



*Kazimierz Zaleski
Agnieszka Skoczylas
Stanisław Bławucki*

Obróbka gładkościowa i umacniająca

Ćwiczenia laboratoryjne



PODRĘCZNIKI

Obróbka gładkościowa i umacniająca

Ćwiczenia laboratoryjne

Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Kazimierz Zaleski
Agnieszka Skoczylas
Stanisław Bławucki

Obróbka gładkościowa i umacniająca

Ćwiczenia laboratoryjne



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Antoni Świć, Politechnika Lubelska

Redakcja i skład: Stanisław Bławucki

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-294-9

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	7
Przedmowa	10
1. GŁADKOŚCIOWE TOCZENIE NOŻAMI O OSTRZACH	
DIAMENTOWYCH	12
1.1. Diament monokrystaliczny (naturalny)	12
1.2. Diament polikrystaliczny (syntetyczny)	14
1.3. Powłoki diamentowe.....	16
1.4. Gładkościowe toczenie i wytaczanie.....	17
1.5. Dobór narzędzia do toczenia gładkościowego.....	19
1.6. Wykonanie ćwiczenia.....	21
2. DOCIERANIE MECHANICZNE WAŁKÓW	23
2.1. Istota procesu docierania.....	23
2.3. Dobór warunków docierania	25
2.4. Maszyny technologiczne do docierania wałków	29
2.5. Właściwości warstwy wierzchniej po docieraniu	33
2.6. Wykonanie ćwiczenia	33
3. DOGLĄDZANIE OSCYLACYJNE WAŁKÓW.....	35
3.1. Charakterystyka narzędzi ściernych.....	35
3.2. Kinematyka procesu doglądania oscylacyjnego.....	38
3.3. Parametry technologiczne doglądania oscylacyjnego wałków osłkami ściernymi.....	43
3.4. Wykonanie ćwiczenia.....	47
4. POLEROWANIE ELEKTROLITYCZNE POWIERZCHNI PŁASKICH.....	50
4.1. Opis procesu polerowania elektrolitycznego	50
4.2. Parametry technologiczne polerowania elektrolitycznego powierzchni płaskich.....	52
4.3. Stan powierzchni przed polerowaniem elektrolitycznym	57
4.4. Zastosowanie elektropolerowania	57
4.5. Wykonanie ćwiczenia.....	58
5. NAGNIATANIE TOCZNE WAŁKÓW	60
5.1. Charakterystyka metod nagniatania tocznego.....	60
5.2. Dobór warunków technologicznych nagniatania tocznego wałków	64
5.3. Wykonanie ćwiczenia.....	69
6. NAGNIATANIE TOCZNE POWIERZCHNI PŁASKICH	72
6.1. Istota procesu nagniatania tocznego powierzchni płaskich.....	73
6.2. Narzędzia do nagniatania powierzchni płaskich	76

6.3. Właściwości warstwy wierzchniej.....	79
6.4. Wykonanie ćwiczenia.....	80
7. NAGNIATANIE ŚLIZGOWE NARZĘDZIAMI DIAMENTOWYMI	82
7.1. Istota procesu nagniatania ślizgowego.....	82
7.2. Odształcenia warstwy wierzchniej w procesie nagniatania ślizgowego.....	84
7.3. Narzędzia do nagniatania ślizgowego	85
7.4. Stan i właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu ślizgowym.....	88
7.5. Zasady doboru warunków nagniatania ślizgowego.....	90
7.6. Przykłady zastosowania nagniatania ślizgowego w budowie maszyn	92
7.7. Wykonanie ćwiczenia.....	93
8. NAGNIATAJĄCE PRZEPYCHANIE ŚLIZGOWE OTWORÓW	97
8.1. Metody nagniatania otworów	97
8.2. Przetłaczanie ślizgowe otworów	100
8.3. Warunki technologiczne nagniatającego przepychania ślizgowego otworów za pomocą kulki.....	102
8.4. Wpływ warunków technologicznych nagniatającego przepychania ślizgowego na siłę przepychania.....	105
8.5. Wpływ warunków technologicznych nagniatającego przepychania ślizgowego na przyrost średnicy obrabianego otworu.....	106
8.6. Właściwości warstwy wierzchniej otworów po nagniatającym przepychaniu ślizgowym.....	107
8.7. Modelowanie nagniatającego przepychania ślizgowego	108
8.8. Wykonanie ćwiczenia.....	109
9. NAGNIATANIE ODŚRODKOWE POWIERZCHNI WALCOWYCH.....	112
9.1. Istota nagniatania odśrodkowego	112
9.2. Nagniatanie odśrodkowe wałków	113
9.3. Nagniatanie otworów.....	114
9.4. Parametry technologiczne nagniatania odśrodkowego.....	114
9.5. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu odśrodkowym	117
9.6. Wykonanie ćwiczenia	118
10. KULKOWANIE WIBRACYJNE.....	122
10.1. Kinematyka, odmiany oraz zastosowanie kulkowania wibracyjnego	122
10.2. Rodzaje wibratorów	128
10.3. Warunki technologiczne kulkowania wibracyjnego.....	132
10.4. Wpływ kulkowania wibracyjnego na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów.....	133
10.5. Wykonanie ćwiczenia	136

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A – anoda,

A_o – powierzchnie rzutu odcisku kulki,

A_p – rozpatrywana powierzchnia obrabianego przedmiotu,

$b \times h \times l$ – wymiary osełki,

CVD – Chemical Vapour Deposition,

d – średnica przedmiotu nagniatanego,

DM – diament monokrystaliczny,

DP – diament polikrystaliczny,

e – dosuw głowicy nagniatającej,

E – moduł Young’a,

f – posuw,

F – siła docisku,

f_k – posuw wzdłużny na jedną kulkę,

F_n – składowa normalna siły osiowej,

F_{prz} – siła przepychania (przeciągania),

HB – twardość materiału wyrażona w skali Brinela,

h_o – skok oscylacji,

HRC – twardość materiału wyrażona w skali Rockwella,

HV – twardość materiału wyrażona w skali Vickersa,

i – liczba przejść narzędzia,

I – natężenie prądu elektrycznego,

J – liczba uderzeń kulki przypadająca na rozpatrywaną powierzchnię,

k – współczynnik zależny od sprężystości materiału,

K – katoda,

k_{el} – równoważnik elektrochemiczny,

K_o – stopień pokrycia kulkowanej powierzchni,

K_{Ra} – współczynnik zmniejszenia chropowatości,

l – długość kontaktu narzędzia z przedmiotem,
 m – intensywność kulkowania,
 MES – metoda elementów skończonych,
 m_k – masa kulki,
 N – narzędzie,
 NCD – drobnoziarniste struktury diamentu syntetycznego,
 n_N – prędkość obrotowa narzędzia,
 n_{PO} – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego,
 NPS – nagniatające przepychanie ślizgowe,
 n_R – prędkość obrotowa rolki,
 PCD – gruboziarniste struktury diamentu syntetycznego.
 PD – diament polikrystaliczny,
 PO – przedmiot obrabiany,
 q – nacisk jednostkowy,
 R – promień tarczy głowicy nagniatającej,
 Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
 Re – granica plastyczności,
 r_k – promień zaokrąglenia elementu diamentowego, promień kulki nagniatającej,
 Rz – największa wysokość profilu chropowatości,
 S – impuls uderzenia,
 SGP – struktura geometryczna powierzchni,
 SSN – sztuczne sieci neuronowe,
 t – czas przepływu prądu elektrycznego,
 t_m – czas maszynowy,
 u – uogólniona liczba przejść,
 v – objętość kulki,
 v – prędkość obwodowa głowicy z kulkami nagniatającymi,
 v_{fo} – prędkość ruchu oscylacyjnego,
 v_{fw} – posuw wzdłużny przedmiotu,

v_n – prędkość kulki podczas nagniatania odśrodkowego,

v_w – prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego,

WL – warstwa lepka,

WW – warstwa wierzchnia,

z – liczba czynnych elementów nagniatających w narzędziu,

ε_h – względne zagłębienie elementu nagniatającego,

ρ – kąt opasania przedmiotu przez osełkę,

ω – częstość kołowa (zwana pulsacją) ruchu osełki ścierniej w czasie jednego pełnego okresu.

Przedmowa

Celem procesu wytwarzania elementów maszyn jest zapewnienie nie tylko wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej tych elementów, ale również odpowiedniego stanu ich warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia” określana jest jako zewnętrzna warstwa materiału przedmiotu, położona bezpośrednio pod jego powierzchnią, która obejmuje tę powierzchnię oraz położoną pod powierzchnią warstwę materiału charakteryzującą się właściwościami fizycznymi a niekiedy także chemicznymi różnymi od właściwości materiału rdzenia przedmiotu. Stan warstwy wierzchniej opisywany jest za pomocą właściwości tej warstwy, do których zalicza się chropowatość i falistość powierzchni, wady powierzchniowe, mikrostrukturę i mikrotwardość oraz naprężenia własne.

Ukształtowana w procesie wytwarzania przedmiotów warstwa wierzchnia ma duży wpływ na właściwości użytkowe tych przedmiotów, a głównie na wytrzymałość zmęczeniową, odporność na zużycie tribologiczne oraz odporność na korozję. Poprzez odpowiednie ukształtowanie warstwy wierzchniej można uzyskać znaczne zwiększenie trwałości elementów maszyn a także ich niezawodności.

Wytwarzanie elementów maszyn zwykle odbywa się w kilku fazach i obejmuje obróbkę wstępną, kształtującą i wykończeniową. Na stan warstwy wierzchniej wykonanego przedmiotu może mieć wpływ cały proces wytwarzania, niemniej decydujący wpływ ma obróbka wykończeniowa. W zależności od głównego celu obróbki wykończeniowej może ona mieć charakter gładkościowy lub umacniający.

Obróbką gładkościową nazywana jest obróbka, której głównym celem jest zapewnienie odpowiedniej, zwykle bardzo małej, chropowatości obrobionej powierzchni. Cel ten można osiągnąć sposobami obróbki wiórowej (np. bardzo dokładne toczenie bądź frezowanie), ścierniej (np. gładzenie, dogładzanie oscylacyjne, polerowanie), erozyjnej (np. elektropolerowanie), hybrydowej (np. szlifowanie elektrochemiczne) oraz nagniataniem (np. wygładzanie ślizgowe narzędziem diamentowym).

Głównym celem obróbki umacniającej jest zmiana właściwości materiału warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno. Efekt umocnienia uzyskiwany jest głównie w procesie obróbki nagniataniem, która polega na oddziaływaniu elementu nagniatającego na obrabiany przedmiot. Obróbka nagniataniem może mieć charakter statyczny, gdy element nagniatający oddziałuje na obrabiany przedmiot ze stałą (w przybliżeniu) siłą, lub dynamiczny, gdy siła ta jest zmienna, a kontakt elementu nagnia-

tającego z przedmiotem jest okresowo przerywany. W zależności od kształtu elementu nagniatającego obróbka ta nazywana jest również kulkowaniem lub krążkowaniem. Obróbka nagniataniem powoduje zwiększenie twardości warstwy wierzchniej przedmiotu oraz ukształtowanie w tej warstwie ściskających naprężeń własnych.

W niniejszym podręczniku scharakteryzowano wybrane sposoby obróbki gładkościowej i umacniającej. Przy wyborze kierowano się możliwością przeprowadzenia ćwiczeń laboratoryjnych związanych z tematyką poszczególnych rozdziałów w Laboratorium Katedry Podstaw Inżynierii Produkcji Politechniki Lubelskiej.

Podręcznik przeznaczony jest dla studentów kierunku *mechanika i budowa maszyn*, szczególnie dla specjalności *technologia maszyn*. Wykłady i ćwiczenia z obróbki gładkościowej i umacniającej prowadzone są na studiach drugiego stopnia tej specjalności. Z podręcznika mogą też korzystać studenci kierunków *inżynieria produkcji* oraz *zarządzanie i inżynieria produkcji*.

Poszczególne rozdziały podręcznika obejmują wiadomości ogólne związane z danym sposobem obróbki gładkościowej lub umacniającej oraz przebieg wykonania ćwiczenia wraz z zagadnieniami, które należy ująć w sprawozdaniu. Wiadomości ogólne mogą być przydatne również do zaliczenia wykładów z tego przedmiotu.

1. GŁADKOŚCIOWE TOCZENIE NOŻAMI O OSTRZACH DIAMENTOWYCH

Toczenie jest jedną z najbardziej popularnych metod kształtowania elementów maszyn w zakresie obróbki skrawaniem. Toczenie polega na oddzielaniu od obrabianego przedmiotu warstwy materiału przy użyciu noża tokarskiego, przy czym obrabiany przedmiot wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi zaś narzędzie wykonuje ruch posuwowy liniowy. Toczenie gładkościowe prowadzone jest jako obróbka wykończeniowa i pozwala uzyskać wysoką dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego oraz niską chropowatość obrobionej powierzchni. Toczenie gładkościowe wymaga więc stosowania ostrych narzędzi z materiałów o podwyższonej odporności na zużycie ściernie. Przykładem takiego materiału narzędziowego o unikalnych właściwościach fizycznych jest diament [4].

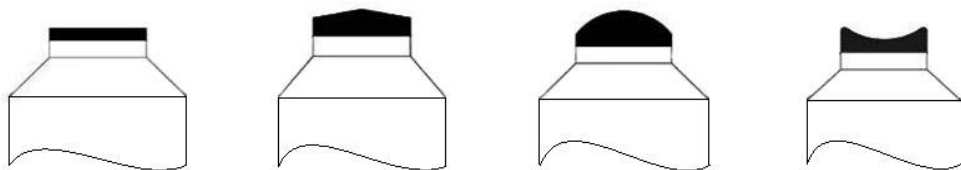
1.1. Diament monokrystaliczny (naturalny)

Do produkcji ostrzy narzędzi skrawających wykorzystywany jest diament monokrystaliczny (DM) o niskich walorach jubilerskich, czyli taki, który posiada skazy i niedoskonałości w postaci przebarwień. Diament, będący najtwardszym znanym materiałem (nawet 10000 HV), dzięki dużej twardości i odporności na ścieranie, jest wykorzystywany jako ostrze w nożach tokarskich. Zaletami diamentu jest mała rozszerzalność cieplna (dziesięciokrotnie mniejsza od węgla spiekanego) i bardzo dobra przewodność cieplna, co wpływa korzystnie na odprowadzanie ciepła z obszaru skrawania. Ostrza skrawające z DM charakteryzują się dużą gładkością powierzchni i krawędzi, a ponadto są odporne na zjawisko powstawania szczepień adhezyjnych w czasie toczenia metali nieżelaznych i eliminuje zjawisko narostu na ostrzu narzędzia [1].

Monokrystaliczny diament wykazuje anizotropowe właściwości mechaniczne, uzależnione od orientacji sieci krystalograficznej. Anizotropowość wpływa na sposób kształtowania monokryształu, co jest możliwe tylko w określonych płaszczyznach łupliwości, gdzie występuje mała energia powierzchniowa. W związku z tym szlifowanie ostrza monokryształu powinno odbywać się w płaszczyźnie najmniejszej twardości. Gotowe ostrze diamentowe powinno być usytuowane w oprawce narzędzia w taki sposób, aby składowe siły skrawania były skierowane w płaszczyźnie maksymalnej twardości monokryształu [5].

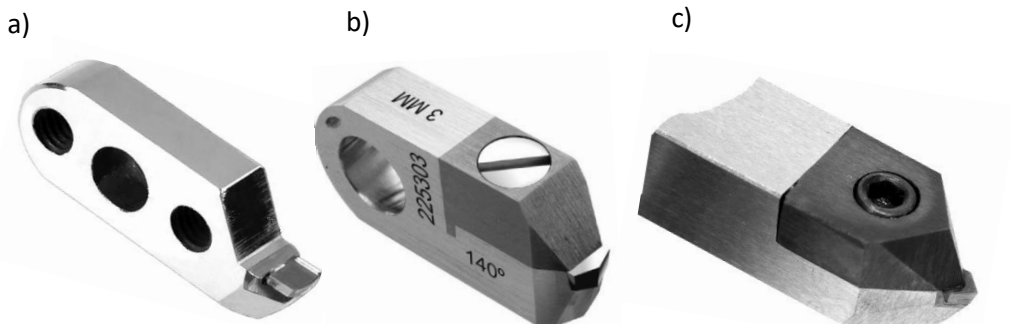
Powszechne zastosowanie ostrzy skrawających z diamentu naturalnego jest ograniczone przede wszystkim ze względu na kilka niekorzystnych cech tego materiału. DM jest mało odporny na utlenianie w podwyższonej temperaturze. Zalecana temperatura pracy narzędzia z tego materiału nie powinna przekraczać około 800°C. W wyższej temperaturze diament ulega przemianie w grafit, co prowadzi do szybkiego stępienia ostrza noża tokarskiego. Ze względu na silne powinowactwo chemiczne diamentu naturalnego do niklu, żelaza i kobaltu, materiał ten nie może być stosowany do obróbki stali. W praktyce oznacza to nasilone zużycie dyfuzyjne ostrza narzędzia w wyniku rozpuszczania się atomów węgla. Niewielka wytrzymałość na zginanie rzędu 300 MPa, a także kruchość DM uniemożliwiają stosowanie tego materiału do obróbki zgrubnej. Noże tokarskie z ostrzami diamentowymi znajdują zastosowanie przeważnie podczas obróbki wykończeniowej powierzchni o chropowatości R_a około 0,2 μm [6].

Noże tokarskie o ostrzach diamentowych (rys. 1.1) doskonale sprawdzają się podczas obróbki metali kolorowych, w tym złota i srebra, węglików spiekanych, kompozytów metalowo-polimerowych, kompozytów z włókna węglowego i szklanego tworzyw sztucznych, ceramiki i szkła optycznego.



Rys. 1.1. Kształty części roboczej noży tokarskich stosowanych w jubilerstwie

Ostrza z DM są mocowane w oprawkach narzędzia w sposób mechaniczny lub metodą lutowania twardego. Przykłady narzędzi z monokrystalicznym ostrzem diamentowym przedstawiono na rysunku 1.2. Wymiary stosowanych monokryształów diamentu są niewielkie zaś krawędzie skrawające zazwyczaj są długości 1÷5 mm. Krótkie krawędzie skrawające ograniczają głębokość skrawania do maksymalnie około 1,5 mm [2].



Rys.1.2. Sposoby mocowania diamentowego ostrza monokrystalicznego w oprawkach narzędziowych: a) lutowanie twarde, b) mocowanie mechaniczne w oprawce jubilerskiej, c) mocowanie mechaniczne w oprawce tokarskiej z chwytem imakowym [8]

1.2. Diament polikrystaliczny (syntetyczny)

Diament syntetyczny wytwarzany jest metodą wysokociśnieniowego sprasowywania grafitu w wysokiej temperaturze rzędu nawet 2500°C . Uzyskuje się w ten sposób monokryształy diamentu o rozmiarach od 1 do $60\text{ }\mu\text{m}$, choć obecne techniki umożliwiają syntetyzowanie kryształów o wymiarach nawet $10\times 10\text{ mm}$.

W dalszym etapie produkcji wytworzone uprzednio monokryształy są poddawane procesowi spiekania w warunkach zbliżonych jak podczas ich wytwarzania z grafitu. Jeśli do procesu dodawana jest kobaltowa faza wiążąca, wówczas otrzymuje się diament polikrystaliczny (DP), bez fazy wiążącej produkowane są diamenty o nazwie PD (lub PCD). Kobalt występujący w fazie wiążącej charakteryzuje się dobrą zwilżalnością, umożliwia przewodność elektryczną całego spieku i poprawia jego właściwości wytrzymałościowe [1].

Diament polikrystaliczny w postaci warstwy o grubości $0,3\div 1,5\text{ mm}$ jest łączony bezpośrednio z podłożem płytkowym z węgliką spiekanego o grubości do 16 mm . Tak powstały kompozyt jest dostępny w kształcie krążków o średnicy od kilku do około 100 mm . Z krążka wycinane są płytki skrawające montowane następnie trwale w oprawkach noży tokarskich poprzez lutowanie lub rozłącznie poprzez mocowanie mechaniczne [2].

Węglik spiekany stosowany jako podłoże dla warstwy diamentowej jest bardziej wytrzymały na zginanie niż spiek diamentowy, co przekłada się korzystnie na całkowitą wytrzymałość ostrza skrawającego (rys. 1.3). Ponadto węglik spiekany wykazuje niewielką rozszerzalność cieplną, co rzutuje na mniejsze naprężenia w stalowej oprawce w przypadku ostrzy lutowanych oraz lepszą ich adhezję.



Rys. 1.3. Typowe kształty płytek tokarskich z ostrzem z diamentu polikrystalicznego [9]

Ostrza skrawające z DP oraz PD dzięki możliwości formowania dowolnych kształtów i wymiarów nadają się również do skrawania zgrubnego i kształtującego. Ostateczną gładkość powierzchni ostrza osiąga się poprzez polerowanie mające na celu poprawę warunków spływu wiórów, a także uzyskanie lepszej jakości powierzchni obrabianych elementów [5].

W przeciwieństwie do DM spieki DP i PD charakteryzują się właściwościami anizotropowymi, gdyż monokryształy diamentu syntetycznego w spieku zorientowane są przypadkowo. Oznacza to, że nie występują płaszczyzny o maksymalnej twardości i odporności na ścieranie, toteż skrawalność tego tworzywa we wszystkich kierunkach jest podobna.

Ostrza skrawające z diamentu polikrystalicznego znajdują szczególnie duże zastosowanie przy toczeniu stopów aluminium o dużej zawartości krzemu. Obróbka tego typu materiału przypomina skrawanie przerywane o dużej amplitudzie składowych siły skrawania. Do skrawania stopów aluminium wykorzystywane są węgliki spiekane, jednak wadą ich stosowania jest szepianie się z aluminium, co znacznie pogarsza jakość obrobionej powierzchni. Zastosowanie przy toczeniu stopów aluminium narzędzi z DP lub PD zapewnia wielokrotny wzrost trwałości ostrza oraz skrócenie czasu obróbki w odniesieniu do węglików spiekanych. Uzyskuje się powierzchnie o chropowatości R_a rzędu $0,4 \div 1,7 \mu m$ przy mniejszej skłonności szepiania z materiałem obrabianym [6].

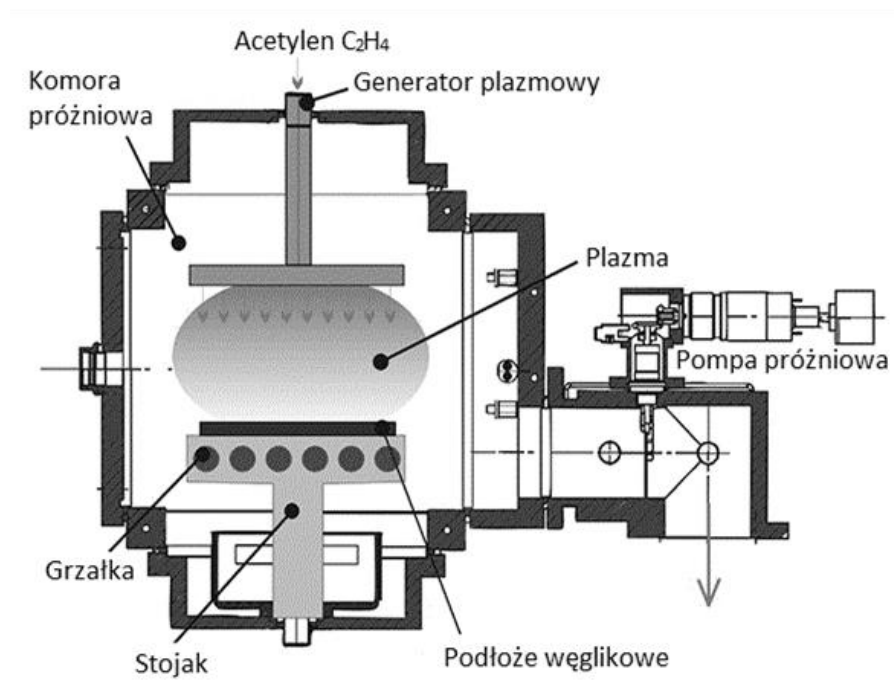
Narzędzia skrawające o ostrzach z DP są powszechnie wykorzystywane podczas skrawania kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami stalowymi, aluminium, magnezowymi oraz tytanowymi. Trwałość narzędzi z poli-

krystalicznego diamentu jest nawet dwudziestokrotnie większa od trwałości węglików spiekanych stosowanych do obróbki ubytkowej kompozytów polimero-metalowych [1].

1.3. Powłoki diamentowe

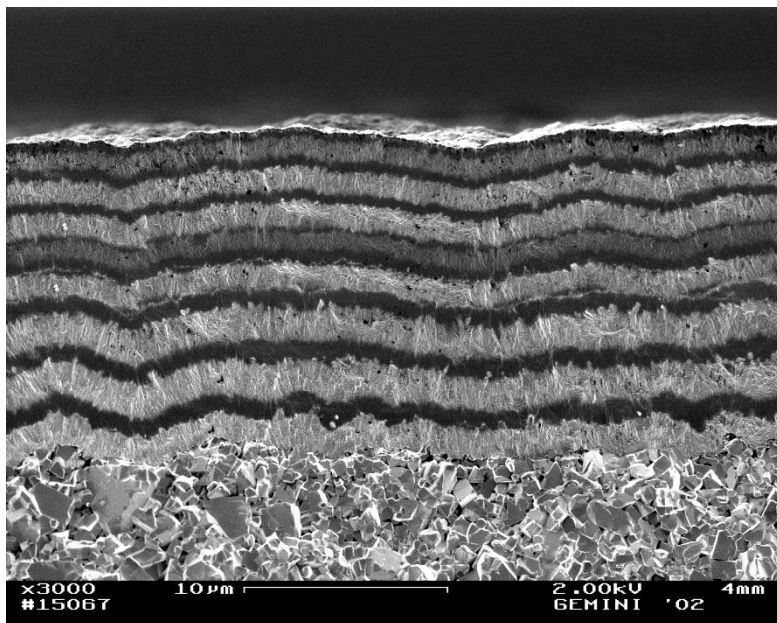
Powłoki diamentowe nakładane są na węglkowych ostrzach metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD) przez aktywację elektryczną gazowych reagentów za pomocą wyładowania jarzeniowego w próżni (rys. 1.4). Stosowanym gazem reakcyjnym jest metan C_2H_4 który w wyładowaniu jarzeniowym dysocjuje na węgiel (diament) i wodór. Grubość powłoki nie przekracza zazwyczaj $30\text{ }\mu\text{m}$, natomiast prędkość nakładania powłok zmienia się w zakresie od $0,01$ do $1\text{ }\mu\text{m}$ na godzinę [1].

Powłoki z PD mogą mieć strukturę drobnoziarnistą NCD bądź gruboziarnistą PCD. Temperatura podłoża, na której wytwarzana jest powłoka, zawiera się w zakresie $250\div 1250^\circ\text{C}$. Twardość otrzymanej powłoki osiąga od 80 do 100% twardości diamentu [4].



Rys. 1.4. Schemat stanowiska do nanoszenia powłok diamentowych [10]

Warstwy diamentu na podłożach węglkowych uzyskane metodą osadzania chemicznego charakteryzują się zwiększoną chropowatością powierzchni względem ostrzy wykonanych z diamentu polikrystalicznego (rys. 1.5). Poważnym ograniczeniem przy nakładaniu powłok jest wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej wraz ze wzrostem grubości osadzonej warstwy diamentu. Zjawisko to można ograniczyć poprzez nakładanie powłok o nanometrowej wielkości ziarna. W ten sposób uzyskuje się mniejszy promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza narzędzia przy jednoczesnym wzroście jego trwałości. Noże tokarskie, których części robocze pokryto warstwami diamentu mogą być stosowane do obróbki tych samych materiałów, które można skrawać ostrzami z diamentu monokrystalicznego i polikrystalicznego [1].



Rys. 1.5. Widok przełomu wielowarstwowej powłoki diamentowej firmy CemeCon [11]

1.4. Gładkościowe toczenie i wytaczanie

Toczenie gładkościowe, zwane również toczeniem dokładnym lub toczeniem diamentowym, ma zastosowanie w sytuacjach, gdy stawiane są wysokie wymagania wobec dokładności wykonania i gładkości obrobionej powierzchni. Podczas toczenia gładkościowego występuje duża prędkość skrawania do ponad 1000 m/min oraz mały posuw narzędzia w granicach od 0,02 do 0,12 mm/obrót.

Zastosowane narzędzia diamentowe dają możliwość skrawania przy małej głębokości rzędu $0,05 \pm 0,3$ mm. Chropowatość powierzchni uzyskana po toczeniu dokładnym jest zazwyczaj mniejsza od chropowatości po szlifowaniu, rozwiercaniu i przeciąganiu [4].

Można wyróżnić dwa zasadnicze czynniki sprzyjające zastosowaniu toczenia gładkościowego jako obróbki wykończeniowej. Przede wszystkim występują nieduże składowe siły skrawania ze względu na małe pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej. Dzięki temu możliwe jest toczenie elementów cienkościennych bez ryzyka uszkodzenia powierzchni poprzez obrócenie w uchwycie. Nieduża siła skrawania pozwala uniknąć szkodliwych drgań układu obróbkowego i umożliwia obróbkę smukłych wałów. Podczas toczenia diamentowego praktycznie nie dochodzi do nagrzewania się przedmiotu obrabianego, co pozwala znacznie ograniczyć odkształcenie przedmiotu na skutek rozszerzalności cieplnej.

Toczenie i wytaczanie gładkościowe stosowane jest przy produkcji masowej części lotniczych i motoryzacyjnych, np. cylindrów, tłoków, korbowodów. W ramach przemysłu precyzyjnego wytwarzane są elementy cienkościenne do aparatury pomiarowej, optycznej i elektroniki.

Nożom tokarskim przeznaczonym do dokładnego toczenia oraz wytaczania stawiane są wysokie wymagania co do kształtu i geometrii ostrza skrawającego. Naroże ostrza powinno być zaokrąglone stycznie do krawędzi skrawających. Z kolei krawędzie skrawające nie mogą posiadać wykruszeń i skaz. W przypadku wystąpienia wykruszeń krawędzi, cząsteczki materiału skrawanego wypełniają miejsca ubytku w narzędziu i sprzyjają powstawaniu narostu. Ponadto narost wywołuje zmienne naprężenia w materiale ostrza, co prowadzi do propagacji wykruszeń krawędzi i uszkodzenia ostrza. Aby uniknąć uszkodzenia ostrza noża, po procesie ostrzenia stosuje się dogładzanie. Dogładzanie diamentowego ostrza noża tokarskiego z jednej strony poprawia trwałość narzędzia, z drugiej strony zapewnia lepszą jakość powierzchni przedmiotów obrabianych [4]. Zalecane parametry geometryczne ostrza noży z płytkami diamentowymi zaprezentowano w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Zalecane wartości kątów ostrzy diamentowych w nożach tokarskich [4]

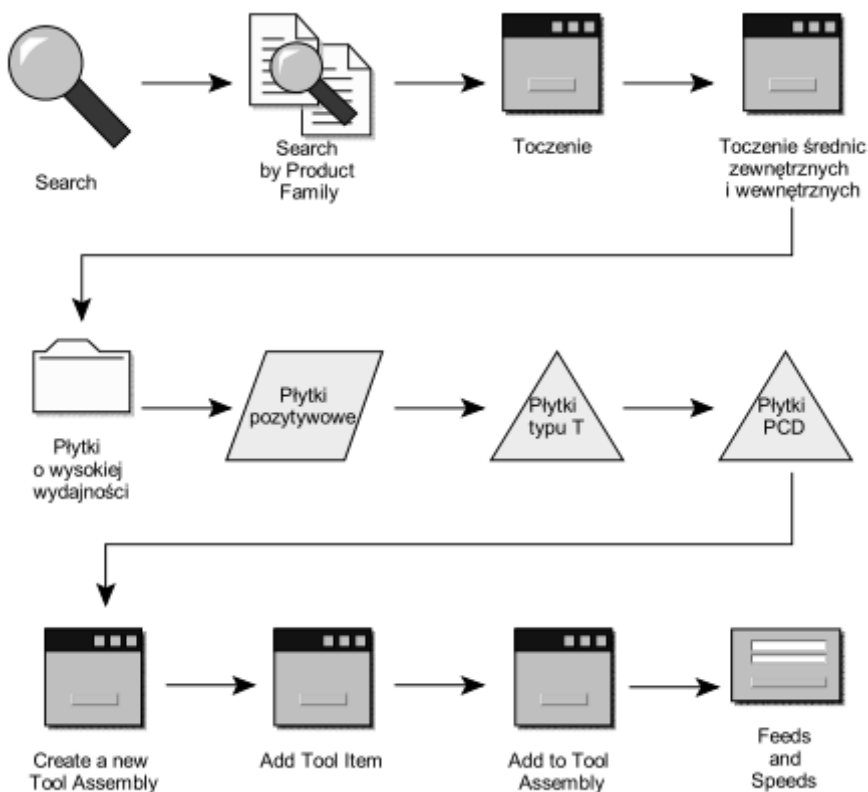
Materiał obrabiany	Kąt natarcia γ	Kąt przyłożenia α	Kąt przystawienia κ_r	Pomocniczy kąt przystawienia κ_r'	Promień naroża r_n , [mm]
Mosiądz, miedź, stopy aluminium, tworzywa sztuczne	$0^\circ \div -8^\circ$	$8^\circ \div 12^\circ$	$30^\circ \div 90^\circ$	$0^\circ \div 10^\circ$	$0,2 \div 0,8$
Brąz, stopy twarde aluminium, tytan	$-3^\circ \div -8^\circ$	$6^\circ \div 8^\circ$			

1.5. Dobór narzędzia do toczenia gładkościowego

Współczesne podejście do zagadnienia doboru parametrów technologicznych toczenia opiera się na wiedzy i doświadczeniu producentów narzędzi skrawających. Do niedawna podstawowym źródłem wiedzy, odnośnie doboru parametrów, były katalogi narzędziowe producentów. Obecnie wprowadzono szereg pomocnych programów komputerowych, mających na celu skrócenie czasu przygotowania produkcji. Przykładem programu komputerowego, wspomagającego inżyniera na etapie doboru narzędzia do obróbki gładkościowej poprzez toczenie jest aplikacja „NOVO” [7].

Po uruchomieniu aplikacji (rys. 1.6) należy przejść do zakładki „Search” i wybrać opcję „Search by Product Family”. W oknie ukażą się metody obróbki, spośród których należy wskazać toczenie, a następnie „Toczenie średnic zewnętrznych i wewnętrznych”. Użytkownik programu ma możliwość wyboru strategii doboru narzędzia zaczynając od oprawki, lub też typując najpierw płytkę skrawającą. W przypadku toczenia gładkościowego ostrzami diamentowymi właściwym podejściem jest najpierw wybór odpowiedniej płytki skrawającej poprzez uruchomienie zakładki „Płytki o wysokiej wydajności”. Producent oferuje trzy grupy materiałów ostrzy skrawających, pośród których są płytki skrawające do obróbki materiałów o dużej twardości. Do tej grupy materiałów zaliczono zarówno diament polikrystaliczny oznaczony jako PCD, jak i regularny azotek boru (CBN).

W rozdziale dotyczącym diamentu polikrystalicznego wspomniano, że materiał ten służy przede wszystkim do obróbki metali i stopów metali nieżelaznych. Wynika z tego konieczność stosowania dodatnich kątów ostrza płytki w celu eliminacji zjawiska narostu. Zatem przy wyborze narzędzia do toczenia gładkościowego należałoby wskazać płytki dodatnie („pozytywowe”). Spośród wszystkich dostępnych kształtów płytek skrawających do omówienia zagadnienia wybrano płytki trójkątne typu T. Płytki skrawające z DP zwykle posiadają tylko jedną roboczą krawędź skrawającą, toteż wybór ogranicza się do jednego z czterech dostępnych gatunków.



Rys. 1.6. Strategia doboru narzędzia do toczenia gładkościowego z wykorzystaniem oprogramowania „NOVO”

W dalszym etapie należy wybrać rozmiar płytki skrawającej z DP w zależności od dostępnej oprawki bądź w zależności od dysponowanej obrabiarki.

Wybór płytki należy zawsze zatwierdzić poleceniem „Create a new Tool Assembly”. Kolejnym krokiem jest wybór rodzaju oprawki tokarskiej poleceniem „Add Tool Item”. Aby dokonać właściwego wyboru oprawki należy zorientować się, jaki jest typ i wymiary kieszeni imaka narzędziowego w tokarce. Dodanie oprawki tokarskiej odbywa się przez polecenie „Add to Tool Assembly”. Po przejściu do głównego panelu złożenia, z prawej strony okna ukazuje się model 3D oprawki wraz z wybraną uprzednio płytką skrawającą.

Ostatnim krokiem przy doborze narzędzia do toczenia gładkościowego jest wybór materiału obrabianego w zakładce „Feeds and Speeds” oraz określenie średnicy obrabianego wałka. Program automatycznie zaproponuje wstępne parametry technologiczne toczenia oraz obliczy prędkość skrawania, objętościową wydajność obróbki, pobór mocy przez obrabiarkę a także przewidywaną chropowatość powierzchni Ra po obróbce.

1.6. Wykonanie ćwiczenia

1.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z nożami tokarskimi, których części robocze wykonano z diamentu monokrystalicznego, diamentu polikrystalicznego oraz powłok diamentowych. Część praktyczna obejmuje między innymi wykonanie prób skrawania zewnętrznych powierzchni walcowych stopu aluminium oraz stopu miedzi dwoma nożami z płytkami diamentowymi a także znalezienie optymalnych parametrów skrawania w celu uzyskania najmniejszej chropowatości powierzchni przy maksymalnie dużej wydajności procesu skrawania.

1.6.2. Przebieg ćwiczenia

1. Wykonanie pomiarów promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej trzech noży tokarskich z częścią roboczą wykonaną z diamentu monokrystalicznego, diamentu polikrystalicznego oraz powłok diamentowych. Należy wykorzystać w tym celu mikroskop cyfrowy.
2. Pomiar chropowatości powierzchni wałków przed toczeniem.
3. Dobór wstępnych parametrów toczenia wałków ze stopu aluminium oraz ze stopu miedzi narzędziem z płytką skrawającą wykonaną z DP korzystając z programu komputerowego, wspomagającego dobór parametrów skrawania.
4. Przeprowadzenie prób toczenia dwóch wałków ze stopu aluminium oraz ze stopu miedzi narzędziami diamentowymi przy zmiennych parametrach technologicznych toczenia.

