

**ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY
W SZCZECINIE
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I MECHATRONIKI**

ROZPRAWA DOKTORSKA

**NAGNIATANIE NARZĘDZIAMI HYDROSTATYCZNYMI
ZŁOŻONYCH POWIERZCHNI PRZESTRZENNYCH
NA FREZARKACH CNC**

Autor:

mgr inż. Daniel Grochała

Promotor:

prof. dr inż. Wiesław Olszak

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I AKRONIMÓW	4
WSTĘP	6
1. PRZEGLĄD LITERATURY	8
1.1. NAGNIATANIE NA FREZARKACH.....	9
1.1.1. <i>Wstępne badania z wykorzystaniem nagniataków sprężystych</i>	<i>10</i>
1.1.2. <i>Badania z wykorzystaniem nagniataków hydrostatycznych.....</i>	<i>12</i>
1.2. NARZĘDZIA DO OBRÓBKI POWIERZCHNI PRZESTRZENNYCH ZŁOŻONYCH	18
1.2.1. <i>Zasada działania nagniataka hydrostatycznego</i>	<i>19</i>
1.2.2. <i>Przegląd rozwiązań nagniataków hydrostatycznych.....</i>	<i>20</i>
1.3. ZASILANIE HYDRAULICZNYCH NARZĘDZI DO NAGNIATANIA	28
1.4. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY	35
2. CELE I PROGRAM PRACY	36
3. PRZYGOTOWANIE STANOWISKA DOŚWIADCZALNEGO.....	37
3.1. NARZĘDZIA HYDROSTATYCZNE DO NAGNIATANIA.....	37
3.1.1. <i>Konstrukcja końcówki roboczej</i>	<i>38</i>
3.1.2. <i>Wymienne końcówki nagniataków hydrostatycznych.....</i>	<i>42</i>
3.1.3. <i>Konstrukcja narzędzia z siłomierzem.....</i>	<i>44</i>
3.2. NAGNIATAK HYDROSTATYCZNY PROSTY	46
3.3. NAGNIATAK Z TŁOKIEM MIECHOWYM.....	56
3.3.1. <i>Zasada działania nagniataka z tłokiem miechowym</i>	<i>58</i>
3.3.2. <i>Stabilizacja siły nagniatania.....</i>	<i>62</i>
3.4. HYDROSTATYCZNY NAGNIATAK KĄTOWY	67
3.5. HYDRAULICZNY UKŁAD ZASILANIA NARZĘDZI HFA.....	69
3.5.1. <i>Wymagania wobec hydraulicznego układu zasilania.....</i>	<i>69</i>
3.5.2. <i>Projekt hydraulicznego układu zasilającego.....</i>	<i>70</i>
4. BADANIA DOBORU TECHNOLOGICZNYCH PARAMETRÓW OBRÓBKI.....	82
4.1. PLANOWANIE BADAŃ	82
4.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE – ETAP PIERWSZY	83
4.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE – ETAP DRUGI.....	98
4.3.1. <i>Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał C45</i>	<i>103</i>
4.3.2. <i>Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał 42CrMo4 ($d_k=10$).....</i>	<i>106</i>

4.3.3. Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał 42CrMo4 ($d_k=20$)	118
4.3.4. Weryfikacja wyników drugiego etapu badań doświadczalnych	129
4.4. BADANIA NAPRĘŻEŃ W WARSTWIE WIERZCHNIEJ	138
5. WNIOSKI	148
5.1. WNIOSKI POZNAWCZE	148
5.2. WNIOSKI UTYLITARNE	149
5.3. DALSZE KIERUNKI PRACY	151
SPIS LITERATURY	153

Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów

a_e	– szerokość frezowania [mm]
a_p	– głębokość frezowania [mm]
b	– szerokość warstwy skrawanej [mm]
D_c	– średnica czołowa freza [mm]
D_e	– średnica efektywna freza [mm]
d_h	– średnica łożyska hydrostatycznego [mm]
d_k	– średnica kulki narzędzia nagniatającego [mm]
D_M	– średnica miecha [mm]
d_o	– średnica płytki skrawającej [mm]
d_t	– średnica efektywna tłoka narzędzia nagniatającego [mm]
F_N	– siła nagniatania [N]
F_h	– siła w nośna w łożysku hydrostatycznym [N]
F_o	– siła osiowa wywierana przez narzędzie [N]
f_m	– posuw czasowy narzędzia [mm/min]
f_r	– posuw na obrót narzędzia skrawającego [mm/obr]
F_t	– siła na tłoku narzędzia nagniatającego [N]
f_{wf}	– posuw poprzeczny frezowania [mm]
f_{wn}	– posuw poprzeczny nagniatania [mm]
H	– przemieszczenie tłoka [mm]
h	– grubość warstwy skrawanej / szerokość łożyska hydrostatycznego [mm]
h_{os}	– wstępne odkształcenie sprężyny [mm]
i	– liczba przejść roboczych narzędzia
k_M	– sztywność miecha [N/mm]
k_s	– sztywność sprężyny [N/mm]
m_l	– moduł luzu łożyska hydrostatycznego [mm]

p	– prawdopodobieństwo testu statystycznego
P1	– ciśnienie zasilania łożyska hydrostatycznego [bar]
P2	– ciśnienie zasilania komory tłokowej [bar]
P3	– ciśnienie na wyjściu z pompy [bar]
r_ϵ	– promień naroża ostrza skrawającego, promień freza kulistego [mm]
r_{frez}	– promień freza [mm]
v_b	– prędkość nagniatania [m/min]
v_c	– prędkość skrawania [m/min]
X	– oś obrabiarki
Y	– oś obrabiarki
Z	– oś obrabiarki / oś narzędzia
α	– kąt nachylenia powierzchni [deg], rozdział 4.1÷4.4 poziom istotności testu statystycznego, rozdział 4.5. kąt padania wiązki promieniowania rentgenowskiego [deg]
φ	– kąt ustawienia próbki wokół osi goniometru [deg]
ν	– lepkość kinematyczna [mm^2/s]
η	– lepkość dynamiczna [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
ψ	– kąt dyfrakcji [deg]
Θ	– kąt Bragga [deg]
CAD	– (Computer Aided Design) komputerowo wspomagane projektowanie
CAM	– (Computer Aided Manufacturing) komputerowo wspomagane wytwarzanie
HFA	– (High Water Based Fluids) emulsja chłodząco – smarująca używana w obróbce skrawaniem, wykorzystana do transmisji energii w układach hydrauliki siłowej.
HSC	– (High Speed Cutting) obróbka skrawaniem z wysokimi prędkościami.
OUPN	– Obrabiarka Uchwyt Przedmiot Narzędzie
PKD	– (Polykristalliner Diamant) diament polikrystaliczny
SGP	– Struktura Geometryczna Powierzchni

Wstęp

Klasyczny proces technologiczny prowadzący do uzyskania przedmiotu o wysokiej dokładności geometrycznej, małej chropowatości powierzchni i żądanych cechach warstwy wierzchniej - realizowany jest przez obróbkę wiórową (zgrubną i kształtującą) oraz obróbkę ścierną (szlifowanie, gładzenie, dogładzanie lub inne). Taki wielooperacyjny proces z dużym udziałem drogiej obróbki ścierniej jest pracochłonny i kosztowny. W przypadku złożonych powierzchni przestrzennych gładkościowa obróbka wykończeniowa często wykonywana jest ręcznie.

Od tego klasycznego schematu odstępstwa zmiierzają do:

- redukowania do minimum liczby operacji, niezbędnych do otrzymania gotowego przedmiotu z przygotówki,
- skrócenia łącznych czasów obróbki,
- zmniejszenia kosztów obróbki,
- polepszenia (lub co najmniej nie pogorszenia) jakościowych wskaźników wyrobu.

Jednym ze sposobów osiągnięcia postawionych wyżej celów jest realizowana na obrabiarkach skrawających obróbka przez zgmiot powierzchniowy (nagniatanie), a zatem bezubytkowa obróbka plastyczna.

Nagniatanie powierzchni na obrabiarkach skrawających ma długą historię [4, 54]. Nagniatanie rolkami po toczeniu czopów osi wagonowych rozpoczęło się w 1848 roku. Rozwijało się tworząc wiele odmian [54]. Obok tocznego [11, 45] – ślizgowe [62]. Obok statycznego – dynamiczne a także hybrydowe [3, 29, 38, 70], gładkościowe [24], umacniające [53, 81], ozdobne [23].

Dziś nagniatanie powierzchni jest stosowane bardzo często. Dominuje jednak przy obróbce powierzchni obrotowych – na tokarkach, wiertarkach, wytaczarkach – niekiedy skutecznie eliminując szlifowanie czy honowanie. Do powierzchni nieobrotowych często stosowane jest kulowanie (śrutowanie), dające dobre efekty umacniające, jednak zdecydowanie gorsze efekty wymiarowe i gładkościowe.

Prowadzone przez wiele lat próby nagniatania na frezarkach nie dawały zadowalających wyników [54]. Dopiero rozwój nagniataków hydrostatycznych pozwolił na pojawienie się w ostatnim dziesięcioleciu pierwszych pozytywnych wyników badań i idące za nimi praktyczne zastosowania nagniatania złożonych powierzchni

przestrzennych na frezarkach [5, 31, 32, 53]. Przełom polega na tym, że gdy przy frezowaniu ruchem głównym jest ruch obrotowy freza – przy nagniataniu narzędziem hydrostatycznym ruchem głównym staje się ruch posuwowy, wymuszający ruch toczny elementu nagniatającego (najczęściej kulki) stanowiącego część narzędzia zamocowanego w nieobracającym się wrzecionie frezarki. Nowoczesne frezarki CNC dysponują napędami posuwów o dużych prędkościach. Pozwala to na uzyskiwanie dużej wydajności powierzchniowej nagniatania. Sterowanie w co najmniej trzech, a w przeważającej liczbie najnowszych maszyn – również w pięciu osiach, umożliwia dotarcie elementu nagniatającego do wielu – inaczej niedostępnych – fragmentów złożonej powierzchni.

Zastosowanie cieczy chłodząco smarującej używanej do frezowania – również jako medium układu hydraulicznego nagniatających narzędzi hydrostatycznych – umożliwia koncentrację operacji. Na jednym stanowisku (frezarce CNC) można realizować frezowanie zgrubne, kształtujące oraz wykończeniowe nagniatanie. To może i powinno być źródłem oszczędności czasu i kosztów, a także podnoszenia jakości wyrobu.

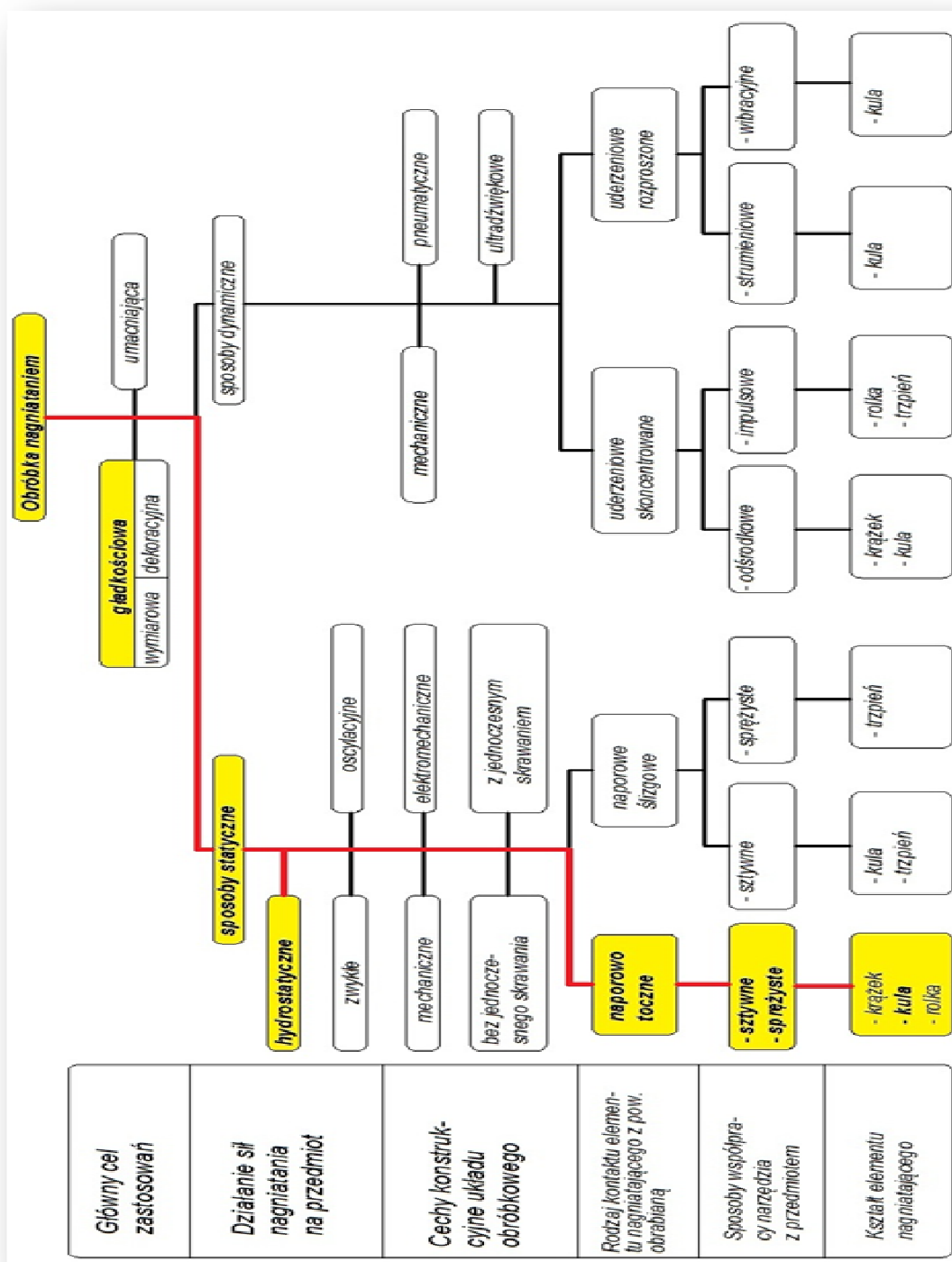
Nagniatanie po toczeniu i nagniatanie po frezowaniu – przy wielu cechach wspólnych (podobnych) – różnią się jednak pod wieloma względami [20, 31, 48, 45, 55]. Wiadomo, że o efekcie końcowym decydują parametry technologiczne obu sąsiadujących zabiegów.

Badając przez wiele lat nagniatanie po toczeniu powierzchni obrotowych, dopracowano się zasad doboru parametrów obu zabiegów, dających efekt „synergii – czyli współdziałania skuteczniejszego niż suma ich oddzielnych działań”. Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi na frezarkach – to dziedzina techniki stawiająca pierwsze kroki. Doświadczeń jest mało, a przy tym są raczej strzeżone przez firmy, które je posiadły.

W pracy podjęto próbę budowy narzędzi i układu zasilania hydraulicznego niezbędnych do nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach, a także próbę określenia zasad doboru technologicznych parametrów frezowania kształtującego i wykończeniowego nagniatania.

1. Przegląd literatury

W długim, ponad stuletnim okresie rozwoju obróbki nagniataniem powstało wiele odmian, co dobrze obrazuje schemat przedstawiony na rysunku 1-1 [54]. Jak wspomniano we wstępie - dominuje nagniatanie naporowe (statyczne) toczone stosowane do obróbki powierzchni obrotowych na tokarkach, wytaczarkach, wiertarkach.



Rysunek 1-1. Podział metod nagniatania

1.1. Nagniatanie na frezarkach

Próby stosowania nagniatania na frezarkach przez wiele lat nie dawały zadowalających wyników. Nie znalazły praktycznego zastosowania głowice do tocznego nagniatania na frezarkach płaszczyzn [41] czy złożonych powierzchni przestrzennych [85]. Główną przyczyną niepowodzeń podczas obróbki złożonych powierzchni przestrzennych był uderowy charakter pracy narzędzia, co dawało niezadowalającą strukturę geometryczną powierzchni.

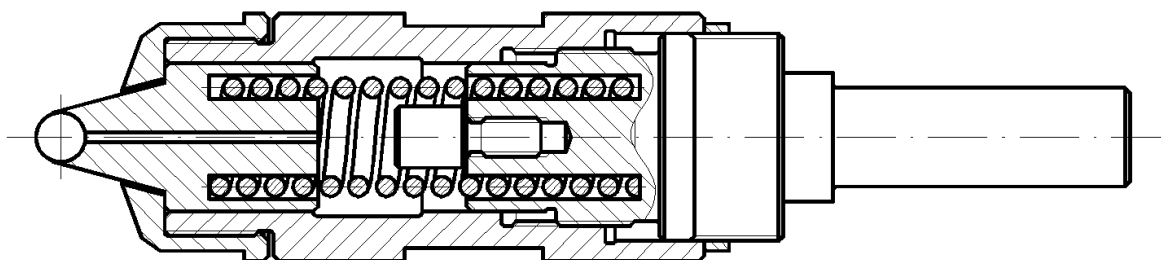
Pozytywne wyniki wstępnych badań nagniatania na frezarkach przyniosły prace [11, 45, 61, 62]. Stosowano tam narzędzia z dociskiem sprężystym, z kulką łożyskową ślizgowo.

Nagniatak zaprojektowany i wykonany w Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej w 2005 r. przedstawiono na rysunku 1-2. Chcąc uzyskać wymaganą jakość powierzchni gotowego wyrobu należy zagwarantować odpowiednią strukturę geometryczną powierzchni SGP po obróbce skrawaniem. Frezowanie kształtujące należy prowadzić z zachowaniem wymagań, jakie narzuca konstrukcja obrabianej części, warunki frezowania powierzchni przestrzennych złożonych (średnica czołowa freza D_c , średnica płytki skrawającej d_p). Technologiczne parametry zabiegu obróbki skrawaniem powinny podlegać optymalizacji pod kątem prowadzonego w następnej kolejności wykończeniowego zabiegu nagniatania.

W przeglądzie literatury obejmującym publikacje ośrodków uniwersyteckich [31, 53, 61] w Polsce, Niemczech, Hiszpanii, USA, a także z Tajwanu nie sprecyzowano dokładnie warunków obróbki powierzchni przestrzennych pod nagniatanie. Także w publikacjach docierających w śladowych ilościach z przemysłu rzadko opisuje się zestaw użytych parametrów frezowania. Nowoczesne systemy wspomagające projektowanie technologii CAM umożliwiają wiele różnych wariantów przeprowadzenia operacji technologicznej frezowania powierzchni przestrzennych złożonych. Wybór właściwej strategii oraz parametrów każdorazowo wymaga wstępnych prób. Do tej pory brak jest jednoznacznej, uniwersalnej metody systematyzującej sposób postępowania podczas doboru parametrów frezowania pod nagniatanie powierzchni przestrzennych złożonych. Dlatego też celowe jest podjęcie tematyki badawczej umożliwiającej określenie technologicznych parametrów frezowania gwarantujące osiągnięcie wymaganego SGP po operacji obróbkowej łączącej zabieg kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania.

1.1.1. Wstępne badania z wykorzystaniem nagniataków sprężystych

Badania własne nad nagniataniem powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC zostały zapoczątkowane w ITM ZUT w Szczecinie w roku 2005 [11, 45]. W pierwszych pracach korzystano z nagniataków jednokulkowych z dociskiem sprężystym i ślizgowym łożyskowaniem kulki nagniatającej (rysunek 1-2).



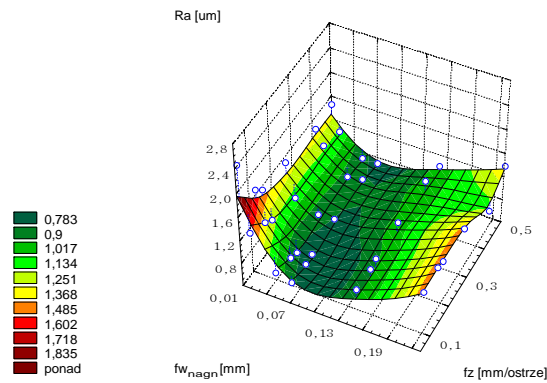
Rysunek 1-2. Schemat nagniataka sprężystego – jednokulkowego z dociskiem sprężystym

Narzędzie cechujące się prostotą konstrukcji nie spełniło jednego z podstawowych założeń. Mianowicie element roboczy nie odtaczał się po powierzchni obrabianego przedmiotu, w związku z tym zakładany charakter nagniatania tocznego powierzchni 3D nie został w osiągnięty. Narzędzie przez większą część badań pracowało jako nagniatak ślizgowy. Pomimo tego uzyskano znaczną redukcję parametrów chropowatości powierzchni.

Wstępne badania przeprowadzone zostały na frezarce sterowanej numerycznie FYJ-50N wyprodukowanej przez Jarocińską Fabrykę Obrabiarek. Prowadzono badania dla stali konstrukcyjnej wyższej jakości C45 normalizowanej do twardości 20 HRC.

Okazało się, że niektóre z grupy niezależnych czynników wejściowych – parametrów badanych (zmiennie ilościowe): f_{wf} , f_{wn} , d_p , d_k , F_N , mają istotny wpływ na końcowy stan SGP. Okazało się również, że istotny wpływ mają zmiennie jakościowe, do których należy zaliczyć wzajemną strategię frezowania i nagniatania. Odpowiednie skojarzenie trajektorii ruchów narzędzi pozwoliło na radykalne obniżenie parametrów SGP. Jako wielkości wyjściowe (zmiennie wynikowe), przyjęto w planie parametry określające końcowy stan struktury geometrycznej powierzchni (wartości zależne).

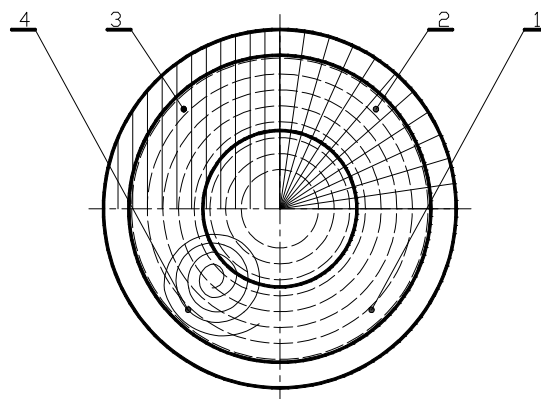
Na podstawie opracowanych wykresów przestrzennych (rysunek 1-3.) dobrano technologiczne parametry obróbki powierzchni przestrzennej złożonej.



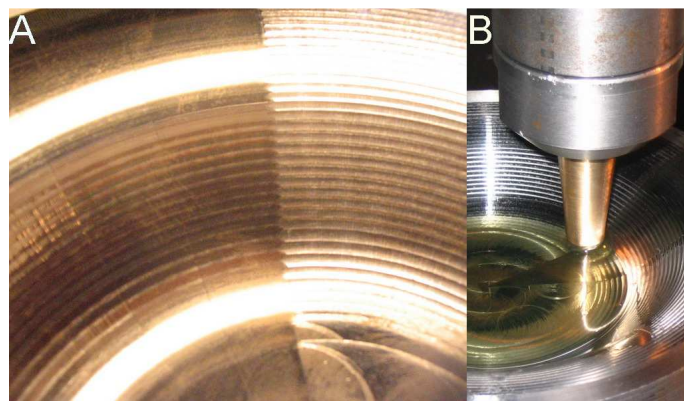
Rysunek 1-3. Wykres zmiany parametru $Ra = F(f_r, f_{wf}, f_{wn})$; gdzie: $f_{wf}=0.2$ [mm]

Nagniatano przedmiot w kształcie miski. Frezowanie i nagniatanie prowadzono w jednym zamocowaniu na trójosiowym centrum obróbkowym MIKRON VCE 500. Frezowano przy użyciu strategii koncentrycznej. Wartość napięcia sprężyny śrubowej w nagniataku wynosiła $F_o=300$ [N].

Próbkę podzielono na cztery części. Na trzech polach prowadzono nagniatanie wg różnych strategii (rysunek 1-4).

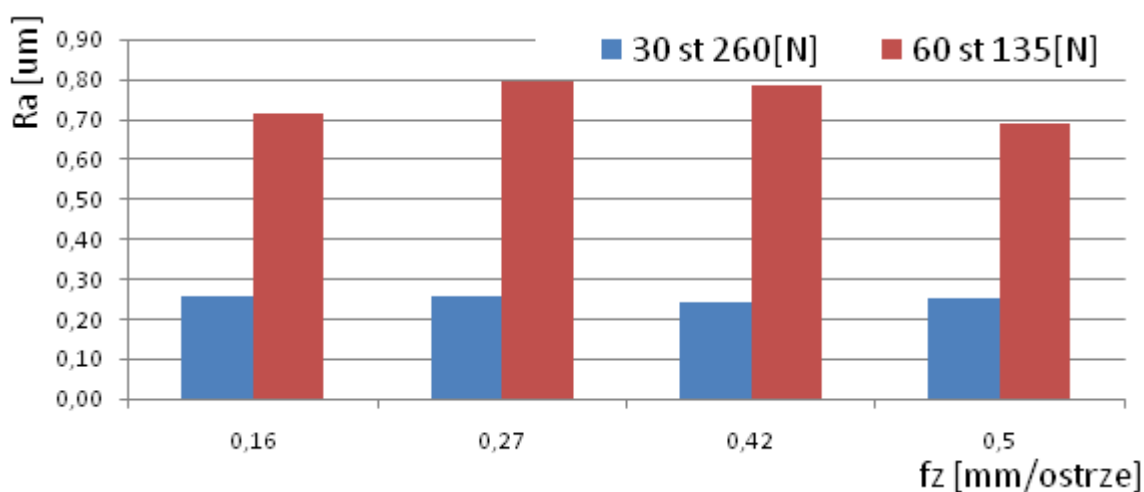


Rysunek 1-4. Strategie obróbki nagniataniem 1 - powierzchnia po frezowaniu koncentrycznym, 2 -strategia promieniowa, 3 – strategia równoległa, 4 – strategia spiralna.



Rysunek 1-5. Nagniatanie powierzchni miski a) obróbka wg strategii promieniowej, widok powierzchni przed i po obróbce, b) nagniatak w trakcie pracy.

Zanotowano istotne zmiany redukcji parametrów SGP uwarunkowane zmianami geometrii powierzchni obrabianej. W fragmentach części gdzie występują znaczne zmiany wartości kąta wzniosu, (spadku) α . zanotowano słabsze wyniki redukcji parametrów SGP.



Rysunek 1-6. Zmiana parametru Ra w zależności od kąta prowadzonej obróbki dla $f_{wn}=0.07$ [mm]

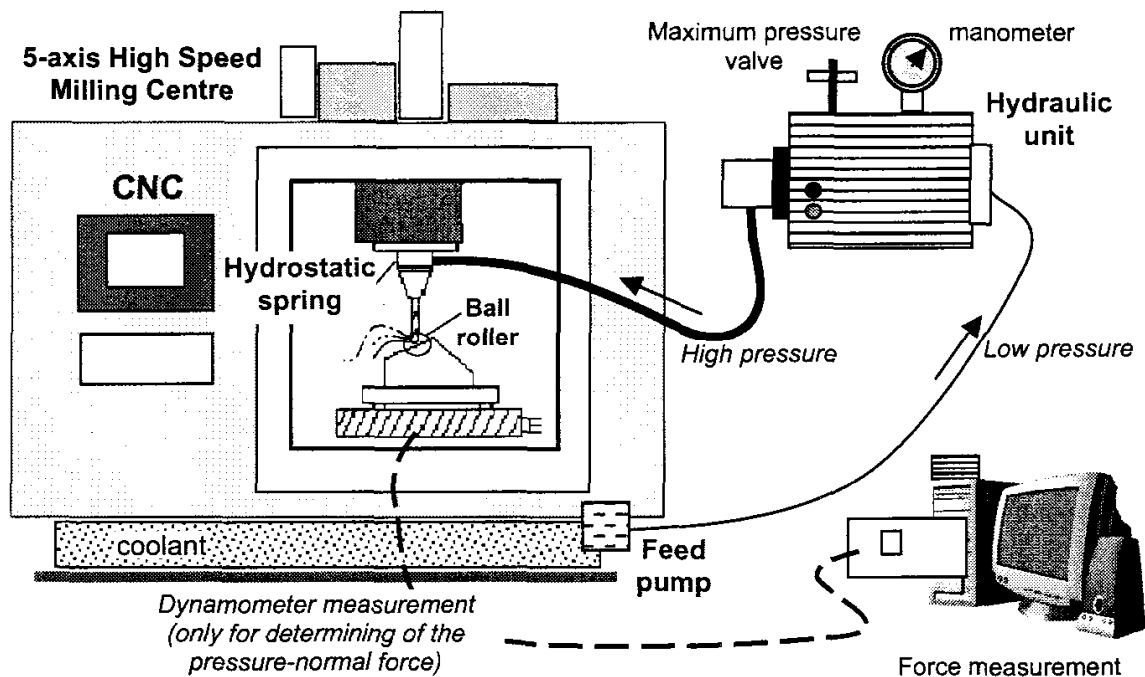
Powodem występowania miejsc o wyższej chropowatości po nagniataniu jest zmienna wartość siły nagniatania F_N (zależna od siły osiowej F_o nagniataka sprężystego i kąta nachylenia powierzchni α). Obserwowano znaczne różnice chropowatości będące następstwem zmian siły F_N .

Uzyskane wyniki pierwszych prac były zachęcające do szerszego podjęcia tematyki nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych. W pierwszej kolejności postanowiono pozbyć się wad stosowanego nagniataka prostego.

1.1.2. Badania z wykorzystaniem nagniataków hydrostatycznych

Pierwsze informacje o zastosowaniu nagniataków hydrostatycznych w pracach frezarskich [31] pochodzą z roku 2005. Autorzy przygotowali stanowisko na którym prowadzone były prace nad nagniataniem powierzchni 3D. Rysunek 1-7 przedstawia schemat stanowiska na bazie pięcioosiowego centrum obróbkowego.

Obrabiano części zamocowane na stole obrabiarki wyposażonej w siłomierz. Narzędzie zasilano z zewnętrznego układu hydraulicznego, który pracował na emulsji chłodząco smarującej zasysanej z instalacji obrabiarki. Próby prowadzono dla typowych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych do produkcji form wtryskowych matryc i tłoczników.

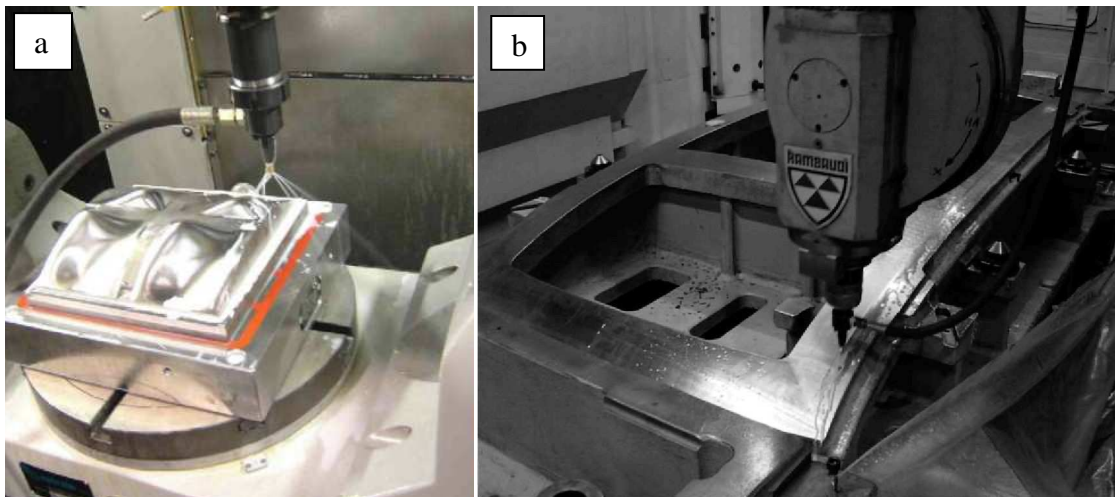


Rysunek 1-7. Stanowisko badawcze do nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych narzędziami hydrostatycznymi [31]

Pierwszym materiałem, była stal AISI. Po frezowaniu otrzymano $R_a = (1,04 \div 2,43) [\mu\text{m}]$, po nagniataniu $R_a = (0,07 \div 0,27) [\mu\text{m}]$. Jednocześnie odnotowano wzrost twardości powierzchni z 32 HRC do (36÷38) HRC. Autorzy uzyskali najlepsze wyniki przy ciśnieniu zasilania 200 [bar].

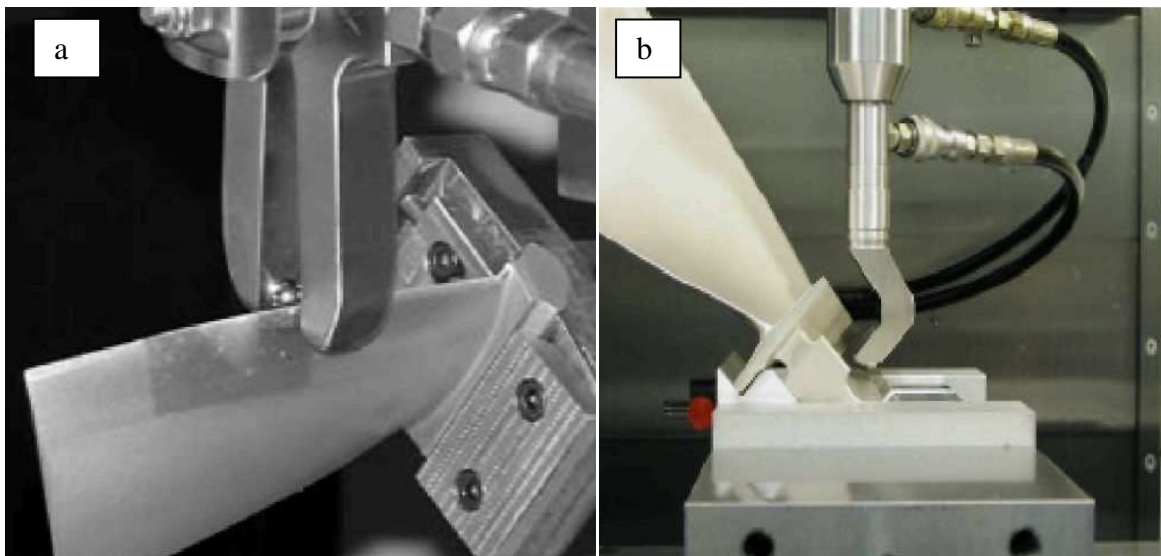
Drugą serię prób przeprowadzono na powierzchniach formy i tłoczniaka ze stali H13 o twardości 52 HRC. Po frezowaniu wartość $R_a = (1,46 \div 2,78) [\mu\text{m}]$, po nagniataniu: $R_a = (0,18 \div 0,45) [\mu\text{m}]$. Trzecią serię prób wykonano na tłoczniaku blach karoseryjnych. Tłoczniak składany zawierał elementy z trzech materiałów: żeliwa sferoidalnego GGG70 (ASTM 100-70-03) o twardości 280 HBN – z wybranymi powierzchniami hartowanymi indukcyjnie do twardości ~60 HRC, stali DIN 1.2379 (AISI D3) hartowanej do 63-64 HRC z napawaną warstwą stellitu Alloy 1 (28 HRC). Uzyskano mniejszą niż poprzednio poprawę parametrów SGP elementów twardych: żeliwo hartowane (R_a z 1,60 do 1,23 $[\mu\text{m}]$) oraz stal hartowana (R_a z 1,22 do 1,08 $[\mu\text{m}]$).

Fotografie z prób nagniatania przedstawia rysunek 1-8. Nagniatanie realizowano przy dość wysokiej wartości posuwu $v_b = 1500 [\text{mm}/\text{min}]$ oraz stałej wartości ciśnienia 200 [bar]. Ostatnie z opisywanych prób przyniosły znaczną redukcję wysokościowych parametrów SGP w żelwie miękkim o twardości 280 HBN (R_a z 1,45 do 0,27 $[\mu\text{m}]$) a także w stelicie (R_a z 0,51 do 0,13 $[\mu\text{m}]$),



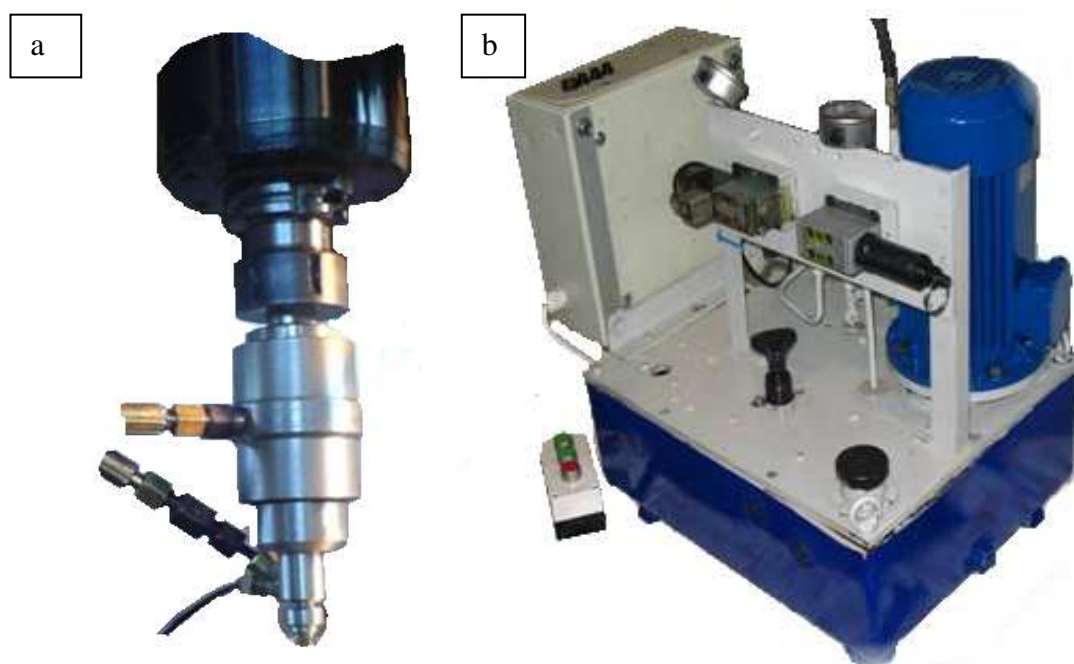
Rysunek 1-8. Przykłady części obrabianych na centach CNC narzędziami hydrostatycznymi: a) forma wtryskowa; b) tłocznik blach karoseryjnych [31]

Dysponując odpowiednimi rozwiązaniami narzędzi hydrostatycznych, w szczególnych przypadkach można prowadzić obróbkę powierzchni przedmiotów cienkościennych [53]. Na rysunki 1-9a pokazano nagniatanie powierzchni łopatek turbiny wykonanych ze stopu Ti-6Al-4V. Narzędzie zaciska się jednocześnie po obu stronach cienkościennego przedmiotu, dzięki czemu siły nagniatania równoważą się, nie odkształcając części. Obok rysunek 1-9b przedstawia nagniatanie narzędziem kątowym w obrębie zamka łopatki wykonanej ze stali nierdzewnej 17-4PH. Specyficzny kształt części jak i użytego oprzyrządowania wymagał skonstruowania, kąтового nagniataka, który podczas pracy nie powodowałby kolizji. W obu przypadkach prowadzono obróbkę umacniającą, celem polepszenia odporności na zużycie zmęczeniowe.



Rysunek 1-9. Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi na frezarkach CNC [53]; a) powierzchni łopatki turbiny silnika lotniczego; b) zamka

W roku 2006 w Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej zbudowano pierwsze stanowisko do nagniatania narzędziami hydrostatycznymi (rysunek 1-10)

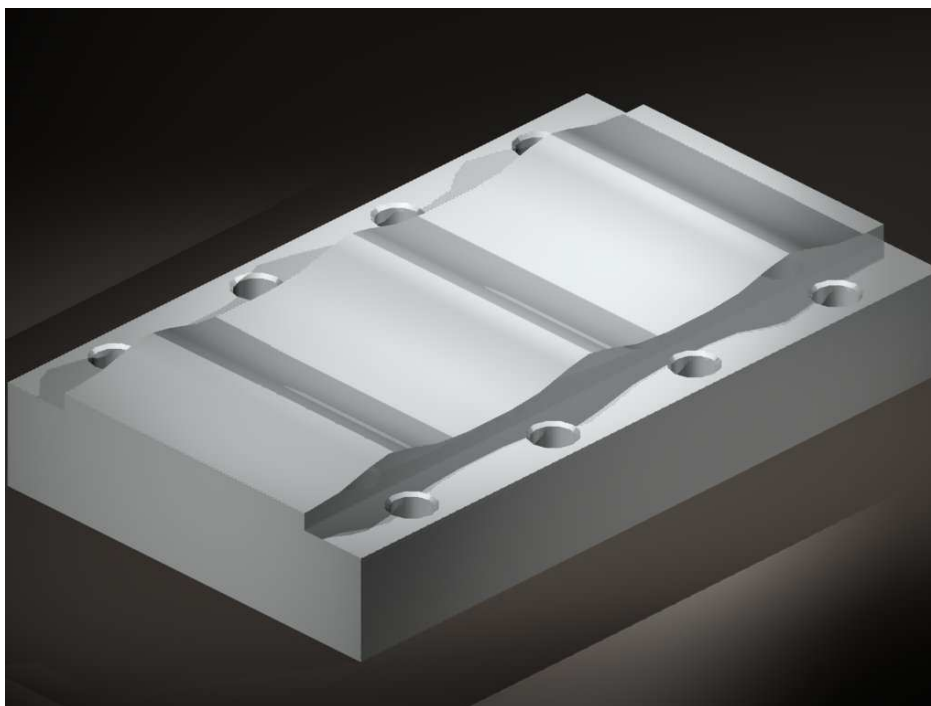


Rysunek 1-10. Elementy prototypowego stanowiska przygotowanego w ITM PS: a) nagniatyk hydrostatyczny prosty; b) olejowy zasilacz hydrauliczny [47]

Badania prowadzono na próbce o złożonym przestrzennie profilu (rysunek 1-11). Powierzchnię próbki podzielono na pola eksperymentalne, obejmujące fragment płaszczyzny oraz powierzchni wklęsłej i wypukłej. Sprawdzone wpływy skojarzonych technologicznych parametrów obróbki oraz strategii na stan końcowy SGP. Próbki frezowano i nagniatano z jednego zamocowania na centrum frezarskim MIKRON VCE 500. Składowe siły nagniatania F_N monitorowano za pomocą zewnętrznego siłomierza mocowanego na stole obrabiarki [47].

Po frezowaniu próbki (rysunek 1-12) otrzymano $R_a = (1,14 \div 4,14)$ [μm], przy czym największe wartości występowały na stromych fragmentach zarysu, najmniejsze na płaszczyznach w dolinach oraz na grzbietach fal. Korzystając z wyników pracy [45] do nagniatania przyjęto wierszowanie $f_{wn} = 0,07$ [mm]. Stosowano prędkości nagniatania od 500 do 8000 [mm/min].

Nie stwierdzono istotnego wpływu prędkości nagniatania na SGP oraz na zachowanie się obrabiarki i narzędzia.



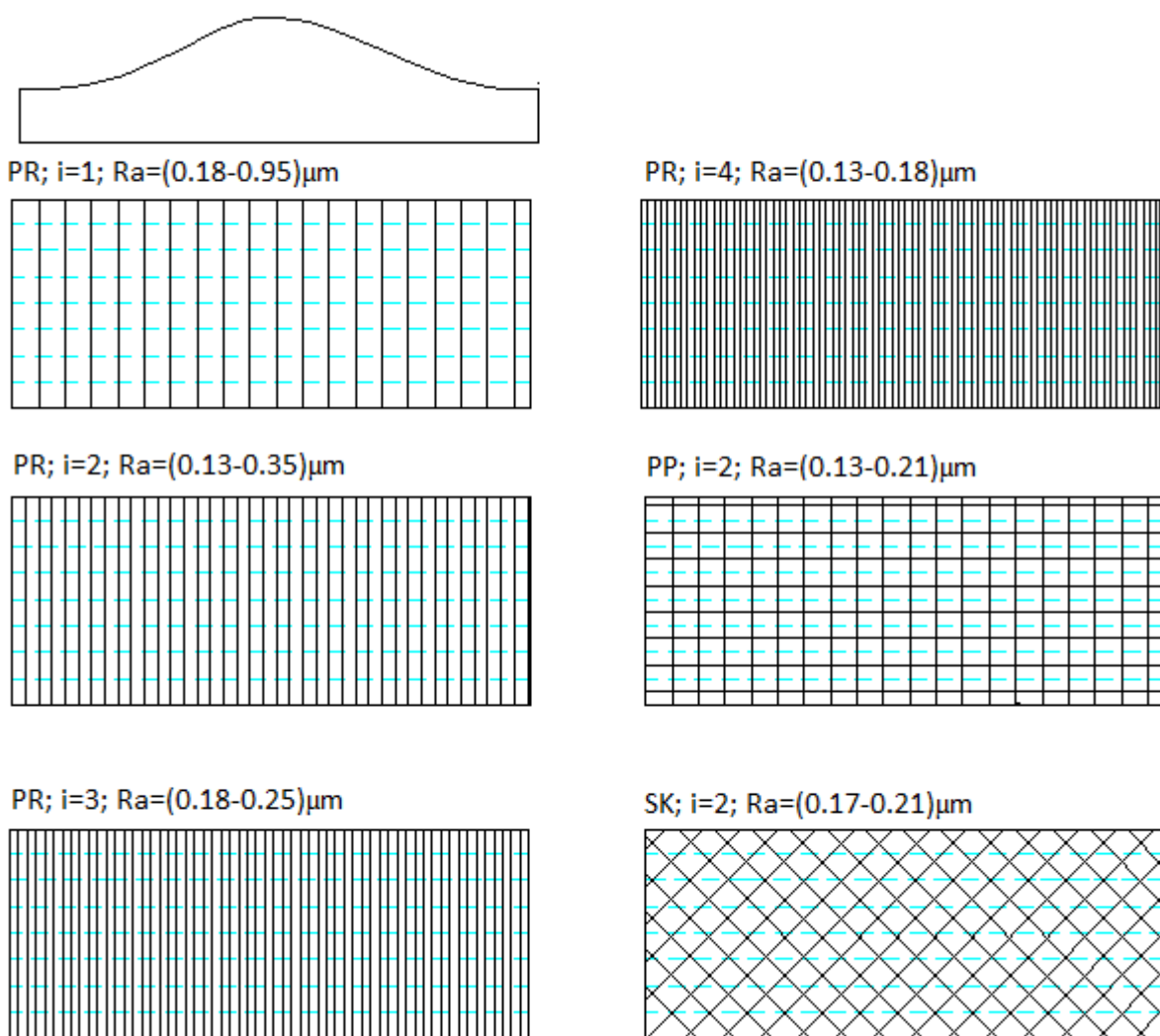
Rysunek 1-11. Widok próbki frezowanej i nagniatanej podczas badań z wykorzystaniem nagniataka hydrostatycznego prostego (stal C45 – 22HRC)

Nagniatano ze stałą siłą osiową ($F_o = \text{const}$), co przy zmiennym kącie nachylenia powierzchni i sterowaniu w trzech osiach dawało zmienną wartość siły normalnej nagniatania ($F_N = \text{var}$). W efekcie tego uzyskano chropowatość powierzchni na stromych zboczach zarysu znacznie większa od chropowatości na grzbietach i w dolinach fal. Zanotowano znaczną poprawę SGP a także zmniejszenie różnic parametrów chropowatości powierzchni w różnych obszarach dzięki nagniataniu w dwóch lub więcej przejściach.

Stwierdzono istotną zależność parametrów SGP w zależności od zastosowanej strategii nagniatania (rysunek 1-12). Zanotowano znaczną poprawę przy zwiększeniu liczby przejść nagniatania i odpowiednim doborze trajektorii narzędzi w obu sąsiadujących zabiegach. Uzyskano porównywalne wartości R_a stosując nagniatanie trzema bądź czterema przejściami prostopadle do śladów frezowania (strategia ortogonalna PR) – oraz nagniatanie dwoma przejściami prostopadłymi względem siebie (strategia podwójnie ortogonalna PP), a także skośnie względem śladów frezowania (strategia krzyżowa SK) – (rysunek 1-12).

Wyniki wstępnych badań z wykorzystaniem nagniataków hydrostatycznych tłokowych były zachęcające. W ITM ZUT w Szczecinie kontynuowano dalsze prace nad nagniataniem powierzchni złożonych na centrach obróbkowych. Wytyczono kierunki

prowadzenia prac na przyszłość obejmujące między innymi stan warstwy wierzchniej, optymalizację operacji a także prace rozwojowe nad stanowiskiem [46, 48].



Rysunek 1-12. Efekty nagniatania w zależności od zastosowanej liczby przejść nagniatających oraz trajektorii narzędzi przy frezowaniu i nagniataniu

W pracy [5] opisano sposób obróbki narzędziami hydrostatycznymi implantów medycznych używanych do rekonstrukcji stawów. Hydrostatyczne narzędzia i opracowaną technologię nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych wykorzystuje w produkcji firma Exactech (USA). Implanty wykonane ze stopów lotniczych tytanu Ti-6Al-4V, nagniatane są celem uzyskania ścisającego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej. Autorzy podają że dzięki opracowanej technologii o 33% wzrosła wytrzymałość zmęczeniową implantu.

W cytowanych źródłach poświęconych technologii obróbki przez nagniatanie powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC, prezentowane są końcowe rezultaty po nagniataniu.



Rysunek 1-13. Przykładowe implanty stawu biodrowego z oferty firmy Exactech

Autorzy nie podają wszystkich parametrów technologicznych obróbki poprzedzającej nagniatanie. Często brak jest informacji na temat chropowatości uzyskanej po frezowaniu. Podobnie jest w przypadku opisów procesu nagniatania, często zamiast wartości siły nagniatania F_N autorzy posługują się wartością ciśnienia, co przy braku informacji o średnicy tłoka w narzędziu uniemożliwia określenie rzeczywistej siły w procesie. Brak możliwości obiektywnej oceny uniemożliwia wzajemne porównanie efektów opisywanych prac.

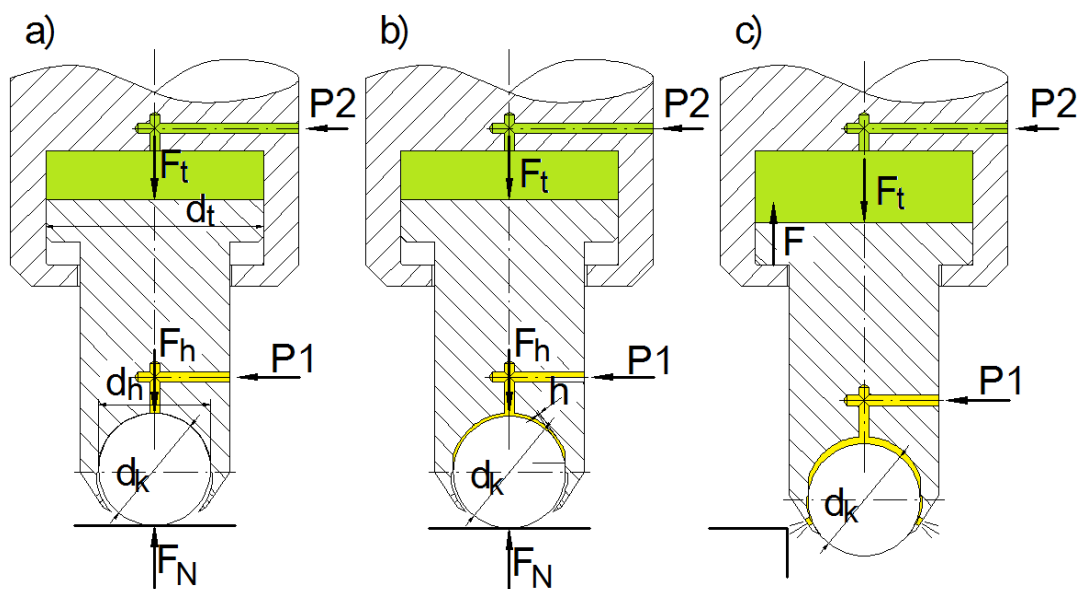
1.2. Narzędzia do obróbki powierzchni przestrzennych złożonych

Zainspirowane pracami [60, 61] próby doprowadziły do wykonania w Instytucie Technologii Mechanicznej Politechniki Szczecińskiej prototypowego jednokulkowego nagniataka sprężystego przeznaczonego do pracy na frezarkach CNC [45]. Wadą tego rozwiązania (rysunek 1-2) było zacieranie się kulki nagniatającej w panewce łożyska. Zmieniając charakter pracy narzędzia z naporowo – tocznego, na ślizgowe.

Sposobem gwarantującym zapewnienie płynności w ruchu tocznym kulki nagniatającej po powierzchni przedmiotu obrabianego jest zastosowanie łożyska hydrostatycznego. Badania własne jak również publikacje ostatnich lat [20, 31, 32, 80, 81], oparte na stosowaniu rozwiązania wg patentu A.Ostertaga [82] dowodzą, że zastosowanie w praktyce łożyska hydrostatycznego w narzędziach nagniatających gwarantuje osiągnięcie znacznej redukcji chropowatości powierzchni, wydłuża żywotność narzędzia umożliwia obróbkę materiałów ulepszonych cieplnie do bardzo wysokiej twardości [20].

1.2.1. Zasada działania nagniataka hydrostatycznego

Sposobem na uniknięcie wad nagniataków mechanicznych okazały się nagniataki hydrostatyczne, od około 20 lat z powodzeniem stosowane w pracach tokarskich. Zasada działania nagniataka hydrostatycznego wyjaśnia rysunek 1-14. W korpusie – cylindrze umieszczony jest tłok o średnicy d_t . Działająca nań ciecz o ciśnieniu P_2 generuje na tłoku siłę F_t .



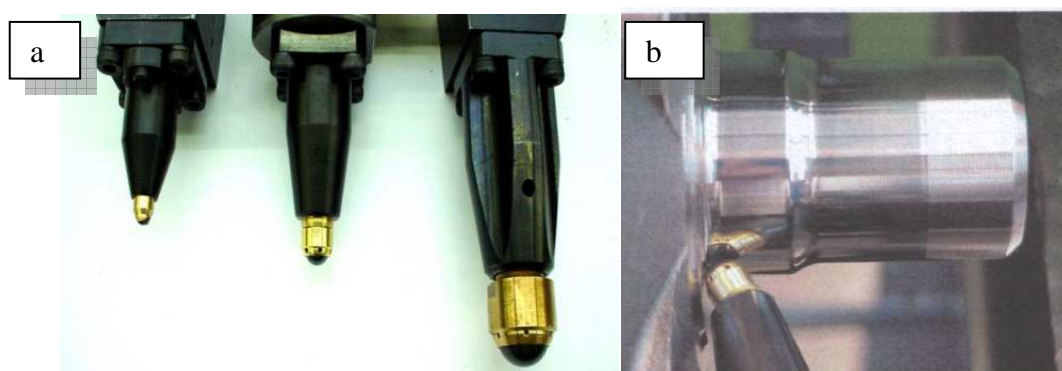
Rysunek 1-14. Zasada działania nagniataka hydrostatycznego

W dolnej części tłoka umieszczona jest kulka nagniatająca o średnicy d_k stykająca się z panewką na średnicy d_h . Jeśli w komorze nad kulką ciśnienie zasilania $P_1=0$, wówczas cała powstała nad tłokiem siła F_t przenoszona jest poprzez metalowy styk kulki z panewką łożyska. W tym momencie w narzędziu brak jest łożyska hydrostatycznego, (rysunek 1-14a). Wzrost ciśnienia P_1 powoduje, zmniejszenie siły przenoszonej przez metaliczny kontakt pary kulka – panewka do wartości $(F_t - F_h)$, gdzie F_h jest siłą działającą w komorze łożyska hydrostatycznego występuje częściowo odciążona podpora hydrostatyczna (rysunek 1-14b).

$$F_N = F_h \quad (1-1)$$

W chwili spełnienia zależności 1-1 zaistnieją warunki utworzenia się łożyska hydrostatycznego. Wówczas pomiędzy kulką i panewką wytworzy się szczelina h umożliwiającą przepływ cieczy i powstanie w pełni łożyskowania hydrostatycznego kulki. W chwili gdy nastąpi przerwanie kontaktu kulki z przedmiotem obrabianym spowodowane zostanie przesunięcie tłoka w skrajne dolne położenia, wówczas też nastąpi

wypływ cieczy z łożyska hydrostatycznego przez promieniowe otwory w dolnej części obejmują kulki dzięki czemu nastąpi spadek ciśnienia P_1 . Narzędzie jest w ten sposób zabezpieczone przed wystrzeleniem kulki. Całą siłę F_t przejmuje korpus narzędzia (rysunek 1-14c). Narzędzie umożliwia swobodny w pewnym zakresie przesuw końcówki nagniatąka, po powierzchni przedmiotu obrabianego, bez konieczności sterowania w osi Z. Jest to niewątpliwie dużą zaletą narzędzia. Przedstawiona koncepcja działania nagniatąka hydrostatycznego została opatentowana przez A.Ostertaga w 1989 roku [82] znalazła również zastosowanie w narzędziach do nagniatania produkowanych przez firmę Ecoroll [81].



Rysunek 1-15. Narzędzia produkowane przez firmę ECOROLL: a) typoszereg nagniataków hydrostatycznych do nagniatania na tokarkach; b) nagniatanie sworznia osi koła samochodowego [81]

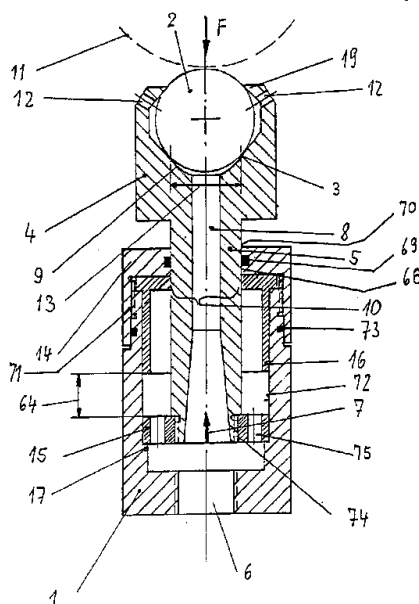
Narzędzia hydrostatyczne głównie wykorzystywane są do nagniatania na tokarkach [20]. Na rysunku 1-15a przedstawiono typoszereg narzędzi hydrostatycznych oferowanych przez firmę ECOROLL, jako przykład obróbki przedstawiono nagniatanie powierzchni osi koła samochodu (rysunek 1-15b), gdzie obok obróbki gładkościowej, prowadzona jest obróbka umacniająca w obrębie karbów.

1.2.2. Przegląd rozwiązań nagniataków hydrostatycznych

Koncepcyjne rozwiązania narzędzi zostały opisane w patencie zgłoszonym na terenie Niemieckiej Republiki Federalnej, autorem był A. Ostertag [82]. Przewidziano w konstrukcji narzędzia hydrostatyczne łożyskowanie elementu nagniatającego oraz wywarcie siły nagniatania za pomocą hydrauliki.

Element nagniatający 2 osadzony jest luźno w końcówce narzędzia (łożysku) 4, ta z kolei zamocowana jest suwliwie w korpusie 1. Ruch końcówki 4 jest ograniczony z jednej strony pokrywą 14, z drugiej zaś zderzakiem 17, na którym opiera się związana

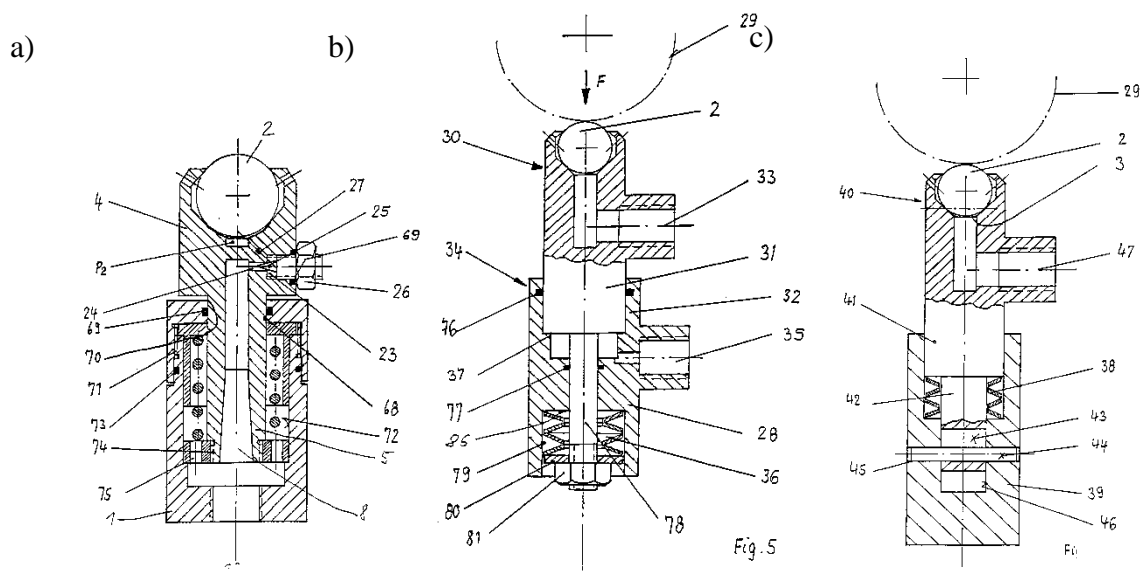
z końcówką tuleja prowadząca 15. Siła osiowa F_0 powstaje pod wpływem ciśnienia cieczy podanej przez króciec przyłączeniowy 6, na powierzchnię czynną tłoka 10 (rysunek 1-16).



