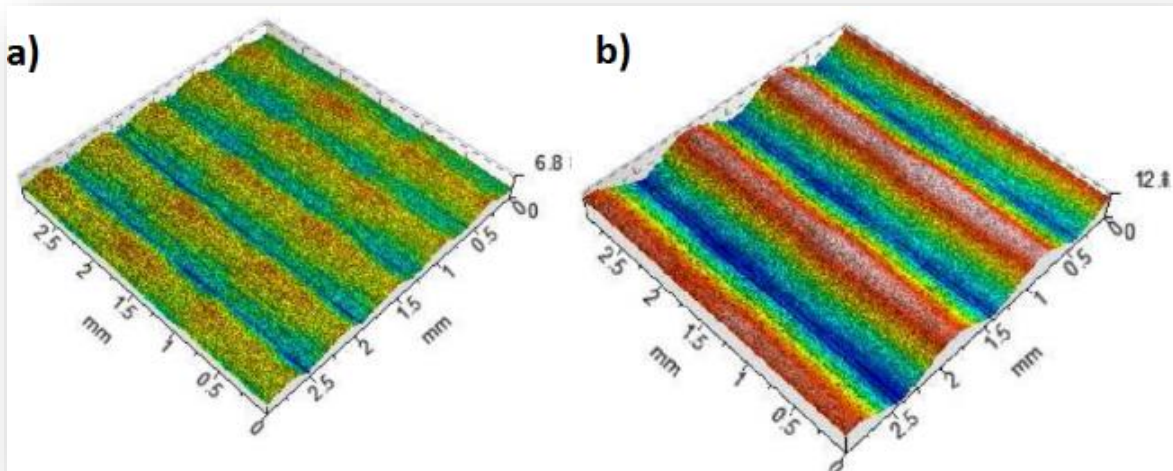


Rysunek 4.6. Zależność stopnia izotropowości powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania

Najwyższą poprawę parametrów związanych z izotropią powierzchni (przejdzie z okresowej struktury anizotropowej do bezkierunkowej struktury izotropowej) zapewniła strategia obróbki krzyżowo skośna SK i strategia podwójnie ortogonalna PP z dwoma przejściami nagniatającymi podczas nagniatania z najmniejszą wartością posuwu wierszowania $f_{wn}=0.02$ mm. Dla tych warunków nagniatania zanotowano wzrost parametrów wyższy o około 55% w stosunku do nagniatania z pozostałymi wartościami wierszowania f_{wn} .

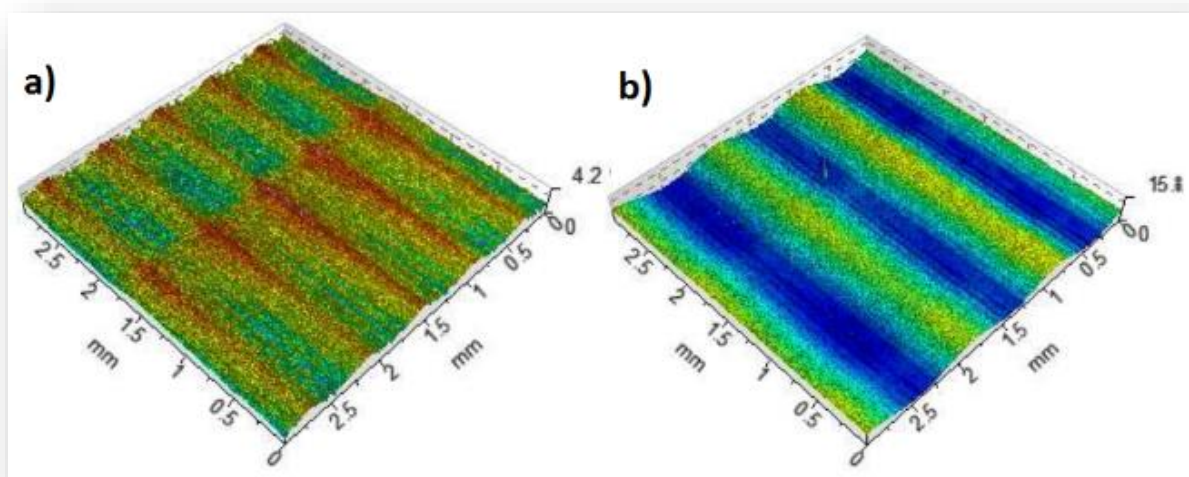
Widok powierzchni otrzymanej po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii ortogonalnej PR z jednym przejściem nagniatającym z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$