5. Pomiar czasu obróbki oraz chropowatości powierzchni dla poszczególnych prób toczenia gładkościowego nożami diamentowymi.
6. Wskazanie optymalnych warunków toczenia spośród wytypowanych i sporządzenie dla każdego z narzędzi wykresu wpływu posuwu na chropowatość powierzchni Ra i Rz.
7. Obserwacje krawędzi skrawających noży użytych w próbach toczenia w celu stwierdzenia występowania zjawiska narostu i oceny stanu zużycia ostrza po obróbce.

1.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki toczeniem gładkościowym,
- b) szkice noży tokarskich z ostrzami diamentowymi,
- c) schemat postępowania przy doborze parametrów technologicznych toczenia gładkościowego,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wniosek.

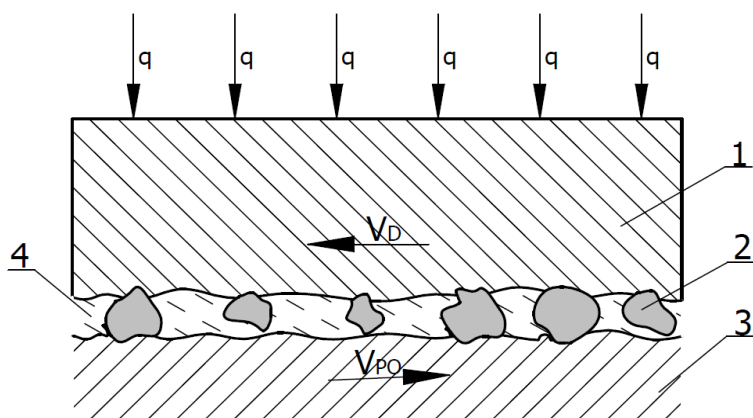
Literatura

1. Cichosz P.: *Narzędzia skrawające*. WNT Warszawa 2013.
2. Dul-Korzyńska B.: *Obróbka skrawaniem i narzędzia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej Rzeszów 2009.
3. Górski E.: *Obróbka gładkościowa*. WNT Warszawa 1970.
4. Kupczyk M. J.: *Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwwuzyściowymi*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań 2009.
5. Przybylski L.: *Strategia doboru warunków skrawania współczesnymi narzędziami*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej Kraków 1999.
6. Wysiński M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*. WNT Warszawa 1997.
7. Program komputerowy „NOVO” firmy KENNAMETAL.
8. <https://dir.indiamart.com/impcat/diamond-tools.html>, dostęp 19.11.2017 r.
9. <http://www.kaizendiamondtools.com/pcbn-tool.html>, dostęp 19.11.2017 r.
10. <http://www.made-in-zelenograd.com/products/vacuum-plasma-equipment>, dostęp 19.11.2017 r.
11. <https://www.pressebox.com/pressrelease/cemecon-ag/CemeCon-AGs-coating-solutions-for-the-aviation-industry/boxid/600532>, dostęp 19.11.2017 r.

2. DOCIERANIE MECHANICZNE WAŁKÓW

2.1. Istota procesu docierania

Docieranie jest odmianą obróbki ścierniej realizowaną przy użyciu luźnych ziaren ściernych, które znajdują się w ośrodku ciekłym (zawiesina) lub półstałym (pasta). Podczas docierania zbierany jest materiał z przedmiotu obrabianego przez ziarna ściernie, które są prowadzone przez narzędzie zwane docierakiem, którego kształt jest odwzorowany na przedmiocie obrabianym [5, 8].



Rys. 2.1. Schemat procesu docierania: 1 – docierak, 2 – ziarna ściernie, 3 – przedmiot obrabiany, 4 – nośnik (pasta lub ciecz) (q – nacisk jednostkowy, V_D – prędkość docieraka, V_{PO} – prędkość przedmiotu obrabianego)

Istota procesu docierania została przedstawiona na rysunku 2.1. Pomiędzy narzędziem (1) a przedmiotem obrabianym (3) znajduje się zawiesina lub pasta ścierna (4). Naciski powierzchniowe pomiędzy docierakiem a przedmiotem obrabianym powodują, że ziarna ściernie (2), które się pomiędzy nimi znajdują, zagłębiają się w obie powierzchnie, głębiej w docierak, płytko w powierzchnię obrabianą. Ziarna nie osadzają się na stałe w docieraku, a jedynie przemieszczają się względem powierzchni obrabianej dzięki ruchom wykonywanym przez narzędzie i/lub przedmiot obrabiany. Wzajemne ruchy narzędzia i przedmiotu obrabianego są kombinacją ruchu obrotowego i prostoliniowo-zwrotnego i są dobierane tak, aby tory poszczególnych ziaren ściernych nie tworzyły skupisk i nie pokrywały się [1, 8, 9]. Mechanizmami dominującymi podczas docierania jest zgniot i odrywanie drobnych nieregularnych cząstek materiału [8].

Docieraniem można obrabiać przedmioty różnych rodzajów, kształtów i wielkości, w praktyce produkcyjnej przeważa obróbka otworów, powierzchni płaskich i płasko-równoległych, np. elementy układów hydrauliki i pneumatyki, silników samochodowych i lotniczych, narzędzi i przyrządów pomiarowych mechanicznych i optycznych [4, 8].

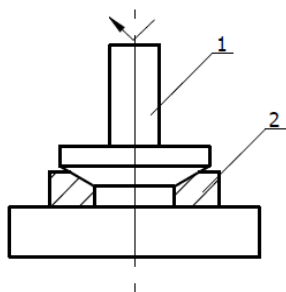
Elementy docierane mogą być wykonywane z różnych materiałów. Jest to sposób obróbki dedykowany do praktycznie wszystkich metali technicznych (żelazne i nieżelazne), szkła, ceramiki, granitu, bazaltu, kamieni półszlachetnych, materiałów półprzewodnikowych (krzem, german). Trudności występują podczas docierania materiałów niejednorodnych np. kompozytów [8, 10].

2.2. Odmiany docierania

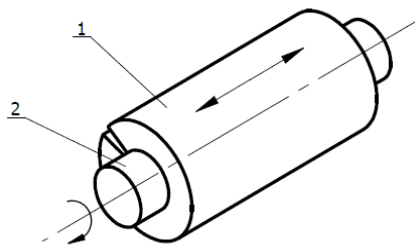
Docieranie ze względu na stopień zmechanizowania można podzielić na:

- ręczne – wszystkie ruchy są wykonywane ręcznie (rys. 2.2a),
- maszynowo-ręczne – gdy ruch główny wykonywany jest maszynowo, a ręcznie jest prowadzone narzędzie lub przedmiot obrabiany (rys. 2.2b),
- maszynowe – gdy wszystkie ruchy są wykonywane maszynowo [3].

a)

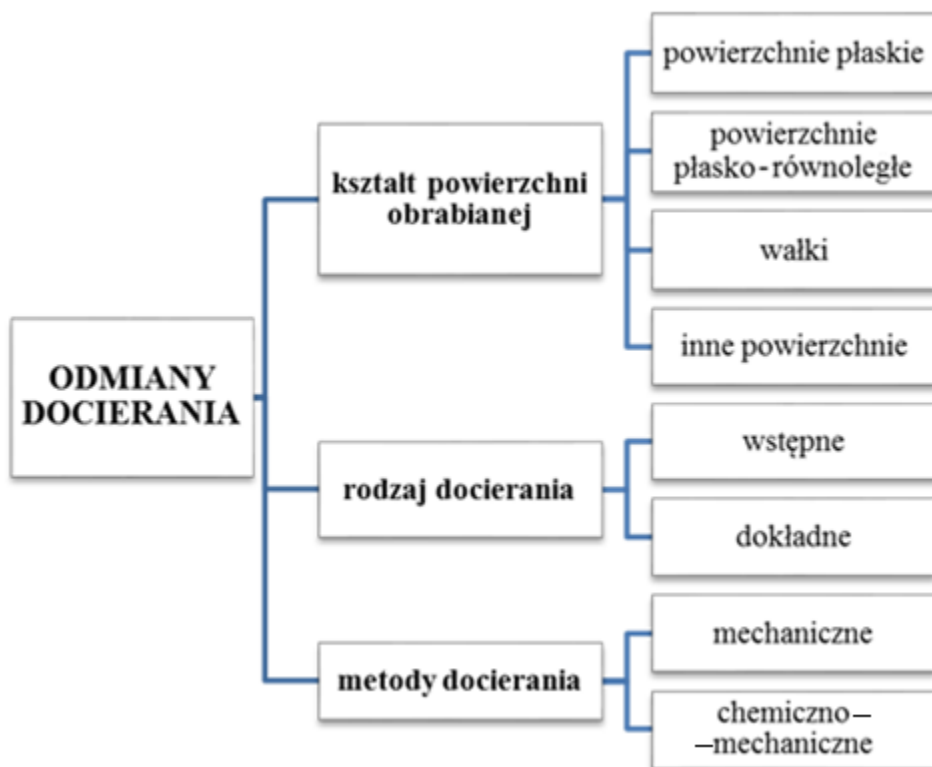


b)



Rys. 2.2. Przykłady docierania ręcznego oraz maszynowo-ręcznego: a) stożka, b) wałka
(1 – docierak, 2 – przedmiot obrabiany)

Na rysunku 2.3 przedstawiono podział docierania w oparciu o kształt powierzchni docieranej, rodzaj docierania oraz metody docierania.



Rys. 2.3. Odmiany docierania powierzchni

Docieranie chemiczno-mechaniczne wykonywane jest w obecności cieczy chemicznie aktywnej.

Poza poszczególnymi odmianami docierania elementów maszyn, często spotykaną odmianą jest docieranie montażowe. Polega ono na wzajemnym docieraniu współpracujących ze sobą części, takich jak zawory i ich gniazda, czopy wałów i ich łożyska ślizgowe. Zaletą tej odmiany docierania jest poprawa jakości współpracujących ze sobą elementów, jednak dzieje się to kosztem zamienności części. Należy pamiętać, że po dotarciu montażowym zespół należy zdemontować, a części staranie wymyć, aby usunąć resztki materiału ściernego [8].

2.3. Dobór warunków docierania

Rezultat i przebieg procesu docierania zależy od: materiału przedmiotu obrabianego, stanu powierzchni i jej kształtu oraz czynników związanych z narzędziem i rodzajem materiału ściernego.

2.3.1. Ziarna ściernie

Materiałami wykorzystywanymi na ziarna ściernie do docierania są głównie materiały sztuczne, takie jak: karborund, elektrokorund, węgiel boru oraz diament syntetyczny.

Karborund jest materiałem najbardziej uniwersalnym, stosowany jest on do większości materiałów, które są docierane, nie jest zalecany do obróbki węglików spiekanych. Elektrokorund używany jest do docierania materiałów o mniejszej twardości, podczas gdy węgiel boru dedykowany jest do materiałów bardziej twardych, np. hartowanych stali oraz węglików spiekanych. Diament, w związku z bardzo ostrymi krawędziami i dużą twardością, doskonale nadaje się do docierania hartowanych stali, węglików spiekanych, szkła oraz ceramiki. Na materiały ściernie z powodzeniem stosowane są również tzw. miękkie materiały ściernie jak tlenek żelaza lub tlenek chromu. Po docieraniu tymi materiałami powierzchnia charakteryzuje się połyskiem [8].

Wydajność obróbki oraz chropowatość powierzchni zależą od wielkości ziaren. Wzrost wymiarów ziarna powoduje zwiększenie wydajności docierania z jednoczesnym pogorszeniem jakości powierzchni. Zatem większe ziarna należy stosować do docierania zgrubnego, a drobne ziarna do docierania dokładnego, oczywiście przy mniejszej wydajności. W tabeli 2.1 przedstawiono zalecane wielkości ziarna w zależności od rodzaju docierania. Osiągana wysokość chropowatości powierzchni Rz odpowiada $5 \div 10\%$ średniej wielkości ziarna.

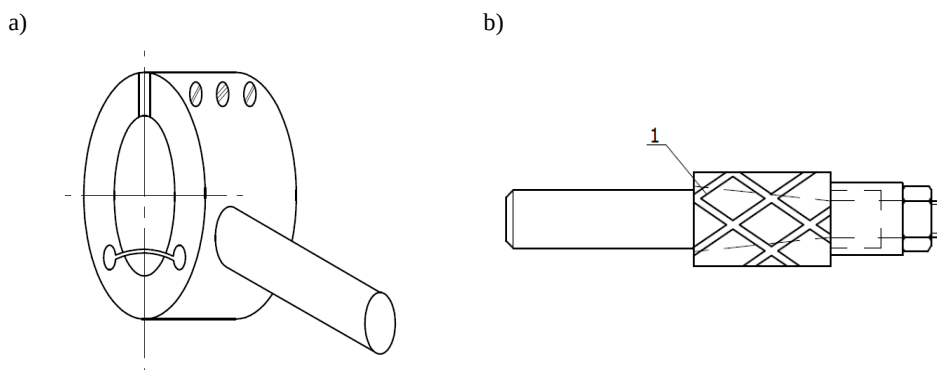
Tabela 2.1. Wielkość ziarna w zależności od odmiany docierania [8]

Rodzaj docierania	Numer ziarna	Wymiar ziarna [μm]
zgrubne	F 220÷F 400	57,5÷17,3
średniodokładne	F 400÷F 600	17,3÷9,3
dokładne	F 800÷F 1200	6,5÷3,0

Na efekty procesu docierania wpływa struktura granulometryczna ścierniwa. Nie jest zalecany duży udział drobniejszych ziaren od frakcji zasadniczej, gdyż uczestniczą one w pracy w bardzo małym stopniu. Niekorzystnie na stan powierzchni wpływają również ziarna o większych rozmiarach, gdyż podczas pracy na powierzchni obrabianej pozostawiają głębsze ślady. Ziarna o budowie izometrycznej ($b:a:l = 1:1:1$) dedykowane są do procesu docierania, pozwala to na łatwiejsze „toczenie się” ziaren ściernych po powierzchni obrabianej [8].

2.3.2. Docierak

Docierak, narzędzie stosowane podczas obróbki docieraniem, jest odzwierciedleniem – negatywem przedmiotu obrabianego. Jego głównym zadaniem jest utrzymanie ziaren ściernych wgniecionych w jego powierzchni (rys. 2.4). Materiał docieraka spełnia podobną rolę jak spoiwo w ściernicy, osadzone w nim ziarna ścierne wykonują pracę skrawania. Kształt docieraka powinien zapewnić równomierne rozrowadzenie pasty ścierniej na całej powierzchni. Docieraki są wykonywane z materiałów o różnej twardości. Dobrze dobrana twardość narzędzia umożliwia okresowe „oparcia” ziaren ściernych oraz pozwala na zajmowanie przez te ziarna nowych położeń. Umożliwia to skrawanie nie jednym lecz kilkoma narożami, co umożliwia poprawienie wydajności procesu, zwiększenie trwałości ziaren ściernych oraz poprawienie chropowatości dotartych powierzchni.



Rys. 2.4. Przykłady docieraków: a) do wałków, b) do otworów (docierak z rozprężną tuleją do większych średnic otworów: 1 – rowki smarowe z przecięciami skośnymi)

Docieraki mogą być wykonane z materiałów miękkich (np. miedź), twardych (hartowane żeliwo) i średnio twardych. Docierak miękki charakteryzuje się tym, że następuje głębsze osadzanie się ziaren ściernych w narzędziu. Mechanizmem bardziej dominującym podczas obróbki jest bruzdowanie i mikroskrawanie, niż toczenie się ziaren ściernych. Uzyskana powierzchnia charakteryzuje się mniejszymi wysokościami chropowatości, jest bardziej błyszcząca i posiada strukturę w większym stopniu ukierunkowaną. Wydajność obróbki docierakami miękkimi jest mała. Docieraki twarde (do 500 HB) z hartowanego żeliwa lub stali służą do docierania zgrubnego przy dużej wydajności. Najczęściej do obróbki stosowane są docieraki o średniej twardości (140÷220 HB) wykonane z drobnoziarnistego żeliwa szarego oraz czasami ze stali niestopowej [6, 8].

Na docieraki mogą być stosowane następujące materiały:

- żeliwo – dedykowane do obróbki twardych materiałów pastami o dużej wielkości ziarna,
- stal – może być wykorzystywana jako zamiennik żeliwa,
- miedź – sprawdza się przy obróbce wykończeniowej przy użyciu past diamentowych o średniej wielkości ziarna,
- mosiądz – tak samo jak miedź,
- drewno – różnych gatunków, zarówno twarde (grab, dąb, buk) jak i miękkie (brzoza, lipa),
- szkło – zalecane przy docieraniu kamieni półszlachetnych, korundu, granatu i innych,
- fibra – po obróbce docierakiem z tego materiału powierzchnia obrabiana cechuje się wysoką jakością,
- skóra, filc – zalecane podczas docierania pastami o średnim bądź drobnym ziarnie [6].

2.3.3. Nacisk jednostkowy

Jednym z najważniejszych czynników, który w sposób istotny wpływa na wydajność procesu docierania jak i chropowatość powierzchni obrobionej, jest nacisk jednostkowy.

W praktyce nacisk jednostkowy do docierania wstępnego wynosi $q = 0,2 \div 0,5$ MPa, a podczas docierania dokładnego $q = 0,05 \div 0,2$ MPa. Racjonalny zakres stosowania nacisku wyznaczany jest najczęściej poprzez maksymalną wydajność i minimalną chropowatość powierzchni. Wydajność obróbki rośnie wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego ale tylko do pewnej wartości, po czym maleje. Spowodowane jest to większym zagłębianiem się ziaren ściernych w miękkie docierak lub/i kruszeniem ziaren przez twardy docierak. Dla niewielkich wartości nacisku obserwuje się wzrost chropowatości powierzchni. Należy to tłumaczyć małymi głębokościami wgnieceń (kraterów) i dominującą chropowatością z obróbki poprzedzającej [8].

2.3.4. Rodzaj nośnika i koncentracja ścierniwa

Równomierne rozprowadzenie materiału ściernego oraz toczenie się ziaren ściernych między powierzchniami narzędzia i przedmiotu obrabianego możliwe jest dzięki obecności nośnika. Rolę nośnika spełniają płyny, najczęściej są to nafta, oleje mineralne (wrzecionowy, maszynowy, czasami olej rozcieńczony naftą) oraz pasty, mieszanina ziaren ściernych oraz towotu lub wosku technicz-

nego [8]. Nośnik, z którym miesza się ścierniwo, powinien zapewniać odpowiednią smarowność, temperaturę topnienia oraz zwilżalność [6]. Celem zwiększenia wydajności procesu i nadania powierzchni dotartej większego połysku niż przy klasycznym docieraniu mechanicznym do zawiesiny ścierniej dodawane są składniki aktywne chemicznie, np. kwas oleinowy, stearynowy, ortofosforowy. Obecność dodatków powoduje wytworzenie na wierzchołkach mikronierówności cienkich warstewek miękkich tlenków metali, które są słabo związane z podłożem, co pozwala na łatwiejsze usuwanie przez materiał ścierny a tym samym uzyskanie zamierzonego efektu [6, 8, 10].

Pasta, pełniąca rolę zawiesiny ścierniej, składa się mikroproszku ściernego, wypełniacza oraz osnowy. Pasty, które w swoim składzie posiadają diament syntetyczny, dedykowane są do obróbki wykończeniowej przedmiotów twardych, od których wymagana jest duża dokładność i bardzo mała chropowatość powierzchni obrabianej (np. sprawdziany, płytki wzorcowe, elementy aparatury pomiarowej i medycznej). Pastami tymi obrabia się wyroby z diamentu, korundu, szkła, kwarcu, ceramiki, krzemu, stopów tytanu. Rozróżnia się pasty zmywalne wodą (W) oraz rozpuszczalnikami organicznymi (O), naftą, benzyną lub spirytusem. Pasty z regularnego azotku boru stosuje się głównie do docierania przedmiotów z niehartowanej stali, żeliwa i metali nieżelaznych. Są one również zmywalne wodą i rozpuszczalnikami organicznymi [6, 7, 10].

Koncentracja ośrodka dobierana jest w oparciu o wielkość ziarna ściernego i prędkość docierania. Ciecze o małej lepkości stosowane są do ścierniwa o drobnych ziarnach i przy dużej prędkości docierania, podczas gdy ciecze gęste i pasty – do większych ziaren i przy małej prędkości (docieranie ręczne) [8].

Na przebieg procesu docierania w istotny sposób wpływa koncentracja ścierniwa, która określa procentowo (wagowo) ilość ziaren ściernych w zawiesinie lub paście ścierniej. Ilość cieczy lub pasty w zawieszynie ścierniej jest optymalna, jeśli wystarcza na utrzymanie minimalnej ale ciągłej warstewki pomiędzy docierakiem a powierzchnią obrabianą. Zawiesiny ścierne charakteryzują się koncentracją od 5% do 40%, natomiast pasty większą (40÷80%). Mała koncentracja ścierniwa nadaje się do docierania maszynowego oraz materiałów twardych, natomiast duża do docierania ręcznego, a także do materiałów miękkich [7, 8].

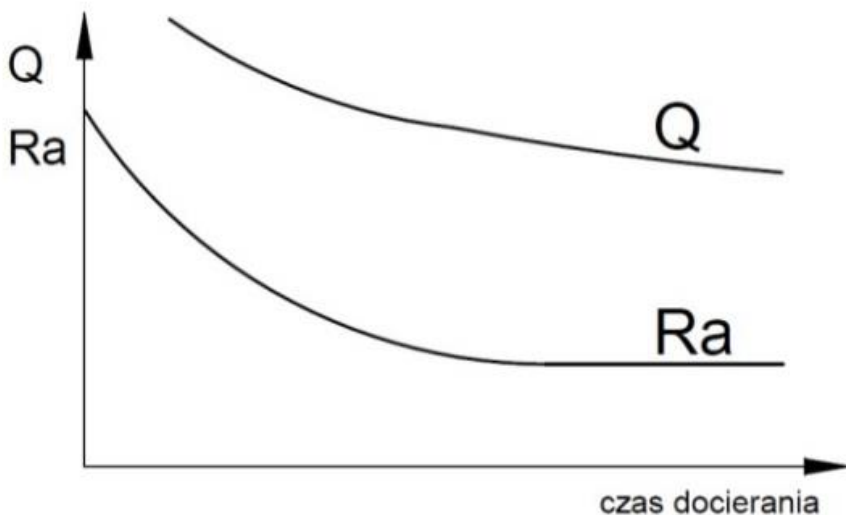
2.3.5. Warunki technologiczne docierania

Wielkość nadatku przeznaczona na docieranie zależy od rodzaju obróbki poprzedzającej, nie bez znaczenia jest również dokładność i chropowatość po

docieraniu. Obróbką poprzedzającą jest najczęściej szlifowanie, gładzenie lub dokładne toczenie. Wartość naddatku obróbkowego na docieranie nie powinna przekraczać 0,02 mm, przy czym na obróbkę wstępną wynosi on $0,005 \div 0,015$ mm na stronę, podczas gdy na wykończeniową 0,005 mm [6, 10].

Prędkość, przy której jest realizowane docieranie, zawiera się w szerokim zakresie od kilku do około 600 m/min, przy czym małe wartości odpowiadają docieraniu ręcznemu lub maszynowo-ręcznemu, wysokie – docieraniu maszynowemu. Wzrost prędkości docierania powoduje wzrost wydajności i chropowatości powierzchni obrobionej. Nadmierny wzrost prędkości, zauważalny przy mniejszych naciskach, może powodować powstawanie klina smarowego i spadek wydajności, co jest niepożądanym zjawiskiem [8].

Wpływ czasu docierania na przebieg i wynik obróbki związany jest z dwoma zjawiskami: tępieniem się naroży ziaren oraz ich kruszeniem. Podczas docierania po upływie pewnego czasu następuje częściowe rozdrobnienie ziaren ściernych, co przekłada się na okresowy wzrost wydajności, po czym następuje jej monotoniczny spadek. Natomiast chropowatość powierzchni na początku szybko maleje, osiągając po pewnym czasie wartość praktycznie niezmienną, właściwą do zastosowanych warunków (rys. 2.5) [7, 8].

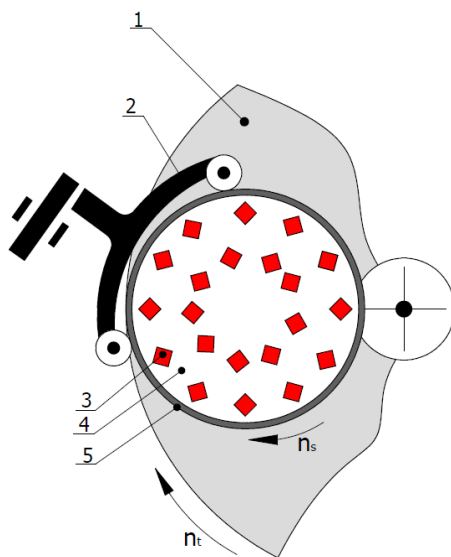


Rys. 2.5. Wpływ czasu docierania na chropowatość powierzchni i wydajność

2.4. Maszyny technologiczne do docierania wałków

Obecnie do docierania powierzchni walcowych zewnętrznych wykorzystywane są docierarki jednotarczowe, docierarki dwutarczowe oraz docierarki bezkłowe.

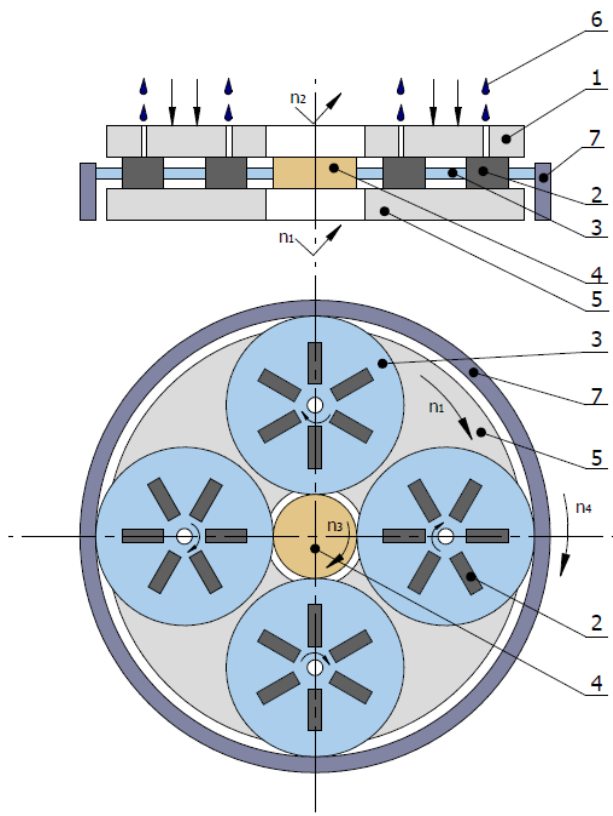
Na rysunku 2.6 przedstawiono schematycznie budowę docierarki jednotarczowej. Rolę docieraka pełni tarcza (1), obracająca się z prędkością n_t , po której poruszają się prowadzące pierścienie (5) z prędkością n_s . Tarcza docierająca (1), obracając się, napędza pierścienie prowadzące (5), w których umieszczone są przedmioty obrabiane (3), wraz z separatorami (4). Pierścienie prowadzące wraz z separatorami utrzymywane są w odpowiednim położeniu przez dźwignie (2). Obciążenie przedmiotów obrabianych odbywa się za pomocą układu pneumatycznego lub grawitacyjnego. Rolą separatorów, które są indywidualnie projektowane i wykonywane w zależności od kształtu przedmiotu, jest oddzielenie od siebie poszczególnych elementów obrabianych [2, 4].



Rys. 2.6. Schemat docierarki jednotarczowej (1 – docierak, 2 – dźwignia, 3 – przedmiot obrabiany, 4 – separator, 5 – pierścień prowadzący)

Docierarki dwutarczowe (rys. 2.7) również służą do docierania przedmiotów walcowych umieszczonych w uchwytach. Istnieje możliwość obróbki przeciwnych powierzchni. Podczas obróbki przedmioty obrabiane (2) umieszczone są w wielogniazdowym uchwycie prowadzącym (separator) (3), który wykonuje ruch planetarny względem dwóch tarcz, umieszczonych jedna nad drugą. Sepa-

ratory (3), o grubości mniejszej niż od wysokości docieranego przedmiotu (2), są napędzane wewnętrznym wieńcem zębatym lub kołkowym (4) i niekiedy także zewnętrznym pierścieniem (7). Płyta docierająca górna (1) oraz płyta docierająca dolna (5) podczas obróbki wykonują ruch obrotowy w tym samym kierunku lub przeciwnym [2, 3, 11].



Rys. 2.7. Schemat docierarki dwutarczowej (1 – płyta docierająca górna, 2 – przedmioty obrabiane, 3 – separator, 4 – pierścień wewnętrzny, 5 – płyta docierająca dolna, 6 – płyn, 7 – pierścień zewnętrzny, n_1 – prędkość tarczy dolnej, n_2 – prędkość tarczy górnej, n_3 – prędkość pierścienia wewnętrznego, kołkowego lub zębatego, n_4 – prędkość pierścienia zewnętrznego, zwykle $n_4 = 0$)

W przypadku gdy ma miejsce docieranie niewielkiej partii wałków można zastosować uproszczoną docierarkę bezkółową. Narzędziem są dwa żeliwne walce o różnej prędkości obwodowej, co jest niezbędne do usunięcia nadmiaru przeznaczanego na obróbkę. Docieraki smarowane są pastą, a przedmiot obrabiany jest dociskany ręcznie do ich powierzchni za pomocą uchwytu [7].

2.5. Właściwości warstwy wierzchniej po docieraniu

Powierzchnia uzyskana po docieraniu cechuje się wysoką jakością. Osiągalne są chropowatość $Ra < 0,01 \mu m$ o bezkierunkowym układzie mikronierówności. Powierzchnia dotarta cechuje się bardzo wysoką nośnością.

Zdjęcie podczas obróbki warstwy rzędu $0,05 \div 0,1 \text{ mm}$ pozwala na usunięcie ewentualnych naprężeń rozciągających, które powstały podczas szlifowania. Podczas obróbki występuje niska temperatura, co nie powoduje powstawania w warstwie wierzchniej naprężeń rozciągających [8].

Po docieraniu warstwa wierzchnia jest umocniona poprzez zgniot na głębokość $4 \div 24 \mu m$, powoduje to zwiększenie odporności powierzchni dotartej na zużycie ściernie, zmęczenie oraz także na korozję [8].

Powierzchnie dotarte cechują się wysoką dokładnością. Istnieje możliwość uzyskania dokładności wymiarowej w granicach $0,3 \div 8 \mu m$. Błąd kształtu może wynosić około $0,5 \mu m$. Wysoką dokładność i niskie wartości błędu uzyskuje się dzięki temu, że w większości przypadków powierzchnia docierana jest bazą obróbkową. Powoduje to, że przedmiot obrabiany nie jest odkształcany ani przez siły docierania ani przez mocujące [6, 8].

2.6. Wykonanie ćwiczenia

2.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze sposobem obróbki wykończeniowej poprzez docieranie. Część praktyczna ćwiczenia obejmuje wykonanie prób docierania powierzchni zewnętrznych części maszyn typu wałek na specjalnym stanowisku laboratoryjnym.

2.6.2. Przebieg ćwiczenia

1. Dla danego rodzaju materiału wałka dobrać odpowiedni docierak, zawiesinę lub pastę ścierną oraz parametry technologiczne docierania.
2. Dokonać pomiaru chropowatości powierzchni zewnętrznej wałków przed operacją docierania.
3. Przeprowadzić docieranie na specjalnym stanowisku do docierania powierzchni wałków. Próba docierania powinna trwać $1 \div 2 \text{ min}$.
4. Zmierzyć chropowatość powierzchni docieranych wałków.
5. Przeprowadzić ocenę właściwości stereometrycznych warstwy wierzchniej docieranych powierzchni wałków w aspekcie odporności na zużycie ściernie, możliwości tworzenia potencjalnych zbiorników środka smarnego.

2.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki docieraniem,
- b) szkic badanej próbki i charakterystykę materiału, z którego została wykonana,
- c) schemat stanowiska wykorzystanego w próbach docierania,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i ich analizę,
- f) wnioski.

Literatura

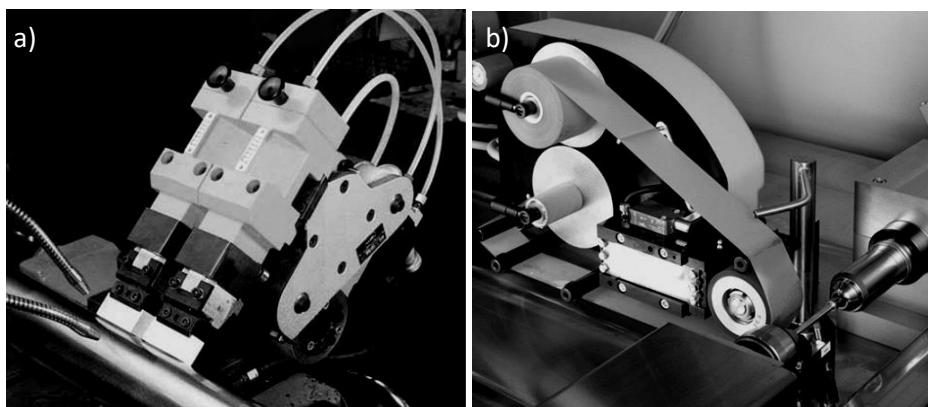
1. Bartosiewicz J.: *Obróbka skrawaniem oraz elementy obrabiarek*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1997.
2. Barylski A.: *Analiza kinematyki docierarek tarczowych*. „Inżynieria Maszyn”, R. 18, z. 2, 2013, s. 97–104.
3. Barylski A.: *Analiza możliwości docierania dwutarczowego wałków w aspekcie kinematyki*. „Mechanik”, nr 8–9, 2017, s. 766–768.
4. Barylski A.: *Docieranie powierzchni płaskich w operacjach montażowych*. „Technologia i Automatyzacja Montażu”, 3, 2014, s. 50–54.
5. Barylski A.: *Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013.
6. Cichosz P.: *Techniki wytwarzania, obróbka ubytkowa: laboratorium*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
7. Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki, wiórowej, ściernej i erozyjnej*. WNT, Warszawa, 1971.
8. Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*. WNT, Warszawa, 2008.
9. Zaleski K., Matuszak J.: *Podstawy obróbki ubytkowej*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2015.
10. *Poradnik inżyniera, Obróbka skrawaniem*, t. I. WNT, Warszawa, 1991.
11. <http://www.ktmia.ath.bielsko.pl/zkww/osir/szlifierki.pdf> – data pobrania 27.08.2017r.

3. DOGŁADZANIE OSCYLACYJNE WAŁKÓW

Dogładzanie oscylacyjne należy do grupy obróbek wykończeniowych i pozwala na uzyskanie powierzchni o chropowatości $R_a = 0,01 \mu\text{m}$. Metodą dogładzania usuwane są ostre nierówności powierzchni, zanieczyszczenia i bezkształtne drobiny metalowe pozostałe po obróbce poprzedzającej. Zostaje odsłonięta struktura krystaliczna metalu bez efektu plastycznego odkształcenia ziaren (jak w przypadku obróbki wiórowej). Usuwany jest tylko materiał w zakresie chropowatości powierzchni, w zasadzie nie ulega zmianie wymiar obróbkowy uzyskany w operacji poprzedzającej dogładzanie oscylacyjne. Tym samym udaje się spełnić większość wymagań stawianych jakości gotowych wyrobów.

3.1. Charakterystyka narzędzi ściernych

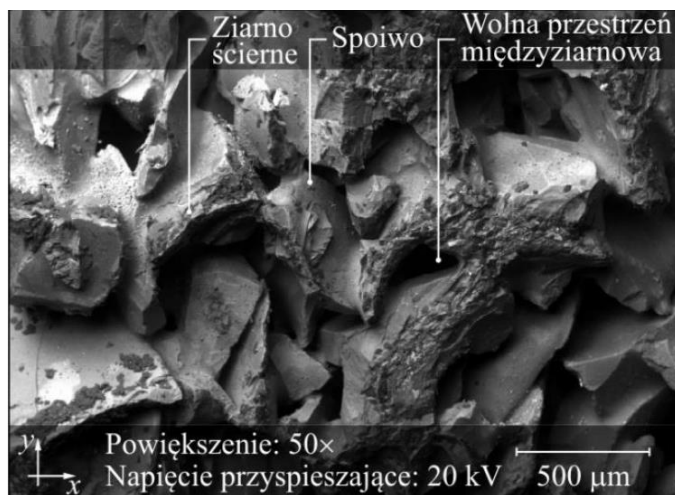
Obróbka wykończeniowa wałków dogładzaniem oscylacyjnym przebiega zwykle z wykorzystaniem tokarek bądź szlifierek wyposażonych w specjalne przyrządy mocowane na obrabiarkach (rys. 3.1). Przyrządy takie, w zależności od zasady działania, można podzielić na mechaniczne, mechatroniczne, pneumatyczne i hydrauliczne. W przypadku obróbki skomplikowanych elementów wykorzystywane są obrabiarki specjalne zwane dogładzarkami [3].



Rys. 3.1. Dogładzanie oscylacyjne wałków: a) ośłkami w przyrządzie pneumatycznym [18], b) folią ścierną [20]

Dogładzanie jest procesem, w którym obróbka odbywa się z wykorzystaniem narzędzia ze spojonego ścierniwa lub folii ścierniej, a stereometria ostrzy jest losowa. Narzędzie podczas obróbki pozostaje w ciągłym kontakcie z przedmiotem obrabianym. Typowe narzędzia stosowane do dogładzania, zwane ośł-

kami, posiadają ziarna ściernie połączone ze sobą przy użyciu spoiwa ceramicznego lub żywicznego. Spoiwo tworząc mostki zapewnia porowatą strukturę, co pokazano na rysunku 3.2. W przypadku nasypowych folii ściernych spoiwo nie tworzy mostków między ziarnami. Mostki powodują, że w strefie styku narzędzia z obrabianym przedmiotem mogą znajdować się wióry, ciecz obróbkowa oraz pozostałości wykruszonych ziaren ściernych i spoiwa [13].



Rys. 3.2. Obrazy mikroskopowe z ziarnami mikrokrystalicznego korundu spiekane o numerze 46, wykonane z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego [19]

Do obróbki gładkościowej powierzchni walcowych i stożkowych wykorzystuje się przeważnie ośelki w kształcie prostopadłościanu (rys. 3.3). Dostępne są także ośelki ze wstępnie wyprofilowanym kształtem części roboczej, co ma służyć skróceniu czasu przygotowania ośelki do dogładzania przedmiotów. Do produkcji ośelek ściernych wykorzystuje się elektrokorund szlachetny, a także węgiel krzemu (karborund) zielony oraz czarny o wielkości ziarna w zakresie $1\div 300\text{ }\mu\text{m}$ [7, 13].