Rysunek 1-16. Schemat ideowy nagniatka hydrostatycznego [82]

Ta sama ciecz po pokonaniu kanału w końcówce roboczej zasila łożysko hydrostatyczne – siła nośna łożyska hydrostatycznego jest iloczynem zredukowanego ciśnienia oraz powierzchni czynnej kulki 13. Istotną wadą tego rozwiązania jest mała siła, powstająca w łożysku hydrostatycznym. Ciecz doprowadzona do łożyska hydrostatycznego 13, ma obniżone natężenie przepływu oraz ciśnienie. Może się okazać, że element nagniatający nie jest w pełni łożyskowany hydrostatycznie, a jedynie występuje częściowo odciążona podpora hydrostatyczna. Dlatego ważny jest stosunek pól powierzchni tłoka 10 oraz czaszy łożyska hydrostatycznego 13. Narzędzie generuje stałą siłę osiową F_0 niezależnie od wielkości wysunięcia końcówki roboczej, można ją również w łatwy sposób regulować i kontrolować. Jako zabezpieczenie przed wystrzeleniem elementu roboczego, w chwili utraty kontaktu z przedmiotem obrabianym przewidziano wykonanie promieniowych otworów w końcówce 4. Natomiast w tulei prowadzącej 15 przewidziano wykonanie otworów 75, jednak ich celem jest zapewnienie swobodnego przepływu cieczy, w trakcie ruchu końcówki w zakresie 64 powodując przemieszczenie tłoka bez zmian ciśnienia. Aby zapobiec przeciekom w miejscach połączeń elementów narzędzia zastosowano uszczelnienia 69, 71. Dla prawidłowego działania opisanego narzędzia istotnym jest aby siła osiowa F_0 , równa była sile generowanej w łożysku hydrostatycznym F_h , dlatego istotą tego rozwiązania jest uzyskanie odpowiedniego stosunku – zapewnienie równości pól 10 oraz 13.

W omawianym patencie [82] autor opisuje szereg różnych wariantów tego samego narzędzia. Do ciekawszych należy zaliczyć nagniatak, w którym wprowadzono możliwość regulacji siły F_h w łożysku hydrostatycznym poprzez zmianę nastawy dławika 25 – rysunek 1-17a.

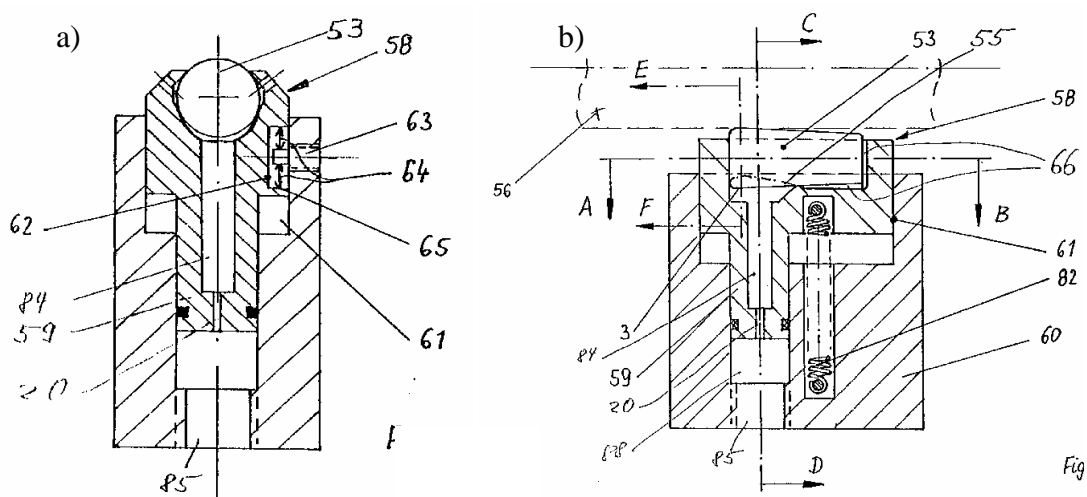


Rysunek 1-17. Narzędzia z regulacją siły nagniatania F_N oraz siły w łożysku hydrostatycznym F_h [82]:
a) regulowany dławik; b) narzędzie zasilane dwustrumieniowo; c) docisk mechaniczny

Proste rozwiązanie znacznie podniosło uniwersalność. Nagniatak można dość łatwo przystosować do chwilowych warunków pracy. Autor w swoim zastrzeżeniu patentowym prezentuje również narzędzie zasilane dwoma strumieniami cieczy hydraulicznej - rysunek 1-17b. Króciec pierwszy oznaczony numerem 33 doprowadza ciecz hydrauliczną do łożyska hydrostatycznego, drugi 35 zasila zespół tłok – cylinder. Wyrowadzenie zespołów regulacji poza narzędzie jest bardzo dobrym rozwiązaniem, pozwala na zmniejszenie gabarytów narzędzia. Dodatkową korzyścią jaką niesie za sobą takie rozwiązanie jest możliwość precyzyjnego sterowania ciśnieniami zasilania oraz łatwość wprowadzania korekt w trakcie pracy układu, a co za tym idzie również szybka zmiana siły nagniatania F_N bez przerywania obróbki. Nagniatak w chwili wyłączenia zasilania hydraulicznego powraca do ustalonej pozycji, ruch powrotny wywołany jest za pomocą sprężyn talerzowych 36, umieszczonych w chwycie. Ograniczeniem w zastosowaniu nagniataków dwustrumieniowych z oddzielnym zasilaniem łożyska hydrostatycznego jest króciec przyłączeniowy, który umieszczony w bezpośredniej bliskości kulki nagniatającej w istotny ogranicza swobodne programowanie trajektorii ruchu narzędzia podczas obróbki powierzchni przestrzennych złożonych. W konstrukcji narzędzia należy zadbać aby króciec zasilający obieg wysokiego ciśnienia przesunąć możliwie blisko części chwytowej.

W innym wariantcie narzędzia autor ograniczył się jedynie do zasilania łożyska hydrostatycznego (rysunek 1-17c) Siła osiowa F_0 pochodzi od mechanicznego układu sprężyn 38, których skok został ograniczony kołkiem 44. Rozwiązanie to jest dość prymitywne narzędzie zostało pozbawione łatwej możliwości regulacji siły w trakcie pracy.

Przy nagniataniu powierzchni przestrzennych złożonych, bez możliwości sterowania w pięciu osiach powstają składowe styczne siły nagniatania F_N , których kierunek i wartość są zależne od siły osiowej F_0 , oraz chwilowego punktu styku pomiędzy narzędziem i częścią obrabianą. Działanie sił stycznych może prowadzić do znacznych deformacji smukłych narzędzi nagniatających, w związku z tym autor proponuje usztywnienie nagniataka poprzez prowadzenie końcówki roboczej w korpusie narzędzia (rysunek 1-18a).



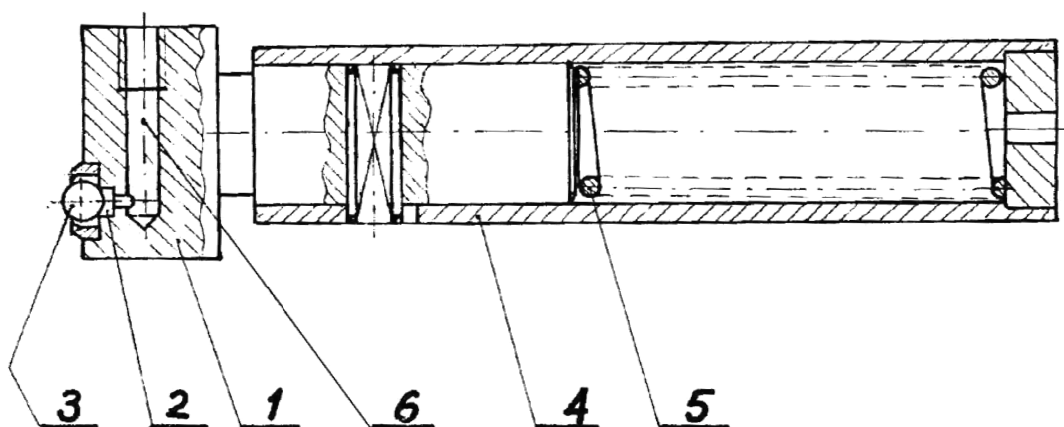
Rysunek 1-18. Modyfikacje narzędzi nagniatających [82]: a) dodatkowe usztywnienie końcówki roboczej; b) wprowadzenie łożyskowania hydrostatycznego rolek nagniatających

W narzędziach (rysunek 1-18b) gdzie elementami roboczymi są rolki nagniatające 53, autor stosuje w konstrukcji specjalne przesuwne wkładki 59, które są zamocowane w korpusie 60, dodatkowo uszczelnione. Do wkładki doprowadzona jest ciecz poprzez szczelinę dławiacą 20. Widać tu analogie do prezentowanego wcześniej narzędzia z kulistym elementem roboczym. W tym rozwiązaniu ruch powrotny końcówki nagniatającej jest realizowany dzięki naciągowej sprężynie śrubowej 82. Rozwiązanie takie doskonale nadaje się do zastosowania w narzędziach wielo-rolkowych przeznaczonych do obróbki otworów przelotowych.

Przytoczone zastrzeżenia patentowe autorstwa A. Ostertaga [82] są pierwszymi rozwiązaniami konstrukcji hydrostatycznych narzędzi do nagniatania. Autor zastrzega

jednocześnie bardzo wiele skomplikowanych wariantów konstrukcji narzędzi hydrostatycznych. Wiadomo, że na niektórych rozwiązaniach bazuje firma ECOROLL. Producent narzędzi jednak nie zdradza w swych katalogach informacji na temat stosowanych rozwiązań. Firma oprócz urządzeń proponuje również wsparcie swoim bogatym doświadczeniem we wdrażaniu technologii w różnych gałęziach przemysłu. Oferowana jest kompleksowa obsługa. Na zapotrzebowanie klienta zostają dobrane narzędzia i zasilacz, również zostaje przygotowany zestaw technologicznych parametrów obróbki. Nieświadomy użytkownik takiego systemu zobowiązany do stosowania technologii zgodnej z zaleceniami producenta. Przy stosowaniu w warunkach nie objętych umową handlową producent nie udziela gwarancji.

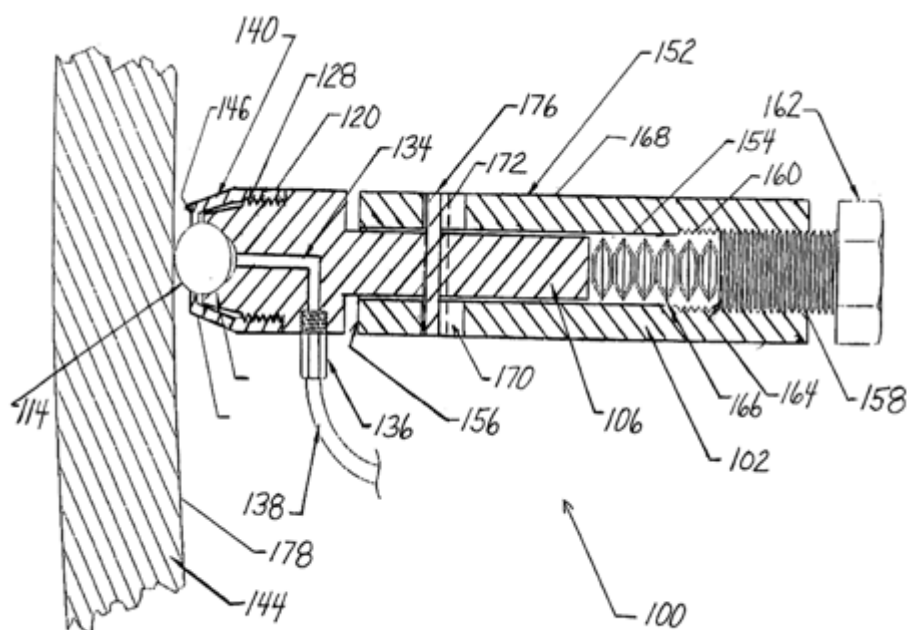
Podobne do prezentowanych powyżej rozwiązania narzędzi (A. Ostertag – rysunek 1-17c) odnaleźć można w bazach danych krajowego urzędu patentowego, gdzie kulka nagniatąca łożyskowana w sposób hydrostatyczny dociskana jest do powierzchni obrabianej za pomocą sprężyny śrubowej rysunek (1-19).



Rysunek 1-19. Nagniatak z hydrostatycznym łożyskowaniem kulki [84]

Przedstawione narzędzie (rysunek 1-19), zostało opatentowane w roku 1996 przez W. Przybylskiego i J. Zielińskiego. Kulka nagniatąca 3 utrzymywana jest przez oprawę łożyska hydrostatycznego 2. Narzędzie zasilane jest z zewnętrznego agregatu hydraulicznego poprzez otwór 6, wykonany w korpusie 1. Konstrukcja jak i zasada działania wskazuje na przeznaczenie narzędzia do pracy na tokarkach. Chwyć 4 jest wydrążony, w środku umieszczono sprężynę śrubowa 5 odpowiedzialną za utrzymanie stałej siły nagniatania F_N . Sprężyna 5 pełni jednocześnie rolę bezpiecznika.

Narzędzia zbliżone konstrukcją wykorzystujące zasadę pracy przedstawioną w opisach patentowych [82][84] odnaleźć można w zbiorach patentów USA[86]. Prosta konstrukcja gwarantuje pewną i niezawodną pracę.

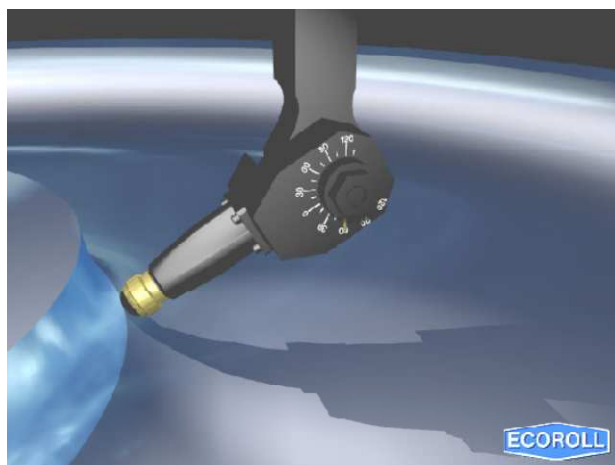


Rysunek 1-20. Nagniatak z dociskiem sprężystym i hydrostatycznym łożyskowaniem kulki [86]

W bazach danych można odnaleźć wiele opisów narzędzi hydrostatycznych przeznaczonych do obróbki powierzchni obrotowych, płaszczyzn oraz powierzchni elementów cienkościennych. Najczęstszą ideą łączącą koncepcje narzędzi jest zastosowanie łożyska hydrostatycznego do zagwarantowania poprawnej pracy elementu nagniatającego. Prezentowane w opisach patentowych narzędzia najczęściej wykazują drobne różnice w konstrukcji szczegółów technicznych odpowiedzialne za regulację przepływu i sterowanie ciśnieniem cieczy hydraulicznej. Czasem patentowane są wyspecjalizowane rozwiązania konstrukcji narzędzi hydrostatycznych umożliwiające obróbkę przedmiotów w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej.

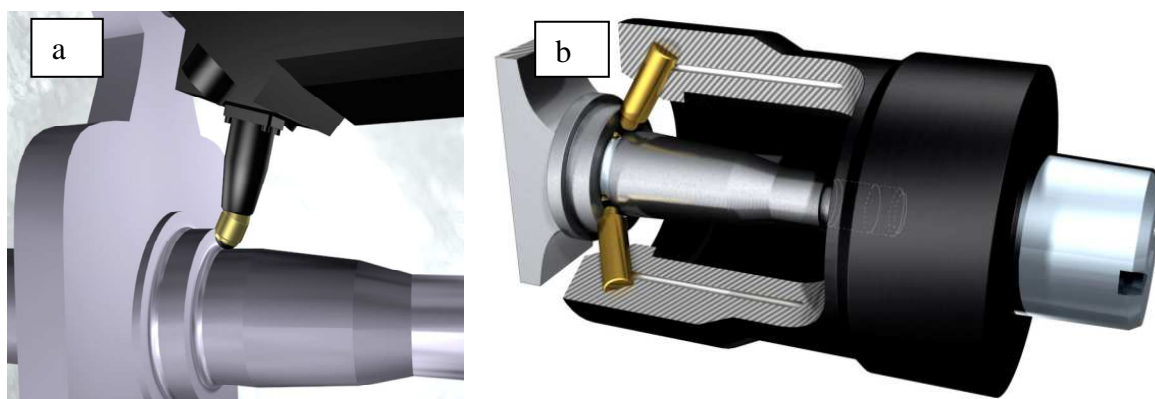
Firma ECOROLL jest jedną z nielicznych firm, która wyspecjalizowała się w produkcji nagniataków hydrostatycznych. Oferowane przez producenta narzędzia pozwalają na obróbkę stali ulepszonych cieplnie do twardości 60 [HRC]. W ofercie niemieckiego producenta odnaleźć można narzędzia i wyposażenie zasilające przystosowane do pracy przy ciśnieniach rzędu 700 [bar]. Kulka nagniatająca wykonana jest ze spieku ceramicznego, którego składu firma nie ujawnia. W prospektach reklamowych firmy [80, 81] prezentowane są różne przykłady praktycznego

wykorzystania narzędzi hydrostatycznych podczas nagniatania powierzchni obrotowych na tokarkach. Rozwiązania techniczne zastosowane w prezentowanych nagniatkach są bardzo interesujące.



Rysunek 1-21. Nagniatanie powierzchni kształtowej narzędziem kątowym z regulacją pozycji

Częstym zastosowaniem narzędzi oferowanych przez Ecoroll jest obróbka umacniająca. Firma dysponując bogatym doświadczeniem także w tym obszarze obróbki wspomaga klientów w doborze optymalnej konstrukcji narzędzia, oferując również wsparcie w opracowaniu technologii.

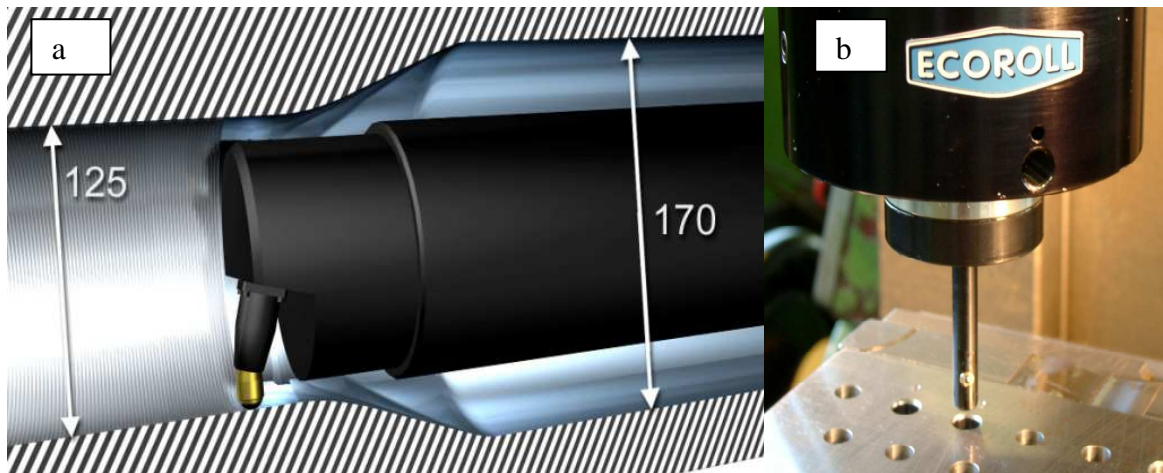


Rysunek 1-22. Nagniatanie karbów [81]: a) narzędziem hydrostatycznym jednokulkowym; b) wielokulkową głowicą hydrostatyczną

Oprócz nagniatków jednokulkowych firma w swej ofercie posiada szeroką gamę specjalnych narzędzi hydrostatycznych z kulkami ceramicznymi do nagniatania otworów przelotowych (rysunek 1-23). Oraz narzędzia do nagniatania precyzyjnych otworów wytaczanych (rysunek 1-24a), oraz otworów krótkich o małej średnicy (rysunek 1-24b).

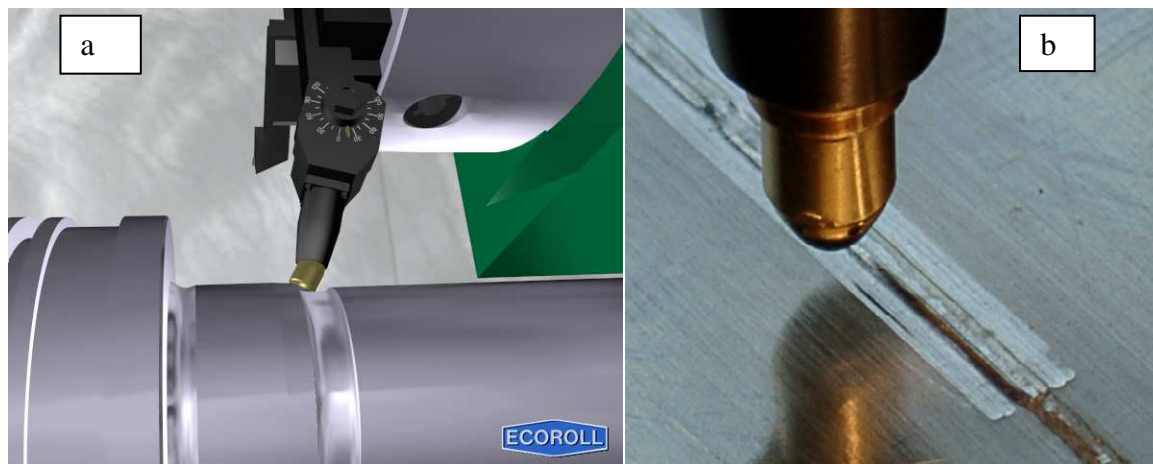


Rysunek 1-23. Nagniatak hydrostatyczny do nagniatania otworów przelotowych



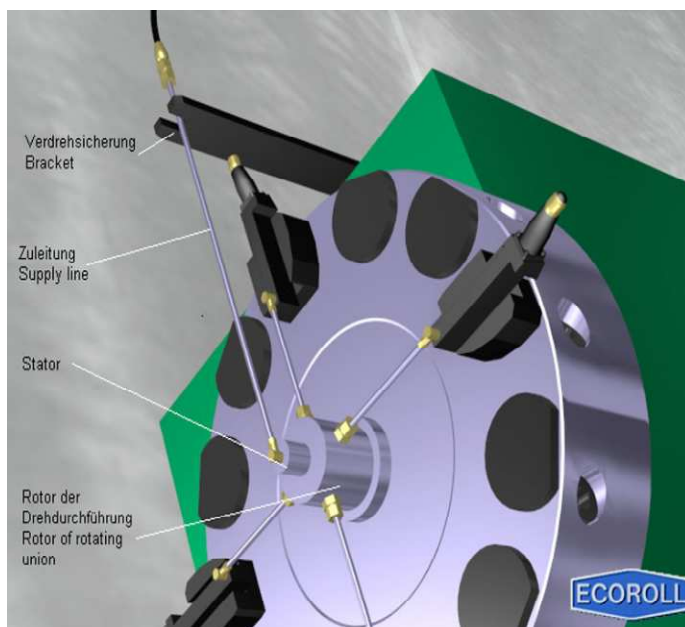
Rysunek 1-24. Nagniatki z oferty Ecoroll do nagniatania: a) wewnętrznych powierzchni walcowych; b) otworów krótkich o małej średnicy

Firma Ecoroll proponuje nagniatanie powierzchni części po operacjach zgrzewania i spawania. Obróbka spoin pozwala na redukcję wpływu negatywnego oddziaływania naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej będących następstwem lokalnego oddziaływania źródła ciepła. Przy okazji można uzyskać poprawę walorów estetycznych złącza spajanego (rysunek 1-25b).



Rysunek 1-25. Zastosowanie narzędzi firmy Ecoroll do nagniatania: a) połączeń zgrzewanych tarciowo; b) połączeń spawanych

W ofercie firmy Ecoroll odnaleźć można kompletne systemy, które po zamontowaniu na konwencjonalnych obrabiarkach skrawających powodują specjalizację maszyny pod nagniatanie. Rysunek 1-26 przedstawia głowicę rewolwerową czteronarzędziową. Dzięki takiemu rozwiązaniu w łatwy sposób można przestawić obrabiarkę na prowadzenie obróbki przedmiotów technologicznie podobnych. Wszystkie narzędzia zamontowane w głowicy zasilane są z jednego centralnego źródła.



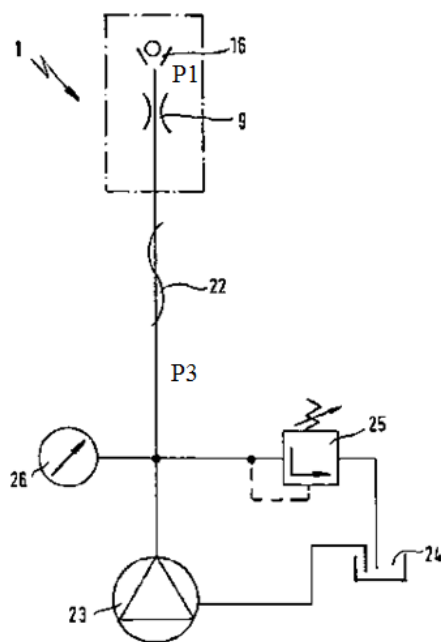
Rysunek 1-26. Głowica rewolwerowa czteronarzędziowa

Firma Ecoroll bardzo ostrożnie podchodzi do rozpowszechniania dokumentacji technicznej oferowanych przez siebie narzędzi oraz hydraulicznych układów zasilających. W broszurach reklamowych i na stronach internetowych ciężko jest odnaleźć jakiegokolwiek schematy konstrukcyjne. Najwięcej informacji dotyczących budowy narzędzi uzyskano z przeprowadzonego przeglądu rozwiązań patentowych i badań własnych.

1.3. Zasilanie hydraulicznych narzędzi do nagniatania

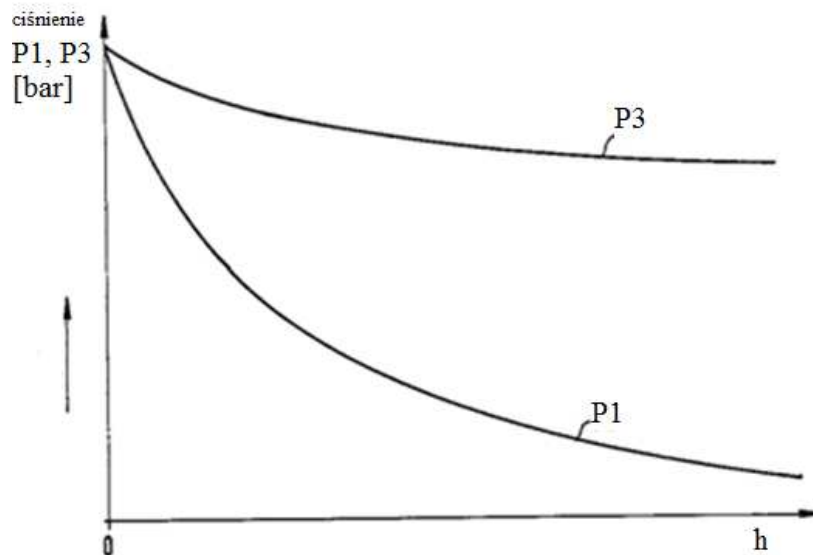
W literaturze hydrauliczne urządzenia zasilające narzędzia do nagniatania są bardzo często pomijane. Spotykane opisy sprowadzają się jedynie do podania rodzaju cieczy i wartości ciśnienia z jaką realizowano obróbkę. Autorzy nie podają parametrów technicznych (maksymalne ciśnienie pracy, rodzaj i wydajność pompy głównej), ani schematów hydraulicznych używanych zasilaczy. Wyjątkiem są publikacje własne będące efektem prowadzonych prac badawczych [46, 47, 48]. Proste opisy urządzeń zasilających nagniataki hydrostatyczne umieścił w swoim zgłoszeniu patentowym A.Ostertag [82].

Układ przedstawiony na rysunku 1-27 jest bardzo prosty. Służyć może jedynie do zasilania narzędzi jednobiegowych lub łożyska hydrostatycznego narzędzi z dociskiem sprężystym. Sercem układu jest pompa 23 generująca ciśnienie cieczy P3, która po przejściu przez dławik 9 zasila komorę łożyska hydrostatycznego ciśnieniem P1. Do kontroli oraz regulacji ciśnienia służy manometr 26 oraz zawór przelewowy 25. Narzędzie wraz z zasilaczem podłączone jest jednym przewodem elastycznym 22. Cała objętość cieczy hydraulicznej krąży w obiegu zamkniętym.



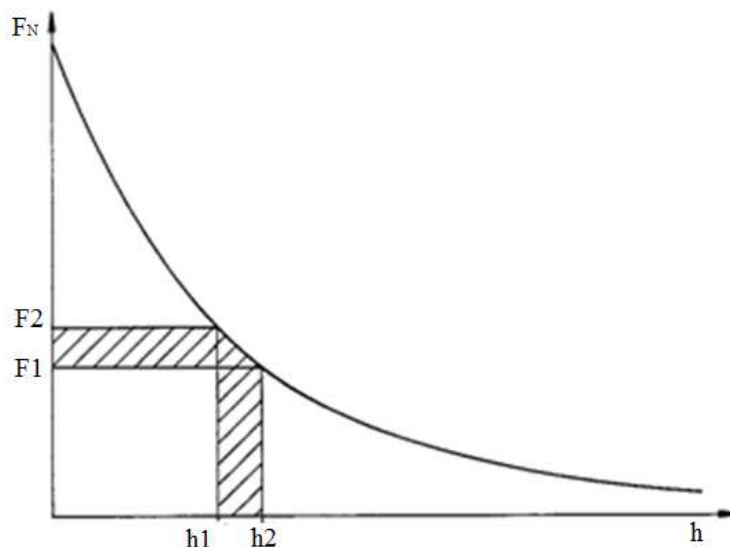
Rysunek 1-27. Proponowane rozwiązanie zasilacza hydraulicznego [82]

Autor na podstawie różnicy ciśnień P3 przed i P1 za dławikiem określa charakter pracy narzędzia (rysunek 1-28). W czasie gdy ciśnienie P1 w łożysku hydrostatycznym, jest mniejsze od ciśnienia zasilania P3, spełnione są warunki pracy elementu roboczego. Rozwinięte jest wówczas w pełni łożyskowanie hydrostatyczne. W chwili gdy wartość ciśnienia P1 zaczyna zbliżać się do wartości P3, łożysko hydrostatyczne zaczyna zanikać, powstaje częściowo odciążona podpora hydrostatyczna. Niebezpiecznym może okazać się moment podczas, którego dojdzie do zamknięcia przepływu przez łożysko hydrostatyczne (kulka zostanie dociśnięta do stożkowego gniazda). Wówczas ciśnienia P1 i P3 wyrównają się. Całość strumienia cieczy zostaje skierowana do komory tłokowej narzędzia. Powodując chwilowy wzrost wartości siły nagniatania F_N . W przypadku źle nastawionego zaworu przelewowego 25 w układzie (rysunek 1-27) niekontrolowany wzrost może doprowadzić do zaburzenia procesu nagniatania, lub też uszkodzenia narzędzia. Rozwiązanie bardzo proste, jednak jak się okazuje nie jest pozbawione poważnych wad.



Rysunek 1-28. Zmiana ciśnienia P1, P3 w zależności od szerokości łożyska hydrostatycznego h

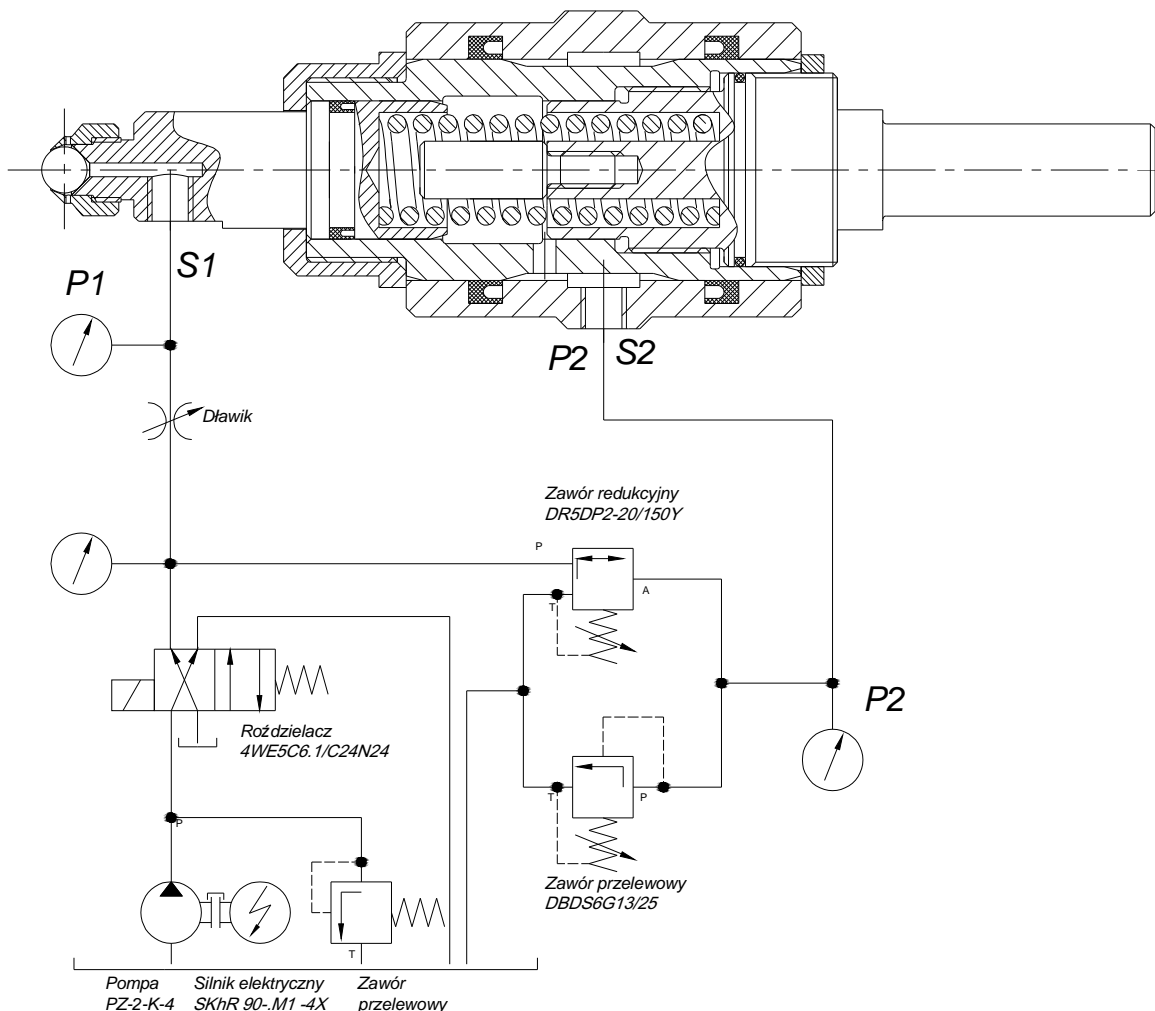
Innym problemem mającym wpływ na efektywność obróbki, są oscylacje siły nagniatania. Powstają na skutek zmiany położenia elementu roboczego, względem panewki łożyska – np. nagniatanie powierzchni o dużej chropowatości. Zmienna w czasie szerokość łożyska hydrostatycznego a doprowadza do ubytku (lub wzrostu) wartości ciśnienia cieczy zasilającej komorę łożyska hydrostatycznego. Autor patentu [82] ilustruje wpływ zmiany szerokości szczeliny h na wartość siły nagniatania F_N w sposób przedstawiony na rysunku 1-29.



Rysunek 1-29. Zależność siły nagniatania F_N od szerokości szczeliny łożyska hydrostatycznego h

Problemu przedstawionego przez A.Ostertaga da się uniknąć stosując narzędzia hydrostatyczne z dociskiem mechanicznym.

Po badaniach własnych zdecydowano się na stosowanie dwuobiegowych nagniataków z dociskiem hydraulicznym. W ten sposób ominięto problem zakłóceń wartości siły nagniatania na skutek oscylacji wartości ciśnienia cieczy doprowadzanej do narzędzia. W zbudowanym zasilaczu niezależne można sterować wartością ciśnienia P1 w łożysku i w komorze tłokowej P2.



Rysunek 1-30. Dwustrumieniowy olejowy układ hydraulicznego zasilania prototypowego nagniataka jedno-kulkowego

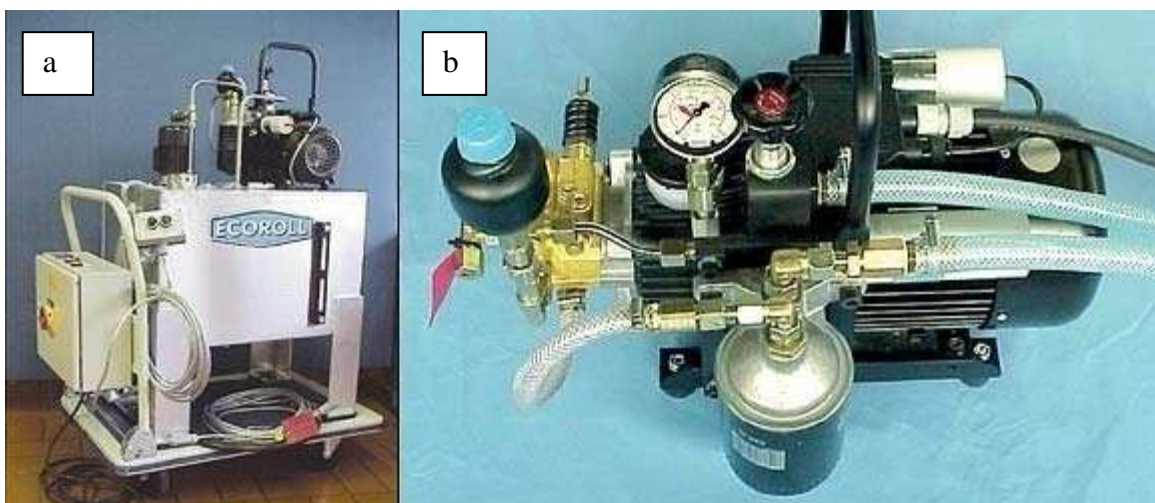
Prezentowany układ (rysunek 1-30) składa się z pompy zębatej PZ-2-K-4. Na wyjściu z pompy podłączono zawór przelewowy, dzięki któremu możliwa jest regulacja ciśnienia zasilania łożyska hydrostatycznego P1 w strumieniu S1. Załączenie rozdzielacza 4WE5C6.1/C24N24 powoduje zasilenie komory łożyska hydrostatycznego nagniataka. W sytuacji gdy brak jest napięcia na cewce rozdzielacza pompa w całości przetłacza olej przez króciec przelewowy. Głównym celem tego rozwiązania jest ułatwienie rozruchu silnika elektrycznego, którego start odbywa się bez obciążenia pompy ciśnieniem P1. Komora łożyska hydrostatycznego podłączona jest poprzez dławik i przewód elastyczny

z zasilaczem. Komora tłokowa zasilana ciśnieniem zredukowanym P2, ze strumienia S2 połączona jest z zasilaczem hydraulicznym również za pomocą przewodu elastycznego. Do redukcji ciśnienia z P1 na ciśnienie P2 działające na czynną powierzchnię tłoka nagniatąka służy zawór redukcyjny DR5DP2-20/150Y.

Groźnymi sytuacjami są momenty gdy podczas pracy trajektoria narzędzia nie będzie równoległa do zarysu powierzchni przedmiotu obrabianego. Zaistnieć może wówczas potrzeba wydłużenia bądź skrócenia długości narzędzia. W przypadku skrócenia zmniejszeniu ulegnie objętość komory tłokowej. Nagła próba skrócenia narzędzia, będzie powodować chwilowy wzrost siły nagniatania, przez co można doprowadzić do uszkodzenia powierzchni przedmiotu obrabianego, narzędzia w skrajnym przypadku obrabiarki. Za utrzymanie stałego ciśnienia P2 oraz upuszczenie nadmiaru oleju ze zmniejszającej swoją objętość komory tłokowej odpowiedzialny jest zawór przelewowy DBDS6G13/25 użyty w układzie równoległe z zaworem redukcyjnym. Nastawy zaworów należy wykonać na tę samą wartość ciśnienia P2. W praktyce uwzględniono bezwładność w działaniu zaworów przelewowego i redukcyjnego. W drodze eksperymentu dobrano odpowiednio niższą nastawę zaworu przelewowego w stosunku do zaworu redukcyjnego. Informacji na temat ciśnień w układzie dostarczały manometry analogowe.

Przedstawiony zasilacz hydrauliczny odznacza się wysoką sprawnością działania i niezawodnością. Ograniczeniem w eksploatacji jest dosyć mała pojemność zbiornika przez co występuje szybkie nagrzewanie układu, Występujący spadek lepkości kinematycznej oleju powoduje zmiany ciśnienia i wydajności. Brak układu regeneracji powracającego oleju, powoduje znaczne ograniczenie czasu, w którym możliwa jest obróbka. Wspomnianych wad można łatwo uniknąć wprowadzając dodatkowy zbiornik (tzw. odstojnik) oraz układ filtrów wraz z układem chłodzącym.

Większość narzędzi z oferty firmy Ecoroll zasilanych jest z zewnętrznych zasilaczy hydraulicznych wykorzystujących ciecz chłodząco – smarującą dostępną na obrabiarkach skrawających. Proponowane układy zasilania umożliwiają współpracę z różnymi rodzajami narzędzi, posiadają również możliwość regulacji parametrów pracy wpływając na technologiczne parametry nagniatania. Firma Ecoroll proponuje dwa typy układów oznaczone symbolem HGP (rysunek 1-31).



Rysunek 1-31. Zewnętrzne układy zasilania narzędzi hydrostatycznych oferowane przez ECOROLL:
a) układ HGP 3.7; b) układ HGP 3.0 [80]

Sposób oznaczania zasilaczy określa wielkość spośród typoszeregu standardowych układów. Pierwszy człon nazwy odpowiada maksymalnemu ciśnieniu pracy (HGP3, HGP4). Doboru urządzenia należy dokonać w zależności od średnicy i ilości elementów nagniatających we współpracującym narzędziu (tabela 1-1).

Tabela 1-1. Typoszereg jednobiegowych zasilaczy hydraulicznych oferowanych przez firmę Ecoroll [80]

Typ agregatu	Maksymalne ciśnienie pracy [bar]	Maksymalna ilość elementów nagniatających (rodzina narzędzi HG)				
		HG2	HG3	HG6	HG13	HG25
HGP3	200	12	10	8	6	6
HGP4	400	5	4	3	2	2

Drugi człon nazwy wiąże się z wariantem konfiguracji urządzenia. Dostępne są ręczne zasilacze działające na zasadzie włącz - wyłącz, gdzie nie ma możliwości regulacji wydajności i ciśnienia. Najbardziej rozbudowane z oferowanych zasilaczy umożliwiają pełną regulację wszystkich parametrów pracy, posiadają również automatykę umożliwiającą włączanie i wyłączanie za pomocą sygnałów z układy sterowania obrabiarki CNC (tabela 1-2).

Tabela 1-2. Konfiguracje zasilaczy hydraulicznych firmy Ecoroll [80]

Oznaczenie	Opis zastosowanych funkcji
.0	Układ mobilny, transport ręczny włącznik START/STOP, bezpośrednie załączanie ciśnienia, brak skrzynki rozdzielczej.
.2	Układ mobilny, na wózku. Do nagniatania gładkościowego i umacniającego, ciśnienie wyrównane w akumulatorze, sterowane zaworem elektromagnetycznym. Załączanie ręczne lub za pomocą funkcji pomocniczych M z układu sterowania CNC maszyny, z skrzynką rozdzielczą.
.3	Układ zintegrowany z układem chłodzenia obrabiarki. Do nagniatania gładkościowego i umacniającego, ciśnienie wyrównane w akumulatorze. Załączanie za pomocą funkcji pomocniczych M z układu sterowania CNC maszyny, brak skrzynki rozdzielczej.
.4	Układ zintegrowany z układem chłodzenia obrabiarki. Do nagniatania gładkościowego i umacniającego, ciśnienie wyrównane w akumulatorze, sterowane zaworem elektromagnetycznym. Załączanie za pomocą funkcji pomocniczych M z układu sterowania CNC maszyny, brak skrzynki rozdzielczej.
.5	Układ mobilny, na wózku. Do nagniatania gładkościowego i umacniającego, ciśnienie wyrównane w akumulatorze, sterowane zaworem elektromagnetycznym. Załączanie ręczne, lub za pomocą funkcji pomocniczych M z układu sterowania CNC maszyny, z skrzynką rozdzielczą.
.7	Układ mobilny, na wózku. Do nagniatania gładkościowego i umacniającego, ciśnienie wyrównane w akumulatorze, sterowane zaworem elektromagnetycznym. Załączanie ręczne, lub za pomocą funkcji pomocniczych M z układu sterowania CNC maszyny, brak skrzynki rozdzielczej.

1.4. Wnioski z przeglądu literatury

Nagniatanie po frezowaniu w odróżnieniu od nagniatania powierzchni po toczeniu jest procesem znacznie bardziej skomplikowanym. Operację składająca się z dwóch zabiegów technologicznych należy traktować całościowo.

W przeprowadzonej analizie literatury odnaleziono niewiele publikacji mówiących o technologii i narzędziach do nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC. Nieliczne materiały (artykuły, materiały promocyjne) nie dają odpowiedzi na temat jak prowadzić nagniatanie gładkościowe po frezowaniu kształtującym.

Publikowane wyniki prac nad nagniataniem powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych, często są niepełne, brak jest dokładnych informacji na temat technologicznych parametrów obróbki, narzędzi, metod pomiaru i oceny wyników pracy.

W trakcie prowadzonego rozpoznania rozwiązań patentowych narzędzi do nagniatania wyszukano wiele konstrukcji odznaczających się wysokim stopniem skomplikowania. Wybrane rozwiązania wykorzystane są w narzędziach dostępnych w handlu – jednak ich konstrukcja jest strzeżoną tajemnicą firmy.

Nieliczni producenci narzędzi sprzedają kompletną technologię opracowaną na potrzeby klienta (narzędzie, zasilacz, parametry obróbki). Często nieświadomy użytkownik takiego systemu jest skazany na to co kupi. Producent nie daje gwarancji i nie ponosi odpowiedzialności w przypadku stosowania jego rozwiązania w warunkach nie objętych umową handlową.

2. Cele i program pracy

Celem pracy jest opracowanie konstrukcji hydrostatycznych narzędzi do nagniatania, powierzchni przestrzennych złożonych na wieloosiowych frezarskich centrach obróbkowych o średnicy kulki nagniatającej $d_k=10$ i 20 [mm]

Opracowane zostaną zasady racjonalnego doboru warunków (strategii i parametrów) frezowania kształtującego i wykończeniowego nagniatania dla uzyskania żądanej SGP przy obróbce typowych materiałów konstrukcyjnych o twardości 20 i 35 HRC. Przygotowane zostaną statystycznie doświadczalne zależności (zależność 2-1) umożliwiające dobór wartości parametrów technologicznych obu zabiegów obróbkowych, gwarantując osiągnięcie tzw. efektu synergii odznaczającego się minimum wartości wysokościowych parametrów SGP,

$$R_x = F(f_{wf}, f_{wn}, F_N) \quad (2-1)$$

gdzie R_x może być dowolnym wysokościowym parametrem określającym SGP.

Zasadnicza część badań prowadzona będzie na płaszczyznach, przy czym warunki obróbki będą odpowiadać warunkom panującym podczas obróbki powierzchni przestrzennych złożonych.

Opracowana zależność powinna umożliwić prognozowanie stanu SGP dla dowolnie przyjętych technologicznych parametrów frezowania i nagniatania bez względu na zarys powierzchni przedmiotu obrabianego, a przygotowane narzędzia i metody nagniatania powinny zagwarantować uzyskanie jednorodnej struktury SGP we wszystkich fragmentach powierzchni przestrzennej złożonej przedmiotu obrabianego.

Zostanie przeprowadzona weryfikacja wyników badań podczas obróbki powierzchni przestrzennych złożonych (wklęsłych i wypukłych) na pięcioosiowym centrum obróbkowym.

Podjęta zostanie próba określenia stanu warstwy wierzchniej po obróbce. Za pomocą nieniszczących metod pomiarów sprawdzona będzie postać i wielkość naprężeń po nagniataniu gładkościowym.

3. Przygotowanie stanowiska doświadczalnego

3.1. Narzędzia hydrostatyczne do nagniatania

Narzędzia do nagniatania na frezarkach CNC powinny odznaczać uniwersalnością tj. możliwością stosowania w szerokim zakresie zadań technologicznych.

Jednym z głównych czynników, na który należy zwrócić uwagę podczas nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych, to zakres przestrzeni roboczej dostępnej maszyny. Przedmiot obrabiany i stosowane oprzyrządowanie technologiczne w znacznym stopniu zmniejszają zakres możliwości swobodnego sterowania trajektorią narzędzia. Nagniatak hydrostatyczny, przypominający w swej budowie siłownik hydrauliczny charakteryzuje się znacznym wymiarem długościowym, co dodatkowo jeszcze ogranicza przestrzeń roboczą. Z drugiej strony pożądanym jest aby nagniataki proste miały duży zakres swobodnego przesuwu wzdłuż osi narzędzia. Ta cecha chroni narzędzie przed błędami programowania ruchu, umożliwia szybkie ustawienie na obrabiarkę, a dzięki wykorzystaniu specjalnych układów hydraulicznego zasilania umożliwia nagniatanie bez programowania ruchu w osi Z. Zapewnienie swobodnego przesuwu wzdłuż osi narzędzia wymaga odpowiednio długich elementów korpusowych i prowadzących w parze tłoczek – cylinder. **Ogólną zasadą przy konstrukcji nagniataków hydrostatycznych powinno być projektowanie jak najkrótszego narzędzia z jak największym skokiem tłoka.**

Inną ważną cechą jest możliwość wywierania przez narzędzie siły osiowej F_o w szerokim zakresie. Dysponując układem hydraulicznym o znanej charakterystyce pracy przy projektowaniu narzędzi powinno się tak dobrać średnicę tłoka aby w przewidywanym zakresie sił nagniatania ominąć niestabilne zakresy pracy zasilacza. Oznacza to konieczność stosowania małych wartości średnicy tłoka w przypadku układów gdzie niestabilna praca występuje przy niskich ciśnieniach, i odwrotnie gdy układ hydrauliczny staje się niestabilny w wysokim zakresie ciśnień średnica tłoka projektowanego narzędzia powinna być odpowiednio większa.

Często w konstrukcji narzędzi wykorzystywane są elementy sprężyste, których działanie wpływa na wartość siły osiowej F_o . Sztywność takich elementów powinno się uwzględnić przyjmując poprawkę podczas wyznaczania średnicy tłoka.

W nagniatkach hydrostatycznych prostych występują połączenia koncentryczne wielu części (chwyt, korpus, tłok, końcówka łożyskowa, kulka nagniatająca). Przy konstrukcji narzędzia należy zwrócić uwagę aby ograniczyć wartość luzu w połączeniach suwliwych, jednocześnie ograniczając bicia powierzchni ustalających części składowych.

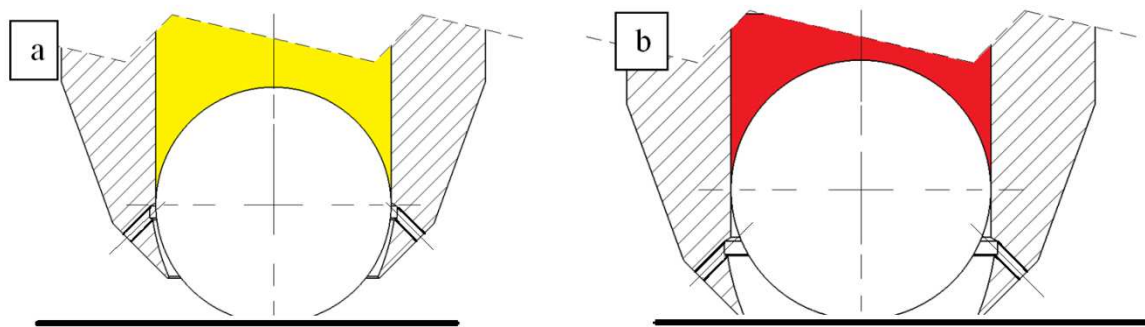
Luzy w narzędziu oraz wynikała mimośrodowość pomiędzy częścią chwytową, a kulka nagniatającą może okazać się problemem podczas programowania trajektorii ruchu narzędzia, szczególnie podczas obróbki powierzchni przestrzennych złożonych. Oprogramowanie CAM, kompletnie pokryje model części siatką wzdłuż, której będą realizowane ruchy rzeczywistego narzędzia, owe luzy i błędy mimośrodowości prowadzić mogą do pozostawienia fragmentów powierzchni nienagniecionych, szczególnie w miejscach szwów powierzchni oraz na ostrych załamaniach, gdzie nagle zmienia się kierunek wzdłuż którego prowadzona jest końcówka narzędzia nagniatającego.

3.1.1. Konstrukcja końcówki roboczej

Końcówka nagniatająca z łożyskiem hydrostatycznym nagniatka jednokulkowego jest jednym z najważniejszych elementów narzędzia. Od jej prawidłowego działania zależy zapewnienie płynności ruchu tocznego po powierzchni obrabianej wpływając na, trwałość kulki nagniatającej. Odpowiednio zaprojektowana końcówka musi zagwarantować utrzymanie kulki, w chwili gdy narzędzie straci kontakt z powierzchnią przedmiotu obrabianego. Odpowiednie zabezpieczenie w tym miejscu jest bardzo ważne gdyż do łożyskowania kulek nagniatających używa się wysokich wartości ciśnienia, często przekraczających 150 [bar]. Dobór rodzaju narzędzia i końcówki nagniatającej w znacznym stopniu podyktowany jest krzywizną powierzchni obrabianej.

W przeglądzie literatury przytoczono patenty, w których opisano chronione rozwiązania jednokulkowych narzędzi hydrostatycznych. Z części chronionych rozwiązań korzysta firma Ecoroll [82, 83], dokładnie jednak nie wiadomo, z których. Teoretycznie najlepszym sposobem wydaje się zastosowanie końcówki z łożyskiem hydrostatycznym – bezpanewkowym [83] rysunek 3-1. Taki sposób łożyskowania gwarantuje najmniejsze opory toczenia. Wykorzystanie bezpanewkowych końcówek podczas nagniatania, szczególnie podczas nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych jest bardzo trudne i wymaga szczególnej uwagi. Narzędzie o stałym wysięgu pozbawione docisku końcówki nagniatającej do przedmiotu musi być cały czas prowadzone normalnie do powierzchni obrabianej. A jakikolwiek błąd programowania trajektorii nagniatka, bądź chwilowy spadek wartości ciśnienia cieczy w łożysku hydrostatycznym (rysunek 3-1b) prowadzić

będzie do uszkodzenia powierzchni przedmiotu obrabianego i/lub narzędzia. Podczas wstępnych badań nad nagniataniem z wykorzystaniem narzędzi hydrostatycznych wielokrotnie obserwowano zjawiska w następstwie, których dochodziło do spadku ciśnienia cieczy (niesymetryczne obciążenie łożyska, wykruszenia powierzchni kulki, zakłócenia w działaniu zasilacza hydraulicznego itp.).

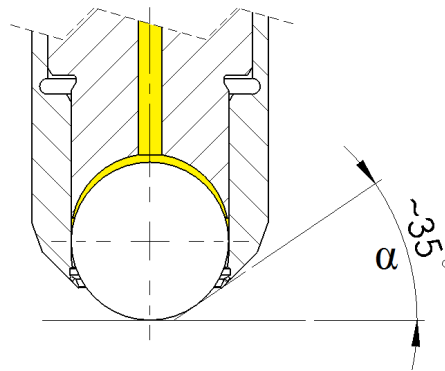


Rysunek 3-1. Bezpanewkowe łożyskowanie hydrostatyczne kulki nagniatającej: a) prawidłowa praca; b) zbyt mała wartość ciśnienia w łożysku

Na podstawie doświadczeń zebranych podczas wstępnych badań zdecydowano się przyjąć i rozwijać koncepcję łożyskowanych hydrostatycznie końcówek nagniatających z panewką. Stosowanie panewki pozwala przy chwilowym zmniejszeniu dopływu cieczy na prowadzenie obróbki w warunkach odciążonej podpory hydrostatycznej, w skrajnym przypadku (brak zasilania) końcówka będzie pracować w warunkach łożyskowania ślizgowego.

Projektując hydrostatyczne narzędzia do nagniatania napotkano na wiele niuansów, których rozwiązanie stanowi bogaty zbiór zebranych doświadczeń praktycznych.

Jednym z podstawowych problemów przy nagniataniu form wtryskowych matryc i tłoczników to szeroki zakres zmienności kąta α (nachylenia powierzchni przestrzennej złożonej – rysunek 3-2). Przy kompleksowej obróbce części gdzie występują jednocześnie powierzchnie poziome i pionowe, należy mieć do dyspozycji kilka narzędzi do pracy w określonym przedziale kątowym α . Projektując narzędzia do obróbki powierzchni przestrzennych złożonych ważne jest aby zakończenie utrzymujące w stałej pozycji kulkę nagniatającą nie ocierało w trakcie pracy o powierzchnię przedmiotu obrabianego. Dlatego należy odstąpić możliwie duży fragment czaszy kulistej, celem maksymalnego powiększenia kąta pracy narzędzia α . Dla opracowanej konstrukcji końcówki nagniatającej wartość kąta α nie może przekroczyć 35° . Zatem rodzina narzędzi z tego typu końcówkami musi składać się z trzech sztuk (α ; $0 \div 90^\circ$).

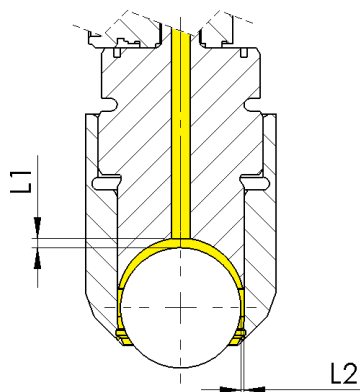


Rysunek 3-2. Ograniczenie kąta pracy α końcówki narzędzia hydrostatycznego

Do prawidłowego działania łożyska hydrostatycznego oprócz wymaganego ciśnienia cieczy hydraulicznej konieczne jest zapewnienie odpowiedniej grubości filmu olejowego. W tym celu projektowana końcówka powinna odznaczać się luzem osiowym (L_1 na rysunku 3-3). Aby kulka mogła się swobodnie odtaczać w panewce łożyska hydrostatycznego wymagany jest również luz promieniowy (L_2 – rysunek 3-3). Wymiary szerokości szczeliny można wyznaczyć z zależności 3-1 [10].

$$L_1 = d_k \cdot m_l \quad (3-1)$$

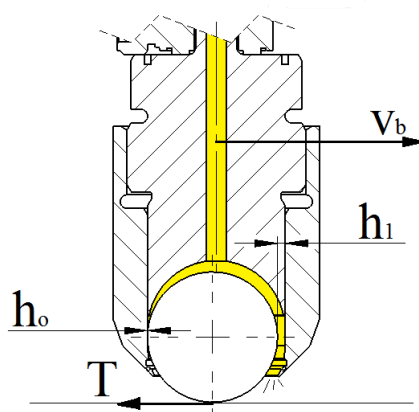
Gdzie d_k jest średnicą kulki nagniatącej a moduł luzu m_l przyjmuje się w przedziale $0.0005 \div 0.003$ [10]. Dla przykładowej końcówki narzędzia nagniatącego o średnicy 10 [mm] maksymalny luz osiowy L_1 nie powinien przekraczać wartości 0.03 [mm]. Wartość wyznaczonego luzu L_1 należy zapewnić w trakcie montażu.



