

**Lidia Gałda**  
Redakcja naukowa

**Metody  
statystyczne  
w praktyce  
inżynierskiej**

Wydano za zgodą Rektora

O p i n i o d a w c a

dr hab. inż. Aleksander MAZURKOW, prof. PRz

W procesie wydawniczym pominięto  
etap opracowania językowego.  
Monografię wydrukowano z matryc  
dostarczonych przez redaktora naukowego.

P r o j e k t o k ł a d k i

Joanna MIKUŁA

*plany badawcze  
metody statystyczne  
inżynieria powierzchni*

ISBN 978-83-7934-026-2  
e-ISBN 978-83-7934-061-3

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

## Spis treści:

<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń</b> .....	5
<b>Wstęp</b> .....	7
1. <b>Kamil Baryła, Sławomir Świrad:</b> Analiza struktury geometrycznej powierzchni brązu po obróbce nagniataniem.....	9
2. <b>Beata Bulikowska, Lidia Gałda:</b> Analiza wpływu wybranych właściwości warstwy wierzchniej na charakterystyki tribologiczne węzła ślizgowego 42CrMo4 – SiC.....	26
3. <b>Adrianna Kwiecień, Lidia Gałda:</b> Ocena istotności wpływu parametru technologicznego i czynnika ludzkiego w procesie nagniatania.....	39
4. <b>Kamil Mrozowski, Sławomir Świrad:</b> Obróbka gładkościowa stali X37CrMoV51 z wykorzystaniem narzędzi hydrostatycznych.....	52
5. <b>Marek Paraniak, Barbara Ciecierska:</b> Zastosowanie planu PS/DK 2 <sup>3</sup> do określenia wpływu parametrów toczenia na chropowatość powierzchni wałka ze stali 42CrMo4.....	66
6. <b>Anna Siębor, Lidia Gałda:</b> Analiza wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na chropowatość powierzchni stali 40CrMnMoS8–6... ..	79
7. <b>Magdalena Słonka, Lidia Gałda:</b> Analiza wpływu parametrów technologicznych procesu nagniatania na chropowatość powierzchni stali X46Cr13....	92
8. <b>Agnieszka Sobolak, Lidia Gałda:</b> Ocena istotności wpływu parametrów procesu nagniatania powierzchni stali 40CrMnMoS8-6.....	104
9. <b>Małgorzata Szczerba, Andrzej Dzierwa:</b> Wpływ nagniatania ślizgowego na właściwości tribologiczne elementów ze stali 34CrNiMo6.....	119
<b>Podsumowanie</b> .....	131
<b>Streszczenie</b> .....	132
<b>Summary</b> .....	132



## Wykaz ważniejszych oznaczeń

Oznaczenie	Jednostka	Opis
$\alpha$		poziom istotności
$\mu$		współczynnik tarcia
$\Delta x_i$		przedział zmienności i-tego czynnika wejściowego
$a_p$	mm	głębokość skrawania
$b_i$		współczynniki regresji
$F$	N	siła tarcia
$F_{kr}$		wartość krytyczna odczytana z tablicy Fishera-Snedecora
$F_t$		wartość testowa
$f$	mm/obr (mm/min)	posuw
$i$	mm	krok wierszowania
$N$		całkowita liczba doświadczeń w planie
$n$		całkowita liczba pomiarów
$n$	obr/min	prędkość obrotowa
$P$	N	siła docisku/nagniatania
$p$	Pa	ciśnienie
$R_a$	$\mu\text{m}$	średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu chropowatości od linii średniej
$R_{dc}$	$\mu\text{m}$	różnica wysokości części profilu chropowatości
$R_{ku}$		współczynnik nachylenia profilu chropowatości
$R_p$	$\mu\text{m}$	maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości
$R_q$	$\mu\text{m}$	średnie kwadratowe odchylenie rzędnych profilu chropowatości
$R_{sk}$		współczynnik asymetrii profilu chropowatości

RSm	mm	średnia szerokość rowków profilu chropowatości
Rt	μm	całkowita wysokość profilu chropowatości
Rv	μm	maksymalna głębokość wgłębień profilu chropowatości
Rz	μm	maksymalna wysokość profilu chropowatości
r		liczba pomiarów równoległych (replikacji, powtórzeń)
Sa	μm	średnie arytmetyczne odchylenie nierówności powierzchni
Sku		współczynnik nachylenia powierzchni
Sp	μm	maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni
Spd	1/mm <sup>2</sup>	gęstość pików powierzchni
Sq	μm	średnie kwadratowe odchylenie nierówności powierzchni
Ssk		współczynnik asymetrii powierzchni
Std	°	kierunkowość struktury powierzchni
Str		wskaźnik tekstury powierzchni
Sv	μm	maksymalna głębokość wgłębień powierzchni
Sz	μm	maksymalna wysokość powierzchni
S <sup>2</sup> (y)		wariancja błędów pomiaru wielkości y
t <sub>(α,f)</sub>		wartość tabelaryczna statystyki t-Studenta
V <sub>p</sub>	m/s	prędkość poślizgu
x <sub>i</sub>		zakodowana wartość i-tego czynnika wejściowego
y <sub>i</sub>		wartość i-tego czynnika wynikowego
$\bar{y}$		średnia arytmetyczna wyników pomiaru

## Wstęp

Monografia została opracowana w oparciu o wspólne badania kadry naukowo-dydaktycznej i studentów Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, realizujących badania w ramach prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich.