Ziarna karborundowe dzięki dużej twardości i kruchości ulegają łatwemu wykruszeniu, co przy działaniu ściernym ośelek zapewnia ciągłą pracę narzędzia ostrymi krawędziami ziaren. Tak więc zachodzi korzystne zjawisko samoostrzenia pilników ściernych aż do całkowitego ich zużycia. Efekt samoostrzenia narzędzia w dużym stopniu zależy od rodzaju zastosowanego spoiwa. Ośelki wykonane ze spoiwa żywicznego są bardziej elastyczne i ciągliwe od ceramicznych a także wykazują lepszą zdolność do samoostrzenia. Stosowane są one głównie

do obróbki miękkich i ciągliwych stopów metali lekkich, takich jak aluminium, miedź i brąz [3, 10].

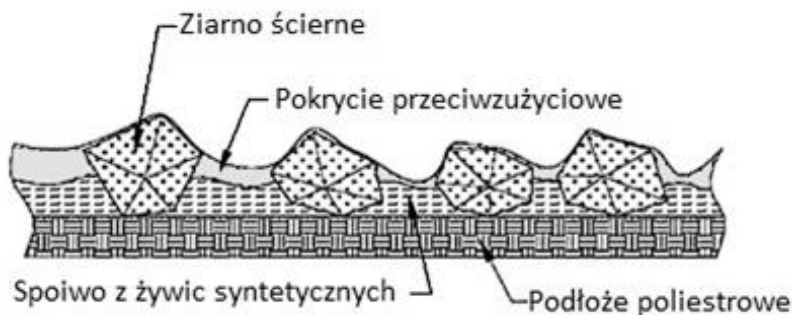


Rys. 3.3. Kształty najczęściej stosowanych oselek (pilników) ściernych do obróbki powierzchni przedmiotów osiowosymetrycznych [15]

Ziarna ścierne elektrokorundu wykazują mniejszą twardość oraz kruchość w porównaniu do ziaren karborundowych, co powoduje mniejszą trwałość i wydajność tych narzędzi. Z powodu mniejszej twardości osetki ścierne elektrokorundowe wykazują mniejsze własności ściernie, a większe działanie polerujące. Powoduje to, że czas trwania operacji dogładzania tymi narzędziami jest dłuższy w porównaniu z dogładzaniem pilnikami karborundowymi. W celu uzyskania efektu polerującego, gdzie R_a jest poniżej $0,02 \mu\text{m}$, można zastosować dodatkową osetkę ścierną z ziarnem poniżej $3 \mu\text{m}$, wypełnioną w 50% grafitem lub drobnym ziarnem Cr_2O_3 [5, 13].

Alternatywą dla oselek ściernych są specjalne folie do dogładzania oscylacyjnego. Folia są narzędziami nasypowymi z mikroziarnami osadzonymi na podłożu z cienkiej taśmy poliestrowej [8]. Budowę taśmy ścierniej zaprezentowano na rysunku 3.4. Grubość poliestrowego podłoża może wynosić od $12,5$ do $125 \mu\text{m}$ przy bardzo małej tolerancji wymiaru. Folia ściernie podobnie jak osetki ściernie wytwarza się z różnych materiałów zależnie od przeznaczenia. Materiałem ściernym może być diament polikrystaliczny, karborund oraz tlenek aluminium. Produkowane są także folie z azotku boru, spiekanego korundu oraz tlenku chromu o wielkości ziarna od $0,01 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$. Ziarna ściernie w narzędziach nasypowych do dogładzania oscylacyjnego nakładane są zawsze jednowarstwowo i zależnie od metody produkcyjnej mogą być osadzone w polu

elektrostatycznym, w polu grawitacyjnym lub też rozcierane na powierzchni wraz ze spoiwem. Folie ściernie znajdują zastosowanie przy dogładzaniu materiałów supertwardych, takich jak: ceramika techniczna, powłoki nakładane plazmowo, węgiel spiekany oraz stal narzędziowa [1, 2].

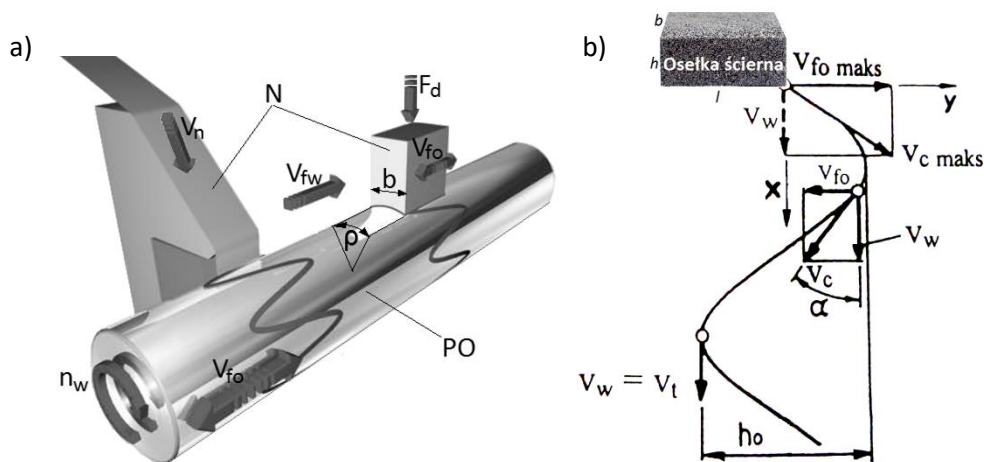


Rys. 3.4. Budowa folii ścierniej o podłożu poliestrowym [13, 16]

3.2. Kinematyka procesu dogładzania oscylacyjnego

Dogładzanie oscylacyjne wałków jest realizowane poprzez sprzężenie kinematyki dwóch lub trzech ruchów roboczych. Przedmiot obrabiany wykonuje ruch obrotowy lub obrotowo zwrotny, narzędzie zaś wykonuje ruch postępowo zwrotny, zwany też ruchem oscylacyjnym o dużej częstotliwości drgań i niewielkim skoku. Dodatkowo przedmiot obrabiany lub narzędzie mogą wykonywać niezbędny ruch posuwowy [3, 5, 13].

Na rysunku 3.5 przedstawiono kinematykę typowego sposobu dogładzania oscylacyjnego powierzchni cylindrycznych i stożkowych za pomocą folii ścierniej oraz ośki. Przyjęto założenie, że pojedyncze ziarno pozostawia na powierzchni obrabianej ślad zbliżony do sinusoidy. Podczas dogładzania oscylacyjnego występują dwie składowe prędkości skrawania leżące w płaszczyźnie stycznej do powierzchni dogładzanej: składowa wzdłużna v_f oraz składowa styczna v_t .



Rys. 3.5. Kinematyka procesu dogładzania oscylacyjnego wałka: a) schemat ogólny, b) tor ruchu pojedynczego ziarna oselki; PO – przedmiot obrabiany, N – narzędzie, n_w – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, v_c – prędkość skrawania v_{fo} – prędkość ruchu oscylacyjnego, v_{fw} – prędkość posuwu wzdłużnego przedmiotu, v_w – prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego h_o – skok oscylacji, $b \times h \times l$ – wymiary oselki, ρ – kąt opasania przedmiotu przez oselkę, α – kąt przecięcia śladu ziarna z wektorem prędkości obwodowej [13, 17]

W przypadku dogładzania oscylacyjnego wałków składowa styczna v_t jest równa prędkości obwodowej przedmiotu obrabianego v_w i wyraża się wzorem:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \left[\frac{m}{\min} \right], \quad (3.1)$$

gdzie: d_w – średnica przedmiotu obrabianego (wałka) [mm],
 n_w – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr/min].

Po uwzględnieniu dotychczasowych założeń, zgodnie z rysunkiem 3.5, prędkość skrawania przy dogładzaniu oscylacyjnym można zapisać w postaci:

$$v_c = \sqrt{v_{fo}^2 + v_w^2} \left[\frac{m}{\min} \right]. \quad (3.2)$$

Składowa normalna prędkości skrawania przy dogłądaniu oscylacyjnym, związana z głębokością skrawania, nie jest uwzględniana w powyższym wzorze, gdyż jej wpływ jest nieistotny w stosunku do pozostałych składowych.

Narzędzie ścierne wykonuje ruch o charakterze sinusoidalnym w kierunku wektora prędkości ruchu obwodowego v_w przedmiotu obrabianego. Droga pokonana przez ośkę w kierunku ruchu oscylacji y jest wyrażona równaniem [13]:

$$y = h_o \cdot \sin \omega t \text{ [mm]}, \quad (3.3)$$

gdzie: h_o – amplituda oscylacji, wyrażona w [mm],

ω – częstość kołowa (zwana pulsacją) ruchu ośki ściernej w czasie jednego pełnego okresu, [radian/t].

Prędkość ruchu oscylacyjnego v_{fo} jest pierwszą pochodną drogi ośki ściernej po czasie i wyraża się zależnością:

$$v_{fo} = \dot{y} = h_o \cdot \omega \cdot \cos \omega t \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right], \quad (3.4)$$

Wiedząc, że częstość kołowa ruchu narzędzia ściernego jest powiązana z częstotliwością i wprowadzając równanie $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_o$, gdzie f_o jest częstotliwością ruchu oscylacyjnego, wzór na końcową prędkość ruchu oscylacyjnego narzędzia przyjmuje postać [13]:

$$v_{fo} = 2\pi \cdot h_o \cdot f_o \cdot \cos \omega t \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right], \quad (3.5)$$

lub

$$v_{fo} = \frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o \cdot \cos \omega t}{1000} \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]. \quad (3.6)$$

Stąd maksymalna możliwa do uzyskania prędkość liniowa oscylacji ośki ściernej wyraża się równaniem:

$$v_{fo \text{ maks}} = 2 \cdot h_o \cdot f_o \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right], \quad (3.7)$$

lub

$$v_{fo maks} = \frac{120 \cdot h_o \cdot f_o}{1000} \left[\frac{m}{min} \right]. \quad (3.8)$$

Podstawiając wzór (3.6) do równania (3.2) uzyskuje się zależność na obliczenie wypadkowej prędkości skrawania:

$$v_c = \sqrt{v_w^2 + \left(v_{fw} \pm \frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o \cdot \cos \omega t}{1000} \right)^2} \left[\frac{m}{min} \right], \quad (3.9)$$

gdzie: v_{fw} – prędkość posuwu wzdłużnego przedmiotu obrabianego w czasie dogładzania oscylacyjnego, [m/min]

Stąd maksymalna możliwa do uzyskania prędkość skrawania podczas dogładzania oscylacyjnego wałka wynosi:

$$v_{c max} = \sqrt{v_w^2 + \left(v_{fw} \pm \frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o}{1000} \right)^2} \left[\frac{m}{min} \right]. \quad (3.10)$$

Prędkość skrawania jest minimalna, gdy składnik związany z oscylacją nie występuje, wówczas wzór na prędkość skrawania wyraża się w postaci:

$$v_{c min} = \sqrt{v_w^2 + v_{fw}^2} \left[\frac{m}{min} \right]. \quad (3.11)$$

Intensywność dogładzania oscylacyjnego w dużym stopniu zależy od wartości kąta zawartego między styczną do toru ziarna a kierunkiem wektora prędkości obwodowej na powierzchni obrabianej (gdy osełka znajduje się w położeniu środkowym). Wartość tego kąta można wyznaczyć z równania:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_w} = \frac{v_{fw} \pm v_{fo}}{v_w}. \quad (3.12)$$

Przy obróbce krótkich przedmiotów stosowane są osełki ściernie o długości w przybliżeniu równej długości obrabianej powierzchni. W takim przypadku

posuw wzdłużny v_{fw} jest zbyteczny i wówczas wypadkową prędkość skrawania opisuje równanie:

$$v_c = \sqrt{v_w^2 + \left(\frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o}{1000} \right)^2 \cdot \cos^2 \omega t} \left[\frac{m}{\min} \right], \quad (3.13)$$

oraz

$$v_{c \text{ maks}} = \sqrt{v_w^2 + \left(\frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o}{1000} \right)^2} \left[\frac{m}{\min} \right]. \quad (3.14)$$

Minimalna prędkość skrawania, gdy składnik związany z oscylacją nie występuje, wyraża się w postaci:

$$v_{c \text{ min}} = v_w \left[\frac{m}{\min} \right] \quad (3.15)$$

Maksymalny kąt pochylenia śladów obróbkowych α w stosunku do płaszczyzny prostopadłej do osi obracającego się przedmiotu można określić równaniem:

$$tg \alpha = \frac{v_{fo}}{v_w} = \frac{120\pi \cdot h_o \cdot f_o}{1000 \cdot v_w}, \quad (3.16)$$

lub

$$tg \alpha = \frac{v_{fo}}{v_w} = \frac{120 \cdot h_o \cdot f_o}{d_w \cdot n_w}. \quad (3.17)$$

Jeżeli wartość kąta α znajduje się w przedziale $30^\circ \div 60^\circ$, wówczas następuje szybkie usuwanie mikronierówności obrabianej powierzchni, natomiast gdy wartość tego kąta jest większa od 60° , to występuje działanie polerujące [3].

3.3. Parametry technologiczne dogładzania oscylacyjnego wałków ośelkami ściernymi

3.3.1. Twardość narzędzia

Jakość powierzchni uzyskana po obróbce dogładzaniem oscylacyjnym w dużej mierze uzależniona jest od wielkości ziarna oraz twardości zastosowanej ośelki ścierniej. Przy doborze ośelek można przyjąć w przybliżeniu, że wielkość ziaren powinna być około 4 razy większa od zmierzonego parametru Rz chropowatości powierzchni przed obróbką. Twardość ośelek dobiera się podobnie jak w przypadku narzędzi do obróbki szlifowaniem.

Oznaczenie i pomiar twardości ośelek różnią się często od przyjętych dla ściernic i prawie wszyscy producenci stosują indywidualne oznaczenia. Pomiar twardości przeprowadzany jest metodą Rockwella i polega na wciskaniu stalowej kulki o średnicy 5 mm przy obciążeniu głównym 600 N [13]. Polska norma przewiduje podział ośelek ściernych na miękkie i twarde, podobnie jak w przypadku ściernic. Przy dogładzaniu stali hartowanej oraz stopów odpornych na korozję z dodatkiem chromu i niklu stosuje się ośelki miękkie o twardości od C do E. Dla ośelek najbardziej miękkich należy stosować większą prędkość skrawania w celu zmniejszenia zużycia a tym samym poprawy wydajności obróbki. Duża wydajność jest szczególnie ważna w produkcji seryjnej, gdzie wykorzystywane są ośelki twardsze, lecz wstępnie wyprofilowane i dopasowane do krzywizny przedmiotu obrabianego. Dogładzanie żeliwa oraz miękkich stali jest realizowane z użyciem pilników ściernych o twardości od J do S [3, 12, 13].

3.3.2. Nacisk jednostkowy narzędzia

Kolejnym, ważnym parametrem, który wpływa na wynik dogładzania oscylacyjnego, jest nacisk jednostkowy narzędzia na powierzchnię przedmiotu obrabianego. Nacisk wpływa na głębokość wnikania ziaren ściernych narzędzia w materiał obrabiany, co związane jest z głębokością skrawania. Liczne badania [11, 12], wykazały, że wraz ze zwiększeniem wartości nacisku jednostkowego wzrasta ilość usuwanego materiału, czemu towarzyszy wzrost zużycia narzędzia w postaci folii ścierniej i ośelki. Szczególnie przy pilnikach miękkich zwiększenie nacisku powoduje wykruszanie się bocznych krawędzi narzędzia. Z drugiej strony dzięki zwiększeniu nacisku wzrasta wydajność obróbki i poprawia się chropowatość powierzchni przedmiotu, ale jedynie w początkowej fazie dogładzania. Zbyt duży nacisk narzędzia na przedmiot obrabiany może spowodować

zwiększenie chropowatości powierzchni obrabianej nawet do wartości większej niż przed obróbką. Powodem tego jest osadzanie się drobin metalu na powierzchni roboczej osełki [4, 11, 12].

Obróbka ze zbyt małym naciskiem jednostkowym prowadzi do bardzo powolnych zmian chropowatości powierzchni i nie są usuwane ślady po obróbce poprzedzającej. Przy dogładzaniu z dużą prędkością obwodową i małym naciskiem narzędzia łatwiej tworzy się film olejowy pomiędzy parą przedmiot obrabiany – narzędzie. Film olejowy z jednej strony odprowadza produkty zużycia i poprawia jakość powierzchni, z drugiej zaś strony utrudnia skrawanie i prowadzi do przerywania obróbki, co znacznie wydłuża czas trwania procesu.

Dogładzanie stali miękkiej i żeliwa powinno odbywać się z naciskiem jednostkowym w granicach od 0,1 do 0,5 MPa. Z badań naukowych wynika, że dla tej grupy materiałów najlepszą jakość powierzchni uzyskuje się przy nacisku 0,4 MPa. Dogładzanie stopów metali lekkich jest możliwe przy stosowaniu zdecydowanie mniejszych nacisków niż przy stali, których wartość zalecana wynosi od 0,05 do 0,1 MPa. Stale hartowane i materiały o większej twardości dogładza się przy większych wartościach docisku. W przypadku osełek wykonanych z węgla krzemu zaleca się stosowanie nacisków w zakresie od 0,5 do 1,5 MPa [13]. Stosując spojone narzędzia z regularnego azotku boru ze spoiwem ceramicznym najlepsze rezultaty uzyskuje się przy dogładzaniu stali łożyskowej 100Cr6 (ŁH15) z naciskiem w granicach od 2,5 do 3,5 MPa [6, 14].

3.3.3. Ciecze obróbkowe

Podstawowym zadaniem cieczy obróbkowej, stosowanej w procesie dogładzania oscylacyjnego jest wypłukiwanie produktów obróbki z porów i powierzchni narzędzia, zmywanie obrabianej powierzchni a także smarowanie miejsca styku przedmiotu obrabianego z narzędziem. Rola chłodząca cieczy w procesie dogładzania oscylacyjnego jest niewielka. Standardowo zaleca się stosowanie mieszanin nafty z mineralnym olejem wrzecionowym zwykle w proporcjach 70% nafta i 30% olej (tabela 3.1). Olej wrzecionowy poprawia właściwości smarne cieczy, natomiast nafta wpływa na poprawę usuwania wiórów z obszaru obróbkowego. Opisana mieszanina dobrze sprawdza się przy obróbce żeliwa i stali o niskiej twardości. Najlepsze wyniki daje dogładzanie z zastosowaniem specjalnie opracowanych olejów. Ich cechami są: dobra zmywalność obrabianej powierzchni, zdolność wypłukiwania produktów obróbki a także dobrze odpowiednio właściwości smarne mające na celu ograniczenie

zużycia ziaren ściernych. Oleje tego typu są bardziej przyjazne dla środowiska i operatora [3, 5, 12, 13].

Pomimo licznych prób użycia do dogładzania oscylacyjnego roztworów i emulsji wodnych, to poza przypadkiem gładzenia osłkami diamentowymi, nie znalazły one szerszego zastosowania w tej obróbce.

Tabela 3.1. Zalecenia odnośnie doboru cieczy obróbkowej do materiału obrabianego dogładzaniem oscylacyjnym osłkami [3]

Postać wióra	Krótkie wióry		Długie wióry
Materiał obrabiany	Stal hartowana	Stal zwykła i żeliwo	Stopy aluminium, miedź, brąz
Mieszanina obróbkowa	Nafta	70% nafta + 30% olej wrzecionowy	Olej wrzecionowy
Dedykowany olej obróbkowy	Olej do dogładzania o niskiej lepkości		Olej do dogładzania o wysokiej lepkości

Podczas dogładzania oscylacyjnego folią ścierną jako ciecz obróbkowa stosowana jest czysta woda lub emulsja wodna. Ciecz obróbkowa w tym przypadku jest konieczna jedynie do zmywania obrabianej powierzchni. Ze względu na to, że folie ściernie używane są jednokrotnie, przesuwająca się folia dostarcza stale nowych ziaren, które biorą udział w procesie dogładzania [13].

3.3.4. Stan powierzchni przed dogładzaniem

Duży wpływ na efekt dogładzania oscylacyjnego ma stan geometryczny powierzchni, a zwłaszcza falistość i chropowatość. Dopuszcza się niedużą falistość powierzchni, ponieważ zostanie ona usunięta podczas obróbki. Natomiast duża falistość i błędy kształtu powierzchni obrabianej spowodują nierównomierne zużycie osłki ścierniej, co z kolei zakłóci właściwy przebieg procesu dogładzania [3, 4].

Zaleca się, aby obróbką poprzedzającą dogładzanie oscylacyjne wałków było toczenie gładkościowe bądź szlifowanie. Wysokość chropowatości powierzchni R_z nie powinna przekraczać $3\div 6\text{ }\mu\text{m}$, a gładkość powierzchni wszystkich przedmiotów z danej serii produkcyjnej powinna być na podobnym poziomie. Na wyniki obróbki dogładzaniem wpływa nie tylko wysokość chropowatości powierzchni wyjściowej ale również kierunkowość śladów po obróbce poprzedzającej. Z tego względu zalecane jest prowadzenie obróbki dogładzaniem

w dwóch zabiegach (układ śladów obróbkowych po dogładzaniu wstępnym umożliwia uzyskanie dobrych wyników po dogładzaniu wykończeniowym). Na ustalenie ilości zabiegów wpływa też grubość naddatku na dogładzanie. Przyjmuje się, że dogładzanie prowadzone jest w dwóch zabiegach, jeśli wartość naddatku przekracza 8 μm [3].

3.3.5. Prędkość obwodowa przedmiotu obrabianego i częstotliwość ruchu oscylacyjnego narzędzia

Dotychczasowe badania wpływu prędkości obwodowej na przebieg procesu dogładzania wykazały, że wraz ze zwiększeniem prędkości obwodowej uzyskuje się poprawę chropowatości powierzchni zwłaszcza w początkowej fazie obróbki. Zmiany są tym szybsze, im większa jest początkowa chropowatość powierzchni [11, 12]. Zalecana prędkość obwodowa przy dogładzaniu ośłką wynosi dla wałków ze stali hartowanej 10÷20 m/min przy obróbce wstępnej oraz 30÷80 m/min przy dogładzaniu wykończeniowym. Przy dogładzaniu foliami ściernymi zaleca się przeprowadzać obróbkę z prędkością obwodową przedmiotu $v_w = 50\div150$ m/min. Zalecane wartości prędkości obwodowej dla innych materiałów zawarto w tabeli 3.2.

Według wzorów (3.5) i (3.7) prędkość ruchu oscylacyjnego zależy od wielkości skoku ośłki ścierniej h_o a także od częstości oscylacji f_o . Współcześnie dobiera się częstość oscylacji narzędzia w granicach 400÷3000 skoków na minutę. W trakcie obróbki powierzchni krzywoliniowych, takich jak bieżnie łożysk tocznych, stosuje się dolne granice z podanego zakresu. Przy wgłębnym dogładzaniu powierzchni walcowych i stożkowych bieżni łożysk najlepsze efekty otrzymuje się przy wyższych wartościach oscylacji rzędu 2500 skoków na minutę. Na dogładzarkach bezkłowych ze względów konstrukcyjnych możliwe jest dogładzanie z częstością do 3000 skoków na minutę [13].

Tabela 3.2. Zalecane parametry kinematyczne dogładzania oscylacyjnego ośłką ścierną [3]

Materiał obrabiany	Prędkość obwodowa przedmiotu v_w [m/min]	Częstotliwość ruchu oscylacyjnego ośłki f_o [min^{-1}]	Długość skoku pilnika h_o [mm]
Stal miękka, żeliwo	30÷40	400÷1000	3÷6
Stal hartowana, materiały twarde	15÷35	450÷600	
Stopy metali nieżelaznych	50÷120	350÷1200	

Wraz ze zwiększeniem częstości oscylacji odnotowuje się spadek wartości chropowatości powierzchni obrabianej. Ziarna ściernie podczas dogładzania z większą częstotliwością zużywają się bardziej w przypadku elektrokorundu, natomiast w przypadku węgla krzemu zużycie narzędzia praktycznie nie zależy od częstości oscylacji.

3.4. Wykonanie ćwiczenia

3.4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami dogładzania oscylacyjnego wałków, ze szczególnym uwzględnieniem dogładzania ośką ścierną na tokarce uniwersalnej z zastosowaniem przyrządu mechanicznego. Część praktyczna obejmuje dobór parametrów technologicznych dogładzania, przeprowadzenie obróbki dogładzaniem oscylacyjnym dwóch wałków wykonanych z różnych materiałów lecz o zbliżonej chropowatości powierzchni. Następnie ocena wpływu warunków technologicznych dogładzania na jakość uzyskanej powierzchni po obróbce i wyciągnięcie wniosków praktycznych.

3.4.2. Przebieg ćwiczenia

1. Dokonanie pomiaru chropowatości i falistości na powierzchni cylindrycznej wałków ze stali hartowanej oraz stopu aluminium, przeznaczonych do dogładzania oscylacyjnego.
2. Dobranie materiału narzędzia ściernego do obróbki wałków oraz parametrów technologicznych procesu:
 - twardości ośki ścierniej,
 - wymiarów narzędzia ściernego,
 - nacisku jednostkowy narzędzia na przedmiot obrabiany,
 - rodzaju cieczy obróbkowej,
 - prędkości obwodowej oraz częstotliwości ruchu oscylacyjnego.
3. Obliczenie prędkości skrawania oraz prędkości ruchu oscylacyjnego.
4. Pomiar średnicy wałków w 10 przekrojach na długości.
5. Przeprowadzenie procesu dogładzania oscylacyjnego wałków wykonanych ze stali hartowanej oraz stopu aluminium przy stałych parametrach prędkości obwodowej oraz zmiennym czasie dogładzania.

6. Pomiar chropowatości i falistości powierzchni po dogładzaniu oscylacyjnych oraz sporządzenie dwóch wykresów, dla każdego z obrabianych wałków, wpływu czasu obróbki na chropowatość powierzchni Ra i Rz.
7. Obserwacje mikroskopowe powierzchni nieobrabianych oraz obrabianych dogładzaniem oscylacyjnym.
8. Pomiar średnicy wałków w 10 przekrojach na długości i odniesienie wyników do pomiarów średnicy przed dogładzaniem.

3.4.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki dogładzaniem oscylacyjnym wraz z rysunkiem,
- b) szkic badanych próbek i rodzaj materiału, z którego zostały wykonane,
- c) schemat stanowiska roboczego oraz parametry dogładzania,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wnioski.

Literatura

1. Auguściński A., Weiss E.: *Dogładzanie oscylacyjne foliami ściernymi*. W: Materiały XVI NSOŚ, Koszalin 1993, s. 239–250.
2. Auguściński A., Weiss E.: *Wpływ wybranych parametrów obróbki na efekt dogładzania foliami ściernymi*. W: Materiały XVII NSOŚ, Kraków 1994, s. 13–21.
3. Górski E.: *Obróbka gładkościowa*. WNT Warszawa 1970.
4. Kurzawski Z., Weiss E.: *Charakterystyka procesu dogładzania w szczególnych warunkach pracy*. W: Materiały XXI NSOŚ, Warszawa 1998, zbiór prac „Badania podstawowe techniczne obróbki ścierniej” Politechnika Warszawska, s. 68–73.
5. Markowski S.: *Badania doboru optymalnych warunków dogładzania oscylacyjnego zewnętrznych powierzchni obrotowych*. Przegląd Naukowo-Techniczny AGH, (1965) 16.
6. Matsumori N.: *Ability of superabrasive stone in superfinishing and its application*. IN: Third Int. Grinding Conf., October 1988, Fontana, Wisconsin, SME Technical Paper, s. 88–595.
7. Materiały firmowe dotyczące narzędzi i technologii dogładzania, Atlantic Honsteine, Guillaume-Werke, Bonn-Beuel 1997.
8. Materiały informacyjne i szkoleniowe dotyczące narzędzi i technologii dogładzania, 3M™ Micro und Superfinishing Systeme, Neuss 1994–98

9. Oczóś K.: *Doskonalenie procesów obróbki ścierniej. Cz. II Wysokoefektywne ściernice i procesy szlifowania*. „Mechanik” nr 8–9, 2010 r., s. 517–529.
10. Oczóś K.: *Doskonalenie procesów obróbki ścierniej. Cz. IV Gładzenie, dogładzanie i obróbka luźnym ścierniwem*. „Mechanik” nr 11 2010r., s. 783–793
11. Puthanangady T. K.: *Superfinishing of steels*. W: Proc. of Conf. International Honing Clinic’94, Novi, Michigan, April 1994, SME Technical Paper, MR s. 94–169.
12. Weiss E.: *Badania nad intensyfikacją warunków dogładzania oscylacyjnego i poprawą własności warstwy wierzchniej*. W: Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia Obróbki Ścierniej” Rzeszów 1974, s. 279–293.
13. Weiss E.: *Kształtowanie jakości wyrobów i wydajności obróbki w procesie dogładzania*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań 1999.
14. Żebrowski H., Weiss E.: *Obróbka ścierna – kierunki rozwoju*. W: Materiały Ogólnokrajowej Konferencji Obrabiarkowej KO’96, Warszawa 1996, s. 123–148.
15. www.directindustry.com/prod/tyrolit-schleifmittelwerke-swarovski-kg/product-37270-1630034.html (dostęp 01.10.2017 r.)
16. www.lakiernictwo.net/artykuly/szlifowanie-tworzyw-drzewnych,1239 (dostęp 01.10.2017 r.)
17. www.mmspektrum.com/clanek/zlepseni-povrchu-a-tvaru.html (dostęp 01.10.2017 r.)
18. www.nagelusa.com/sg-50-sg-75-superfinishing-attachment/ (dostęp 01.10.2017 r.)
19. www.sihg.tu.koszalin.pl/2015/10/08/sciernica-impregnowana-pierwiastkami-niemetalicznymi-2/ (dostęp 01.10.2017 r.)
20. www.techno-finish.ch/english/technologie.html (dostęp 01.10.2017 r.)

4. POLEROWANIE ELEKTROLITYCZNE POWIERZCHNI PŁASKICH

Wobec współczesnych technik obróbki elementów maszyn i urządzeń stawiane są wymagania zwiększonej dokładności wykonania a także wysokiej jakości powierzchni i odporności na korozję. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu w procesie produkcyjnym operacji technologicznej polerowania powierzchni.

Proces polerowania, polegający na usuwaniu bardzo małych nierówności oraz rys z powierzchni elementów, jest znaną i często stosowaną techniką obróbki wykończeniowej. Najprostszą odmianą polerowania jest mechaniczne ścieranie przy wykorzystaniu specjalnych past polerskich oraz sukna polerskiego. Jednakże przy obróbce miękkich metali, takich jak cyna, miedź, ołów, polerowanie mechaniczne staje się kłopotliwe, zwłaszcza gdy kształt elementu jest skomplikowany. Rozwiązaniem tych niedogodności jest polerowanie elektrolityczne, które pozwala zastąpić w wielu sytuacjach pracochłonny proces polerowania mechanicznego.

4.1. Opis procesu polerowania elektrolitycznego

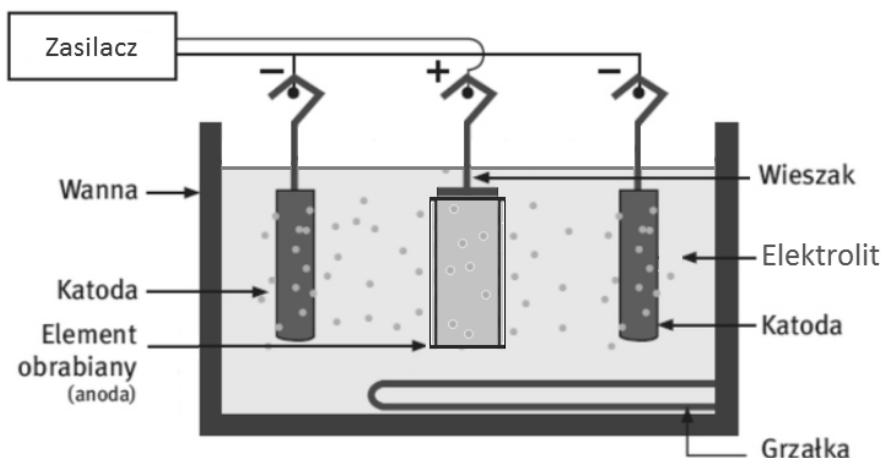
Obróbka wykończeniowa polerowaniem elektrolitycznym elementów metalowych sprowadza się do przepływu prądu elektrycznego przez elektrolit, który powoduje rozpuszczanie wierzchołków chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu – anody (rys. 4.1). Proces roztwarzania zachodzi wyłącznie na anodzie i stąd znany jest także jako polerowanie anodowe. Katody pełnią zadanie doprowadzania prądu elektrycznego do elektrolitu i zamknięcia obwodu. Odległość katody od anody wpływa na rozłożenie gęstości prądu elektrycznego w wannie z elektrolitem. Katody nie biorą udziału w procesie elektrochemicznym toteż ich masa i objętość nie ulegają zmianie [2, 3, 12].

Podczas obróbki powierzchniowej elektropolerowaniem nie występują oddziaływania mechaniczne. Dzięki temu możliwa jest obróbka elementów cienkościennych o małej sztywności. Podstawą obróbki elektrochemicznej jest wymiana masy między obrabianym elementem a elektrolitem, zgodnie z I prawem Faradaya:

$$m = k_{el} \cdot I \cdot t , \quad (4.1)$$

gdzie: k_{el} – równoważnik elektrochemiczny, równy masie substancji wydzielonej przy przepływie przez elektrolit ładunku elektrycznego 1 C,
 I – natężenie prądu elektrycznego,
 t – czas przepływu prądu elektrycznego.

Podczas elektropolerowania w pierwszej kolejności z powierzchni elementu usuwana jest warstwa małych nierówności (poniżej 1 μm). Powierzchnia przedmiotu zostaje wygładzona. W drugiej kolejności uzyskuje się efekt wyblyszczania, który jest możliwy do uzyskania nawet na powierzchni o znacznej chropowatości [2, 10].

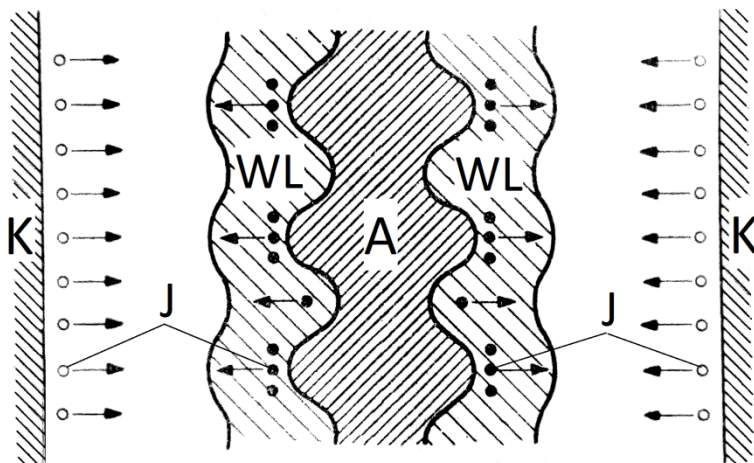


Rys. 4.1. Schemat stanowiska do polerowania elektrolitycznego

Efekt wygładzania zachodzi na skutek powstawania na powierzchni anody cienkiej, w porównaniu z wysokością nierówności, warstwy metalicznej, zwanej warstwą lepką lub błonką anodową (rys. 4.2). Warstwa lepka składa się z produktów anodowego roztwarzania, przy czym wierzchołki chropowatości powierzchni są pokryte cieńszą warstwą błonki niż wgłębienia. Atomy metalu stanowiące anodę wychodzą z sieci krystalicznej i dyfundują przez warstwę przyelektrodową do elektrolitu.

Przyczyną mniejszej grubości warstwy lepkiej na wierzchołkach a większej we wgłębieniach chropowatości powierzchni obrabianej jest różna gęstość cieczy. Opór stawiany przez cieńszą warstwę błonki jest mniejszy niż przez grubszą. Toteż wierzchołki chropowatości powierzchni rozpuszczają się w większym

stopniu niż wgłębienia. Różnica ta wynika z różnego czasu i prędkości dyfuzji produktów rozpuszczania w głąb elektrolitu. W ten sposób zachodzi stopniowe likwidowanie nierówności powierzchni aż do całkowitego jej wygładzenia [2, 12].



Rys. 4.2. Schemat zasady polerowania elektrolitycznego cienkościennego elementu metalowego:
A – anoda, K – katoda, J – jony, WL – warstwa lepka

Efekt wybłyszczania powierzchni polega na rozpuszczaniu nierówności o wysokości poniżej $0,01\ \mu\text{m}$. Na powierzchni warstwy anodowej kształtuje się wówczas dodatkowa warstwa, o wiele cieńsza od warstwy lepkiej. Nowa warstwa tworzy się na powierzchni anody i jednocześnie rozpuszcza się w elektrolicie. Warunkiem utrzymania się warstwy wybłyszczonej jest jednakowa prędkość przechodzenia jonów metalu przez granicę metal-warstwa [2, 4].

4.2. Parametry technologiczne polerowania elektrolitycznego powierzchni płaskich

4.2.1. Ciecz obróbkowa – skład i koncentracja

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na proces elektrolitycznego polerowania jest skład elektrolitu oraz jego stężenie. Elektrolit ponadto powinien spełniać kilka podstawowych wymagań [2, 10]:

- być bezpieczny i wygodny w zastosowaniu,
- posiadać wysoką zdolność polerującą,
- nie działać trawiąco na przedmiot polerowany,

- d) posiadać odpowiednią trwałość,
- e) zapewniać dobre wyniki polerowania zarówno przy niskiej gęstości prądu jak i przy niskim napięciu.

Przygotowanie elektrolitu do pracy polega na rozpuszczeniu składników, a następnie na wstępnej jego pracy. Rozpuszczanie składników musi być prowadzone w odpowiedniej kolejności, w innym wypadku może dojść do zniszczenia kąpeli. Świeżo przygotowana kąpiel powinna być podgrzana do temperatury $70 \div 75^\circ\text{C}$, a następnie należy przepuścić przez nią prąd stały o parametrach $5 \div 15 \text{ Ah/dm}^3$. Materiałem anody i katody jest ołów, zaś stosunek powierzchni anody do katody powinien wynosić w zakresie $3:1 \div 4:1$ [1, 3, 10].