Rysunek 3-3. Luzy w hydrostatycznej końcówce nagniatącej

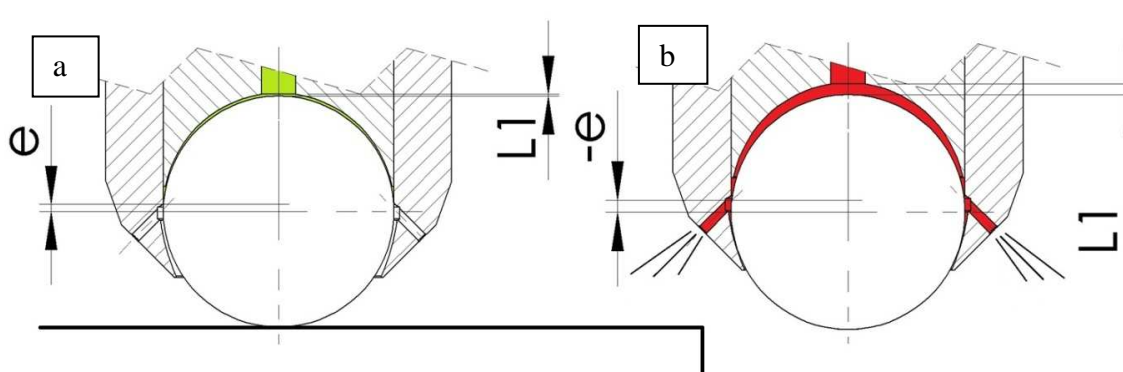
Podczas prób pracą prototypowych nagniataków obserwowano wielokrotnie większe przecieki przez łożysko hydrostatyczne od teoretycznie wyznaczonych. Głównym powodem takiego stanu rzeczy jest model łożyska przyjęty do obliczeń zakładający symetryczne obciążenie łożyska hydrostatycznego $h_0=h_1$. Praktyczne uzyskanie takich

warunków jest niemożliwe, ponieważ w trakcie nagniatania składowa siła tarcia T skierowana przeciwnie do wektora prędkości nagniatania v_b , będzie powodowała niesymetryczne $h_1 > h_0$ ustawienie się kulki nagniatającej względem panewki łożyska (rysunek 3-4).



Rysunek 3-4. Przypadek asymetrycznego obciążenia łożyska hydrostatycznego w trakcie pracy narzędzia

Projektując końcówki nagniatające, szczególną uwagę poświęcono zabezpieczeniom kulki przed wystrzeleniem w sytuacji gdy nastąpi utrata kontaktu z przedmiotem obrabianym. Materiał i kształt warg sprawdzono korzystając z oprogramowania do analiz metodą elementów skończonych SolidWorks Simulation 2010. Dodatkowym zabezpieczeniem w konstrukcji końcówki są promieniowe otwory w obudowie utrzymującej kulkę. Odpowiedzialne są za zmniejszenie ciśnienia cieczy napierającej na kulkę w czasie gdy będzie utrzymywana tylko przez wargi (rysunek 3-5b).



Rysunek 3-5. Zabezpieczenie końcówki nagniatającej: a) normalne warunki pracy; b) kulka opiera się na wargach

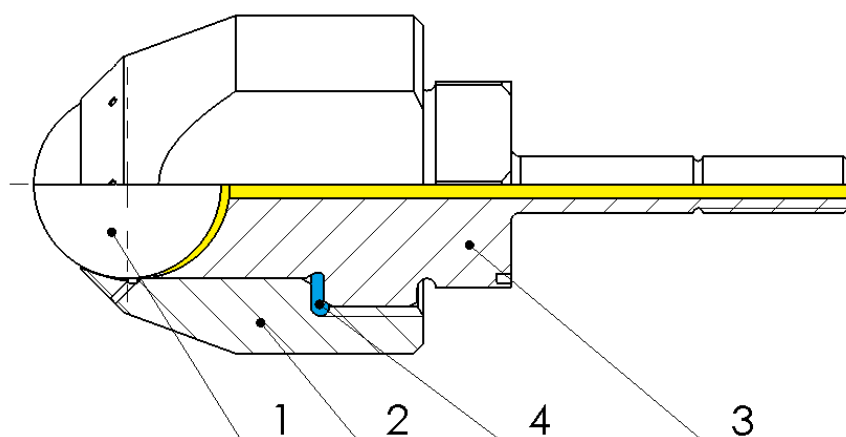
Podczas montażu należy zwrócić uwagę na zapewnienie wymaganej wartości luzu pomiędzy bieżną łożyska hydrostatycznego, kulka nagniatającą a wargami. Minimalny luz montażowy musi być większy lub równy sumie wartości szerokości szczeliny łożyska

hydrostatycznego L_1 oraz odległości przemieszczenia kuli e . Gdzie odległość e jest mierzona pomiędzy środkiem kulki nagniatającej a górną krawędzią odsłaniającą promieniowe otwory. Podczas normalnej pracy ciecz wypełnia jedynie szczelinę łożyska hydrostatycznego L_1 (rysunek 3-5a). W momencie utraty kontaktu kulki z przedmiotem obrabianym (rysunek 3-5b) ciśnienie cieczy spowoduje przemieszczenie kulki w skrajne dolne położenie, do styku z wargami. Wówczas nastąpi powiększenie objętości komory łożyska hydrostatycznego, przez odsłonięte skośne otwory znajdujące się w obejmie nastąpi wypływ cieczy rozładowując tym samym wysokie ciśnienie cieczy hydraulicznej napierającej na powierzchnię kulki nagniatającej. Ze względu na wymaganą dokładność konstrukcji, wszystkie elementy końcówki po toczeniu muszą zostać poddane dokładnemu szlifowaniu. Panewka łożyska hydrostatycznego dodatkowo jest jeszcze docierana. Montaż końcówek odbywa się poprzez połączenia gwintowane z prowadzeniem cylindrycznym. Podczas prac nad narzędziami pojawiła się również koncepcja montażu kulek w końcówkach nagniatających poprzez deformację plastyczną warg obejm. Jednak rozwiązanie to zostało odrzucone ze względów praktycznych – brak powtarzalności wymiarów szczeliny łożyska hydrostatycznego, oraz utrudniona wymiana kulek nagniatających.

Opracowana konstrukcja dobrze spełniła swoje zadanie. Podczas prowadzonych badań nie doszło do uszkodzenia końcówki nagniatającej (wystąpienia kulki nagniatającej).

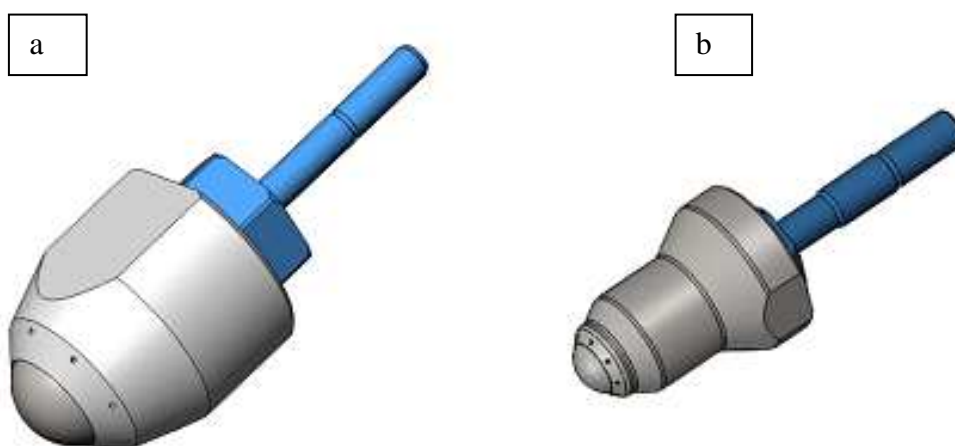
3.1.2. Wymienne końcówki nagniataków hydrostatycznych

Podczas prac projektowych przyjęto rozwiązanie narzędzia składającego się z dwóch części. Pierwszą część stanowi zespół siłownika hydraulicznego. Drugą część stanowi wymienna końcówka nagniatająca. W rodzinie opracowanych nagniataków prostych postanowiono ujednoczyć sposób zasilania hydraulicznego i łączenia końcówki nagniatającej z narzędziem. Przyłącze hydrauliczne zasilające końcówkę nagniatającą zostało przeniesione do zespołu siłownika. W ten sposób oddalono od kulki nagniatającej elementy narzędzia, które stanowiłyby ograniczenie kąta pracy α . Łożysko hydrauliczne zasilane jest przez osiowy otwór wykonany w panewce. Dławienie w otworze zasilającym komorę łożyska hydrostatycznego jest pożądanym zjawiskiem w ten sposób ograniczone zostają pulsacje ciśnienia cieczy w łożysku. We wcześniejszych konstrukcjach narzędzi (zasilanych olejowym układem hydraulicznym) w tym miejscu celowo wstawiano dławik [48].



Rysunek 3-6. Wymienna końcówka nagniatająca $d_k=20$ [mm], 1 – kulka nagniatająca, 2 – obejma, 3-panewka łożyska wraz z częścią chwytową, 4 – elastyczna wkładka

Proste czynności obsługowe przy narzędziu można prowadzić bezpośrednio na obrabiarce. Po zdjęciu obejmy 2 (rysunek 3-6) można przeprowadzić oględziny panewki łożyska hydrostatycznego 3 lub wymienić kulkę nagniatającą 1. Powtórne zmontowanie końcówki i wyregulowanie luzu w łożysku jest bardzo proste. Końcówkę należy skrócić do wyczuwalnego oporu, następnie poluzować złącze gwintowane pomiędzy obejmą 2 a panewką 3. Przy określonym skoku gwintu, każda z końcówek nagniatających ma wyznaczoną wartość kąta o którą należy cofnąć obejmę. Obejma zabezpieczona jest przed samoczynnym odkręcaniem poprzez elastyczną wkładkę 4. Innym rozwiązaniem (nie stosowanym podczas badań) jest użycie w połączeniu gwintowym kleju montażowego.



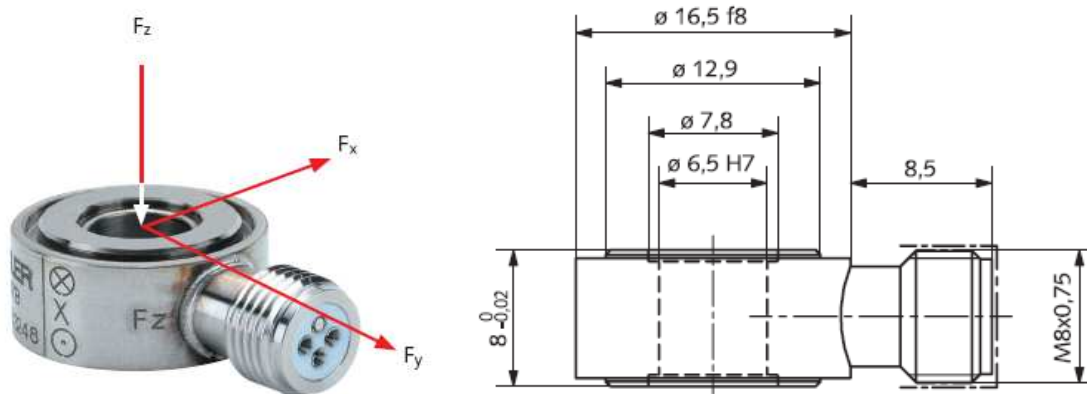
Rysunek 3-7. Wymienne końcówki nagniataków hydrostatycznych prostych: a) $d_k=20$ [mm]; b) $d_k=10$ [mm]

Pomimo smukłego i delikatnego wyglądu końcówki nagniatające są bardzo wytrzymałe, podczas badań, bardzo często obciążane były siłą osiową F_o przekraczającą 2500 [N].

3.1.3. Konstrukcja narzędzia z siłomierzem

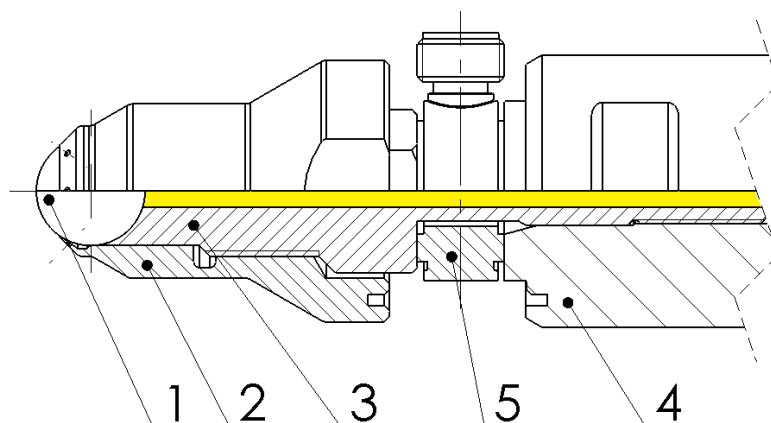
Siła nagniatania F_N jest jednym z podstawowych parametrów technologicznych, przez co istotną sprawą jest możliwość jej precyzyjnego nastawiania, odczytu chwilowej wartości a także sprawowanie nadzoru podczas obróbki. Określić siłę podczas procesu obróbki można na dwa sposoby. Pierwszą (pośrednią) metodą jest wyznaczenie siły osiowej generowanej przez narzędzie jako iloczyn pola powierzchni tłoka i ciśnienia – w tym przypadku należy śledzić zmiany ciśnienia zredukowanego P2 zasilającego komorę tłokową. Drugim sposobem jest bezpośredni pomiar wartości siły osiowej z wykorzystaniem odpowiedniego czujnika. Pierwsza metoda jest trudna w stosowaniu podczas obróbki powierzchni przestrzennych złożonych na trójosiowych frezarkach CNC. Siłę nagniatania F_N (normalna do powierzchni) wyznaczyć można z rozkładu siły osiowej F_o na składowe F_x , F_y , F_z . W celu wyznaczenia wartości wszystkich składowych konieczne jest uwzględnienie geometrii przedmiotu w chwilowym punkcie styku z narzędziem. Metoda pośrednia określania siły nagniatania F_N może znaleźć zastosowanie jedynie w sytuacji gdy jest możliwość normalnego ustawienia narzędzia względem powierzchni obrabianej, gdzie $F_N=F_o$ (obróbka powierzchni walcowych na tokarkach, obróbka powierzchni 3D na pięcioosiowych centrach obróbkowych).

Planowano prowadzenie badań doświadczalnych z wykorzystaniem obu typów maszyn (trójosiowych i pięcioosiowych), dlatego też przyjęto drugą – bezpośrednią formę określania wartości siły. W literaturze można odnaleźć prace poświęcone nagniataniu powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC, w których do pomiaru wartości składowych siły nagniatania F_N używano specjalnych wieloskładowych stolików pomiarowych. Prowadzone badania własne z wykorzystaniem tego typu siłomierzy dały niezadowalające wyniki. Stosowanie stolików umożliwiających pomiary siły wydłuża przygotowanie stanowiska doświadczalnego, komplikuje sposób ustalenia i zamocowania przedmiotu, jednocześnie istotnie zostaje ograniczona przestrzeń robocza maszyny. Rozwiązaniem napotkanych problemów stało się umiejscowienie siłomierza w konstrukcji narzędzia. Do tego celu wybrano trójskładowy piezoelektryczny siłomierz firmy Kistler typ 9017B (rysunek 3-8).



Rysunek 3-8. Siłomierz Kistlera typ 9017b

Mierząc jednocześnie wszystkie trzy składowe można dosyć łatwo wyznaczyć wartość siły nagiatającej F_N . Wymiary oraz sposób montażu siłomierza wpłynęły na kształt końcówki nagiatającej (rysunek 3-9). Do prawidłowego działania wymagane jest napięcie wstępne siłomierza siłą 10 [kN].



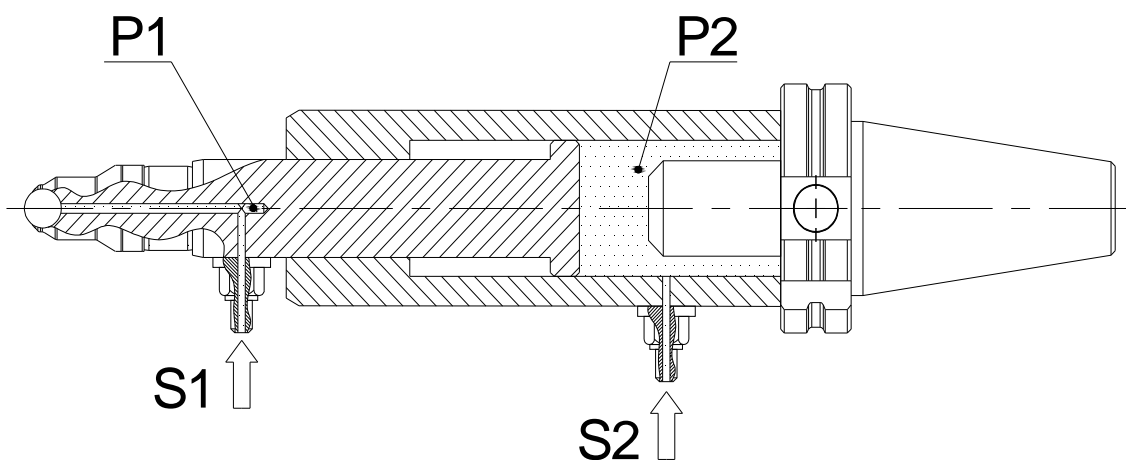
Rysunek 3-9. Końcówka nagiatająca $d_k=10$ [mm] z siłomierzem; 1) kulka nagiatająca; 2) obejmka; 3) panewka łożyska hydrostatycznego; 4) fłok; 5) siłomierz Kistler

Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości panewki łożyska oraz gwintu wymagało stosowania obróbki cieplnej. Problem obróbki cieplnej (do twardości ~ 45 HRC) stał się o tyle skomplikowany, że projektowane końcówki nagiatające mają duży stosunek długości do średnicy. Z tego powodu koniecznością stało się opracowanie technologii obróbki cieplnej, która zagwarantuje odpowiednią wytrzymałość mechaniczną jednocześnie nie powodując utraty dokładności wymiarowo – kształtowej elementów końcówki nagiatającej.

3.2. Nagniatak hydrostatyczny prosty

W urządzeniach hydraulicznych powszechnie używanym generatorem siły jest siłownik hydrauliczny. Siłownik generując siłę osiową F_o w narzędziu hydrostatycznym odpowiedzialny jest za utrzymanie stałej wartości siły nagniatania F_N . W porównaniu do konstrukcji siłowników hydraulicznych używanych w urządzeniach mechanicznych budowa siłowników w nagniatakach jest dosyć delikatna. Narzędzie jednocześnie musi odznaczać się zdolnością do zapewnienia siły nagniatania F_N w bardzo szerokim zakresie 200÷2500 [N] (i więcej). Między innymi z powodu delikatnej konstrukcji siłownika należy zadbać o zachowanie bezpieczeństwa operatora.

W praktyce można się spotkać z różnymi rozwiązaniami siłowników hydraulicznych często również w tej roli występują nurniki lub membrany. Wybór najlepszego rozwiązania do stosowania w nagniatakach pośród szerokiej gamy rozwiązań jest bardzo trudny. Typ użytego siłownika w nagniataku wiąże się z wymogiem stosowania odpowiedniego zasilacza hydraulicznego. Im bardziej skomplikowane narzędzie tym bardziej skomplikowanego (droższego) wymaga układu zasilania.



Rysunek 3-10. Nagniatak prosty dwustrumieniowy. Strumień zasilania łożyska S1 wysokim ciśnieniem P1, strumień zasilania komory tłokowej S2 ciśnieniem cieczy P2

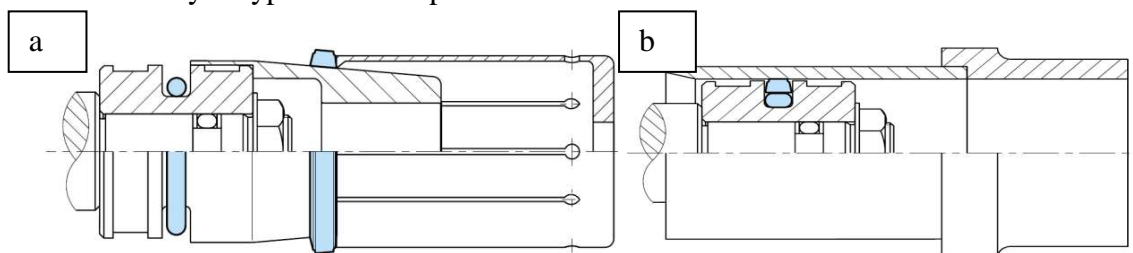
Spośród różnych możliwych wariantów nagniataków tłokowych zdecydowano się przyjąć i rozwijać konstrukcję narzędzi dwuobiegowych opartych o siłownik jednostronnego działania wg rysunku 3-10. Niezależne sterowanie wartością ciśnienia w łożysku hydrostatycznym i w komorze tłokowej daje szerokie możliwości adaptacji narzędzia do różnych potrzeb obróbki. Przyjęty sposób podejścia do konstrukcji umożliwia prowadzenie niezależnych prac rozwojowych każdego z elementów narzędzia (końcówki nagniatającej, siłownika) zachowując kompatybilność nowych rozwiązań z wcześniej

opracowanymi. Ponadto narzędzia hydrostatyczne dwuobiegowe zapewniają stałość ($F_N = \text{const}$) bez względu na wartość stosowanego wysięgu. Również zmiany wysięgu narzędzia podyktowane zmianami geometrii przedmiotu obrabianego nie powinny powodować istotnych zmian siły osiowej F_o . Niewątpliwie jest to dużą zaletą narzędzi hydrostatycznych w odróżnieniu od narzędzi z dociskiem sprężystym, gdzie siła nagniatania zależy od napięcia wstępnego użytego elementu sprężystego oraz wysięgu nagniataka.

Układ generowania siły w narzędziu hydrostatycznym z siłownikiem jednostronnego działania umożliwia łatwą nastawę i daje możliwość wprowadzania korekt bez przerywania procesu obróbki. W tym przypadku wywierana siła jest iloczynem średnicy efektywnej tłoka d_t oraz ciśnienia zredukowanego P_2 zasilającego komorę tłokową narzędzia wg zależności 3-1.

$$F_o = \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \cdot P_2 \quad (3-1)$$

Najprostszym rozwiązaniem w tego typu narzędziach jest umiejscowienie tłoka w tłoczysku, które stanowi jednocześnie korpus narzędzia. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania pakietu uszczelnień wraz z specjalnymi pierścieniami prowadzącymi oraz uszczelnieniami zgarniającymi, których zadaniem jest zabezpieczenie przed dostaniem się zanieczyszczeń do wnętrza narzędzia. Pierścienie prowadzące zastosowane są celem ograniczenia tarcia pomiędzy metalicznymi powierzchniami tłoka i cylindra. Zwykle materiał z którego wykonuje się pierścienie prowadzące tzw. slydringi [75] zapewnia minimalny współczynnik tarcia a także zabezpiecza przed powstaniem drgań samowzbudnych typu stick – slip.

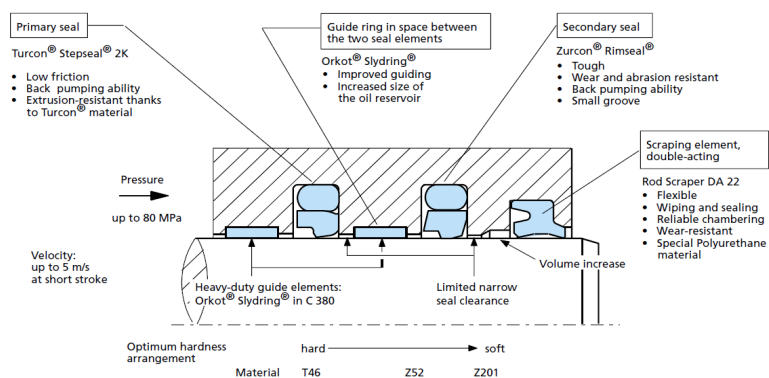


Rysunek 3-11. Proces montażu uszczelnienia: a) na tłoku; b) posadowienie tłoka w cylindrze z wykorzystaniem tulei pośredniczących

Można spotkać dwa warianty narzędzi, w których wykorzystany będzie pakiet uszczelnień tłoka (rysunek 3-11a) lub pakiet uszczelnień tłoczyska (rysunek 3-12). Wariant narzędzia, w którym wykorzystane będą uszczelnienia tłoka jest wariantem narzędzia, technologicznie łatwiejszym w wykonaniu, kształtowanie wszystkich kanałków w których

spoczywać będą uszczelnienia, i pierścienie ślizgowe, w trakcie tokarskich operacji obróbki jest znacznie łatwiejsze w porównaniu do narzędzi drugiego typu.

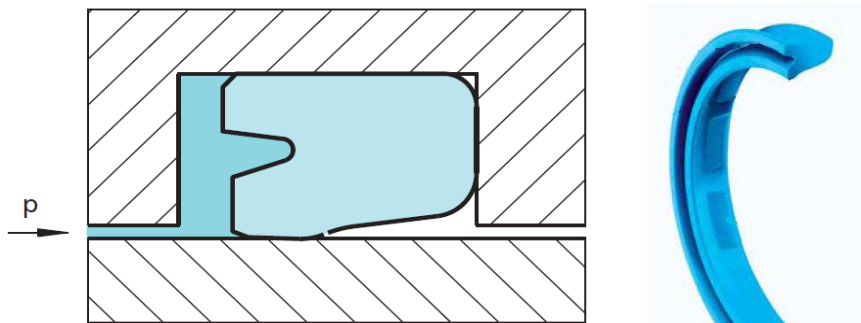
Na niekorzyść rozwiązania pierwszego typu przemawia utrudniony proces montażu narzędzia (rysunek 3-11b), w trakcie którego należy korzystać ze specjalnych tulei prowadzącej, której zadaniem jest zabezpieczenie przed uszkodzeniami uszczelnień.



Rysunek 3-12. Systemy uszczelnień tłoczyśka oferowany przez firmę TRELLEBORG [76]

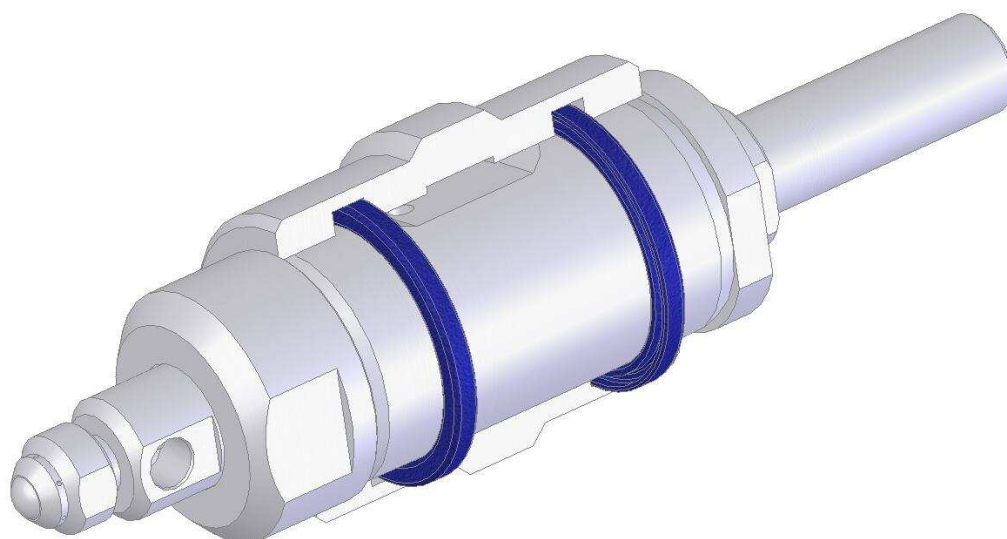
Rozwiązaniem drugiego typu (rysunek 3-12) jest system, w którym zastosowano pakiet uszczelnień cylindra. Takie rozwiązanie niestety komplikuje technologiczność konstrukcji nagniatąka. Podstawowym kryterium odbioru korpusu narzędzia jest dokładność kształtowo – wymiarowa kanałków a także ich współosiowość. W związku z tym operacje obróbki tokarskiej muszą być prowadzone z jednego zamocowania przedmiotu obrabianego. Od strony montażu tłok, powinien mieć wykonaną fazę, poza tym nie trzeba stosować żadnego dodatkowego oprzyrządowania.

Najpopularniejszym rozwiązaniem uszczelnień w siłownikach hydraulicznych jednostronnego działania jest zastosowanie uszczelnień w przekroju przypominających literę U często nazywanych uszczelnieniami wargowymi (rysunek 3-13).



Rysunek 3-13. Tłokowe uszczelnienie wargowe

Uszczelnienia charakteryzują się, dobrym przyleganiem warg do powierzchni uszczelnianych, wysoką szczelnością statyczną i dynamiczną. Dla zmniejszenia tarcia bez obciążenia tego typu uszczelnienia odznaczają się ograniczoną ekspansją do wewnątrz warg uszczelniających. Uszczelnienia przy ruchu powrotnym wykazują minimalne tarcie dzięki czemu pozbawione są wady tzw. wstecznego pompowania. Odznaczają się również niskim współczynnikiem wytwarzania ciepła. Ten typ uszczelnień został wykorzystany w pierwszym nagniatku hydrostatycznym prostym skonstruowanym na potrzeby prowadzonych badań własnych. Narzędzie przedstawione na rysunku 3-14 pracowało poprawnie, nie obserwowano wycieków. Niewielkie trudności pojawiły się przy montażu, jednakże łatwo je usunięto powiększając fazy na tłoku. Narzędziem tym obrabiano płaszczyzny oraz powierzchnie przestrzenne złożone o niewielkich kątach α .

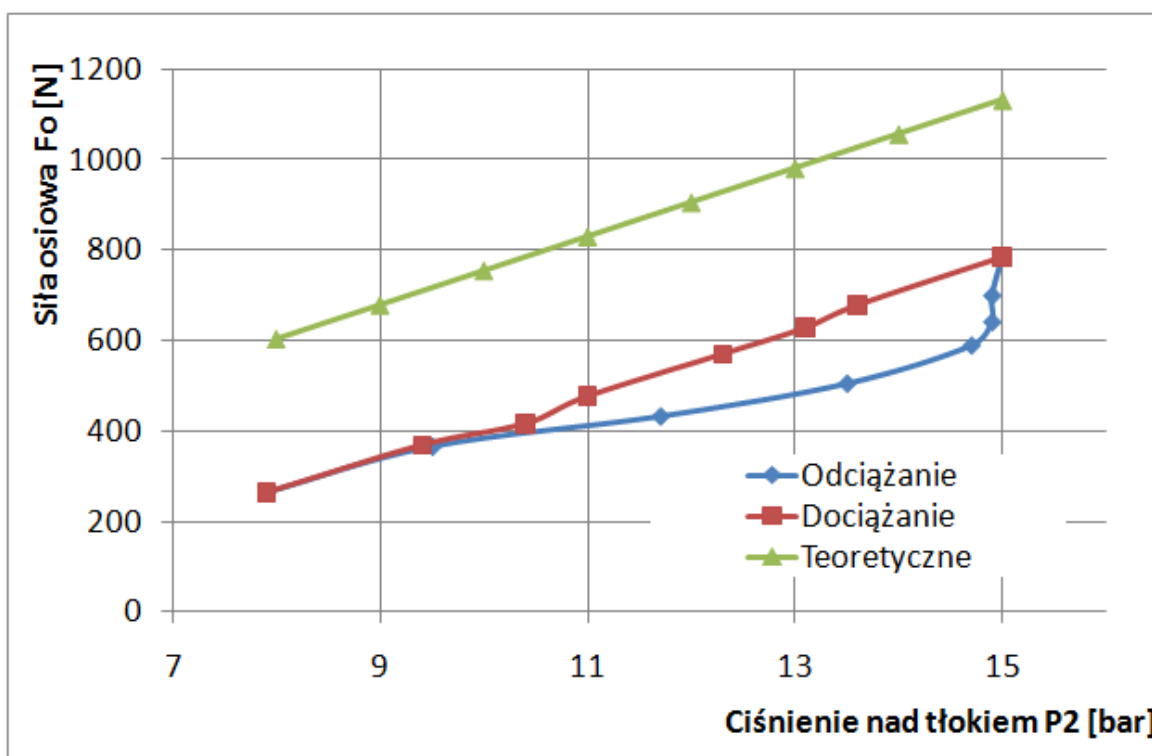


Rysunek 3-14. Praprototyp nagniatków hydrostatycznych prostych wykonany w ITM ZUT w Szczecinie

Pomimo wielu zalet stosowanych uszczelnień, głównym ograniczeniem jest zdolność do przenoszenia obciążeń jedynie w osi. W przypadku gdy ma się do czynienia z obciążeniem poprzecznym (znaczny udział składowej stycznej siły osiowej F_0), ten system uszczelnień nie gwarantuje odpowiedniej sztywności w kierunku promieniowym, przez co podczas pracy będzie dochodziło do wzajemnych otarć powierzchni tłoka i cylindra. Ślady zużycia na powierzchniach uszczelniających są powodem powstawania nieszczelności wpływając na pracę narzędzia. Narzędzia z tego typu uszczelnieniami nadają się do obróbki płaszczyzn, oraz powierzchni przestrzennych złożonych na obrabiarkach pięcioosiowych (normalne ustawienie do powierzchni obrabianej).

Sporządzono eksperymentalną charakterystykę narzędzia, której celem było wyznaczenie rzeczywistej siły osiowej F_o w zależności od ciśnienia w komorze tłokowej P2.

Na wykresie zależności ciśnienie P2 – siła osiowa F_o rysunek 3-15 można zauważyć pętlę histerezy, świadczy to o występowaniu w układzie zakłóceń. Wraz ze wzrostem ciśnienia obserwowany jest liniowy wzrost siły nagniatania, wzrost ten jednak jest mniejszy niż wynika z przebiegu teoretycznego. Otrzymano wyraźny dowód potwierdzający występowanie oporów wewnątrz narzędzia na skutek tarcia generowanego przez uszczelnienia.



Rysunek 3-15. Charakterystyka ciśnienie nad tłokiem P2 – siła osiowa F_o praprototypowego nagniataka hydrostatycznego

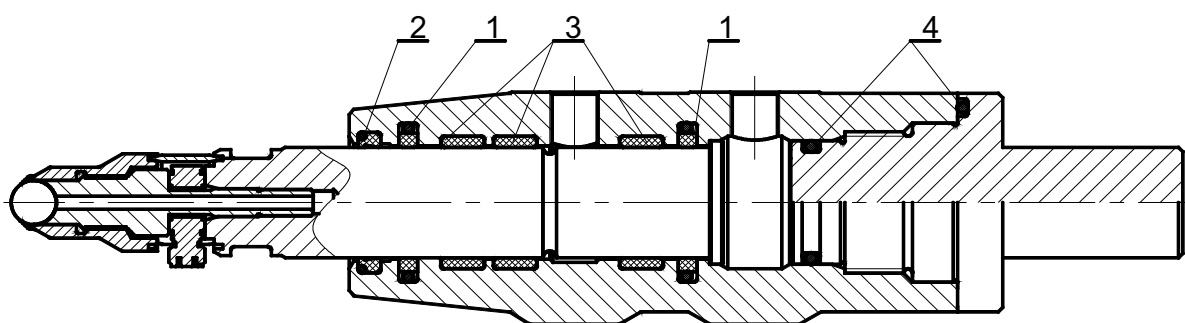
Opory wewnętrzne powodują również ograniczenie maksymalnej siły osiowej generowanej przez narzędzie przy ciśnieniu P2 wynoszącym 15 [bar]. Zarejestrowano wartość siły osiowej F_o około 800 [N], gdzie wyznaczona wartość teoretyczna siły w tym punkcie powinna przekraczać 1100 [N].

W początkowym okresie odciażania narzędzia, widać nieproporcjonalny spadek siły osiowej F_o , w stosunku do zmiany wartości ciśnienia P2. Początkowo histereza siły przekracza wartość 200 [N] co stanowi ~25% wartości aktualnej siły osiowej F_o . Szerokość pętli histerezy zmniejsza się ze spadkiem ciśnienia nad tłokiem P2. Akceptowalny poziom

osiąga przy wartości około 9 [bar], wówczas różnica siły oscyluje w granicach około 10 [N], a histereza wynosi około 3% siły osiowej F_0 .

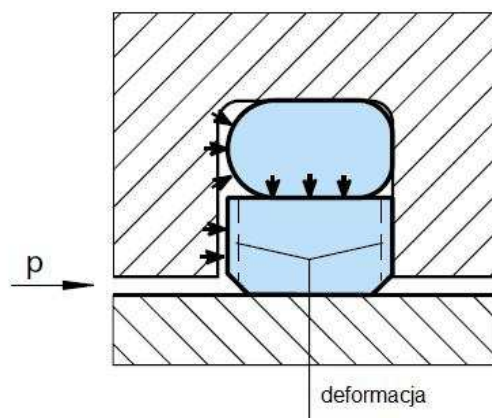
Sporządzona charakterystyka pomimo wyraźnie widocznych anomalii w górnym zakresie jest przydatna. Zebrane doświadczenie umożliwiło opracowanie procedury badań wzorcujących (ciśnienie – siła), kolejno konstruowanych narzędzi.

Występowanie histerezy jak również brak możliwości do przenoszenia sił promieniowych przez narzędzie był powodem podjęcia projektu kolejnego nagniatka hydrostatycznego (rysunek 3-16).



Rysunek 3-16. System zastosowanych uszczelnień w nagniatku hydrostatycznym nr 2; 1-uszczelnienia pakietowe tłoka; 2-uszczelnienie zgarniające; 3- pierścienie ślizgowe; 4-oringi

Nagniatka hydrostatyczny przedstawiony na rysunku 3-16 został zaopatrzony w pakietowe uszczelnienia tłoka firmy TRELEBORG, typu turcon glyd ring (rysunek 3-17). Przeznaczone do uszczelniania połączeń ruchomych, pod ciśnieniem ponad 800 [bar], gdzie prędkość przemieszczania tłoka przekracza 15 [m/s], a częstotliwość w przypadku ruchu posuwisto – zwrotnego jest większa od 5 [Hz]. Uszczelnienia te nadają się do pracy w oleju mineralnym a także emulsjach olejowo – wodnych.



Rysunek 3-17. Zasada działania pakietowego uszczelnienia tłoka

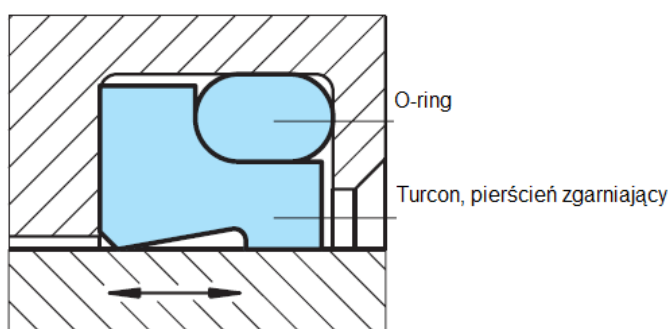
Powyższe uszczelnienia przeznaczone są do konstrukcji gdzie wymaga się dużych prędkości przemieszczeń, a w których powinien zostać do minimum ograniczony

współczynnik tarcia statycznego i dynamicznego. Właściwości materiału, z którego zostały wykonane uszczelki powodują minimalne straty spowodowane zamianą energii na ciepło, a także całkowicie eliminują drgania stick – slip. Charakteryzują się podwyższoną odpornością na zużycie, mogą być również stosowane w przypadku, gdzie medium ma słabe właściwości smarne. Widoczny jest brak adhezji uszczelnień w trakcie długich przestojów urządzeń. Uszczelnienia w trakcie nawet długiego okresu eksploatacji nie rozpadają się i nie zmieniają właściwości chemicznych medium roboczego.

Ze względu na warunki pracy nagniatka hydrostatycznego pracującego na cieczach HFA, wybrano właśnie to rozwiązanie, jako optymalne, gwarantujące niezawodną pracę narzędzia.

Aby zwiększyć sztywność narzędzia – zdolność do przenoszenia sił promieniowych zastosowano pakiet pierścieni ślizgowych wykonanych z materiału TURCITE. Zdecydowano się na rozwiązanie składające się z trzech pierścieni ślizgowych bliżej końcówki roboczej narzędzia jest zdwojony układ pierścieni, tłok w swej końcowej części podparty jest jednym pierścieniem, wszystkie mają jednakową szerokości 9.7[mm]. Wkładki mają bardzo dobre warunki ślizgowe dzięki zastosowanym specjalnym strukturom na powierzchni. Producent gwarantuje również przy starcie oraz małych prędkościach ruchu całkowity brak drgań. Pozostałe właściwości są podobne jak w przypadku uszczelnień pakietowych turcon glyd ring.

Najbardziej narażonym uszczelnieniem na wpływ otoczenia jest uszczelka zgarniająca wykonana z materiału nazywanego TURCON (rysunek 3-18).



Rysunek 3-18. Schemat uszczelnienia zgarniającego

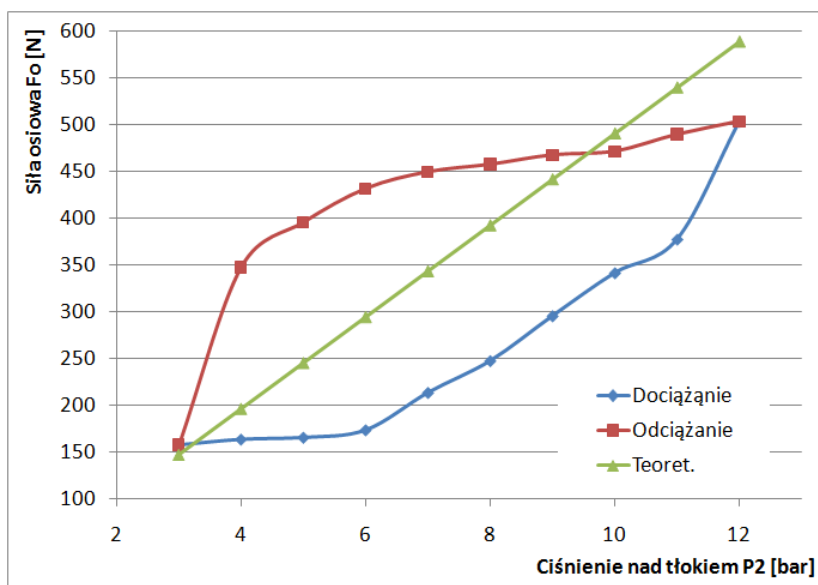
Pełni ona rolę wycieraczki cylindra w narzędziu. Zabezpieczając jednocześnie przed dostaniem się do wnętrza narzędzia wiórów i innych zanieczyszczeń występujących w kabinach nowoczesnych maszyn skrawających do metali. Uszczelnienie w tym miejscu powinno cechować się doskonałymi właściwościami ślizgowymi, zdolnością do

zeskrobania trawle przyległego brudu, utrzymaniem filmu olejowego ponadto mieć zdolność do nadrobienia położenia za uchylnym ruchem tłoka. Przy tym nie powinno zabierać zbyt wiele miejsca w konstrukcji narzędzia. Narzędzie z przytoczonym systemem uszczelnień (rysunek 3-19) poddano badaniom.



Rysunek 3-19. Nagniatak hydrostatycznego ze zmodyfikowanym systemem uszczelnień: a) widok pakietu uszczelnień; b) narzędzie gotowe do pracy

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania charakterystyk ciśnienie nad tłokiem P2 – siła osiowa F_o . W obu konstrukcjach hydrostatycznych narzędzi do tego celu wykorzystano maszynę wytrzymałościową INSTRON, nr kat. 2518-102 z siłomierzem o numerze UK-626 pozwalającym wykonywać pomiary statyczne $0 \div 20$ [kN].



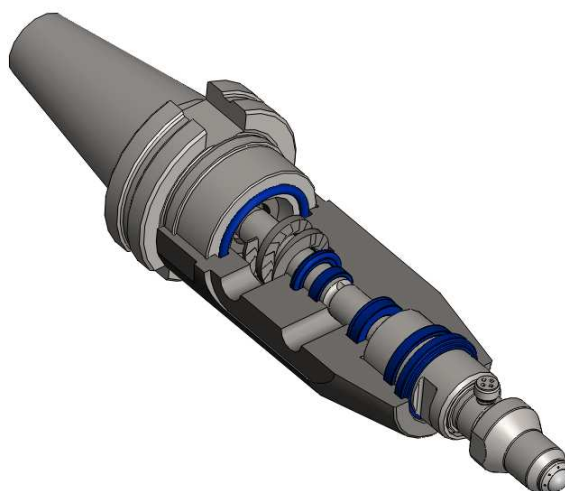
Rysunek 3-20. Charakterystyka ciśnienie nad tłokiem P2 – siła osiowa F_o nagniataka hydrostatycznego ze zmodyfikowanym systemem uszczelnień

Badania wzorcujące narzędzi były badaniami statystycznymi, tj w trakcie próby końcówka narzędzia nie zmieniała swojego położenia. Nagniatak po zamocowaniu w uchwycie maszyny wytrzymałościowej wciśnięto do połowy przewidzianego zakresu pracy. Po włączeniu zasilania hydrostatycznego i wyregulowaniu ciśnienia zasilania

w komorze łożyska hydrostatycznego P1, włączono zasilanie i stopniowo zwiększano ciśnienie P2 w komorze tłokowej.

Sporządzona charakterystyka (rysunek 3-20) ukazała znaczną różnicę siły pomiędzy dociążaniem i odciążaniem. Histereza, która ujawniła się po wykonaniu wykresu była zaskoczeniem. Wprowadzenie do narzędzia omawianego wcześniej pakietu uszczelnień nie przyniosło spodziewanego efektu. W omawianym rozwiązaniu zastosowanie aż trzech pierścieni ślizgowych o największej szerokości w całym dostępnym typoszeregu okazało się rozwiązaniem przewymiarowanym. W tym przypadku mogło dojść również do przekroczenia tolerancji wymiarowo – kształtowych.

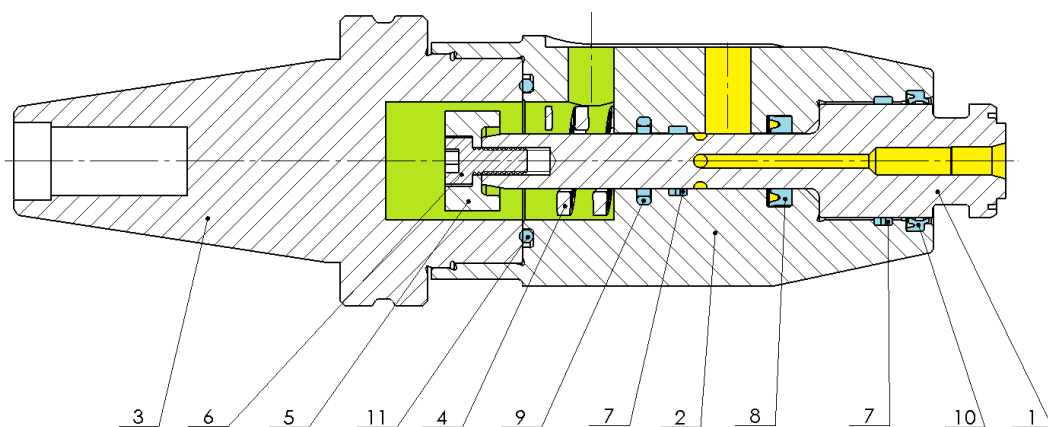
Narzędzie po zmontowaniu zostało poddane wzorcowaniu. Nagniatak (rysunek 3-20) był wielokrotnie używany w trakcie prac eksperymentalnych. Doświadczenie zebrane w trakcie eksploatacji oraz powtórna analiza przyczyn powstania histerezy doprowadziły do wykonania kolejnej wersji nagniataka hydrostatycznego prostego (rysunek 3-21).



Rysunek 3-21. Hydrostatyczny tłokowy nagniatak prosty po optymalizacji

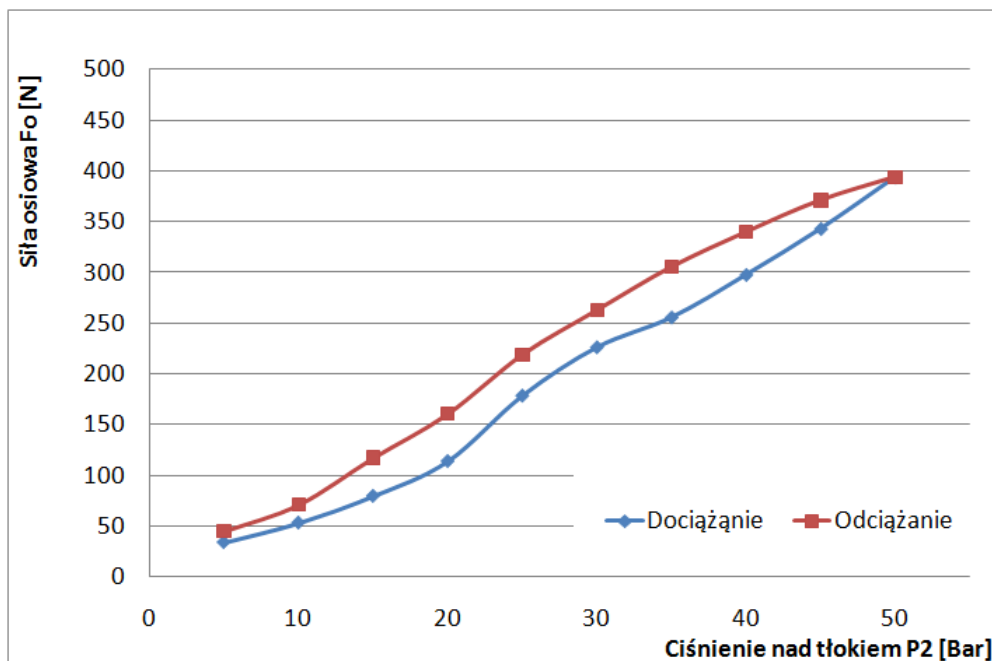
Projekt przedstawionego narzędzia opracowano po tym jak został wykonany i uruchomiony zasilacz hydrauliczny z cyfrowym układem sterowania, przeznaczony do pracy na cieczach HFA. Narzędzie (rysunek 3-21) poddano optymalizacji mając na uwadze zapewnienie prawidłowej współpracy z nowo przygotowanym zasilaczem. Pierwszą wprowadzoną modyfikacją było zmniejszenie średnicy tłoka 1. W porównaniu z wcześniejszą wersją nagniataka hydrostatycznego prostego zastosowano tylko dwa pierścienie poślizgowe 7 o mniejszej niż poprzednio szerokości. Wprowadzono istotne różnice w sposobie uszczelnienia. Po stronie końcówki nagniatającej zostało zastosowane

wargowe uszczelnienie tłoka 8, po stronie komory tłokowej dwustronnie działające uszczelnienie pakietowe 9. Wnętrze narzędzia zabezpieczono uszczelką zgarniającą 10. Zmniejszenie wymiarów narzędzia uzyskano na skutek częściowego przeniesienia komory tłokowej do chwytu 3, dzięki temu korpus narzędzia 2 mógł zostać znacznie skrócony. Komorę tłokową w miejscu podziału pomiędzy chwyttem a korpusem uszczelniono za pomocą o-ringa 11. Podjęto się próby ograniczenia występującej w narzędziach tłokowych histerezy poprzez zastosowanie sprężyny 4, której zadaniem jest przeciwdziałanie oporom tarcia na uszczelkach z chwilą odciążania narzędzia. Sprężyna 4 napięta wstępnie za pomocą kapsla 5 przytwierdzonego śrubą 6 do tłoka 1 powoduje samoczynne cofanie się tłoka w korpusie narzędzia. Dzięki takiemu rozwiązaniu wyeliminowano możliwość kolizji narzędzia z przedmiotem obrabianym w chwili braku zasilania hydraulicznego. Narzędzie samoistnie chowając tłok prowadzi do odsunięcia końcówki nagniatącej od powierzchni przedmiotu obrabianego.



Rysunek 3-22. Tłokowy nagniatak prosty po optymalizacji konstrukcji

Przyłącza hydrauliczne do zasilania tłoka i łożyska hydrostatycznego umieszczono w korpusie. W tłoku wykonano złącze gwintowane do połączenia z wcześniej opracowanymi końcówkami wraz z siłomierzem. Wzorcowanie narzędzia wykazało korzystne przebiegi $P2-F_0$ (rysunek 3-23) przy dociążaniu i odciążaniu, jednocześnie ograniczono histerezę. W całym zakresie pracy wynosiła około 15% wartości siły F_0 , jest to wynik zadowalający. Pomimo tego stanowi jeszcze istotne utrudnienie w sterowaniu wartością normalnej siły nagniatania F_N . Wzorcowanie prowadzono za pomocą wbudowanego w narzędzie siłomierza, a tor pomiaru siły stanowił fragment cyfrowego układu sterowania wykonanego zasilacza hydraulicznego.



Rysunek 3-23. Charakterystyka nagniatąka tłokowego prostego po optymalizacji

Równocześnie z badaniami omawianego narzędzia (rysunek 3-22) prowadzono wzorcowanie prototypu nagniatąka hydrostatycznego prostego, w którym klasyczne rozwiązanie tłok – uszczelki - cylinder zastąpiono sprężystym miechem [88].

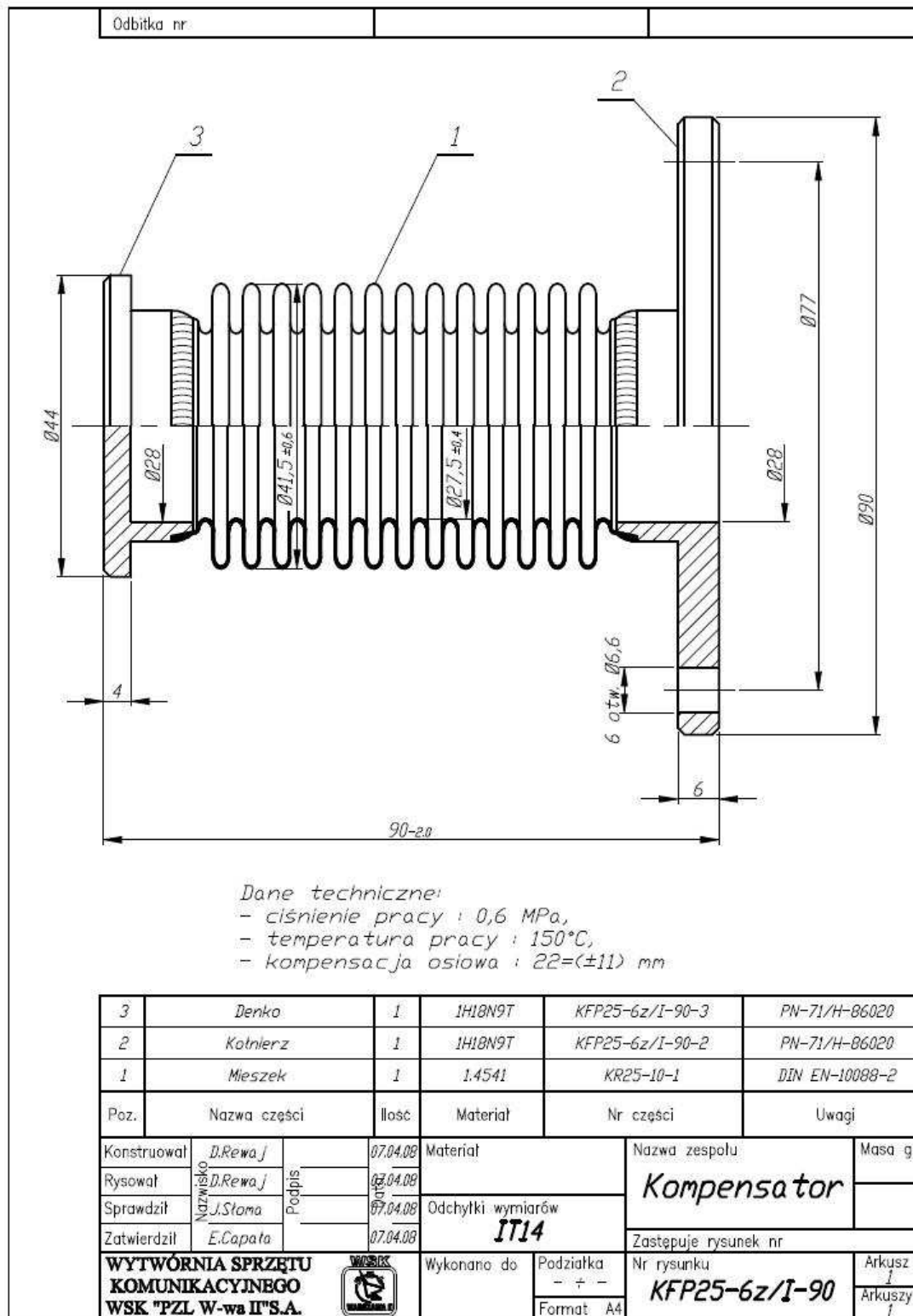
3.3. Nagniatąk z tłokiem miechowym

Chcąc ułatwić kontrolę nad siłą F_N w procesie nagniatania, uprościć sterowanie doprowadzanym strumieniem cieczy, należy ograniczyć lub całkowicie wyeliminować histerezę narzędzia. Po pierwszych niezadowolających wynikach prac z wykorzystaniem narzędzi tłokowych zdecydowano o podjęciu próby alternatywnego rozwiązania sposobu generowania siły osiowej F_o . Podjęto decyzje o próbie zastąpienia układu tłok – uszczelki – cylinder sprężystym elementem w postaci membrany lub miecha.



Rysunek 3-24. Kompensator miechowy zamontowany w rurociągu [74]

Do generowania siły osiowej F_0 i przemieszczenia Z elementu roboczego użyto kompensatorów miechowych, które na co dzień niwelują przemieszczenia w rurociągach przesyłających płyny pod ciśnieniem.



Rysunek 3-25. Tłok miechowy z wykorzystaniem kompensatora KFP25-6

Wykorzystano do tego celu kompensatory miechowe produkowane przez Zakład Elementów Sprężystych WSK „PZL – Warszawa II”. Przyjęto jako bazę kompensator dostępny w handlu pod nazwą KF25-6. Miech wykonany ze stali nierdzewnej 1H18N9T doskonale nadaje się do pracy z cieciami HFA. Wielkości charakterystyczne miecha zostały zebrane i przedstawione w tabeli 3-1.

Tabela 3-1. Charakterystyka kompensatora miechowego KF25-10 [74]

ND	NP	Oznaczenie	D _o	D _r	g	L _m	Powierzchnia czynna	Kompensacja	Szywność k _m	Masa
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[N/mm]	[kg]
25	10	KR25-6	44.5	33.7	2.9	180	92	±11	12	0.4

Rozwiązanie standardowego kompensatora miechowego poddano modyfikacji do tego aby można je było wykorzystać jako tłok – miech narzędzia hydrostatycznego do nagniatania (rysunek 3-25). Z jednej strony zamknięto miech denkiem, z drugiej wprowadzono przyłącze kołnierzowe, dzięki czemu tłok – miech stał się integralną częścią narzędzia. Miech, jaki i dodatkowe elementy zostały wykonane w zakładach PZL w Warszawie. Tam też dokonano połączeń spawaniem elementów cienkościennych miecha z denkiem i z kołnierzem.

W narzędziach hydrostatycznych do nagniatania tłoki – miechy powinny pracować jako sprężyste elementy rozciągane. Narzędzie zasilane strumieniem cieczy o ciśnieniu P2 osiąga pozycję roboczą, tj. pozycję w której dojdzie do kontaktu elementu nagniatającego z powierzchnią przedmiotu obrabianego po rozciągnięciu elementu sprężystego. Wszelkie przerwy w zasianiu narzędzi, np. na skutek awarii zasilacza doprowadzą do samoistnego cofnięcia się narzędzia zamocowanego we wrzecionie maszyny. Tym samym układ stanie się bezkolizyjny, podobnie nagniatka tłokowy.

3.3.1. Zasada działania nagniatka z tłokiem miechowym

Nagniatki z miechowym tłokiem przystosowano do współpracy z końcówkami nagniatającymi opracowanymi razem z nagniatkami tłokowymi. Stosowanie sprężystego miecha jako rozwiązanie siłownika jednostronnego działania w konstrukcji nagniatka stwarza możliwość wykonania dwóch typów narzędzi, różniących się sposobem wykorzystania właściwości sprężystych miecha.