mm przedstawiono na rysunku 4.7a, rysunek 4.7b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$.



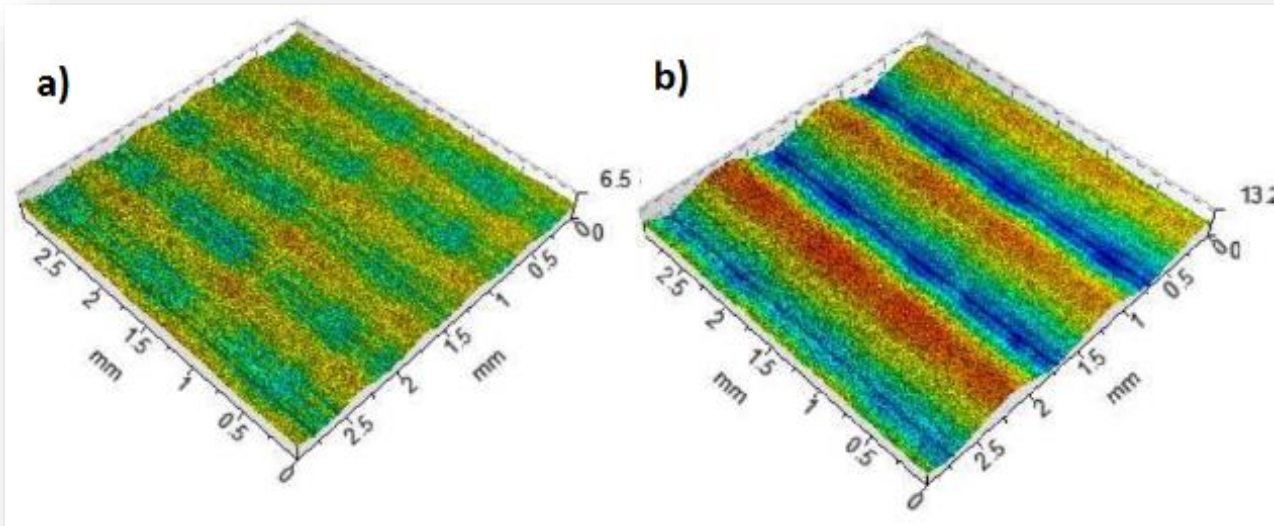
Rysunek 4.7. Efekty obróbki według strategii ortogonalnej z jednym przejściem nagniatającym PR z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

Na rysunku 4.8a przedstawiono widok powierzchni otrzymanej po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii podwójnie ortogonalnej PP z dwoma przejściami nagniatającymi z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm, rysunek 4.8b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z tą samą strategią PP z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$



Rysunek 4.8. Efekty obróbki według strategii podwójnie ortogonalnej z dwoma przejściami nagniatającymi PP z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

Rysunek 4.9a przedstawia widok powierzchni otrzymanej po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii krzyżowo skośnej SK z dwoma przejściami nagniatającymi z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm, rysunek 4.9b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z tą samą strategią SK przy wierszowaniu nagniatania $f_{wn}=0.02$



Rysunek 4.9. Efekty obróbki według strategii krzyżowo skośnej z dwoma przejściami nagniatającymi SK z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

Wykorzystanie parametrów izotropowości powierzchni do opisu efektywności obróbki - zmiany tekstury powierzchni regularnej, okresowej - na strukturę bezkierunkową (anizotropowej na izotropową) w kształtowaniu hybrydowych operacji obróbki. Dodatkowe kryterium izotropowości połączone z wartościami wysokościowych parametrów SGP pozwala na bardziej wydajny dobór technologicznych parametrów obróbki często różnych zabiegów obróbkowych łączonych w jednej operacji technologicznej.