Kąpiele elektrolityczne opisane w literaturze można podzielić w zależności od składu roztworu cieczy na dwie podstawowe grupy.

Do pierwszej grupy należą kąpiele na bazie kwasu nadchlorowego HClO_4 i bezwodnika octowego $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$. Zastosowanie tych cieczy jest coraz radsze ze względu na własności wybuchowe i trudności eksploatacyjne spowodowane potrzebą stosowania generatorów o wysokim napięciu, co dodatkowo naraża obsługę na ryzyko porażenia prądem elektrycznym. Grupę tych elektrolitów wykorzystuje się przeważnie do celów metalograficznych [2].

Do drugiej grupy należą kąpiele oparte na kwasie fosforowym H_3PO_4 (z dodatkiem kwasu siarkowego H_2SO_4 i innych składników, np. kwasu chromowego CrO_3 , cytrynowego $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, gliceryny $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) i są one jak dotychczas najbardziej uniwersalnymi kąpielami o szerokim zakresie stosowania. Roztwory z tej grupy nadają się szczególnie do elektropolerowania stali stopowych, których polerowanie mechaniczne jest bardzo uciążliwe. Najlepsze rezultaty uzyskuje się przy możliwie najbardziej drobnoziarnistej strukturze, a równocześnie stosowaniu możliwie największej gęstości prądu [3, 8].

Badania wykonane przez autora [9] wykazały istotną zmianę chropowatości powierzchni na poziomie $\alpha = 0,05$ po obróbce elektrochemicznej stali w 95% (wagowo) kwasie H_2SO_4 bez efektu wyblyszczania powierzchni. Natomiast po obróbce w 98% (wagowo) kwasie H_3PO_4 zaobserwowano jedynie efekt wyblyszczania, bez wygładzania. Zmieszanie kwasów w stosunku wagowym 1:1 powoduje zarówno poprawę chropowatości powierzchni, jak i pojawienie się połysku. W tabeli 4.1 zaprezentowano zalecany skład oraz stężenie wagowe roztworów kąpeli przeznaczonych do elektropolerowania różnych rodzajów stali. Są to wyniki badań z ostatnich 50 lat. Należy pamiętać, że w każdym przy-

padku przyjęty skład elektrolitu powinien być sprawdzony doświadczalnie i skorygowany.

Tab. 4.1. Zalecane parametry polerowania elektrolitycznego stali [1, 2, 5, 6, 9]

Materiał obrabiany	Skład i stężenie wagowe kąpeli [%]						Parametry procesu		
	H ₃ PO ₄	H ₂ PO ₄	H ₂ SO ₄	CrO ₃	H ₂ O	C ₆ H ₁₅ NO ₃	Temp. [°C]	Gęstość prądu [A/dm ²]	Czas [min]
Stal niestopowa i niskostopowa	63	-	15	10	12	-	57÷77	50÷100	3÷10
	-	70	21	-	9	-			
	77	-	9	8	6	-	80÷85	40÷50	1÷10
	70	-	-	14	16	-	70÷80	50÷70	1÷3
	88	-	-	10	2	-	80÷90	80÷100	1÷10
	88	-	-	10	2	-	50	5÷10	1÷10
	49,5	-	40	-	10,5	-	50÷80	50	1÷10
	63	-	15	10	12	-	50÷55	50÷100	1÷10
	70	-	12	9	9	-	50÷70	50	1÷10
Stal nierdzewna i kwasoodporna	60	-	30	-	10	-	60÷85	80	1÷3
	65	-	15	10	10	-	60÷85	80	1÷3
	55,4	-	44,4	-	-	0,2	60÷65	40÷50	2÷3
	45,5	-	54,5	-	-	-	85÷95	80÷140	2÷3
	43	-	15	-	42	-	40÷60	≥ 5	1÷5
	56	-	-	12	32	-	40÷80	10÷100	10÷20
	54	-		20	26		85÷90	90÷110	10÷20
	60*	-	37	-	3	-	50÷80	80	1÷5
	* + 22 cm ³ C ₃ H ₆ O ₃ na 1 dm ³ roztworu								

Przy elektrolitycznym polerowaniu stopów aluminium wyróżnia się dwa niezależne procesy: kwaśny i zasadowy. W procesie kwaśnym przeważnie używa się kwasu fluoroborowego (HBF₄) o koncentracji od 0,5 do 5%. Elektrolit powinien znajdować się w wannie wyłożonej gumą, a jego temperatura nie przekracza 30°C. Gęstość prądu ustala się w granicach 1÷1,2 A/dm². Czas elektropolowania nie przekracza 3 minut. Po tym procesie zazwyczaj przeprowadzany jest dodatkowy zabieg utrwalania [2].

Proces zasadowy polerowania aluminium składa się z dwóch zabiegów obróbki anodowej w alkalicznym oraz kwaśnym elektrolicie. Elektrolitem alkalicznym jest roztwór zawierający węglan sodu (15% wagowo) z fosforanem sodu (5%) oraz wody destylowanej (80%). Temperatura roztworu wynosi około

80°C a czas trwania zabiegu to około 5÷10 minut. W celu zabezpieczenia otrzymanej powierzchni przedmiot poddaje się trawieniu w 20% roztworze NaHSO₄. Gęstość prądu nie powinna przekraczać 8 A/dm² a czas zabiegu trwa od 20 do 30 minut. Następnie przedmiot obrabiany płucze się w zimnej wodzie i utrwała efekt elektropolerowania w gorącej wodzie destylowanej przez kolejne 20 minut [2].

Elektrolityczne polerowanie miedzi i mosiądzu prowadzi się w kwasie ortofosforowym H₃PO₄ w temperaturze około 22 °C przy dwóch zakresach gęstości prądu od 5 do 15 A/dm² oraz od 10 do 80 A/dm². Czas trwania procesu jest w dużej mierze uzależniony od stanu powierzchni i w przypadku polerowania blachy walcowanej nie przekracza na ogół 3÷6 minut [2, 10].

4.2.2. Temperatura elektrolitu

Temperatura elektrolitu wpływa na jego lepkość. Wraz ze wzrostem temperatury zmienia się proces dyfuzji produktów anodowego roztwarzania od powierzchni obrabianej do elektrolitu. Wzrost temperatury zmniejsza też opór elektrolitu, co prowadzi do zwiększenia anodowej gęstości prądu i podnosi sprawność procesu. Wysoka temperatura elektrolitu umożliwia ponadto polerowanie przedmiotu bez uprzedniego starannego odtłuszczenia [2, 10].

Intensywność parowania elektrolitu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, chociaż skutek słabszej przyczepności do przedmiotów polerowanych obniża się jego zużycie. Zbyt wysoka temperatura uniemożliwia utrzymywanie się warstwy lepkiej na anodzie, powodując spływanie tej warstwy, co objawia się w postaci ciemnych smug na powierzchni [10].

Dla zapewnienia optymalnego zakresu temperatury roztworu roboczego, w konstrukcji wanien oprócz urządzeń grzejących znajdują się także urządzenia chłodnicze oraz termostaty kontrolujące stałość temperatury roztworów.

W niektórych sytuacjach na efektywność polerowania elektrolitycznego wpływa mieszanie elektrolitu. Przykładem jest obróbka srebra w cyjankach, gdzie bez mieszania dochodzi do pasywności anody a tym samym zahamowania całego procesu elektropolerowania [2].

4.2.3. Czas trwania procesu elektropolerowania

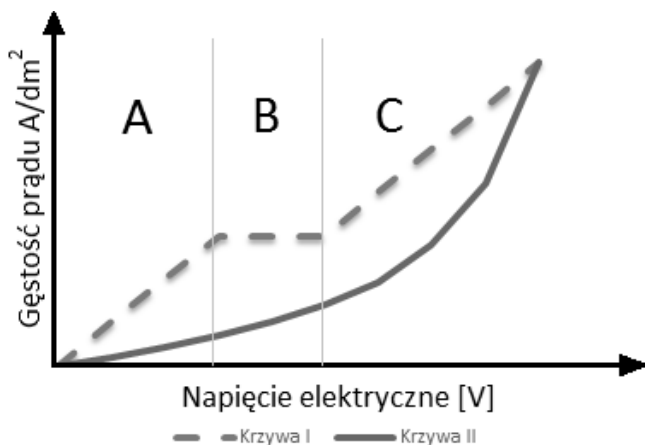
Czas elektropolerowania uzależniony jest od wielu czynników, takich jak: skład elektrolitu, skład chemiczny obrabianego metalu, warunki prądowe oraz stan powierzchni wyjściowej. Im staranniejsze jest mechaniczne wykończenie przedmiotu, tym krótszy będzie czas trwania elektropolerowania. Ubytek mate-

riału z obrabianej powierzchni jest proporcjonalny do czasu trwania procesu, tak więc jeśli polerowanie trwa za krótko, to uzyskuje się jedynie efekt wybłyszczenia powierzchni. Nadmierne zwiększenie czasu obróbki prowadzi do wzrostu kosztów bez poprawy efektu, a nawet może dojść do pogorszenia jakości powierzchni na skutek ujawnienia niejednorodności składu struktury metalu [2, 4, 11].

4.2.4. Parametry prądowe

Podstawowymi parametrami prądowymi, którymi można sterować w czasie polerowania elektrolitycznego są napięcie oraz gęstość prądu elektrycznego. W większości przypadków warunki prądowe są ustalane ze względu na wymagania gęstości prądu, a jedynie w nielicznych sytuacjach parametrem sterującym jest napięcie w określonym zakresie [2, 3].

Podczas elektropolerowania miedzi, cynku i ich stopów, parametrem kontrolowanym jest różnica potencjałów między anodą i katodą. Elektropolerowanie w tej grupie materiałów rozpoczyna się w momencie zahamowania wzrostu gęstości prądu przy dalszym wzroście napięcia, co prezentuje obszar *B* na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Krzywe polaryzacji anodowej: *krzywa I* – dla miedzi, cynku i kobaltu; *krzywa II* – dla aluminium, żelaza, niklu, cyny i ołowiu, A, B, C – obszary polaryzacji

Elektropolerowaniu żelaza, aluminium oraz niklu towarzyszy ciągły wzrost gęstości prądu przy wzroście napięcia. Dlatego w tym przypadku parametrem sterującym przebiegiem procesu jest gęstość prądu.

Wartość gęstości prądu w urządzeniach przemysłowych zmienia się w granicach od 2 do 200 A/dm².

4.3. Stan powierzchni przed polerowaniem elektrolitycznym

Gładkość powierzchni po obróbce poprzedzającej polerowanie elektrolityczne zależy od rodzaju obrabianego materiału. Parametr Rz, opisujący wysokość chropowatości powierzchni, nie powinien przekraczać $40\text{ }\mu\text{m}$ a jego wartość zalecana to $10\text{ }\mu\text{m}$. Zachodzi przy tym zależność, że powierzchnie o większej wyjściowej chropowatości są bardziej podatne na elektropolerowanie niż powierzchnie o chropowatości Rz rzędu $1,6 \div 6,3\text{ }\mu\text{m}$ [2, 8].

Przedmioty podlegające polerowaniu elektrolitycznemu powinny być przygotowane poprzez czyszczenie i odtłuszczanie. Dokładne czyszczenie nie jest konieczne jedynie w przypadku obróbki w gorącym elektrolicie, ponieważ wszelkie zanieczyszczenia powierzchniowe zostaną samoistnie usunięte przy polerowaniu. Przy obróbce w elektrolitach chłodnych oczyszczanie jest niezbędnym warunkiem prawidłowego przebiegu procesu. Wskaźnikiem dobrego odtłuszczenia przedmiotu jest równomierne zwilżanie całej jego powierzchni po opłukaniu wodą [2].

4.4. Zastosowanie elektropolerowania

Poprawa odporności na korozję, wysoki połysk, niska przyczepność powierzchniowa a także walory estetyczne powierzchni elektropolerowanych są cechami, które decydują o przydatności tej obróbki do produkcji sprzętu chirurgicznego, implantów medycznych oraz armatury ze stali kwasoodpornych. Duże zastosowanie elektropolerowanie znalazło też przy produkcji maszyn przepływowych, zwłaszcza elementów o skomplikowanym kształcie z materiałów trudnoobrabialnych. Do tych elementów zalicza się m.in.: łopatki silników odrzutowych, łopatki sprężarek, korpusy i wirniki pomp przemysłowych. Celem elektropolerowania w przypadku tych części jest obniżenie oporów przepływu, poprawa odporności na korozję i pasywację a także zastąpienie polerowania mechanicznego [1, 5, 6].

Elektropolerowanie jest stosowane również w sytuacjach, gdy wobec części stawiane są wysokie wymagania co do gładkości, współczynnika tarcia, braku karbów, mikrozadziórów a także ostrych krawędzi. Do typowych elementów poddawanych polerowaniu elektrolitycznemu można zaliczyć między innymi: koła zębate i pasowe, śruby, wały, elementy układu paliwowego, tłoki, wtryskiwacze i wiele innych [7, 11].

4.5. Wykonanie ćwiczenia

4.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z procesem polerowania elektrolitycznego, ze szczególnym uwzględnieniem obróbki powierzchni płaskich. Ponadto ćwiczenie umożliwia zapoznanie ze strategią doboru parametrów technologicznych elektropolerowania oraz oceną wpływu tych parametrów na efekt poobrobkowy.

Część praktyczna obejmuje przeprowadzenie obróbki powierzchni płaskiej próbek wykonanych metodą frezowania oraz szlifowania, o różnym wyjściowym stanie powierzchni.

4.5.2. Przebieg ćwiczenia

1. Zmierzenie parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz próbek ze stali niestopowej, wykonanych metodą frezowania oraz szlifowania na szlifierce do płaszczyzn.
2. Przeprowadzenie obserwacji mikroskopowych powierzchni próbek przeznaczonych do polerowania.
3. Pomiar grubości próbek w 10 miejscach przy użyciu mikromierza cyfrowego.
4. Dobór parametrów technologicznych elektropolerowania na podstawie zaleceń zawartych w tabeli 4.1. Za punkt wyjścia można przyjąć dostępne substancje chemiczne.
5. Przygotowanie próbek do polerowania elektrolitycznego poprzez mycie w rozpuszczalniku oraz suszenie.
6. Ważenie każdej z próbek na precyzyjnej wadze laboratoryjnej.
7. Całość procesu elektropolerowania wykonuje odpowiednio przeszkolony pracownik techniczny. Obserwacja obróbki może odbywać się z zachowaniem odpowiedniego dystansu od urządzenia i przy zastosowaniu wszelkich niezbędnych środków ochrony osobistej.
8. Mycie i suszenie próbek po elektropolerowaniu oraz ponowne pomiary chropowatości powierzchni, wymiarów (grubości) a także obserwacje mikroskopowe.
9. Ważenie każdej z próbek na precyzyjnej wadze laboratoryjnej.
10. Określenie wpływu stanu powierzchni przed obróbką polerowaniem elektrolitycznym na efekt końcowy po obróbce w aspekcie parametrów chropowatości powierzchni, masy oraz stopnia połysku.

4.5.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki elektropolerowaniem,
- b) szkic badanych próbek i rodzaj materiału, z którego zostały wykonane,
- c) schemat stanowiska do polerowania elektrolitycznego,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wnioski.

Literatura

1. Cichowicz M., Nowicki B., Szkopek T.: *Elektrolityczne polerowanie wyrobów walcowanych i odlewanych ze stali i staliw kwasoodpornych*. „Mechanik”, 1988, z. 9, s. 431–434.
2. Dobrowolski. J.: *Polerowanie elektrolityczne*. Państwowe Wydawnictwa Techniczne Warszawa 1952.
3. Hryniewicz T.: *Fizykochemiczne i technologiczne podstawy procesu elektropolerowania stali*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej Koszalin 1989.
4. Hryniewicz T., *Technologia powierzchni*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004.
5. Hryniewicz T, Rokicki R., Rokosz K.: *Metal Surface Modofication by Magneto-electropolishing*. Proc. of METAL2007, 2007, Hradecnad Moravici, Czech Republic, Symp. D, Surface Engineering., D2, s. 1–8.
6. Musialik J., Zaborski A., Tubielewicz K.: *Obróbka elektropolerowaniem narzędzi i elementów chirurgicznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 133, „Mechanika”, z. 44, Rzeszów 1995, s. 87–94.
7. Nawrat G., Simka W.: *Polerowanie elektrolityczne i pasywacja elektrochemiczna implantów z tytanu i jego stopów*. „Przemysł Chemiczny” T. 82 nr 8–9, 2003 str. 851–854.
8. Nowicki B.: *Własności powierzchni polerowanych elektrolitycznie*. „Mechanik” 11–12/ 1976, s. 590–593.
9. Rokosz K.: *Polerowanie elektrochemiczne stali w polu magnetycznym*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej Koszalin 2012.
10. Tegart W. J.: *Elektrolityczne i chemiczne polerowanie metali*. WNT, Warszawa, 1961.
11. Zaborski S., Sudzik A., Kołodziej M.: *Polerowanie elektrochemiczne wybranego elementu maszyny papierniczej*. „Mechanik” 9/2014, s. 343–348.
12. Zaleski K.: *Laboratorium obróbki ubytkowej*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001.

5. NAGNIATANIE TOCZNE WAŁKÓW

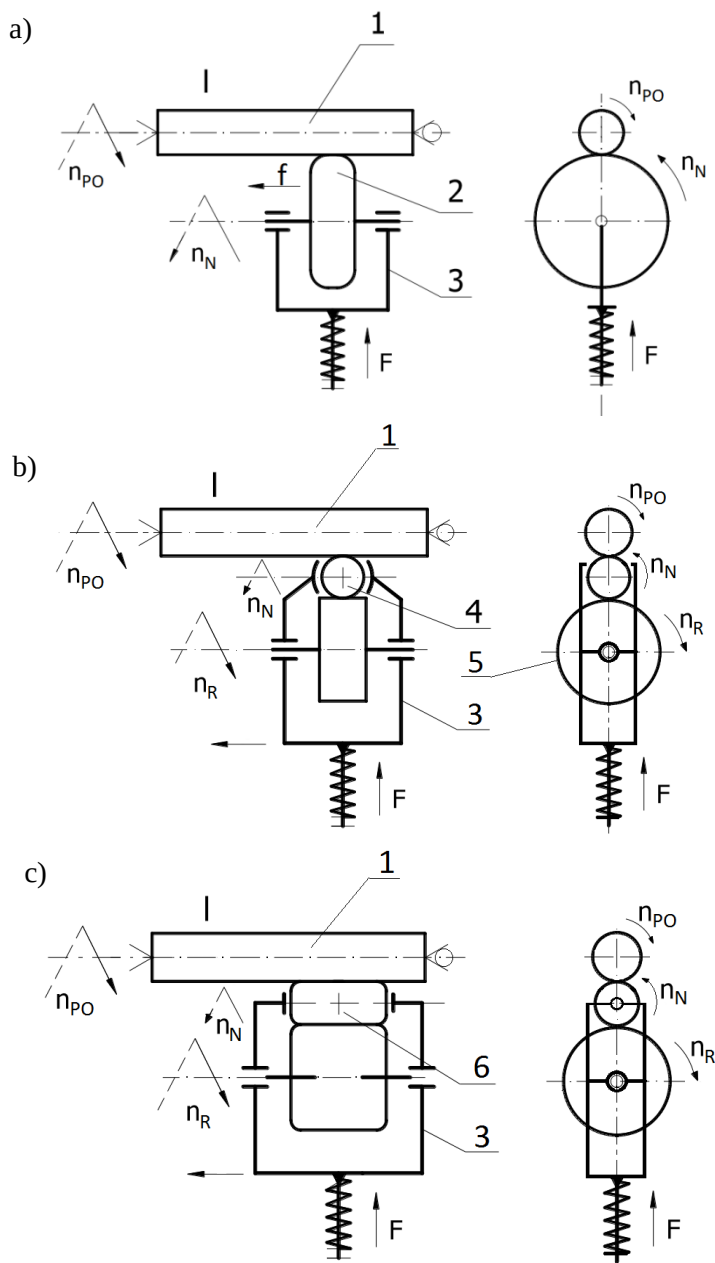
Wobec wysokich wymagań, jakie są stawiane elementom maszyn i urządzeń pod względem dokładności wykonania i gładkości obrobionych powierzchni, konieczne jest stosowanie specjalnych sposobów i warunków obróbki wykończeniowej. Przykładem takiej obróbki jest statyczne nagniatanie toczne powierzchni walcowych. Obróbka ta powoduje poprawę chropowatości powierzchni obrobionych elementów a ponadto utwardzenie warstwy wierzchniej poprzez zgmiot i wytworzenie stanu ściskających naprężeń własnych. Umocniona powierzchnia o niskiej chropowatości charakteryzuje się większą odpornością na zużycie, jest bardziej wytrzymała na obciążenie zmienne. Obróbka powierzchniowa wałków poprzez ich nagniatanie dzięki swej prostocie jest możliwa do realizacji praktycznie na każdego rodzaju tokarce.

5.1. Charakterystyka metod nagniatania tocznego

Obróbka powierzchniowa nagniataniem jest jednym ze sposobów oddziaływania na warstwę wierzchnią obrabianych elementów. Zasada obróbki polega na wykorzystaniu zjawiska umocnienia metalu w wyniku plastycznych deformacji, na pewnej głębokości od powierzchni, spowodowanych oddziaływaniem gładkiego lecz twardego narzędzia na powierzchnię obrabianą.

Nagniatanie toczne charakteryzuje się ruchem obrotowym elementów nagniatających (krążka, kulki lub rolki), które podczas obróbki toczą się bez poślizgu po obracającej się powierzchni obrabianej (rys. 5.1). Procesowi nagniatania towarzyszy statyczne oddziaływanie układu sił naporu narzędzia na obrabiany przedmiot w wyniku pokonywania sił tarcia tocznego oraz momentu bezwładności pomiędzy przedmiotem obrabianym a elementem nagniatającym narzędzia.

Odształcenia plastyczne w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego powstają w wyniku przekroczenia granicy plastyczności materiału, na który oddziałuje układ sił powodujących naciski powierzchniowe. Proces zachodzi w temperaturze otoczenia i powoduje zmniejszenie nierówności chropowatości powierzchni a także zgmiot i stekstrowanie ziaren w warstwie wierzchniej. Efektem zgmiotu jest poprawa właściwości wytrzymałościowych obrobionego elementu, wzrost odporności na korozję oraz odporności na zużycie ściernie ze względu na zwiększenie twardości powierzchni [2, 3].



Rys. 5.1. Schemat nagniatania tocznego wałków z wykorzystaniem narzędzia w kształcie:
a) krążka, b) kulki, c) rolki: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – narzędzie krążek, 3 – obudowa
nagniatąka imakowego, 4 – narzędzie kulka, 5 – rolka dociskowa, 6 – narzędzie rolka,
 n_{PO} , n_N , n_R – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, narzędzia, rolki dociskowej

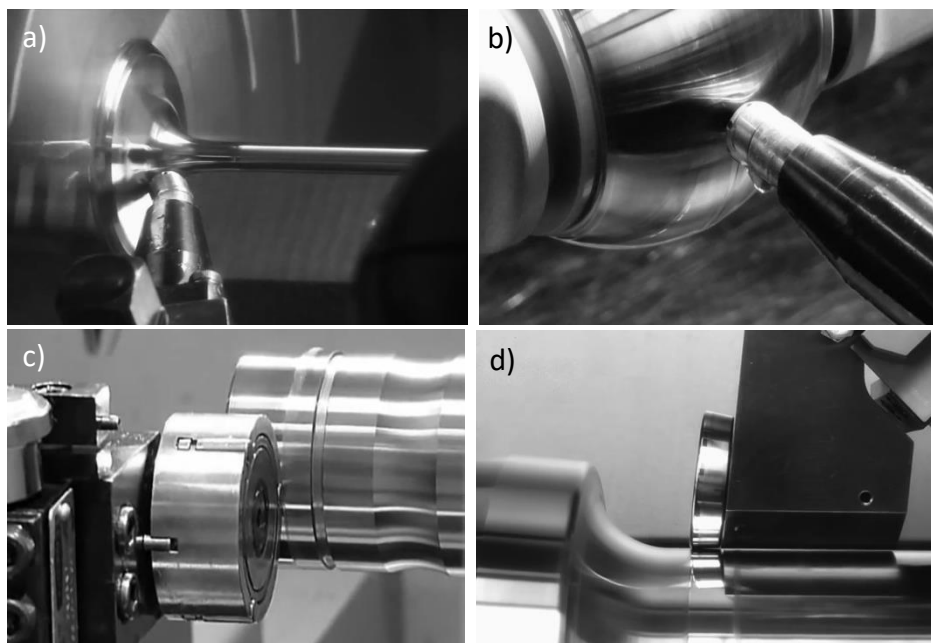
W procesie nagniatania sposobem statycznym docisk narzędzia może mieć charakter sztywny – gdzie siła powstaje w wyniku wzajemnych oddziaływań naprężeniowych narzędzia i przedmiotu, lub sprężysty – gdzie siła docisku narzędzia jest wywierana przez sprężynę, ciecz lub sprężone powietrze pod dużym ciśnieniem (siłowniki). Podczas nagniatania ze sztywnym dociskiem, siła wywierana przez narzędzie na obrabiany przedmiot zależy wyłącznie od wielkości naddatku na obróbkę [10, 12].

Nagniatanie toczne wałków jest stosowane przeważnie wówczas, gdy wymaganym efektem jest niska chropowatość powierzchni, poprawa właściwości wytrzymałościowych i odporności na korozję lub duża dokładność wymiarowo kształtowa obrobionego przedmiotu. Czasami nagniatanie toczne stosowane jest także w celu uzyskania specyficznych cech użytkowych na powierzchni elementu obrobionego. Znane jest nagniatanie czopów, panewek, prowadnic, tłoków i cylindrów poprzez wytwarzanie na powierzchni tych części specjalnych mikroworków smarnych, w celu poprawy efektywności smarowania w węzłach ciernych. Innym przykładem jest zastosowanie omawianej obróbki do wytwarzania wzorów i reliefów na powierzchni uchwytów, dźwigni, korb. Przykładem takiej obróbki jest radełkowanie stosowane przy produkcji bębnow mikromierzy. Przykłady elementów podlegających nagniataniu pokazano na rysunki 5.2 [1, 5].

W niektórych sytuacjach obróbka nagniataniem stosowana jest w celu poprawy przyczepności i jakości powłok galwanicznych, redukcji naprężeń rozciągających w elementach po obróbce cieplnej, poprawy refleksyjności powierzchni odbijających światło [12].

Zastosowanie nagniatania w produkcji seryjnej daje wiele korzyści. Z jednej strony prostota obróbki nie wymaga dużych kwalifikacji od operatora maszyny technologicznej. Z drugiej strony niski koszt narzędzia, które można mocować w imaku obrabiarki tak jak nóż tokarski, pozwala skrócić czas obróbki wykończeniowej danego elementu i obniżyć koszty produkcji. Poprzez nagniatanie toczne eliminuje się konieczność stosowania takich obróbek jak szlifowanie, dogładzanie oscylacyjne oraz polerowanie mechaniczne i elektrolityczne.

Pomimo licznych zalet stosowania obróbki nagniataniem tocznym, proces ten ma też pewne ograniczenia. Przede wszystkim elementy przeznaczone do nagniatania muszą mieć odpowiednią twardość. Zbyt mała twardość może być przyczyną powstawania falistości na obrabianej powierzchni i silnego płynięcia plastycznego materiału, co pogarsza jakość powierzchni. Z kolei zbyt duża twardość elementu, przekraczająca 45 HRC, powoduje obniżenie efektywności obróbki a dodatkowo zachodzi intensywne zużycie narzędzia [4, 7].



Rys. 5.2. Przykłady elementów obrabianych metodą nagniatania tocznego: a) nagniatanie kulką zaworu silnika spalinowego, b) nagniatanie kulką powierzchni kulistej, c) nagniatanie głowicą rolkową powierzchni cylindrycznej, d) nagniatanie rolką czopu wałka [9]

Kolejne ograniczenie w zastosowaniu obróbki nagniataniem tocznym wałków wynika ze sztywności układu obrabiarka-przedmiot-narzędzie. Przebieg obróbki oraz jakość uzyskanej powierzchni będą w dużym stopniu uzależnione od kondycji technicznej obrabiarki a zwłaszcza luzów na prowadnicach. Nagniatanie przedmiotów o zbyt małej sztywności wymaga stosowania specjalnych podtrzymek bądź narzędzi wielokrotnych. Obróbka cienkościennych cylindrów także wymaga dodatkowego podparcia przedmiotu lub stosowania specjalnych stożkowych tulei rozprężnych [6, 8].

5.2. Dobór warunków technologicznych nagniatania tocznego wałków

5.2.1. Dobór cieczy obróbkowej

Efektywność nagniatania tocznego, wyrażona w postaci uzyskanej chropowatości powierzchni oraz jej odbłaskowości, zależy od warunków smarowania. Ciecz smarująca wpływa korzystnie na przebieg procesu. W tabeli 5.1 zaprezentowano wpływ cieczy obróbkowej na jakość powierzchni po nagniataniu tocznym. Nie zaleca się jedynie stosowania cieczy obróbkowej przy nagniataniu żeliwa, ze względu na wypłukiwanie ziaren grafitu ze struktury krystalicznej [8, 14].

Tabela 5.1. Wpływ cieczy obróbkowej na chropowatość powierzchni elementów stalowych po nagniataniu tocznym [12]

Rodzaj cieczy obróbkowej	Chropowatość powierzchni Rz [μm]	Stan obrobionej powierzchni
bez smarowania	2,8	matowa, złuszczona
emulsja 5%	1,4	matowa
olej maszynowy	1,0	niski połysk
nafta + olej 1:1	1,2	średni połysk
nafta	1,1	wysoki połysk

Stosowanie nafty jako środka smarnego może powodować wypłukiwanie smaru z łożysk nagniataka, co powoduje zacieranie się elementów tocznych narzędzia. Ponadto nafta charakteryzuje się niską zwilżalnością powierzchni metalu i jest zalecana tylko przy szczególnie dużych naciskach jednostkowych. W pozostałych przypadkach zaleca się stosowanie olejów maszynowych lub mieszanin olejów z naftą [4, 13].

5.2.2. Nagniatanie z dociskiem sztywnym narzędzia

Nagniatanie z dociskiem sztywnym narzędzia może być zrealizowane narzędziem jednoelementowym lub wieloelementowym. Najważniejszym parametrem technologicznym tego procesu jest wcisk nagniatania. Wcisk jest różnicą pomiędzy nastawionym wymiarem przesuwu poprzecznego narzędzia w głąb przedmiotu obrabianego i wymiarem przedmiotu przed nagniataniem. Tak więc wcisk jest większy o wartość wpływu odkształceń sprężystych od naddatku obróbkowego, rozumianego jako różnica wymiaru przedmiotu przed i po obróbce.

W tabeli 5.2 zaprezentowano zalecane wartości wcisku stosowane przy obróbce wałków głowicami rolkowymi z dociskiem sztywnym, w zależności od wyjściowej chropowatości powierzchni.

Tabela 5.2. Zalecane wartości wcisku nagniatania podczas obróbki wałków głowicami rolkowymi z dociskiem sztywnym [12]

Chropowatość powierzchni przed nagniataniem, Ra [μm]	Chropowatość powierzchni po nagniataniu Ra, [μm]			
	0,32÷0,63	0,16÷0,32	0,10÷0,16	0,05÷0,10
	Zalecane wartości wcisku nagniatania W [mm]			
1,25÷2,5	0,01÷0,04	0,015÷0,05	0,02÷0,06	0,02÷0,08
2,5÷5,0	0,03÷0,06	0,04÷0,07	0,06÷0,09	0,08÷0,11
5,0÷10,0	0,06÷0,10	0,08÷0,13	0,09÷0,16	0,14÷0,19
10,0÷16,0	0,12÷0,17	0,14÷0,19	0,17÷0,22	0,19÷0,24

Dobierając warunki nagniatania wałków z dociskiem sztywnym, należy brać pod uwagę zjawisko łuszczenia się powierzchni przedmiotu podczas obróbki z dużymi wciskami. Z tego względu nie należy przekraczać granicznych zalecanych wartości wcisków. Zjawiska łuszczenia można uniknąć w łatwy sposób poprzez wykonanie operacji nagniatania w kilku kolejnych przejściach zamiast jednego [11].

5.2.3. Nagniatanie z dociskiem sprężystym narzędzia

Podczas nagniatania z dociskiem sprężystym, głównym parametrem wpływającym na chropowatość powierzchni i stopień umocnienia jest siła nagniatania. Przyjmuje się, że siła nagniatania F , działająca na powierzchnię kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym, równa jest naciskom jednostkowym nagniatania q_n . Aby zaszedł proces nagniatania, wartość nacisków jednostkowych q_n musi przekroczyć granicę plastyczności R_e materiału, z którego wykonany jest przedmiot obrabiany, zgodnie z równaniem [3]:

$$q_n > R_e \quad (5.1)$$

Na podstawie licznych prac badawczych ustalono, że w czasie nagniatania tocznego stali normalizowanych wymagane naciski jednostkowe powinny być około 2 razy większe od granicy plastyczności materiału, z którego wykonano przedmiot obrabiany. Biorąc pod uwagę ten warunek oraz chropowatość powierzchni

przed nagniataniem, opracowano tabelę 5.3 z zalecanymi parametrami nagniatania tocznego dla różnych materiałów [1, 5, 12].

Tabela 5.3 Zalecane naciski jednostkowe przy nagniataniu tocznym wałków w zależności od stanu powierzchni i narzędzia nagniatającego [12]

Materiał przedmiotu obrabianego	Warunki obróbki poprzedzającej		Narzędzie	
			krążek, rolka	kulka
	Sposób obróbki	Wysokość nierówności Rz [μm]	Zalecane naciski jednostkowe narzędzia q_n [MPa]	
C10E, C22, C35	toczenie	80÷320	800÷1100	950÷1000
		40÷80	600÷800	550÷950
		6,3÷40	400÷600	400÷550
		do 6,3	200÷400	200÷400
C45 C55 50G (PN)	wytaczanie	80÷320	1200÷1400	1100÷1300
		40÷80	900÷1200	800÷1100
	rozwiercanie	6,3÷40	500÷900	400÷800
		do 6,3	350÷500	300÷400
Żeliwo szare	szlifowanie	80÷320	800÷1100	800÷1100
		40÷80	600÷800	550÷800
		6,3÷40	400÷600	350÷550
		do 6,3	200÷400	200÷350
Mosiądz	toczenie wytaczanie	80÷320	800÷1100	750÷1150
		40÷80	600÷800	550÷750
		6,3÷40	350÷600	300÷550
		do 6,3	200÷350	200÷300

Znając orientacyjne wartości nacisków jednostkowych lub znając granicę plastyczności materiału obrabianego możliwe jest obliczenie rzeczywistej siły docisku narzędzia, niezbędnej do zaistnienia procesu nagniatania tocznego.

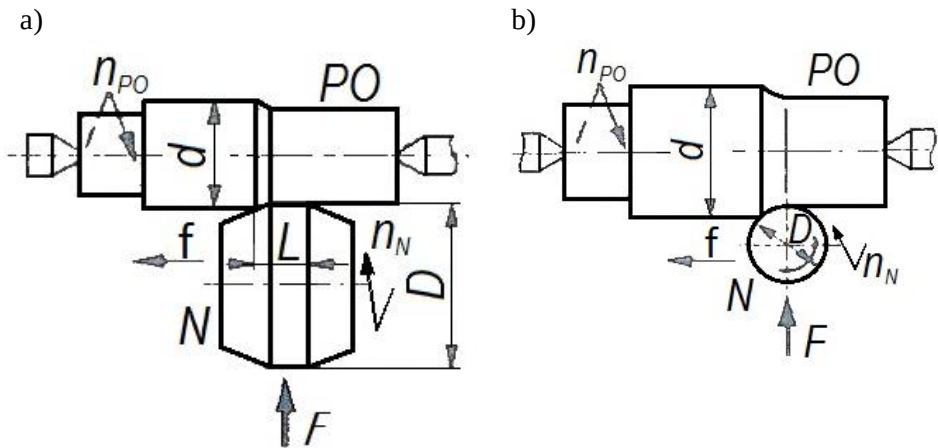
W przypadku nagniatania powierzchni cylindrycznej wałka krążkiem bądź rolką (rys. 5.3) siła docisku narzędzia może być wyrażona następującym wzorem [12]:

$$F = 7,9 \cdot \frac{d \cdot l \cdot q_n^2}{E \cdot \left(\frac{d}{D} + 1 \right)} [N], \quad (5.2)$$

gdzie: q_n – największa wartość nacisków nagniatania [MPa],
 d – średnica przedmiotu w miejscu obróbki [mm],
 D – średnica krążka, kulki lub rolki [mm],
 l – długość powierzchni kontaktu narzędzia z przedmiotem [mm],
 E – moduł Younga [MPa].

Natomiast przy nagniataniu wałków narzędziem w postaci kulki siłę docisku nagniataka oblicza się ze wzoru [12]:

$$F = \left(\frac{D \cdot q_n}{0,045 \cdot E} \right)^2 \cdot q_n [N], \quad (5.3)$$



Rys. 5.3. Schemat obróbki nagniataniem tocznym: a) krążkiem, b) kulką; PO – przedmiot obrabiany, N – narzędzie, n – prędkość obrotowa, f – posuw, F – siła docisku narzędzia, D – średnica narzędzia, d – średnica przedmiotu obrabianego, L – szerokość części walcowej rolki [12]

Dopuszczalny wzdłużny posuw nagniatania f szacuje się ze wzoru przybliżonego. Wzór wynika ze związku między promieniem zaokrąglenia narzędzia oraz wysokością nierówności powierzchni po nagniataniu tocznym [12]:

$$f \approx 2,87 \cdot \sqrt{R \cdot Rz} \left[\frac{mm}{obr} \right], \quad (5.4)$$

gdzie: R – promień zaokrąglenia narzędzia, [mm],
 Rz – oczekiwana wysokość nierówności powierzchni po nagniataniu, [mm].

Teoretyczną wysokość nierówności można obliczyć ze znanego wzoru:

$$Rz = \frac{f^2}{8 \cdot R} [mm], \quad (5.5)$$

W praktyce posuw dobiera się na podstawie sporządzonych doświadczalnie danych. Przykładem może być tabela 5.4, która zawiera zalecane parametry posuwu w funkcji średnicy kulki oraz wymaganej chropowatości przedmiotu obrabianego.