Pierwszym wariantem jest narzędzie z tzw. swobodnym miechem (rysunek 3-26a). W narzędziu tym końcówka z kulką nagniatającą 6 zamocowana jest na trzpieniu 5 prowadzonym w korpusie 7, połączonym z chwytem 8. Miechowy tłok 1 może się odkształcać w kierunku osiowym o długość $\pm H$. Zabezpieczenie miecha przed uszkodzeniem na skutek zbyt mocnego ściśnięcia (np. w trakcie ustawiania narzędzia) zrealizowano ogranicznikiem 3, zabezpieczeniem przed zbyt mocnym rozciągnięciem jest odpowiednio ukształtowana powierzchnia oporowa w korpusie narzędzia 7. W czasie pracy nagniataka w komorze miechowego tłoka o średnicy D_M panuje ciśnienie P_2 , co generuje osiową siłę hydrostatyczną. Gdy element nagniatający wraz z trzpieniem przemieści się o wartość Z spowoduje to odkształcenie sprężystego miecha o współczynniku sztywności k_M . Powstaje wówczas dodatkowa siła sprężystości. Siła osiowa F_o działająca na przedmiot obrabiany jest liniowo zależna od ciśnienia P_2 , przemieszczenia Z i współczynnika sztywności miecha, zgodnie z zależnością 3-2.

$$F_o = \frac{\pi \cdot D_M^2 \cdot P_2}{4} - k_M \cdot Z \quad (3-2)$$

Zdecydowano się na wykonanie drugiej wersji nagniataka (rysunek 3-26b). Gdzie trzpień 5 prowadzony wewnątrz korpusu 7, wraz z końcówką nagniatającą 2 dociskany jest do denka miecha 2, sprężyną 9. Zabezpieczeniem przed zduszeniem jest trzpień 3, jednocześnie położenie powierzchni czołowej trzpienia określa położenie zerowe elementu nagniatającego, które występuje przy miechu ściśniętym o dopuszczalną wartość H . Miech jest ściskany siłą F_{so} :

$$F_{so} = k_s \cdot h_{os} \quad (3-3)$$

gdzie:

k_s – współczynnik sztywności sprężyny ściskającej,

h_{os} – wstępne odkształcenie sprężyny.

Aby miech mógł zająć położenie zerowe powinien być spełniony warunek:

$$F_{so} = k_s \cdot h_{os} \geq k_M \cdot H \quad (3-4)$$

gdzie:

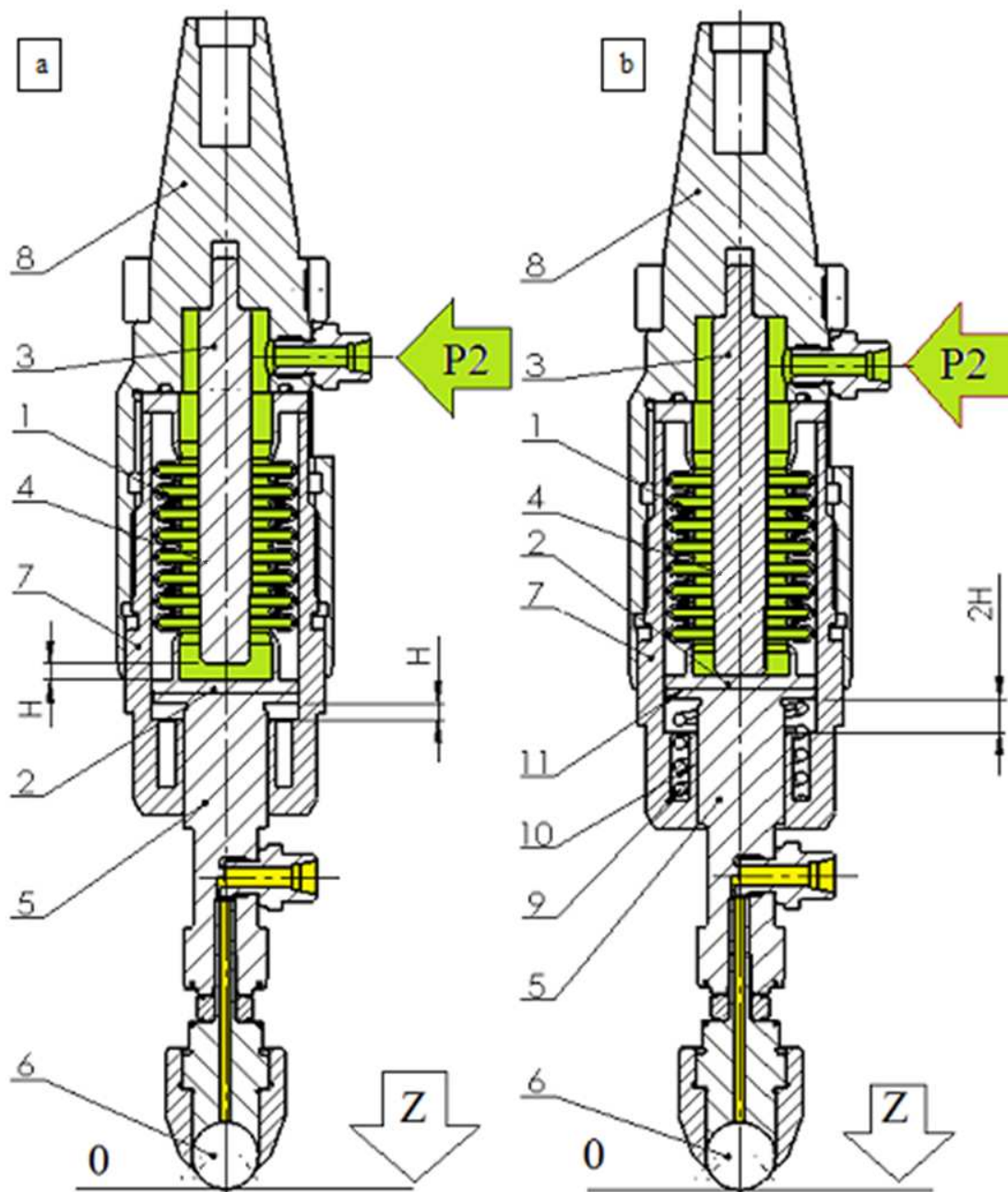
k_M – współczynnik sztywności miecha,

H – przemieszczenie tłoka z pozycji centralnej do skrajnego dolnego lub górnego położenia.

Uwzględniając wstępne napięcie tłoka – miecha sprężyną śrubową, siłę osiową F_o wywieraną przez narzędzie można opisać zależnością:

$$F_o = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} \cdot P_2 + k_M \cdot H - k_s \cdot h_{os} - (k_s + k_M) \cdot Z \quad (3-5)$$

przy czym $0 \leq z \leq 2 \cdot H$

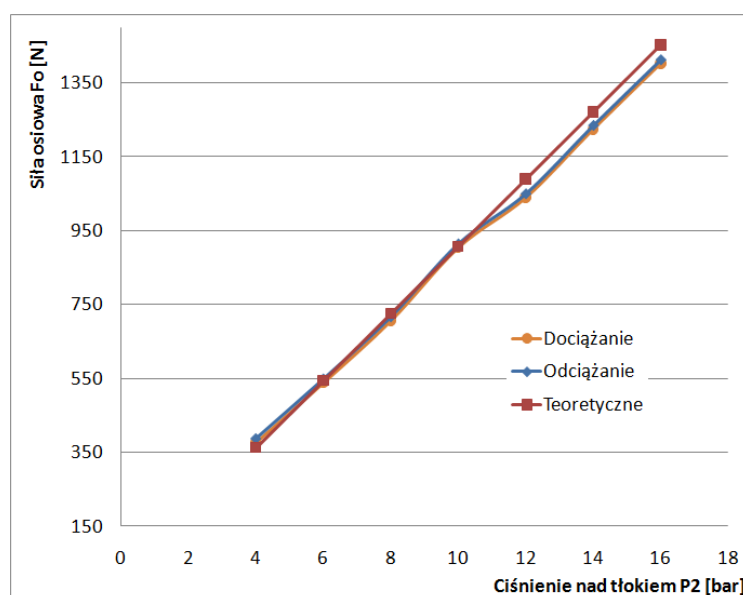


Rysunek 3-26. Nagniatak hydrostatyczny z miechowym tłokiem: a) swobodnym, b) napiętym wstępnie

Zaletą przedstawionego narzędzia jest brak znaczącego tarcia wewnętrznych elementów siłownika, co eliminuje zjawisko histerezy. Do zasilania narzędzia ze

sprężystym miechem można użyć różnych cieczy: olej, emulsja olejowa a także sprężonego powietrza.

Istotnym ograniczeniem w stosowaniu narzędzi z miechowym tłokiem jest wymagane ciśnienie zasilania P2 w zakresie od 4 do 10 [bar] w przypadku narzędzi do nagniatania, gdzie tłok jest prowadzony wewnątrz korpusu dopuszcza się możliwość zwiększenia ciśnienia pracy do 16 [bar] (brak możliwości wybożenia miecha). Przy zastosowaniu miecha wg specyfikacji określonej przez producenta (tabela 3-1), przygotowany projekt narzędzia pozwalał na rozwinięcie maksymalnej siły osiowej F_o na poziomie 1300 [N]. Opracowano prostą konstrukcję nagniataka hydrostatycznego z miechowym tłokiem, stosując jednocześnie szerokie tolerancje części składowych. Narzędzie bardzo szybko wykonano i przebadano. Wyniki wzorcowania nagniataka okazały się zgodne z oczekiwaniami (rysunek 3-27).



Rysunek 3-27. Wyniki wzorcowania nagniataka hydrostatycznego z miechowym tłokiem

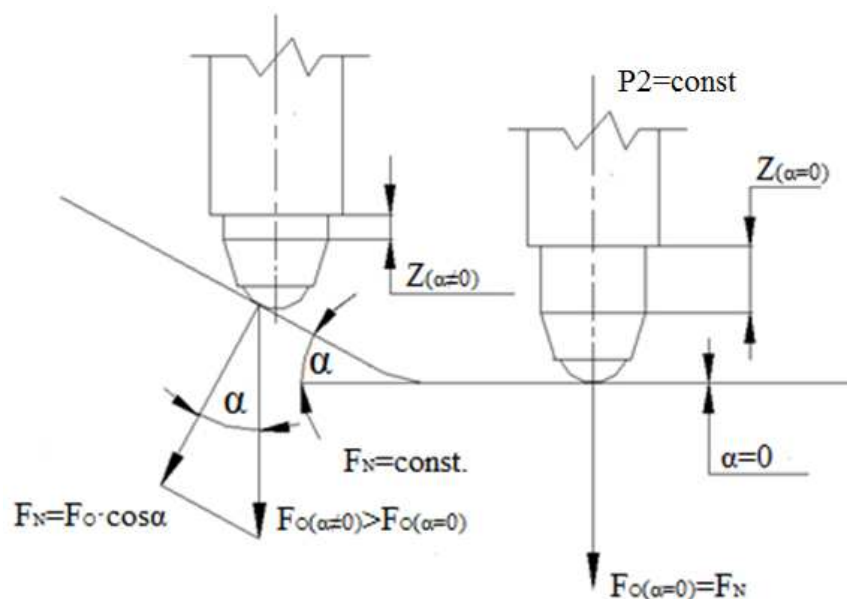
Narzędzie wykazuje liniowy przebieg zależności ciśnienie P2 – siła osiowa F_o . Zgodnie z prognozami narzędzie jest praktycznie pozbawione histerezy siły (poniżej 3% w pełnym zakresie siły F_o)

Po etapie testów i wstępnych prób nagniatków z miechowym tłokiem był najczęściej używanym narzędziem w trakcie badań spośród wszystkich opracowanych nagniatków hydrostatycznych prostych.

3.3.2. Stabilizacja siły nagniatania

W trakcie prowadzonych badań głównie korzystano z nagniataka z miechowym tłokiem napiętym wstępnie [49]. Wynikało to w głównej mierze z właściwości narzędzia (rysunek 3-27). Podczas teoretycznych rozważań nad zasadą działania nagniataków miechowych wyprowadzono zależność, wg której korzystając z właściwości sprężystych narzędzia można stabilizować siłę nagniatania. Pomysł wydał się szczególnie przydatny przy obróbce powierzchni przestrzennych złożonych na obrabiarkach trójosiowych, a więc wszędzie tam, gdzie nie ma możliwości ustawienia narzędzia normalnie do powierzchni obrabianej.

Stabilizacja siły nagniatania F_N polega na wprowadzaniu korekty siły osiowej F_o wywieranej przez narzędzie nie zmieniając wartości ciśnienia P_2 panującego w komorze tłokowej. Korekta siły osiowej realizowana jest poprzez zmianę wysięgu końcówki nagniatającej (rysunek 3-28).

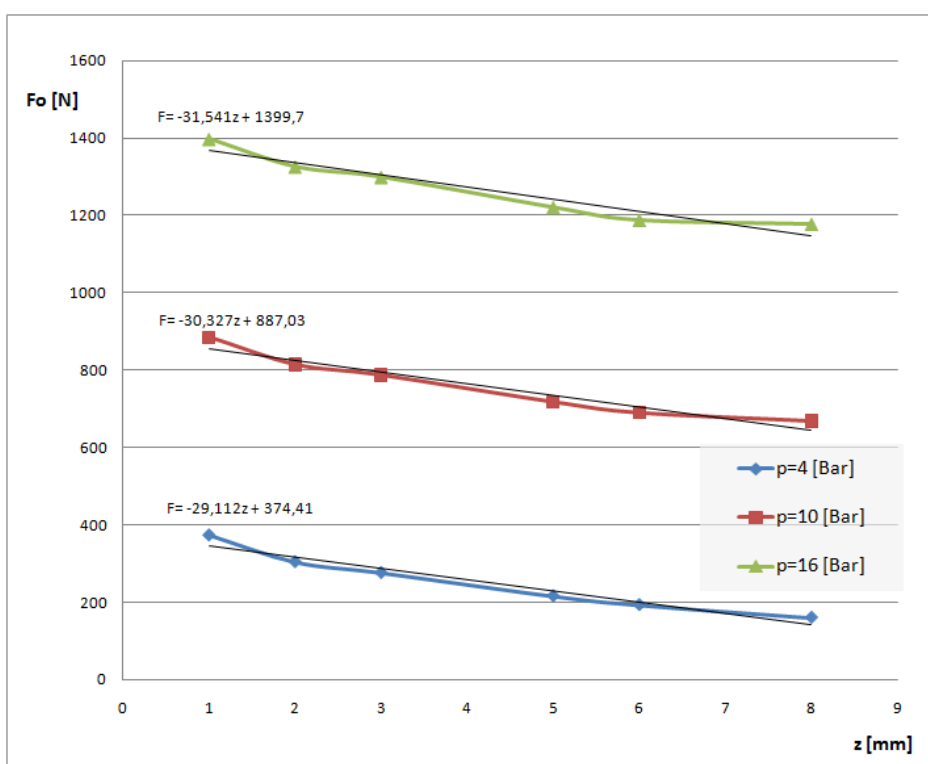


Rysunek 3-28. Stabilizacja siły nagniatania F_N powierzchni o złożonym zarysie poprzez korektę sterowania narzędziem w osi Z

Wykorzystać przedstawioną ideę w praktyce można jedynie pod warunkiem utrzymania stałej wartości ciśnienia w komorze tłokowej narzędzia. Za utrzymanie stałego ciśnienia P_2 odpowiedzialny jest hydrauliczny układ zasilania. W torze zasilania komory tłokowej przygotowanego zasilacza zastosowano czujnik ciśnienia i proporcjonalny zawór przelewowy. Opracowane zabezpieczenie eliminuje niekontrolowany wzrost ciśnienia P_2 w komorze tłokowej, spowodowany zmniejszającą się objętością. Co praktycznie

wyklucza możliwość gwałtownego wzrostu wartości siły osiowej F_o . Zatem teoretycznie opracowana koncepcja stabilizacji siły nagniatania mogła zostać praktycznie zweryfikowana.

W tym celu dla wybranych poziomów ciśnienia zasilania określono doświadczalnie charakterystyki siły osiowej F_o wywieranej przez narzędzie w funkcji przemieszczenia końcówki roboczej Z (rysunek 3-29). Podczas badania komora tłoka-miecha o średnicy D_M była zasilana ciśnieniem P_2 , generując w ten sposób siłę hydrostatyczną. Końcówka robocza nagniatąka przemieszczając się o wartość Z , powodowała odkształcenie sprężystego miecha o współczynniku sztywności k_M . Generowana była w tym czasie dodatkowa siła sprężystości. Siłę w osi narzędzia F_o określa zależność 3-5.



Rysunek 3-29. Rzeczywiste przebiegi siły osiowej $F_o=f(z)$ dla narzędzia miechowego

Opracowane dane doświadczalne wskazują na niewielkie odchyłki od liniowości przebiegu siły osiowej F_o , zmiany współczynników kierunkowych prostych aproksymujących zebrane punkty są nieistotne (rysunek 3-29).

Następnie przeprowadzono eksperyment, w którym obrabiano na trójosiowym frezarskim centrum obróbkowym MIKRON VCE 500 wklęsłą część powierzchni sferycznej próbki o promieniu $R=230$ [mm] (rysunek 3-30).

Podczas obróbki zarysu powierzchni przestrzennej złożonej siłę nagniatania (normalną do powierzchni) określa zależność:

$$F_N = F_o \cdot \cos \alpha \quad (3-6)$$

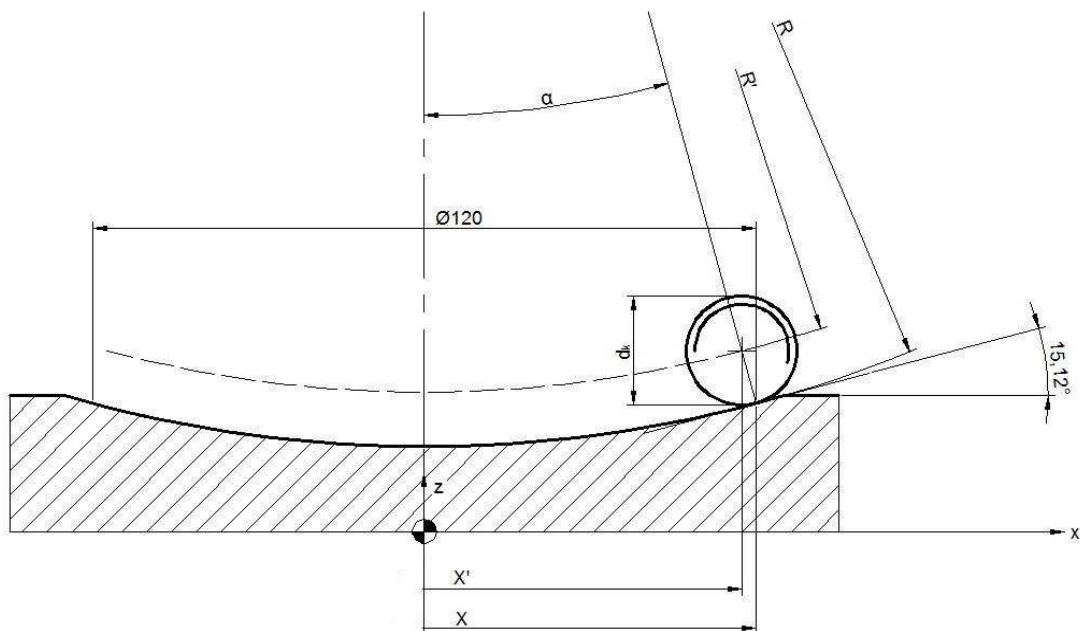
Przyjęto siłę nagniatania $F_N=700$ [N], z wcześniej przygotowanych charakterystyk (rysunek 3-29) dobrano wartość ciśnienia zasilania komory tłokowej narzędzia $P_2=10$ [bar]. Korzystając z zależności aproksymującej charakterystykę sztywności narzędzia (rysunek 3-29) określono wzór na korektę współrzędnej Z_{kor} zarysu nagniatanej powierzchni w funkcji wartości współrzędnej x (zależność 3-7),

$$Z_{kor} = \frac{887,03 - F_N}{30,327} - \frac{\left(887,03 - \frac{F_N}{\cos(\arcsin(x/R))}\right)}{30,327} \quad (3-7)$$

gdzie:

x – współrzędna punktu styku kulki nagniatającej z powierzchnią obrabianą.

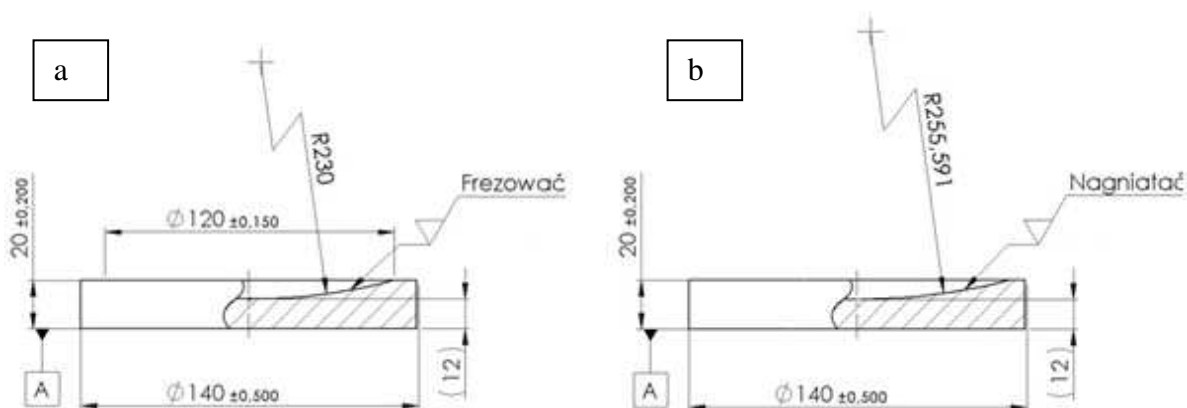
Aby osiągnąć wymaganą korektę należy ścisnąć narzędzie w trakcie obróbki o wartość $Z_{kor}=0,828$ [mm]. W tym celu program sterujący do nagniatania przygotowano poprzez korektę zarysu powierzchni po frezowaniu. Zmiana zarysów części pomiędzy frezowaniem i nagniataniem spowodowała wymuszone ściśnięcie narzędzia w trakcie nagniatania.



Rysunek 3-30. Zarys powierzchni próbki obrabianej w trakcie eksperymentu ze stabilizacją siły nagniatania

Dodatkowe przemieszczenie – ściśnięcie nagniataka w osi Z realizowane było płynnie, przez co następowała płynna zmiana siły nagniatania F_N . Zarys powierzchni

frezowanej oraz skorygowany zarys do wygenerowania programu sterującego nagniataniem przedstawiono na rysunku 3-31.



Rysunek 3-31. Zarys próbki do badania stabilizacji siły nagniatania a) zarys frezowany, b) skorygowany zarys do wygenerowania programu sterującego nagniataniem

Próbkę frezowano kształtując frezem kulistym o średnicy 20 [mm] wg strategii promieniowej. Nagniatano końcówką z kulką ceramiczną ZrO_2 o średnicy $d_k=20$ [mm]. Zestaw parametrów technologicznych frezowania i nagniatania przedstawiono w tabeli 3-2.

Tabela 3-2. Parametry technologiczne użyte podczas eksperymentu ze stabilizacją siły nagniatania F_N

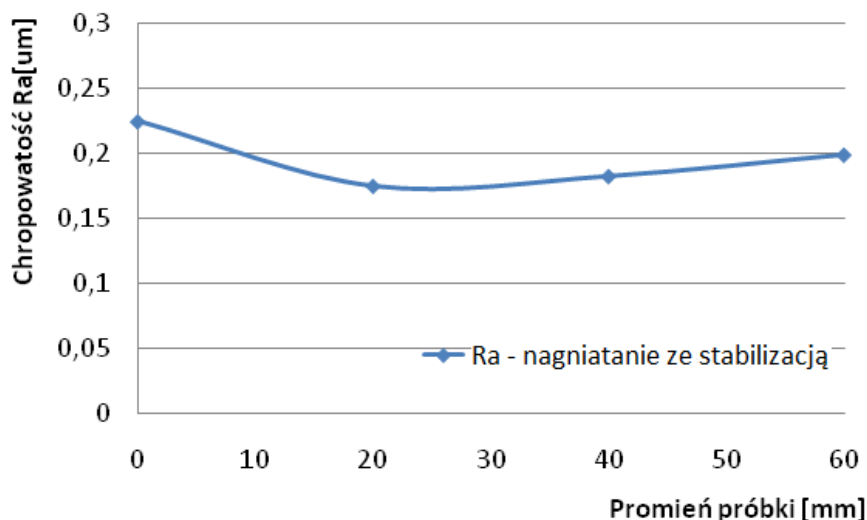
Parametry przy frezowaniu		Parametry przy nagniataniu	
v_c [m/min]	120	v_b [mm/min]	4000
f_r [mm/ostre]	0,15	F_N [N]	700
a_p [mm]	1	f_{wn} [mm]	0.1
f_{wf} [mm]	0,5	Liczba przejść	1

Próbka po nagniataniu została oznaczona celem łatwego zlokalizowania miejsc wykonania pomiarów SGP. Do pomiarów użyto przenośnego profilometru Hommel Etamic T1000. Ostrze odwzorowujące ustawiano stycznie do powierzchni, używano czujnika indukcyjnego TKU300/600, zakres pomiarowy 80 [μ m], $l_t=4,8$ [mm], $l_c=0,8$ [mm], $v_t=0,5$ [mm/s], filtr ISO 11562(M1). Wykonano po pięć pomiarów na każdym z promieni r , następnie obliczono wartości średnie, wyniki przedstawiono w tabeli 3-3.

Tabela 3-3. Wyniki pomiarów SGP powierzchni próbki po nagniataniu

Promień próbki na którym wykonano pomiar r [mm]	Parametr SGP [μm]	Nagniatanie promieniowe
0	Ra	0,224
	Rz	1,3
	Rmax	1,84
20	Ra	0,175
	Rz	1,07
	Rmax	1,29
40	Ra	0,182
	Rz	0,96
	Rmax	1,14
60	Ra	0,199
	Rz	1,05
	Rmax	1,4

Na podstawie wyników z przeprowadzonego badania można stwierdzić, że próbka nagniatana w całym obszarze cechuje się dość jednorodnym stanem SGP, różnice wyników pomiędzy pomiarami na różnych promieniach próbki nie są istotne, (rysunek 3-32). Należy uznać, że uzyskany wynik potwierdza praktyczną możliwość wykorzystania narzędzia z miechowym tłokiem również do stabilizacji siły nagniatania F_N .



Rysunek 3-32. Wartości średnie parametru Ra uzyskane podczas nagniatania ze stabilizacją siły F_N metodą korekcji długości narzędzia Z

Podsumowując wynik eksperymentu można stwierdzić, że założenia teoretyczne zostały potwierdzone doświadczalnie, a uzyskany wynik jest zadowalający.

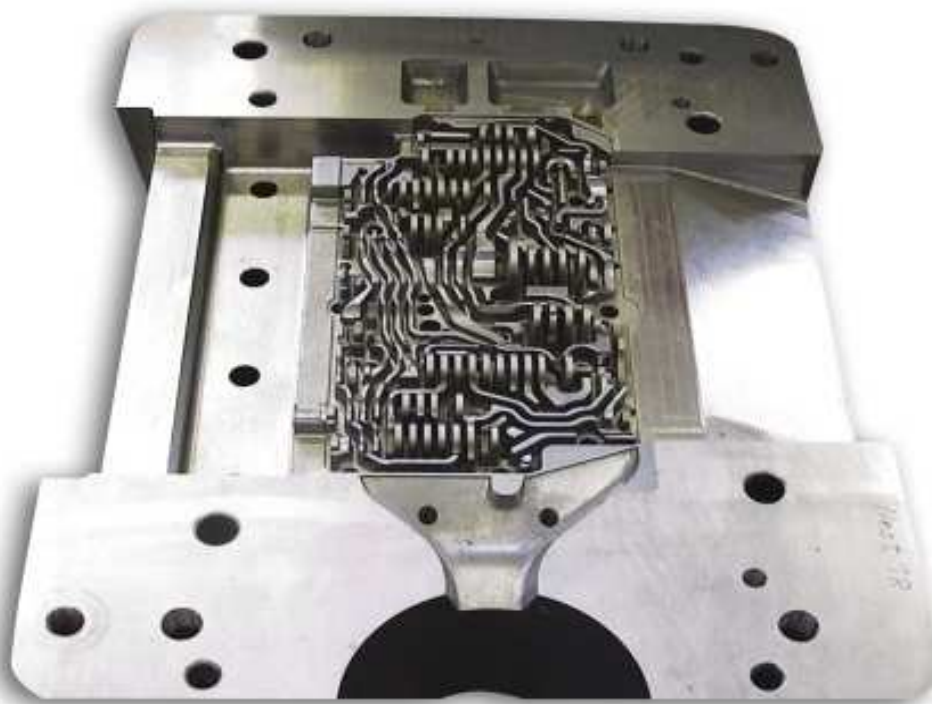
Sprężysty miech napięty sprężyną śrubową nadaje narzędziu liniową charakterystykę $F = f(z)$. Umożliwiając w ten sposób stabilizację siły nagniatania F_N przy obróbce powierzchni o złożonych zarysach, nie zmieniając ciśnienia cieczy. Szczególnie

pożądana jest stromo opadająca charakterystyka narzędzia (rysunek 3-29), wówczas można stosować szerszy zakres korekcji siły osiowej F_o przy $P_2 = \text{const}$.

Ograniczeniem w stosowaniu opisanej metody korekcji jest kąt zarysu powierzchni nagniatanej α . Projektowane końcówki nagniatające można stosować jedynie na powierzchniach gdzie wartość kąta α nie przekracza 35° .

3.4. Hydrostatyczny nagniatak kątowy

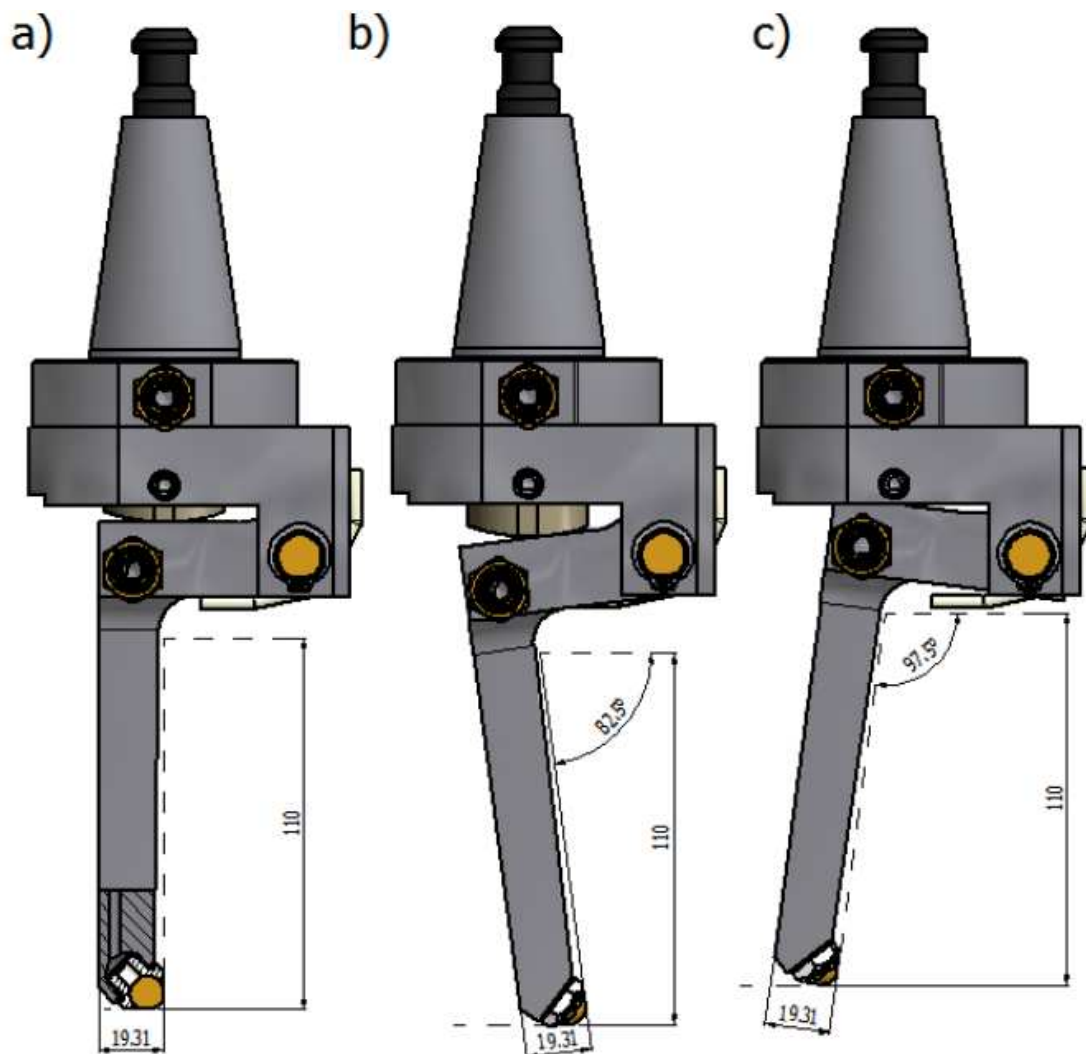
W praktyce przemysłowej wskazać można wiele przykładów gdzie nagniatanie powierzchni przestrzennych złożonych nie może zostać zrealizowane za pomocą opisanych powyżej narzędzi. Najpoważniejszym problemem jest brak możliwości normalnego ustawienia nagniataków prostych w wielu fragmentach części (rysunek 3-33). Częstym zadaniem technologicznym jest obróbka powierzchni równoległych do osi wrzeciona obrabiarki ($\alpha = 90^\circ$ – powierzchnie boczne kanałów).



Rysunek 3-33. Forma odlewnicza korpusu zaworu logicznego

Narzędzie kątowe jest jedynym sposobem prowadzenia obróbki w warunkach, w których kierunek działania końcówki nagniatającej nie pokrywa się z osią wrzeciona. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca w wąskich i głębokich kanałach końcówka nagniatająca musiała ulec zmniejszeniu, zrezygnowano z bezpośredniego pomiaru składowych siły nagniatania F_N . W konstrukcji wykorzystano dźwignię, gdzie na jednym

końcu została umieszczona końcówka nagniatająca, po drugiej stronie umieszczono zespół siłownika hydraulicznego. Stosowanie dźwigni (prostej lub kątowej) wymaga dla zapewnienia żądanej siły nagniatania F_N , przyłożenia po drugiej stronie siły o proporcjonalnie większej wartości. Ze względu na ograniczone możliwości zasilacza hydraulicznego, narzędzia kątowe odznaczają się powiększoną średnicą tłoka. Zasilanie łożyska hydrostatycznego odbywa się poprzez otwór wykonany w jednym z ramion dźwigni, w ten sposób oddalono od końcówki nagniatającej przyłącze hydrauliczne zasilające komorę łożyska hydrostatycznego.



Rysunek 3-34. Pozycje dźwigni nagniataka kątowego podczas obróbki: a) promieni na dnie kanałków; b) powierzchni bocznej kanałka; c) dna kanałka

Ze względu na brak bezpośredniej możliwości pomiaru składowych siły nagniatania nastawy realizuje się w oparciu o charakterystyki ciśnienie – siła wykonane podczas wzorcowania narzędzia. W przypadku nagniataków kątowych podobnie jak w rozwiązaniach narzędzi prostych należy szukać rozwiązań ograniczających

występowanie histerezy siły. W tym celu rozważane jest również zastąpienie tłoka sprężystym miechem bądź membraną.

3.5. Hydrauliczny układ zasilania narzędzi HFA

3.5.1. Wymagania wobec hydraulicznego układu zasilania

Z kolei gdy mowa jest o zasilaniu narzędzi hydrostatycznych do nagniatania najwygodniej byłoby aby układ hydrauliczny pracował na emulsji chłodząco smarującej, którą napełniony jest zbiornik obrabiarki skrawającej. Takie instalacje pomiędzy układami olejowymi a układami wodnymi oznaczane są jako układy do pracy na cieczach HFA. W cieczach HFA można wydzielić trzy grupy koncentracji oleju emulgującego i tak:

HFAS – są to newtonowskie ciecze będące emulsją oleju mineralnego lub syntetycznego o zawartości poniżej 2%, są to ciecze prawie wolne od oleju i ekologiczne. W obróbce skrawaniem tego typu medium jest używane niezmiernie rzadko jedynie w przypadku ściernej obróbki wykończeniowej, gdzie istnieje konieczność bardzo silnego chłodzenia bardziej niż konieczność smarowania. Taka ciecz w zasadzie nie ma właściwości antykorozyjnych.

HFAE – ciecze dające najmniejszą ochronę przeciwkorozyjną będące emulsją od 2 do 5% emulgującego oleju mineralnego lub syntetycznego, ciecze dość powszechnie używane w obróbce ściernej.

W przypadku obróbki kształtującej frezowaniem na uniwersalnych centrach obróbkowych najczęściej ma się do czynienia z cieczą HFA będącą emulsją wody i oleju emulgującego w proporcjach od 5 do 10% oraz lepkości kinematycznej ν w temperaturze 20°C na poziomie 30÷45 [mm²/s], oraz lepkości ν nie mniejszej niż 16÷22 [mm²/s] w temperaturze 50[°C]. Taka koncentracja oleju w cieczy sprawia, iż w zasadzie medium nie jest agresywne wobec przedmiotu obrabianego. W sytuacjach, gdy obrabiarka przeznaczona jest do obróbki wielozabiegowej części o skomplikowanym kształcie, gdzie oprócz prac frezarskich występować będzie wiercenie i gwintowanie stosuje się jeszcze bogatsze w olej ciecze chłodząco – smarujące. Taka sytuacja jest o tyle korzystna, że ciecz ma silne właściwości antykorozyjne i zadowalającą lepkość gwarantującą poprawne działanie elementów sterujących i generatorów energii w układach hydraulicznych. Problemem mogą stać się wydzielające się frakcje płynu agresywnego w chwilach dłuższych postoi agregatów, gdzie miejscowa korozja może doprowadzić do uszkodzenia

elementów sterujących przepływem i ich uszczelnień. Stąd też pomimo mało agresywnego charakteru płynu, należy całość układu projektować i wykonać przy założeniu odporności na korozję wszystkich jego elementów. Takie rozwiązania powodują znaczne podniesienie kosztów układów HFA w stosunku do ich odpowiedników olejowych. Dodatkową trudnością przy budowie zasilacza jest dość ograniczona możliwość w doborze komponentów, które odznaczają się gwarancją producenta na stosowanie cieczy HFA.

Projekt układu ewoluował z układu olejowego[47, 48]. Zakładano możliwość uzyskania ciśnienia zasilania w łożysku hydrostatycznym P1 rzędu 500 [bar]. Bazując na doświadczeniu z pracy na poprzednim zasilaczu, gdzie wydajność wynosiła 4.3 [l/min] postanowiono w nowoprojektowanym zasilaczu podnieść wydajność do około 10 [l/min] (dwukrotnie większa średnica kulki nagniatającej $d_k=20$ [mm], ciecz o mniejszej lepkości).

Przeprowadzone badania charakterystyki cieczy HFA dowiodły znaczącego spadku lepkości kinematycznej ν po przekroczeniu temperatury ok. 40°C. Chcąc wyeliminować zmiany charakterystyk układu spowodowane wpływem temperatury zdecydowano się wprowadzić odpowiedni układ chłodzący.

Ciecz hydrauliczna miała być pobierana bezpośrednio ze zbiornika obrabiarki. Projekt przewidywał zabezpieczenie elementów zasilacza odpowiednim zespołem filtrów.

3.5.2. Projekt hydraulicznego układu zasilającego

Podstawowym wymogiem przy budowie zasilacza było zapewnienie mobilności oraz niewielkich gabarytów celem swobodnego manewrowania w ograniczonej przestrzeni pomiędzy obrabiarkami CNC. Jako podstawę urządzenia wykorzystano wózek transportowy, wzmocniony ramą. Na bardzo małej powierzchni należało rozmieścić wszystkie elementy zasilacza, do których musiał być zapewniony dostęp w trakcie montażu, oraz podczas prowadzenia prac konserwacyjnych i serwisowych. Projekt zasilacza hydraulicznego przygotowano wykorzystując oprogramowanie CAD.

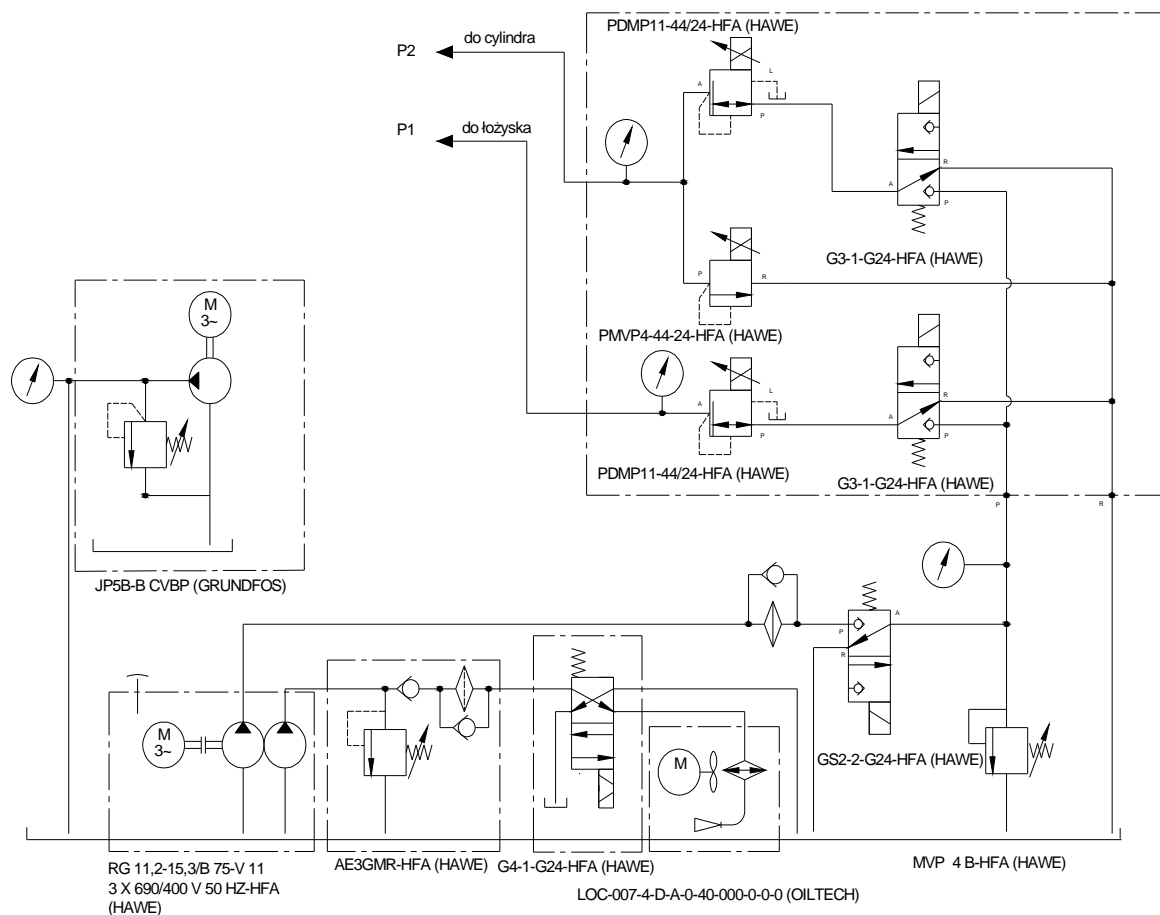
Układ hydrauliczny zasilacza podzielono na cztery części (układ ssąco – tłoczący, regeneracji cieczy, zasilania i regulacji oraz wyrównania ciśnienia), po wykonaniu schematów hydraulicznych przystąpiono do doboru odpowiednich komponentów. W związku z początkowymi trudnościami z wyszukaniem odpowiednich części układu z akumulatorami pęcherzowymi postanowiono opracować jeszcze jeden wariant zasilacza.

Projekt instalacji wyposażonej w akumulatory pęcherzowe dopuszczał stosowanie pomp tłoczkowych, w których występują znaczne pulsacje ciśnienia. Trudnością, z jaką się

liczono dopuszczając stosowanie tego rozwiązania jest konieczność użycia drogiego układu i trudnej operacji podnoszenia ciśnienia gazu w akumulatorach pęcherzowych, tak aby można było pracować z ciśnieniami powyżej 160 [bar]. Jednocześnie wykluczono użycie standardowych akumulatorów pęcherzowych ze względu na agresywny charakter cieczy chłodząco smarującej w stosunku do materiału przepony.

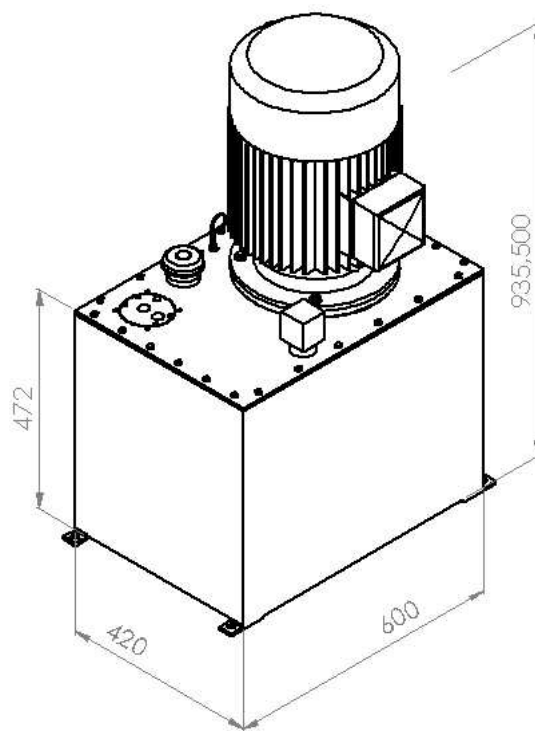
Drugim wariantem był układ wykorzystujący pompy wielosekcyjne tłoczkowe. Taka pompa odznacza się wprowadzaniem pulsacji ciśnienia o znacznie mniejszej amplitudzie i wyższej częstotliwości. Dodatkowo pulsacje cieczy hydraulicznej powinny zostać ograniczone po przejściu przez szereg zaworów redukcyjnych i przelewowych. Układ bez akumulatorów jest prostszy w wykonaniu i eksploatacji. Zdecydowano się na wykonanie zasilacza wg drugiego projektu (bez akumulatorów), dobrano w tym celu odpowiednią pompę. Na rysunku 3-35 przedstawiono projekt oraz wymieniono typ i producentów komponentów użytych do budowy zasilacza. Wszystkie elementy za wyjątkiem układu ssąco – tłoczącego posiadają dopisek HFA. Sercem układu jest tzw. powerpack firmy Hawe (rysunek 3-36).

W skład powerpacka wchodzi 75 litrowy zbiornik, dwie pompy wielotłoczkowe o wydajności 11,5 oraz 15,3 [l/min] będące w stanie zapewnić maksymalne ciśnienie robocze równe 690 [bar]. Do dodatkowego wyposażenia powerpacka należą elektroniczne czujniki poziomu i temperatury cieczy. Jedna z pomp odpowiedzialna jest za przetłaczanie cieczy przez układ regeneracji. W tym obiegu ciśnienie zredukowane jest za pomocą zaworu AE3GMR-HFA, następnie ciecz kierowana jest do niskociśnieniowego filtra firmy PARKER. Producent komponentów hydraulicznych (firma Hawe) wymaga w instalacji HFA filtrów o stopniu filtracji cząstek stałych poniżej 10 [μm]. Rozdzielacz G4-1-G24-HFA w zależności od temperatury emulsji w zbiorniku głównym łączy się i prowadzi strumień cieczy na chłodnicę olejowo – powietrzną firmy OILTECH, w przypadku gdy układ jest zimny sprawia że przefiltrowana ciecz krąży w zbiorniku głównym szybciej się nagrzewając. Według zaleceń producenta dobrano chłodnicę na 50% mocy silników zainstalowanych w układzie.



Rysunek 3-35. Zasilacz hydrauliczny bez akumulatorów pęcherzowych

Druga z pomp (o większej wydajności), zasila poprzez filtr wysokociśnieniowy PARKER i zawór bezpieczeństwa MVP 4B-HFA blok zasilania i regulacji. Ciecz hydrauliczna po przejściu przez rozdzielacz G3-1-G24-HFA, i wyregulowaniu ciśnienia zaworem proporcjonalnym PDMP11-44/24-HFA, zasila ciśnieniem P1 komorę łożyska hydrostatycznego narzędzia. Drugi obieg cieczy w układzie zasilania i regulacji po załączeniu rozdzielacza G3-1-G24-HFA, kieruje strumień cieczy na proporcjonalny zawór redukcyjny PDMP11-44/24-HFA, którego celem jest wyregulowanie ciśnienia P2 w komorze tłokowej narzędzia. Przelewowy zawór proporcjonalny PMVP4-44-24-HFA, odpowiedzialny jest za wypuszczenie nadmiaru cieczy z komory nad tłokiem w momencie wymuszonego ściskania narzędzia. Stały poziom cieczy w zbiorniku głównym, połączonym poprzez odstojnik, zapewniała samozasysająca pompa wirowa JP5B CVBP (przeznaczona do przetłaczania cieczy agresywnych) firmy Grundfos.



Rysunek 3-36. Powerpack HAWE

Na potrzeby sterowania wprowadzono manometryczne punkty pomiaru ciśnienia. Na wejściu (przed zaworem PVP 4B-HFA) do głównego toru zasilania zastosowano klasyczny manometr glicerynowy WIKA klasy 1.6 o zakresie wskazań 0-600 [bar]. Pozostałe dwa punkty manometryczne, to pomiar ciśnienia bezpośrednio wychodzącego z zasilacza hydraulicznego w torze zasilania łożyska hydrostatycznego P1 oraz komory tłokowej P2 (rysunek 3-37) W tym celu użyto dokładnych czujników ciśnienia o liniowej charakterystyce (bar – mA) firmy PARKER typ SCPSD-600-14-27. Dodatkowo do zalet tych czujników należy zaliczyć dokładność, która wynosi $\pm 0,5\%$ wartości ciśnienia roboczego, oraz temperaturowa stabilność wskazań wynosząca $\pm 0,02\%$ ciśnienia roboczego (w zakresie pracy $-20, +80^{\circ}\text{C}$).

Po wykonaniu instalacji hydraulicznej i pierwszych próbach rozruchowych pojawił się problem podczas uruchamiania w sytuacji, gdzie wyłączono zasilacz pracujący pod wysokim ciśnieniem. Przy ponownym uruchomieniu pompy powerpacka generowały wysokie opory, utrudniając ponowny start silnika elektrycznego

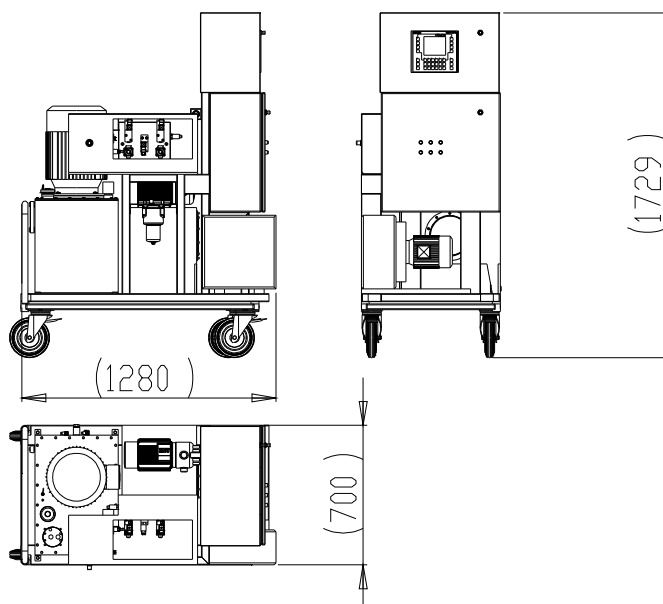


Rysunek 3-37. Manometry cyfrowe podczas pracy urządzenia a) ciśnienie panujące w łożysku, b) ciśnienie zasilania komory tłokowej narzędzia

Wprowadzono w układzie dodatkową instalację tzw. rozruchową. Głównym elementem opisywanej modyfikacji jest rozdzielacz zaworowy GS2-2-24-HFA. Rozdzielacz zamontowany przed zaworem MVP 4B-HFA, automatycznie załącza się w chwili startu układu kierując strumień cieczy z głównego toru zasilana z powrotem do zbiornika. Układ działa podczas przełączania silnika elektrycznego w procedurze rozruchowej gwiazda – trójkąt. Wyłączenie następuje samoczynnie po czasie, gdy układ osiągnie pełną sprawność. W ten sposób pompy przetłaczają ciecz bez oporów ułatwiając start silnika. W ślad za modyfikacją w układzie hydraulicznym zasilacza koniecznym było wprowadzenie odpowiedniej przeróbki w układzie elektrycznym.

Przy doborze wysokociśnieniowych elementów układu filtracji okazało się, że filtry przeznaczone do pracy przy ciśnieniach rzędu 500 [bar] nie należą do produktów standardowo oferowanych. W zasilaczu hydraulicznym użyto w torze zasilania łożyska hydrostatycznego P1 filtra, którego maksymalne ciśnienie pracy wynosiło 416 [bar]. Po ustawieniu i zamocowaniu wszystkich elementów układu wykonano połączenia rurowe pomiędzy blokami zaworowymi.

Po zmontowaniu hydrauliki podłączono instalację elektryczną.



Rysunek 3-38. Projekt zasilacza hydraulicznego do pracy na cieczech HFA

Projekt instalacji elektrycznej musiał odpowiadać wymaganiom stawianym przemysłowym, mobilnym urządzeniom dużej mocy zasilanym z instalacji trójfazowej prądu przemiennego. Zakładano pracę zasilacza w warunkach produkcyjnych w środowisku o znacznym zapyleniu, wilgotności oraz dużej zmienności temperatur. Przy konstrukcji urządzenia należało zwrócić uwagę, że w bezpośredniej bliskości instalacji elektrycznej poprowadzone będą wysokociśnieniowe przewody hydrauliczne, których rozszczelnienie może nieść niebezpieczne następstwa w połączeniu z prądem przemiennym o dużym natężeniu. Kolejnym ważnym wymaganiem jest doprowadzenie źródła energii elektrycznej do wszystkich elementów układu. W torze mocy wykorzystywany jest prąd przemienny trójfazowy. W torze sterowania i regulacji wymagany jest prąd stały o napięciu 24[V]. Reasumując należało zaprojektować dwa odrębnie zabezpieczone obwody elektryczne do zasilania wszystkich elementów zasilacza, które będą cechowały się odpornością na warunki środowiskowe, drgania, przypadkowe uszkodzenia mechaniczne oraz co najważniejsze będą odpowiadały klasie ochrony urządzeń przed penetracją czynników zewnętrznych IP 46 (ochrona przed ciałami stałymi o wielkości ponad 1 [mm] i ochrona przed silnym strumieniem wody lub zalewaniem falą z dowolnego kierunku zgodnie z normą PN-EN 60529:2003).

W celu spełnienia wspomnianych wymagań umieszczono wszystkie najważniejsze elementy instalacji elektrycznej w ochronnej szafce rozdzielczej, przytwierdzonej do ramy zasilacza za pomocą śrub z wkładkami wibroizolującymi. Przewody elektryczne wyprowadzono z szafki poprzez specjalne uszczelniane przelotki. Przewody zasilające

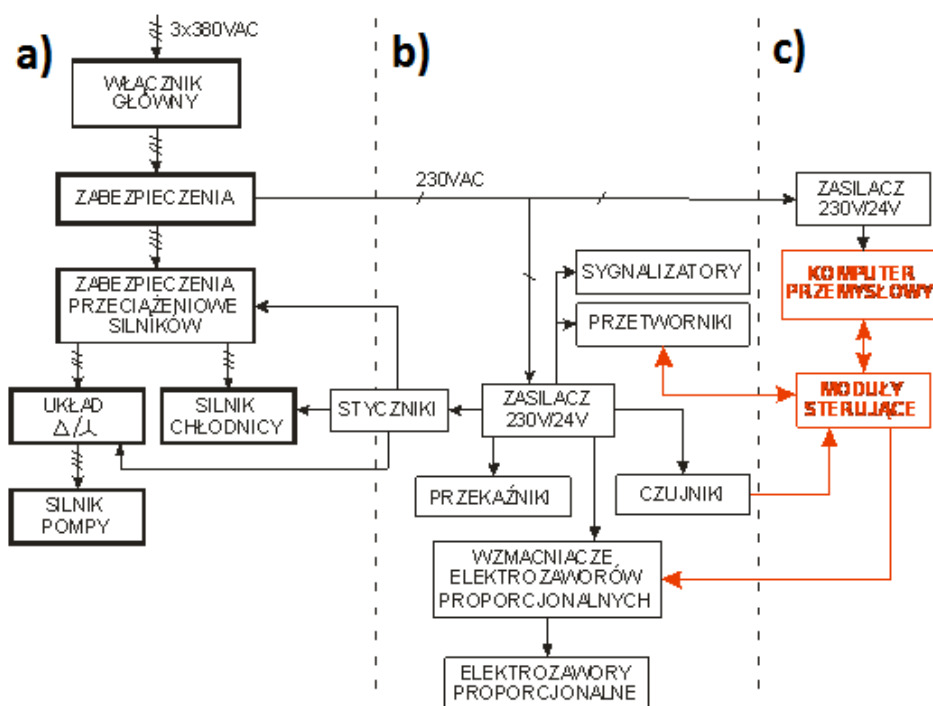
zebrano w wiązki poprowadzone po ramie nośnej zasilacza. Newralgiczne miejsca gdzie przewody elektryczne mogły by ulec uszkodzeniom mechanicznym lub groziło by ich zalanie strumieniem cieczy z rozszczelnionego układu postanowiono zabezpieczyć układając instalację w rurkach ochronnych. Wiązki elektryczne ułożono w sposób umożliwiający w przyszłości dotarcie i wymianę każdego z przewodów bez konieczności wymiany całej wiązki.

Prace nad wykonaniem układu sterowania prowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie zrealizowano sterowanie analogowe (bloki a i b na rysunku 3-39). Po załączeniu włącznika głównego podane jest napięcie na bloki zabezpieczeń, w skład których wchodzi układ do kontroli kolejności faz i bezpieczniki przeciwzwarceniowe. Następnie zostają uruchomione końcowe elementy wykonawcze (silnik chłodnicy i pompy). Do silnika napędzającego pompę dołączono dodatkowy układ automatycznego rozruchu gwiazda – trójkąt. Układ ten konieczny jest podczas rozruchu silnika dużej mocy, dodatkowo wykonano połączenie z rozdzielaczem zaworowym będącym następstwem wprowadzonej modyfikacji układu hydraulicznego. Dzięki temu start pomp odbywa się na biegu luzem. Rysunek 3-39b przedstawia blok sterowania analogowego zasilany napięciem stałym +24[V]. Zasilacz elektryczny o odpowiedniej wydajności prądowej dostarcza energii potrzebnej do poprawnej pracy czujników i elementów elektronicznych sterujących pracą proporcjonalnych zaworów.

Blokiem pośrednim pomiędzy układami zasilanymi napięciem 3-fazowym (rysunek 3-39a) a sterowaniem 24V (rysunek 3-39b) jest blok styczników, które załączają - wyłączają odpowiednio zabezpieczenia przeciążeniowe silników i układ automatycznego załączania gwiazda – trójkąt. W bloku przekaźników umieszczono przekaźnik ustalający hierarchię sterowania (analogowe – cyfrowe). Przyjęto zasadę, w której nadrzędnym jest układ sterowania analogowego. Przejście na tryb pracy cyfrowego układu sterowania musi zostać wywołane odpowiednim sygnałem sterującym przekaźnika elektrycznego (blok b na rysunku 3-39). Wyłączenie układu cyfrowego, bądź jego awaria spowoduje automatyczny powrót do wartości nastawionych w sposób analogowy. Dzięki takiemu rozwiązaniu umożliwiono wcześniejszy rozruch zasilacza hydraulicznego, oraz opracowanie algorytmów potrzebnych w cyklu automatycznej pracy cyfrowego układu sterowania.

Uruchomienie cyfrowego układu sterowania pracą zasilacza było kolejnym etapem (rysunek 3-39c). Przed tym jednak określono bezwładność hydraulicznych elementów

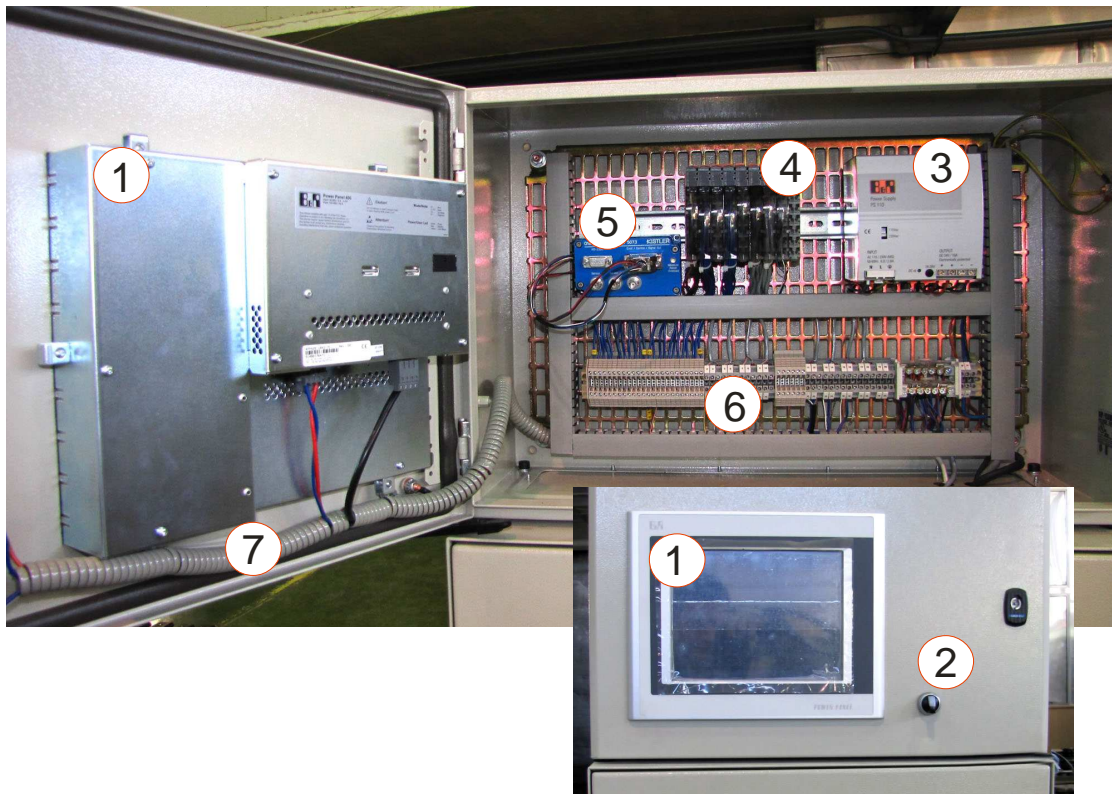
sterowania, oraz charakterystyki prądowe elementów układu pomiarowego. Sprawdzano obecność pętli histerezy dla opracowania zasad zwrotnego systemu regulacji.