W monografii przedstawiono problemy kształtowania technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej materiałów stosowanych w budowie maszyn. Warstwę wierzchnią po procesie technologicznego kształtowania określa się technologiczną warstwą wierzchnią, natomiast w trakcie eksploatacji lub po zakończeniu eksploatacji zostaje ukształtowana eksploatacyjna warstwa wierzchnia, która może różnić się strukturą geometryczną powierzchni, twardością, składem chemicznym i innymi parametrami. Szczególną uwagę zwrócono na wykorzystanie metod planowania eksperymentu, które pozwalają w sposób prawidłowy określić występujące zależności między parametrami technologicznymi a właściwościami charakteryzującymi warstwę wierzchnią, jak również pomiędzy parametrami warstwy wierzchniej a cechami użytkowymi elementów maszyn. Zastosowano programy statyczne randomizowane do oceny istotności wpływu parametrów technologicznych obróbki maszynowej. Programy randomizowane stosuje się do eliminowania nieistotnych wielkości wejściowych z dalszej analizy, dzięki czemu można skrócić czas i zmniejszyć koszty działań. Wykorzystano również statyczne plany badawcze do oceny wpływu parametrów wejściowych realizowanych procesów na otrzymywane parametry wyjściowe. W celu zapewnienia praktycznej użyteczności opisanych metod doświadczalnych przedstawiono je łącznie z przykładami zastosowań. Wyniki pomiarów zostały poddane analizie statystycznej. Przedstawione metody obliczeniowe pozwalają ocenić czy badany proces jest powtarzalny, nie narażając się na przypadkowe efekty, prowadzące do błędnego wnioskowania. Bazując na procedurach obliczeniowych według metod planowania eksperymentu można otrzymać funkcję określającą cechy obiektu badań. Funkcja ta pozwoli w sposób adekwatny opisać zależności między wielkościami wyjściowymi a wejściowymi w pewnym, przyjętym zakresie ich zmienności. W monografii przedstawiono także badania tribologiczne wybranych węzłów kinematycznych o zróżnicowanej topografii powierzchni elementów trących. W celu podkreślenia zalet planowania badań eksperymentalnych z wykorzystaniem metod statycznych w monografii przedstawiono również analizę wyników badań przeprowadzoną poprzez omówienie otrzymanych wyników.





**Kamil BARYŁA**  
**Sławomir ŚWIRAD**

# **1. ANALIZA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI BRĄZU PO OBRÓBCE NAGNIATANIEM**

## **1.1. Wprowadzenie**

Elementy maszyn i urządzeń ulegają zużyciu w wyniku działania zróżnicowanych czynników zewnętrznych: mechanicznych, chemicznych, cieplnych oraz innych. Stopień odporności danej części na wspomniane czynniki jest zdefiniowany wytrzymałością i stanem warstwy wierzchniej, te z kolei zależą od zastosowanego procesu technologicznego. W wyniku realizacji określonej obróbki powstaje charakterystyczna dla danego procesu struktura geometryczna powierzchni, na jakość której wpływają w znacznym stopniu parametry procesu.

Do grupy procesów obróbki wykończeniowej należą między innymi szlifowanie, polerowanie, rozwiercanie, gładzenie, frezowanie gładkościowe oraz obróbka nagniataniem. W przypadku zastosowania procesu nagniatania oprócz zwiększenia gładkości obrabianej powierzchni możliwe jest także umocnienie warstwy wierzchniej oraz zwiększenie dokładności wykonania przedmiotu.

Niniejszy rozdział zawiera omówienie wybranych zagadnień dotyczących obróbki nagniataniem, zakresu jej stosowalności, wad i zalet oraz wpływ parametrów procesu na stan obrabianej powierzchni. Podkreślono znaczenie struktury geometrycznej powierzchni w projektowaniu i wytwarzaniu części maszyn. W części eksperymentalnej zrealizowano proces obróbki nagniataniem z zastosowaniem zmiennych wartości posuwu i siły docisku wstępnie przetoczonych próbek wykonanych z brązu berylowego (CuBe<sub>2</sub>) oraz brązu cynowego (CuSn10P). Następnie wszystkie próbki zostały poddane pomiarom za pomocą profilometru Surtronic 3+ i z wykorzystaniem oprogramowania firmy Taylor – Hobson, które pozwoliło na wyznaczenie profili chropowatości oraz parametrów amplitudowych badanych powierzchni.