Tabela 5.4. Zalecane wartości posuwu wzdłużnego kulkowania naporowego dla wymaganej chropowatości powierzchni po nagniataniu [12]

Chropowatość powierzchni Ra [μm]		Liczba kulek w narzędziu	Posuw nagniatania [mm/obr] w funkcji średnicy narzędzia [mm]				
Wymagana	Początkowa		6	10	20	40	100
0,32÷0,63	2,5÷5	1	0,20	0,25	0,35	0,50	0,80
0,16÷0,32	1,25÷2,5		0,14	0,20	0,25	0,35	0,60
0,1÷0,16	1,25÷2,5		0,10	0,15	0,20	0,25	0,40
0,05÷0,1	0,63÷1,25		0,07	0,10	0,12	0,20	0,30

O czasie trwania obróbki oraz o wartości posuwu decyduje liczba przejść i liczba aktywnych elementów nagniatających w narzędziu. Oba parametry sprowadza się do jednej zależności, która nosi nazwę uogólnionej liczby przejść u i opisana jest wzorem [12]:

$$u = \frac{l}{f} \cdot z \cdot i \quad (5.6)$$

gdzie: l – długość kontaktu narzędzia z przedmiotem, [mm],
 f – posuw nagniatania [mm/obr],
 z – liczba czynnych elementów nagniatających w narzędziu,
 i – liczba przejść narzędzia.

Czynnikiem determinującym liczbę przejść narzędzia są kwestie ekonomiczne. Zwiększenie uogólnionej liczby przejść prowadzi do wydłużenia czasu maszynowego, a tym samym wydłużenia całego procesu technologicznego. Wartość zalecana wynosi $u = 50$, ale dąży się do jej zminimalizowania [12].

Liczba przejść narzędzia powinna być możliwie najmniejsza. Wynika to z zależności opisującej wydajność nagniatania. Wydajność obróbki gładkościowej nagniataniem tocznym jest odwrotnie proporcjonalna do czasu maszynowego, który opisuje równanie [12]:

$$t_m = \frac{i \cdot L}{f \cdot n} \text{ [min]}, \quad (5.7)$$

gdzie: i – liczba przejść narzędzia,
 L – długość drogi ruchu narzędzia w jednym przejściu, [mm],
 f – posuw nagniatania [mm/obr],
 n – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego, [obr/min].

Stopień przyrostu twardości materiału warstwy wierzchniej przedmiotu nagniatanego rośnie wraz ze wzrostem docisku narzędzia oraz liczbą przejść. Natomiast przy zwiększaniu parametrów posuwu oraz prędkości nagniatania efekt utwardzenia zmniejsza się [4, 13].

5.3. Wykonanie ćwiczenia

5.3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami nagniatania tocznego wałków z dociskiem sprężystym, ze szczególnym uwzględnieniem rolowania i kulkowania oraz sposobem doboru warunków obróbki i ich wpływem na efekt końcowy. Część praktyczna obejmuje przeprowadzenie procesu nagniatania tocznego wałka na tokarce za pomocą narzędzi w kształcie rolki i kuli.

5.3.2. Przebieg ćwiczenia

1. Pomiar parametrów chropowatości powierzchni R_a i R_z oraz twardości powierzchni cylindrycznej dla dwóch wałków wykonanych ze stali konstrukcyjnej oraz z żeliwa szarego.
2. Przeprowadzenie obserwacji mikroskopowych powierzchni wałków przed nagniataniem tocznym.
3. Pomiar średnicy wałków w 10 przekrojach na wyznaczonej długości oraz obliczenie wartości średniej i odchylenia standardowego.
4. Dobór zalecanych nacisków jednostkowych q_n wywieranych przez narzędzie na podstawie tabeli 5.3.
5. Obliczenie wymaganej siły docisku F narzędzia do przedmiotu obrabianego.
6. Obliczenie uogólnionej liczby przejść a także czasu maszynowego obróbki nagniataniem tocznym.
7. Przeprowadzenie obróbki nagniataniem tocznym z dociskiem sprężystym dwóch wałków przy zmiennych parametrach posuwu oraz przy zmiennej liczbie przejść.
8. Ponowny pomiar chropowatości powierzchni R_a i R_z wałków oraz twardości powierzchni cylindrycznej po nagniataniu.
9. Przeprowadzenie obserwacji mikroskopowych powierzchni wałków po nagniataniu tocznym.
10. Pomiar średnicy wałków w 10 przekrojach na wyznaczonej długości oraz obliczenie wartości średniej i odchylenia standardowego.
11. Określenie wpływu parametrów technologicznych na jakość powierzchni oraz stopień utwardzenia.

5.3.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki nagniataniem tocznym,
- b) szkice próbek oraz rodzaj materiału, z którego zostały wykonane,
- c) schemat blokowy stanowiska i szkice narzędzi,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wnioski.

Literatura

1. Bednarski P., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Toboła D.: *Badania wybranych właściwości fizycznych i stereometrycznych warstwy wierzchniej uzyskanej po nagniataniu tocznym stali hartowanych rolkami z węglików spiekanych*. Materiały Konferencji nt. Innovative Manufacturing Technology. Kraków 2011, s. 336–349.
2. Czechowski K., Polowski W., Wszolek J.: *Nagniatanie toczne jako metoda obróbki wykończeniowej*. „Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie”, 2009, czerwiec, s. 22–31.
3. Dyl T.: *Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności*. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia 2014.
4. Górski E.: *Obróbka gładkościowa*. WNT Warszawa 1970.
5. Grzesik W.: *Polepszenie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych Cz. III. Nagniatanie toczne i ślizgowe twardych stali*. „Mechanik” 2012 R 85 nr 7, s. 558–563.
6. Grzesik W., Żak K., Prażmowski M.: *Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing*. J. of Mach. Eng. Vol. 12/1 (2012), s. 18–27.
7. Hryniewicz T.: *Technologia powierzchni*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2004.
8. Laber S.: *Analiza współzależności pomiędzy stanem warstwy wierzchniej a właściwościami użytkowymi żeliwnych elementów maszyn obrabianych nagniataniem*. WSI Zielona Góra 1985.
9. Materiały promocyjne firmy Ecoroll, www.ecoroll.com, dostęp 20.11.2017.
10. Parol A.: *Obróbka powierzchniowa dogniataniem*. Wyd. WSI Lublin 1977.
11. Przybylski W., Waszczur P., Dobrzyński M.: *Analiza doboru parametrów obróbkowych w toczeniu na twardo w kontekście nagniatania gładkościowego*. Materiały V Szkoły Obróbki Skrawaniem. Opole 2011, s. 327–334.
12. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT Warszawa 1987.
13. Polowski W.: *Nagniatanie. Rozdział w Poradniku inżyniera, konstruktora i mechanika. Obróbka skrawaniem w praktyce pod redakcją J. Stósa*. Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa, 2008.
14. Tubielewicz K.: *Technologia nagniatania żeliwnych części maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.

6. NAGNIATANIE TOCZNE POWIERZCHNI PŁASKICH

Intensywny rozwój obrabiarek i ich systemów sterowania, jak również systemów komputerowego wspomaganie projektowania procesów technologicznych umożliwia osiągnięcie dużych wydajności i jakości powierzchni podczas obróbki nagniataniem.

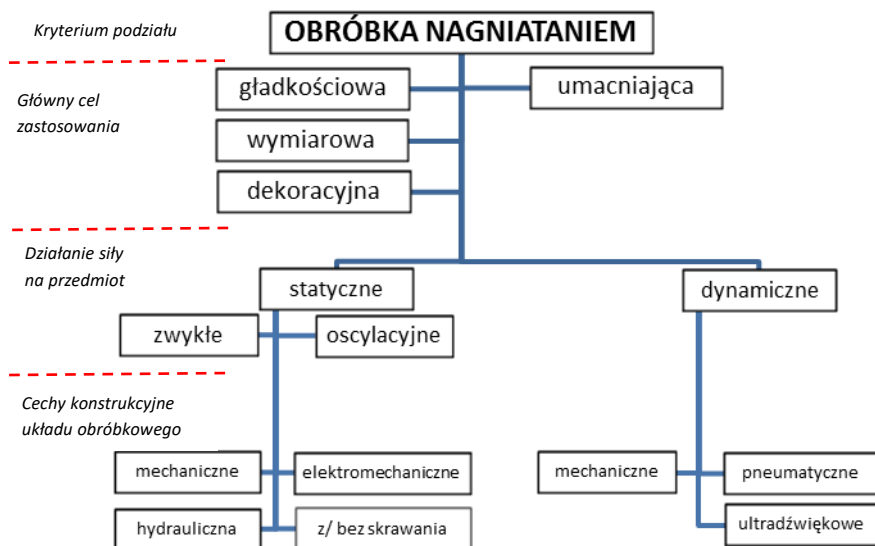
Technologia ta stosowana jest jako obróbka wykończeniowa gładkościowa i umacniająca. Może ona być realizowana na uniwersalnych obrabiarkach i centrach obróbkowych [3, 9].

Zaletami technologii nagniatania, dotyczącymi jakości powierzchni przedmiotu obrabianego, są [9]:

- uzyskanie powierzchni o bardzo małej chropowatości ($R_a = 0,2 \div 0,8 \mu\text{m}$), charakteryzującej się dużymi promieniami zaokrąglenia wierzchołków i wgłębień profilu oraz o dużym udziale nośnym profilu nierówności,
- zapewnienie małego współczynnika tarcia, dużego współczynnika odbicia światła i dobrej przyczepności środków smarnych oraz dobrej przyczepności i równomierności nakładanych twardych powłok,
- zwiększenie odporności przedmiotów na działanie czynników eksploatacyjnych, takich jak: ścieranie, zmęczenie postaciowe i powierzchniowe oraz korozja.

Technologia nagniatania sklasyfikowana jest według następujących kryteriów (rys. 6.1):

- cel obróbki,
- rodzaj i liczba elementów nagniatających,
- cechy kinematyczno-konstrukcyjne układu obróbkowego,
- charakter działania siły na przedmiot,
- rodzaj współpracy narzędzia z przedmiotem,
- rodzaj kontaktu elementu nagniatającego narzędzia z powierzchnią obrabianą [3, 9].



Rys. 6.1. Klasyfikacja obróbki nagniataniem

6.1. Istota procesu nagniatania tocznego powierzchni płaskich

Obróbka nagniataniem tocznym, zaliczana do nagniatania statycznego, pozwala na kształtowanie powierzchni walcowych (zewnątrznych i wewnętrznych), kształtowych oraz płaskich. Umożliwia ona na obróbkę płyt, przewodnic, powierzchni bocznych tulei oporowych i uszczelniających, powierzchni płaskich typu kołnierz armatury w instalacjach rurociągów okrętowych [2, 3].

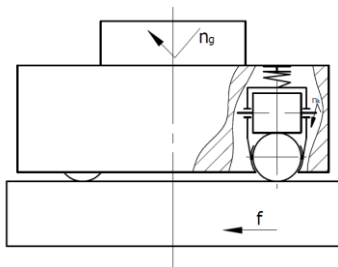
Nagniatanie toczne w obróbce powierzchni płaskich stosowane jest w celu wygładzenia, poprawy płaskości, umocnienia oraz wykonania mikrorowków smarnych. Technologia ta w pewnych przypadkach pozwala na zastąpienie szlifowania i docierania powierzchni płaskich [9].

Nagniatanie toczne elementów płaskich na frezarkach lub centrach frezarskich może być realizowane za pomocą nagniataków lub głowic nagniatających [3]. Wybór narzędzia nagniatającego do obróbki wpływa na kinematykę procesu. Nagniatanie toczne elementów płaskich z powodzeniem może być również wykonywane na tokarce przy wykorzystaniu specjalnego oprzyrządowania [10].

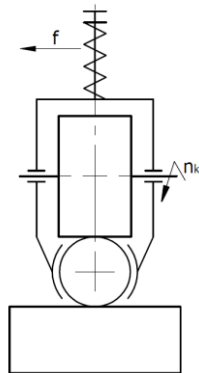
Podczas nagniatania powierzchni płaskiej głowicą nagniatającą, głowica ta zamocowana jest we wrzecionie obrabiarki (rys. 6.2a) i wykonuje ruch główny, który jest ruchem obrotowym. Elementy nagniatające, podtrzymywane w koszyku, toczą się bez poślizgu po powierzchni obrabianej, jak i po powierzchni bież-

ni, która obraca się względem korpusu głowicy. Przedmiot obrabiany wykonuje ruch posuwowy [7, 11].

a)



b)



Rys. 6. 2. Kinematyka nagniatania tocznego powierzchni płaskich
a) głowicą nagniatającą, b) nagniatakiem

Przy nagniataniu tocznym nagniatakiem (rys. 6.2b), ruchem głównym jest ruch wymuszający ruch toczny elementu nagniatającego, stanowiącego część narzędzia zamocowanego w nieobrótającym się wrzecionie frezarki, po obrabianiu powierzchni [4].

Możliwości układów kinematycznych i sterowania obrabiarek pozwalają na przeprowadzenie nagniatania tocznego powierzchni płaskich i krzywoliniowych na frezarkach lub centrach frezarskich. Nagniatanie na tego typu maszynach technologicznych za pomocą nagniataka wiąże się z przyjęciem odpowiedniej strategii, która powinna zapewnić:

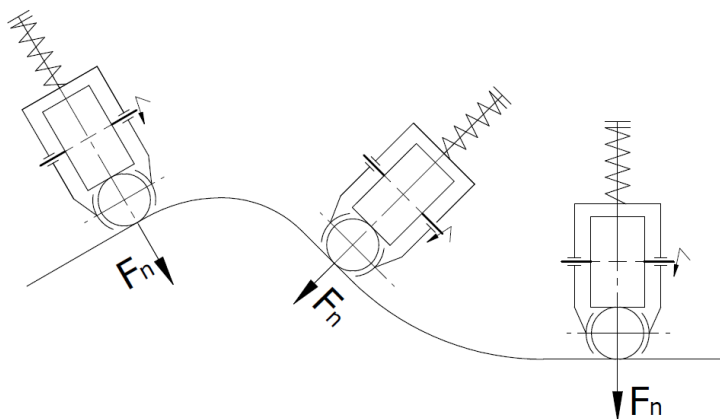
- stałą siłę nagniatania (tj. stały docisk narzędzia w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej),
- stałą odległość pomiędzy kolejnymi przejściami wierszującymi narzędzia,
- stały, w miarę możliwości, kontakt narzędzia z materiałem obrabianym,
- zgodność kierunku głównego ruchu z kierunkiem ruchu tocznego narzędzia [11].

Podczas obróbki głowicą nagniatającą powierzchni płaskiej wymagane jest:

- aby wszystkie elementy nagniatające pozostawały w stałym kontakcie z powierzchnią obrabianą,
- został zachowany stały docisk wszystkich elementów nagniatających w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej [11].

Podczas nagniatania tocznego powierzchni krzywoliniowych na frezarce lub centrum frezarskim 3 – osiowym wymagane jest, aby składowa normalna siły osiowej F_n (prostopadła do powierzchni przedmiotu obrabianego) miała wartość stałą, wiąże się to z odpowiednim sterowaniem wartością siły osiowej narzędzia F_o . Jakikolwiek odstępstwa od założonej siły nagniatania będą skutkowały uzyskaniem odmiennej od założonej struktury geometrycznej powierzchni. Nastąpić może również przekroczenie zakładanej wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Przekroczenie wartości siły podczas obróbki może powodować łuszczenie i odpadanie fragmentów warstwy wierzchniej podczas eksploatacji części. W przypadku obróbki na 5 – osiowym centrum frezarskim możliwe jest zawsze ustawienie narzędzia prostopadłe do powierzchni przedmiotu obrabianego, co ułatwia sterowanie wartością siły nagniatania (rys. 6.3) [11].

Kolejnym wyzwaniem technologicznym procesu nagniatania tocznego na frezarkach jest posuw poprzeczny. Jest to parametr technologiczny, który w sposób istotny determinuje wysokość nierówności powierzchni po obróbce poprzedzającej, którą bardzo często jest frezowanie, jak i podczas samego nagniatania. Uwzględniając ekonomikę obróbki poprzedzającej bardzo często teoretyczna wysokość mikronierówności w kierunku posuwu (Rz_{fr}) jest mniejsza niż w kierunku prostopadłym (Rz_{fw}) oznacza to konieczność nagniatania w kierunku prostopadłym do śladów wierszowania celem uzyskania jak najlepszych efektów [11].



Rys. 6.3. Ustawienie narzędzia prostopadle do powierzchni obrabianej na 5 – osiowym centrum frezarskim (F_n – składowa normalna siły osiowej)

Średnica elementu nagniatającego w sposób istotny wpływa na wielkość siły użytej w procesie nagniatania. Większa średnica elementu nagniatającego przyczynia się do powstawania mniejszych nacisków na powierzchni przedmiotu obrabianego, a zatem mniejszych naprężeń w warstwie wierzchniej. Z kolei, im większa średnica elementu nagniatającego, tym musi być użyta większa siła aby osiągnąć zamierzone efekty struktury geometrycznej powierzchni. W przypadku kiedy obróbką poprzedzającą jest frezowanie, wykonane frezem kulistym lub składanym frezem torusowym, średnica elementu nagniatającego powinna być identyczna lub mniejsza jak narzędzia skrawającego [11].

Ważnym zagadnieniem, podczas nagniatania narzędziem z dociskiem wywołanym za pomocą wstępnie napiętej sprężyny, jest aby sprężyna się ugięła, narzędzie natomiast powinno się przybliżyć o niewielką odległość do przedmiotu obrabianego. Oznacza to, że narzędzie nagniatające, gdy osiągnie styk z powierzchnią przedmiotu obrabianego, zmienia swoją długość (ugięcie sprężyny). Zaistniałe zjawisko wpływa istotnie na sposób dojścia narzędzia do strefy obróbki. Najbardziej odpowiednim sposobem dojścia do materiału dla narzędzia jest wejście liniowe, wzdłuż osi narzędzia normalnie do obrabianej części. Taki sposób przemieszczania się narzędzia nie powoduje uszkodzenia ostrych zewnętrznych krawędzi przedmiotu obrabianego czy wykruszenia powierzchni elementu nagniatającego [1].

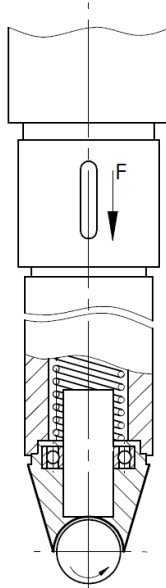
6.2. Narzędzia do nagniatania powierzchni płaskich

Rozwój obróbki nagniataniem, jako obróbki wykończeniowej, skłania do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi. Wiodącymi producentami narzędzi do nagniatania są firmy Ecoroll, Cogsdill, Yamasa, Bright, Baubles AG, TIZ Implements oraz Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW). Prace badawcze w obszarze narzędzi do nagniatania tocznego są prowadzone również w Instytucie Technologii Mechanicznej w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym.

Nagniatanie toczne elementów płaskich może być wykonywane za pomocą nagniataków, narzędzie z jednym elementem nagniatającym, oraz głowic nagniatających, narzędzie składające się z wielu elementów nagniatających. Siła nagniatania podczas obróbki może być wywierana w sposób mechaniczny, (docisk sztywny lub sprężysty), albo hydrostatycznie [7].

Nagniatak z dociskiem mechanicznym (rys. 6.4), zbudowany jest z korpusu, w którym znajduje się sprężyna śrubowa, pozwalająca na wywieranie siły docisku zamocowanego zespołu roboczego do powierzchni obrabianej. Wartość siły

docisku narzędzia do powierzchni obrabianej regulowana jest najczęściej poprzez nakrętkę regulacyjną i odczytywana na podziałce przytwierdzonej do korpusu [2]. Pomimo swojej prostej budowy, nagniatka z dociskiem sprężystym pozwala na znaczną redukcję parametrów chropowatości [4].

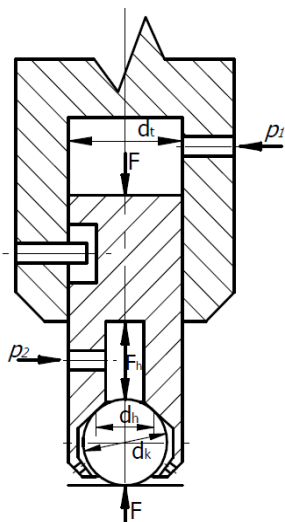


Rys. 6.4. Schemat nagniatka kulkowego z dociskiem mechanicznym do obróbki powierzchni płaskich na frezarce (F – siła docisku)

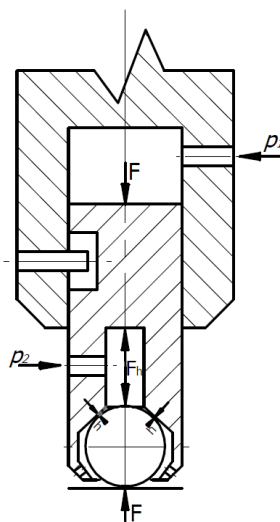
Do obróbki powierzchni płaskich obecnie z powodzeniem stosowane są nagniatki hydrostatyczne. Budowę i zasadę działania przedstawiono na rysunku 6.5. W korpusie narzędzia umieszczony jest tłok o średnicy d_t . Działająca na tłok ciecz o ciśnieniu p_1 wytwarza siłę F . W dolnej części tłoka znajduje się kulka nagniatająca o średnicy d_k , która styka się z gniazdem stożkowym o średnicy d_h (rys. 6.5a). Jeśli w komorze nad kulką ciśnienie $p_2 = 0$, wówczas cała powstała nad tłokiem siła F przenoszona jest poprzez metalowy styk kulki z panewką łożyska (rys. 6.5b). W tym momencie brak jest w narzędziu łożyska hydrostatycznego. Wzrost ciśnienia p_2 powoduje powstanie szczeliny o szerokości h , co przyczynia się do zmniejszenia kontaktu pary kulka-panewka. W chwili spełnienia równości $F = F_h$ zaistnieją warunki utworzenia się łożyska hydrostatycznego. wówczas pomiędzy kulką i panewką wytworzy się szczelina h , która pozwala na przepływ cieczy i powstanie w pełni hydrostatycznego łożyskowania kulki (rys. 6.5c). W chwili gdy nastąpi przerwanie kontaktu kulki z przedmiotem

obrabanym nastąpi przesunięcie się tłoka w skrajne dolne położenie. Wówczas ma miejsce również wypływ cieczy z łożyska hydrostatycznego

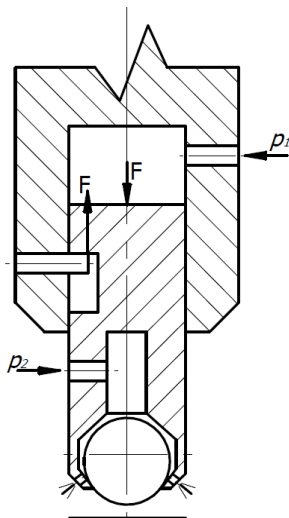
a)



b)



c)



Rys. 6.5. Schemat i zasada pracy nagiataka łożyskowanego hydrostatycznie do obróbki powierzchni płaskich na frezarce: a) częściowo obciążona podpora hydrostatyczna, b) pełne łożyskowanie hydrostatyczne, c) utrata kontaktu przedmiot-narzędzie (d_k – średnica kulki nagiatającej, d_h – średnica gniazda stożkowego, d_t – średnica tłoka, p_1 – ciśnienie, p_2 – ciśnienie, F_h – siła działająca w komorze łożyska, F – siła)

przez promieniowe otwory w dolnej części obejmują kulki, dzięki czemu dochodzi do spadku ciśnienia p_2 , co zabezpiecza narzędzie przed uszkodzeniem [4, 11]. Zaletą nagniataków łożyskowanych hydrostatycznie jest łatwość regulacji siły wywieranej przez kulkę oraz możliwość swobodnego przesuwania się elementu nagniatającego w pewnym zakresie, właściwym dla konkretnego narzędzia [7].

Do obróbki dużych powierzchni płyt i przewodnic stosowane są głowice wieloelementowe z dociskiem sztywnym lub sprężystym. Głowica mocowana jest za część chwytową we wrzecionie obrabiarki. Elementy nagniatające, podtrzymywane w obracającym się na łożysku tocznym koszyku, toczą się po twardej pierścieniowej bieżni, pod wpływem siły tarcia (głowica z dociskiem sztywnym) albo poprzez docisk sprężyny śrubowej do elementu nagniatającego, który regulowany jest za pomocą nakrętki [9].

6.3. Właściwości warstwy wierzchniej

Efekty przeprowadzonego nagniatania tocznego powierzchni płaskich na frezarkach w dużym stopniu zależą od stanu struktury geometrycznej powierzchni (SGP) po obróbce poprzedzającej, którą często jest frezowanie, oraz od rodzaju materiału obrabianego i twardości obrabianego wyrobu.

Nagniatanie toczne narzędziami hydrostatycznymi pozwala na uzyskanie chropowatości powierzchni $R_a = 0,1 \div 0,2 \text{ } \mu\text{m}$. Efektywność przeprowadzonej obróbki zależy od twardości materiału obrabianego. Gdy twardość jest mniejsza od 30 HRC parametr chropowatości powierzchni R_a może się zmniejszyć o 70%÷90%, natomiast przy twardości powyżej 50 HRC zmiany parametru R_a są zdecydowanie mniejsze (15%÷30%) [7].

Przeprowadzając obróbkę nagniataniem powierzchni przestrzennej po frezowaniu, wykonanej ze stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A), można uzyskać kilkunastokrotne zmniejszenie parametru R_a , (np. parametr $R_a = 0,11 \text{ } \mu\text{m}$ podczas obróbki z siłą nagniatania $F = 100 \text{ N}$, posuw poprzeczny $f_{wn} = 0,06 \text{ mm}$) [6].

Obróbka nagniataniem tocznym powoduje zmianę charakteru struktury geometrycznej powierzchni ze zdefiniowanej na losową lub mieszaną [6].

W wyniku nagniatania głowicami kulkowymi z dociskiem sprężystym można uzyskać chropowatość powierzchni (po uprzednim frezowaniu) na poziomie $R_a = 0,32 \div 0,64 \text{ } \mu\text{m}$ i przyrost twardości o 20%, co pozwala na zastąpienie szlifowania [9].

Znaczną poprawę struktury geometrycznej powierzchni a także równomiernej jakości na różnych jej obszarach uzyskuje się stosując nagniatanie w dwóch lub więcej przejściach. Uzyskane efekty obróbki są współzależne od przyjętej

strategii nagniatania. Wyrażna poprawa jakości powierzchni ma miejsce przy zwiększeniu liczby przejść. Nie bez znaczenia, ze względu na uzyskane rezultaty, jest odpowiedni dobór trajektorii frezowania, które bardzo często jest obróbką poprzedzającą [7]. Najlepsze rezultaty w aspekcie wygładzenia powierzchni uzyskuje się stosując strategię nagniatania w kierunku ortogonalnym do kierunku posuwu frezowania, które było wykonane frezem kulistym [5].

Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi pozwala na ukonstytuowanie żądanego stanu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Nagniatanie jednocześnie z dwóch stron łopatek sprężarki, powoduje, że siły równoważą się, nie odkształcając części [8].

6.4. Wykonanie ćwiczenia

6.4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z obróbką nagniataniem tocznym powierzchni płaskich. Część praktyczna ćwiczenia obejmuje wykonanie prób nagniatania tocznego powierzchni płaskich na pionowej frezarce.

6.4.2. Przebieg ćwiczenia

1. Dla danego rodzaju materiału elementu obrabianego dobrać parametry technologiczne nagniatania tocznego (siłę nagniatania, posuw oraz prędkość nagniatania) korzystając z instrukcji stanowiskowej.
2. Dokonać pomiaru chropowatości powierzchni oraz mikrotwardości próbek przed obróbką nagniataniem.
3. Przeprowadzić nagniatanie toczne płaskich próbek na frezarce pionowej dla zmiennych parametrów technologicznych (prędkość nagniatania i posuw).
4. Zmierzyć chropowatość powierzchni oraz mikrotwardość obrobionych próbek.
5. Przeprowadzić ocenę właściwości stereometrycznych warstwy wierzchniej oraz wyznaczyć stopień umocnienia.

6.4.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki nagniataniem tocznym powierzchni płaskich,
- b) szkic badanej próbki i charakterystykę materiału, z którego została wykonana,
- c) schemat stanowiska wykorzystanego w próbach nagniatania,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,

- e) wyniki pomiarów i ich analizę,
- f) wnioski.

Literatura

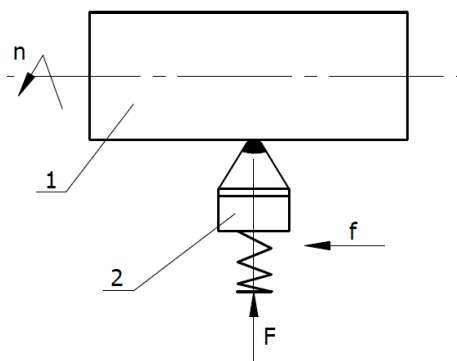
1. Czechowski K., Polowski W., Czerwiński A., Kalisz J., Toboła D., Janczewski Ł., Wrońska I.: *Wybrane aspekty nagniatania powierzchni krzywoliniowych*. „Obróbka Metalu”, 2012, 3, s. 58, 60–62, 64–65.
2. Czechowski K., Polowski W., Kalisz J., Janczewski Ł., Toboła D., Wszolek J.: *Zestaw narzędzi do nagniatania tocznego i ślizgowego powierzchni złożonych na obrabiarkach CNC*. „Mechanik”, 2012, 12, s. 1041–1044.
3. Dyl T.: *Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2011, 71, s. 38–48.
4. Grochała D.: *Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC – praca doktorska*, Szczecin, ZUT, 2011.
5. Kalisz J., Czerwiński A., Janczewski Ł., Czechowski K., Polowski W., Toboła D.: *Wybrane aspekty modyfikacji struktury geometrycznej powierzchni po frezowaniu za pomocą nagniatania tocznego i ślizgowego*. „Mechanik”, 2013, nr 8–9, s. 201–208.
6. Kalisz J., Janczewski Ł., Czechowski K., Czerwiński A., Polowski W., Łętocha A.: *Rozwój technologii nagniatania tocznego powierzchni frezowanych*. „Mechanik”, 2014, 3, s. 186–189.
7. Olszak W., Grochała D.: *Nagniatanie powierzchni 3D na frezarkach CNC*. [w:] Przybylski W. (red.): *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Politechnika Gdańska, 2008, s. 387–398.
8. Prev y P. S., Jayaraman N.: *Overview of low plasticity burnishing for mitigation of fatigue damage mechanisms*. <http://www.lamdatechs.com/documents/260.pdf> – 06.11.2017
9. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. Warszawa, WNT, 1987.
10. Skoczylas A., Zaleski K.: *Struktura geometryczna powierzchni przedmiotów ze stali C45 wycinanych laserem a następnie nagniatanych tocznie*. *Mechanik*, 2014, 11, s. 228–235.
11. Sosnowski M., Grochała D.: *Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych z łożonych na centrach obróbkowych*. „Mechanik”, 2011, 1, s. 15–18.
12. Patent – PL 192153 Głowica do nagniatania tocznego.

7. NAGNIATANIE ŚLIZGOWE NARZĘDZIAMI DIAMENTOWYMI

7.1. Istota procesu nagniatania ślizgowego

Obróbka nagniataniem jest jednym ze sposobów obróbki wykończeniowej elementów maszyn, polegającym na wykorzystaniu powierzchniowego odkształcenia plastycznego wytwarzanego w warstwie wierzchniej przedmiotu w wyniku oddziaływania narzędzia na powierzchnię obrabianą. Ze względu na kinematykę procesu można wyróżnić dwie podstawowe metody nagniatania: dynamiczne i statyczne [9]. Nagniatanie ślizgowe zaliczane jest do grupy metod statycznych nagniatania.

Podczas nagniatania twardy i gładki element nagniatający dociskany do powierzchni obrabianej z odpowiednią siłą, przemieszcza się po obrabianej powierzchni, wywołując w strefie nagniatania tarcie ślizgowe oraz plastyczne odkształcenie i wygładzenie nierówności powierzchni (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Kinematyka procesu nagniatania ślizgowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – narzędzie

Nagniatanie ślizgowe przydatne jest do obróbki:

- przedmiotów o małej sztywności (tuleje cienkościenne, wałki o małej średnicy),
- elementów wykonanych ze stopów metali o dużej twardości (stale hartowane),
- elementów z powłokami galwanicznymi, dyfuzyjnymi itp. (azotowanych, chromowanych, nawęglanych i hartowanych oraz innych) [2, 4],
- elementów o małych wymiarach,

- elementów, które również mogą być nagniatane kulkowaniem naporowym tocznym (przedmioty wykonane ze stali o niskiej i średniej twardości, metali kolorowych, stopów żelaznych) [3].

Do mocnych stron technologii nagniatania ślizgowego należy zaliczyć:

- możliwość uzyskania powierzchni o bardzo małej chropowatości,
- dużą przyczepność i równomierność nakładanych twardych powłok na powierzchnie po nagniataniu,
- małą siłę nagniatania (mała powierzchnia styku z materiałem obrabianym),
- możliwość poprawy dokładności kształtowo-wymiarowej o 1÷2 klasy, w granicznych przypadkach można uzyskać dokładność w klasie IT7÷IT5 dla otworów, a dla wałków IT8÷IT6,
- wyeliminowanie lub ograniczenie pracochłonnych operacji wykończeniowej obróbki ścierniej (honowanie, szlifowanie, dogładzanie, polerowanie),
- możliwość stosowania narzędzi nagniatających na obrabiarkach uniwersalnych i sterowanych numerycznie [3, 18].

Wadami i ograniczeniami technologii nagniatania ślizgowego są:

- utrudniona obróbka małych otworów, powierzchni kształtowych, małych promieni przejść itp.,
- w związku z podatnością układu OUPN (obrabarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie) nagniatanie ślizgowe powinno być realizowane na obrabiarkach o dużej sztywności,
- mała wydajność spowodowana niewielkimi wymiarami narzędzi oraz koniecznością stosowania małych wartości posuwów,
- mała głębokość umocnienia, co ogranicza zastosowanie nagniatania ślizgowego jako obróbki umacniającej tylko dla elementów o małych wymiarach [3].

Obróbka nagniataniem ślizgowym może być realizowana z dociskiem sztywnym bądź sprężystym. Zastosowanie podczas nagniatania docisku sztywnego pozwala na uzyskanie dużej dokładności kształtowo-wymiarowej i zmniejszenie błędów kształtu po obróbce poprzedzającej [9]. W praktyce nagniatanie z dociskiem sztywnym może być stosowane raczej do obróbki krótkich przedmiotów. Nagniatanie z dociskiem sprężystym jest łatwiejsze w realizacji, gdyż obróbka nie wymaga szczególnie dokładnych obrabiarek [3].

Podczas nagniatania ślizgowego następuje minimalne zmniejszenie wymiaru przedmiotu obrabianego (w granicach wysokości nierówności R_z) i dlatego nie ma potrzeby przewidywania specjalnych nadatków obróbkowych [3].

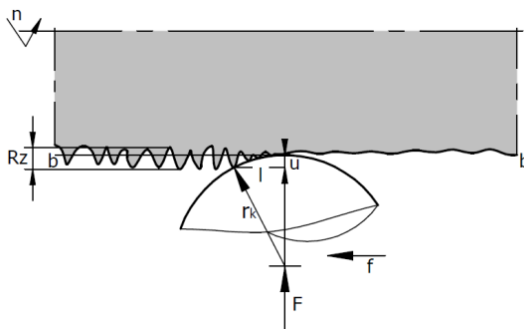
Nagniatanie ślizgowe ze względu na cel obróbki może być stosowane jako:

- a) gładkościowe,
- b) umacniające,
- c) wymiarowe [3].

7.2. Odształcenia warstwy wierzchniej w procesie nagniatania ślizgowego

Model odształcenia materiału za pośrednictwem ślizgającej się powierzchni kulistej (rys. 7.2) ma na celu opisanie za pomocą równania matematycznego wpływu czynników zmiennych na siłę docisku narzędzia do powierzchni obrabianej.

Spotkane w literaturze technicznej modele nagniatania ujmują zależności pomiędzy głębokością odształcenia plastycznego obrabianego przedmiotu, siłą nagniatania i właściwościami materiału obrabianego w postaci formuły [3]. Powierzchnia obrabiana rozpatrywana jest jako powierzchnia idealnie gładka. Pozwala to na wyznaczenie siły nagniatania wyłącznie w zależności od żądanej głębokości umocnienia warstwy wierzchniej, właściwości sprężysto-plastycznych materiału obrabianego oraz geometrii styku narzędzie-przedmiot obrabiany [3].



Rys. 7.2. Model procesu nagniatania ślizgowego narzędziem zakończonym kuliścią: r_k – promień zaokrąglenia końcówki narzędzia, l – długość styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, u – wgłębienie narzędzia, b – linia średnia profilu nierówności powierzchni obrabianej

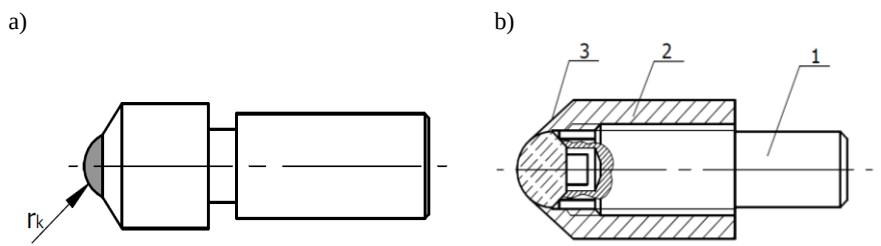
W przypadku nagniatania ślizgowego gładkościowego efekty obróbki, poza czynnikami wymienionymi powyżej, zależą również od wyjściowej chropowatości powierzchni. Potwierdzają to prace [3, 16], które przedstawiają formuły

eksperymentalne uwzględniające chropowatość wyjściową. W związku z powyższym model nagniatania gładkościowego powinien uwzględniać stan stereometryczny, a w szczególności wysokość nierówności powierzchni przed nagniataniem.

7.3. Narzędzia do nagniatania ślizgowego

7.3.1. Budowa narzędzi do nagniatania ślizgowego

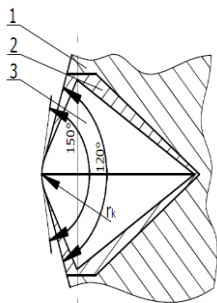
Narzędziami wykorzystywanymi do nagniatania ślizgowego są nagniataki, które mogą być narzędziami jednolitymi lub składanymi (rys. 7.3). Narzędzie składa się z oprawki i końcówki roboczej z elementem nagniatającym [3, 18].