Rysunek 3-39. Schemat blokowy układu sterowania

Ostatni blok (rysunek 3-39c) to układ sterowania oparty na komputerze przemysłowym, zasilanym z oddzielnego zasilacza o napięciu +24 [V]. Komputer przemysłowy wyposażony jest jednocześnie w ekran dotykowy, na którym umieszczono interfejs operatora i przyciski sterujące. Elementy elektroniczne cyfrowego układu sterowania podobnie jak elementy układu analogowego umieszczono w ochronnej szafie rozdzielczej. Konstrukcja cyfrowego układu sterowania opiera się na wykorzystaniu modułowych komponentów automatyki. Wygląd oraz rozmieszczenie elementów sterujących wewnątrz szafy przedstawiono na rysunku 3-40.

Na drzwiach szafy sterującej zamontowano komputer sterujący z widocznym panelem 1 oraz przyciskiem załączającym sekcje komponentów układów automatyki 2. Wnętrze szafy wyposażono w szyny montażowe DIN, do których zamontowano zasilacz 3, moduły sterujące 4, wzmacniacz sygnałów do pomiaru siły 5 oraz zaciski łączeniowe 6.



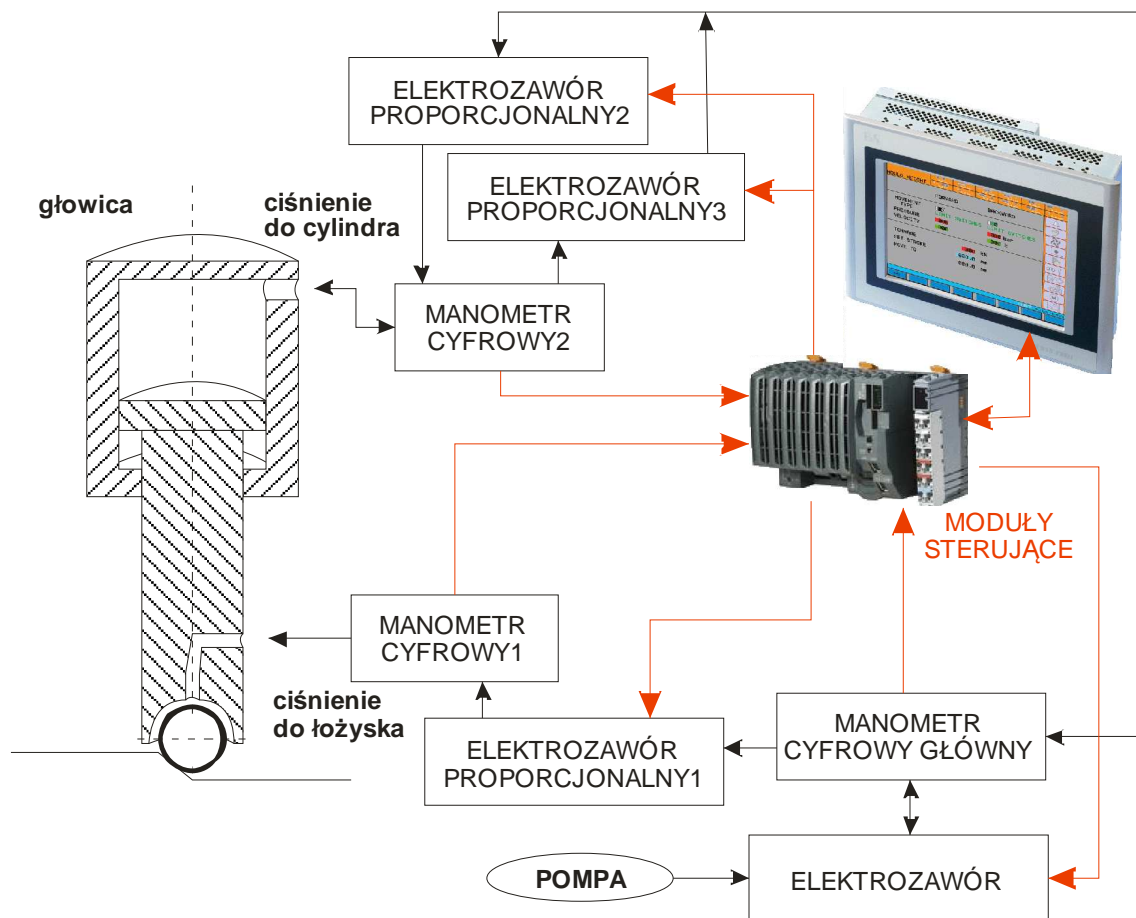
Rysunek 3-40. Wygląd szafy sterującej – cyfrowy układ sterowania

Fizyczne połączenie pomiędzy komputerem przemysłowym a modułami wewnątrz szafy odbywa się za pomocą przewodów umieszczonych wewnątrz elastycznych korytek 7. Na potrzeby sterowania cyfrowego zostały wprowadzone dodatkowe elementy sensoryki. Pomiar ciśnień i siły odbywa się niezależnie w układzie cyfrowym i analogowym. Analogowe sygnały z czujników zamontowanych w cyfrowym układzie sterowania zostają zamienione na postać cyfrową za pomocą odpowiednich modułów wejścia. Opracowaniem zebranych sygnałów zajmuje się komputer przemysłowy. Sygnał wyjściowy do hydraulicznego elementu wykonawczego zostaje wyprowadzony z komputera za pomocą modułów wyjścia.

Na rysunku 3-41 przedstawiono schemat blokowy pomiaru ciśnień emulsji w układzie. Czarnymi liniami zaznaczono kierunek przepływu cieczy hydraulicznej natomiast czerwonymi pokazano sygnały elektryczne.

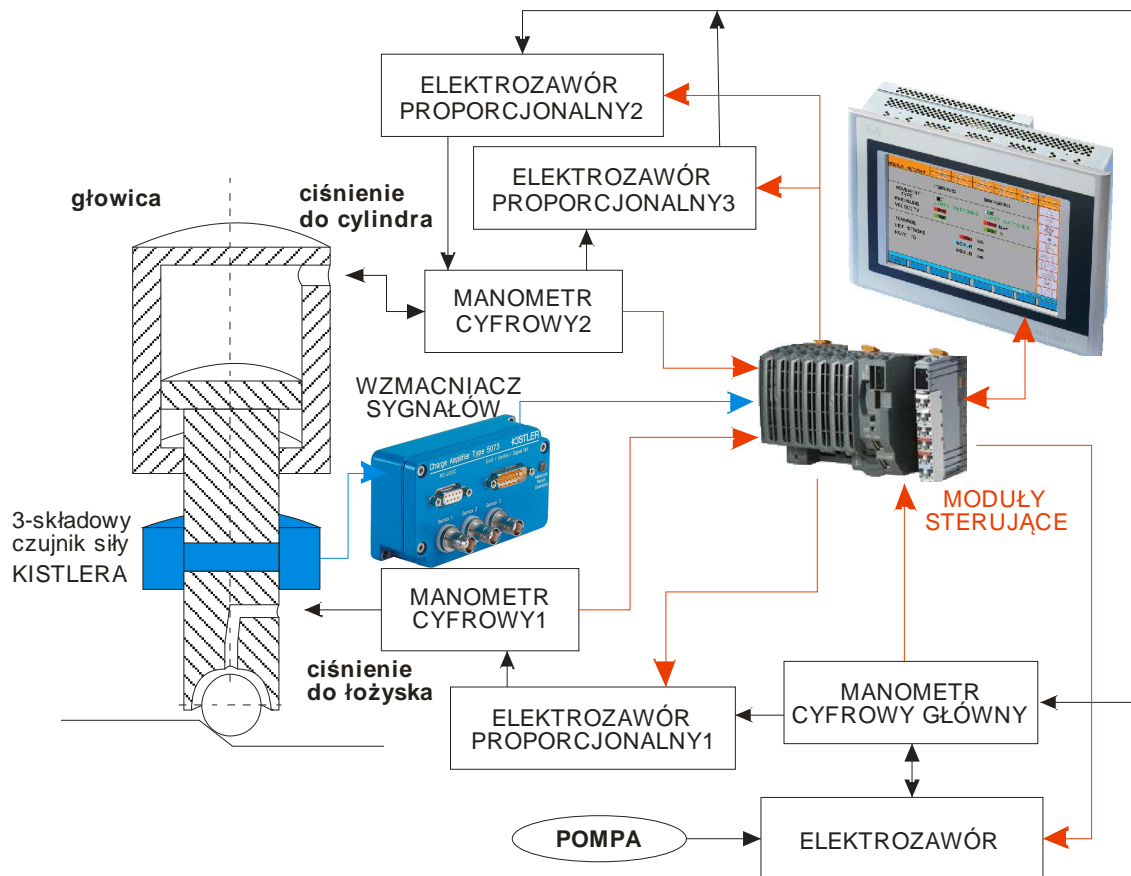
Sercem sterowania cyfrowego jest komputer przemysłowy PowerPanel firmy Bernecker&Rainer. Komputer za pomocą przemysłowego protokołu komunikacyjnego X2X współpracuje z modułami sterującymi. Połączone szeregowo moduły sterujące odpowiedzialne są za prawidłową, szybką i bezkolizyjną wymianę informacji sterujących pomiędzy komputerem przemysłowym a czujnikami oraz elementami wykonawczymi. Manometr główny kontroluje ciśnienie wychodzące z pompy. W przypadku zakłóceń

wynikających z nieprawidłowej pracy pompy elektrozawór odetnie dopływ emulsji do układu. Manometr cyfrowy 1 i manometr cyfrowy 2 czuwają nad stałym ciśnieniem P1 doprowadzanym do komory łożyska i ciśnieniem P2 doprowadzanym do komory tłokowej narzędzia. W przypadku zmian ciśnienia emulsji wynikających ze zmiany krzywizny obrabianej powierzchni nastąpi automatyczna korekta ciśnienia P2. Na potrzeby sterowania elektrozaworami proporcjonalnymi wykonano pomiary rzeczywistych charakterystyk prądowych zamontowanych elementów– charakterystyki teoretyczne podane przez producenta były niedokładne.



Rysunek 3-41. Schemat blokowy pomiaru ciśnienia w układzie

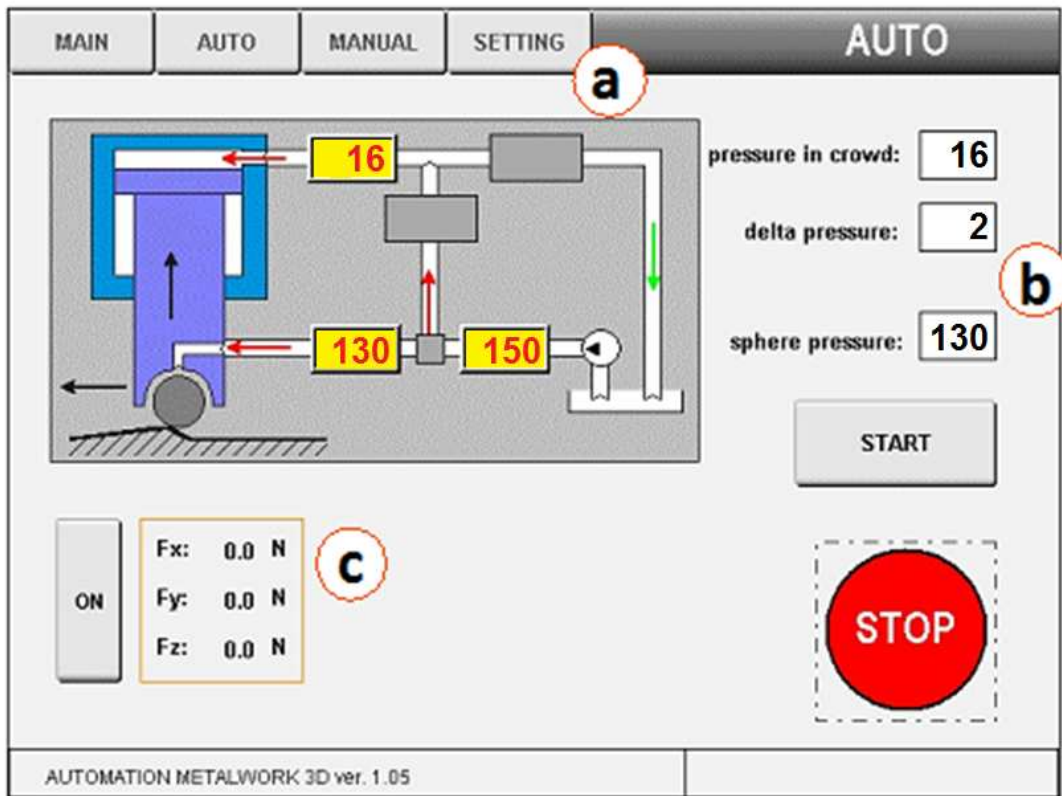
Ostatnią uruchomioną częścią sterowania cyfrowego był układ nadzoru składowych siły osiowej F_o . Schemat blokowy układu przedstawiono na rysunku 3-42. Sygnał z siłomierza zamontowanego w narzędziu zostaje poddany wstępnej obróbce we wzmacniaczu sygnału a następnie przesłany jest do modułów wejściowych w celu zamiany na postać cyfrową (po jednym module dla każdej z rejestrowanych składowych).



Rysunek 3-42. Schemat blokowy pomiaru siły w układzie

Zapisany w pamięci trwałej komputera program sterujący czuwa nad poprawną wymianą sygnałów sterujących z modułami zewnętrznymi. Sygnały odbierane po odpowiednim opracowaniu poddawane są dalszej obróbce w zainstalowanym komputerze wg przygotowanych algorytmów uwzględniających charakterystyki zainstalowanych urządzeń. Sygnał do wykonania zadanych poleceń uwzględnienia również charakterystyki rzeczywistych elementów elektrycznych i hydraulicznych. Dzięki temu przygotowany układ cyfrowego sterowania odznacza się stabilną i niezawodną pracą. Opracowane algorytmy są w stanie prawidłowo reagować na zmienne warunki pracy (np.: rozgrzewanie układu) utrzymując stałe wartości zadanych parametrów. Dzięki temu obsługa zasilacza jest bardzo prosta i nie wymaga sprawowania ciągłego nadzoru przez operatora.

Opracowano przejrzysty i prosty w obsłudze interfejs operatora (rysunek 3-43). Na wyświetlaczu komputera prowadzona jest pełna wizualizacja zasilania we wszystkich torach układu hydraulicznego dostępna jest również informacja na temat chwilowych wartości składowych siły nagniatania F_N .



Rysunek 3-43. Okno interfejsu operatora: a) wizualizacja parametrów ciśnienia; b) pole nastaw żądanych wartości ciśnienia; c) załączanie pomiarów i wizualizacja wartości składowych sił

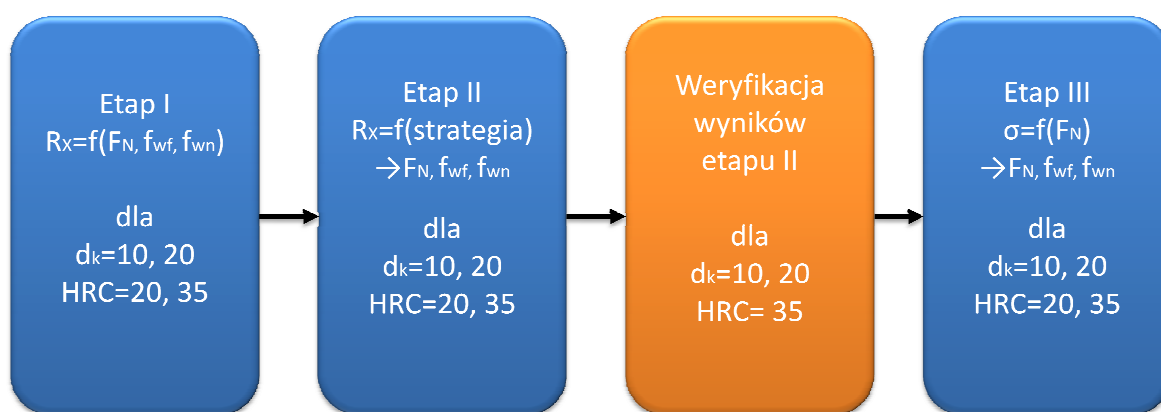


Rysunek 3-44. Zasilacz hydrauliczny w trakcie automatycznej pracy podczas nagniatania na obrabiarce pięcioosiowej

4. Badania doboru technologicznych parametrów obróbki

4.1. Planowanie badań

Celem prowadzonych badań jest określenie zakresu technologicznych parametrów oraz strategii obróbki, które dadzą najkorzystniejszy stan struktury geometrycznej powierzchni przestrzennych złożonych podczas obróbki na frezarskich centrach obróbkowych. Podjęta zostanie próba określenia poziomu wprowadzanych naprężeń w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego. W tym celu zostaną wzajemnie kojarzone różne strategie obróbki oraz technologiczne parametry frezowania i nagniatania. Obszar badań obejmować będzie dwa typy stali powszechnie używane w przemyśle maszynowym (C45 – 20HRC i 42CrMo4 – 35HRC). Przygotowane próbki zostaną nagniatane narzędziami z kulistym zakończeniem o średnicy $d_k=10$ i 20[mm]. Część właściwa badań doświadczalnych została podzielona na trzy etapy. Zdecydowano prowadzić prace w systemie szeregowym tj. każdy kolejny etap rozpoczęty zostanie dopiero po zamknięciu prac wcześniejszych, (opracowaniu i analizie zebranych danych) taki tryb pracy jest konieczny ze względu na szeroki zakres w różnych obszarach badań. Wyniki każdego z zamykanych etapów będą wypełniać plan eksperymentu realizowany w następnych częściach.



Rysunek 4-1. Schemat blokowy prowadzonych badań eksperymentalnych

Etap pierwszy ma na celu określenie zakresu zmienności parametrów technologicznych stosowanych podczas frezowania i nagniatania, głównym celem jest zawężenie obszaru badań realizowanych w dalszej części pracy, pozostawiając tylko reprezentatywny zakres zoptymalizowanych parametrów obróbki, w szczególności należy określić wpływ siły nagniatania F_N .

Podczas drugiego etapu badań sprawdzeniu podlegać będzie strategia obróbki. Zakłada się sprawdzenie rezultatów nagniatania prowadzonego strategią ortogonalną PR, podwójnie ortogonalną PP i krzyżową skośną SK. Dla przyjętych strategii zostaną wytypowane i wzajemnie skojarzone parametry technologiczne frezowania i nagniatania o różnych wartościach. Na zakończenie drugiego etapu badań przewiduje się przeprowadzenie badania weryfikującego uzyskane wyniki.

W dwóch pierwszych etapach do oceny wyników służyć będą wysokościowe parametry SGP.

W trzecim etapie zostanie podjęta próba określenia poziomu wprowadzanych naprężeń w warstwie wierzchniej. W tym celu zostaną przygotowane próbki spełniające ograniczenia dyfraktometru rentgenowskiego. Metoda pomiaru naprężeń z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego daje tym lepszy wynik im bardziej jednorodna jest powierzchnia. Z praktycznego punktu oznacza to, że szczególnie pożądane są powierzchnie pomiarowe o najmniejszych wysokościach nierówności. Plan eksperymentu w trzecim etapie będzie zatem nastawiony na uzyskanie minimum wysokościowych parametrów SGP. Zakłada się użycie sił nagniatania F_N o wartościach jak w etapach wcześniejszych. Wyniki prowadzonych prac powinny dać odpowiedź jak przyjęte parametry technologiczne frezowania i nagniatania wpływają na stan warstwy wierzchniej.

4.2. Badania eksperymentalne – etap pierwszy

Materiałem do badań były dwa gatunki stali: C45 ulepszona cieplnie do twardości 20HRC, oraz stal 42CrMo4 ulepszona cieplnie do twardości 35HRC. Podczas badań użyto nagniataka hydrostatycznego prostego – z tłokiem miechowym z końcówkami zaopatrzonymi w ceramiczne kulki (ZrO_2) o średnicy $d_k=10$ i 20 [mm]. Ze względu na trudności w przygotowaniu, oraz pomiarach SGP powierzchni próbek przestrzennych złożonych zdecydowano się zastąpić powierzchnię próbek 3D powierzchniami płaskimi. Próbki miały wymiary $100 \times 100 \times 20$ [mm]. Frezowanie kształtujące zostało zrealizowane na pięcioosiowym centrum frezarskim DMU-60 MONOBLOCK frezami z płytkami o średnicy d_o odpowiadającej średnicy kulki nagniatającej rysunek 4-2.



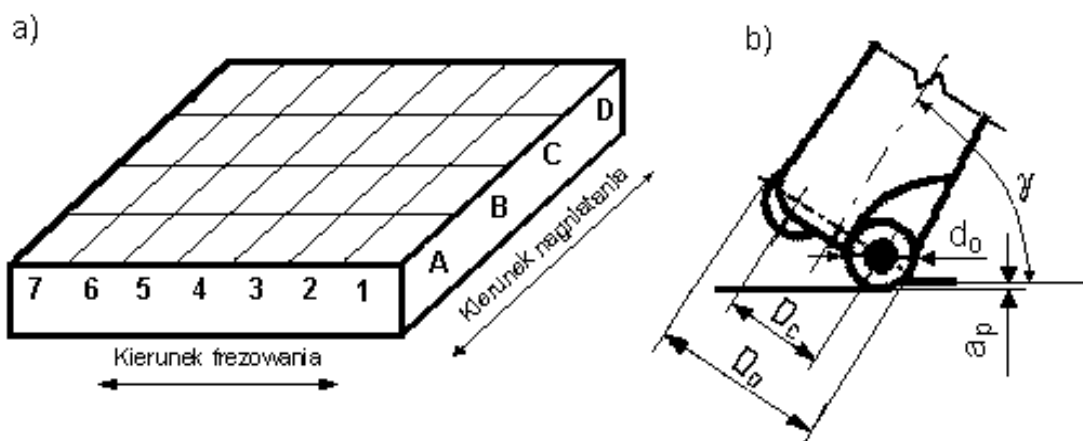
Rysunek 4-2. Frezowanie kształtujące próbek na centrum obróbkowym DMU-60 MONOBLOCK

Na podstawie prac wcześniejszych dotyczących warunków frezowania i nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych [45, 46] przyjęto przedziały zmienności technologicznych parametrów obróbki:

- wierszowanie przy frezowaniu $f_{wf}=0.1\div 0.7$ [mm]
- wierszowanie przy nagniataniu $f_{wn}=0.02\div 0.2$ [mm]
- siła nagniatania $F_N=200\div 1500$ [N] (górną granicę zakresu określono podczas badań)

Pozostałe parametry frezowania były takie same bez względu na stosowany wariant narzędzia i wynosiły odpowiednio $a_p=0.5$ [mm], $f_z=0.1$ [mm], $v_c=110$ [m/min]. Plan badań eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 4-1.

Próbkę podzielono na cztery pasy frezowane z różnymi wartościami wierszowania, gdzie pas A frezowano z wierszowaniem $f_{wf}=0.1$ [mm], B \rightarrow $f_{wf}=0.3$, C \rightarrow $f_{wf}=0.5$, D \rightarrow $f_{wf}=0.7$. Stosowano strategię prostopadłą, tj nagniatano pasami prostopadle zorientowanymi do śladów pozostawionych na powierzchni po frezowaniu (rysunek 4-3).



Rysunek 4-3. Przygotowanie próbek do badań: a) system oznaczania pól pomiarowych, b) sposób ustawienia narzędzia podczas frezowania próbek

Wierszowanie przy nagniataniu było takie same w każdym z przypadków obróbki (materiał, średnica kulki nagniatającej d_k), zdecydowano się użyć posuwu wierszowania $f_{wn}=0.12$ [mm]. Celem wykonania w prawidłowy sposób pomiarów SGP koniecznym było przygotowanie pól pomiarowych o minimalnej szerokości około 12 [mm], dlatego też na powierzchni próbki zrealizowano tylko siedem przypadków nagniatania oznaczonych cyframi. Dla łatwiejszego rozróżnienia pól pomiarowych pomiędzy każdym z fragmentów powierzchni nagniatanej pozostawiono około 1 [mm] przerwy uzyskując w ten sposób wyraźne rozgraniczenie pomiędzy poszczególnymi przypadkami nagniatania.

Tabela 4-1. Plan badań eksperymentalnych – etap pierwszy

Nazwa zmiennej	Materiał próbki	
	C45 (20HRC)	42CrMo4 (35HRC)
Posuw wierszowania, przy frezowaniu, f_{wf} [mm]	0,1; 0,3; 0,5; 0,7	0,1; 0,3; 0,5; 0,7
Posuw wierszowania, przy nagniataniu, f_{wn} [mm]	0,12	0,12
Siła nagniatania F_N [N]	200–1500 co 100	200–1500 co 100
Średnica kulki d_k [mm]	10, 20	10, 20
Strategia nagniat.	PR ¹	PR ¹
Liczba przejść nagniatania i	1	1

¹ PR – strategia nagniatania, kierunek przejść przy nagniataniu prostopadły do śladów po frezowaniu

W planie pracy założono, że każdy z przypadków obróbki prowadzony będzie na osobnej próbce, gdzie każda z próbek będzie wykorzystana tylko jeden raz. Z tego względu w pierwszym etapie badań wstępnie przygotowano po dwie próbki. Zakładano wstępnie badania w zakresie F_N 200 do 800 [N] na próbce pierwszej i F_N 900 do 1500 [N] na próbce drugiej, zwiększono wartość siły o 100 [N]. Po wykonaniu pierwszych próbek okazało się, że niezbędne jest odstępstwo od planu wg tabeli 4-1. Krok o jaki zmieniano wartość siły jest zbyt mały. Zwiększono również wartość siły maksymalnej z 1500 [N] do około 2000 [N]. Dla całego obszaru badań tj. każdego materiału i obydwu średnic narzędzi przewidziano przygotowanie ośmiu próbek. Nagniatanie prowadzono na centrum frezarskim MIKRON VCE 500 z prędkością $v_b=8000$ [mm/min] (z maksymalną wartością jaką można rozwinąć na wspomnianej obrabiarce). Pomimo zwiększenia wartości siły maksymalnej nagniatania stwierdzono, że siła $F_N \approx 2000$ [N] nie zapewnia osiągnięcia efektu, w którym powierzchnia jest nagniatana do tzw. „dna”. Czyli do momentu gdzie wszystkie wierzchołki i doliny nierówności powierzchni osiągną, linię średnią zarysu w profilu poprzecznym, a dalsze zwiększanie wartości siły będzie nieefektywne - nie będzie prowadziło do obniżenia wysokościowych parametrów SGP [64]. Siła $F_N=2000$ [N] była zbyt mała szczególnie przy obróbce stali o twardości 35HRC narzędziem o średnicy $d_k=20$ [mm]. Dlatego zdecydowano raz jeszcze rozszerzyć zakładany zakres sił do wartości około 3000 [N], wprowadzając trzecią próbkę gdzie siła nagniatania F_N zmieniała się w zakresie 2000 do 3000 [N].

Tabela 4-2. Wartości sił nagniatania stosowane podczas badań w pierwszym etapie

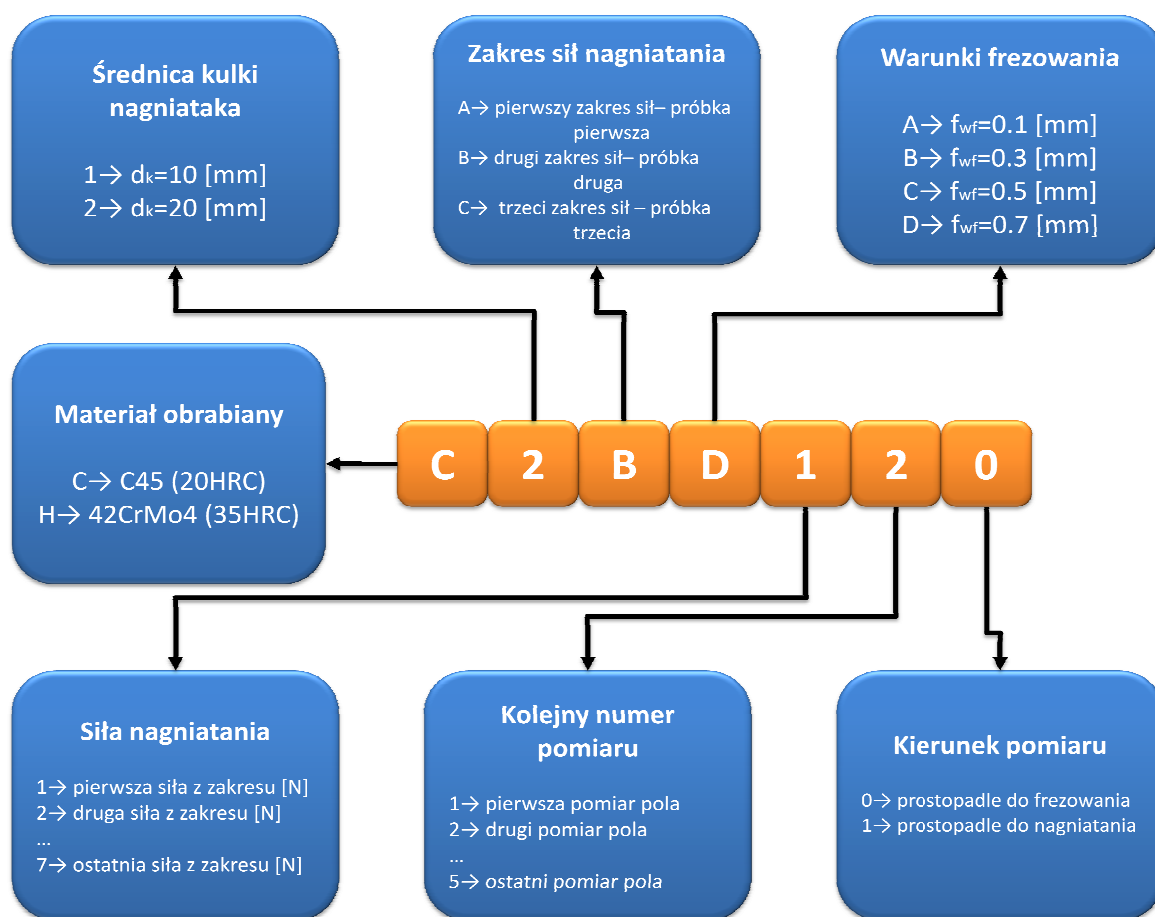
Średnica elementu	Nazwa próbki	Wartości używanych sił [N]	
		C45 (20 HRC)	42CrMo4 (35 HRC)
ø10	A	200; 300; 400; 500; 600; 700; 800	200; 400; 600; 800; 1000; 1200; 1400
	B	900; 1000; 1100; 1200; 1300; 1400; 1500	1600; 1800; 2000
	C	1700; 1900; 2100	2250; 2500; 2750; 3000
ø20	A	200; 400; 600; 800; 1000; 1200; 1400;	200; 400; 600; 800; 1000; 1200; 1400
	B	1600; 1800; 2000	1600; 1800; 2000
	C	2250; 2500; 2750; 3000	2250; 2500; 2750; 3000

Ostatecznie w pierwszym etapie badań przygotowano 12 próbek na których w sumie uzyskano 236 pól pomiarowych. Pomiary SGP wykonano profilometrem Hommel-Etamic T1000 wyposażonym w czujnik TKU 300/600. Pomiary obejmowały rejestrację profili obrobionej powierzchni, na odcinku pomiarowym $l_t=4.8$ [mm], z prędkością przesuwu czujnika 0.5 [mm/s]. W czasie pomiaru stosowano filtr ISO11562 (M1), $\lambda_c=0.8$ [mm].

Wyniki pomiarów SGP rejestrowano w formie zapisu chmury punktów profilu odwzorowanego. Taka forma rejestracji danych umożliwia wyznaczenie dowolnego parametru opisującego profil pierwotny (P), falistość (W), chropowatość (R), a także określenie przebiegu krzywych Abbota. Na każdym z pól wykonano pomiary w pięciu miejscach w kierunku prostopadłym do kierunku frezowania, dodatkowo w pasie B wykonano pięć pomiarów w kierunku prostopadłym do kierunku nagniatania.

Podczas badań została zarejestrowana duża liczba danych, celem ułatwienia identyfikacji wyników i warunków obróbki próbki zostały specjalnie oznaczone, a każdemu z zarejestrowanych profili nadawano nazwę wg przygotowanego schematu.

Rysunek 4-4 wyjaśnia system oznaczeń wyników pomiarów próbek w którym każdy ze zmierzonych profili jest opisany za pomocą kodu składającego się z siedmiu znaków i tak np.: C2BD121 oznacza pole pomiarowe na próbce z materiału C45 (20 HRC), frezowane i nagniatane narzędziami o średnicy d_o i $d_k=20$ [mm], zakres sił zrealizowanych na drugiej próbce 1600÷2000 [N] (tabela 4-2), pomiar wykonano bezpośrednio na polu frezowanym z $f_w=0.7$ [mm], nagniatanym z siłą $F_N=1600$ [N], jest to drugi z zarejestrowanych wyników pomiarów dla tego pola wykonany prostopadle do śladów frezowania.



Rysunek 4-4. System identyfikacji próbek i pól pomiarowych – etap pierwszy

Z zarejestrowanej chmury punktów dla każdego z profili wyznaczano wstępnie wytypowane parametry profilu (22 parametry), które następnie poddawane były obróbce. W pierwszej kolejności sprawdzono testem Grubbs'a czy pośród wyznaczonych wartości nie ma wyników odstających [52]. W następnym kroku z przetestowanych wyników wyznaczano wartość średnią każdego z zarejestrowanych parametrów. Opracowane przykładowe wyniki pomiarów dla pola C2BD120 przedstawiono w tabeli 4-3.

Tabela 4-3. Wartości średnie parametrów SGP wyznaczone dla pola pomiarowego C2BD120

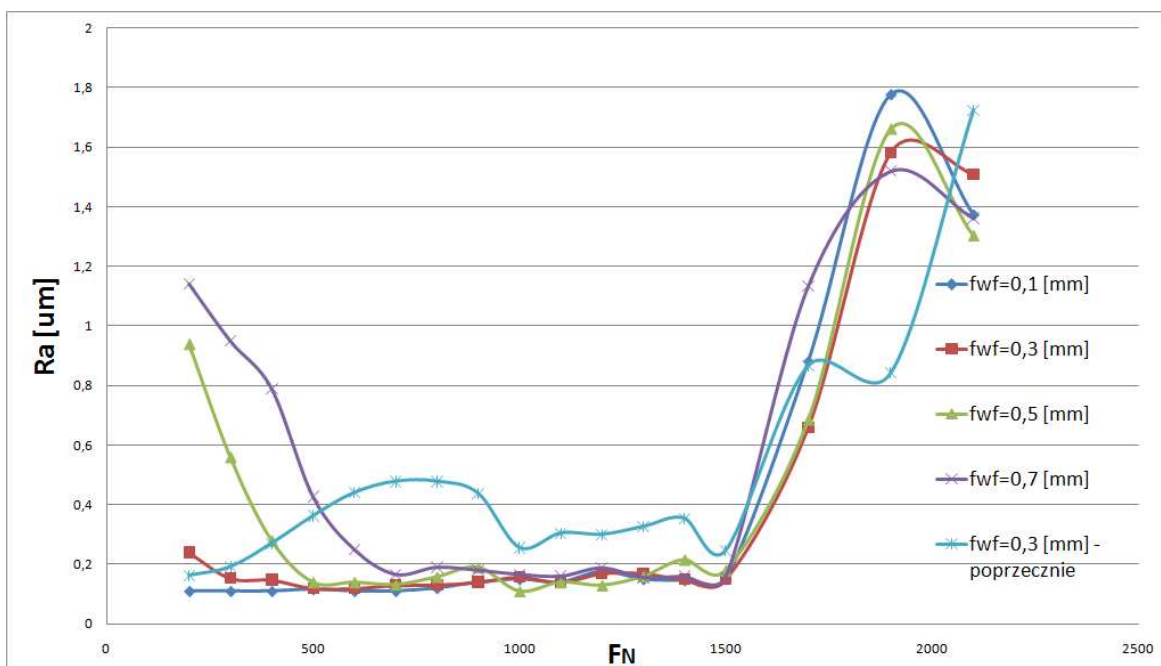
Symbol pola	Parametr SGP										
	Pt	Pp	Pz	Pa	Pq	Psk	Psm	Pdq	Rt	Ra	Rq
C2BD120	12,368	0,242	2,28	6,016	6,686	0,0148	0	0,0796	1,602	0,13	0,16
Symbol pola	Parametr SGP										
	Rsk	Rz	Rmax	Rku	Rpk	Rk	Rvk	MR1	MR2	A1	A2
C2BD120	0,8198	0,98	1,524	5,918	0,21	0,424	0,128	11,16	91,98	11,622	5,042

W efekcie prowadzonych prac dokonano systematyzacji dużej ilości danych. Opracowanie wyników badań eksperymentalnych winno mieć charakter praktyczny, dlatego też do oceny końcowej wyników prowadzonych prac postanowiono przyjąć jedynie parametr Ra. Wartość tego parametru jest wielkością najczęściej stosowaną przez konstruktorów w dokumentacji technologicznej form wtryskowych matryc i tłoczników.

Średnie wartości parametru Ra dla próbek zebrano w tabelach 4-4; 4-5; 4-6; 4-7.

Tabela 4-4. Wyniki pomiarów chropowatości Ra po nagniataniu materiału C45 (20HRC) obrabianej narzędziami o średnicy d_p i $d_k=10$ [mm]

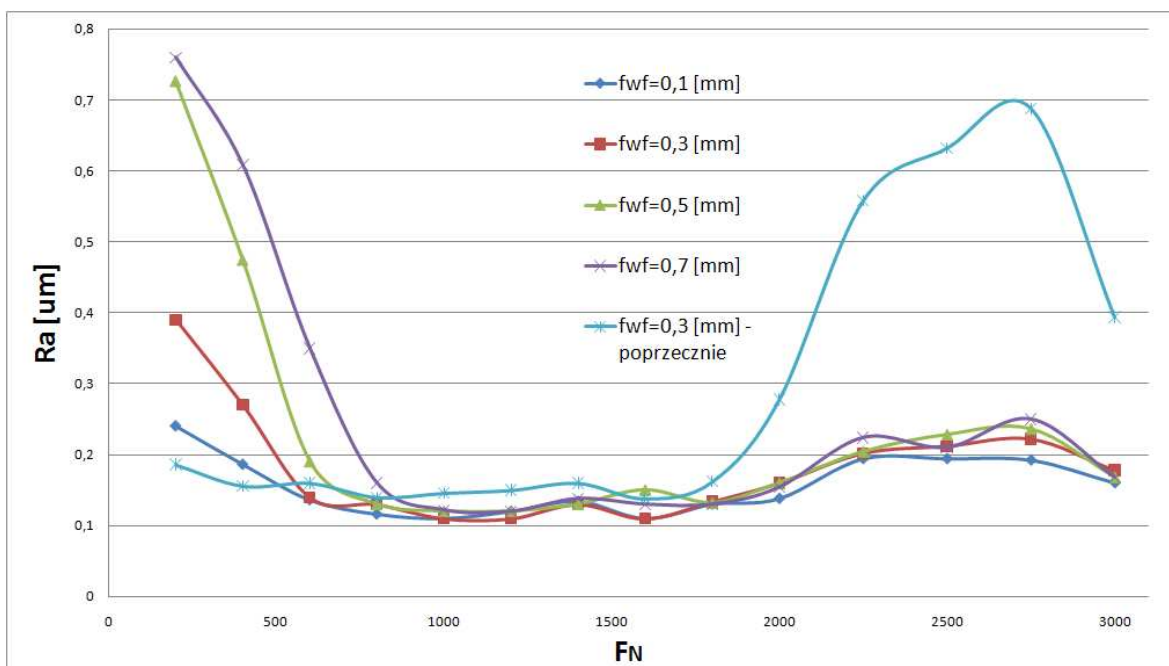
Posuw f_{wf} [mm]	Średnie wartości chropowatości powierzchni po nagniataniu Ra [μ m]								
	Siła nagniatania F_N [N]								
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0,1	0,11	0,11	0,11	0,116	0,11	0,11	0,12	0,14	0,15
0,3	0,24	0,154	0,148	0,12	0,12	0,13	0,132	0,14	0,158
0,5	0,94	0,56	0,28	0,14	0,14	0,132	0,158	0,19	0,11
0,7	1,142	0,95	0,79	0,428	0,25	0,166	0,19	0,18	0,166
0,3-p	0,162	0,191	0,27	0,362	0,44	0,478	0,478	0,438	0,256
Posuw f_{wf} [mm]	Siła nagniatania F_N [N]								
	1100	1200	1300	1400	1500	1700	1900	2100	
	0,1	0,14	0,176	0,15	0,146	0,15	0,882	1,778	1,374
0,3	0,14	0,17	0,17	0,15	0,15	0,66	1,582	1,51	
0,5	0,14	0,13	0,16	0,216	0,18	0,686	1,662	1,304	
0,7	0,16	0,188	0,156	0,16	0,158	1,134	1,52	1,362	
0,3-p	0,304	0,30	0,326	0,354	0,246	0,866	0,842	1,724	



Rysunek 4-5. Wykres parametru Ra w funkcji siły nagniatania F_N , po nagniataniu materiału C45 (20HRC) kulką o średnicy $d_k=10$ [mm]

Tabela 4-5. Wyniki pomiarów chropowatości Ra po nagniataniu materiału C45 (20HRC) obrabianej narzędziami o średnicy d_p i $d_k=20$ [mm]

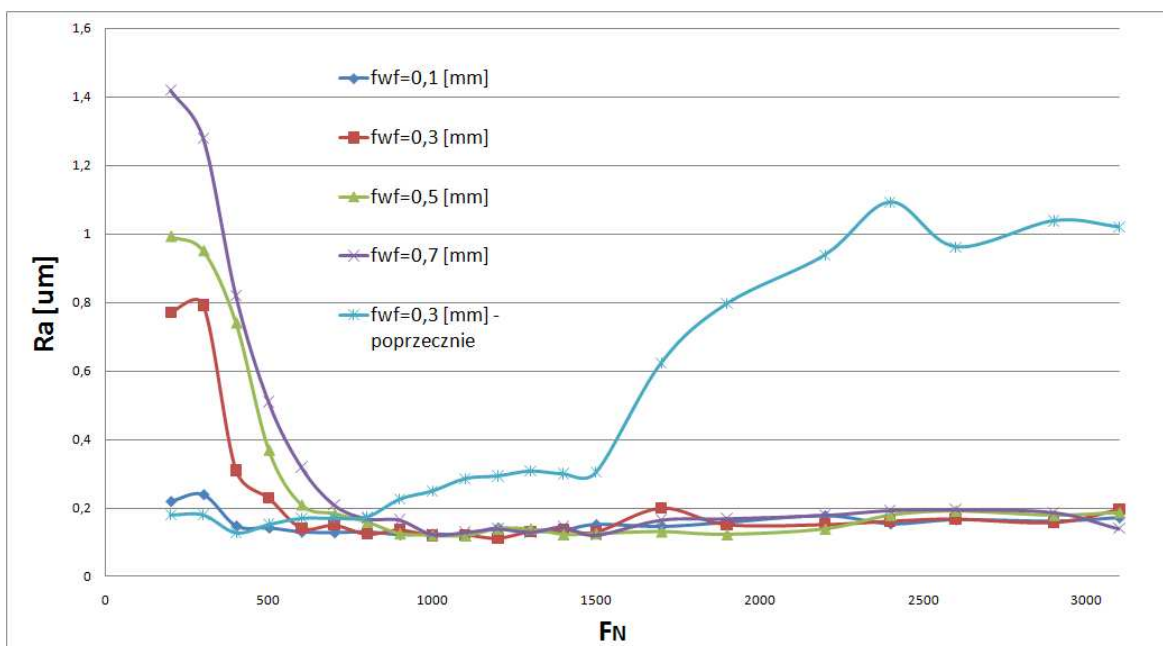
Posuw f_{wf} [mm]	Siła nagniatania F_N [N]													
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2250	2500	2750	3000
	Średnie wartości chropowatości powierzchni po nagniataniu Ra [μ m]													
0,1	0,24	0,186	0,136	0,116	0,11	0,12	0,134	0,11	0,13	0,138	0,194	0,194	0,192	0,16
0,3	0,39	0,27	0,14	0,13	0,11	0,11	0,13	0,11	0,134	0,16	0,202	0,212	0,222	0,178
0,5	0,726	0,474	0,19	0,13	0,12	0,12	0,13	0,15	0,132	0,16	0,204	0,228	0,236	0,168
0,7	0,76	0,608	0,35	0,16	0,122	0,12	0,138	0,13	0,13	0,154	0,224	0,21	0,25	0,168
0,3-p	0,186	0,156	0,16	0,14	0,146	0,15	0,16	0,138	0,162	0,278	0,558	0,632	0,688	0,394



Rysunek 4-6. Wykres parametru Ra w funkcji siły nagniatania F_N , po nagniataniu materiału C45 (20HRC) kulką o średnicy $d_k=20$ [mm]

Tabela 4-6. Wyniki pomiarów chropowatości Ra po nagniataniu materiału 42CrMo4 (35HRC) obrabianej narzędziami o średnicy d_p i $d_k=10$ [mm]

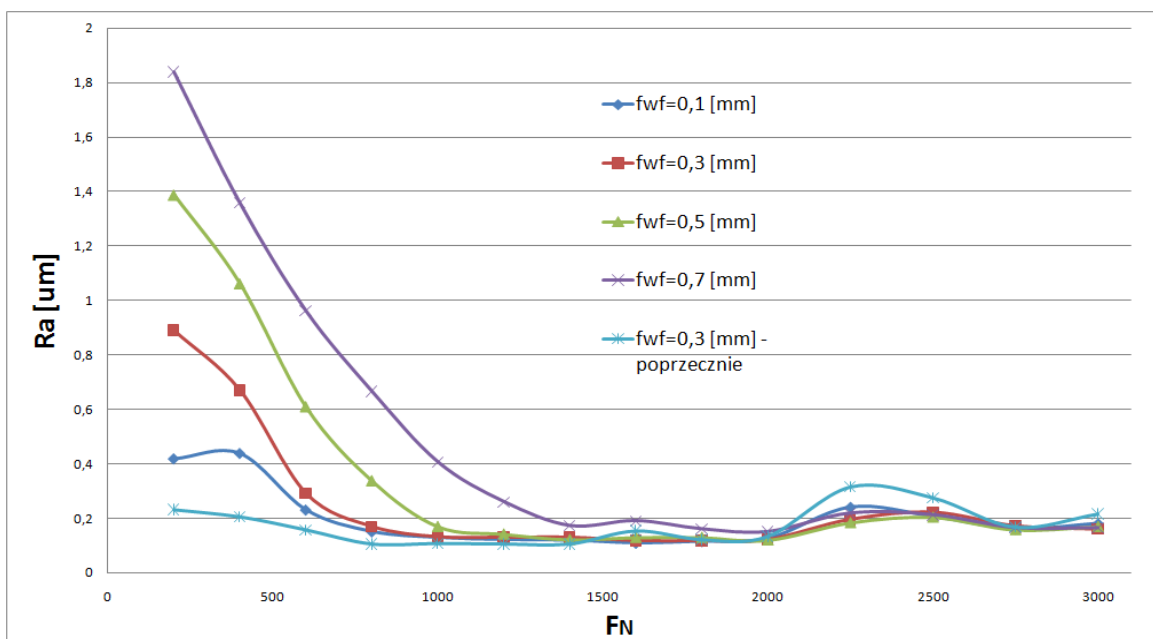
Posuw f_{wf} [mm]	Średnie wartości chropowatości powierzchni po nagniataniu Ra [um]										
	Siła nagniatania F_N [N]										
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
0,1	0,22	0,24	0,148	0,142	0,13	0,128	0,13	0,122	0,124	0,122	0,142
0,3	0,77	0,792	0,31	0,23	0,142	0,15	0,124	0,136	0,12	0,122	0,112
0,5	0,992	0,95	0,74	0,37	0,21	0,184	0,16	0,126	0,122	0,12	0,14
0,7	1,42	1,28	0,82	0,51	0,32	0,21	0,17	0,166	0,124	0,13	0,14
0,3-p	0,18	0,18	0,128	0,152	0,17	0,17	0,174	0,226	0,250	0,286	0,294
Posuw f_{wf} [mm]	Siła nagniatania F_N [N]										
	1300	1400	1500	1700	1900	2200	2400	2600	2900	3100	
0,1	0,132	0,134	0,152	0,146	0,158	0,178	0,154	0,166	0,162	0,172	
0,3	0,132	0,138	0,13	0,20	0,152	0,152	0,162	0,168	0,158	0,196	
0,5	0,14	0,124	0,126	0,132	0,124	0,14	0,18	0,192	0,18	0,188	
0,7	0,13	0,146	0,122	0,166	0,17	0,18	0,194	0,196	0,188	0,14	
0,3-p	0,308	0,300	0,304	0,624	0,796	0,938	1,092	0,962	1,038	1,02	



Rysunek 4-7. Wykres parametru Ra w funkcji siły nagniatania F_N , po nagniataniu materiału 42CrMo4 (35HRC) kulką o średnicy $d_k=10$ [mm]

Tabela 4-7. Wyniki pomiarów chropowatości Ra po nagniataniu materiału 42CrMo4 (35HRC) obrabianej narzędziami o średnicy d_p i $d_k=20$ [mm]

Posuw f_{wf} [mm]	Siła nagniatania F_N [N]													
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2250	2500	2750	3000
	Średnie wartości chropowatości powierzchni po nagniataniu Ra [μ m]													
0,1	0,42	0,44	0,232	0,152	0,13	0,122	0,12	0,11	0,116	0,126	0,242	0,208	0,162	0,182
0,3	0,89	0,67	0,292	0,17	0,132	0,13	0,13	0,118	0,118	0,122	0,196	0,222	0,172	0,16
0,5	1,388	1,062	0,61	0,338	0,17	0,142	0,122	0,13	0,13	0,12	0,184	0,204	0,158	0,17
0,7	1,84	1,358	0,962	0,666	0,406	0,26	0,172	0,19	0,16	0,15	0,218	0,212	0,164	0,164
0,3-p	0,232	0,206	0,158	0,106	0,108	0,106	0,106	0,154	0,122	0,134	0,316	0,276	0,168	0,216



Rysunek 4-8. Wykres parametru Ra w funkcji siły nagniatania F_N , po nagniataniu materiału 42CrMo4 (35HRC) kulką o średnicy $d_k=20$ [mm]

Zebrane w trakcie pierwszego etapu dane, prezentowane w formie wykresów $Ra=f(F_N)$ potwierdzają, że minimum chropowatości po nagniataniu występuje w pewnym zakresie sił nagniatania F_N . Przy niskich wartościach siły nagniatania zauważyć można dominującą chropowatość w kierunku równoległym do nagniatania, zależność ta jest dobrze widoczna dla większych wartości posuwów wierszowania przy frezowaniu ($f_{wf}=0.3\div 0.7$ [mm]). Zwiększenie wartości siły nagniatania zmniejsza chropowatość w kierunku równoległym do kierunku nagniatania, jednak nadmierny wzrost siły nagniatania prowadzi do wzrostu chropowatości w kierunku prostopadłym do kierunku nagniatania. Efekt ten jest szczególnie dobrze widoczny przy nagniataniu kulką o średnicy $d_k=10$ [mm] (rysunek 4-5; 4-7).

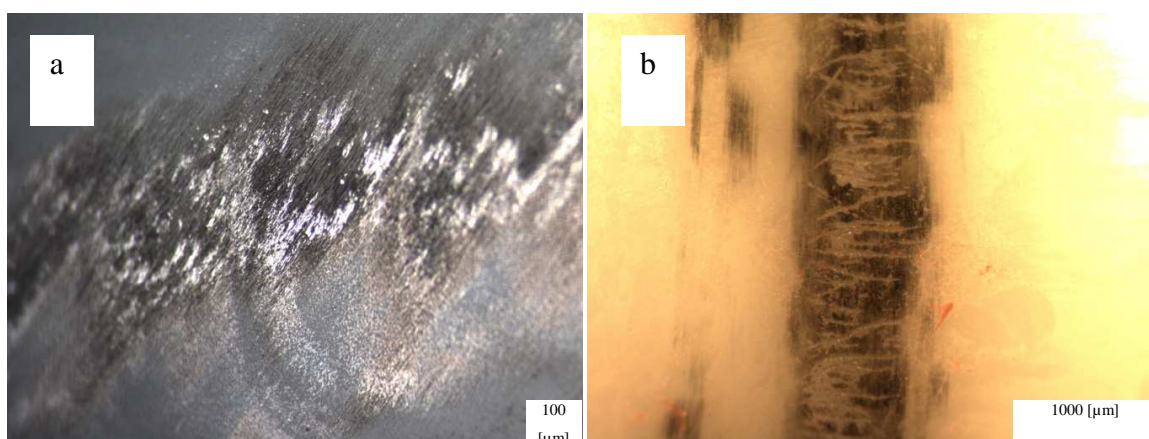
Analiza wykresów $Ra=f(F_N)$ posłużyła do określenia przedziałów zmienności siły F_N w drugim etapie badań doświadczalnych. Wytypowane wartości użyte w dalszej części badań przedstawiono w tabeli 4-8.

Tabela 4-8. Przedziały zmienności siły F_N wytypowane do drugiego etapu badań doświadczalnych

Materiał obrabiany	Siła (zakres siły) nagniatania F_N [N]	
	Średnica kulki nagniatającej d_k [mm]	
	10	20
C45 (20 HRC)	500	800
42CrMo4 (35 HRC)	500 ÷ 1500	800 ÷ 2000

Ważnym wynikiem pierwszego etapu prac eksperymentalnych było sprawdzenie właściwości ceramicznego materiału końcówki narzędzia podczas nagniatania naporowo – tocznego. Stosowano trzy powszechnie dostępne materiały. Przy okazji badań zasadniczych dokonano obserwacji na podstawie, których sformułowano ogólne wnioski, stanowiące systematyzację właściwości fizycznych przebadanych materiałów w odniesieniu do nagniatania.

W przypadku stosowania ceramiki do obróbki stali wysoko ulepszonych cieplnie kierowanie się jedynie twardością, oraz odpornością na pękanie kruche nie daje pełnej informacji. W trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono że materiał ceramiczny Si_3N_4 – teoretycznie najlepiej predysponowany (najwyższa twardość – tabela 4-9) do nagniatania dawał wyniki niezadowalające. Często obserwowano szybkie zużycie kulki nagniatającej spowodowanej starciem (rysunek 4-9a), oraz wykruszeniami (rysunek 4-9b).



Rysunek 4-9. Zużycie eksploatacyjne kulek ceramicznych a) starcie kulki z Si_3N_4 , b) wykruszenia i pęknięcia na obwodzie kulki z ZrO_2

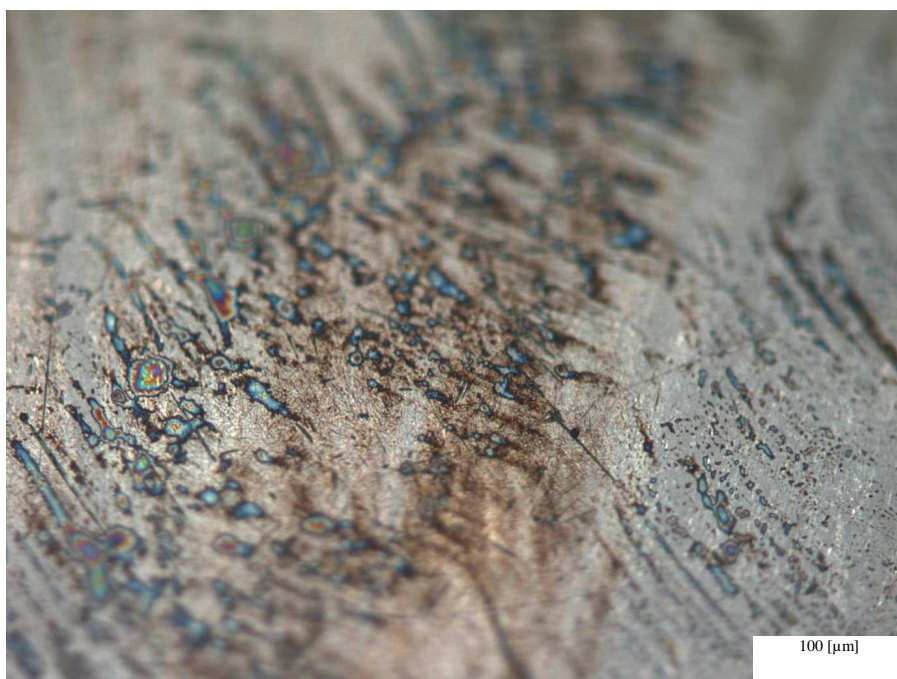
Stosując materiał Al_2O_3 można używać wyższych wartości sił nagniatania, dla tego materiału notowano również dłuższą trwałość. Spośród przebadanej ceramiki najlepiej wypadły kulki wykonane z ZrO_2 . Materiał ten odznaczał się najwyższą ze wszystkich odpornością na ściskanie i zginanie gwarantował również najdłuższy okres trwałości przy najwyższych wartościach siły nagniatania.

Tabela 4-9. Własności materiałów ceramicznych w porównaniu ze stalą stopową[79]

Własności	Jednostka	Stal stopowa	Si ₃ N ₄	ZrO ₂	Al ₂ O ₃
Gęstość	Kg/dm ³	7,6	3,2-3,3	6	3,93
Twardość Vickersa	HV	700	1500-1800	1200	1800
Twardość Rockwella	HRC	62	75-80	70	80
Wsp. rozszerzalności cieplnej α	$\alpha \times 10^{-6}/K$	10-16	3,2	10,5	9,1
Przewodność cieplna	W/mK	30-40	18	2	25
Maks. temp pracy	°C	120	800	500	1850
Moduł Younga	GPa	208	300-320	210	380
Wytrzymałość na zginanie (800°C)	MPa	-	200	300	220
Wytrzymałość na ściskanie (800°C)	MPa	400	1400	2100	1500
Odporność na pękanie kruche	MPa ^m ^{1/2}	25	18	10	4,6
Oporność elektryczna (600°C)	Ohm/m	0,1-1	10 ¹⁸	10 ¹⁵	10 ⁸
Samo smarowność	-	-	+++	++	+
Właściwości magnetyczne	-	+/-	-	-	-

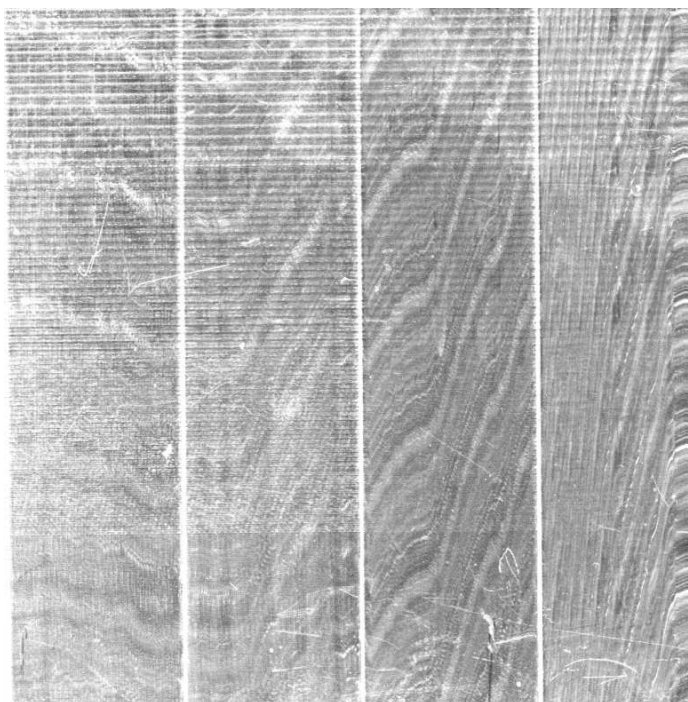
W trakcie prowadzonych prac notowano różne, nie opisane dotychczas w literaturze formy zużycia elementów nagniatających. Wyróżniono dwa typy: mikro i makrozużycie.