5 Podsumowanie i wnioski

W ramach zrealizowanego projektu przeprowadzono badania nad potencjalnym rozpoznaniem możliwości przemysłowej aplikacji opracowanego narzędzia a także hybrydowej technologii obróbki powierzchni narzędzi wykorzystywanych w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych.

Należy zauważyć, że na tle europejskim, krajowy rynek przetwórstwa tworzyw sztucznych wykazuje się dużą dynamiką tempa wzrostu. W najbliższych latach spodziewane jest znaczne zapotrzebowanie na produkcję coraz lepszych i tańszych narzędzi (form wtryskowych matryc czy tłoczników).

Najlepszym miejscem obecnie do prowadzenia dalszych badań jak również aplikacji przemysłowej wydaje się być rynek produkcji narzędzi zlokalizowany w Portugalii (największa w Europie produkcja), jak również obszar firm produkujących narzędzia dla przemysłu przetwórstwa tworzyw sztucznych zlokalizowany w obrębie województwa kujawsko-pomorskiego.

Prowadzone badania nad nagniataniem przedmiotów na twardo wykazały, że przy znacznie mniejszych nakładach czasu można osiągnąć efekt porównywalny ze stanem powierzchni otrzymywanym w skutek polerowania. W trakcie przeprowadzonych badań najkorzystniejszą spośród badanych strategii okazała się strategia SK z dwoma skrzyżowanymi przejściami nagniatającymi zorientowanymi skośnie w stosunku do śladów pozostawionych przez frez. Również dobre efekty pozwala osiągnąć strategia podwójnie ortogonalna z dwoma przejściami nagniatającymi w tym przypadku warunkiem gwarantującym sukces jest użycie małej wartości posuwu wierszowania przy nagniataniu f_{wn} . Najstabiliej podczas badań wypadła strategia ortogonalna podczas, której zrealizowano tylko jedno przejście nagniatania, prostopadłe do śladów pozostawionych przez frez.

Analizując jedynie redukcję wysokościowych parametrów SGP można by uznać, że dokonano istotnej modyfikacji plastycznej (zmiany wysokości, kształtu i przebiegu krzywej Abbota) nierówności powstałych w skutek frezowania. Jednak podczas badań nie udało się przejść od stanu anizotropowej powierzchni frezowanej do izotropowego efektu po nagniataniu (stopień izotropowości wyższy od 80%), jest to spowodowane zbyt małą wartością przyjętej siły nagniatania ($F_N=800N$) i stosunkowo niewielkimi odkształceniami plastycznymi obrabianej stali.

Istnieje duże prawdopodobieństwo, że wytworzona SGP narzędzia (tłoczniaka lub matrycy) w początkowym okresie eksploatacji będzie przenoszona na powierzchnię wytwarzanych wyrobów powodując ich zmatowienie.

Posiadanie mikrohydraulicznego narzędzia nie jest jedynym i głównym czynnikiem gwarantującym otrzymanie sukcesu poprzez wytworzenie refleksyjnych powierzchni o niskich

wartościach wysokościowych parametrów SGP i pożądanym stanie izotropowości. Każdorazowo wytworzona technologia powinna zostać zoptymalizowana pod kątem użytych narzędzi

Hybrydowe połączenie kształtującej obróbki skrawaniem z wykończeniową, plastyczną obróbką powierzchni stanowić może dobrą alternatywę dla tradycyjnych technik obróbki wykończeniowej narzędzi powszechnie wykorzystywanych w przemyśle tworzyw sztucznych.

Nowoczesne mikrohydrauliczne narzędzia do nagniatania pozwalają zagwarantować wysoki stopień koncentracji technologicznej gwarantując jednocześnie wysoką wydajność procesu obróbki przy jednocześnie niskim koszcie jednostkowym.