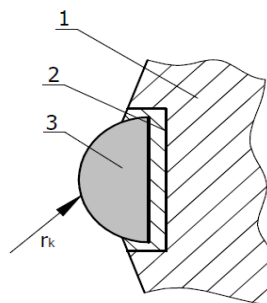
Rys. 7.3. Przykładowe konstrukcje narzędzi do nagniatania ślizgowego: a) narzędzie łączone w sposób trwały, b) narzędzie składane: 1 – część chwytowa, 2 – nakrętka, 3 – końcówka robocza (r_k – promień zaokrąglenia końcówki)

Część robocza (kończówka) nagniataka może mieć kształt kuli, torusa, walca lub stożka zaokrąglonego odpowiednim promieniem. Kończówka robocza może być wykonana z diamentu naturalnego lub z diamentów syntetycznych (rys. 7.4). Promień zaokrąglenia elementu diamentowego wynosi od 1 mm do 4 mm i zależy od rodzaju i twardości materiału obrabianego. Oprawka służy do mocowania w niej końcówki roboczej i prowadzenia procesu nagniatania. Jest ona mocowana na obrabiarkach w imakach narzędziowych, suportach, głowicach rewolwerowych [3, 18].

a)



b)



Rys. 7.4. Budowa końcówek roboczych narzędzi do nagniatania ślizgowego: a) końcówka z monokrystalicznego diamentu naturalnego, b) końcówka z syntetycznego kompozytu diamentowego; 1 – oprawka, 2 – spoiwo, 3 – część robocza

Najbardziej uniwersalnymi, umożliwiającymi obróbkę zarówno powierzchni płaskich jak i walcowych zewnętrznych oraz wewnętrznych, są narzędzia o zakończeniu kulistym. Podczas pracy obszar styku narzędzia, o kształcie kulistym, z powierzchnią obrabianą jest mniejszy niż w przypadku narzędzi z końcówkami o innych kształtach, co oznacza, że wymagana jest mniejsza siła docisku podczas obróbki. Czynniki te odgrywa istotną rolę podczas nagniatania powłok czy elementów o małej sztywności [3].

Stosując podczas nagniatania narzędzia z innymi końcówkami niż kuliste (powierzchnia robocza to czoło lub obwód walca) istnieje możliwość uzyskania bardziej gładkiej powierzchni po obróbce, a także zastosowanie większych posuwów, co pozwala na poprawę wydajności obróbki [3].

W literaturze można spotkać niewiele informacji dotyczących trwałości narzędzi do nagniatania ślizgowego. Wykorzystując kompozyt diamentowy do obróbki stali o twardości 57÷59 HRC można uzyskać czas pracy narzędzia około 8 godzin, natomiast trwałość takiego narzędzia przy obróbce stali o średniej twardości wynosi około 30 godzin lub 200 km drogi [3].

Nagniatanie ślizgowe uważane jest za ekonomicznie korzystny sposób obróbki. Związane jest to ze stosunkowo niewielkim kosztem nagniataka (cena narzędzia zbliżona jest do ceny noża tokarskiego z węgla spiekanego) oraz niewielkim kosztem oprzyrządowania [3, 9].

7.3.2. Materiały stosowane na narzędzia do nagniatania ślizgowego

Materiały narzędziowe, stosowane na końcówki narzędzi do nagniatania ślizgowego, powinny charakteryzować się:

- dużą twardością,
- odpornością na zużycie ścierne i adhezyjne,
- wysoką odpornością na ściskanie,
- niskim współczynnikiem tarcia ślizgowego po metalach,
- wysoką przewodnością i dużą pojemnością cieplną [3].

Powyższe wymagania spełnia diament naturalny. Zastosowanie diamentu naturalnego na końcówkę narzędzia do nagniatania ślizgowego pozwala na obróbkę najtwardszych stali i stopów metali. Do zalet diamentu, jako materiału narzędziowego, należy zaliczyć: niski współczynnik tarcia ślizgowego po metalach, wysoką odporność na ściskanie, dużą przewodność cieplną. W tabeli 7.1 przedstawiono wybrane właściwości diamentu naturalnego.

Poza licznymi zaletami diament naturalny posiada pewne wady, do których należy zaliczyć: dużą kruchość, małą wytrzymałość na zginanie oraz anizotropię. Występowanie zjawiska anizotropii w kryształach diamentu utrudnia realizację procesu nagniatania ślizgowego. Podczas obróbki kryształów diamentu musi być zorientowany w taki sposób aby „twardy” kierunek siatki krystalograficznej był usytuowany zgodnie z siłą bądź zgodnie z kierunkiem wektora prędkości nagniatania [3].

Tabela. 7.1. Właściwości diamentu naturalnego [1, 3]

Gęstość [g/cm ³]	Twardość [GPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wytrzymałość na zginanie R _g [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie R _c [MPa]
3,5÷3,6	do 106	900÷1250	< 300	< 2000
Współczynnik tarcia ślizgowego po metalach		0,02÷0,1		
Termoodporność [°C]		około 800		

Poza diamentem naturalnym na końcówki elementu nagniatającego z powodzeniem stosowane są polikrystaliczne kompozyty diamentowe. Powstają one na bazie proszków diamentowych z wypełnieniem metalowym. Materiały te w swoim składzie zawierają stosunkowo dużą ilość wtrąceń metalicznych niklu i chromu (około 10% masy), a także ziarna diamentowe o różnych rozmiarach. Obecność wtrąceń przyczynia się do wzrostu porowatości powierzchni, co po-

woduje wzrost współczynnika tarcia ślizgowego oraz spadek termoodporności. Kompozyty diamentowe charakteryzują się izotropią właściwości mechanicznych i dużą odpornością na wykruszenie.

Kolejną grupą materiałów narzędziowych stosowanych na końcówki narzędzi do nagniatania ślizgowego są kompozyty diamentowe, które powstają na bazie mikroproszków diamentowych i węgliku krzemu. Wytwarzane są one metodą nasycania krzemem proszku diamentowego w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury [3, 11, 12]. Przedstawicielem tej grupy materiałów stosowanych na narzędzia do nagniatania ślizgowego jest AKTM [11]. Zawiera on osnowę z cząstek diamentu ($85 \div 90\%$ masy), pomiędzy którymi znajdują się cząsteczki wypełniacza – węgliku krzemu i niezwiązany krzem krystaliczny ($1 \div 2\%$ masy). Materiał ten charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem tarcia ślizgowego (w porównaniu do kompozytów na bazie wypełniaczy metalowych), bardzo dużą termoodpornością, a także materiały te nie zmieniają swoich właściwości do temperatury około $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12].

Obecnie można spotkać narzędzia do nagniatania ślizgowego z powłokami diamentowymi nanoszonymi metodami PVD lub CVD [13]. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość nanoszenia powłok na podłoże prawie każdego rodzaju, a nieobecność fazy wiążącej poprawia właściwości wytrzymałościowe materiału narzędziowego [3]. Koszt narzędzi z powłokami diamentowymi jest kilkakrotnie niższy niż dla narzędzi w całości wykonywanych z kompozytów diamentowych [8].

Do nagniatania ślizgowego miękkich stali, miękkich stopów metali nieżelaznych, żeliwa z powodzeniem stosowane są takie materiały jak: rubin, szafir, materiały ceramiczne, węglik spiekane czy stale o wysokiej twardości [3, 9].

7.4. Stan i właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu ślizgowym

Obróbka nagniataniem ślizgowym pozwala na znaczną poprawę chropowatości powierzchni. Istnieje możliwość uzyskania chropowatości powierzchni takiej jak po polerowaniu, przy wyjściowej powierzchni po szlifowaniu czy nawet toczeniu [5, 10], a przy odpowiednim doborze parametrów obróbki możliwe jest uzyskanie chropowatości powierzchni $Ra < 0,04\text{ }\mu\text{m}$ [6]. Współczynnik zmniejszenia chropowatości powierzchni może osiągać wartość równą 25. Profilogram powierzchni po nagniataniu charakteryzuje się dużymi odstępami, wierzchołki mikronierówności są spłaszczone, brak jest mikrokarbów, co powoduje, że powierzchnia po nagniataniu ślizgowym charakteryzuje się dużą refleksyjnością.

Podczas obróbki zmianie ulega kształt krzywej Abbotta-Firestone'a oraz parametry związane z tą krzywą [3].

Umocnienie po nagniataniu ślizgowym jest mniejsze niż po innych metodach nagniatania. Wartość stopnia umocnienia zależy od twardości materiału wyjściowego. W materiałach miękkich przyrost twardości może dochodzić do kilkudziesięciu procent, natomiast w materiałach o bardzo dużej twardości nie przekracza kilku procent. Głębokość zachodzących zmian jest niewielka, zazwyczaj umocnienie następuje w granicach wysokości mikronierówności [3].

Zmiany strukturalne po nagniataniu gładkościowym są niewielkie i zbliżone do zmian po kulkowaniu naporowym tocznym [14]. Zauważalne jest ukierunkowanie ziaren na niewielkiej głębokości pod powierzchnią obrabianą.

Podczas obróbki nagniataniem ślizgowym ma miejsce zwiększenie objętości właściwej materiału w stanie zgniotu, co prowadzi do ukonstytuowania w warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych. Maksymalne wartości naprężeń własnych (co do bezwzględnej wartości) występują tuż pod powierzchnią obrabianą. Wartość ich zależy od parametrów technologicznych obróbki i właściwości materiału obrabianego [15].

W wyniku przeprowadzonej obróbki nagniataniem następuje poprawa wytrzymałości zmęczeniowej części maszyn o wysokiej jak i niskiej twardości oraz regularnych kształtach [3].

Metodą nagniatania ślizgowego można poprawić odporność na zużycie tribologiczne węzłów tarcia, w których pracują bieżnie łożysk tocznych i czopy łożysk ślizgowych wykonanych z twardych stali, jak także tych, w których stosowane są np. panewki ze stopów łożyskowych o niezbyt wysokiej twardości. Po obróbce uzyskuje się powierzchnie bez zanieczyszczeń szlifierskich i ostrych nierówności powierzchni oraz o odpowiedniej stereometrii powierzchni i właściwej strukturze śladów poobróbkowych [3].

Nagniatanie ślizgowe, podobnie jak i inne odmiany nagniatania, powoduje niekorzystną aktywację powierzchni poprzez zgniot, następuje zwiększenie gęstości dyslokacji, obniżenie samopasywacji powierzchni, co prowadzi do zmniejszenia odporności na zużycie korozyjne [3]. Jednak według autora pracy [13] oddziaływanie naprężeń ściskających łącznie ze zmniejszeniem chropowatości powierzchni może poprawić właściwości antykorozyjne materiału.

7.5. Zasady doboru warunków nagniatania ślizgowego

7.5.1. Stan powierzchni przed obróbką

Powierzchnia przeznaczona do nagniatania ślizgowego powinna być czysta, jednolicie gładka, bez większych rys, wgłębień i innych uszkodzeń oraz śladów narostu. W przypadku nagniatania ślizgowego materiałów o niskiej twardości parametr chropowatości R_a powinien wynosić od 0,63 do 2,5 μm , a dla materiałów o wysokiej twardości parametr R_a powinien zawierać się w przedziale od 0,32 do 1,25 μm . Gdy występują na powierzchni obrabianej zbyt duże nierówności, wówczas nagniatanie ślizgowe zatracą cechy obróbki gładkościowej [3].

7.5.2. Promień zaokrąglenia końcówki narzędzia

Dobierając promień zaokrąglenia narzędzia nagniatającego należy kierować się właściwościami sprężysto-plastycznymi obrabianego materiału: granicą plastyczności, modułem sprężystości oraz twardością.

Promień zaokrąglenia narzędzia dobierany jest na podstawie zależności 7.1, zgodnie z zasadą: im większa twardość nagniatanego materiału, tym mniejszy promień zaokrąglenia końcówki narzędzia nagniatającego [3].

$$r_k = 4,9 - 0,0055HV \quad (7.1)$$

gdzie: HV – twardość materiału obrabianego wyrażona w skali Vickersa.

Promień zaokrąglenia końcówki narzędzia wynosi od 1 do 4 mm. Zalecane wartości promieni w zależności od rodzaju materiału nagniatanego zawiera tabela 7.2.

Tabela. 7.2. Zalecane wartości promienia zaokrąglenia końcówki elementu nagniatającego [3, 9]

Obrabiany materiał		Promień r_k [mm]
Rodzaj materiału	Twardość	
Stale miękkie i stopy materiałów nieżelaznych	HRC < 30	4÷2,5
Stale o średniej twardości po obróbce cieplnej	HRC 35÷50	2,5÷1,5
Stale o dużej twardości, nawęglane i hartowane	HRC 50÷65	1,5÷1

7.5.3. Posuw narzędzia

Wartość posuwu narzędzia nagniatającego uzależniona jest od podziałki nierówności powierzchni nagniatanej. Prace doświadczalne [3] wykazały, że posuw nagniatania powinien wynosić ok. $\frac{1}{2}$ wartości odstępu pomiędzy mikronierównościami. Zastosowanie mniejszej wartości posuwu nie powoduje istotnej poprawy chropowatości powierzchni nagniatanej, a jedynie może wywołać niekorzystny efekt nadmiernego zgniotu. Posuw nagniatania przekraczający $\frac{1}{2}$ wartości odstępu pomiędzy mikronierównościami nie zapewnia odpowiednio głębokiego wygładzenia wszystkich nierówności powierzchni. Dla wartości parametru chropowatości $R_z = 5 \div 6 \text{ } \mu\text{m}$ odstęp nierówności jest zazwyczaj rzędu $0,06 \div 0,08 \text{ mm}$, a zatem aby nagniatanie ślizgowe zostało efektywnie przeprowadzone należy dobrać wartość posuwu nagniatania około $0,03 \div 0,04 \text{ mm/obr.}$

7.5.4. Siła nagniatania

Siła nagniatania ślizgowego zależy od:

- wysokości nierówności powierzchni wyjściowej,
- odstępu pomiędzy mikronierównościami w kierunku posuwu nagniatania,
- promienia zaokrąglenia końcówki narzędzia nagniatającego,
- wartości posuwu nagniatania [3].

Wymienione powyżej czynniki wpływają na liczbę i objętość nierówności jednocześnie znajdujących się pod narzędziem, a tym samym ilość materiału, który musi być odkształcony plastycznie i wyrównany w procesie nagniatania ślizgowego.

Wartość siły nagniatania można określić na podstawie następującego wzoru [9]:

$$F = \pi \cdot \varepsilon_h \cdot HV \cdot \left(\frac{d \cdot r_k}{d + r_k} \right)^2, [N] \quad (7.2)$$

gdzie: ε_h – względne zagłębienie elementu nagniatającego,

r_k – promień zaokrąglenia elementu nagniatającego [mm],

d – średnica przedmiotu nagniatanego [mm],

HV – twardość materiału obrabianego mierzona metodą Vickersa [MPa].

Zalecane wartości względnego zagłębienia elementu nagniatającego ε_h ($\varepsilon_h = \frac{h}{r_k}$, gdzie h – głębokość zagłębienia elementu w obrabianą powierzchnię, r_k – promień zaokrąglenia elementu diamentowego [9]) wynoszą:

- obróbka gładkościowa: stal hartowana $\varepsilon_h = 0,003$; materiał miękki $\varepsilon_h = 0,0015$,
- obróbka umacniająca: stal hartowana $\varepsilon_h = 0,007$; materiał miękki $\varepsilon_h = 0,0045$ [8].

7.5.5. Prędkość obwodowa nagniatania

Jest to parametr, który nie ma większego wpływu na efekty obróbki. Ze względów praktycznych prędkość nagniatania powinna być możliwie duża, w praktyce mieści się ona w przedziale od 1÷1,5 m/s podczas nagniatania gładkościowego końcówką wykonaną z diamentu syntetycznego. Dla tego zakresu prędkości nie następuje odczuwalne nagrzewanie się przedmiotu obrabianego. Nie jest wymagane również stosowanie chłodzenia, nie występują także drgania rezonansowe [3].

7.5.6. Smarowanie

Podczas nagniatania ślizgowego zastosowanie smarowania nie jest konieczne, ale obecność środka smarnego ułatwia poślizg narzędzia po obrabianej powierzchni, zmniejsza opory tarcia oraz wykazuje właściwości tłumiące. Podczas nagniatania stali zalecane jest ciągłe zwilżanie powierzchni obrabianej olejem maszynowym, natomiast nie jest wskazane stosowanie środków aktywnych, czy też emulsji obróbkowych. Olej maszynowy dedykowany jest do zastosowania podczas obróbki innych stopów niż stal oraz „czystych” metali. Powłoki chromowe należy nagniatć bez obecności środka smarnego ze względu na możliwość powiększenia porów w powłoce w wyniku zmiany ciśnienia wnikaćcego do nich oleju [3].

7.6. Przykłady zastosowania nagniatania ślizgowego w budowie maszyn

W literaturze przedmiotowej można znaleźć przykłady przemysłowe zastosowania nagniatania ślizgowego.

Autorzy pracy [10] zajmowali się nagniataniem ślizgowym rolki prowadzącej do rozlewaczki płynów wykonanej ze stopu aluminium Al-Mg-Si. Po obrób-

ce uzyskano chropowatość powierzchni $Ra = 0,12 \mu\text{m}$, została zachowana klasa dokładności IT7. Zmianie uległa średnica obrabianej rolki o wartość $0,01 \text{ mm}$.

Nagniataniem ślizgowym z powodzeniem można obrabiać elementy wirnika. Przeprowadzona obróbka promienia wirnika powoduje przebudowę struktury geometrycznej powierzchni oraz uzyskanie wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej od 11% do 25% [17].

Nagniatanie ślizgowe z powodzeniem może być wykorzystywane do usuwania zakłóceń mechanicznych, które są skutkiem błędów kształtu i położenia oraz nierówności powierzchni czopów łożysk wirników. Po obróbce zauważono, że istnieje możliwość znacznego zmniejszenia nierówności powierzchni czopów łożysk wirnika, a tym samym zmniejszenie zakłóceń mechanicznych wirnika [3].

Od tulei gąsienicowych ciągników wymagana jest wysoka odporność na zużycie ściernie oraz bardzo dobra szczelność połączenia na styku powierzchni czołowych, współpracujących z elementami uszczelniającymi. Bardzo często powierzchnie robocze są nawęglane i hartowane. Aby móc uzyskać wysoką szczelność tulei w połączeniu parametr chropowatość powierzchni Ra czoła tego elementu musi być mniejszy od $0,32 \mu\text{m}$, jednocześnie musi być zapewniona współśrodkowość śladów poobróbkowych. Obróbka szlifowaniem nie pozwala na uzyskanie żądanej kierunkowości struktury, a operacja docierania lub polerowania jest bardzo pracochłonna. Po nagniataniu ślizgowym tuleja gąsienicy ciągnika posiada współśrodkowy układ śladów poobróbkowych, a parametr chropowatości powierzchni Ra jest mniejszy od $0,32 \mu\text{m}$ [3].

7.7. Wykonanie ćwiczenia

7.7.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z jedną z metod nagniatania statycznego, którą jest nagniatanie ślizgowe. Część praktyczna obejmuje dobór warunków nagniatania ślizgowego, przeprowadzenie obróbki oraz ocenę efektów obróbki.

7.7.2. Przebieg ćwiczenia

1. Dobrać warunki nagniatania ślizgowego oraz obliczyć siłę nagniatania na podstawie zależności 7.2.
2. Na podstawie charakterystyki sprężyny nagniataka ustalić wartość ugięcia sprężyny dla danej siły nagniatania.
3. Za pomocą profilografometru zmierzyć chropowatość powierzchni przed nagniataniem.

4. Przeprowadzić próby nagniatania ślizgowego (dla zmiennych wartości posuwu, dokonać pomiaru czasu nagniatania).
5. Za pomocą profilografometru zmierzyć chropowatość powierzchni po nagniataniu.
6. Korzystając z przedstawionej poniżej zależności 7.3 obliczyć czas maszynowy nagniatania:

$$t_m = \frac{i \cdot L}{f \cdot n}, [min] \quad (7.3)$$

gdzie: L – długość drogi narzędzia [mm],

i – liczba przejeżdż,

n – prędkość obrotowa przedmiotu [obr/min],

f – posuw nagniatania [mm/obr].

7. Obliczyć, korzystając z przedstawionego poniżej wzoru (7.4), wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} :

$$K_{Ra} = \frac{Ra_1}{Ra_0} \quad (7.4)$$

gdzie: Ra_1 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości przed nagniataniem,

Ra_0 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości po nagniataniu.

7.7.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki nagniataniem ślizgowym,
- b) szkic badanej próbki i rodzaj materiału, z którego została wykonana,
- c) schemat nagniataka wykorzystywanego w próbach nagniatania,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wnioski.

Literatura:

1. Cichosz P., Kuzinovski M., Tomov M.: *Narzędzia skrawające z materiałów supertwardych. Cz. I. Ostrza diamentowe*. „Mechanik”, 2017, nr. 8–9, s. 660–668.
2. Korzyński M.: *Nagniatanie powłok chromowych. Monografia*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej „Mechanika” z. 124, Rzeszów, 1994.
3. Korzyński M.: *Nagniatanie ślizgowe*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.
4. Korzyński M.: *Some properties of nitrided by various methods 40HM steel and effect of following diamond tool slide burnishing*. Zeszyty Naukowe Politechnik Rzeszowskiej, „Mechanika”, z. 49, Rzeszów 1997.
5. Łabędź J., Skorupka A.: *Wpływ nagniatania ślizgowego elementem diamentowym na wytrzymałość zmęczeniową stopu aluminium PA6*. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz 2000.
6. Łabędź J., Słomski J.: *Stan warstwy wierzchniej stali łożyskowej po wybranych operacjach obróbkowych*. Materiały konferencji Naukowo-Technicznej „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej – WW’96”.
7. Nakoneczny A.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna – kulowanie (shot peening)*. Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa, 2003.
8. Owers C.: *Industrial diamond: applications, economics and a view to the future*. Industrial Diamond Review, 3, 2000, s. 176–181.
9. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
10. Przybylski W., Zieliński W.: *Obróbka wykończająca stopów aluminium przez nagniatanie ślizgowe*. [w]: pod red. W. Przybylskiego: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2005.
11. Rozenberg O. A., Sokhan S. V., Voznyy V. V., Mamalis A. G.: *A study of the integrity of a burnisher’s working surface manufactured from a diamond-composition thermostable material*. “International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, 2005, DOI 10.1007/s00170-004-2148-x, published online.

12. Rozenberg O. A., Shulzenko A. A., Mamalis A. G., Gargin V. G., Sokhan S. V.: *Manufacture of tips for diamond burnishing and dressing probes for abrasive wheels with a diamond composition thermal material AKTM*. "Journal of Materials Science" 38, 2003, s. 789–794.
13. Świrad S.: *Influence of parameters of sliding burnishing with cylindrical elements of surface roughness*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. „Mechanika”, z. 68, 2006, s. 223–228.
14. Tubielewicz K., Major B., Zaborski A.: *Struktura warstwy wierzchniej po nagniataniu*. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz 2000.
15. Tubielewicz K., Zaborski A.: *Modelowanie i doświadczalna analiza procesu odkształceń podczas nagniatania i zużycia*. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Technologia obróbki przez nagniatanie”, Bydgoszcz 2000.
16. Tubielewicz K., Zaborski A.: *Optymalizacja parametrów użytkowych warstwy wierzchniej po nagniataniu*. [w]: pod red. W. Przybylskiego: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Gdańsk, 2005.
17. Zielecki W.: *Slide burnishing of shaft neck radius*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. „Mechanika”, z. 68, 2006, s. 255–260.
18. <https://www.ios.krakow.pl/96,8,oferta,nagniataki-slizgowe.htm>, data pobrania: 03.08.2017r.

8. NAGNIATAJĄCE PRZEPYCHANIE ŚLIZGOWE OTWORÓW

Obróbka wykończeniowa otworów może być realizowana różnymi sposobami, do których można zaliczyć dokładne wytaczanie, rozwiercanie, przeciąganie i przepychanie, szlifowanie, honowanie, dogładzanie oscylacyjne, docieranie, nagniatanie. Wybór odpowiedniego sposobu obróbki zależy od materiału obrabianego, kształtu i wymiarów otworu, wymaganej dokładności i chropowości powierzchni, wymaganych właściwości fizycznych warstwy wierzchniej. W wielu przypadkach efektywnym sposobem obróbki wykończeniowej otworów jest nagniatanie.

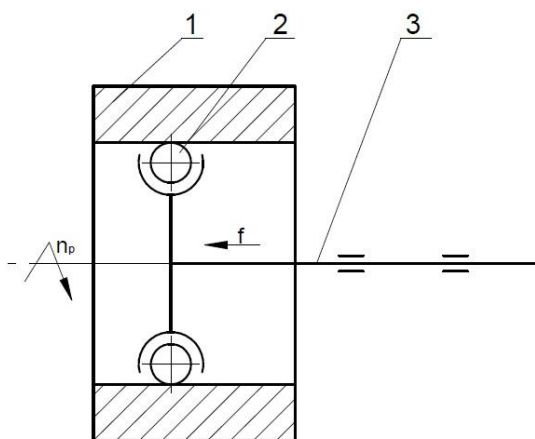
8.1. Metody nagniatania otworów

Otworki mogą być nagniatane zarówno metodami statycznymi, które charakteryzują się stałą siłą oddziaływania elementu nagniatającego na obrabiany przedmiot, jak i dynamicznymi, których cechą jest uderzeniowe oddziaływanie elementów nagniatających na obrabianą powierzchnię. Narzędzia nagniatające do otworów mają często budowę podobną do narzędzi stosowanych do nagniatania wałków, należy jednak uwzględnić ograniczenia związane z wymiarami otworów. W zależności od charakteru współpracy elementu nagniatającego z powierzchnią obrabianego otworu, nagniatanie statyczne dzieli się na toczne i ślizgowe.

Przykład obróbki otworu nagniataniem tocznym z dociskiem sztywnym przedstawiono schematycznie na rys. 8.1. Przedmiot obrabiany 1 wykonuje ruch obrotowy z prędkością n_p , a narzędzie nagniatające 3 ze sztywnym dociskiem, którego średnica zewnętrzna, ze względu na konieczność odkształcenia warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, jest większa od średnicy otworu, przemieszcza się wzdłuż osi otworu z posuwem f . Podczas nagniatania kulki 2 toczą się po wewnętrznej powierzchni przedmiotu 1.

Nagniatanie ślizgowe, charakteryzujące się występowaniem poślizgu pomiędzy elementem nagniatającym a obrabianą powierzchnią, można podzielić na odmiany [11]:

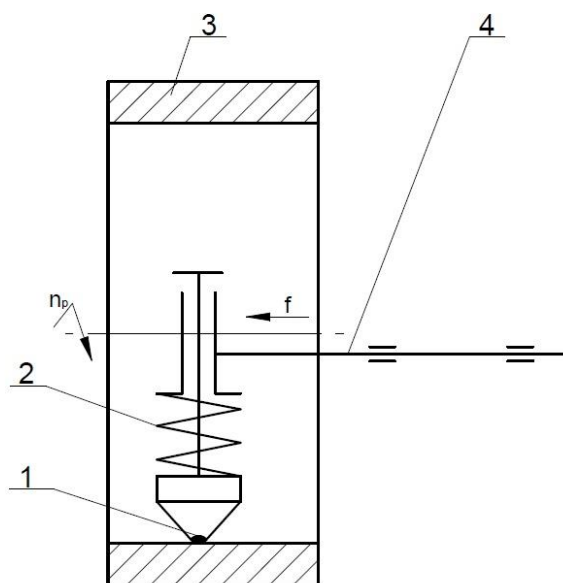
- wygładzanie ślizgowe,
- przetłaczanie ślizgowe.



Rys. 8.1. Schemat nagniatania tocznego otworu: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – kulka nagniatająca, 3 – narzędzie nagniatające

Do wygładzania ślizgowego używane są nagniataki, najczęściej z wkładką diamentową, zakończone czaszą kulistą o niewielkim promieniu (od kilku dziesiątych milimetra do kilku milimetrów). Ze względu na mały promień elementu nagniatającego, wygładzanie ślizgowe wykonywane jest z małymi siłami docisku, co umożliwia obróbkę otworów w elementach cienkościennych. Na rys. 8.2 pokazano schematycznie przykład ślizgowego wygładzania nagniataniem z dociskiem sprężystym. Przedmiot obrabiany 3 wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi z prędkością n_p , który jest ruchem głównym, natomiast narzędzie nagniatające 4 wykonuje ruch prostoliniowy w kierunku równoległym do osi przedmiotu (posuw f). Nagniatak, zakończony kulistą wkładką diamentową 1, jest dociskany do obrabianej powierzchni za pomocą sprężyny 2.

W procesie wygładzania ślizgowego stosowane są niewielkie posuwy, rzędu kilku setnych mm/obr., i siły docisku w granicach kilku-kilkunastu daN, w zależności od materiału obrabianego i chropowatości powierzchni przed nagniataniem. Dobór odpowiednich parametrów technologicznych umożliwia uzyskanie bardzo małej chropowatości powierzchni, rzędu kilku setnych mikrometra (parametr Ra) [5].



Rys. 8.2. Schemat wygładzania ślizgowego otworu: 1 – wkładka diamentowa, 2 – sprężyna dociskająca, 3 – przedmiot obrabiany, 4 – narzędzie nagniatające

Drugą odmianę nagniatania ślizgowego, przetłaczanie ślizgowe, scharakteryzowano w podrozdziale 8.2.

Do nagniatania dynamicznego otworów najczęściej stosuje się metodę odśrodkową oraz impulsową [10, 11]. Do nagniatania, zarówno odśrodkowego jak i impulsowego, służą głowice z rozmieszczonymi na obwodzie elementami nagniatającymi, które uderzają w powierzchnię obrabianego otworu pod wpływem siły odśrodkowej lub wskutek impulsów spowodowanych przez występy obracającej się bieżni.

Zastosowanie przedstawionych w niniejszym podrozdziale metod nagniatania, szczególnie nagniatania dynamicznego, wymaga użycia narzędzi o znacznych rozmiarach, co uniemożliwia zastosowanie tych metod do obróbki otworów o małej średnicy. Również prezentowane metody nagniatania mogą być stosowane w ograniczonym zakresie do obróbki wykończeniowej otworów o dużej długości, gdyż wiąże się to z koniecznością użycia narzędzi o dużym wysięgu, co niekorzystnie wpływa na ich sztywność.

8.2. Przetłaczanie ślizgowe otworów

Przetłaczanie ślizgowe¹ polega na wprowadzeniu do obrabianego otworu narzędzia nagniatającego, przy czym średnica narzędzia jest większa od średnicy otworu (występuje wcisk), a następnie przemieszczeniu, z poślizgiem, narzędzia wzdłuż osi otworu. Umocnienie warstwy wierzchniej w otworze obrabianego przedmiotu następuje wówczas, gdy w strefie kontaktu z narzędziem w materiale obrabianym występują nie tylko odkształcenia sprężyste, ale również plastyczne. Naddatek na odkształcenia sprężyste zależy od właściwości obrabianego materiału i, przykładowo, dla otworów o średnicy w zakresie (10÷45) mm w stali niehartowanej wartość tego naddatku wynosi w granicach (0,025÷0,06) mm (ze wzrostem średnicy zwiększa się naddatek) [10].

Przetłaczanie ślizgowe, w zależności od sposobu przyłożenia siły do narzędzia, dzieli się na:

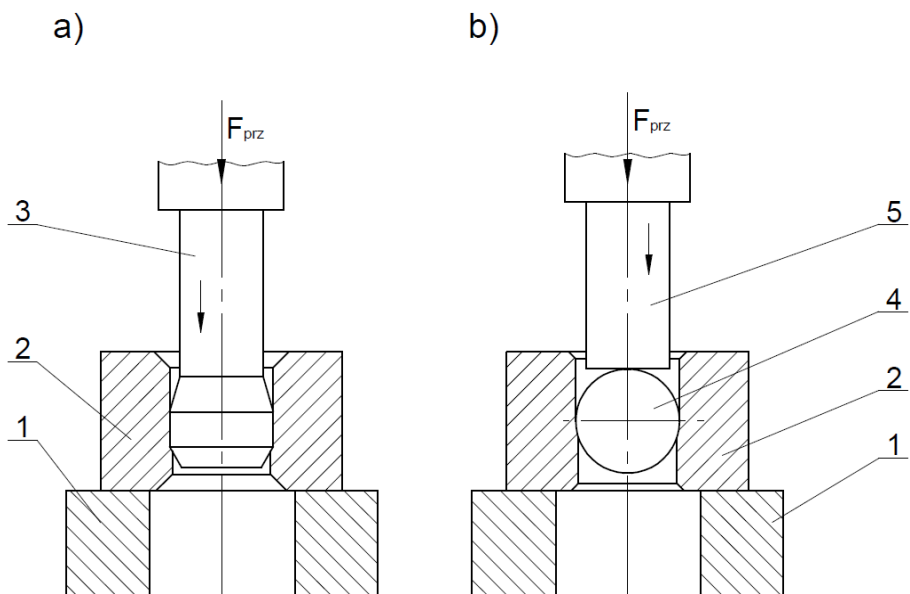
- przepychanie nagniatające,
- przeciąganie nagniatające.

Zaleca się, aby otwory, dla których stosunek długości do średnicy jest mniejszy od 6, obrabiać przepychaniem nagniatającym, natomiast gdy wartość tego stosunku jest większa – przeciąganiem [11].

Do nagniatającego przepychania ślizgowego (NPS) w charakterze narzędzi mogą być stosowane kulki lub przepychacze trzpieniowe (rys. 8.3). Obróbka NPS najczęściej wykonywana jest na prasach. Przedmiot obrabiany 2 posadowiony jest na tulei podporowej, której wysokość jest większa od długości części roboczej przepychacza trzpieniowego 3 lub połowy średnicy kulki 4, a średnica otworu jest większa od średnicy narzędzia przepychającego. W przypadku przepychania kulką 4 (rys. 8.3b) konieczne jest użycie trzpienia 5, który z siłą F_{prz} oddziałuje na kulkę 4.

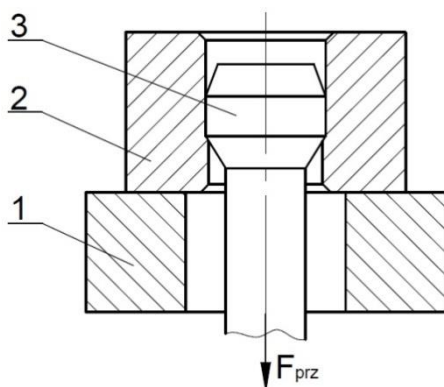
W procesie przepychania nagniatającego przedmiot obrabiany może wykonywać ruch obrotowy. Obróbka taka może być realizowana na tokarce po zamocowaniu przedmiotu obrabianego w uchwycie tokarskim a narzędzia nagniatającego w imaku nożowym [2].

¹ Przetłaczanie ślizgowe jest też nazywane kalibrowaniem otworów [10]



Rys. 8.3. Schemat nagiatającego przepychania ślizgowego otworu: a) przepychaczem trzpieniowym, b) kulka; 1 – tuleja podporowa, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – przepychacz trzpieniowy, 4 – kulka przepychająca 5 – trzpień

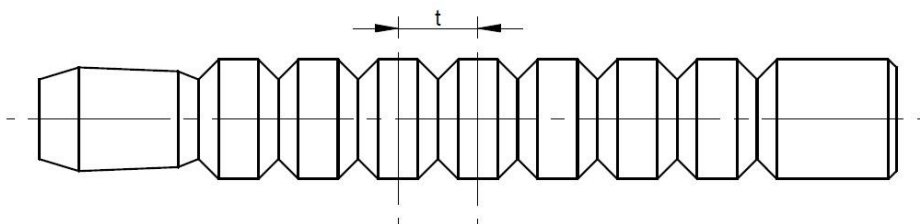
Przeciąganie nagiatające przedstawiono schematycznie na rys. 8.4. Przeciągacz nagiatający 3 pod wpływem działania siły F przemieszcza się ślizgowo wzdłuż otworu przedmiotu obrabianego 2, który posadowiony jest na tulei podporowej 1. Otwory często obrabiane są za pomocą przeciągaczy skrawająco-nagiatających (ostrza skrawające poprzedzają pierścienie nagiatające).



Rys. 8.4. Schemat nagiatającego przeciągania ślizgowego otworu: 1 – tuleja podporowa, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – przeciągacz nagiatający

Do obróbki nagniatającym przepychaniem, jak i przeciąganiem, ślizgowym mogą być zastosowane narzędzia z jednym pierścieniem nagniatającym (rys. 8.3a i 8.4) lub z wieloma pierścieniami nagniatającymi (rys. 8.5). Podziałka t przepychacza lub przeciągacza z wieloma pierścieniami nagniatającymi zależy od długości obrabianego otworu l_o i może być obliczona z zależności [10]:

$$t = (1,0 \div 1,2) \sqrt{l_o} \quad (8.1)$$



Rys. 8.5. Wielopierścieniowy przepychacz nagniatający ślizgowy

Wielopierścieniowe przepychacze i przeciągacze nagniatające mogą być jednolite, które wykonane są w całości z jednego materiału, oraz składane.

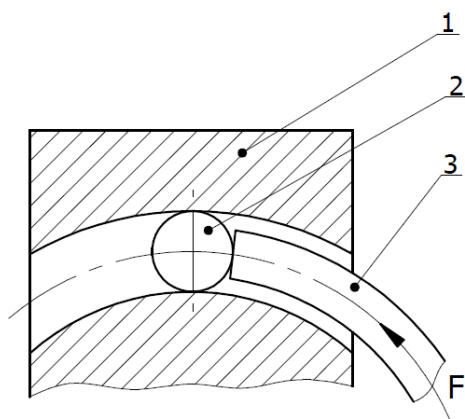
Przepychacze i przeciągacze składane zbudowane są z pierścieni nagniatających, które rozmieszczone są na trzpieniu wraz z przedzielającymi je tulejkami dystansowymi [4]. Pierścienie nagniatające najczęściej wykonywane są z węglików spiekanych lub stali szybko tnącej. Zastosowanie narzędzi składanych wpływa na zmniejszenie zużycia drogich materiałów narzędziowych, umożliwia też obróbkę otworów o różnej średnicy z użyciem jednej oprawki narzędziowej i wymiennych pierścieni nagniatających.