Ślady świadczące o występowaniu mikrozużycia na powierzchni ceramicznej elementu nagniatającego są niewidoczne gołym okiem. Interesujący jest mechanizm fizyczny tworzenia się tej formy zużycia. Najprawdopodobniej na skutek wciskania i łączenia cząstek metalu z materiałem ceramicznym zostają wypełnione nierówności w powierzchni kulki nagniatającej rysunek 4-10. Nagromadzony stopniowo materiał napierając na krawędzie rys na powierzchni ceramicznej, prowadzi do rozłupywania i powiększania się mikro szczelin na powierzchni kulki. W ramach prowadzonych badań nie określono dokładnie przyczyn i warunków powstawania tej formy zużycia.



Rysunek 4-10. Ślady tlenków metali będące następstwem wypełnienia mikro nierówności powierzchni kulki ceramicznej wykonanej z ZrO₂

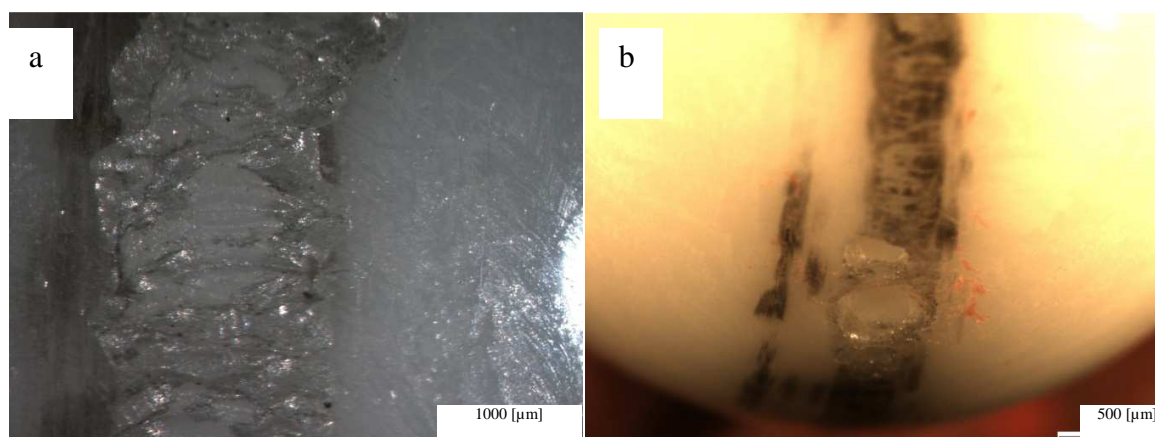
W trakcie badań eksperymentalnych wielokrotnie obserwowano efekty mikro zużycia końcówek nagniataków (rysunek 4-11). Na powierzchni przedmiotu obrabianego tworzyły się ślady układające się w regularne struktury, dodatkowo powierzchnia obrabiana uległa zmatowieniu.



Rysunek 4-11. Efekt mikrozużycia na powierzchni próbki 42CrMo4 (35HRC) obrobionej kulką ø10 Si₃N₄

Należy jednak pokreślić fakt, że osiągnęto redukcję wysokościowych parametrów SGP na poziomie porównywalnym z wartościami uzyskanymi w trakcie prawidłowo prowadzonego procesu obróbki. Oznaki mikrozużycia końcówki nagniatającej często były objawem poprzedzającym zużycie w skali makro.

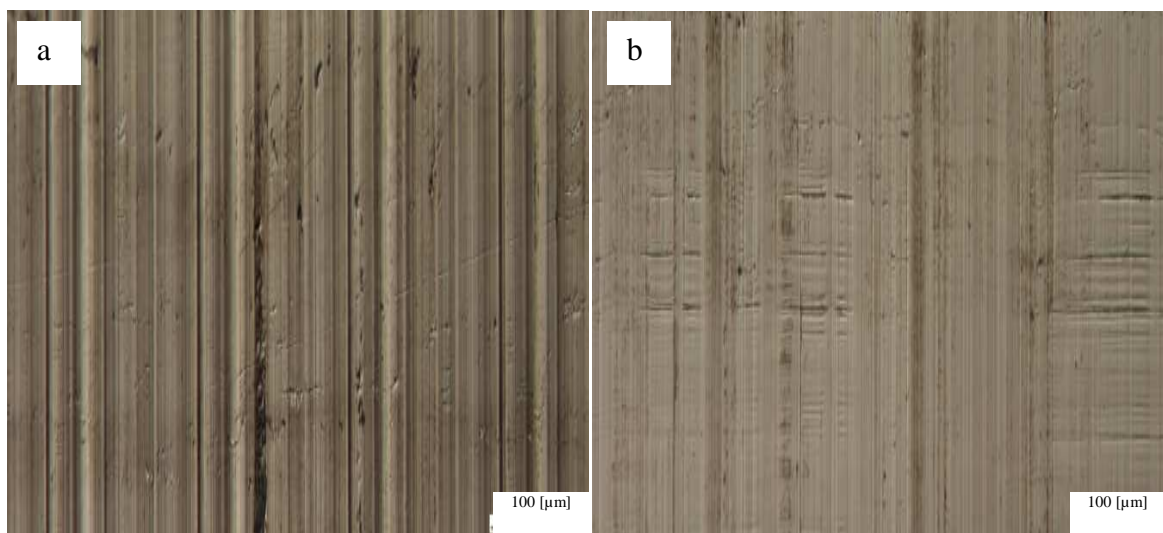
Makrozużycie kulki nagniatającej polega na tworzeniu się poprzecznych, głębokich pęknięć (rysunek 4-12a). Odsłaniające się ostre krawędzie poddawane dużym jednostkowym naciskom, krusząc się powodują odpadanie i łuszczenie coraz większych fragmentów. Na powierzchni kulki obserwowano tworzenie się kraterów rysunek (4-12b). Proces zużycia przebiegał gwałtownie.



Rysunek 4-12. Formy makro zużycia kulek ceramicznych z ZrO_2 a) poprzeczne pęknięcia; b) kratery będące efektem łuszczenia

Podczas prowadzonych prac obserwowano nagle pojawiające się makrozużycie elementów nagniatających bez wcześniejszych zapowiadających oznak w formie mikrozużycia.

Stosując nową kulkę, oraz dodatkowe przejścia nagniatania można usunąć skazy powstałe na powierzchni spowodowane mikrozużyciem końcówki narzędzia. Natomiast jeżeli dojdzie do makrozużycia powierzchni kulki nagniatającej, gwałtownemu pogorszeniu ulega stan obrabianej powierzchni, zostaje podniesiona wartość wysokościowych parametrów SGP (rysunek 4-13a). Powstałe w ten sposób defekty na powierzchni przedmiotu obrabianego są trudne do usunięcia pomimo stosowania dodatkowych – wygładzających przejść nagniatania.



Rysunek 4-13. Widok powierzchni próbki C45 (20HRC) frezowanej $f_{wf}=0.3$ [mm] i nagniatanej $f_{wn}=0.08$ [mm], $F_N=500$ [N]; a) powierzchnia porysowana; b) powierzchnia bez wad

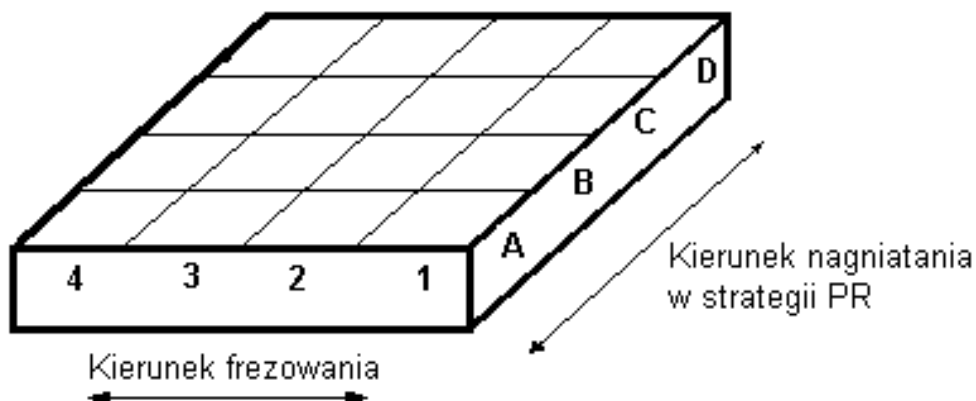
Na podstawie obserwacji zachowania ceramicznych kulek w pierwszym etapie badań doświadczalnych zdecydowano się stosować kulki nagniatające z materiału ZrO_2 . Ze względu na trudności w ocenie mikro zużycia w warunkach warsztatowych profilaktycznie przed przystąpieniem do obróbki wymieniano kulki w końcówce roboczej nagniataka. Poczynione obserwacje są poza głównym nurtem badań doświadczalnych i nie pozwalają na sformułowanie szczegółowych wniosków dotyczących zasad doboru ceramicznego materiału kulek przy nagniataniu naporowo – tocznym. Są jednak istotne ze względu na prawidłowy przebieg i wyniki uzyskiwane w dalszych częściach badań eksperymentalnych. Chcąc określić zależności pomiędzy stosowanymi siłami nagniatania, rodzajem i stanem materiału obrabianego a okresem trwałości ceramicznych kulek nagniatających należało by przeprowadzić odrębnie zaplanowany cykl badań.

4.3. Badania eksperymentalne – etap drugi

Celem drugiego etapu badań doświadczalnych było określenie wpływu strategii oraz parametrów technologicznych tj. posuwu wierszowania przy frezowaniu f_{wf} , posuwu wierszowania przy nagniataniu f_{wn} i siły nagniatania F_N na kształtowanie SGP.

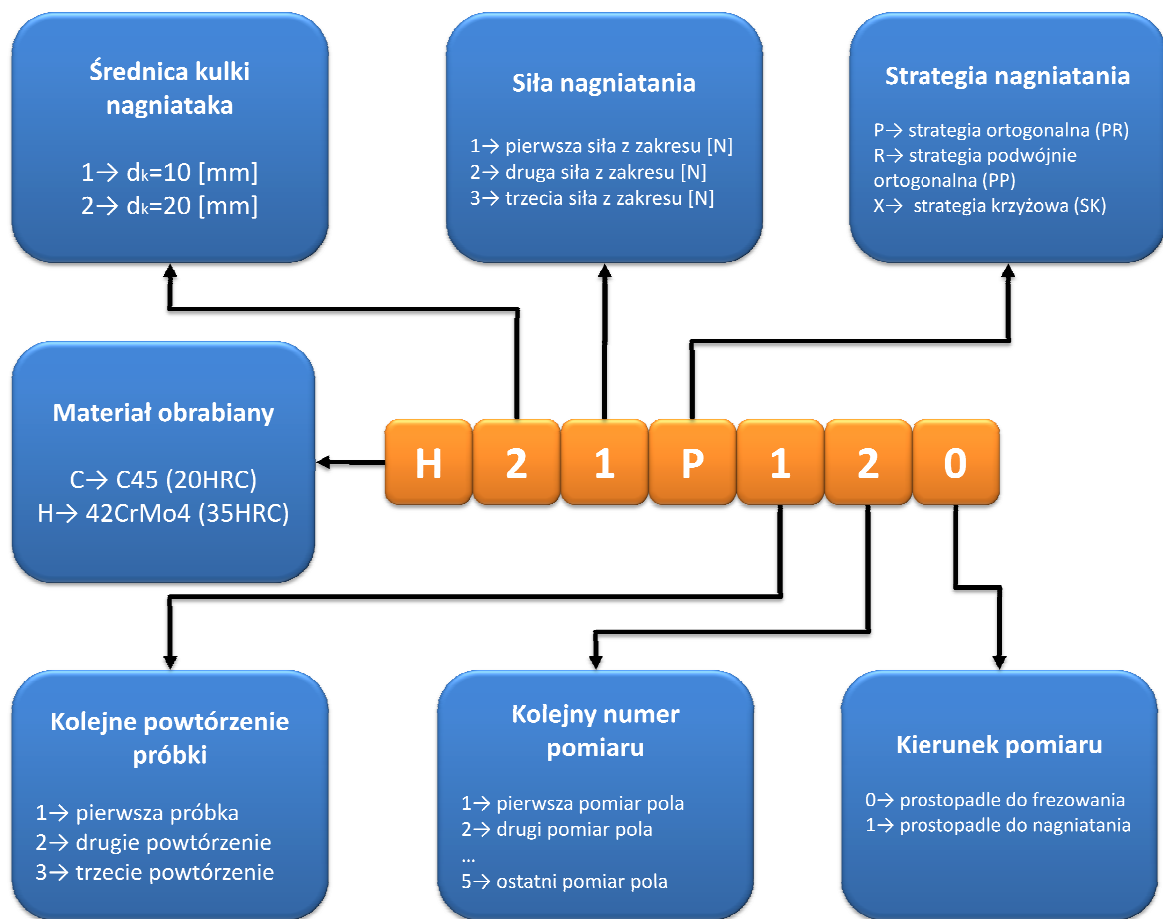
Badania podobnie jak w pierwszej części prowadzono stosując próbki płaskie, o wymiarach $100 \times 100 \times 20$ [mm]. Frezowanie kształtujące zrealizowano głowicami z płytkami okrągłymi $d_o=10$ i 20 [mm] na centrum obróbkowym DMU-60 MONOBLOCK. Próbkę podzielono na cztery pasy A, B, C, D frezowane z różnymi wartościami posuwu wierszowania f_{wf} , $A \rightarrow 0,1$ [mm], $B \rightarrow 0,3$ [mm], $C \rightarrow 0,5$ [mm]

i $D \rightarrow 0,7$ [mm] (rysunek 4-14). Wartości pozostałych technologicznych parametrów frezowania były takie same jak podczas pierwszego etapu badań.



Rysunek 4-14. Widok próbki przygotowanej w drugim etapie badań

Na powierzchni frezowanej zmieniając w kolejnych pasach wartość wierszowania zrealizowano cztery warianty nagniatania gdzie: $f_{wn.}$; $1 \rightarrow 0,02$ [mm], $2 \rightarrow 0,08$ [mm], $3 \rightarrow 0,14$ [mm], $4 \rightarrow 0,20$ [mm]. W ten sposób na każdej z próbek uzyskano szesnaście pól pomiarowych. Nagniatanie zrealizowano na obrabiarce MIKRON VCE 500, prędkość nagniatania była identyczna jak w pierwszym etapie badań $v_b=8000$ [mm/min]. Podobnie jak w pierwszym etapie każda z wykonanych próbek została oznaczona zgodnie z przygotowanym schematem (rysunek 4-15). Celem eliminacji tzw. błędów grubych i zjawisk losowych w badaniach doświadczalnych dotyczących strategii powtarzano trzykrotnie każdą z prób. Pomiary SGP realizowano analogicznie jak w pierwszej części badań używając profilometru Hommel – Etamic T1000. Na każdym z szesnastu pól doświadczalnych wykonano dziesięć pomiarów profilu powierzchni rzeczywistej – pięć prostopadle i pięć równoległe do kierunku nagniatania. Jako wynik końcowy przyjęto wyższą spośród dwóch wartości średnich obliczonych po odrzuceniu testem Grubbs'a wartości odstających.



Rysunek 4-15. System identyfikacji próbek i pól pomiarowych – etap drugi

Przygotowano dwa plany eksperymentów dla materiału C45 (20HRC) i 42CrMo4 (35HRC). W tabelach 4-10 i 4-11 prezentowane są kombinacje technologicznych parametrów obróbki (frezowania i nagniatania), oraz użytych wartości siły nagniatania F_N i średnic kulek. Przy czym pełen plan eksperymentu zakładający badanie wpływu strategii nagniatania zrealizowano dla materiału 42CrMo4. Uznano za niecelowe badanie wpływu strategii nagniatania przy obróbce tzw. stali miękkiej. Dla tego materiału prowadzono wiele prac poprzedzających właściwe badania doświadczalne. Ograniczając badanie strategii w przypadku stali miękkiej znacznie ograniczono liczbę próbek oraz skrócono czas opracowania wyników. Pomimo zastosowanego uproszczenia przygotowano dwanaście próbek uzyskując 192 pola pomiarowe. Czas potrzebny na obróbkę jednej próbki (frezowanie + nagniatanie) to blisko trzy godziny. Czas wykonania pomiarów wszystkich próbek ze stali C45 (20HRC) zajął około trzydziestu godzin. Dla stali 42CrMo4 (35HRC) zrealizowano pełen plan eksperymentu – wszystkie z wytypowanych wartości siły, oraz strategii. W sumie dla materiału 42CrMo4 przygotowano 24 próbki (384 pola pomiarowe), badania tego materiału trwały dwukrotnie dłużej w stosunku do stali C45. Podczas prowadzonych badań część próbek odrzucono ze względu na

występujące zużycie kulek nagniatających. W ich miejsce przygotowano i zmierzono próbki tzw. zapasowe.

Tabela 4-10. Parametry procesu nagniatania materiału C45 kulką o średnicy $d_k = 10$ i 20 [mm]

Nr punktu planu	Posuw wierszowania przy frezowaniu f_{wf} [mm]	Posuw wierszowania przy nagniataniu f_{wn} [mm]	Siła F_N [N]	
			$d_k = 10$ [mm]	$d_k = 20$ [mm]
1	0,1	0,02	500	800
2	0,1	0,08	500	800
3	0,1	0,14	500	800
4	0,1	0,20	500	800
5	0,3	0,02	500	800
6	0,3	0,08	500	800
7	0,3	0,14	500	800
8	0,3	0,20	500	800
9	0,5	0,02	500	800
10	0,5	0,08	500	800
11	0,5	0,14	500	800
12	0,5	0,20	500	800
13	0,7	0,02	500	800
14	0,7	0,08	500	800
15	0,7	0,14	500	800
16	0,7	0,20	500	800

Tabela 4-11. Parametry procesu nagniatania materiału 42CrMo4 kulką o średnicy $d_k = 10$ i 20 [mm]

Nr punktu planu	Posuw wierszowania przy frezowaniu f_{wf} [mm]	Posuw wierszowania przy nagniataniu f_{wn} [mm]	Siła F_N [N]	
			$d_k = 10$ [mm]	$d_k = 20$ [mm]
1	0,1	0,02	500	800
2	0,1	0,08	500	800
3	0,1	0,14	500	800
4	0,1	0,20	500	800
5	0,3	0,02	500	800
6	0,3	0,08	500	800
7	0,3	0,14	500	800
8	0,3	0,20	500	800
9	0,5	0,02	500	800
10	0,5	0,08	500	800
11	0,5	0,14	500	800
12	0,5	0,20	500	800
13	0,7	0,02	1000	800
14	0,7	0,08	1000	800

15	0,7	0,14	1000	800
16	0,7	0,20	1000	800
17	0,1	0,02	1000	1400
18	0,1	0,08	1000	1400
19	0,1	0,14	1000	1400
20	0,1	0,20	1000	1400
21	0,3	0,02	1000	1400
22	0,3	0,08	1000	1400
23	0,3	0,14	1000	1400
24	0,3	0,20	1000	1400
25	0,5	0,02	1000	1400
26	0,5	0,08	1000	1400
27	0,5	0,14	1000	1400
28	0,5	0,20	1000	1400
29	0,7	0,02	1500	1400
30	0,7	0,08	1500	1400
31	0,7	0,14	1500	1400
32	0,7	0,20	1500	1400
33	0,1	0,02	1500	2000
34	0,1	0,08	1500	2000
35	0,1	0,14	1500	2000
36	0,1	0,20	1500	2000
37	0,3	0,02	1500	2000
38	0,3	0,08	1500	2000
39	0,3	0,14	1500	2000
40	0,3	0,20	1500	2000
41	0,5	0,02	1500	2000
42	0,5	0,08	1500	2000
43	0,5	0,14	1500	2000
44	0,5	0,20	1500	2000
45	0,7	0,02	1500	2000
46	0,7	0,08	1500	2000
47	0,7	0,14	1500	2000
48	0,7	0,20	1500	2000

W drugim etapie podobnie jak w pierwszej części rejestrowano chmury punktów dla każdego ze zmierzonych profili. Następnie dokonano obliczeń wybranych parametrów SGP. Statystyczne opracowanie przeprowadzono dla parametru Ra.

Ocenę wpływu drugiego przejścia nagniatania na SGP przy zastosowaniu strategii ortogonalnej (PR) prowadzono testem parametrycznym dla prób zależnych (t-studenta). W dalszych częściach opracowania statystycznego wyników prowadzono ocenę jednorodności wariancji (test F), następnie testami parametrycznymi dla prób niezależnych (t-studenta bądź Cochran-Coxa) wykonano analizy istotności oddziaływania przyjętych strategii (ortogonalna PR, podwójnie ortogonalna PP, krzyżowa SK).

Do estymacji zależności statystyczno – doświadczalnych stosowano regresję krokową z odrzucaniem zmiennych.

4.3.1. Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał C45

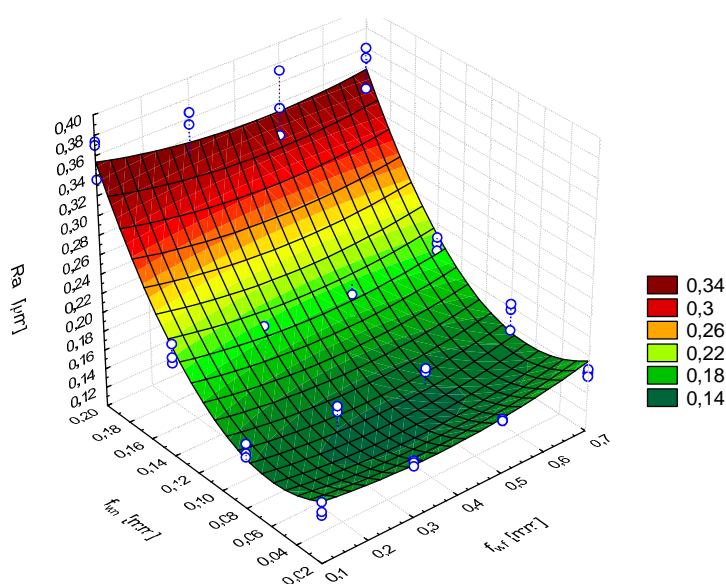
W tabeli 4-12 przedstawiono średnie wartości parametru Ra powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej (PR), kulkami o średnicy 10 i 20 [mm] z siłą 500 [N].

Tabela 4-12. Średnie wartości parametru Ra po nagniataniu jednym przejściem ortogonalnym

Parametry procesu		Chropowość Ra [μm]							
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Średnica kulki $d_k=10$ [mm]				Średnica kulki $d_k=20$ [mm]			
		1	2	3	\bar{Ra}	1	2	3	\bar{Ra}
0,1	0,02	0,164	0,15	0,154	0,1560	0,136	0,146	0,146	0,1427
	0,08	0,158	0,154	0,168	0,1600	0,138	0,152	0,148	0,1460
	0,14	0,198	0,204	0,218	0,2067	0,146	0,148	0,154	0,1493
	0,20	0,336	0,374	0,37	0,3600	0,168	0,186	0,196	0,1833
0,3	0,02	0,16	0,158	0,154	0,1573	0,148	0,144	0,142	0,1447
	0,08	0,162	0,156	0,162	0,1600	0,148	0,154	0,15	0,1507
	0,14	0,182	0,174	0,194	0,1833	0,156	0,162	0,152	0,1567
	0,20	0,296	0,354	0,366	0,3387	0,18	0,198	0,202	0,1933
0,5	0,02	0,158	0,156	0,156	0,1567	0,146	0,15	0,146	0,1473
	0,08	0,156	0,154	0,158	0,1560	0,152	0,15	0,154	0,1520
	0,14	0,164	0,164	0,186	0,1713	0,156	0,17	0,162	0,1627
	0,20	0,306	0,334	0,372	0,3373	0,214	0,226	0,206	0,2153
0,7	0,02	0,162	0,166	0,158	0,1620	0,148	0,15	0,152	0,1500
	0,08	0,178	0,184	0,156	0,1727	0,154	0,146	0,156	0,1520
	0,14	0,2	0,206	0,192	0,1993	0,164	0,172	0,164	0,1667
	0,20	0,318	0,35	0,36	0,3427	0,206	0,21	0,214	0,2100

Rysunek 4-16 przedstawia wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} przy sile nagniatania $F_N = 500$ [N] dla

powierzchni nagniatanej kulką o średnicy 10 [mm], tabela 4-13 zawiera wyniki estymacji zależności $Ra=f(f_{wf}, f_{wn})$.



Rysunek 4-16. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał C45 (20 HRC), $d_k=10$ [mm], siła nagniatania $F_N=500$ [N]

Tabela 4-13. Wyniki estymacji współczynników zależności Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem, materiał C45 (20 HRC), $d_k=10$ [mm], siła nagniatania $F_N=500$ [N]

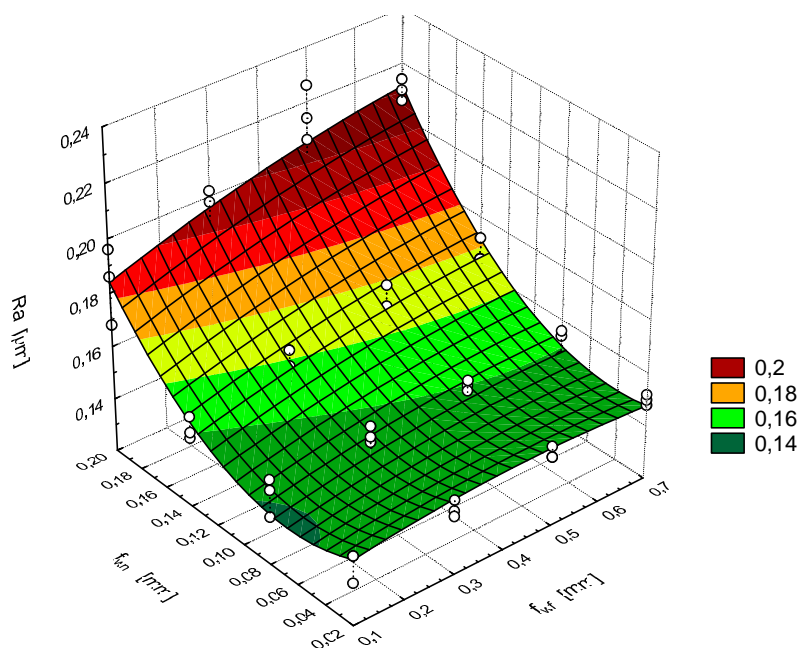
Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(43)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,20405	0,012348	16,52477	0,000000
f_{wf}	-0,12783	0,058197	-2,19655	0,033492
f_{wn}	-1,31676	0,178628	-7,37151	0,000000
f_{wf}^2	0,15417	0,070993	2,17156	0,035451
f_{wn}^2	10,43981	0,788816	13,23479	0,000000
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; $R=0,97125760$ $R^2=0,94334133$, $F(4,43)=178,98$; $p=0,000000$				

Wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=479,64$ przy 4 stopniach swobody licznika i 43 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05,4,43}=2,58$ oraz wszystkie współczynniki są istotne statystycznie. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest bardzo dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,943$. Zależność opisująca chropowatość Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} ma postać:

$$\hat{Ra} = 0.20405 - 0.12783f_{wf} - 1.31676f_{wn} + 0.15417f_{wf}^2 + 10.43981f_{wn}^2 \quad (4-1)$$

Na rysunku 4-17 przedstawiono wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} przy sile nagniatania $F_N = 800$ [N] dla

powierzchni nagniatanej kulką o średnicy 20 [mm], w tabeli 4-14 zawarto wyniki estymacji zależności $Ra=f(f_{wf}, f_{wn})$.



Rysunek 4-17. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał C45 (20 HRC), $d_k=20$ [mm], siła nagniatania $F_N=800$ [N]

Tabela 4-14. Wyniki estymacji współczynników zależności Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem, materiał C45 (20 HRC), $d_k=20$ [mm], siła nagniatania $F_N=800$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(43)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,152324	0,003073	49,57390	0,000000
f_{wn}	-0,381400	0,069351	-5,49956	0,000002
f_{wn}^2	2,615741	0,299054	8,74672	0,000000
$f_{wf}f_{wn}$	0,230120	0,037369	6,15804	0,000000
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra ; $R=0,95268593$ $R^2=0,90761047$ $F(3,44)=144,08$; $p=0,000000$				

Wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=479,64$ przy 3 stopniach swobody licznika i 44 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05,3,44}=2,82$ oraz wszystkie współczynniki są istotne statystycznie. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest bardzo dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,907$. Zależność opisująca chropowatość Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} ma postać (zależność 4-2):

$$\hat{Ra} = 0.152324 - 0.38140f_{wn} + 2.615741f_{wn}^2 + 0.23012f_{wf}f_{wn} \quad (4-2)$$

Po opracowaniu danych doświadczalnych zebranych dla stali miękkiej okazało się, że odpowiednio regulując wartość siły nagniatania F_N można uzyskać efekt obróbki na porównywalnym poziomie ($Ra\ 0.14 \div 0.15\ [\mu m]$) bez względu na średnicę elementu nagniatającego. Dla kulki o średnicy $\phi 10\ [mm]$, w całym zakresie stosowanych posuwów wierszowania przy frezowaniu f_{wf} widoczne są znaczne zmiany chropowatości Ra . Duży wpływ na wielkość zmian parametru Ra ma wartość stosowanego posuwu nagniatania f_{wn} – rysunek 4-16. Nagniatanie narzędziem o średnicy $\phi 20\ [mm]$ cechuje się mniejszym rozrzutem wartości parametru Ra – rysunek 4-17. Widoczny jest wpływ posuwu wierszowania przy frezowaniu f_{wf} , jednak zmiana wartości posuwu wierszowania przy nagniataniu f_{wn} nie generuje tak dużych rozrzutów wartości parametru Ra jak ma to miejsce dla kulki $\phi 10\ [mm]$. Charakterystyka 4-17 uzyskana dla kulki $\phi 20\ [mm]$ jest mniej stroma w porównaniu do charakterystyki 4-16 uzyskanej dla kulki $\phi 10\ [mm]$.

W praktyce oznacza to tolerancję zmienności dla wartości parametru wierszowania przy nagniataniu f_{wn} dla kulki o średnicy $\phi 20\ [mm]$,

4.3.2. Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał 42CrMo4 ($d_k=10$)

Wyniki nagniatania powierzchni w jednym przejściu wg strategii ortogonalnej PR oraz średnie wartości zmierzonej chropowatości powierzchni określonej parametrem Ra przedstawiono w tabeli 4-15.

Tabela 4-15. Średnie wartości parametru Ra po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=500\ [N]$

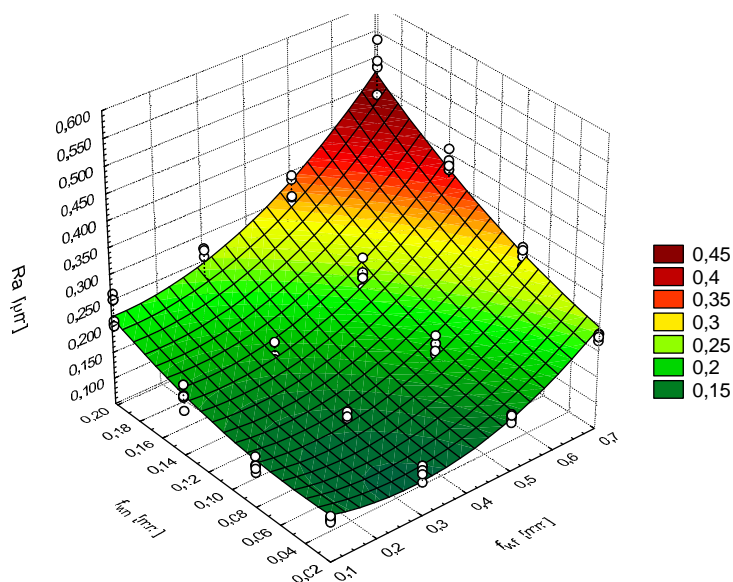
Parametry procesu		Chropowatość powierzchni $Ra\ [\mu m]$						Statystyki Grubbsa			
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Numer próbki						Średnia z próbek \bar{Ra}	Odchyl. standard. s	G_{min}	G_{max}
		1	2	3	4	5	6				
0,1	0,02	0,13	0,13	0,136	0,13	0,126	0,138	0,1317	0,004457	1,27135	1,4209
	0,08	0,132	0,13	0,13	0,116	0,124	0,148	0,1300	0,010583	1,32286	1,70084
	0,14	0,162	0,166	0,164	0,136	0,186	0,186	0,1667	0,018533	1,65471	1,043192
	0,20	0,208	0,214	0,266	0,204	0,254	0,254	0,2333	0,027558	1,06445	1,185361
0,3	0,02	0,144	0,146	0,146	0,138	0,114	0,13	0,1363	0,012549	1,77975	0,77034
	0,08	0,148	0,138	0,134	0,15	0,136	0,14	0,1410	0,006542	1,06998	1,37569
	0,14	0,162	0,136	0,154	0,154	0,188	0,188	0,1637	0,020685	1,33757	1,176379
	0,20	0,21	0,198	0,262	0,212	0,278	0,274	0,2390	0,036128	1,13486	1,079509
0,5	0,02	0,16	0,16	0,156	0,15	0,144	0,158	0,1547	0,006408	1,66450	0,83225
	0,08	0,186	0,2	0,2	0,216	0,18	0,186	0,1947	0,013246	1,10722	1,610503
	0,14	0,216	0,244	0,246	0,274	0,236	0,236	0,2420	0,018931	1,37336	1,690309
	0,20	0,26	0,292	0,338	0,346	0,304	0,306	0,3077	0,031379	1,51904	1,221608

0,7	0,02	0,232	0,234	0,22	0,232	0,228	0,228	0,2290	0,005020	1,79284	0,996024
	0,08	0,272	0,3	0,3	0,308	0,29	0,302	0,2953	0,012817	1,82054	0,988297
	0,14	0,37	0,382	0,37	0,41	0,388	0,378	0,3830	0,014953	0,86937	1,805626
	0,20	0,432	0,406	0,486	0,536	0,484	0,496	0,4733	0,046813	1,43834	1,338657

Próbki nr 1, 2, 3 będą nagiataane 2. przejściem wg strategii ortogonalnej PR, a próbki nr 4, 5, 6 będą nagiataane 2. przejściem wg strategii podwójnie ortogonalnej PP

Eliminacja wyników pomiarów obarczonych błędem grubym testem Grubbsa wykazała, że nie ma podstaw do odrzucenia ekstremalnych wartości wyników eksperymentu w poszczególnych punktach planu badań (wartość krytyczna statystyki Grubbsa dla $\alpha = 0,05$ wynosi 1,996).

Na rysunku 4-18 przedstawiono wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagiataaniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagiataania $F_N = 500$ [N].



Rysunek 4-18. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagiataanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagiataania $F_N=500$ [N]

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 4-15 korzystając z procedury krokowej regresji liniowej wyestymowano zależność opisującą związek Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} , przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-16).

Tabela 4-16. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagniatania $F_N=500$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(90)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,179557	0,012420	14,45695	0,000000
f_{wf}	-0,429994	0,051540	-8,34287	0,000000
f_{wn}	-0,425102	0,161779	-2,62768	0,010107
f_{wf}^2	0,723958	0,059197	12,22963	0,000000
f_{wn}^2	3,275463	0,657745	4,97983	0,000003
$f_{wf}f_{wn}$	1,343889	0,157859	8,51323	0,000000
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; R=0,9728527, R ² =0,94644239, F(5,90)= 318,09; p=0,000000				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=318,09$ przy 5 stopniach swobody licznika i 90 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 5, 90}=2,32$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest znacznie mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest bardzo dobry, współczynnik determinacji $R^2=0,946$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowatość Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} :

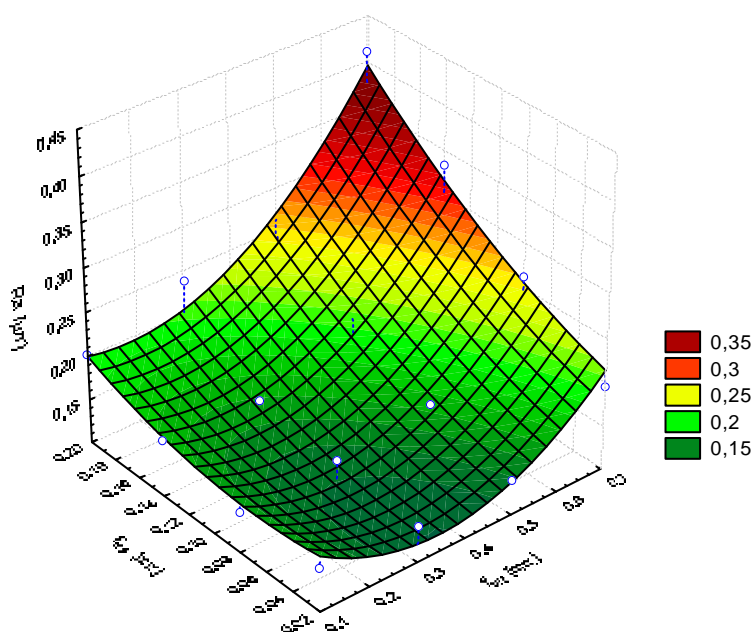
$$\hat{Ra} = 0.179557 - 0.429994f_{wf} - 0.425102f_{wn} + 0.723958f_{wf}^2 + 3.275463f_{wn}^2 + 1.343889f_{wf}f_{wn} \quad (4-3)$$

W tabeli 4-17 przedstawiono średnie wartości chropowatości powierzchni Ra po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=1000$ i 1500 [N].

Wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} dla siły nagniatania $F_N= 1000$ [N] przedstawiono na rysunku 4-19.

Tabela 4-17. Średnie wartości chropowatości powierzchni Ra po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=1000$ i 1500 [N]

Parametry procesu		Chropowość powierzchni Ra [μm]	
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	$F_N=1000$ [N]	$F_N=1500$ [N]
0,1	0,02	0,150	0,146
	0,08	0,146	0,150
	0,14	0,164	0,154
	0,20	0,202	0,238
0,3	0,02	0,142	0,160
	0,08	0,152	0,146
	0,14	0,158	0,172
	0,20	0,238	0,238
0,5	0,02	0,140	0,158
	0,08	0,164	0,156
	0,14	0,174	0,166
	0,20	0,226	0,236
0,7	0,02	0,196	0,152
	0,08	0,262	0,158
	0,14	0,334	0,198
	0,20	0,41	0,230



Rysunek 4-19. R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagniatania $F_N=1000$ [N]

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 4-17 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} i sile nagniatania $F_N=1000$ [N], przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-18).

Tabela 4-18. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagniatania $F_N=1000$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(12)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,202706	0,021892	9,25957	0,000001
f_{wf}	-0,544627	0,132792	-4,10135	0,001469
f_{wf}^2	0,734375	0,159576	4,60205	0,000609
$f_{wf}f_{wn}$	1,467063	0,207640	7,06543	0,000013
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: R_a ; $R=0,95427723$, $R^2=0,91064503$; $F(3, 12)=40,765$; $p=0,000000$				

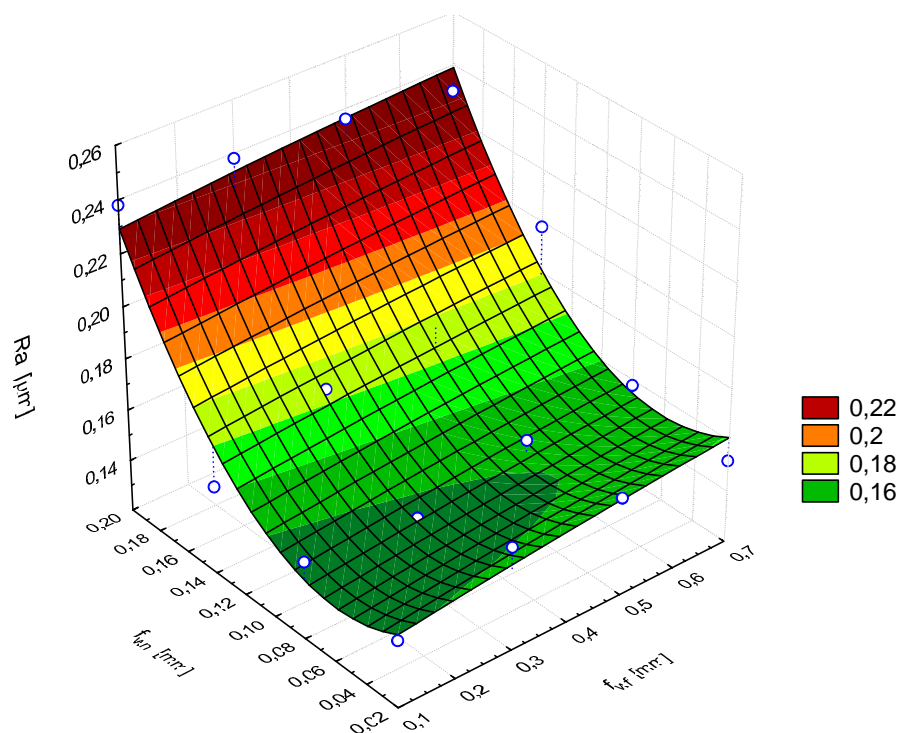
Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=40,765$ przy 3 stopniach swobody licznika i 12 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 3, 12}=3,49$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest znacznie mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,911$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowatość R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} :

$$\hat{R}_a = 0.202706 - 0.544627f_{wf} - 0.734375f_{wf}^2 + 1.467063f_{wf}f_{wn} \quad (4-4)$$

Na rysunku 4-20 przedstawiono wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} dla siły nagniatania $F_N=1500$ [N].

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabelicy 4-17 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu z siłą $F_N=1500$ N (tabela 4-19).



Rysunek 4-20. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagiatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagiatania $F_N=1500$ [N]

Tabela 4-19. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagiataciu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagiatania $F_N = 1500$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie stand. współczyn.	Statystyka t(12)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,164175	0,007355	22,32068	0,000000
f_{wn}	-0,544583	0,162109	-3,35936	0,005128
f_{wn}^2	4,479167	0,715869	6,25697	0,000029
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; $R=0,9963991$, $R^2=0,929279$; $F(3,12)=85,410$; $p=0,000000$				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=85,410$ przy 3 stopniach swobody licznika i 12 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 3, 12}=3,49$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest mniejszy od przyjętego poziomu

istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,929$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowatość R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} i sile nagniatania $F_N=1500$ [N]:

$$\hat{R}a = 0.164175 - 0.544583 f_{wn} + 4.479167 f_{wn}^2 \quad (4-5)$$

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabelach 4-15 i 4-17 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} oraz siły nagniatania F_N przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-20).

Tabela 4-20. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} i siły nagniatania F_N po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(41)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,071104	0,015372	4,62563	0,000037
f_{wf}^2	0,385186	0,056316	6,83974	0,000000
f_{wn}^2	1,823821	0,433409	4,20809	0,000137
$f_{wf}f_{wn}$	1,552419	0,325023	4,77634	0,000023
F_N	0,000073	0,000017	4,37393	0,000082
$f_{wf}F_N$	-0,000199	0,000042	-4,71748	0,000028
$f_{wf}^2f_{wn}^2F_N$	-0,000937	0,000268	-3,49531	0,001152
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: R_a ; $R=0,95215796$, $R^2=0,9066047$; $F(6, 41)= 66,332$; $p=0,000000$				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=66,332$ przy 6 stopniach swobody licznika i 41 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 6, 41}=2,33$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,907$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowość Ra w funkcji technologicznych parametrów nagniatania:

$$\hat{Ra} = 0.071104 + 0.385186f_{wf}^2 + 1.823821f_{wn}^2 + 1.552419f_{wf} \cdot f_{wn} + 0.000073F_N + \\ - 0.000199 f_{wf} \cdot F_N - 0.000937 f_{wf} \cdot f_{wn} \cdot F_N \quad (4-6)$$

Korzystając z programu optymalizacji gradientowej pakietu MATLAB wyznaczono minimum funkcji Ra (zależność 4-6). **Obliczone minimum występuje dla: $f_{wf} = 0,10$ [mm], $f_{wn} = 0,02$ [mm] $F_N = 500$ [N] i wynosi $Ra_{min} = 0,104$ [μ m].**

Wyniki nagniatania drugim przejściem wg strategii ortogonalnej PR, krzyżowej SK i podwójnie ortogonalnej PP przy sile nagniatania $F_N=500$ [N] przedstawiono w tabeli 4-21.

Tabela 4-21. Średnie wartości chropowości powierzchni Ra po nagniataniu drugim przejściem z siłą $F_N=500$ [N]

Parametry procesu		Chropowość Ra [μ m]											
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia ortogonalna PR				Strategia podwójnie ortogonalna PP				Strategia krzyżowa SK			
		1	2	3	\bar{Ra}	4	5	6	\bar{Ra}	1	2	3	\bar{Ra}
0,1	0,02	0,142	0,13	0,14	0,1373	0,154	0,164	0,162	0,1600	0,126	0,128	0,136	0,1300
	0,08	0,15	0,124	0,14	0,1380	0,154	0,162	0,164	0,1600	0,122	0,126	0,142	0,1300
	0,14	0,154	0,142	0,158	0,1513	0,166	0,174	0,178	0,1727	0,176	0,17	0,17	0,1720
	0,20	0,156	0,168	0,18	0,1680	0,264	0,26	0,242	0,2553	0,236	0,186	0,174	0,1987
0,3	0,02	0,15	0,146	0,14	0,1453	0,152	0,162	0,156	0,1567	0,124	0,14	0,132	0,1320
	0,08	0,148	0,134	0,146	0,1427	0,156	0,164	0,176	0,1653	0,132	0,14	0,144	0,1387
	0,14	0,162	0,142	0,154	0,1527	0,162	0,17	0,18	0,1707	0,19	0,172	0,146	0,1693
	0,20	0,162	0,174	0,168	0,1680	0,26	0,274	0,26	0,2647	0,228	0,188	0,2	0,2053
0,5	0,02	0,162	0,15	0,156	0,1560	0,164	0,166	0,166	0,1653	0,13	0,138	0,14	0,1360
	0,08	0,178	0,154	0,158	0,1633	0,202	0,186	0,19	0,1927	0,152	0,142	0,144	0,1460
	0,14	0,208	0,17	0,186	0,1880	0,21	0,228	0,208	0,2153	0,208	0,182	0,176	0,1887
	0,20	0,244	0,202	0,208	0,2180	0,33	0,308	0,3	0,3127	0,276	0,222	0,224	0,2407
0,7	0,02	0,194	0,17	0,164	0,1760	0,192	0,194	0,18	0,1887	0,164	0,152	0,136	0,1507
	0,08	0,246	0,224	0,216	0,2287	0,25	0,216	0,228	0,2313	0,22	0,178	0,174	0,1907
	0,14	0,324	0,282	0,272	0,2927	0,3	0,266	0,322	0,2960	0,258	0,212	0,198	0,2227
	0,20	0,38	0,312	0,30	0,3307	0,442	0,38	0,406	0,4093	0,344	0,26	0,296	0,3000

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu drugiego przejścia nagniatającego realizowanego równoległe do pierwszego przejścia nagniatającego (strategia ortogonalna PR) na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-22.

Z analizy statystycznej wynika, że wpływ drugiego przejścia ortogonalnego na chropowatość powierzchni jest w zasadzie nieistotny. Tylko dla kombinacji parametrów $f_{wf}=0,1$ [mm] i $f_{wn}=0,20$ [mm] oraz $f_{wf}=0,7$ [mm] i $f_{wn}=0,02$ i $0,14$ [mm] wystąpiło istotne zmniejszenie chropowatości.

Tabela 4-22. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami ortogonalnymi (strategia PR) w stosunku do nagniatania jednym przejściem

Parametry procesu		Średnia Raz z próbek [µm]		Różnica średnich	Odchyl. standard.	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f _{wf} [mm]	f _{wn} [mm]	pojedn. przejściu	podwu przejściach						
0,1	0,02	0,132000	0,137333	-0,00533	0,006110	-1,5119	2	0,269703	bez zmian
	0,08	0,130667	0,138000	-0,00733	0,012220	-1,0394	2	0,407780	bez zmian
	0,14	0,164000	0,151333	0,01267	0,009866	2,2238	2	0,156180	bez zmian
	0,20	0,229333	0,168000	0,061333	0,021572	4,9246	2	0,038847	poprawa
0,3	0,02	0,145333	0,145333	0,000000	0,006000	0,0000	2	1,000000	bez zmian
	0,08	0,140000	0,142667	-0,00267	0,008327	-0,5547	2	0,634852	bez zmian
	0,14	0,150667	0,152667	-0,0020	0,003464	-1,0000	2	0,422650	bez zmian
	0,20	0,223333	0,168000	0,055333	0,035572	2,6943	2	0,114563	bez zmian
0,5	0,02	0,158667	0,156000	0,002667	0,006429	0,7184	2	0,547089	bez zmian
	0,08	0,195333	0,163333	0,032000	0,020881	2,6544	2	0,117444	bez zmian
	0,14	0,235333	0,188000	0,047333	0,034775	2,3575	2	0,142460	bez zmian
	0,20	0,296667	0,218000	0,078667	0,057839	2,3558	2	0,142628	bez zmian
0,7	0,02	0,228667	0,176000	0,052667	0,013317	6,8502	2	0,020653	poprawa
	0,08	0,290667	0,228667	0,062000	0,031432	3,4164	2	0,076032	bez zmian
	0,14	0,374000	0,292667	0,081333	0,030616	4,6013	2	0,044129	poprawa
	0,20	0,441333	0,330667	0,110667	0,068537	2,7967	2	0,107604	bez zmian

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu drugiego przejścia nagniatającego realizowanego prostopadle do pierwszego przejścia nagniatającego (strategia podwójnie ortogonalna PP) na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-23.

Tabela 4-23. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami podwójnie ortogonalnymi w stosunku do nagniatania jednym przejściem

Parametry procesu		Średnia Raz z próbek [µm]		Różnica średnich	Odchyl. standard.	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f _{wf} [mm]	f _{wn} [mm]	pojedn. przejściu	podwu przejściach						
0,1	0,02	0,131333	0,160000	-0,028667	0,008083	-6,1429	2	0,025492	pogorszenie
	0,08	0,129333	0,160000	-0,030667	0,012702	-4,1818	2	0,052704	bez zmian
	0,14	0,169333	0,172667	-0,003333	0,023180	-0,2491	2	0,826552	bez zmian
	0,20	0,237333	0,255333	-0,018000	0,037470	-0,8321	2	0,492907	bez zmian

ciąg dalszy na następnej stronie

0,3	0,02	0,127333	0,156667	-0,029333	0,017243	-2,9465	2	0,098467	bez zmian
	0,08	0,142000	0,165333	-0,023333	0,015535	-2,6015	2	0,121424	bez zmian
	0,14	0,176667	0,170667	0,006000	0,013115	0,7924	2	0,511187	bez zmian
	0,20	0,254667	0,264667	-0,010000	0,033287	-0,5203	2	0,654693	bez zmian
0,5	0,02	0,150667	0,165333	-0,014667	0,007024	-3,6168	2	0,068666	bez zmian
	0,08	0,194000	0,192667	0,001333	0,011015	0,2097	2	0,853353	bez zmian
	0,14	0,248667	0,215333	0,033333	0,028378	2,0345	2	0,178892	bez zmian
	0,20	0,318667	0,312667	0,006000	0,010000	1,0392	2	0,407843	bez zmian
0,7	0,02	0,229333	0,188667	0,040667	0,007024	10,0283	2	0,009798	poprawa
	0,08	0,300000	0,231333	0,068667	0,009238	12,8750	2	0,005979	poprawa
	0,14	0,392000	0,296000	0,096000	0,035157	4,7296	2	0,041914	poprawa
	0,20	0,505333	0,409333	0,096000	0,007211	23,0585	2	0,001875	poprawa

Z analizy statystycznej wynika, że wpływ drugiego przejścia realizowanego prostopadle do kierunku nagniatania w pierwszym przejściu na chropowatość powierzchni jest istotny tylko dla posuwu wierszowania przy frezowaniu $f_{wf} = 0,7$ [mm].

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu dwu przejść nagniatających realizowanych krzyżowo w stosunku do jednego przejścia nagniatającego na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-24.

Tabela 4-24. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK w stosunku do nagniatania jednym przejściem ortogonalnym

Parametry procesu		Średnia Raz z próbek [μm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	pojedn. przejściu	podwu przejściach						
0,1	0,02	0,131667	0,130000	1,40940	0,654042	0,50036	7	0,632168	bez zmian
	0,08	0,130000	0,130000	1,00000	0,862402	0,00000	7	1,000000	bez zmian
	0,14	0,166667	0,172000	28,62222	0,068202	-0,47821	7	0,647072	bez zmian
	0,20	0,233333	0,198667	1,42381	0,648054	1,68017	7	0,136814	bez zmian
0,3	0,02	0,136333	0,132000	2,46042	0,627607	0,53592	7	0,608616	bez zmian
	0,08	0,141000	0,138667	1,14643	1,000000	0,51386	7	0,623170	bez zmian
	0,14	0,163667	0,169333	1,14366	0,779894	-0,37971	7	0,715417	bez zmian
	0,20	0,239000	0,205333	3,09778	0,523697	1,46747	7	0,185688	bez zmian
0,5	0,02	0,154667	0,136000	1,46667	0,905561	4,32049	7	0,003478	poprawa
	0,08	0,194667	0,146000	6,26667	0,286636	5,96043	7	0,000564	poprawa
	0,14	0,242000	0,188667	1,23871	1,000000	4,09852	7	0,004582	poprawa
	0,20	0,307667	0,240667	1,05050	1,000000	3,04052	7	0,018833	poprawa
0,7	0,02	0,229000	0,150667	7,83069	0,057618	12,84490	7	0,000004	poprawa
	0,08	0,295333	0,190667	3,95292	0,186848	8,50559	7	0,000062	poprawa
	0,14	0,383000	0,222667	4,40668	0,157655	10,79449	7	0,000013	poprawa
	0,20	0,473333	0,300000	1,23393	1,000000	5,38421	7	0,001026	poprawa

Z analizy statystycznej wynika, że efekt nagniatania dwoma przejściami krzyżowymi w porównaniu do nagniatania jednym przejściem jest istotny dla posuwów wierszowania przy frezowaniu $f_{wf}=0,5$ i $0,7$ [mm].

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających ortogonalnych w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii krzyżowej przedstawiono w tabeli 4-25.

Tabela 4-25. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii ortogonalnej PR w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK

Parametry procesu		Średnia Raz próbek [µm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{vn} [mm]	Strategia PR	Strategia SK						
0,1	0,02	0,137333	0,130000	1,47619	0,807692	1,52543	4	0,201846	bez zmian
	0,08	0,138000	0,130000	1,53571	0,788732	0,82223	4	0,457135	bez zmian
	0,14	0,151333	0,172000	5,77778	0,295082	-3,96914	4	0,016551	str. ortog. lepsza
	0,20	0,168000	0,198667	7,50926	0,235038	-1,51740	4	0,203768	bez zmian
0,3	0,02	0,145333	0,132000	2,52632	0,567164	2,44339	4	0,070949	bez zmian
	0,08	0,142667	0,138667	1,53571	0,788732	0,71207	4	0,515752	bez zmian
	0,14	0,152667	0,169333	4,82895	0,343115	-1,18779	4	0,300627	bez zmian
	0,20	0,168000	0,205333	11,70370	0,157434	-3,02372	4	0,039021	str. ortog. lepsza
0,5	0,02	0,156000	0,136000	1,28571	0,875000	4,33013	4	0,012348	str. krzyż. lepsza
	0,08	0,163333	0,146000	5,90476	0,289655	2,15918	4	0,096978	bez zmian
	0,14	0,188000	0,188667	1,25806	0,885714	-0,04518	4	0,966133	bez zmian
	0,20	0,218000	0,240667	1,81654	0,710092	-1,02983	4	0,361284	bez zmian
0,7	0,02	0,176000	0,150667	1,27703	0,878338	2,06999	4	0,107231	bez zmian
	0,08	0,228667	0,190667	2,69061	0,541916	2,20540	4	0,092097	bez zmian
	0,14	0,292667	0,222667	1,29422	0,871756	2,90104	4	0,044072	str. krzyż. lepsza
	0,20	0,330667	0,300000	1,04805	0,976540	0,88072	4	0,428209	bez zmian

Z analizy statystycznej wynika, że dla posuwów $f_{wf} = 0,1-0,3$ nieco lepsze jest nagniatanie wg strategii ortogonalnej natomiast dla posuwów $f_{wf}=0,5-0,7$ lepsze efekty obserwuje się nagniatając dwoma przejściami realizowanymi według strategii krzyżowej SK.

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających ortogonalnych PR w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii podwójnie ortogonalnej PP przedstawiono w tabeli 4-26.

Tabela 4-26. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii ortogonalnej PR w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii podwójnie ortogonalnej PP

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [µm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia PR	Strategia PP						
0,1	0,02	0,137333	0,160000	1,47619	0,807692	-4,7150	4	0,00920	str. ortog. lepsza
	0,08	0,138000	0,160000	6,14286	0,280000	-2,6944	4	0,05440	bez zmian
	0,14	0,151333	0,172667	1,85714	0,700000	-3,5777	4	0,02321	str. ortog. lepsza
	0,20	0,168000	0,255333	1,04854	0,976303	-9,0184	4	0,00083	str. ortog. lepsza
0,3	0,02	0,145333	0,156667	1,00000	1,000000	-2,7578	4	0,05096	str. ortog. lepsza
	0,08	0,142667	0,165333	1,76744	0,722689	-3,1168	4	0,03563	str. ortog. lepsza
	0,14	0,152667	0,170667	1,24590	0,890511	-2,3068	4	0,08232	bez zmian
	0,20	0,168000	0,264667	1,81481	0,710526	-16,6326	4	0,00007	str. ortog. lepsza
0,5	0,02	0,156000	0,165333	27,00000	0,071429	-2,6458	4	0,05723	bez zmian
	0,08	0,163333	0,192667	2,38462	0,590909	-3,3166	4	0,02947	str. ortog. lepsza
	0,14	0,188000	0,215333	3,00000	0,500000	-2,1490	4	0,09809	bez zmian
	0,20	0,218000	0,312667	2,13812	0,637324	-5,9582	4	0,00398	str. ortog. lepsza
0,7	0,02	0,176000	0,188667	4,39535	0,370690	-1,2474	4	0,28029	bez zmian
	0,08	0,228667	0,231333	1,23204	0,896040	-0,1990	4	0,85196	bez zmian
	0,14	0,292667	0,296000	1,04553	0,977740	-0,1463	4	0,89076	bez zmian
	0,20	0,330667	0,409333	1,92022	0,684880	-2,5610	4	0,06257	bez zmian

Z analizy statystycznej wynika, że chropowatość powierzchni nagniatanej dwoma przejściami realizowanymi według strategii ortogonalnej PR jest w większości przypadków istotnie mniejsza od chropowatości uzyskanej po nagniataniu dwoma przejściami wg strategii podwójnie ortogonalnej PP.

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii krzyżowej SK w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii podwójnie ortogonalnej PP przedstawiono w tabeli 4-27.

Tabela 4-27. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii ortogonalnej PP.

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [µm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia SK	Strategia PP						
0,1	0,02	0,130000	0,160000	1,00000	1,0000	-6,94365	4	0,00226	str. krzyż. lepsza
	0,08	0,130000	0,160000	4,00000	0,4000	-4,39155	4	0,01176	str. krzyż. lepsza
	0,14	0,172000	0,172667	3,11111	0,4864	-0,16440	4	0,87739	bez zmian
	0,20	0,198667	0,255333	7,87379	0,2253	-2,81155	4	0,04824	str. krzyż. lepsza
0,3	0,02	0,132000	0,156667	2,52632	0,5671	-4,52027	4	0,01065	str. krzyż. lepsza
	0,08	0,138667	0,165333	2,71429	0,5384	-3,92232	4	0,01721	str. krzyż. lepsza
	0,14	0,169333	0,170667	6,01639	0,2850	-0,09667	4	0,92763	bez zmian
	0,20	0,205333	0,264667	6,44898	0,2684	-4,65847	4	0,00960	str. krzyż. lepsza
0,5	0,02	0,136000	0,165333	21,00000	0,0909	-9,38083	4	0,00071	str. krzyż. lepsza
	0,08	0,146000	0,192667	2,47619	0,5753	-8,19288	4	0,00120	str. krzyż. lepsza
	0,14	0,188667	0,215333	2,38462	0,5909	-2,27921	4	0,08486	bez zmian
	0,20	0,240667	0,312667	3,88398	0,4095	-3,63243	4	0,02211	str. krzyż. lepsza

ciąg dalszy na następnej stronie

0,7	0,02	0,150667	0,188667	3,44186	0,4502	-4,12438	4	0,01456	str. krzyż. lepsza
	0,08	0,190667	0,231333	2,18386	0,6281	-2,28929	4	0,08392	str. krzyż. lepsza
	0,14	0,222667	0,296000	1,23786	0,8937	-3,00947	4	0,03957	str. krzyż. lepsza
	0,20	0,300000	0,409333	1,83219	0,7061	-3,61423	4	0,02242	str. krzyż. lepsza

Z analizy statystycznej wynika, że chropowatość powierzchni nagniatanej dwoma przejściami realizowanymi według strategii krzyżowej SK w większości przypadków jest istotnie mniejsza od chropowatości powierzchni uzyskanej po nagniataniu wg strategii podwójnie ortogonalnej PP.

Z analizy wyników nagniatania materiału 42CrMo4 (35 HRC) końcówką kulistą o średnicy $d_k=10$ [mm] wynika, że nagniatanie dwoma przejściami jest efektywne tylko dla powierzchni frezowanej z posuwem $f_{wf}=0,5-0,7$ [mm]. Zaleca się wówczas stosować nagniatanie wg strategii krzyżowej SK.

4.3.3. Statystyczne opracowanie wyników badań – materiał 42CrMo4 ($d_k=20$)

Zestawienie wykonanych prób nagniatania powierzchni jednym przejściem wg strategii ortogonalnej oraz średnie wartości zmierzonej chropowatości powierzchni określonej parametrem Ra przedstawiono w tabeli 4-28.

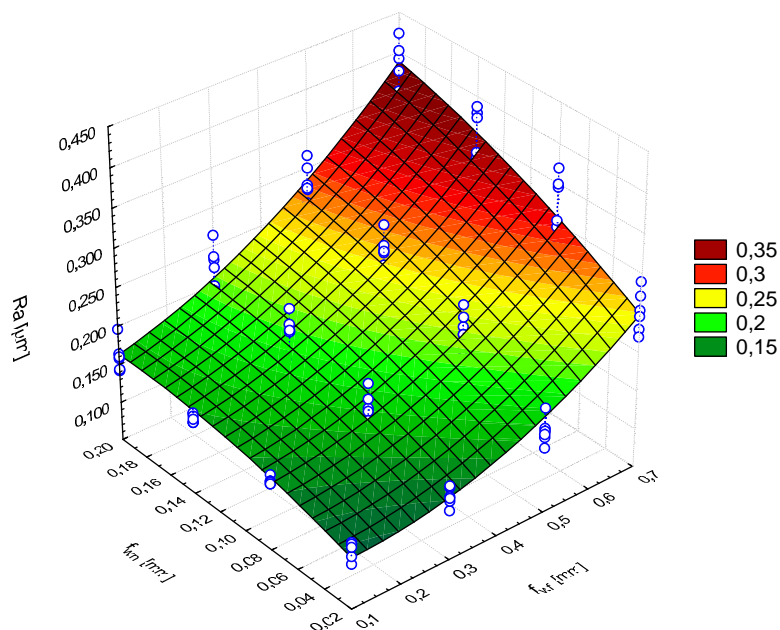
Tabela 4-28. Średnie wartości chropowatości powierzchni Ra po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=800$ [N]

Parametry procesu		Chropowatość powierzchni Ra [μ m]							Statystyki Grubbsa		
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Numer próbki						Średnia z próbek \bar{Ra}	Odchyl. standard. s	G_{min}	G_{max}
		1	2	3	4	5	6				
0,1	0,02	0,108	0,136	0,136	0,118	0,134	0,13	0,1270	0,01150	1,6512	0,782
	0,08	0,148	0,14	0,136	0,14	0,138	0,136	0,1397	0,00445	0,8226	1,8696
	0,14	0,156	0,144	0,144	0,152	0,144	0,148	0,1480	0,00506	0,7905	1,5811
	0,20	0,196	0,164	0,142	0,158	0,144	0,16	0,1607	0,01945	0,9592	1,8157
0,3	0,02	0,114	0,144	0,146	0,126	0,132	0,13	0,1320	0,01186	1,5169	1,1798
	0,08	0,206	0,174	0,186	0,17	0,156	0,158	0,1750	0,01875	1,0132	1,6532
	0,14	0,234	0,204	0,214	0,206	0,174	0,176	0,2013	0,02300	1,1883	1,420
	0,20	0,264	0,232	0,236	0,222	0,198	0,192	0,2240	0,02650	1,2074	1,5092
0,5	0,02	0,134	0,16	0,156	0,148	0,186	0,152	0,1560	0,01720	1,2787	1,7437
	0,08	0,25	0,222	0,234	0,212	0,212	0,192	0,2203	0,02005	1,4126	1,4791
	0,14	0,288	0,252	0,256	0,262	0,254	0,236	0,2580	0,01706	1,2892	1,7580
	0,20	0,316	0,278	0,30	0,272	0,274	0,254	0,2823	0,02210	1,2817	1,5229
0,7	0,02	0,254	0,29	0,272	0,23	0,246	0,22	0,2520	0,02604	1,2285	1,4589
	0,08	0,37	0,346	0,35	0,296	0,304	0,272	0,3230	0,03783	1,3479	1,2421
	0,14	0,38	0,374	0,388	0,322	0,33	0,302	0,3493	0,03579	1,3224	1,0803
	0,20	0,424	0,392	0,402	0,342	0,376	0,35	0,3810	0,03136	1,2435	1,3710

Próbki nr 1, 2, 3 będą nagniatane 2. przejściem wg strategii ortogonalnej PR, a próbki nr 4, 5, 6 będą nagniatane 2. przejściem wg strategii podwójnie ortogonalnej PP

Eliminacja wyników pomiarów obarczonych błędem grubym testem Grubbs'a wykazała, że nie ma podstaw do odrzucenia ekstremalnych wartości wyników eksperymentu w poszczególnych punktach planu badań (wartość krytyczna statystyki Grubbs'a dla $\alpha = 0,05$ wynosi 1,996).

Na rysunku 4-21 przedstawiono wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagniatania $F_N = 800$ [N].



Rysunek 4-21. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagniatania $F_N=800$ [N]

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 4-28 korzystając z procedury krokowej regresji liniowej wyestymowano zależność opisującą związek Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} , przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-29).

Tabela 4-29. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagniatania $F_N=800$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(91)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,09378	0,008433	11,12061	0,000000
f_{wn}	0,59178	0,161953	3,65401	0,000431
f_{wf}^2	0,27030	0,023590	11,45810	0,000000
f_{wn}^2	-1,73032	0,664222	-2,60504	0,010730
$f_{wf}f_{wn}$	0,76563	0,150094	5,10105	0,000002
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; $R=0,95930774$ $R^2=0,91676679$; $F(4,91)=262,59$; $p=0,000000$				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=262,59$ przy 4 stopniach swobody licznika i 91 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 4, 91}=2,47$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest znacznie mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,917$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowość R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} :

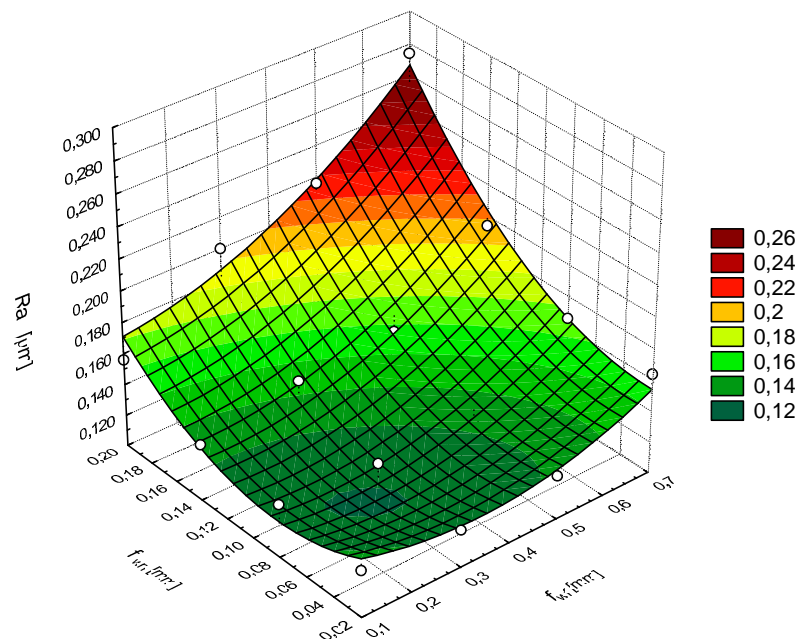
$$\hat{R}_a = 0.09378 + 0.59178f_{wn} + 0.27030f_{wf}^2 - 1.73032f_{wn}^2 + 0.76563f_{wf}f_{wn} \quad (4-7)$$

W tabeli 4-30 przedstawiono średnie wartości chropowości powierzchni R_a po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=1400$ i 2000 [N].

Wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} dla siły nagniatania $F_N=1400$ [N] przedstawiono na rysunku 4-22.

Tabela 4-30. Średnie wartości chropowości powierzchni R_a po nagniataniu jednym przejściem prostopadłym do kierunku frezowania (strategia ortogonalna PR) z siłą $F_N=1400$ i 2000 [N]

Parametry procesu		Chropowość powierzchni R_a [μm]	
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	$F_N=1400$ [N]	$F_N=2000$ [N]
0,1	0,02	0,130	0,126
	0,08	0,134	0,126
	0,14	0,136	0,146
	0,20	0,156	0,222
0,3	0,02	0,124	0,144
	0,08	0,130	0,132
	0,14	0,148	0,160
	0,20	0,200	0,206
0,5	0,02	0,128	0,142
	0,08	0,126	0,128
	0,14	0,152	0,174
	0,20	0,216	0,248
0,7	0,02	0,164	0,140
	0,08	0,166	0,182
	0,14	0,194	0,244
	0,20	0,274	0,288



Rysunek 4-22. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagiataanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagiataania $F_N=1400$ [N]

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 4-30 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} , dla siły nagiataania $F_N=1400$ [N], przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-31).

Tabela 4-31. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagiataaniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej i sile nagiataania $F_N=1400$ [N]

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(10)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,160901	0,014491	11,10376	0,000001
f_{wf}	-0,149733	0,060133	-2,49005	0,031987
f_{wn}	-0,673639	0,188749	-3,56898	0,005104
f_{wf}^2	0,203125	0,069066	2,94104	0,014759
f_{wn}^2	3,576389	0,767397	4,66041	0,000894
$f_{wf}f_{wn}$	0,731667	0,184175	3,97266	0,002632
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; $R=0,97592650$, $R^2=0,95243254$; $F(5, 10)=40,046$; $p=0,000000$				

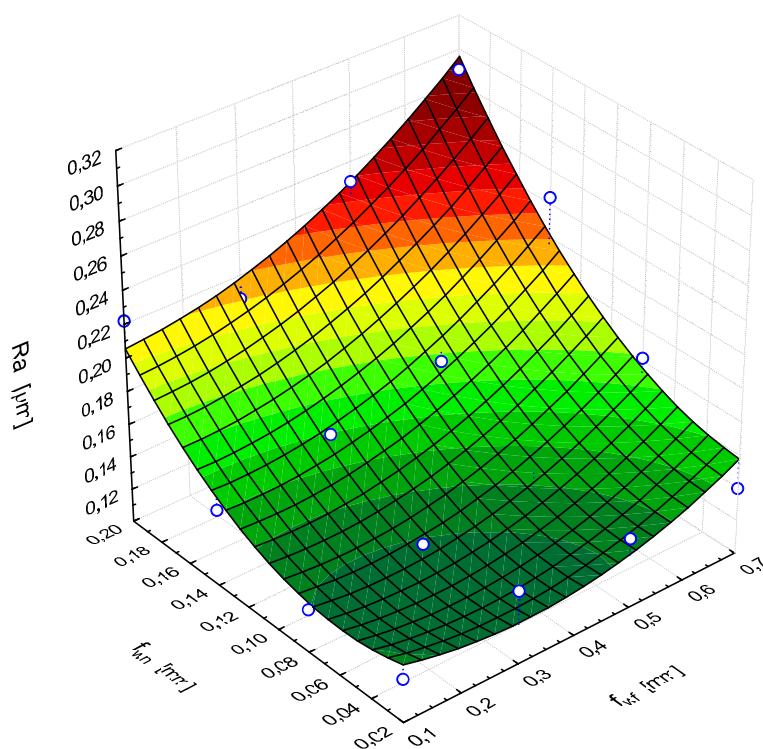
Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=40,046$ przy 5 stopniach swobody licznika i 10 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 5, 10}=3,33$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest znacznie mniejszy od przyjętego

poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest bardzo dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,952$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowatość Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} :

$$\hat{Ra} = 0.160901 - 0.149733f_{wf} - 0.673639f_{wn} + 0.203125f_{wf}^2 + 3.576389f_{wn}^2 + 0.731667f_{wf}f_{wn} \quad (4-8)$$

Na rysunku 4-23 przedstawiono wykres przestrzenny obrazujący zależność chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} dla siły nagniatania $F_N = 2000$ [N].



Rysunek 4-23. Zależność Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} powierzchni nagniatanej jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR; materiał 42CrMo4 (35 HRC), siła nagniatania $F_N=2000$ [N]

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 4-30 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu z siłą $F_N=2000$ [N] (tabela 4-32).

Tabela 4-32. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR i sile nagniatania $F_N=2000$ [N].

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka t(12)	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,141256	0,012377	11,41258	0,000000
f_{wn}	-0,591941	0,279357	-2,11894	0,055639
f_{wn}^2	3,888889	1,204635	3,22827	0,007242
$f_{wf}f_{wn}$	0,790964	0,150529	5,25458	0,000203
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Ra; $R=0,95292342$, $R^2=0,90806305$; $F(3,12)=39,508$; $p=0,000000$				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=39,5086$ przy 3 stopniach swobody licznika i 12 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 3, 12}=3,49$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,908$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowatość R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} i sile nagniatania $F_N=2000$ [N]:

$$\hat{R}_a = 0.141256 - 0.591941f_{wn} + 3.888889f_{wn}^2 + 0.790964f_{wf}f_{wn} \quad (4-9)$$

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabelach 4-28 i 4-30 wyestymowano zależność opisującą związek chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} oraz siły nagniatania F_N przyjmując jako model zależności wielomian stopnia drugiego (tabela 4-33).

Tabela 4-33. Wyniki estymacji współczynników zależności chropowatości R_a w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} i siły nagniatania F_N po nagniataniu jednym przejściem wg strategii ortogonalnej PR

Współczynnik	Wartość współczyn.	Odchylenie standard. współczyn.	Statystyka $t(41)$	Poziom prawdopodob. p
Wyraz wolny	0,271844	0,029620	9,17776	0,000000
f_{wf}^2	0,357563	0,040479	8,83338	0,000000
f_{wn}^2	0,923265	0,324544	2,84481	0,006904
$f_{wf}f_{wn}$	0,764324	0,158644	4,81787	0,000020
F_N	-0,000233	0,000045	-5,12542	0,000007
F_N^2	0,00000009	0,00000002	5,73941	0,000001
$f_{wf}F_N$	-0,000147	0,000021	-6,99656	0,000000
Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: R_a ; $R=0,96222428$, $R^2=0,92587556$; $F(6, 41)= 85,354$; $p=0,000000$				

Z analizy statystycznej wynika, że wyestymowana zależność jest istotna statystycznie, wartość statystyki $F=85,354$ przy 6 stopniach swobody licznika i 41 stopniach swobody mianownika znacznie przekracza wartość krytyczną $F_{0,05, 6, 41}=2,33$ oraz wszystkie współczynniki są istotne poziom prawdopodobieństwa p wystąpienia statystyki testowej t dla wszystkich współczynników jest mniejszy od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Stopień dopasowania zależności do danych doświadczalnych jest dość dobry, współczynnik determinacji $R^2 = 0,926$.

Po podstawieniu obliczonych współczynników uzyskano następującą postać zależności opisującej chropowość Ra w funkcji technologicznych parametrów nagniatania:

$$\hat{Ra} = 0.271844 - 0.357563f_{wf}^2 + 0.923265f_{wn}^2 + 0.764324f_{wf}f_{wn} - 0.000233F_N + 0.00000009 F_N^2 - 0.000147 f_{wf} F_N \quad (4-10)$$

Korzystając z programu optymalizacji gradientowej pakietu MATLAB wyznaczono minimum funkcji Ra (zależność 4-10). **Obliczone minimum występuje dla: $f_{wf} = 0,294$ [mm]; $f_{wn} = 0,02$ [mm]; $F_N = 1534,74$ [N] i wynosi $Ra_{min} = 0,09567$ [μ m].**

Wyniki nagniatania drugim przejściem wg strategii ortogonalnej PR, krzyżowej SK i podwójnie ortogonalnej PP przy sile nagniatania $F_N=800$ [N] przedstawiono w tabeli 4-34.

Tabela 4-34. Średnie wartości chropowości powierzchni Ra po nagniataniu drugim przejściem z siłą $F_N=800$ [N]

Parametry procesu		Chropowość Ra [μ m]											
f_w [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia ortogonalna PR				Strategia podwójnie ortogonalna PP				Strategia krzyżowa SK			
		1	2	3	\bar{Ra}	4	5	6	\bar{Ra}	1	2	3	\bar{Ra}
0,1	0,02	0,142	0,13	0,11	0,1273	0,126	0,118	0,112	0,1187	0,12	0,116	0,116	0,1173
	0,08	0,146	0,138	0,11	0,1313	0,14	0,116	0,118	0,1247	0,122	0,116	0,116	0,1180
	0,14	0,14	0,138	0,122	0,1333	0,144	0,138	0,124	0,1353	0,122	0,124	0,122	0,1227
	0,20	0,154	0,138	0,112	0,1343	0,148	0,132	0,146	0,1420	0,166	0,164	0,162	0,1640
0,3	0,02	0,146	0,138	0,114	0,1327	0,144	0,118	0,122	0,1280	0,126	0,126	0,12	0,1240
	0,08	0,158	0,144	0,12	0,1407	0,144	0,126	0,124	0,1313	0,122	0,13	0,12	0,1240
	0,14	0,142	0,156	0,138	0,1453	0,158	0,15	0,134	0,1473	0,138	0,138	0,136	0,1373
	0,20	0,146	0,168	0,148	0,1540	0,186	0,162	0,186	0,1780	0,178	0,208	0,17	0,1853
0,5	0,02	0,144	0,148	0,136	0,1427	0,142	0,114	0,13	0,1287	0,134	0,142	0,122	0,1327
	0,08	0,152	0,158	0,142	0,1507	0,166	0,134	0,142	0,1473	0,136	0,16	0,138	0,1447
	0,14	0,178	0,174	0,17	0,1740	0,188	0,194	0,174	0,1853	0,172	0,198	0,146	0,1720
	0,20	0,176	0,204	0,194	0,1913	0,216	0,23	0,22	0,2220	0,222	0,25	0,20	0,2240
0,7	0,02	0,178	0,17	0,164	0,1707	0,174	0,19	0,182	0,1820	0,16	0,196	0,158	0,1713
	0,08	0,216	0,266	0,228	0,2367	0,228	0,214	0,222	0,2213	0,19	0,254	0,184	0,2093
	0,14	0,252	0,30	0,278	0,2767	0,246	0,268	0,27	0,2613	0,236	0,30	0,232	0,2560
	0,20	0,308	0,33	0,32	0,3193	0,26	0,324	0,292	0,2920	0,272	0,34	0,268	0,2933

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu drugiego przejścia nagniatającego realizowanego równoległe do pierwszego przejścia nagniatającego (strategia ortogonalna PR) na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-35

Tabela 4-35. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami ortogonalnymi (strategia ortogonalna PR) w stosunku do nagniatania jednym przejściem

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [µm]		Różnica średnich	Odchyl. standard.	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	po jedn. przejściu	po dwu przejściach						
0,1	0,02	0,12667	0,12733	0,00067	0,030551	0,0378	2	0,9732	bez zmian
	0,08	0,14133	0,13133	0,01000	0,013856	1,2500	2	0,3377	bez zmian
	0,14	0,14800	0,13333	0,01467	0,008083	3,1429	2	0,0880	bez zmian
	0,20	0,16733	0,13467	0,03267	0,008327	6,7951	2	0,0209	poprawa
0,3	0,02	0,13467	0,13267	0,00200	0,032187	0,1076	2	0,9241	bez zmian
	0,08	0,18867	0,14067	0,04800	0,018000	4,6188	2	0,0438	poprawa
	0,14	0,21733	0,14533	0,07200	0,022271	5,5995	2	0,0304	poprawa
	0,20	0,24400	0,15400	0,09000	0,027055	5,7617	2	0,0288	poprawa
0,5	0,02	0,15000	0,14267	0,00733	0,015535	0,8176	2	0,4994	bez zmian
	0,08	0,23533	0,15067	0,08467	0,018148	8,0808	2	0,0149	poprawa
	0,14	0,26533	0,17400	0,09133	0,016653	9,4992	2	0,0109	poprawa
	0,20	0,29800	0,19133	0,10667	0,033005	5,5977	2	0,0304	poprawa
0,7	0,02	0,27200	0,17067	0,10133	0,022745	7,7166	2	0,0163	poprawa
	0,08	0,35533	0,23667	0,11867	0,037112	5,5382	2	0,0310	poprawa
	0,14	0,38067	0,27667	0,10400	0,027495	6,5514	2	0,0225	poprawa
	0,20	0,4060	0,31933	0,08667	0,027301	5,4984	2	0,0315	poprawa

Z analizy statystycznej wynika, że wpływ drugiego przejścia na chropowatość powierzchni zależy od parametrów procesu nagniatania. Dla posuwu wierszowania frezowania $f_{wf} = 0,1$ [mm] istotne zmniejszenie chropowatości występuje dopiero dla posuwu wierszowania nagniatania $f_{wn} = 0,20$ [mm]. Dla posuwów frezowania $f_{wf} = 0,3$ i $0,5$ [mm] obserwuje się istotne zmniejszenie chropowatości dla posuwów nagniatania $f_{wn} = 0,08$ i $0,20$ [mm]. Dla posuwu frezowania $f_{wf} = 0,7$ [mm] wystąpiło istotne zmniejszenie chropowatości w całym zakresie posuwów nagniatania.

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu drugiego przejścia nagniatającego realizowanego prostopadle do pierwszego przejścia nagniatającego (strategia podwójnie ortogonalna PP) na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-36.

Tabela 4-36. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami podwójnie ortogonalnymi w stosunku do nagniatania jednym przejściem

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [µm]		Różnica średnich	Odchyl. standard.	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	po jedn. przejściu	po dwu przejściach						
0,1	0,02	0,12733	0,11867	0,008667	0,01448	1,0375	2	0,408480	bez zmian
	0,08	0,13800	0,12467	0,013333	0,01179	1,9707	2	0,187556	bez zmian
	0,14	0,14800	0,13533	0,012667	0,00986	2,2238	2	0,156180	bez zmian
	0,20	0,15400	0,14200	0,012000	0,00200	10,3923	2	0,009133	poprawa

Ciąg dalszy na następnej stronie

0,3	0,02	0,12933	0,12800	0,001333	0,01701	0,1358	2	0,904436	bez zmian
	0,08	0,16133	0,13133	0,030000	0,00400	12,9904	2	0,005874	poprawa
	0,14	0,18533	0,14733	0,038000	0,01249	5,2697	2	0,034176	poprawa
	0,20	0,20400	0,17800	0,026000	0,01732	2,6000	2	0,121541	bez zmian
0,5	0,02	0,16200	0,12867	0,033333	0,03442	1,6769	2	0,235549	bez zmian
	0,08	0,20533	0,14733	0,058000	0,01743	5,7617	2	0,028827	poprawa
	0,14	0,25067	0,18533	0,065333	0,00757	14,9449	2	0,004447	poprawa
	0,20	0,26667	0,22200	0,044667	0,01101	7,0235	2	0,019675	poprawa
0,7	0,02	0,23200	0,18200	0,050000	0,01039	8,3333	2	0,014096	poprawa
	0,08	0,29067	0,22133	0,069333	0,02003	5,9945	2	0,026719	poprawa
	0,14	0,31800	0,26133	0,056667	0,02248	4,3662	2	0,048660	poprawa
	0,20	0,35600	0,29200	0,064000	0,01587	6,9830	2	0,019898	poprawa

Z analizy statystycznej wynika, że wpływ drugiego przejścia realizowanego prostopadle do kierunku nagniatania w pierwszym przejściu (strategia podwójnie ortogonalna PP) na chropowatość powierzchni jest podobny jak w poprzednim przypadku, gdy drugie przejście realizowane jest równoległe do pierwszego przejścia nagniatającego (strategia ortogonalna PR).

Wyniki analizy statystycznej istotności wpływu dwu przejść nagniatających realizowanych krzyżowo w stosunku do nagniatania jednym przejściem ortogonalnym na efekty nagniatania przedstawiono w tabeli 4-37.

Tabela 4-37. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK w stosunku do nagniatania jednym przejściem ortogonalnym

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [μm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	po jedn. przejściu	po dwu przejściach						
0,1	0,02	0,127000	0,117333	24,8250	0,078346	1,394572	7	0,205803	bez zmian
	0,08	0,139667	0,118000	1,6556	0,835696	7,299883	7	0,000163	poprawa
	0,14	0,148000	0,122667	19,2000	0,100484	8,292280	7	0,000072	poprawa
	0,20	0,160667	0,164000	94,6667	0,020972	-0,41523*	5,02	0,783134	bez zmian
0,3	0,02	0,132000	0,124000	11,7333	0,160782	1,109400	7	0,303910	bez zmian
	0,08	0,17500	0,12400	12,5571	0,150800	4,480387	5,05	0,002865	poprawa
	0,14	0,20133	0,13733	396,800	0,005031	6,79847*	7	0,00102	poprawa
	0,20	0,22400	0,18533	1,7502	0,804504	2,202557	7	0,063491	bez zmian
0,5	0,02	0,15600	0,13267	2,9211	0,548928	2,128344	7	0,070843	bez zmian
	0,08	0,22033	0,14467	2,2684	0,667389	5,820513	7	0,000650	poprawa
	0,14	0,25800	0,17200	2,3214	0,387205	6,072450	7	0,000505	poprawa
	0,20	0,28233	0,22400	1,2851	0,709052	3,588551	7	0,008874	poprawa
0,7	0,02	0,25200	0,17133	1,4834	0,898926	4,599255	7	0,002486	poprawa
	0,08	0,32300	0,20933	1,0515	0,831475	4,217598	7	0,003948	poprawa
	0,14	0,34933	0,25600	1,1366	0,783710	3,617887	7	0,008534	poprawa
	0,20	0,38100	0,29333	1,6646	0,558391	3,623981	7	0,008465	poprawa

*statystyka testowa Cochran-Coxa z oddzielną oceną wariancji

Z analizy statystycznej wynika, że efekt nagniatania dwoma przejściami krzyżowymi w porównaniu do nagniatania jednym przejściem ortogonalnym zależy od parametrów procesu obróbki. Dla niskich wartości posuwu wierszowania przy frezowaniu $f_{wf}=0,1$ i $0,3$ [mm] istotne zmniejszenie chropowatości występuje dla posuwów wierszowania przy nagniataniu $f_{wn} = 0,08$ i $0,14$ [mm]. Dla większych posuwów przy frezowaniu ($f_{wf}=0,5$ i $0,7$ [mm]) zaobserwowano istotne zmniejszenie się chropowatości w całym zakresie zmienności posuwów przy nagniataniu.

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających ortogonalnych w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii krzyżowej przedstawiono w tabeli 4-38.

Tabela 4-38. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii ortogonalnej PR w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [μm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. P	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia PR	Strategia SK						
0,1	0,02	0,127333	0,117333	49,0000	0,040000	1,06066*	2,08	0,39626	bez zmian
	0,08	0,131333	0,118000	29,7778	0,064982	1,20168	4	0,295767	bez zmian
	0,14	0,133333	0,122667	73,0000	0,027027	1,85996*	2,05	0,20058	bez zmian
	0,20	0,134667	0,164000	112,3333	0,017647	-2,38624*	2,035	0,13757	bez zmian
0,3	0,02	0,132667	0,124000	23,1111	0,082949	0,88250	4	0,427352	bez zmian
	0,08	0,140667	0,124000	13,1905	0,140940	1,44821	4	0,221130	bez zmian
	0,14	0,145333	0,137333	67,0000	0,029412	1,45521*	2,06	0,27950	bez zmian
	0,20	0,154000	0,185333	2,7117	0,538835	-2,31552	4	0,081536	bez zmian
0,5	0,02	0,142667	0,132667	2,7143	0,538462	1,47087	4	0,215285	bez zmian
	0,08	0,150667	0,144667	2,7143	0,538462	0,66712	4	0,541206	bez zmian
	0,14	0,174000	0,172000	42,2500	0,046243	0,13169*	2,09	0,90680	bez zmian
	0,20	0,191333	0,224000	3,1192	0,485531	-1,96472	4	0,120899	bez zmian
0,7	0,02	0,170667	0,171333	9,2703	0,194737	-0,05130	4	0,961547	bez zmian
	0,08	0,236667	0,209333	2,2094	0,623171	1,01242	4	0,368601	bez zmian
	0,14	0,276667	0,256000	2,5219	0,567869	0,79383	4	0,471729	bez zmian
	0,20	0,319333	0,293333	13,4945	0,137983	1,07385	4	0,343355	bez zmian

* statystyka testowa Cochrań-Coxa z oddzielną oceną wariancji

Z analizy statystycznej wynika, że nie obserwuje się istotnej różnicy chropowatości powierzchni nagniatanej dwoma przejściami realizowanymi według strategii ortogonalnej PR i krzyżowej SK.

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających ortogonalnych w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii podwójnie ortogonalnej przedstawiono w tabeli 4-39.

Tabela 4-39. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii ortogonalnej PR w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii podwójnie ortogonalnej PP

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [μm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia PR	Strategia PP						
0,1	0,02	0,127333	0,118667	5,29730	0,317597	0,85166	4	0,442389	bez zmian
	0,08	0,131333	0,124667	2,01504	0,663342	0,49938	4	0,643732	bez zmian
	0,14	0,133333	0,135333	1,08219	0,960526	-0,24333	4	0,819718	bez zmian
	0,20	0,134667	0,142000	5,91228	0,289340	-0,55417	4	0,608982	bez zmian
0,3	0,02	0,132667	0,128000	1,41497	0,828169	0,37152	4	0,729092	bez zmian
	0,08	0,140667	0,131333	3,04396	0,494565	0,72980	4	0,505953	bez zmian
	0,14	0,145333	0,147333	1,67164	0,748603	-0,22423	4	0,833566	bez zmian
	0,20	0,154000	0,178000	1,29730	0,870588	-2,25441	4	0,087219	bez zmian
0,5	0,02	0,142667	0,128667	5,28571	0,318182	1,58293	4	0,188604	bez zmian
	0,08	0,150667	0,147333	4,24490	0,381323	0,31189	4	0,770704	bez zmian
	0,14	0,174000	0,185333	6,58333	0,263736	-1,78208	4	0,149321	bez zmian
	0,20	0,191333	0,222000	3,87179	0,410526	-3,33719	4	0,028911	str. ortog. lepsza
0,7	0,02	0,170667	0,182000	1,29730	0,870588	-1,84391	4	0,138967	bez zmian
	0,08	0,236667	0,221333	13,81081	0,135036	0,98251	4	0,381475	bez zmian
	0,14	0,276667	0,261333	3,25564	0,469965	0,96676	4	0,388409	bez zmian
	0,20	0,319333	0,292000	8,43956	0,211874	1,39890	4	0,234405	bez zmian

Z analizy statystycznej wynika, że nie obserwuje się istotnej różnicy chropowatości powierzchni nagniatanej dwoma przejściami realizowanymi według strategii ortogonalnej PR a dwoma przejściami w strategii podwójnie ortogonalnej PP.

Wyniki analizy statystycznej istotności różnicy dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii krzyżowej SK w stosunku do dwu przejść nagniatających realizowanych wg strategii podwójnie ortogonalnej PP przedstawiono w tabeli 4-40.

Tabela 4-40. Porównanie efektu nagniatania dwoma przejściami wg strategii krzyżowej SK w stosunku do nagniatania dwoma przejściami wg strategii podwójnie ortogonalnej PP

Parametry procesu		Średnia Ra z próbek [μm]		Statystyka F	Prawdop. statystyki F	Statystyka t	Liczba stopni swobody	Prawdop. p	Wniosek
f_{wf} [mm]	f_{wn} [mm]	Strategia SK	Strategia PP						
0,1	0,02	0,117333	0,118667	9,2500	0,195122	-0,31235	4	0,770382	bez zmian
	0,08	0,118000	0,124667	14,7778	0,126761	-0,83918	4	0,448593	bez zmian
	0,14	0,122667	0,135333	79,0000	0,025000	-2,12426*	2,05	0,16447	bez zmian
	0,20	0,164000	0,142000	19,0000	0,100000	4,26028	4	0,013051	str. krzyż. gorsza
0,3	0,02	0,124000	0,128000	16,3333	0,115385	-0,48038	4	0,656045	bez zmian
	0,08	0,124000	0,131333	4,3333	0,375000	-1,03940	4	0,357316	bez zmian
	0,14	0,137333	0,147333	112,0000	0,017699	-1,41108*	2,035	0,29165	bez zmian
	0,20	0,185333	0,178000	2,0903	0,647191	0,52145	4	0,629593	bez zmian

ciąg dalszy na następnej stronie

0.5	0,02	0,132667	0,128667	1,9474	0,678571	0,40089	4	0,708991	bez zmian
	0,08	0,144667	0,147333	1,5639	0,780059	-0,21661	4	0,839110	bez zmian
	0,14	0,172000	0,185333	6,4177	0,269625	-0,82619	4	0,455125	bez zmian
	0,20	0,224000	0,222000	12,0769	0,152941	0,13284	4	0,900733	bez zmian
0.7	0,02	0,171333	0,182000	7,1458	0,245524	-0,80915	4	0,463808	bez zmian
	0,08	0,209333	0,221333	30,5135	0,063465	-0,52714	4	0,625981	bez zmian
	0,14	0,256000	0,261333	8,2105	0,217143	-0,22857	4	0,830412	bez zmian
	0,20	0,293333	0,292000	1,5990	0,769539	0,04477	4	0,966439	bez zmian
* statystyka testowa Cochran – Coxa z oddzielną oceną wariancji									

Z analizy statystycznej wynika, że nie obserwuje się istotnej różnicy chropowatości powierzchni nagniatanej dwoma przejściami realizowanymi według strategii krzyżowej SK i podwójnie ortogonalnej PP.

Z przeprowadzonej analizy wyników nagniatania materiału 42CrMo4 (35 HRC) końcówką kulistą o średnicy $d_k=20$ [mm] wynika, że nagniatanie dwoma przejściami jest efektywne dla powierzchni frezowanej z posuwami $f_{wf}=0,3 \div 0,7$ [mm]. Można stosować każdą z rozważanych strategii ze wskazaniem na strategię ortogonalną PR.

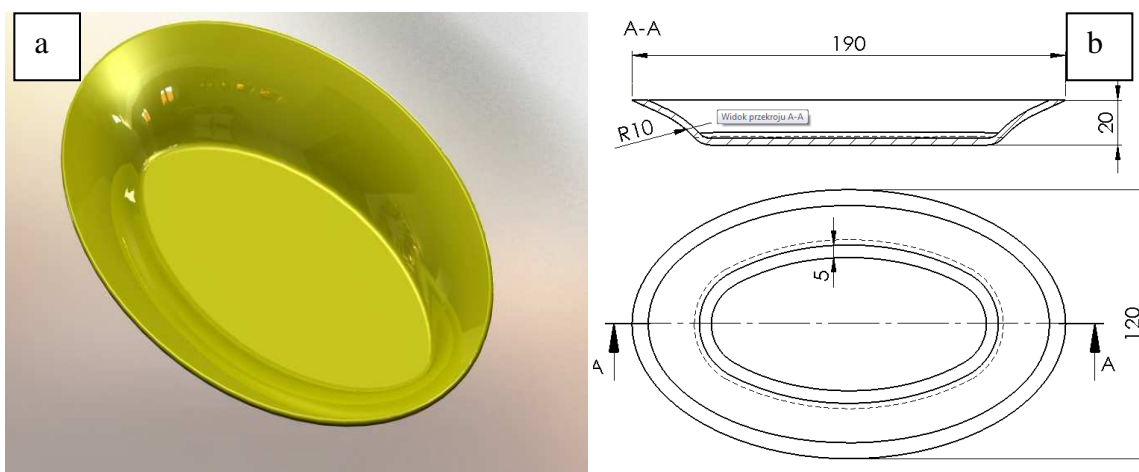
Porównując wykresy przedstawiające zależność parametru Ra w funkcji posuwów f_{wf} i f_{wn} po nagniataniu kulką o tej samej średnicy i przy tej samej sile nagniatania F_N dla materiału C45 (20 HRC) i 42CrMo4 (35 HRC), rysunek 4-16 z rysunkiem 4-18, i rysunek 4-17 z rysunkiem 4-21. **Porównując zależności: zależność 4-1 z zależnością 4-3 i zależność 4-2 z zależnością 4-7 można zauważyć różny charakter. Dla materiału C45 obserwuje się silniejszy wpływ posuwu nagniatania f_{wn} na chropowatość powierzchni niż posuwu frezowania f_{wf} (zależności 4-1 i 4-2). Przy nagniataniu materiału twardszego widać silniejszy wpływ posuwu frezowania f_{wf} niż posuwu nagniatania f_{wn} (zależności 4-3 i 4-7). Stąd wniosek, że nie można zależności $Ra=f(f_{wf}, f_{wn})$ wyznaczonej dla materiału 42CrMo4 (35 HRC) wykorzystać do opisu tego związku dla materiału C45 (20 HRC) stosując jedynie współczynniki poprawkowe.**

4.3.4. Weryfikacja wyników drugiego etapu badań doświadczalnych

Dwie pierwsze części badań prowadzono stosując istotne uproszczenie; powierzchnie przestrzenne złożone zastąpiono próbkami płaskimi. Głównym celem zastosowanego zabiegu było przyspieszenie prowadzonych prac, ułatwienie programowania obrabiarek CNC oraz przygotowanie próbek na których ocena parametrów

SGP dostępnymi metodami nie będzie przysparzać kłopotów. Zrealizowano frezowanie na obrabiarce pięcioosiowej, nagniatanie próbek prowadzono na obrabiarce trójosiowej. Frezując płaszczyzny wyeliminowano zjawiska towarzyszące frezowaniu powierzchni przestrzennych złożonych, związane ze zmienną grubością h i szerokością b warstwy skrawanej w zależności od kształtu powierzchni (wklęsła, wypukła), oraz zmienną wartością prędkości skrawania v_c w zależności od chwilowej wartości średnicy efektywnej D_e freza. Wpływ wspomnianych zjawisk [47] traktowano jako pomijalnie mały zakładając porównywalny stan SGP w przypadku próbek płaskich i powierzchni przestrzennych złożonych. Jednocześnie zweryfikowano doświadczalnie jedną z tez pracy, przy okazji sprawdzając poprawność wyestymowanych zależności statystyczno doświadczalnych.

Do tego celu przygotowano przedmiot o złożonym przestrzennie kształcie rysunek 4-24. Na podstawie którego podjęto się wykonania formy wtryskowej do tworzyw sztucznych.

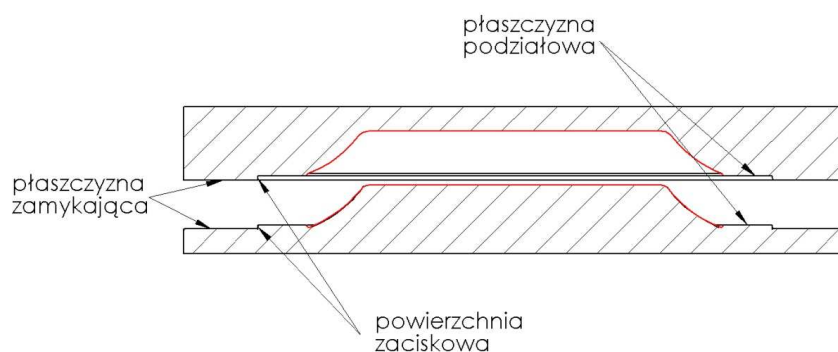


Rysunek 4-24. Przedmiot wytwarzany: a) widok gotowego modelu talerza b) wymiary charakterystyczne części

W oparciu o przygotowany model talerzyka zaprojektowano formę, w której wystąpiły dwa typy powierzchni. Część wklęsła (matryca) oraz część wypukła (stempel). Materiał stal 42CrMo4 o twardości 34-36 HRC, w praktyce przemysłowej jest bardzo często wykorzystywany do produkcji form wtryskowych do tworzyw sztucznych i gumy. Obróbka obu połówek formy była prowadzona na centrum obróbkowym DMG DMU 60 MONOBLOCK.

Ze względu na pracochłonność i wysoki koszt wykonania formy wtryskowej z wszystkimi rozwiązaniami technicznymi takimi jak elementy ustalające i prowadzące, kanały zasilające, oraz kanały chłodzące. Przeprowadzono jedynie obróbkę powierzchni

przestrzennej złożonej, odpowiedzialnej za kształtowanie powierzchni gotowej wypraski talerza (kolor czerwony na rysunku 4-25). Zastosowano uproszczenie w obrębie powierzchni zaciskowej, która ze względów technologicznych powinna być nachylona do płaszczyzny podziału formy pod kątem 3 do 5°. W tym wypadku wykonano powierzchnię zaciskową prostopadle do płaszczyzny podziału. Powierzchnię zamykającą formy oraz dodatkowe powierzchnie płaskie pozostawiono w stanie po kształtującym frezowaniu. Nagniatanie tych obszarów można uznać za niecelowe, gdyż w miejscach, gdzie przecinają się dwie powierzchnie tworzące ostrą krawędź uzyska się zaokrąglenie. W praktyce w miejscach gdzie przecina się płaszczyzna podziałowa formy z powierzchnią zaciskową oraz w miejscu przecięcia się powierzchni zaciskowej z płaszczyzną zamykającą takie zaokrąglenie doprowadziłoby do powstawania grubych nadlewek wokół wypraski, trudnych do okrawania w późniejszych etapach procesu technologicznego.



Rysunek 4-25. Rysunek powierzchni roboczych formy wtryskowej do tworzyw sztucznych

Skomplikowanym technologicznie zagadnieniem okazał się przebieg promienia wraz zewnętrzną krawędzią ograniczająca wypraskę, a także sposób przebiegu płaszczyzny podziału. Ze względu na średnicę narzędzi do frezowania i nagniatania należało zaplanować sposób wykonania i podziału promienia w obu częściach formy. Zdecydowano się na uproszczenie polegające na przeniesieniu promienia w dolną część, górę pozostawiając płaską. Dzięki temu rozwiązaniu można było prowadzić nagniatanie obu części formy do krawędzi nagniatakiem o większej średnicy kulki d_k niż średnica płytki skrawającej freza d_o .

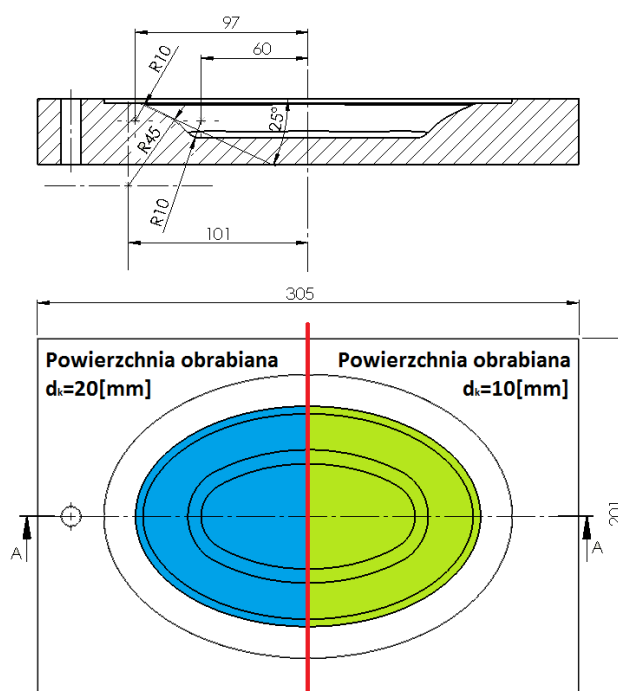
Materiał do wykonania próbek w postaci płyt został wstępnie ulepszonej cieplnie do twardości 34-36 HRC. Próbki po zgrubnej obróbce skrawaniem raz jeszcze ulepszonej cieplnie, pomimo dobrej hartowności stali 42CrMo4, istniała obawa, że bez dodatkowej obróbki cieplnej w rdzeniu materiału będzie inna twardość niż na powierzchni. Różnica twardości pomiędzy poszczególnymi fragmentami próbki mogłaby skutkować

nierównomierną redukcją chropowatości w obrębie powierzchni nagniatanej. Dopiero po obróbce cieplnej i poprawieniu baz obróbkowych przystąpiono do kształtującego frezowania. Na tą operację pozostawiono naddatek obróbkowy równy 1 [mm]. Na podstawie wcześniejszych badań przyjęto zestawy parametrów do kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania. Jako kryterium doboru kierowano się minimum wartości parametru Ra oraz wydajnością powierzchniową. Zestawy parametrów przedstawiono w tabeli 4-41.

Tabela 4-41. Zestawienie parametrów technologicznych frezowania próbek 3D.

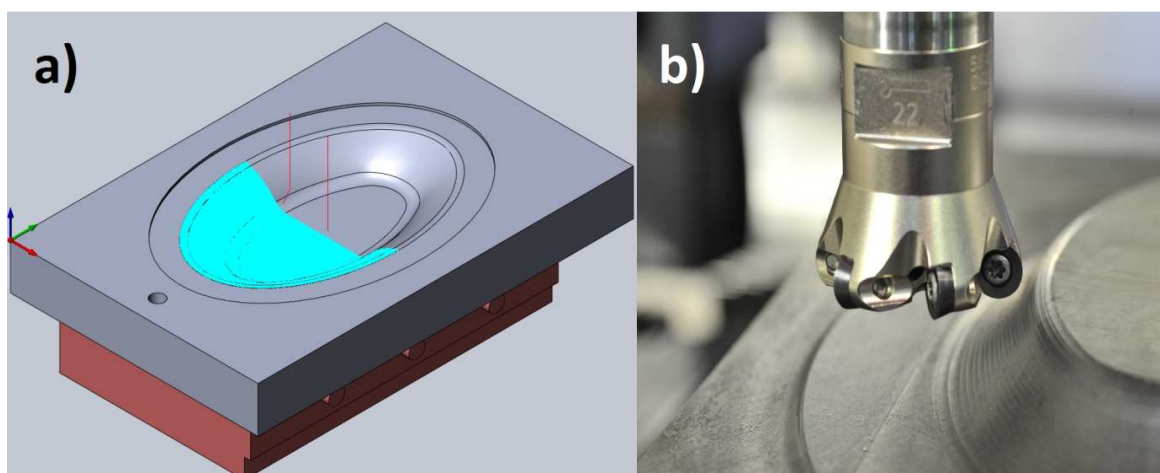
Parametr	Średnica płytki freza $d_p=10$ [mm]	Średnica płytki freza $d_p=20$ [mm]
v_c [m/min]	120	120
f_z [mm/ostre]	0.15	0.15
a_p [mm]	1	1
f_{wd} [mm]	0.278	0.294
Liczba przejść	1	1

Obie części formy (matrycę oraz stempel) podzielono na dwa fragmenty – rysunek 4-26. Otrzymano w ten sposób cztery fragmenty powierzchni przestrzennej złożonej, które następnie frezowano i nagniatano. Sprawdzone w ten sposób dwukrotnie otrzymane zależności statystyczno – doświadczalne frezowanie $d_o = 10$ [mm] i nagniatanie $d_k=10$ [mm], oraz frezowanie $d_o = 20$ [mm] i nagniatanie $d_k=20$ [mm] na powierzchni wklęsłej i na powierzchni wypukłej.



Rysunek 4-26. Podział powierzchni formy na dwa niezależnie obrabiane fragmenty.

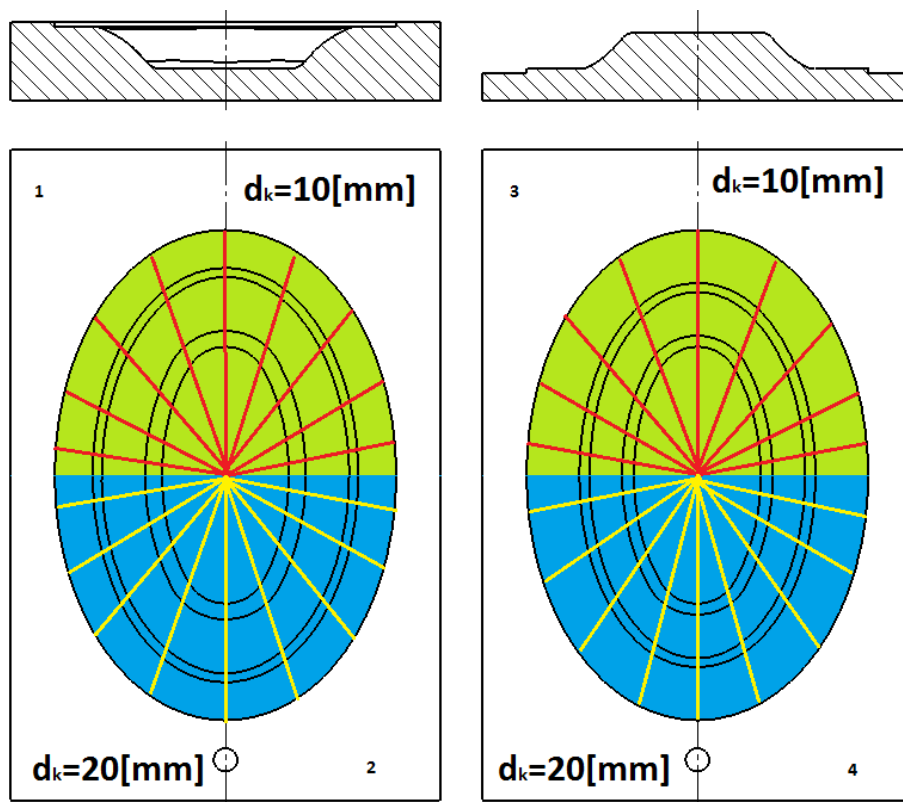
Aby zwiększyć wydajność frezowania powierzchni wypukłej (stempla) postanowiono wykorzystać posiadane wielostrzowe głowice torusowe. Jednak w przypadku obróbki powierzchni wklęsłych (matrycy) głowicami torusowymi powstał by fragment powierzchni przejściowej obrabianej dwukrotnie zarówno głowicą z płytkami skrawającymi $d_o=10$ [mm] oraz głowicą z płytkami $d_o=20$ [mm]. Dlatego do obróbki kształtującej powierzchni wklęsłej użyto frezów kulistych $d_o=10$ i 20 [mm]. Przy obróbce frezami kulistym dla zapewnienia regularnej struktury powierzchni oraz uniknięcia skrawania z prędkością $v_c=0$ [mm/min] skorzystano z często używanej praktycznie opcji pochylenia narzędzia. Tor freza programowano mając na uwadze uzyskanie struktury cechującej, się stałą odległością pomiędzy kolejnymi śladami przejść freza $f_{wf}=\text{const}$ (rysunek 4-27a)



Rysunek 4-27. Sposób przygotowania próbki do nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych:
a) widok próbki, b) fotografia próbki po frezowaniu kształtującym

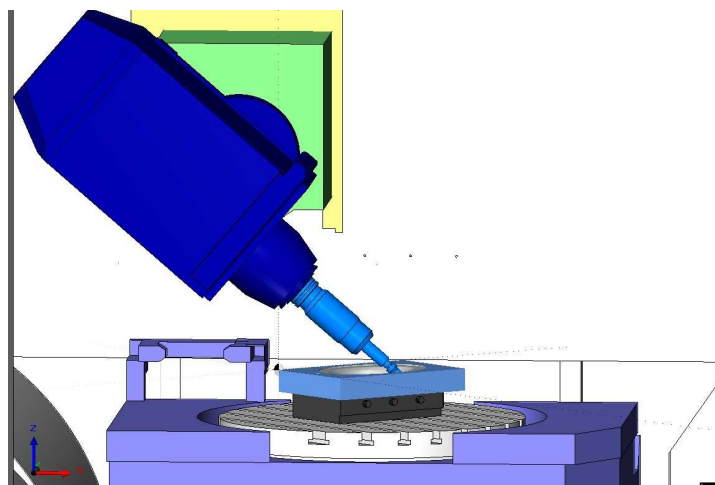
W programie SolidCAM przygotowano symulację różnych wariantów obróbki uwzględniającą elementy układu OUPN, parametry obróbki oraz technologiczne ograniczenia. Wytypowano kilka różnych strategii obróbki, łączących wzajemnie ślady frezowania i nagniatania w sposób zapewniający prostopadłą trajektorię narzędzia nagniatającego do śladów frezowania. Na etapie symulacji zdecydowano się na przyjęcie wariantu łączącego strategię spiralnego frezowania połówek formy z nagniataniem promieniowym (rysunek 4-28).

Prace symulacyjne pozwoliły dodatkowo zwrócić uwagę na istotne aspekty związane z pięcioosiowym nagniataniem na obrabiarce CNC.



Rysunek 4-28. Połączenie strategii frezowania i nagniatania powierzchni obu części formy

Ze względu na zmienną długość nagniataka w przypadku utraty kontaktu z przedmiotem obrabianym w trybie automatycznej pracy, ponowne wejście narzędzia w strefę obróbki jest trudne do zrealizowania (wymagany jest prostopadły najazd na powierzchnię obrabianą a po osiągnięciu styku i naprężeniu narzędzia należy chwilę odczekać celem ustabilizowania ciśnienia i siły w układzie). Najlepiej jest gdy w programie obróbkowym będzie jedno wejście, nieprzerwana sekwencja obróbki i jedno wyjście narzędzia. Na tym problemie skupiono uwagę podczas przygotowania i przeglądania wyników symulacji. Po sprawdzeniu warunków kinematycznych wirtualnej obróbki, okazało się, że umieszczenie próbki w centralnym punkcie stołu obrabiarki uniemożliwia pełną, nieprzerwaną obróbkę wszystkich fragmentów powierzchni. Wprowadzenie i zamocowanie próbki względem obrotowej osi C maszyny z pewną mimośrodowością jest najprostszym rozwiązaniem pojawiającego się problemu rysunek 4-29. Celem usytuowania punktu zerowego części i orientacji modeli w oraz rzeczywistych próbek w płaszczyźnie XY wykonano otwór ustalający. W praktyce rolę otworu ustalającego pełni otwór pod montaż tulei prowadzących obie połówki formy wzdłuż słupów. Na koniec sprawdzono czy złącza i przewody hydrauliczne nie będą powodować kolizji podczas obróbki. Dopuszczono odchyłkę od normalnego ustawienia narzędzia względem powierzchni obrabianej w granicach $\pm 5^{\circ}$.



Rysunek 4-29. Sprawdzenie symulacji obróbki uwzględniającej wszystkie ograniczenia wynikające z zastosowanego układu OUPN

Po wyeliminowaniu pojawiających się problemów przeprowadzono końcowy etap symulacji z uwzględnieniem wybranej strategii oraz wytypowanych technologicznych parametrów obróbki. Otrzymano wynik pozbawiony błędów oraz kolizji. Wygenerowano kod, który następnie wgrano do układu sterowania centrum obróbkowego, gdzie dokonano ostatniego sprawdzenia wykonując symulację maszynową w czasie rzeczywistym. Następnie przystąpiono do badań weryfikujących wyniki uzyskane we wcześniejszych etapach prac (rysunek 4-30).



Rysunek 4-30. Widok nagniatka miechowego z końcówką $d_k=10$ [mm] podczas obróbki pięcioosiowej

Badania weryfikacyjne prowadzono z wykorzystaniem miechowego nagniatka hydrostatycznego. Końcówkę roboczą zaopatrzono w kulkę ceramiczną wykonaną z ZrO_2 . Czas nieprzerwanego nagniatania pojedynczego fragmentu próbki przekraczał trzy

godziny. Ze względu na trwałość kulki nagniatającej, wykonano próby w niskim i średnim zakresie sił. Pozostałe parametry nagniatania przedstawiono w tabeli 4-42.

Tabela 4-42. Zestawienie parametrów technologicznych nagniatania próbek 3D

Parametr	Nagniatak z końcówką $d_k=10[\text{mm}]$	Nagniatak z końcówką $d_k=20[\text{mm}]$
v_b [mm/min]	4000	4000
F_N [N]	500	1500
f_{wn} [mm]	0.1	0.1
Liczba przejęć	1	1

Nagniatanie pięcioosiowe realizowano na tzw. posuwach szybkich obrabiarki wynoszących 4000 [mm/min] była to pierwsza tego typu praca prowadzona w ITM ZUT w Szczecinie, dlatego też ze względów bezpieczeństwa zaniechano zwiększania wartości posuwu i podnoszenia wydajności. Stosując wysokie prędkości nagniatania problemem okazują się przewody hydrauliczne podłączone do narzędzia, które są szarpane i wielokrotnie przeginane. Brak odpowiedniego zabezpieczenia może prowadzić do rozszczelnienia układu. W tym celu najlepiej jest przewody zebrać w pętlę, która następnie zostanie podwieszona pod wrzecionem obrabiarki. Wykorzystując możliwości cyfrowego układu sterowania i regulacji w trakcie badań śledzono parametry nagniatania (ciśnienia P1 i P2 w narzędziu oraz składowe siły nagniatania F_N).

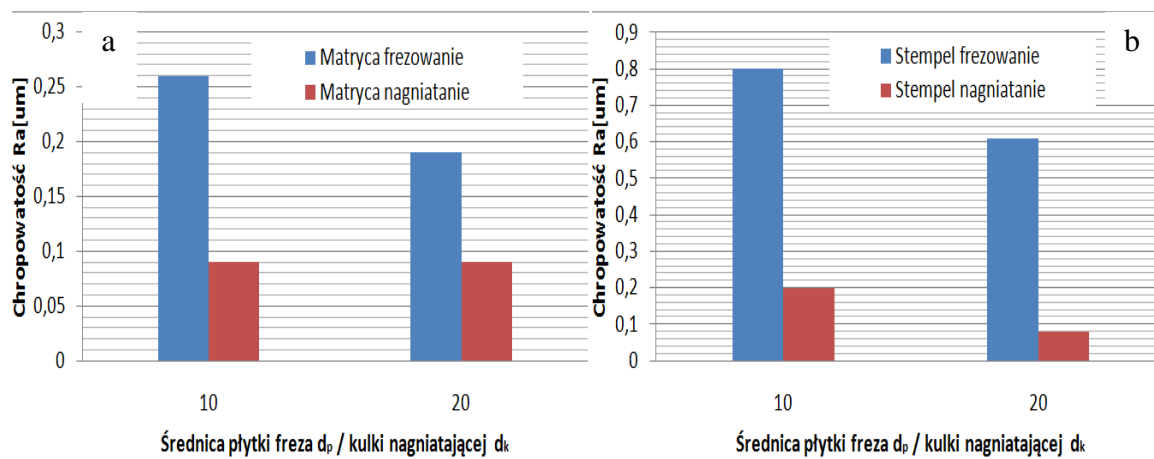
Dla użytych wartości technologicznych parametrów obróbki wyznaczono prognozowane wartości parametru R_a . Dla kulki o średnicy 10 [mm] z zależności 4-6 $\hat{R}_a = 0,158$ [μm] (przy $R_{a_{\min}}=0,104$), oraz $\hat{R}_a = 0,122$ [μm] dla $d_k=20$ [mm] z zależności 4-10 (przy $R_{a_{\min}}=0,095$). Wartości parametrów SGP, zmierzono wykorzystując przenośny profilometr firmy Hommel-Etamic T1000 z bezślizgaczą sondą TKU300/600. Na każdym z otrzymanych pól wykonywano pomiary profili zgodnie ze strategią pomiarową realizowaną we wcześniejszych etapach badań tj. pomiary wzdłuż i w poprzek śladów pozostawionych przez narzędzie do nagniatania, po odrzuceniu testem wartości odstających przyjęto za wynik końcowy większą spośród obliczonych wartości średnich. Wyznaczone wartości parametrów SGP przedstawiono w tabeli 4-43.

Porównując otrzymane wyniki z wartościami prognozowanymi można stwierdzić, że wykazują zgodność. Dla obu typów powierzchni frezowanych i nagniatanych narzędziami o średnicy (d_p i d_k) 20 [mm] nie została przekroczona wartość prognozowana chropowatości powierzchni $\hat{R}_a = 0,12$ [μm], podczas obróbki części wklęsłej (matrycy) otrzymano $R_a = 0,09$ [μm] i $R_a = 0,08$ [μm] dla powierzchni wypukłej (stempla).