8.3. Warunki technologiczne nagniatającego przepychania ślizgowego otworów za pomocą kulki

Nagniatające przepychanie ślizgowe otworów narzędziem w kształcie kuli charakteryzuje się wieloma zaletami, do których można zaliczyć [9, 11, 13]:

- dużą wydajność.
- nieskomplikowaną obsługę urządzeń technologicznych, a tym samym możliwość zatrudnienia pracownika o niskich kwalifikacjach,
- dość proste (niedroge) oprzyrządowanie technologiczne,
- w przypadku przepychania, możliwość przeprowadzenia obróbki na prasach, które są szeroko stosowane w przemyśle,

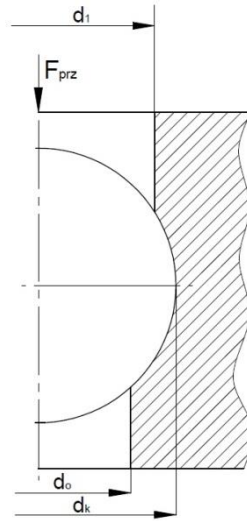
- duże możliwości automatyzacji procesu,
- możliwość obróbki, narzędziem w kształcie kuli, otworów o nieprostoliniowej osi, np. łukowej (rys. 8.6),
- równoważenie się sił występujących między narzędziem a przedmiotem obrabianym w kierunku prostopadłym do osi przepychanego otworu,
- samocentrowanie się kulki w przepychanym otworze, co zapewnia równomierność zgniotu na całym obwodzie otworu,
- zwiększenie dokładności otworu,
- zmniejszenie chropowatości powierzchni,
- poprawę stanu warstwy wierzchniej.



Rys. 8.6. Schemat przepychania kulka otworu łukowego: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – kulka przepychająca, 3 – trzpień łukowy

Natomiast ujemną stroną obróbki NPS jest duży współczynnik tarcia między narzędziem nagniatającym a przedmiotem obrabianym.

Uwzględniając występujące w procesie nagniatającego przepychania ślizgowego odkształcenia sprężyste i plastyczne, należy dobierać kulkę o średnicy d_k większej od średnicy d_1 otworu po NPS, natomiast średnica d_o otworu wstępnego (po obróbce poprzedzającej NPS) powinna być mniejsza od średnicy d_1 (rys. 8.7).



Rys. 8.7. Wymiary obrabianego otworu i kulki w procesie NPS: d_o – średnica otworu przed przepychaniem, d_1 – średnica otworu po przepychaniu, d_k – średnica kulki

Oznaczając przyrost średnicy otworu jako Δd_1 , można zapisać:

$$\Delta d_1 = d_1 - d_o \quad (8.2)$$

Ważnym parametrem w procesie przepychania jest wcisk w , który jest określany jako:

$$w = d_k - d_o \quad (8.3)$$

Natomiast wcisk względny w_w , wyrażany w procentach, jest definiowany następująco:

$$w_w = 100 \frac{w}{d_k}, \% \quad (8.4)$$

Do podstawowych czynników mających wpływ na przebieg i efekty obróbki NPS należy zaliczyć [7, 8]:

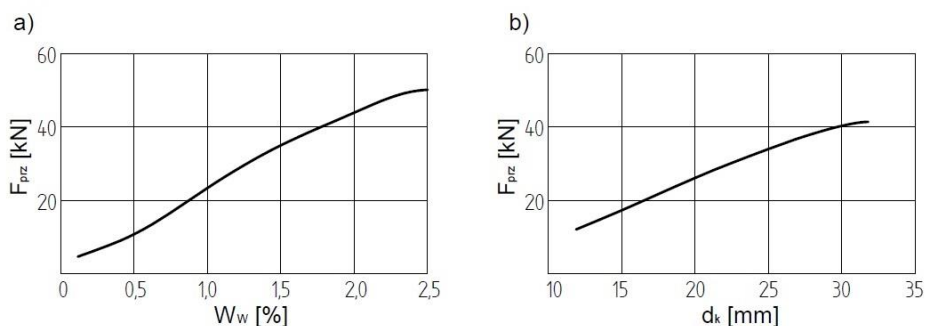
- właściwości materiału obrabianego,
- właściwości materiału narzędzia nagniatającego,
- współczynnik tarcia między narzędziem nagniatającym a przedmiotem obrabianym,

- średnicę otworu,
- wcisk,
- różnicę między średnicą zewnętrzną przedmiotu a średnicą przepychanego otworu,
- prędkość przepychania,
- liczbę przejść kulki,
- rodzaj cieczy smarującej,
- chropowatość powierzchni otworu przed przepychaniem,
- chropowatość powierzchni roboczych narzędzia nagniatającego,
- błędy kształtu otworu przed przepychaniem.

8.4. Wpływ warunków technologicznych nagniatającego przepychania ślizgowego na siłę przepychania

Ze względu na występowanie w procesie NPS dużego nacisku jednostkowego oraz dużego współczynnika tarcia, siła przepychania osiąga znaczne wartości, które zależą od właściwości materiału obrabianego oraz warunków technologicznych procesu.

Do czynników znacząco wpływających na siłę przepychania trzeba zaliczyć średnicę przepychanego otworu oraz wcisk. Na rys. 8.8a przedstawiono wpływ średnicy przepychanego otworu a na rys. 8.8b wcisku na siłę przepychania otworów w przedmiotach ze stali C45. Widoczny jest duży wzrost wartości siły wraz ze wzrostem obydwu parametrów NPS [6].



Rys. 8.8. Siła przepychania w zależności od: a) wcisku względnego ($d_k = 20,638$ mm), b) średnicy otworu przed przepychaniem ($w_w = 1,16\%$) [6]

Siła przepychania zależy też od chropowatości powierzchni otworu przed NPS. Przykładowo, podczas przepychania otworów o średnicy $d_o = 20,4$ mm

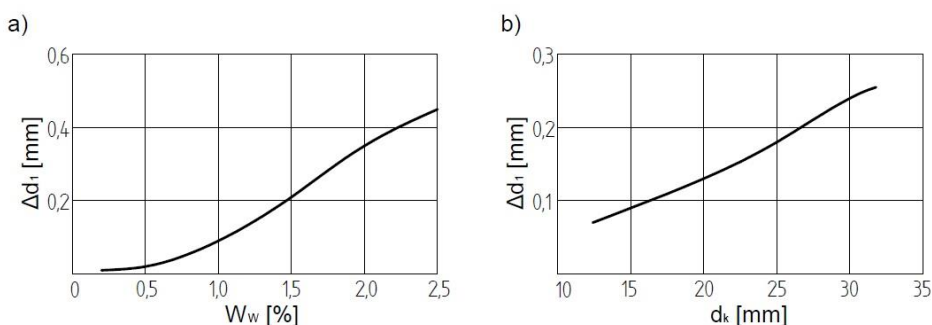
z wciskiem $w_w = 1,16\%$ zmniejszenie chropowatości powierzchni z $Ra = 17,0 \mu\text{m}$ do $Ra = 1,8 \mu\text{m}$ spowodowało wzrost siły przepychania o około 15% [6].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na siłę przepychania jest prędkość przepychania. Ze wzrostem prędkości przepychania w zakresie (2,8÷6) mm/s zaobserwowano niewielki wzrost siły przepychania [3]. Siłę przepychania można zmniejszyć dobierając odpowiednią ciecz smarującą [9].

8.5. Wpływ warunków technologicznych nagniatającego przepychania ślizgowego na przyrost średnicy obrabianego otworu

Jednym z celów obróbki NPS jest uzyskanie otworu o określonej średnicy. Aby ten cel osiągnąć należy określić średnicę otworu przed przepychaniem, do czego potrzebna jest – zgodnie ze wzorem (8.2) – znajomość przyrostu średnicy otworu Δd_I wskutek przepychania. Przyrost średnicy otworu związany jest z odkształceniami plastycznymi obrabianego materiału w procesie NPS.

Przyrost średnicy otworu zależy od wielu czynników. Na rys. 8.9a przedstawiono wpływ wcisku względnego w_w podczas przepychania kulką otworu w stali C45 na przyrost średnicy otworu Δd_I . Widoczny jest duży wzrost przyrostu średnicy w miarę zwiększania wcisku względnego. Przyrost średnicy otworu zwiększa się również ze wzrostem tej średnicy (rys.8.9b) [6]. Należy zwrócić uwagę, że przy stałym wcisku względnym ze wzrostem średnicy otworu zwiększa się wcisk bezwzględny.



Rys. 8.9. Przyrost średnicy otworu w zależności od: a) wcisku względnego ($d_k = 20,638 \text{ mm}$), b) średnicy otworu przed przepychaniem ($w_w = 1,16\%$) [6]

Duży wpływ na przyrost średnicy otworu ma materiał obrabiany. Przykładowo, po obróbce NPS stali niestopowej C45, brązu BA1032 i stopu tytanu WT3-1, z zastosowaniem jednakowych warunków technologicznych, przyrost średnicy otworu w brązie był nieco większy niż w stali, a w stopie tytanu kilkakrotnie mniejszy [6, 12, 13].

8.6. Właściwości warstwy wierzchniej otworów po nagniatającym przepychaniu ślizgowym

Obróbka NPS wpływa na poprawę właściwości warstwy wierzchniej obrabianych otworów. Narzędzie nagniatające, w procesie przepychania, powoduje zgniatanie mikronierówności powierzchni otworu, co wpływa na zmniejszenie chropowatości powierzchni. Wskutek dużego nacisku jednostkowego następuje zgniot warstwy wierzchniej obrabianego otworu, czego efektem są korzystne zmiany właściwości fizycznych tej warstwy.

Nagniatające przepychanie ślizgowe wpływa na zmniejszenie chropowatości powierzchni obrabianego otworu. Chropowatość powierzchni po NPS zależy od materiału obrabianego, wcisku, średnicy otworu oraz chropowatości powierzchni przed przepychaniem. Obróbka NPS umożliwia uzyskanie bardzo małej chropowatości powierzchni w porównaniu z chropowatością przed przepychaniem. Na przykład, po przepychaniu kulką stalową otworu w tulei grubościenną ze stali niestopowej C45, o średnicy $D_o = 20,4$ mm i chropowatości wyjściowej $Ra_0 = 2,8$ μm , otrzymano powierzchnię o chropowatości $Ra = 0,3$ μm [6]. Podobne efekty uzyskano po przepychaniu otworu w brązie [12].

W wyniku obróbki NPS następuje wzrost mikrotwardości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Przykładowo, po przepychaniu otworów w próbkach stalowych o średnicy $D = 26,7$ mm z wciskiem bezwzględnym $w = 0,30$ mm stopień umocnienia, definiowany jako wyrażony w procentach stosunek przyrostu mikrotwardości do mikrotwardości początkowej, wyniósł ok. 57%, a głębokość warstwy utwardzonej sięgała 0,3 mm [3].

Ważną właściwością warstwy wierzchniej, mającą duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, są naprężenia własne. Po obróbce NPS w warstwie wierzchniej przepychanego otworu w przedmiocie obrabianym kształtowane są ściskające naprężenia własne, zalegające na znacznej głębokości. Przykładowo, w warstwie wierzchniej otworów w próbkach ze stali C45, przepychanych kulką o średnicy $d_k = 31,758$ mm, z wciskiem względnym $w_w = 1,52\%$ powstały

ściskające naprężenia własne na głębokości ok. 1 mm, o wartości maksymalnej przekraczającej 200 MPa [14].

8.7. Modelowanie nagniatającego przepychania ślizgowego

Zastosowanie przepychania i przeciągania nagniatającego w przemyśle, mimo licznych zalet, nie jest zbyt duże. Wydaje się, że jedną z przyczyn niewielkiego zastosowania jest brak wystarczających informacji na temat doboru warunków technologicznych obróbki NPS. Ułatwieniem doboru warunków technologicznych NPS w przypadku konkretnego otworu może być matematyczny model tego procesu. Modelowanie obróbki NPS może być przeprowadzone metodami:

- modelowanie z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN),
- modelowanie oparte na metodzie elementów skończonych (MES).

Efektom obróbki NPS powinno być wykonanie otworu o określonej średnicy i chropowatości powierzchni. Przeprowadzenie operacji NPS wymaga określenia średnicy kulki przepychającej, średnicy i chropowatości powierzchni otworu wstępnego (przed NPS) oraz warunków technologicznych, takich jak prędkość przepychania, liczba przejazdów, ciecz smarująca. Stosując sztuczną sieć neuronową można opracować model procesu NPS [6, 12]. SSN należy wytrenować w oparciu o przykłady znanych wartości czynników wyjściowych, które odpowiadają założonym wartościom czynników wejściowych. Wartości tych przykładów uzyskiwane są na drodze doświadczalnej.

Model opracowany w oparciu o SSN może być wykorzystany do sterowania procesem NPS [7]. Koncepcja ta wiąże się z koniecznością posiadania kompletów specjalnych kulek przepychających. Jednostka sterująca, na podstawie przesłanych wartości średnicy i chropowatości powierzchni przed NPS oraz wymaganej średnicy i chropowatości powierzchni otworu po NPS, wyznacza średnicę kulki przepychającej (z kompletu) oraz sprawdza, czy nie nastąpi przekroczenie wymaganej chropowatości powierzchni i dopuszczalnego wcisku.

Modelowanie procesu NPS może być przeprowadzone również w oparciu o metodę elementów skończonych. Modelowanie MES obróbki NPS może być przeprowadzone przy założeniu oddziaływania sztywnego narzędzia o ustalonej krzywiznie na odkształcalny przedmiot. Siła oddziaływania narzędzia przepychającego na przedmiot rozkłada się na powierzchni kontaktu kulistego w przestrzeni sprężysto-plastycznej. Do obliczeń wykorzystywane są odpowiednie programy komputerowe. Zastosowanie MES do modelowania NPS umożliwia

określenie rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu, rozkładu temperatury w strefie kontaktu narzędzia przepychającego z obrabianym przedmiotem, jak również rozkładu intensywności odkształcenia, prędkości odkształcenia, intensywności naprężeń i naprężeń średnich [1].

8.8. Wykonanie ćwiczenia

8.8.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami nagniatania otworów, ze szczególnym uwzględnieniem przepychania i przeciągania ślizgowego, wpływem warunków technologicznych NPS na siłę przepychania oraz średnicę otworu po przepychaniu, ogólną charakterystyką warstwy wierzchniej po NPS. Część praktyczna obejmuje przeprowadzenie obróbki NPS otworu za pomocą narzędzia w kształcie kuli, pomiary siły przepychania, a także wyznaczenie przyrostu średnicy otworu oraz wskaźnika zmniejszenia chropowatości powierzchni.

8.8.2. Przebieg ćwiczenia

1. Dla danej średnicy kulki przepychającej d_k i wcisku względnego w_w obliczyć, korzystając ze wzorów (8.3) i (8.4), średnicę otworu wstępnego (przed przepychaniem) d_o' .
2. Zamocować badaną próbkę w uchwycie tokarki i przeprowadzić obróbkę otworu (wytaczanie) o średnicy d_o' .
3. Zmierzyć średnicę otworu d_o i ocenić różnicę między średnicą obliczoną d_o' a zmierzoną d_o .
4. Za pomocą profilografometru zmierzyć parametr Ra_0 chropowatości powierzchni po wytaczaniu.
5. Dobrać średnicę trzpienia przepychającego.
6. Zamocować na stole maszyny wytrzymałościowej przyrząd specjalny do NPS wraz z badaną próbką.
7. Przeprowadzić obróbkę NPS, mierząc siłę przepychania F_{prz} .
8. Zmierzyć średnicę otworu po NPS.
9. Zmierzyć parametr Ra_1 chropowatości powierzchni otworu po obróbce NPS.
10. Obliczyć, korzystając ze wzoru (8.2), przyrost średnicy otworu Δd_1 .
11. Obliczyć, korzystając z przedstawionego poniżej wzoru (8.5), wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} :

$$K_{Ra} = \frac{Ra_1}{Ra_0} \quad (8.5)$$

Ra_1 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości przed przepychaniem

Ra_0 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości po przepychaniu

8.8.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę obróbki NPS,
- b) szkic badanej próbki i rodzaj materiału, z którego została wykonana,
- c) schemat przyrządu specjalnego do NPS,
- d) opis przebiegu ćwiczenia,
- e) wyniki pomiarów i obliczeń,
- f) wnioski.

Literatura

1. Dyl T.: *Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności*. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia 2014.
2. El-Abden S.Z., Abdel-Rachman M., Mohamed F.A.: *Finishing of non-ferrous internal surfaces using ballizing technique*. "Journal of Materials Processing Technology" 124(2002), s. 144–152.
3. Fattouh M.: *Some investigations on the ballizing process*. "Wear" 134(1989), s. 209–219.
4. Grzesik W.: *Badania warunków przeciągania nagniatającego otworów w tulejach grubościennych*. „Mechanik” 5–6/1990, s. 189–191.
5. Korzyński M.: *Nagniatanie ślizgowe*. WNT Warszawa 2007.
6. Lipski J., Kuczaszewski J., Zaleski K.: *Zastosowanie sieci neuronowej do modelowania stanu warstwy wierzchniej po nagniatającym przepychaniu ślizgowym*. Materiały III Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej”, Gorzów Wlkp. - Lubniewice 1996, s. 433–436.
7. Lipski J., Zaleski K.: *Sterowanie procesem nagniatającego przepychania ślizgowego z zastosowaniem neuronowego modelu procesu*. Materiały II Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Jakość w budowie obrabiarek i technologii maszyn”, Kraków 1997, s. 45–51.
8. Nee A.Y.C.: *On the development of ballizing monograms*. "Int. J. Mach. Tool Des. Res". Vol. 26, No. 3, 1986, s. 293–306.

9. Nee A.Y.C., Venkatesh V.C.: *Bore finishing – the ballizing process*. “Journal of Mechanical Working Technology”, 6(1982), s. 215–226.
10. Parol A.: *Obróbka powierzchniowa dogniataniem*. Wyd. WSI Lublin 1977.
11. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT Warszawa 1987.
12. Zaleski K., Lipski J.: *Modelowanie nagniatającego przepychania ślizgowego otworów w przedmiotach z brązu przy zastosowaniu sieci neuronowej*. [W:] Przybylski W. (red.) *Współczesne problemy technologii obróbki przez nagniatanie*. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005, s. 29–35.
13. Zaleski K.: *Nagniatające przepychanie ślizgowe otworów w przedmiotach ze stopów tytanu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej „Mechanika” Nr 133, z. 44, 1995, s. 133–138.
14. Zaleski K.: *Wpływ nagniatającego przepychania ślizgowego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianego otworu*. [W:] Świąć A. (red.): *Technologiczne systemy informacyjne w inżynierii produkcji i kształceniu technicznym*. LTN Lublin 2001, s. 333–338.

9. NAGNIATANIE ODŚRODKOWE POWIERZCHNI WALCOWYCH

Nagniatanie odśrodkowe, zwane również kulkowaniem odśrodkowym, ma na celu umocnienie warstwy wierzchniej części maszyn narażonych na działanie obciążeń zmiennych oraz w mniejszym stopniu wygładzenie nierówności powierzchni.

Nagniatanie odśrodkowe zaliczane jest to dynamicznych metod nagniatania, które w stosunku do nagniatania statycznego posiada wiele zalet:

- przerywany kontakt narzędzia z powierzchnią przedmiotu podczas obróbki, co nie powoduje powstawania niekorzystnej, ciągłej fali materiałowej przed narzędziem,
- lepsze odprowadzenie ciepła ze strefy obróbki,
- mniejsze siły nagniatania,
- możliwość obróbki powierzchni kształtowych nie obrotowych
- możliwość obróbki na skrawających obrabiarkach uniwersalnych.

Do słabszych stron nagniatania dynamicznego należy zaliczyć:

- hałaśliwość pracy narzędzi,
- stosunkowo niewielka głębokość utwardzenia warstwy wierzchniej,
- mała dokładność wymiarowo-kształtowa obrobionych przedmiotów [5, 9, 12].

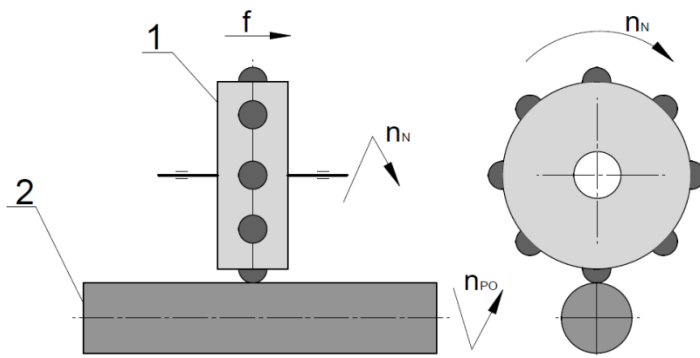
9.1. Istota nagniatania odśrodkowego

Nagniatanie odśrodkowe, wykorzystujące działanie siły odśrodkowej elementów nagniatających, polega na cyklicznym skoncentrowanym uderzeniu o powierzchnię obrabianą wirujących elementów w postaci kulek, krążków lub trzpieni. Uderzające elementy nagniatające o powierzchnię obrabianą oddają swoją energię kinetyczną, która w strefie nagniatania zostaje przemieniona na energię odkształcenia plastycznego.

W procesie nagniatania odśrodkowego występują cztery podstawowe ruchy, które stanowią kinematykę nagniatania odśrodkowego (rys. 9.1):

- główny ruch roboczy, jest to ruch obrotowy, wykonywany przez głowicę nadaje elementom nagniatającym wymaganą energię kinetyczną,
- posuwowy ruch wzdłużny będący ruchem postępowo-zwrotnym lub obrotowym przedmiotu obrabianego,

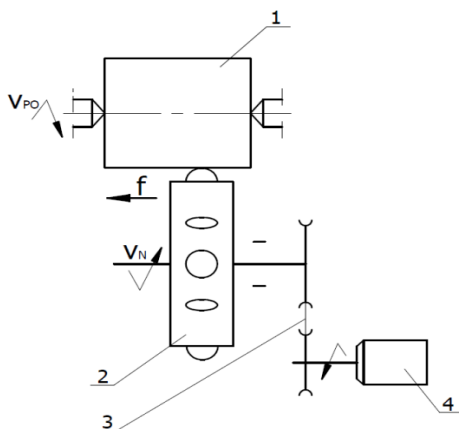
- posuwowy ruch poprzeczny, który może być wykonywany przez przedmiot lub narzędzie,
- ruch uderzenia elementów nagniatających o powierzchnię obrabianą [5].



Rys. 9.1. Schemat nagniatania odśrodkowego (1 – narzędzie, 2 – przedmiot obrabiany)

9.2. Nagniatanie odśrodkowe wałków

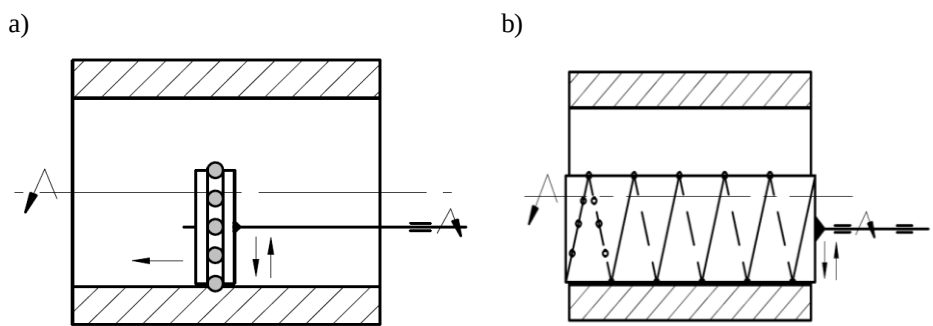
Nagniatanie odśrodkowe wałków wykonywane jest najczęściej na tokarce kłowej (rys. 9.2) przy wykorzystaniu suportowych narzędzi nagniatających (2), którymi są wieloelementowe głowice nagniatające. Narzędzia nagniatające posiadają własny napęd (3, 4), który pozwala wprowadzić głowicę w ruch obrotowy. Posuw nagniatania wymuszony jest przez suport tokarki [5].



Rys. 9.2. Schemat nagniatania odśrodkowego wałków w układzie kłowym (1 – przedmiot obrabiany, 2 – narzędzie, 3 – przekładnia pasowa, 4 – silnik)

9.3. Nagniatanie otworów

Za pomocą nagniatania dynamicznego odśrodkowego z powodzeniem można obrabiać powierzchnie walcowe wewnętrzne. Na rysunku 9.3 przedstawiono schemat odśrodkowego kulowania otworów, które przebiega według podobnego schematu jak obróbka wałków. Obróbka kulowaniem otworów może być realizowana za pomocą głowicy jednorzędowej (rys. 9.3a), jak i głowic wielorzędowych (rys. 9.3b), co pozwala na kilkukrotne skrócenie czasu obróbki.



Rys. 9.3. Schemat nagniatania odśrodkowego otworów: a) głowicą jednorzędową z posuwem wzdłużnym, b) głowicą wielorzędową z posuwem poprzecznym

Nagniatanie odśrodkowe otworów różni się od kulowania wałków wzajemną proporcją prędkości składowych kulki w odniesieniu do prędkości obwodowej głowicy nagniatającej. Związane jest to ze zmianą krzywizny obrabianego przedmiotu z wypukłej na wklęsłą [5].

9.4. Parametry technologiczne nagniatania odśrodkowego

Podczas nagniatania odśrodkowego elementy nagniatające, w wyniku ruchu obrotowego tarczy głowicy nagniatającej, poruszają się ruchem obrotowym z prędkością obwodową v , która może być rozłożona na składową normalną v_n oraz styczną v_s . Po uderzeniu kulka odskakuje od przedmiotu obrabianego w przeciwnym kierunku z prędkością u_n wyznaczaną z zależności (9.1) [5]:

$$u_n = v_n k \quad (9.1)$$

gdzie: k – współczynnik zależny od sprężystości materiału obrabianego,
 v_n – składowa normalna prędkości obwodowej głowicy z kulkami

Prędkość kulki v_n dla nagniatania odśrodkowego wałka można obliczyć z zależności 9.2 a dla otworu ze wzoru 9.3 [5]:

$$v_n = v \sqrt{\frac{2e(R+r_k+r)}{R(r+r_k)}} \quad (9.2)$$

$$v_n = v \sqrt{\frac{2e(r-R-r_k)}{R(r-r_k)}} \quad (9.3)$$

gdzie: v – prędkość obwodowa głowicy z kulkami [m/min],
 e – dosuw głowicy do przedmiotu [mm],
 R – promień tarczy głowicy [mm],
 r_k – promień kulki [mm],
 r – promień obrabianego wałka/ otworu [mm].

Pomijając wpływ bardzo małej wartości dosuwu e w stosunku do promienia głowicy nagniatającej R wartość kąta α , można wyznaczyć na podstawie zależności 9.4 [5]:

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{2e(R+r_k+r)}{R(r_k+r)}} \quad (9.4)$$

Podczas uderzenia kulka odbija się od powierzchni obrabianej i zostaje cofnięta w głąb gniazda głowicy nagniatającej na odległość e – zwaną *dosuwem głowicy do przedmiotu obrabianego*. Wartość dosuwu e można wyznaczyć na podstawie zależności (9.5) [5]. W praktyce wartość dosuwu wynosi $0,02 \div 0,5$ mm.

$$e = R_2 - R_1 \quad (9.5)$$

gdzie: R_2 – największa odległość kulki od środka obrotu głowicy [mm],
 R_1 – odległość kulki od środka obrotu głowicy w momencie chwilowego kontaktu z przedmiotem [mm].

Efekty obróbki nagniataniem odśrodkowym zależą od wartości impulsu uderzenia, którego przybliżoną wartość można obliczyć na podstawie wzoru (9.6) [5]. Masa i prędkość elementu nagniatającego wpływają na wartość impulsu uderzenia [5].

$$S = \frac{2\pi m_k n}{1000} \sqrt{\frac{e(D_g + d)(D_g - D_k)}{d + D_g}} \quad (9.6)$$

gdzie: m_k – masa kulki [kg],
 n – prędkość obrotowa głowicy [obr/s],
 k – współczynnik zależny od sprężystości obrabianego materiału,
($k = 0$ materiały plastyczne, $k = 1$ materiały sprężyste, $k = 0,7$ dla stali),
 D_g – średnica głowicy [mm],
 d – średnica przedmiotu obrabianego [mm],
 D_k – średnica kulki [mm],
 e – dosuw głowicy do przedmiotu obrabianego [mm].

Energia kinetyczna jaką posiada element nagniatający wraz z głowicą nagniatającą wyznaczana jest na podstawie zależności (9.7) [5]:

$$E = \frac{m_k v_n^2}{2} \quad (9.7)$$

gdzie: m_k – masa kulki [kg],
 v_n – prędkość kulki nagniatającej [m/s].

Aby móc obrobić powierzchnie wałka lub otworu o danej długości głowica nagniatająca musi wykonywać posuwowy ruch wzdłużny, którego wartość wyznacza się w oparciu o zależność (9.8) [5].

$$f = f_k z \frac{n_g}{n} \quad (9.8)$$

gdzie: f_k – posuw wzdłużny na jedną kulkę [mm/kulkę],
 z – liczba kulek nagniatających,
 n_g – prędkość obrotowa głowicy nagniatającej [obr/min],
 n – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr/min].

Parametrem definiującym nagniatanie odśrodkowe jest intensywność kulgowania (9.9), która określa liczbę uderzeń m kulek przypadających na 1 mm² obrobionej powierzchni [5].

$$m = \frac{n_g z}{\pi d n f} \quad (9.9)$$

gdzie: z – liczba kulek nagniatających,

n_g – prędkość obrotowa głowicy nagniatającej [obr/min],

n – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr/min],

f – posuw wzdłużny nagniatania [mm/obr],

d – średnica przedmiotu obrabianego [mm].

9.5. Właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu odśrodkowym

Nagniatanie dynamiczne odśrodkowe pozwala na kształtowanie korzystnych właściwości stereometrycznych i fizycznych warstwy wierzchniej.

Chropowatość powierzchni ukształtowana poprzez nagniatanie odśrodkowe zależy od: wartości dosuwu narzędzia do przedmiotu obrabianego, prędkości obwodowej głowicy, liczby przejść narzędzia, wymiarów elementów nagniatających, materiału obrabianego i chropowatości wyjściowej [1, 5, 7]. Parametr R_a po nagniataniu można uzyskać na poziomie $0,25 \div 0,5 \text{ } \mu\text{m}$. Po nagniataniu odśrodkowym nie powstaje struktura anizotropowa [4].

Chropowatość powierzchni wraz ze wzrostem dosuwu narzędzia do przedmiotu obrabianego najpierw maleje, a następnie rośnie. Zwiększenie dosuwu powoduje zmniejszenie wpływu bicia kulek na równomierność śladów uderzeń na powierzchni obrabianej, ale ma miejsce intensyfikacja zjawiska tarcia w strefie obróbki, co przekłada się na wzrost parametrów chropowatości. Wzrost prędkości obwodowej głowicy nagniatającej równoznaczny jest ze zwiększeniem energii kinetycznej elementów nagniatających, co wpływa na wielkość odkształceń plastyczno-sprężystych. Wpływ prędkości obwodowej głowicy nagniatającej jest identyczny jak dosuwu [3, 7, 10, 11]. Przekroczenie wartości optymalnej prędkości nagniatania powoduje wzrost falistości oraz łuszczenie się powierzchni [2]. Wzrost posuwu wzdłużnego oraz przesuwu poprzecznego powoduje zmniejszenie liczby uderzeń kulek przypadających na jednostkę powierzchni obrabianej, a tym samym wzrost odległości między śladami uderzeń, co przekłada się na zwiększenie się chropowatości powierzchni obrobionej. Chropowatość powierzchni po nagniataniu odśrodkowym uwarunkowana jest również właściwościami mechanicznymi materiału obrabianego oraz stanem geometrycznym powierzchni wyjściowej [3, 7, 10, 11].

Powierzchnia obrobiona nagniataniem odśrodkowym charakteryzuje się dużą gładkością oraz bardziej „opływowym” kształtem mikronierówności, co przekłada się na stosunkowo duży udział nośny [2]. Podczas obróbki na powierzchni obrabianej wybijane są ślady obróbkowe, co pozwala na powstawanie

potencjalnych „zbiorników” mogących gromadzić w swej przestrzeni substancje smarujące bądź też stymulować korzystne eksploatacyjne procesy hydrodynamicznego „unoszenia smarownego” [9].

Podczas nagniatania odśrodkowego następuje rozdrobnienie struktury i zwiększenie gęstości dyslokacji, co przyczynia się do zwiększenia twardości i wytrzymałości [6]. Głębokość i stopień umocnienia warstwy wierzchniej uzależnione są od parametrów technologicznych procesu [2, 8, 10]. Głębokość utwardzenia jak i twardość wzrastają wraz ze wzrostem prędkości obwodowej narzędzia. Wzrost prędkości obwodowej przedmiotu i posuwu powoduje spadek stopnia umocnienia warstwy wierzchniej. Duża chropowatość początkowa stanowi jakby „osłonę” podstawowych warstw materiału przed uderzeniami, co utrudnia równomierne rozłożenie zgniotu [8, 10, 11].

9.6. Wykonanie ćwiczenia

9.6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą obróbki powierzchni walcowych zewnętrznych nagniataniem odśrodkowym oraz wpływem parametrów technologicznych obróbki na wybrane właściwości warstwy wierzchniej. Cześć praktyczna obejmuje przeprowadzenie próby nagniatania odśrodkowego wałka dla zadanych warunków obróbki.

9.6.2. Przebieg ćwiczenia

1. Przygotować wałek do próby nagniatania odśrodkowego – odtłuścić powierzchnię, zmierzyć średnicę oraz chropowatość powierzchni przed nagniataniem.
2. Dobrać prędkość obrotową głowicy nagniatającej kierując się średnicą koła pasowego zamocowanego na trzpieniu silnika oraz średnicą koła zamocowanego na trzpieniu głowicy (tabela z danymi w dokumentacji stanowiskowej).
3. Dla zadanego dosuwu głowicy e obliczyć wartość odległości tarczy głowicy nagniatającej x od przedmiotu obrabianego:

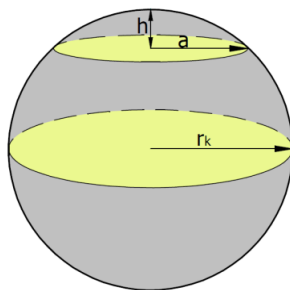
$$x = h - e$$

gdzie: h – strzałka czaszy kulki wysuniętej z tarczy głowicy nagniatającej,

e – dosuw głowicy,

a – promień czaszy,

r_k – promień kulki nagniatającej.



Rys. 9.4. Strzałka czaszy

Strzałkę czaszy (rys. 9.4) należy obliczyć przekształcając zależność 9.10.

$$a = \sqrt{(2r_k - h)h} \quad (9.10)$$

4. Przeprowadzić próbę nagniatania odśrodkowego wałka.
5. Dokonać pomiaru średnicy przedmiotu obrabianego, policzyć liczbę kulek nagniatających celem wyznaczenia pozostałych parametrów nagniatania odśrodkowego.
6. Obliczyć masę kulki nagniatającej z zależności 9.11:

$$m_k = \rho \cdot V \quad (9.11)$$

gdzie: V – objętość kulki,
 ρ – gęstość materiału kulki.

7. Obliczyć impuls uderzenia z zależności 9.6.
8. Obliczyć energię kinetyczną wirującego elementu nagniatającego na podstawie wzoru 9.7.
9. Obliczyć posuw na jedną kulkę z wzoru 9.8.
10. Obliczyć intensywność kulkowania m z zależności 9.9.
11. Zmierzyć chropowatość powierzchni po nagniataniu.
12. Wyznaczyć odchylenie standardowe dla pomiarów chropowatości powierzchni przed i po obróbce nagniataniem odśrodkowym.
13. Obliczyć, korzystając z wzoru (9.12), wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} :

$$K_{Ra} = \frac{Ra_1}{Ra_0} \quad (9.12)$$

gdzie: Ra_1 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości przed nagniataniem,
 Ra_0 – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości po nagniataniu.

9.6.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) zwięzłą charakterystykę nagniatania odśrodkowego,
- b) szkic badanej próbki i charakterystykę materiału, z którego została wykonana,
- c) opis przebiegu ćwiczenia,
- d) wyniki pomiarów i obliczeń,
- e) wnioski.

Literatura:

1. Dopierała A., *Wybór zasadniczych parametrów kulowania udarowego*, Sesja Naukowa Komisji Technologii Budowy Maszyn, Poznań, 1979.
2. Grajcar J., Laber S., *Niektóre zagadnienia technologii wykończającej kulowania udarowego żeliwa Żl 25 + Cu*. [W:] Materiały konferencyjne: IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna *Postępy w teorii i technice obróbki materiałów*, Kraków, 1973, s. 5–14.
3. Kęsy M., *Problemy kształtowania warstwy wierzchniej żeliwa szarego dynamicznymi metodami nagniatania*, „Inżynieria Materiałowa”, 2005, 5, s. 755–757.
4. Korzyński M., Pacana A., *Centreless burnishing and influence of its parameters on machining effects*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2010, 210, s. 1217–1223.
5. Przybylski W., *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT, 1987.
6. Tubielewicz K., *Technologia nagniatania żeliwnych części maszynowych*, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2005.
7. Tubielewicz K., *Wpływ parametrów kulowania odśrodkowego na wskaźniki chropowatości powierzchni*, „Mechanik”, 1974, 2, s. 89–92.

8. Tubielewicz K., *Wpływ parametrów kulkowania odśrodkowego na wskaźnik umocnienia warstwy wierzchniej stali*, „Mechanik”, 1973, 8, s. 415–419.
9. Tubielewicz K., Kęsy M., *Technologiczne problemy obróbki żeliwa szarego*, [W:] Materiały konferencyjne : XXVI Szkoła Tribologiczna Problemy Tribologiczne w Przyrodzie i Technice oraz VI Konferencja Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych, Łódź – Niedzica, 2003, s. 161–175.
10. Zaleski K., Lipski J., *Modelowanie za pomocą sieci neuronowej odśrodkowego kulkowania stopu tytanu*, „Przegląd Mechaniczny”, 2006, 12, s. 29–33.
11. Zaleski K., Lipski J., *Zastosowanie sieci neuronowej do projektowania procesu technologicznego kulkowania odśrodkowego stopu tytanu*, [W:] pod red. M. Korzyński, *Wytwarzanie elementów maszyn ze stopów metali o specjalnych właściwościach*, Rzeszów – Bystre, Politechnika Rzeszowska, 2001, s. 167–174.
12. Zaleski K., Skoczyła A.: *Struktura geometryczna powierzchni stali po cięciu laserowym i nagniataniu odśrodkowym*. „Przegląd Mechaniczny”, 6, 2015, s. 32–36.