Tabela 4-43. Wyniki pomiarów SGP powierzchni frezowanych i nagniatanych formy

Średnia wartość parametru SGP [μm]	Powierzchnia frezowana wklęsła (matryca)		Powierzchnia nagniatana wklęsła (matryca)		Powierzchnia frezowana wypukła (stempel)		Powierzchnia nagniatana wypukła (stempel)	
	$d_p=10$ [mm]	$d_p=20$ [mm]	$d_k=10$ [mm]	$d_k=20$ [mm]	$d_p=10$ [mm]	$d_p=20$ [mm]	$d_k=10$ [mm]	$d_k=20$ [mm]
Teoretyczna wartość \hat{R}_a	-	-	0,158	0,122	-	-	0,158	0,122
Ra	0,26	0,19	0,09	0,09	0,80	0,61	0,20	0,08
Rz	1,36	0,938	0,50	0,47	4,09	3,15	0,75	0,31
Rmax	1,57	1,11	0,61	0,62	5,11	4,05	0,88	0,36

Wynik zgodny przewyższający wartości prognozowane otrzymano również w przypadku obróbki matrycy nagniatanej narzędziem o średnicy 10 [mm], w tym przypadku średnia wartość zmierzonego parametru R_a wynosiła 0,09 [μm], podczas gdy prognozowana wartość parametru \hat{R}_a była blisko dwukrotnie wyższa i wynosiła $R_a = 0,16$ [μm]. Można mówić o wyniku niezadowalającym w przypadku obróbki powierzchni wypukłej (stempla) narzędziami o średnicy (d_p i d_k) 10 [mm], gdzie średnia zmierzona wartość parametru $R_a = 0,2$ [μm] przekroczyła nieznacznie wartość prognozowaną $\hat{R}_a = 0,16$ [μm]. Przyczyn takiego stanu należy upatrywać w wysokiej chropowatości powierzchni oraz śladach drgań powstałych po frezowaniu, wynikłych ze zużycia płytek skrawających. Frezowanie omawianego fragmentu formy trwało ponad trzy godziny, w tym czasie ujawniły się zjawiska, których nie można było zaobserwować podczas przygotowań próbek w etapach wcześniejszych. Jednak pomimo tego zakłócenia należy zwrócić uwagę na fakt, iż nagniatanie prowadzone było prawidłowo widoczna jest ponad trzykrotna redukcja wysokości nierówności powierzchni rysunek (4-31b).



Rysunek 4-31. Wykres przedstawiający redukcję chropowatości powierzchni obu połówek formy a) części wklęsłej (matrycy), b) części wypukłej (stempla)

Podsumowując wyniki prowadzonych prac można stwierdzić, że wobec ręcznej obróbki wykończeniowej powierzchni przestrzennych złożonych obróbka nagniataniem na centrum frezarskim pięcioosiowym jest dobrą, alternatywną formą obróbki powierzchni form wtryskowych matryc i tłoczników. Pomimo rozbieżności w jednym z czterech przypadków badań, ogólny wynik zakończonych badań weryfikacyjnych należy uznać za bardzo dobry. Opracowane zależności statystycznie doświadczalne umożliwiają prognozowanie z dobrym rezultatem stanu SGP po łączonej obróbce frezowaniem i nagniataniem. Wyniki omawianej pracy stanowią dobry punkt wyjścia do praktycznego zastosowania i dalszych badań.

4.4. Badania naprężeń w warstwie wierzchniej

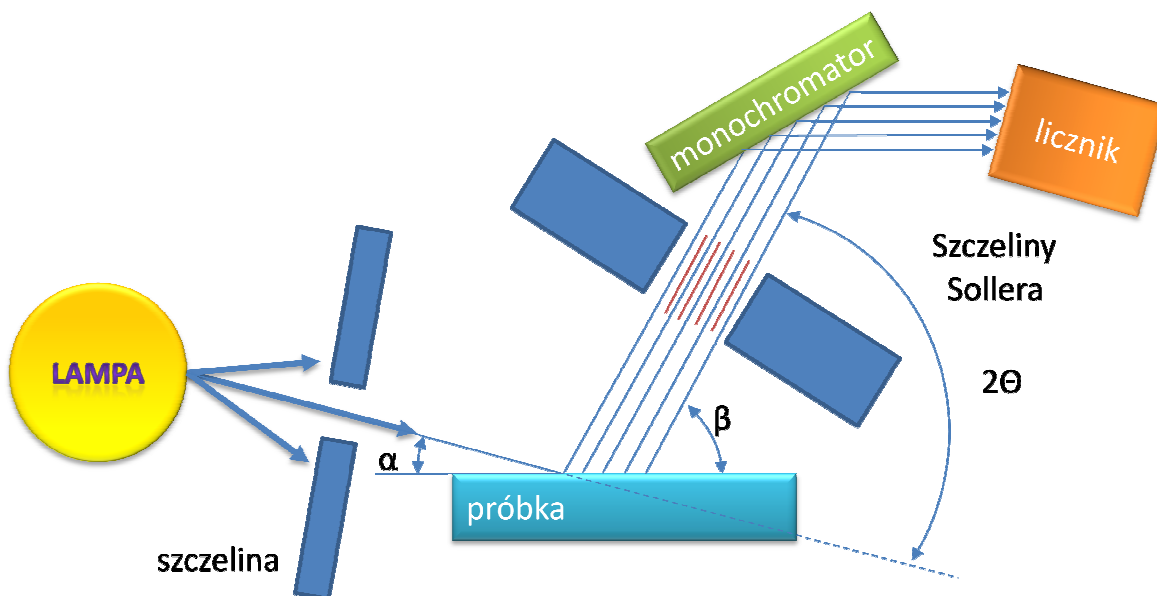
Zrealizowane badania umożliwiają określenie zestawu optymalnych parametrów technologicznych kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych. Można również na podstawie dobranych parametrów obróbki prognozować wartości wybranych parametrów SGP gotowego wyrobu. Jednak stan końcowy po obróbce oprócz SGP to również stan naprężeń w warstwie wierzchniej. Szczególnie mało informacji odnieść można w zakresie nieniszczących badań stanu warstwy wierzchniej po nagniataniu, zwłaszcza po nagniataniu powierzchni przestrzennych złożonych. Efekt gładkościowy nagniatania bardzo mocno zależy od wartości użytej siły nagniatania F_N . Dysponując odpowiednią aparaturą, tj. narzędzie oraz hydrauliczny układ zasilania ograniczenie maksymalnej wartości siły nagniatania F_N praktycznie przestaje być istotne. W takim przypadku chcąc osiągnąć dobry efekt gładkościowy stosując wysokie wartości sił nagniatania w jednym przejściu można

nieświadomie przekroczyć wartości dopuszczalne – bezpiecznych naprężeń w warstwie wierzchniej. Efektem niewłaściwie prowadzonej obróbki może być pojawiające się podczas eksploatacji zużycie na powierzchni części w postaci spękań i łuszczenia się. Przedmiot bardzo szybko straci swoje właściwości eksploatacyjne pomimo początkowego bardzo dobrego SGP. Stąd też podjęto się próby określenia stanu warstwy wierzchniej. W tym celu przygotowano próbki tak samo jak w wcześniejszych etapach badań. Jediną różnicą były wymiary próbek 10x10x7 [mm], na powierzchni każdej znalazło się tylko jedno pole pomiarowe. Ograniczenie wymiarów próbki podyktowane było wymiarami i sposobem montażu w przestrzeni roboczej urządzenia do pomiarów naprężeń. Obróbkę zrealizowano w warunkach umożliwiających osiągnięcie minimum wartości wysokościowych parametrów SGP. Podczas ostatniej części badań stosowano najczęściej wykorzystywane we wcześniejszych etapach wartości siły nagniatania F_N . Rodzaj oraz wartość naprężeń wyznaczano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert PRO firmy Panalytical, dostępnego w Instytucie Inżynierii Materiałowej ZUT w Szczecinie.



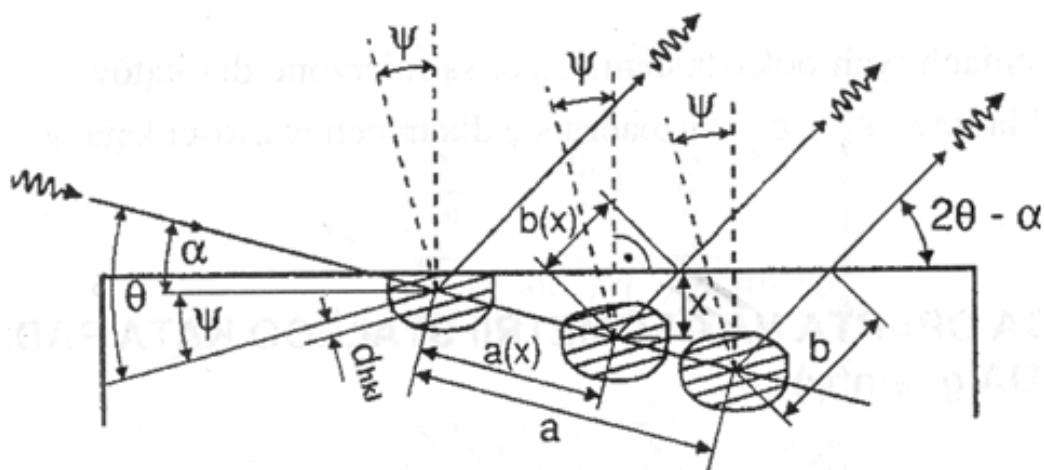
Rysunek 4-32. Dyfraktometr rentgenowski X'Pert PRO firmy Panalytical

Spośród dostępnych metod pomiaru zdecydowano się na użycie metody opartej na geometrii stałego kąta padania – metoda $g\text{-sin}^2\psi$ [59]

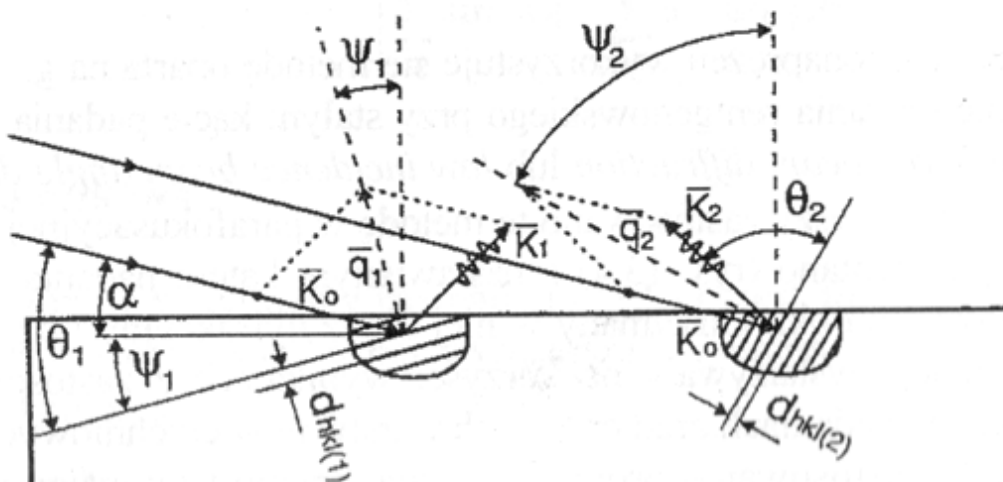


Rysunek 4-33. Schemat goniometru do rejestracji obrazu dyfrakcyjnego w geometrii stałego kąta padania α . Obraz dyfrakcyjny powstaje przez krokowe lub ciągle skanowanie licznikiem na ramieniu pod kątem 2θ

Metoda wykorzystująca ten sposób dyfrakcji nadaje się do badania warstw ciał stałych. W geometrii stałego kąta padania płaszczyzny uginające są nachylone względem powierzchni (rysunek 4-34), a kąt nachylenia ψ zależy od kąta Bragga Θ i kąta padania α . Przy dużych kątach Θ i małym kącie padania płaszczyzny uginające mogą być prawie prostopadłe do powierzchni próbki. Stwarza to możliwość pomiarów orientacji krystalograficznej, gradientów składu chemicznego, fazowego i naprężeń (odkształceń własnych).



Rysunek 4-34. Schemat dyfrakcji [59] w geometrii stałego kąta padania α



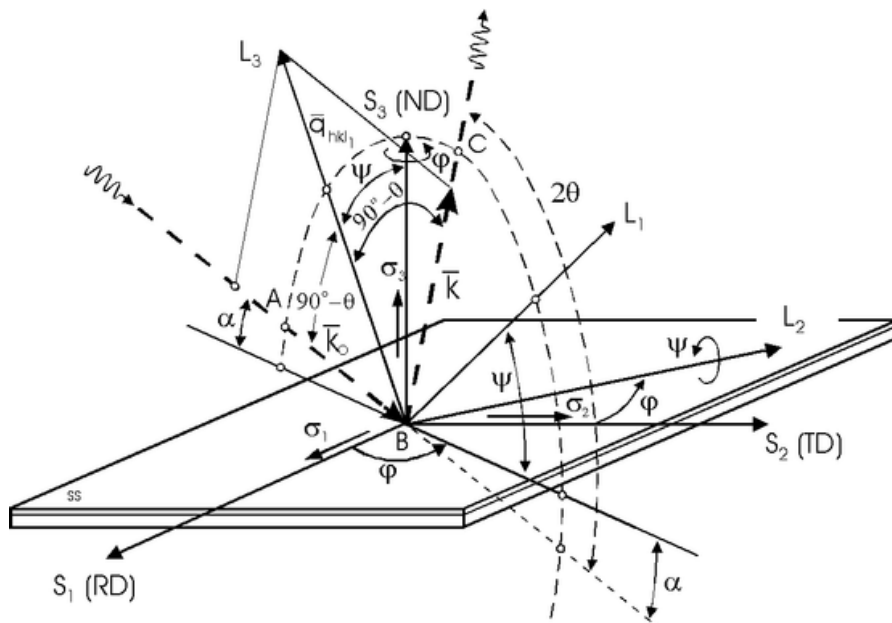
Rysunek 4-35. Schemat dyfrakcji w geometrii stałego kąta padania α – w ujęciu wektorowym [59]

Stosowana metoda pomiarowa $g\text{-sin}^2\psi$ nie wymaga stosowania próbek wzorcowych. Wykorzystanych jest wiele linii dyfrakcyjnych hkl. Z geometrycznych zależności (rysunek 4-35) pomiędzy kątami α , Θ , ψ wynika zależność:

$$\psi = \alpha - \Theta \quad (4-11)$$

Przystępując do przeprowadzania analizy stanu warstwy wierzchniej przyjętą metodą ustawia się wartości kąta padania α . W zależności od kształtu, symetrii przedmiotu oraz interesującego kierunku naprężeń ustawia się wartość położenia katowego względem osi goniometru φ (rysunek 4-36), zmiennymi wielkościami są wartości kątów Bragga Θ oraz kąt nachylenia ψ (zależność 4-11).

Ze względu na wiele różnych linii dyfrakcji hkl o różnych wartościach kąta ψ w płaszczyźnie dyfrakcji, stosowano goniometr typu ω . Metoda $g\text{-sin}^2\psi$ na tle pozostałych metod wykorzystujących różne postacie dyfrakcji odznacza się ograniczoną podatnością na błędy wynikłe z wpływu SGP mierzonej części. Wartość będąca wynikiem pomiaru naprężeń jest uśrednieniem stałych sprężystości dla większej ilości linii hkl. Opisywana metoda ma jeszcze tą zaletę, że przy niewielkim przesunięciu płaszczyzny próbki z osi goniometru unika się błędów pomiarowych spowodowanych błędnym pomiarem położenia katowego linii dyfrakcyjnej.

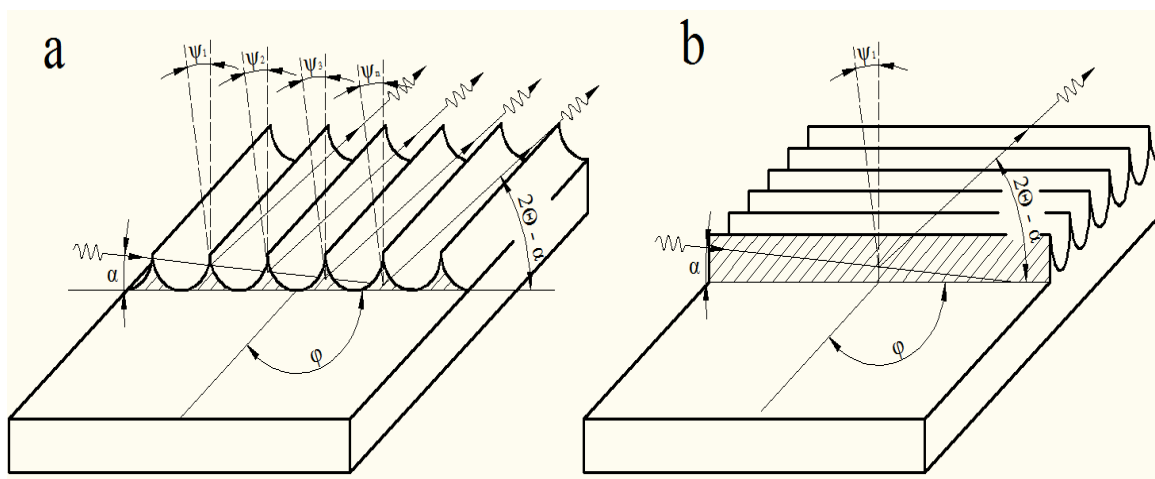


Rysunek 4-36. Układ przestrzenny wiązki padającej i ugiętej od trzech refleksów hkl w dyfrakcji przy stałym kącie padania oraz składowe naprężenia na powierzchni we współrzędnych próbki S_i i układu pomiarowego L_j [59]

Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów naprężeń w badanych próbkach wykonano szereg pomiarów na próbkach kontrolnych celem opracowania metodologii postępowania i doboru nastaw urządzenia pomiarowego X'pert PRO.

W trakcie prób przygotowawczych okazało się, jak ważne jest zapewnienie równoległości pomiędzy mierzoną powierzchnią próbki a podstawą. Notowano również brak powtarzalności oraz duży rozrzut uzyskanych wyników w zależności od ustawienia kąтового próbki φ ponadto wyznaczone wartości naprężeń były obarczone dużą niepewnością pomiaru.

Dlatego celem ograniczenia wpływu zakłóceń i zapewnienia równoległości powierzchnia podstawy próbek była szlifowana, frezowanie i nagniatanie realizowano wykorzystując uchwyt magnetyczny. Do nagniatania stosowano technologiczne parametry obróbki gwarantujące minimalne wartości wysokościowych parametrów SGP. Na koniec oznaczono kierunek nagniatania celem jednoznacznego ustalenia próbki w przestrzeni goniometru. Próbki ustawiano tak aby kierunek nagniatania pokrywał się z kierunkiem padania wiązki promieniowania rentgenowskiego (rysunek 4-37b). Takie ustawienie wpływało na odtwarzalność uzyskiwanych wartości, jednocześnie ograniczając błędy związane z teksturą powierzchni.



Rysunek 4-37. Sposób ustawienia próbki względem wiązki padającej w przestrzeni goniometru:

a) poprzecznie do śladów nagniatania, b) wzdłużnie do śladów nagniatania

Po zakończeniu wstępnych prac na próbkach kontrolnych przystąpiono do właściwej części badań. Wykonano dwadzieścia próbek (dwa materiały 20 i 35HRC, dwie średnice narzędzia do nagniatania $d_k = 10$ i 20 [mm], pięć poziomów siły nagniatania F_N) -warunki obróbki przedstawiono w tabeli 4-44.

Tabela 4-44. Warunki obróbki próbek przeznaczonych do pomiaru naprężeń

Parametr	Jednostka	Materiał C45 (20HRC) d_p i $d_k = 10, 20$ [mm]	Materiał 42CrMo4 (35HRC) d_p i $d_k = 10, 20$ [mm]
Prędkość skrawania v_c	[m/min]	110	110
Posuw na ostrze f_z	[mm]	0.1	0.1
Wierszowanie przy frezowaniu f_{vf}	[mm]	0.1	0.1
Głębokość skrawania a_p	[mm]	0.5	0.5
Prędkość nagniatania v_b	[mm/min]	8000	8000
Wierszowanie przy nagniataniu f_{vb}	[mm]	0.02	0.02
Siła nagniatania F_N	[N]	500; 700; 900; 1100; 1300;	500; 700; 900; 1100; 1300;

Wykonane próbki trwale oznaczono. Przystępując do wykonania serii pomiarów od nowa skonfigurowano dyfraktometr rentgenowski do pracy z lampą $CoK\alpha$ (lampa sodowa używana w trakcie prób przygotowawczych uległa uszkodzeniu) o długości fali $\lambda = 1,78901$ [Å]. Celem uzyskania właściwej wiązki, zastosowano w wiązce promieni ugiętych płasko – równoległy kolimator. Zastosowano programowaną szczelinę oraz maskę, dzięki której napromieniowana powierzchnia próbki miała kształt kwadratu

o długości boku 7 [mm]. Ze względu na długi czas potrzebny na wykonanie pomiaru, zdecydowano się na przyjęcie tylko jednej wartości kąta padania wiązki $\alpha=7^\circ$. Widma wykonano w przedziale kątowym $46-130^\circ 2\theta$ z krokiem $0,02^\circ$ czas zliczania ustawiono 3 [sek.]. Położenie refleksów dopasowano w programie ProfileFit.

Badania związane z użyciem dyfraktometru rentgenowskiego do określenia naprężeń w warstwie wierzchniej części są pierwszymi tego typu pracami zrealizowanymi na WIMiM ZUT w Szczecinie. Pomimo dość długiego okresu przygotowawczego, w którym opracowywano strategię pomiaru naprężeń (wybór metody pomiarowej, opracowanie nastaw dyfraktometru, analityczny sposób wyznaczania uśrednionej wartości naprężeń) otrzymane wyniki należy traktować jako wartości orientacyjne. Spodziewano się uzyskać ściskający stan naprężeń w warstwie wierzchniej (ujemne wartości). Zakładano również wzrost bezwzględnej wartości naprężeń wraz ze wzrostem siły nagniatania F_N . Spodziewano się uzyskania większych bezwzględnych wartości naprężeń przy nagniataniu kulką o średnicy 10 [mm] od wartości uzyskanych przy nagniataniu narzędziem z kulką 20 [mm] (mniejsze jednostkowe naciski narzędzia przy tej samej sile). Z powodu dość skromnej liczby publikacji naukowych na temat praktycznych metod wyznaczania naprężeń i właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu oraz braku własnego dorobku w realizacji badań naukowych ww. obszarze tematycznym, nie próbowano podjęcia się prognozowania wartości powstałych naprężeń w zależności od głębokości. Wyznaczone wartości (tabela 4-45) powinny jedynie służyć ocenie przyjętej wartości siły nagniatania F_N (dobra / za duża).

Tabela 4-45. Wartości naprężeń wyznaczone metodą $g\text{-sin}^2\psi$, przy kącie padania wiązki $\alpha = 7^\circ$

Siła nagniatania F_N [N]	C45 (20HRC)		42CrMo4 (35HRC)	
	Naprężenia [MPa]		Naprężenia [MPa]	
	$d_k=10$ [mm]	$d_k=20$ [mm]	$d_k=10$ [mm]	$d_k=20$ [mm]
500	-570	-321	-759	-370
700	-600	-316	-782	-351
900	-596	-413	-505	-367
1100	-533	-462	-500	-372
1300	-577	-461	-486	-387

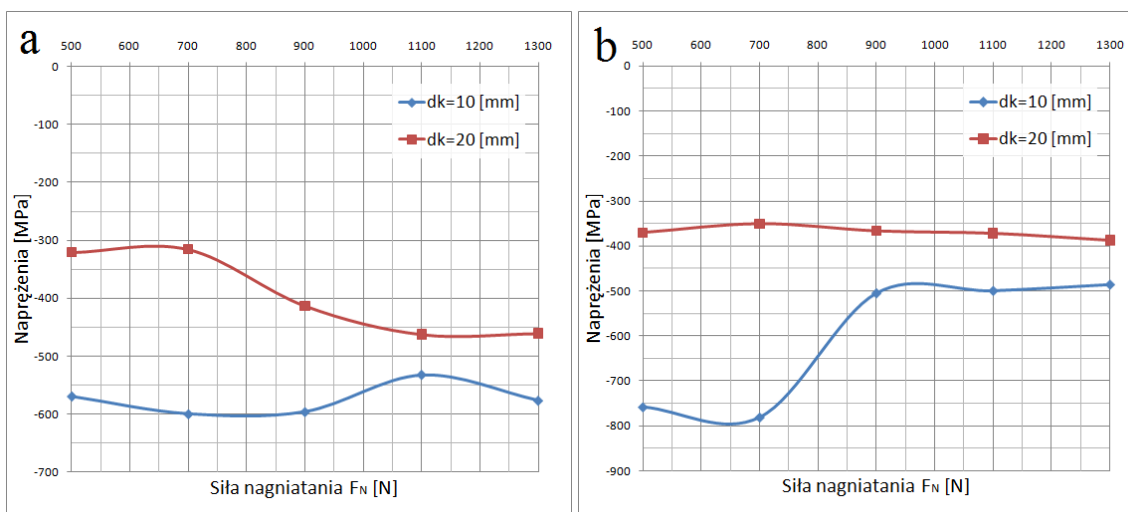
Na wykresach (rysunek 4-38) prezentowane są przebiegi naprężeń w zależności od zastosowanej siły nagniatania F_N . Na wszystkich próbkach zgodnie z oczekiwaniami uzyskano ujemne wartości świadczące o ściskających naprężeniach w warstwie wierzchniej. Zgodnie z przewidywaniami wartości bezwzględne zarejestrowanych

naprężeń powierzchni obrabianych narzędziem o średnicy 10 [mm] przekraczają wartości naprężeń, po obróbce narzędziem o średnicy 20 [mm].

W stosowanym przedziale sił nagniatania F_N (tabela 4-45) zanotowano nieznaczne wahania naprężeń – około 100MPa. Rozrzut uzyskanych wartości mieści się w granicach błędu stosowanej metody pomiarowej. Można stwierdzić, że zmiana siły nagniatania w stosowanym przedziale nie wpływa istotnie na wartości rejestrowych naprężeń. Biorąc pod uwagę fakt, że we wszystkich przypadkach w taki sam sposób rejestrowano średnie wartości naprężeń w stałej objętości pod powierzchnią materiału to brak istotnych różnic w charakterystyce siła – naprężenia jest pozytywnym zjawiskiem. Duża tolerancja wartości siły nagniatania F_N jest dobrym zabezpieczeniem części przed wprowadzeniem stanu naprężeń który mógłby powodować niepożądane zjawiska na powierzchni gotowego wyrobu.

Wyjątkiem jest przypadek, w którym nagniatano materiał 42CrMo4 narzędziem o średnicy 10 [mm], zarejestrowano rozrzut wartości naprężeń na poziomie ~300 [MPa]. W tym przypadku wystąpiły również anomalie, zarejestrowane początkowo naprężenia ok. 780 [MPa] dla sił 500 oraz 700 [N] zmalały do około 500 [MPa] dla sił 900÷1300 [N]. Wykonane dodatkowo pomiary były zbieżne z wartościami prezentowanymi w tabeli 4-45. Obserwowane zjawisko należy najprawdopodobniej tłumaczyć relaksacją naprężeń mogącą wystąpić na skutek przypadkowego oddziaływania mechanicznego na powierzchnie pomiarowe, lub przemianami strukturalnymi (bądź fazowymi) stali w efekcie oddziaływania narzędzia nagniatającego. Celem ustalenia faktycznych przyczyn takiego stanu rzeczy należałoby przeprowadzić dodatkowe badania metalograficzne, jak również powtórnie wykonać próbki w przypadku potwierdzenia hipotezy występowania przemian strukturalnych bądź fazowych.

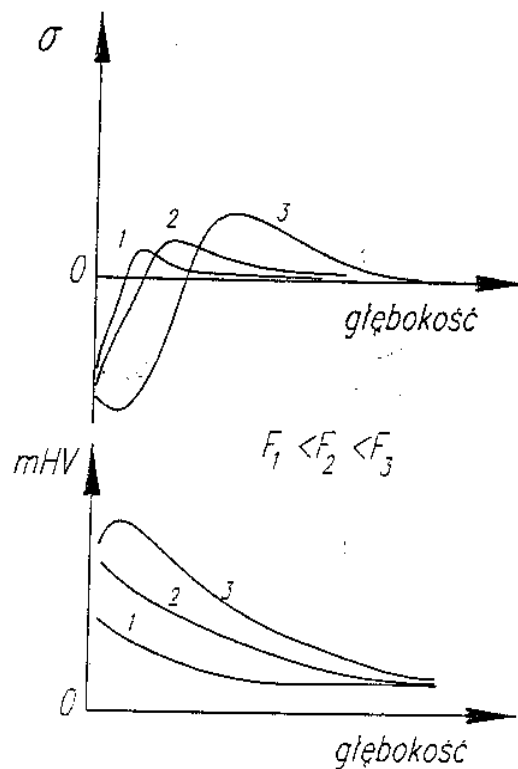
Jednoznaczne określenie granic bezpiecznego poziomu naprężeń w warstwie wierzchniej, do którego można by odnieść uzyskane wyniki jest trudne. W tabelach własności mechanicznych i fizycznych stali nie podaje się maksymalnych wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Ze względu na sposób tworzenia się i zakres penetracji naprężeń powstałych w trakcie nagniatania nie ma możliwości porównania z wartościami naprężeń wyznaczonymi podczas statycznej próby na ściskanie



Rysunek 4-38. zależność naprężeń od użytej siły nagniatania F_N : a) materiał C45 (20 HRC); b) materiał 42CrMo4 (35 HRC)

Ze wzrostem siły nagniatania rosną naprężenia i rośnie mikrotwardość w warstwie wierzchniej. Maksimum twardości znajduje się zwykle na tej samej głębokości co maksimum naprężeń ściskających. Po przekroczeniu pewnej wartości siły nagniatania F_N , maksima te przesuwają się w głąb materiału. Równocześnie rosną wartości naprężeń rozciągających w głębszych warstwach, co może stać się powodem niekorzystnego zjawiska łuszczenia się powierzchni i utraty jej zdolności do pracy

W przypadku nagniatania gładkościowego ze względu na właściwości eksploatacyjne powierzchni od charakterystyki siła – naprężenia, bardziej przydatną była by charakterystyka wartość naprężeń – głębokość zalegania (rysunek 4-39), której jednak z przyczyn technicznych (duża ilość pomiarów pod różnymi kątami α) jak i zarówno braku praktycznego doświadczenia nie opracowano.



Rysunek 4-39. Rozkład naprężeń i mikrotwardości w warstwie wierzchniej po nagniataniu z różnymi siłami

W trakcie opracowania wyników badań napotkano na problemy związane z wyznaczeniem głębokości zalegania i wartości naprężeń. Wykonane pomiary odznaczały się małą powtarzalnością i dużymi rozrzutami. Bez odpowiedniego opracowania statystycznego niemożliwe jest sporządzenie wiarygodnych przebiegów głębokość – naprężenia. Uzyskane wyniki badań nie pozwalają na jednoznaczne sformułowanie wniosku mówiącego o bezpiecznej wartości i korzystnym przebiegu rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej. Nie można również dać jednoznacznej odpowiedzi, że wprowadzony stan naprężeń jest następstwem obróbki nagniataniem z przyjętymi parametrami, nie zbadano stanu naprężeń powierzchni po frezowaniu.

Podczas prowadzonych badań potwierdzono wprowadzenie korzystnych, ściskających naprężeń w warstwie wierzchniej. Dla różnych średnic kulek nagniatających odnotowano istotne różnice wartości naprężeń wywołane zmienną wartością nacisków przy tej samej wartości siły nagniatania F_N .

5. Wnioski

Analiza literatury oraz przeprowadzone badania upoważniają do sformułowania wniosków końcowych. Ujęte zostaną w trzech grupach, jako wnioski poznawcze, utylitarne oraz jako wnioski wskazujące dalsze kierunki pracy.

5.1. Wnioski poznawcze

1. Badania doświadczalne technologii obróbki składającej się z dwóch zabiegów kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania wskazują na możliwość osiągnięcia żadanego stanu SGP. Opracowane na podstawie zebranych wyników zależności statystyczno doświadczalne umożliwiają optymalizację i dobór parametrów technologicznych obu obróbek gwarantujących uzyskanie powierzchni odznaczającej się minimalnymi wysokościami nierówności. Pomiedzy realizowanymi zabiegami technologicznymi wystąpi tzw. efekt synergii. Możliwe jest również prognozowanie wartości wybranych parametrów SGP na podstawie przyjętych wartości technologicznych parametrów obróbki.
2. Znalazła swoje praktyczne potwierdzenie jedna z głównych tez pracy. Zależności statystyczno doświadczalne opracowane na podstawie wyników badań prowadzonych na płaszczyznach okazały się słuszne również w trakcie prowadzenia obróbki przedmiotów o złożonym kształcie 3D.
3. Przyjęte do badań gatunki stali różniły się składem chemicznym oraz właściwościami mechanicznymi. W obu przypadkach opracowane zależności statystyczno doświadczalne $Ra=f(f_{wf}, f_{wn}, F_N)$ wykazują istotnie różnice. Oznacza to brak możliwości stosowania jednego uniwersalnego modelu, w którym zmienne warunki obróbki wpływać będą jedynie na korektę wartości współczynników poprawkowych. W prowadzonych badaniach dla materiału C45 (20HRC) zaobserwowano silniejszy wpływ posuwu nagniatania f_{wn} na chropowatość powierzchni niż posuwu frezowania f_{wf} . Odwrotna sytuacja miała miejsce przy nagniataniu twardszego materiału 42CrMo4 (35 HRC), widoczny wyraźnie silniejszy wpływ posuwu frezowania f_{wf} niż posuwu nagniatania f_{wn} .
4. Najlepsze wyniki uzyskuje się prowadząc nagniatanie prostopadle do śladów frezowania. Jednak w przypadku programowania nagniatania powierzchni przestrzennych szczególnie o dużych wartościach kąta pochylenia powierzchni α należy dostosować trajektorię ruchu narzędzia nagniatającego pokrywającą się

z kierunkiem największego nachylenia powierzchni (wyeliminowanie niekorzystnego działania na SGP składowych stycznych siły osiowej F_o narzędzia do nagniatania). Chcąc uzyskać jednakową redukcję parametrów SGP we wszystkich fragmentach powierzchni przestrzennych złożonych należy optymalizować operację technologiczną już na etapie wyboru i programowania trajektorii freza.

5. Wyniki podjętych prób wykonania pomiarów naprężeń w warstwie wierzchniej są dalekie od oczekiwań. Nie udało się opracować rozkładów naprężeń w zależności od głębokości. Pozytywnym efektem uzyskanie wyników świadczących o braku naprężeń rozciągających. Dodatkową korzyścią jest zebranie praktycznego doświadczenia w posługiwaniu się dyfraktometrem rentgenowskim, oraz metodą pomiarową $g\text{-sin}^2\psi$.
6. Podczas prac nad konstrukcją narzędzi do nagniatania zastąpienie układu tłok – uszczelki – cylinder sprężystym miechem pozwoliło wyeliminować histerezę. Rozwiązanie nagniataka miechowego umożliwia stosowanie korekcji siły osiowej poprzez zmianę długości Z narzędzia utrzymując stałą wartość ciśnienia w komorze tłokowej.

5.2. Wnioski użytkowe

1. Podczas badania sprawdzono wpływ drugiego przejścia nagniatania oraz wpływ wybranych strategii. W większości przypadków wpływ drugiego przejścia jest istotny aczkolwiek redukcja wysokościowych parametrów SGP nie następuje tak silnie jak po pierwszym przejściu. Pomiędzy strategiami ortogonalną PR, podwójnie ortogonalną PP i krzyżową skośną SK składającymi się z dwóch przejść nagniatania brak jest istotnych różnic, zwłaszcza przy używaniu kulek nagniatających o dużej średnicy. Oznacza to możliwość uzyskania jednolitego stanu końcowego SGP pomimo zmiany strategii, pod warunkiem zachowania niezmiennych wartości technologicznych parametrów obróbki. Ze względu na często występujące skomplikowane kształty powierzchni 3D, takie zmiany strategii w różnych fragmentach powierzchni obrabianej mogą się okazać nieuniknione.
2. Wprowadzanie drugiego przejścia nagniatania jest celowe podczas obróbki powierzchni odznaczającej się wysokimi wartościami wysokościowych parametrów SGP. Taki stan powierzchni jest charakterystyczny po frezowaniu z dużymi wartościami posuwu wierszowania f_{wf} . Dysponując obrabiarką zapewniającą

wysokie prędkości posuwów (prędkości nagniatania v_b) i narzędziami o dużych średnicach kulki nagniatającej (duże wierszowanie przy nagniataniu f_{wn}), można optymalizować technologię pod kątem zapewnienia dużej wydajności (frezowanie kształtujące + dwa przejścia nagniatania wg przyjętej strategii).

3. Nagniatanie powierzchni przestrzennych złożonych po frezowaniu umożliwia uzyskanie gładkich powierzchni o średniej wartości parametru $R_a = 0.15$ [μm], dla obu przebadanych materiałów (C45 -20HRC, 42CrMo4 – 35HRC) bez względu na średnicę kulki nagniatającej ($d_k = 10$ i 20 [mm]). W szczególnych przypadkach odpowiednio dobierając warunki obróbki można osiągnąć powierzchnie na których średnia wartość parametru R_a wynosić będzie około 0.1 [μm].
4. Przy doborze średnicy kulki nagniatającej należy się kierować kryteriami dokładności, geometrii przedmiotu i wydajność. Przy czym wszystkie wymogi najłatwiej jest spełnić stosując możliwie duże średnice kulki nagniatającej. Użycie kulek o mniejszej średnicy powinno być podyktowane jedynie geometrią przedmiotu frezowanego. W takim wypadku średnica kulki nagniatającej powinna odpowiadać średnicy freza kulistego, bądź średnicy płytki w głowicy torusowej.
5. Podczas badań dokonano porównania właściwości kulek z ceramiki tlenkowej ZrO_2 , Al_2O_3 i azotkowej Si_3N_4 . Najlepszym spośród przebadanych ceramicznych materiałów do nagniatania okazał się tlenek cyrkonu (ZrO_2), najłagodniej wypadł azotek krzemu (Si_3N_4). Na tej podstawie sformułowano wniosek dotyczący zasady doboru materiału ceramicznego, w myśl którego w pierwszej kolejności należy kierować się wartością wytrzymałości na ściskanie i zginanie dopiero w dalszej kolejności liczy się twardość.
6. W chwili obecnej spośród stosowanych rozwiązań najlepszym typem narzędzi do nagniatania są hydrostatyczne nagniataki z miechowym tłokiem. W porównaniu do innych stosowanych konstrukcji odznaczają się całkowitym brakiem histerezy, dzięki swym właściwościom sprężystym podczas pracy na trójosiowych centrach obróbkowych umożliwiają stabilizację siły nagniatania F_N .
7. Zarejestrowane w trakcie badań profile umożliwiają wyznaczenie dowolnego parametru 2D SGP. Na podstawie zebranych danych możliwe jest przeprowadzenie analiz celem określenia zależności statystyczno doświadczalnych dowolnego z wybranych parametrów 2D.

5.3. Dalsze kierunki pracy

1. Korzystanie z profilometrów stykowych przy pomiarach topografii powierzchni przestrzennych złożonych, dla wyznaczenia parametrów stereometrycznych SGP jest czasochłonne i przy skomplikowanym zarysie trudne do zrealizowania. Do oceny topografii powierzchni 3D znacznie lepiej nadają się bezdotykowe urządzenia pomiarowe (mikroskopy interferencyjne lub konfokalne).
2. Najpowszechniej do opisu stanu SGP wykorzystuje się parametry określone w przekroju poprzecznym. Mierzenie wybranych parametrów chropowatości odbywa się za pomocą profilometrów stykowych z czujnikami indukcyjnymi, a sposób wykonania pomiaru dokładnie opisują normy. Taka forma oceny nie do końca dobrze nadaje się do określenia efektów obróbki powierzchni przestrzennych złożonych. Cechą charakterystyczną opisywanej technologii jest pozostawienie śladów po każdym z zabiegów. Możliwość stosowania dowolnych trajektorii narzędzia nagniatającego względem śladów po frezowaniu, zwiększa liczbę wariantów możliwych do uzyskania struktur SGP. Mnoży się również liczba sposobów wyboru przekroju, w którym będzie wykonywany pomiar. Co często wpływa na rejestrację bardzo różniących się wyników wybranych parametrów. Do opisu topografii powierzchni przestrzennych złożonych znacznie lepiej nadają się parametry stereometryczne. Za ich pomocą określony jest całościowy obraz wybranego fragmentu badanej powierzchni a nie tylko wybrany przekrój.
3. Statystyczna analiza zebranych wyników wykazała istotne różnice w sile oddziaływania poszczególnych parametrów technologicznych w zależności od materiału przedmiotu obrabianego. Zanotowane różnice świadczą o konieczności rozszerzenia prac doświadczalnych na inne powszechnie dostępne materiały konstrukcyjne. W wyniku prowadzonych prac powinien powstać zbiór informacji stanowiących wytyczne doboru technologicznych parametrów frezowania i nagniatania, tak jak ma to miejsce w przypadku normatywów dla obróbki skrawaniem.
4. Rozwiązaniem umożliwiającym najwyższy stopień koncentracji technologicznej a zarazem ograniczającym koszty związane z aparaturą do nagniatania jest zastąpienie zewnętrznego źródła zasilania hydraulicznego układem chłodząco – smarującym obrabiarki. Nowoczesne wieloosiowe obrabiarki do skrawania metali dysponują układem chłodzenia narzędzi przez wrzeciono, gdzie wartość ciśnienia często przekracza 80 [Bar]. Jest to wartość wystarczająca, do zasilania narzędzi

z mikrohydraulicznym układem sterowania. Oprócz znacznej redukcji kosztów do zalet narzędzia z mikrohydrauliką należy zaliczyć minimalizację czasu potrzebnego do przejścia z frezowania na nagniatanie. Brak dodatkowych przewodów hydraulicznych w przestrzeni roboczej maszyny pozwoli na korzystanie z magazynów narzędzi na obrabiarkach CNC. Prace nad konstrukcją prototypu mikrohydraulicznego nagniataka są już rozpoczęte w ITM ZUT.

5. Programowanie trajektorii nagniatania odbywa się z wykorzystaniem modułów frezarskich w powszechnie dostępnych systemach CAM. Wygenerowana ścieżka narzędzia odznaczać się musi dużą gęstością (małe wartości f_{wn}) oraz dokładnością odwzorowania zarysu. Oprogramowanie używane do programowania frezowania w takich sytuacjach wymaga dużej mocy obliczeniowych komputera. Często przygotowanie programu obróbkowego do nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych wymaga od kilku do kilkunastu godzin nieprzerwanej pracy komputera. Powinno się podjąć próby stworzenia dodatkowych algorytmów obliczeniowych i modułów przeznaczonych do nagniatania, które można by włączyć do oprogramowania CAM. W ten sposób łącząc z bazą danych typowych nagniataków umożliwiające zostanie dokładne i szybkie programowanie operacji nagniatania.
6. Aparatura oraz metody nieniszczących pomiarów wykorzystujących zjawisko dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego dają technikowi pomiarowemu szerokie pole manewru w doborze nastaw goniometru (wartości kątów, szerokości szczelin, czasu napromieniowania, długości fali wiązki rentgenowskiej, itp.) – istotnie wpływając na wynik pomiaru. Brak standaryzacji aparatury, nastaw i metod pomiaru powoduje wiele nieścisłości. W przyszłości sposób wyznaczania naprężeń w warstwie wierzchniej powinien ulec standaryzacji tak jak ma to miejsce np. w pomiarach chropowatości powierzchni gdzie standaryzacji podlegają ostrza odwzorowujące w przyrządach pomiarowych, warunki pomiarów i sposób określania parametrów SGP. Przygotowane przez interdyscyplinarny zespół specjalistów procedury zebrane w normy powinny pozwolić na upowszechnienie metod opartych na dyfrakcji rentgenowskiej jednocześnie ściśle określając warunki realizowanych pomiarów.

Spis Literatary

- [1] Axinte D.A., Cao Y.Y.: „Innovative design of hybrid tool for turning assisted with superficial cold forming”. *Journal of Materials Processing Technology* 2008r., nr 204, s.357-364.
- [2] Bouzid W., Tsoumarev O., Sai K.: „An investigation of surface roughness of burnished AISI 1024 steel”. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* 2004r., nr 24, s.120-125.
- [3] Bozdana A.T., Nabil N.Z., Hua L.: „Deep cold rolling with ultrasonic vibrations - a new mechanical surface enhancement technique”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005r., nr 45, s.713-718.
- [4] Burakowski T. „Areologia – powstanie i rozwój” Wydanie I, Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy Radom 2007. ISBN 978-83-7204-616-1
- [5] Butle D. Burnishing for fatigue strength. *Advanced Materials & Processes*, October 2005, ASM International. (Tłumaczenie: Nagniatanie - obróbka wykańczająca– poprawiająca właściwości zmęczeniowe implantów. Przegląd Mechaniczny LXV.Z.1/2006 S. 45-47.)
- [6] El-Axir M.H., Ibrahim A.A.: „Some surface characteristics due to center ball burnishing”. *Journal of Materials Processing Technology* 2005r., nr 167, s.47-53.
- [7] El-Axir M.H.: „An investigation into roller burnishing”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2000r., nr 40, s.1603-1717.
- [8] El-Axir M.H., Othman O.M., Abodiena A.M.: „Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process”. *Journal of Materials Processing Technology* 2008r., nr 196, s.120-128.
- [9] El-Khabeery M.M., El-Axir M.H.: „Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2001r., nr 41, s.1705-1719.
- [10] Fuller D.: „Teoria i praktyka smarowania”. Warszawa, PWT, 1960.
- [11] Grochala, D., Kwaczynski, W., Filipowicz, K.: „Attempts of burnishing free form spatial surfaces using CNC milling tools”. *DAAAM International Scientific Book*

- 2006, hard cover, ISBN 3-901509-47-X, ISSN 1726-9687, Editor: B. Katalinic, Publisher DAAAM International Vienna, Vienna 2006r., s.251-262.
- [12] Grzesik W., Wanat T.: „Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis”. *Journal of Materials Processing Technology* 2005r., nr 169, s.364-371.
- [13] Hamadach H., Laouar L., Zeghib N.E., Chaoui K.: „Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing”. *Journal of Materials Processing Technology* 2006r., nr 130, s.130-136.
- [14] Hassan A.M., Al-Dhifi S.Z.S.: „Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process”. *Journal of Materials Processing Technology* 1999r. nr 96, s.73-80.
- [15] Hassan A.M., Momani A.M.S.: „Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2000r., nr 40, s.1775-1786.
- [16] Hassan A.M., Al-Jalil H.F., Ebied A.A.: „Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components”. *Journal of Materials Processing Technology* 1998r., nr 83, s176-179.
- [17] Hassan A.M.: „The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals” *Journal of Materials Processing Technology* 1997r., nr 72, s.385-391.
- [18] Hua W., Man Y., Liu B.: „Contact force studies of a burnishing slider” *Tribology International* 2008., nr 41, s.60-66.
- [19] Jezierski J.: „Wpływ krzywizny narzędzia dogniatającego na efekt umocnienia powierzchniowego” – część I. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej Warszawa 1975.
- [20] Klocke F., Liermann J., : „Roller burnishing of hard turned surfaces”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 1998r., nr 38, s.419-423.
- [21] Klocke F.: [dostęp 20. V.2007] „Hard Turning – Hard Roller Burnishing” *Manufacturing Technology I. Laboratory for Machine Tools and Production Engineering WZL RWTH Aachen* Dostęp w Internecie: http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/99bb29b71821808dc1256f33004f81ce/fti_e8.pdf

- [22] Knobel P.P.: „Feinstfräsen Fräsen von Freiformflächen mit Schleifqualität”. Abhandlung zur Erlangung des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 2000.
- [23] Korzyński M.: „Relief ma king on Bering sleeve surface by eccentric burnishing” Journal of Materials Processing Technology 2009., nr 209, s.131-138.
- [24] Korzyński M.: „A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction” Journal of Materials Processing Technology 2009., nr 209, s.625-633.
- [25] Kułakowska A., Wojtalik M., Kukiełka L.: „Analiza numeryczna wpływu odchyłek zarysu nierówności trójkątnej po toczeniu na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego.” Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowej pod patronatem Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN i Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej pt.: „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie”. Gdańsk 2005 s.73-80. ISBN 83-88579-46-0
- [26] Kułakowska A., Kukiełka L.: „Analiza numeryczna wpływu odchyłek zarysu nierówności powierzchni po toczeniu na odchyłki zarysu nierówności po nagniataniu”. Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej pod patronatem Komisji Budowy Maszyn PAN - oddział w Poznaniu: „Projektowanie Procesów Technologicznych”. Poznań 2006 s.171-178. ISBN 978-83-903808-7-2
- [27] Lee S.S.G., Loh N.H.: „Computer-intergrated ball burnishing of plastic-iniection-mould cavity insert”. Journal of Materials Processing Technology 1996r., nr 57, s.189-194.
- [28] Lee Y.S., Ma Y., Jegadesh G.: „Rolling-ball method and contour machining approach to identifying critical regions for complex surface machining”. Computers in industry 2000r., nr 41, s.163-180.
- [29] Lin Y.C., Yan B.H, Huang F.Y.: „Surface Improvement Using a Combination of Electrical Discharge Machining with Ball Burnish Machining Based on the Taguchi Method”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2001r., nr 18, s.693-682.
- [30] Lipski J.: „Napędy i sterowania hydrauliczne”. Warszawa, WKŁ, 1998. ISBN 83-206-0156-8.

- [31] Lopez de Lascalle L.N., Lamikiz A., Munoa J., Sanchez J.A.: „Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005r., nr 45, s.1659-1668.
- [32] Lopez de Lascalle L.N., Lamikiz A., Sanchez J.A., Arana J.L.: „The effect of ballburnishing on heat-treated steel and inconel 718 milled surfaces”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007r., nr 32, s.958-968.
- [33] Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I.: „Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels” *Precision Engineering* 2005r., nr 29, s.253-256.
- [34] Luo H., Liu J., Wang L., Hong Q.: „Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools”. *Journal of Materials Processing Technology* 2006r., nr 180, s.9-16.
- [35] Luo H., Wang L., Zhang C.: „Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existance of the outstripping phenomenon”. *Journal of Materials Processing Technology* 2001r., nr 116, s.88-90.
- [36] Mackiewicz J.: „Podpory hydrostatyczne w napędach hydraulicznych. Zastosowanie dławików gwintowych do hydrostatycznego odciążania tłoczników pomp i silników hydraulicznych”. *Przegląd mechaniczny. SIMP. Zeszyt 21/1972* s.659-661.
- [37] Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Horvath M., Meszaros I., Paulmier D.: „Ultraprecision metal removal processing of mirror-surfaces”. *Journal of Materials Processing Technology* 2001r., nr 108, s269-277.
- [38] Musialik J.: „Zjawiska termomechaniczne determinujące właściwości warstwy wierzchniej stali nagniatanej elektromechanicznie”. *Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa* 2003. ISBN 83-7193-206-5
- [39] Nemat M., Lyons A.C.: „An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel and Aluminium”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2000r., nr 16, s.469-473.
- [40] Oczóś K.E., Liubimov V.: „Struktura Geometryczna Powierzchni” *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej Rzeszów* 2003 ISBN 83-7199-247-5

- [41] Olszak W., Cieloszyk J., Sobkowiak E.: „Głowica frezarska skrawająco-nagniatająca”. Technologia obróbki przez nagniatanie-IV Konferencja Naukowo-Techniczna, Bydgoszcz 1996. s.1-10
- [42] Olszak W.: „Nowe rozwiązanie głowicy do tocznego nagniatania płaszczyzn na frezarkach”. Materiały z VII konferencji naukowo-technicznej Bydgoszcz 2000. Zespół Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy Sekcja Obrabiarek i Narzędzi OW SIMP Bydgoszcz 2000, s.147-156.
- [43] Olszak W., Cieloszyk J.: „The face for burnishing surface on milling machines”. Annals of DAAAM for 2002 & Proceedings of the 13th International DAAAM Symposium. Published by DAAAM International, Viena, Austria 2002, s.391-392
- [44] Olszak W.: „Konstrukcja głowicy do tocznego nagniatania powierzchni przestrzennych na frezarkach SN”. Materiały konferencji na temat: „Obróbki kształtującej i powierzchniowej nagniataniem” Koszalin 2004. Politechnika Koszalińska – zeszyty naukowe wydziału mechanicznego nr 34, 2004, s.235 – 242.
- [45] Olszak W., Cieloszyk W., Grochała D., Kwaczyński W.: „Próby nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC”. Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowej pod patronatem Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN i Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej pt.: „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie”. Gdańsk 2005 s.113-122. ISBN 83-88579-46-0
- [46] Olszak W., Grochała D.: „Nagniatanie powierzchni 3D na frezarkach CNC”. Monografia pod redakcją W. Przybylskiego z X Konferencji Naukowej pt.: „Technologia Obróbki przez Nagniatanie” – Tom II. Gdańsk 2008 s.387-398. ISBN 978-83-88579-32-5
- [47] Olszak W., Mackiewicz J., Grochała D., Kwaczyński W.: „Frezowanie i nagniatanie złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC” – „Obróbka skrawaniem część pierwsza. Wysoka produktywność”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2007 s.351-360. ISBN 978-83-7493-343-8.
- [48] Olszak W., Grochała D., Mackiewicz J., Kwaczyński W.: „Nagniatanie jako zabieg wykończeniowy po frezowaniu złożonych powierzchni przestrzennych na

- frezarkach CNC” Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej pod patronatem Komisji Budowy Maszyn PAN - oddział w Poznaniu: „Projektowanie Procesów Technologicznych”. Poznań 2006 s.301-310. ISBN 978-83-903808-7-2.
- [49] Olszak W., Grochała D., Koza K.: „Narzędzie do nagniatania powierzchni”. Zgłoszenie patentowe P.392663 przyjęte przez Urząd Patentowy RP 2010-10-19.
- [50] Osiecki A.: „Hydrostatyczny napęd maszyn”. Warszawa, WNT, 1998
- [51] Patyk R., Kukielka L.: „Teoretyczne i doświadczalne podstawy procesu wygniatacia regularnych nierówności o zarysie trójkątnym”. Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowej pod patronatem Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN i Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej pt.: „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie”. Gdańsk 2005 s.305-314. ISBN 83-88579-46-0
- [52] Polanski Z.: „Planowanie doświadczeń w technice”. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984, ISBN 83-01-0407-8
- [53] Prevey P.S., Jayaraman N., J. Cammett.: [dostęp 20.V.2007] „Overview of low plasticity burnishing for mitigation of fatigue damage mechanisms”. Dostęp w Internecie: <http://www.lambdatechs.com/html/resources/260.pdf>
- [54] Przybylski W.: „Technologia obróbki nagniataniem” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1987. ISBN 83-204-0742-7
- [55] Przybylski W.: „Nagniatanie powierzchni płaskich głowicami wielokulowymi” Technologia obróbki przez nagniatanie-IV Konferencja Naukowo-Techniczna, Bydgoszcz 1988. s.86-92.
- [56] Przybylski W.: „Nagniatanie powierzchni cylindrycznych, płaskich i kształtowych na tokarkach”. Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowej pod patronatem Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN i Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej pt.: „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie”. Gdańsk 2005 s.123-131. ISBN 83-88579-46-0
- [57] Richardson R., Bhatti R.: „A review of research into the role of guide pads in BTA deep-hole machining”. Journal of Materials Processing Technology 2001r., nr 110, s.61-69.

- [58] Segawa T., Sasahara H., Tsutsumi M.: „Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2004r., nr 44, s.1215-1221.
- [59] Senczyk D.: „Podstawy tensometrii rentgenowskiej”. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005r. ISBN 83-7143234-7.
- [60] Shiou F.J., Chen C.H., Li W.T.: „Automated surface finishing of plastic injection mold steel with spherical grinding and ball burnishing processes”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2006r., nr 28, s.61-66.
- [61] Shiou F.J., Chen C.H.: „Determination of Optimal Ball-Burnishing Parameters for Plastic injection Moulding Steel”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2003r., nr 3, s.177-185.
- [62] Shiou F.J., Chen C.H.: „Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process”. *Journal of Materials Processing Technology* 2003r., nr 140, s.248-254.
- [63] Shiou F.J., Chen C.H.: „Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes”. *Journal of Materials Processing Technology* 2008r., nr 201, s.554-559.
- [64] Shiou F.J., Chuang C.H.: „ Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell”. *Precision Engineering* 2010r., nr 34, s.76-84.
- [65] Stryczek S.: „Napęd hydrostatyczny”, Tom I - Elementy, Tom II - Układy. Warszawa, WNT, 1997. ISBN 83-204-2189-6.
- [66] Tian Y., Shin Y.C.: „Laser-assisted burnishing of metals”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2006r., nr 47, s.14-22.
- [67] Tubielewicz K.: „Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych”. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa 2000. ISBN 83-7193-087-9
- [68] Wagner K., Putz A., Engel U.: „Improvement of tool life in cold forging by locally optimized surfaces”. *Journal of Materials Processing Technology* 2006r., nr 177, s.206-209

- [69] Wagner K., Voelkl R., Engel U.: „Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces”. *Journal of Materials Processing Technology* 2008r., nr 201, s.2-8
- [70] Wang K.H, Blunt L.A, Stout K.J.: „The 3-D Characterisation of the Surface Topography of the Ballizing Process”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 1998r., nr 38, s.437-444.
- [71] Yan B.H., Lin Y.C., Huang F.Y.: „Surface modification of Al.-Zn-Mg alloy by combined electrical discharge machining with ball burnish machining”. *Journal of Machine Tools & Manufacture* 2002r., nr 42, s.925-934.
- [72] Yan B.H., Lin Y.C., Wang C.C., Chow H.M.: „Feasibility study of rotary electrical discharge machining with Ball burnishing for $AL_2O_3/6061$ Al Composite”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2000r., nr 40, s.1403-1421.
- [73] Zhu W., Lee Y.S .: „Five-axis pencil-cut planning and virtual prototyping with 5-DOF haptic interface”. *Computer-Aided Design* 2004r., nr 36, s.1295-1307.
- [74] Katalog kompensatorów miechowych firmy WITZENMANN [dostęp 05.I.2009]: „Axial expansion joints”. Dostęp w Internecie:
http://www.witzenmann.de/witzenmann/eng/downloads/Haustechnik_kp_e_geschuetzt.pdf
- [75] Katalog pierścieni prowadzących firmy TRELLEBORG [dostęp 02.I.2009]: „Hydraulic seals – linear”. Dostęp w Internecie:
http://tss.trelleborg.com/com/www/media/downloads/catalogs/slydring_gb.pdf
- [76] Katalog uszczelnień cylindrów firmy TRELLEBORG [dostęp 02.I.2009]: „Hydraulic seals – linear”. Dostęp w Internecie:
http://www.tss.trelleborg.com/com/www/media/downloads/catalogs/rod_gb.pdf
- [77] Katalog uszczelnień tłoków firmy TRELLEBORG [dostęp 02.I.2009]: „Hydraulic seals – linear”. Dostęp w Internecie:
http://www.tss.trelleborg.com/com/www/media/downloads/catalogs/piston_gb.pdf
- [78] Karta charakterystyki preparatu firmy EMULGOL DS. 30 [dostęp 29.XII.2008] firmy OrlenOil. Dostęp w Internecie:
<http://www.orlenoil.pl/index.php?download,6f4922f45568161a8cdf4ad2299f6d23>

- [79] Materiały promocyjne firmy CERAMIT [dostęp 17.III.2011]: „Własności tworzyw ceramicznych w porównaniu ze stalą stopową”. Dostęp w Internecie: <http://ceramit.pl/images/wlasnosci.pdf>
- [80] Materiały promocyjne firmy ECOROLL [dostęp 08.IV.2007]: „Applications of Deep Rolling”. Dostęp w Internecie: http://www.ecoroll.de/4088_3e.pdf
- [81] Materiały promocyjne firmy ECOROLL [dostęp 28.III.2007]: „Deep rolling, versatile efficient against Fatigue”. Dostęp w Internecie: <http://www.ecoroll.de/6090e.pdf>
- [82] Patent Europa nr 0353376 A1. „Walzwerkzeug“. Ostertag Alfred. 1990.02.07.
- [83] Patent Niemcy nr 19534631 A1. „Verfahren und Vorrichtung zum Bearbeiten einer Werkstückoberfläche mit einem in einem hydrostatischen Lager gelagerten Walzkörper“. Ostertag Alfred. 1997.03.20.
- [84] Patent Polska nr PL54645 (Y1). „Ball – type burnishing tool”. Przybylski Włodzimierz, Zieliński Jerzy. 1996.
- [85] Patent Polska nr P341877. „Głowica do tocznego nagniatania płaszczyzn”. Olszak Wiesław. 2006.
- [86] Patent United States nr US5826453. „Burnishing method and apparatus for providing a layer of compressive residual stress in the surface of a workpiece”. Paul S. Prevey. 1998.10.27.
- [87] Patent United States nr US6622570 B1. „Method for reducing tensile stress zones in the surface of a part”. Paul S. Prevey. 2003.09.23.
- [88] Zgłoszenie patentowe P.392663.: „Narzędzie do nagniatania powierzchni”. Olszak W., Grochała D., Koza K., zgłoszenie przyjęte w Urzędzie Patentowym RP 2010-10-19.