10. KULKOWANIE WIBRACYJNE

Kulkowanie vibracyjne jest jedną z metod nagniatania dynamicznego rozproszonego. Nagniatanie dynamiczne jest sposobem wykończeniowej obróbki wytwarzanych przedmiotów, polegającym na cyklicznym uderzaniu elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię. Efektem tych uderzeń jest zmiana struktury geometrycznej powierzchni oraz właściwości fizycznych warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu.

Nagniatanie dynamiczne dzieli się na skoncentrowane i rozproszone [5]. Nagniatanie rozproszone (nazywane też kulkowaniem)², w odróżnieniu od skoncentrowanego, charakteryzuje się tym, że elementy nagniatające nie uderzają w obrabianą powierzchnię według wcześniej opracowanego programu (odległości między śladami są określone), ale w sposób przypadkowy. Rozróżnia się dwie metody kulkowania rozproszonego: strumieniowe i vibracyjne.

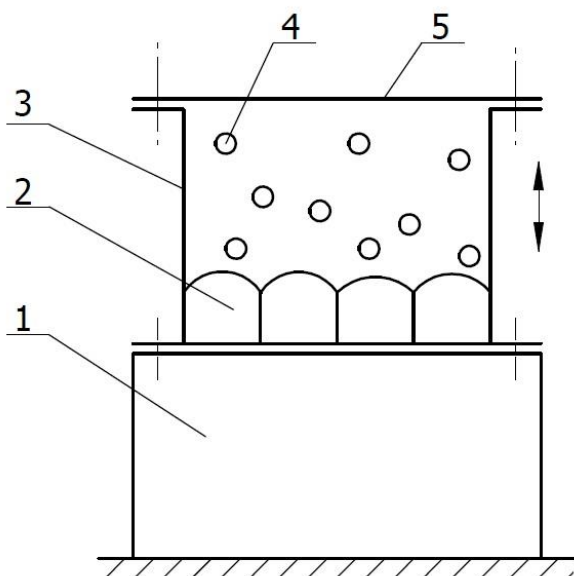
W procesie kulkowania strumieniowego nagniatanie następuje wskutek uderzania w powierzchnię obrabianą strumienia elementów nagniatających poruszających się z dużą prędkością. Kulkowanie vibracyjne polega na uderzaniu elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię wskutek drgań komory roboczej, w której znajdują się zarówno elementy nagniatające jak i obrabiane przedmioty.

10.1. Kinematyka, odmiany oraz zastosowanie kulkowania vibracyjnego

Przykład obróbki kulkowaniem vibracyjnym przedstawiono schematycznie na rys. 10.1. Przedmioty obrabiane 2 są zamocowane w komorze roboczej 3, która posadowiona jest na wibratorze 1. Po zamocowaniu przedmiotów 2 do komory roboczej 3 zasypywane są kulki nagniatające 4, po czym komora zamykana jest pokrywą górną 5. Wibrator 1 wprowadza w ruch drgający komorę roboczą 3 wraz z przedmiotami 2 (kierunek ruchu zaznaczono strzałką). Pod wpływem tych drgań kulki 4 zderzają się z przedmiotami 2, powodując umocnienie ich warstwy wierzchniej. Kulki zderzają się również ze ściankami komory roboczej, pokrywą górną oraz innymi kulkami, co powoduje, że poszczególne kulki

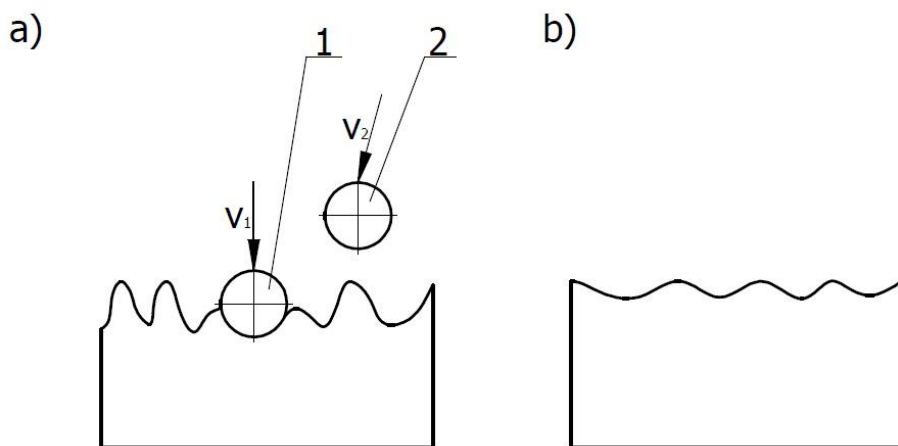
² Elementami nagniatającymi w procesie nagniatania dynamicznego rozproszonego najczęściej są kulki, dlatego obróbka ta bardzo często nazywana jest kulkowaniem lub kulowaniem.

uderzają w powierzchnię przedmiotu z różną prędkością i pod różnym kątem, a rozmieszczenie śladów uderzeń jest przypadkowe.



Rys. 10.1. Schemat kulkowania wibracyjnego: 1 – wibrator, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – komora robocza, 4 – kulka nagniatąca, 5 – pokrywa górna

Kulkowanie wibracyjne powoduje ukształtowanie nowej, w stosunku do istniejącej, struktury geometrycznej powierzchni obrabianego przedmiotu (rys. 10.2). Kulka 1, uderzająca z prędkością v_1 w obrabianą powierzchnię, powoduje zginięcie mikronierówności po obróbce poprzedzającej kulkowanie (rys. 10.2a). Skutki uderzeń poszczególnych kulek są zróżnicowane ze względu na różną prędkość i kąt uderzenia, np. prędkość i kąt uderzenia kulki 2 są inne w porównaniu z kulą 1. Wraz ze wzrostem czasu kulkowania odciski powstające wskutek uderzeń kulek pokrywają całą obrabianą powierzchnię, czego efektem jest powstanie punktowej struktury geometrycznej powierzchni o kształcie mikronierówności związanym z krzywizną kulek nagniatających (rys. 10.2b).



Rys. 10.2. Kształt mikronierówności powierzchni przed kulkowaniem (a) oraz po kulkowaniu (b): 1, 2 – kulki nagniatające

Struktura geometryczna powierzchni po kulkowaniu zależy od stopnia pokrycia K_o odciskami uderzeń kulek [5]:

$$K_o = \frac{A_o}{A_p} J \quad (10.1)$$

gdzie: A_o – powierzchnia rzutu odcisku kulki,

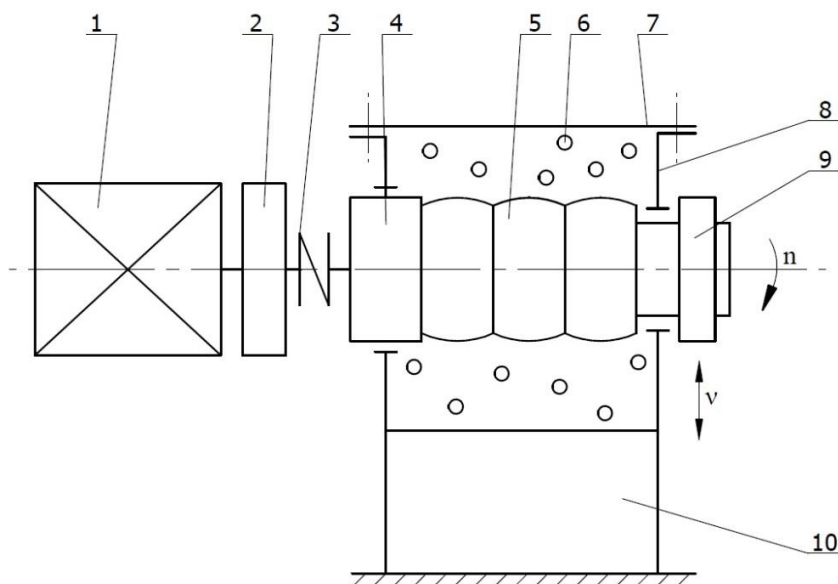
A_p – rozpatrywana powierzchnia obrabianego przedmiotu,

J – liczba uderzeń kulki przypadająca na rozpatrywaną powierzchnię.

W zależności od kształtu i wymiarów obrabianych przedmiotów stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne urządzeń do kulkowania wibracyjnego. Jeżeli obróbka umacniająca wymagana jest na całym obwodzie przedmiotu, może być zastosowane kulkowanie wibracyjno-rotacyjne [10, 11].

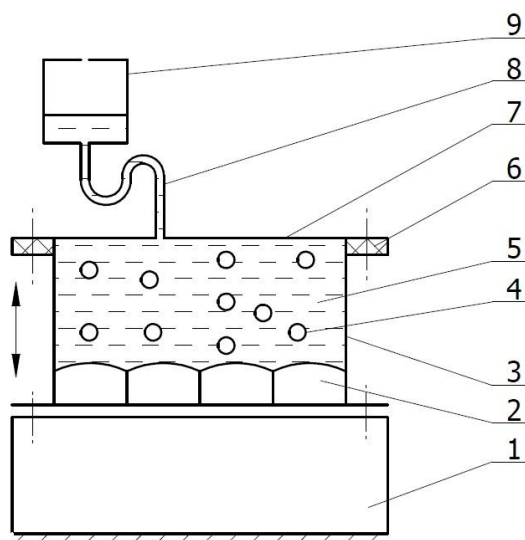
Przykład kulkowania wibracyjno-rotacyjnego przedmiotów osiowo-symetrycznych z otworami przedstawiono na rys. 10.3. Obrabiane przedmioty 5 mocowane są na trzpieniu obrotowym 4, który jest ślizgowo ułożyskowany w ściankach komory roboczej 8. Do zabezpieczenia trzpienia 4 przed wypadnięciem służy pierścień 9. Po umieszczeniu trzpienia 4 wraz z przedmiotami obrabianymi 5 w komorze roboczej zasypywane są kulki nagniatające 6, po czym komora jest zamykana pokrywą 7. Komora 8 posadowiona jest na wibratorze 10, który wprawia ją w ruch drgający o częstotliwości ν . Pod wpływem drgań kulki

6 uderzają w powierzchnie obrabianych przedmiotów 5, powodując ich nagniatanie. W celu zapewnienia równomierności nagniatania na całym obwodzie przedmiotów 5, trzpień 4 wprawiany jest w ruch obrotowy z prędkością n za pomocą silnika 1. Przekładnia 2 służy do zmniejszenia prędkości obrotowej trzpienia 4, a sprzęgło elastyczne 3 umożliwia połączenie ruchu obrotowego trzpienia 4 z ruchem drgającym komory 8.



Rys. 10.3. Schemat kulkowania wibracyjno-rotacyjnego: 1 – silnik, 2 – przekładnia, 3 – sprzęgło elastyczne, 4 – trzpień obrotowy, 5 – kulkowany przedmiot, 6 – kulka nagniatająca, 7 – pokrywa, 8 – komora robocza, 9 – pierścień zabezpieczający, 10 – wibrator

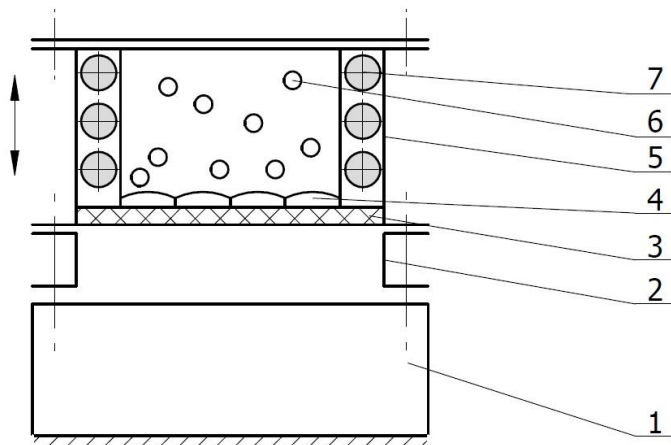
Kulkowanie wibracyjne może być prowadzone na sucho lub w środowisku cieczy obróbkowej. Schemat stanowiska do kulkowania wibracyjnego w cieczach przedstawiono na rys. 10.4 [4]. W komorze roboczej 3, wykonującej ruch drgający wywołany przez wibrator 1, oprócz przedmiotów obrabianych 2 i kulek nagniatających 4 znajduje się ciecz obróbkowa 5. Między płytą górną 7 a komorą roboczą 3 znajduje się uszczelka 6, która zabezpiecza komorę przed wyciekaniem cieczy. Połączony z komorą roboczą 3 układ odpowietrzający 9 zabezpiecza przed nadmiernym wzrostem ciśnienia cieczy obróbkowej 5.



Rys. 10.4. Schemat stanowiska do kulowania wibracyjnego w cieczach: 1 – wibrator, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – komora robocza, 4 – kulka nagniatająca, 5 – ciecz obróbkowa, 6 – uszczelka, 7 – płyta górna, 8 – przewód elastyczny, 9 – układ odpowietrzający

Przedmioty po kulowaniu wibracyjnym w cieczach powinny być możliwie szybko wysuszone. Proces suszenia odbywa się w różnego rodzaju suszarkach, a mianowicie: wibracyjno-kołowych, bębnowych, tunelowych taśmowych, odśrodkowych [6].

Umocnienie warstwy wierzchniej wskutek kulowania wibracyjnego można zwiększyć poprzez przeprowadzenie tej obróbki w podwyższonej temperaturze [4]. Na rys. 10.5 przedstawiono schematycznie stanowisko do kulowania wibracyjnego z podgrzewaniem komory roboczej. W celu zabezpieczenia wibratora 1 przed nagrzewaniem się, komora 5 połączona jest z wibratorem za pośrednictwem wsporników 2, a ponadto zastosowana została warstwa izolacyjna 3. Elementy grzejne 7 powodują wzrost temperatury przedmiotów obrabianych 4, co wpływa na ich uplastycznienie i wzrost umocnienia warstwy wierzchniej pod wpływem uderzeń kulek nagniatających 6.



Rys. 10.5. Schemat stanowiska do kulowania wibracyjnego w podwyższonej temperaturze:
 1 – wibrator, 2 – wspornik, 3 – warstwa izolacyjna, 4 – przedmiot obrabiany, 5 – komora robocza,
 6 – kulka nagniatająca, 7 – element grzejny

Głównym celem poddawania elementów maszyn obróbce kulowaniem wibracyjnym jest zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej tych elementów. Kulowanie wibracyjne umożliwia zwiększenie czasu pracy obrabianych elementów albo zmniejszenie ich masy, co ma szczególne znaczenie w przemyśle lotniczym, a także motoryzacyjnym. W bardzo dużym stopniu na wzrost wytrzymałości zmęczeniowej wpływają ściskające naprężenia własne, ukształtowane w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów w procesie kulowania. Obróbka kulowaniem wibracyjnym może korzystnie wpływać również na inne cechy eksploatacyjne elementów maszyn, takie jak odporność na zużycie tribologiczne czy odporność na korozję.

Do zalet kulowania wibracyjnego można zaliczyć:

- możliwość nadania warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów określonych właściwości,
- niewielkie siły występujące w procesie kulowania, co umożliwia obróbkę przedmiotów o małej sztywności,
- dobre odprowadzenie ciepła (temperatura obrabianych przedmiotów tylko nieznacznie wzrasta),
- możliwość obróbki przedmiotów o złożonym kształcie, zarówno nieobrotowych jak i obrotowych.

Jako wady kulkowania wibracyjnego trzeba uznać duży hałas, towarzyszący tej obróbce, oraz brak możliwości poprawy dokładności wymiarowej obrabianych przedmiotów.

10.2. Rodzaje wibratorów

Do nadawania ruchu drgającego komorom roboczym wraz ze znajdującymi się w nich obrabianymi przedmiotami i kulkami nagniatającymi służą urządzenia nazywane wibratorami. Maszyny i urządzenia wibracyjne mają szerokie zastosowanie w technice, a szczególnie są używane do [1, 2]:

- wygładzania powierzchni za pomocą kształtek ściernych,
- nagniatania gładkościowego i umacniającego,
- oczyszczania i odtłuszczania przedmiotów,
- usuwania zadziorów i stępienia ostrych krawędzi,
- wybijania odlewów z form piaskowych,
- zagęszczania mieszanki betonowej,
- transportu materiałów sypkich,
- stabilizacji wymiarowo-kształtowej elementów spawanych, odlewanych, kutech,
- wspomagania procesów skrawania, odlewania, obróbki plastycznej.

Ze względu na liczbę kierunków ruchów składowych komory roboczej wyróżnia się urządzenia wibracyjne [1]:

- ruchu jednokierunkowym,
 - o ruchu płaskim,
- ruchu przestrzennym.

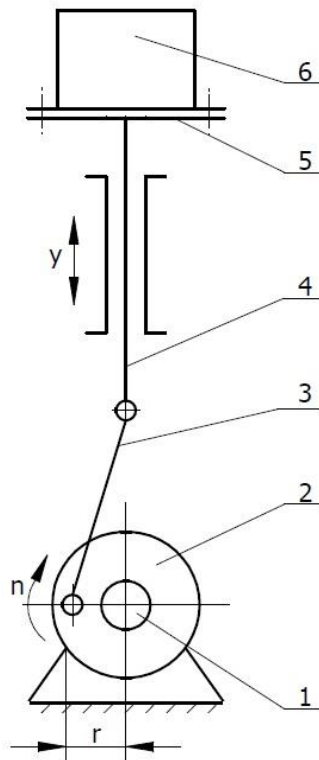
Biorąc pod uwagę zasadę działania, rozróżnia się następujące typy wibratorów [2]:

- mechaniczne,
- elektromagnetyczne,
- pneumatyczne,
- hydrauliczne.

W procesie kulkowania najczęściej stosowane są wibratory mechaniczne, które napęd otrzymują od silników, głównie elektrycznych. Wibratory te dzieli się na [2]:

- kinematyczne,
- dynamiczne.

Wibratory mechaniczne kinematyczne zwykle działają w oparciu o mechanizm korbowy. Zasadę pracy przykładowego wibratora kinematycznego o ruchu jednokierunkowym przedstawiono na rys. 10.6. Wał 1 wraz z osadzoną na nim tarczą 2 wykonuje ruch obrotowy z prędkością n . Na tarczy 2 w odległości r od osi wału 1 zamocowany jest sworzeń, który poprzez korbowód 3 połączony jest z suwakiem 4. Na suwaku 4 osadzona jest płyta 5, do której mocuje się komorę roboczą 6. Ruch obrotowy wału 1 wymusza ruchy posuwisto-zwrotne suwaka 4 wraz z komorą roboczą 6 w kierunku y .

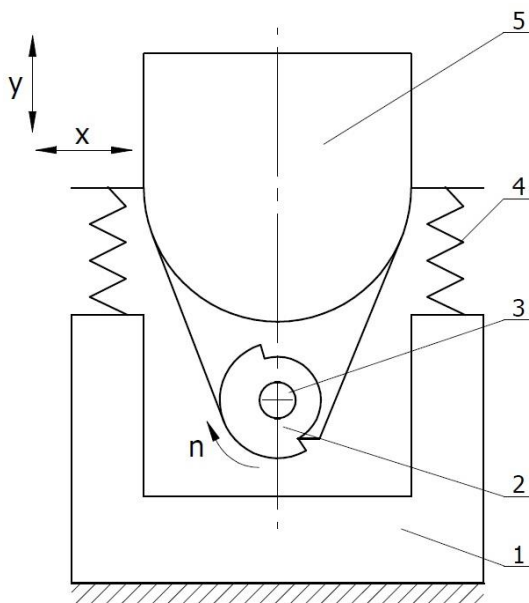


Rys. 10.6. Schemat urządzenia do kulkowania z wibratorem mechanicznym kinematycznym o ruchu jednokierunkowym: 1 – wał, 2 – tarcza, 3 – korbowód, 4 – suwak, 5 – płyta, 6 – komora robocza

W wibratorach mechanicznych dynamicznych³ siła wymuszająca drgania pochodzi od obracającej się masy niewyważonej. Zasada pracy przykładowego

³ Wibratory mechaniczne dynamiczne nazywane są też wibratorami bezwładnościowymi lub inercyjnymi [2, 4]

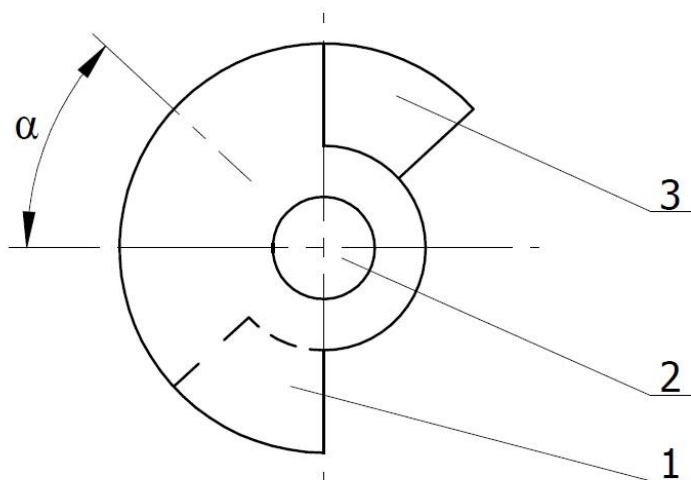
wibratora dynamicznego o ruchu płaskim została pokazana na rys. 10.7. Masa niewyważona 2, zamocowana na obracającym się z prędkością n wale 3, wymusza drgania komory roboczej 5. Komora ta za pośrednictwem sprężyn 4 została posadowiona na podstawie 1. Sprężyste posadowienie komory umożliwia jej przemieszczanie się w kierunku osi x oraz y .



Rys. 10.7. Schemat urządzenia do kulkowania z wibratorem mechanicznym dynamicznym o ruchu płaskim: 1 – podstawa, 2 – masa niewyważona, 3 – wał, 4 – sprężyna, 5 – komora robocza

Urządzenia z wibratorami o ruchu płaskim (również o ruchu przestrzennym) stosowane są głównie do usuwania pokryć i warstw przypowierzchniowych oraz poprawy chropowatości powierzchni [1, 6]. Efekt usuwania materiału oraz wyrównywania mikronierówności powierzchni uzyskiwany jest w wyniku wzajemnego ruchu stycznego obrabianych przedmiotów i elementów medium obróbkowego, którym najczęściej są kształtki ściernic. Wskutek występowania w procesie oddziaływania tych elementów na przedmioty składowej siły prostopadłej do obrabianej powierzchni może również nastąpić umocnienie warstwy wierzchniej przedmiotów.

Wały wibratorów dynamicznych mogą być ze stałą lub nastawialną masą niewyważoną [2]. Na wałku 2 (rys. 10.8) z nastawialną masą niewyważoną znajdują się dwa elementy ustawialne 1 oraz 3, których wzajemne położenie można zmieniać o kąt α w zakresie od 0° do 180° . Zmiana kąta α wpływa na wartość niewyważenia.



Rys. 10.8. Schemat wału wibratora dynamicznego z nastawialną masą niewyważoną:
1, 3 – elementy ustawialne, 2 – wał, α – kąt wzajemnego położenia elementów ustawialnych

Do kulkowania przeważnie stosowane są wibratory o ruchu jednokierunkowym. Drgania w jednym kierunku wibratorów dynamicznych można uzyskać poprzez zastosowanie dwóch wałów o osiach równoległych, o jednakowej masie niewyważonej, obracających się w przeciwnych kierunkach. Osadzone na tych wałach elementy o masie niewyważonej ustawia się tak, aby siły w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny przechodzącej przez osie wałów równoważyły się.

W wibratorach elektromagnetycznych drgania wymuszane są przez zmienne siły przyciągania zwory elektromagnesu zasilanego zmiennym prądem elektrycznym. Zwora elektromagnesu zwykle jest połączona z korpusem elektromagnesu, który jest posadowiony na podłożu za pośrednictwem układu sprężystego. Rdzeń ze zworą połączony jest za pomocą sprężyn, których charakterystyka umożliwia drgania układu z częstotliwością bliską częstotliwości rezonansowej [2].

Wibratory elektromagnetyczne charakteryzują się następującymi zaletami:

- płynność regulacji amplitudy drgań poprzez zmianę napięcia zasilania,
- małe zużycie ze względu na brak elementów trących,
- brak konieczności smarowania,
- łatwość automatyzacji urządzeń wibracyjnych,
- możliwość pracy w dowolnej pozycji.

Natomiast do wad wibratorów elektromagnetycznych można zaliczyć [2]:

- brak możliwości uzyskania jednocześnie dużej siły i dużej amplitudy drgań,
- konieczność budowania maszyn wibracyjnych jako układów drgających okołorezonansowo.

W wibratorach pneumatycznych źródłem siły wymuszającej jest najczęściej ruch obrotowy masy niewyważonej albo ruch obiegowy kuli lub rolki po pierścieniowej bieżni, wzbudzony strumieniem sprężonego powietrza. Do zalet wibratorów pneumatycznych trzeba zaliczyć możliwość regulacji częstotliwości drgań oraz siły wymuszającej, a do wad – duże zużycie energii i znaczny poziom hałasu [2].

Czynnikiem wzbudzającym drgania w wibratorach hydraulicznych jest strumień cieczy. Wibratory te charakteryzują się możliwością uzyskania znacznych sił oraz dość cichą pracą.

10.3. Warunki technologiczne kulkowania wibracyjnego

Warunki technologiczne mają duży wpływ zarówno na strukturę geometryczną powierzchni jak i właściwości fizyczne warstwy wierzchniej przedmiotów obrobionych kulkowaniem wibracyjnym. Do podstawowych czynników wpływających na efektywność kulkowania wibracyjnego można zaliczyć:

1. Rodzaj i właściwości materiału obrabianego.
2. Elementy nagniatające.
3. Kształt i wymiary obrabianych przedmiotów.
4. Parametry technologiczne.
5. Ciecz obróbkowa.

Obróbce kulkowaniem wibracyjnym poddawane są przedmioty wykonane z różnych materiałów, a w szczególności ze stali, stopów tytanu, stopów aluminium. Przedmioty, przed kulkowaniem, mogą być poddawane różnym rodzajom obróbki cieplnej, co ma znaczący wpływ na ich właściwości, a szczególnie na twardość. Większe zmiany właściwości warstwy wierzchniej następują w przypadku kulkowania przedmiotów o mniejszej twardości.

Najczęściej stosowanymi elementami nagniatającymi w obróbce kulkowaniem wibracyjnym są kulki stalowe o średnicy kilku milimetrów. Ze względu na łatwość zakupu i małą chropowatość powierzchni duże zastosowanie mają kulki łożyskowe. Mogą być też używane, szczególnie w przypadku kulkowania w podwyższonej temperaturze, kulki ze stali szybko tnącej lub z węglików spiekanych.

Kształt i wymiary obrabianych przedmiotów mają wpływ na wielkość komory roboczej i sposób mocowania tych przedmiotów. Przedmioty o dużych gabarytach zwykle mocowane są za pomocą odpowiednich uchwytów do dna komory roboczej. Natomiast przedmioty o małych wymiarach („drobne”) mogą się swobodnie przemieszczać w medium obróbkowym, które tworzą elementy nagniatające. Przedmioty wymagające obróbki umacniającej na całym obwodzie mocowane są na obracającym się trzpieniu (kulkowanie wibracyjno-rotacyjne).

Do podstawowych parametrów technologicznych kulkowania wibracyjnego należy zaliczyć:

- amplitudę drgań wibratora,
- częstotliwość drgań wibratora,
- czas kulkowania.

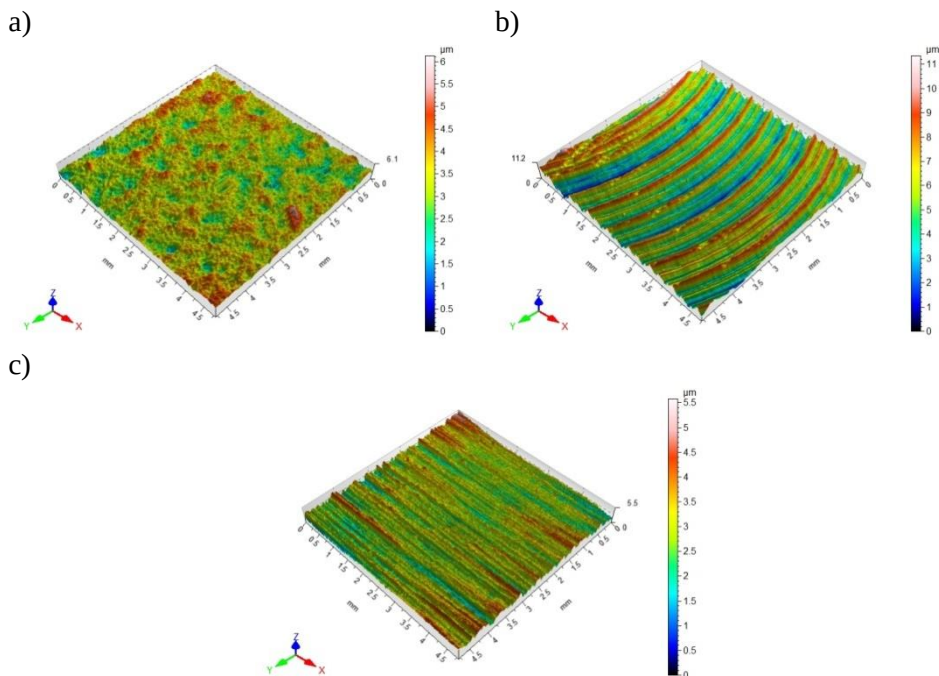
Na przebieg procesu kulkowania wpływa też wysokość komory roboczej oraz wysokość „wsadu” elementów nagniatających.

Kulkowanie wibracyjne często prowadzone jest w powietrzu („na sucho”). W przypadku stosowania cieczy obróbkowej konieczne jest wyposażenie stanowiska w odpowiednią komorę roboczą. Korzystnie na efekty kulkowania wpływa zastosowanie cieczy z dodatkami powierzchniowo aktywnymi [7].

10.4. Wpływ kulkowania wibracyjnego na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów

Kulkowanie wibracyjne powoduje znaczące zmiany właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów w stosunku do stanu przed tą obróbką. Podczas uderzania elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię znaczna część energii kinetycznej jest zużywana na odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, czego efektem jest „wyrównywanie” mikronierówności po obróbce poprzedzającej kulkowanie i umocnienie warstwy wierzchniej.

Struktura geometryczna powierzchni po kulkowaniu wibracyjnym nie ma określonego kierunku i klasyfikowana jest jako punktowa. Topografię powierzchni po kulkowaniu przedstawiono na rys. 10.9, dla porównania zamieszczono też SGP po frezowaniu i szlifowaniu. Widoczne są ślady uderzeń kulek na powierzchni obrobionej kulkowaniem oraz ślady przemieszczających się ostrzy na powierzchni frezowanej frezem walcowo-czołowym i ziaren ściernych na powierzchni szlifowanej obwodem ściernicy.



Rys. 10.9. Topografia powierzchni przedmiotów obrabianych: a) kulkowaniem wibracyjnym, b) frezowaniem czołowym, c) szlifowaniem obwodem ściernicy

Chropowatość powierzchni po kulkowaniu wibracyjnym zależy od parametrów technologicznych oraz czasu kulkowania. Ze wzrostem amplitudy i częstotliwości drgań wibratora chropowatość powierzchni zwiększa się, co jest związane ze wzrostem energii uderzenia kulek. Również użycie kulek o większej średnicy powoduje wzrost chropowatości, co uzasadnione jest wzrostem masy kulek, a tym samym energii uderzenia (mniejsze znaczenie ma wzrost promienia krzywizny). Natomiast zmniejszenie chropowatości powierzchni uzyskuje się zwiększając czas kulkowania [8].

Chropowatość powierzchni zależy też od właściwości materiału obrabianego oraz od odmiany kulkowania. Przykładowo można podać, że wartość parametru R_a chropowatości powierzchni po kulkowaniu wibracyjnym próbek ze stali 30HGSA o twardości $36 \div 38$ HRC wynosiła, w zależności od parametrów technologicznych, od $0,22$ do $1,3 \mu\text{m}$, natomiast po kulkowaniu wibracyjno-rotacyjnym próbek ze stali łożyskowej o twardości $62 \div 64$ HRC w czasie 20 minut osiągnięto chropowatość powierzchni $R_a = 0,06 \div 0,11 \mu\text{m}$ [8, 11].

Z analizy krzywych udziału materiałowego powierzchni po kulkowaniu wibracyjnym i po szlifowaniu wynika, że kulkowanie wpływa korzystnie na parametry tej krzywej, co wskazuje na korzystny wpływ kulkowania na właściwości obrabianych powierzchni w aplikacjach tribologicznych [9].

Kulkowanie wibracyjne powoduje wzrost twardości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Twardość na powierzchni kulkowanego przedmiotu najczęściej mierzona jest metodą Vickersa przy różnych obciążeniach (HV1, HV5, HV10) [3]. Utwardzenie warstwy wierzchniej mierzy się za pomocą mikrotwardościomierzy. Pomiary mikrotwardości, na zglądach prostopadłych lub ukośnych, pozwalają na określenie rozkładu mikrotwardości w funkcji odległości od powierzchni badanego przedmiotu. Mikrotwardość mierzona jest głównie metodami Vickersa i, rzadziej, Knoopa. Stosowane obciążenia wgłębnika podczas pomiaru mikrotwardości metodą Vickersa nie przekraczają 1,961 N (od HV0,01 do HV0,2) [12].

W zależności od materiału obrabianego i parametrów technologicznych wzrost mikrotwardości WW po kulkowaniu wibracyjnym wynosi od kilku procent do ok. 40%, a głębokość warstwy utwardzonej – od kilkunastu setnych milimetra do ok. 0,3 mm [4, 8, 11].

Efektom uderzeń elementów nagniatających w obrabianą powierzchnię są odkształcenia plastyczne warstwy materiału położonej bezpośrednio pod tą powierzchnią. Wskutek tych odkształceń następuje zmniejszenie gęstości materiału tej warstwy, co powoduje zwiększenie jej objętości. Objętość właściwa materiału nie odkształconego plastycznie (położonego pod tą warstwą) nie ulega zmianie, a w związku z tym, materiał ten uniemożliwia swobodne rozprzestrzenianie się warstwy o zmniejszonej objętości właściwej (odkształconej plastycznie) powodując ukształtowanie się w tej warstwie ściskających naprężeń własnych.

Wartość ściskających naprężeń własnych, ukształtowanych w WW przedmiotów wskutek kulkowania wibracyjnego wynosi na ogół kilkaset MPa (ze znakiem ujemnym) i zmienia się w zależności od właściwości materiału obrabianego i warunków technologicznych kulkowania. Głębokość, na jakiej występują ściskające naprężenia własne, na ogół jest nie mniejsza od kilku setnych milimetra i nie większa od kilku dziesiątych milimetra.

10.5. Wykonanie ćwiczenia

10.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z obróbką umacniającą elementów maszyn metodą kulcowania wibracyjnego, odmianami tej obróbki, budową wibratorów, parametrami technologicznymi i jej wpływem na właściwości WW obrabianych przedmiotów. Część praktyczna obejmuje przeprowadzenie kulcowania wibracyjnego oraz ocenę wpływu tej obróbki na strzałkę ugięcia badanych próbek oraz twardość na powierzchni tych próbek.

10.5.2. Przebieg ćwiczenia

1. Przygotować próbki do badań – odtłuścić, sprawdzić stan powierzchni i prostoliniowość.
2. Sprawdzić, czy wtyczka przewodu zasilającego silnik wibratora nie jest włożona do gniazda (jeśli jest, to należy ją wyjąć).
3. Korzystając z mikrotwardościomierza, zmierzyć twardość HV1 na powierzchni próbek.
4. Zamocować próbki w komorze roboczej wibratora.
5. Obliczyć objętość „wsadu” kulek – średnicę kulek i wysokość „wsadu” podającą ćwiczenia.
6. Odmierzyć obliczoną objętość „wsadu” kulek i wsypać kulki do komory roboczej.
7. Zamknąć pokrywę komory roboczej.
8. Włożyć wtyczkę przewodu zasilającego silnik wibratora do gniazda i włączyć wibrator.
9. Przeprowadzić kulcowanie wibracyjne w czasie podanym przez prowadzącego ćwiczenia.
10. Wyłączyć wibrator i wyjąć z gniazda wtyczkę przewodu zasilającego silnik wibratora.
11. Otworzyć pokrywę komory roboczej.
12. Usunąć kulki nagniatające z komory roboczej.
13. Wyjąć próbki z komory roboczej, przemyć je acetonem i osuszyć.
14. Zmierzyć strzałkę ugięcia próbek przy pomocy czujnika o dokładności 0,001 mm.
15. Zmierzyć twardość HV1 na powierzchni kulcowanych próbek.

Uwaga:

Nie wolno włączać wibratora bez zgody prowadzącego ćwiczenia.

10.5.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- a) szkic stanowiska do kulkowania wibracyjnego,
- b) opis przebiegu ćwiczenia,
- c) wyniki pomiarów i obliczeń,
- d) wnioski.

Literatura

1. Marciniak M., Stefko A., Szyrle W.: *Podstawy obróbki w wygładzarkach pojemnikowych*. WNT, Warszawa 1983.
2. Michalczyk J.: *Maszyny wibracyjne – obliczenia dynamiczne, drgania, hałas*. WNT, Warszawa 1995.
3. Nakonieczny J.: *Dynamiczna powierzchniowa obróbka plastyczna. Kulowanie Shot peening*. Wyd. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 2002.
4. Parol A.: *Badanie wpływu obróbki umacniającej i gładkościowej na własności warstwy wierzchniej*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1988.
5. Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT Warszawa 1987.
6. Woźniak K.: *Obróbka powierzchni w wygładzarkach pojemnikowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA Warszawa 2017.
7. Zaleski K.: *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
8. Zaleski K.: *Modelowanie chropowatości powierzchni i stopnia umocnienia warstwy wierzchniej stali 30HGSA po nagniataniu wibracyjnym*. „Mechanik”, nr 3/2007, s. 194–198.
9. Zaleski K., Skoczylas A.: *Effect of vibration shot peening parameters upon shapes of bearing curves of alloy steel surface*. “Advances in Science and Technology Research Journal”. Vol. 9, No. 25, March 2015, s. 20–26.
10. Zaleski K.: *The effect of vibratory and rotational shot peening and wear on fatigue life of steel*. “Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability”. Vol. 19, No. 1, 2017, s. 102–107.
11. Zaleski K.: *Wpływ kulkowania wibracyjno-rotacyjnego na stan warstwy wierzchniej w stanie zahartowanym*. [W:] Świć A. (red.): *Projektowanie i automatyzacja procesów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005, s. 13–18.
12. PN-EN ISO 6507–1: 2007. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Część 1: Metoda badań.