## 1.2. Nagniatanie

Podczas procesu nagniatania w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego dochodzi do odkształcenia plastycznego materiału o charakterze miejscowym. Odkształcenie to powstaje na skutek przemieszczania się gładkiego narzędzia o pomijalnej odkształcalności po powierzchni obrabianego przedmiotu. Narzędzie przez cały czas trwania obróbki dociskane jest ze stałą i określoną siłą do obrabianej części. Obróbka przeważnie odbywa się na zimno. W jej wyniku dochodzi do zgniotu w warstwie wierzchniej oraz do płynięcia nierówności powierzchni, co prowadzi do zmniejszenia jej chropowatości oraz znacznych zmian w warstwie wierzchniej [2, 8].

Zakres zastosowań nagniatania jest szeroki i obejmuje m.in.: obróbkę umacniającą, umożliwiając kształtowanie własności fizycznych warstwy wierzchniej, dzięki czemu można zwiększyć odporność zmęczeniową wyrobu; obróbkę gładkościową, gdzie drogą odkształcenia plastycznego można zredukować wysokość nierówności np. po wcześniejszym toczeniu lub frezowaniu; obróbkę mającą na celu podniesienie dokładności wymiarów lub obniżenie chropowatości do zadanego poziomu; obróbkę, w wyniku której nierówności powierzchni zostaną przekształcone według zadanych parametrów stereometrycznych, dzięki temu możliwe jest uzyskanie powierzchni o założonych własnościach np. o zadanej nośności; obróbkę tworzącą mikro-rowki smarne, dzięki którym współpracujące powierzchnie są bardziej odporne na zatarcie; tworzenie dekoracyjnych wzorów na powierzchniach wyrobu [10].

Obróbka nagniataniem może zastąpić w procesie produkcyjnym niektóre operacje wykończeniowe, takie jak polerowanie, szlifowanie czy gładzenie. Niewątpliwą zaletą tej technologii jako obróbki wykończeniowej jest fakt, że nie jest konieczne posiadanie obrabiarek specjalnych, gdyż do przeprowadzenia operacji nagniatania możliwe jest wykorzystanie uniwersalnych obrabiarek skrawających po uprzednim wyposażeniu ich w stosowne oprzyrządowanie [10]. Pozostałe zalety, jak i wady obróbki nagniataniem zostały zebrane i przedstawione w tab. 1.1.

### 1.2.1. Nagniatanie toczne narzędziem jednoelementowym

Nagniatanie toczne jest jedną ze statycznych metod nagniatania naporowego. Kinematykę obróbki stanowi złożenie ruchów obrotowego obrabianego przedmiotu i elementów nagniatających oraz ruchu posuwowego narzędzia pod obciążeniem statycznych sił naporu. W ruch obrotowy można wprawić zarówno nagniatany przedmiot, jak i narzędzie. W przypadku przeprowadzania procesu nagniatania na obrabiarkach uniwersalnych napędzany jest przedmiot i to on napędza elementy narzędzia [10].

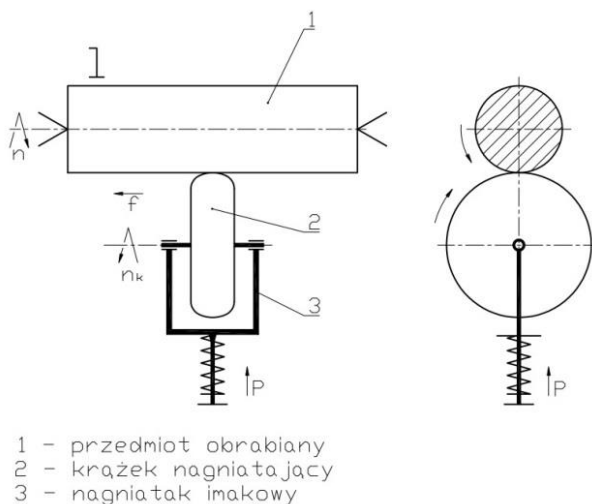
Tabela 1.1. Zalety i wady obróbki nagniataniem (opracowanie własne na podstawie [8])

ZALETY	
związane z jakością wyrobu	związane z technologią
<ul style="list-style-type: none"> <li>o możliwość uzyskania powierzchni o niskiej chropowatości i dużych promieniach zaokrągleń wierzchołków i wrębów, o wiele większych niż po szlifowaniu;</li> <li>o na obrobionej powierzchni brak odprysków, pozostałości ścierniwa czy wiórów występujących na powierzchniach po obróbce skrawaniem;</li> <li>o minimalne nagrzewanie materiału podczas obróbki, co wyklucza m.in. deformacje cieplne i odweglenie;</li> <li>o wzrost wytrzymałości zmęczeniowej oraz twardości;</li> <li>o wzrost odporności na ścieranie i korozję powierzchniową;</li> <li>o możliwość wytworzenia warstwy wierzchniej o zadanych właściwościach fizycznych;</li> <li>o możliwość wytworzenia mikro rowków zwiększających odporność na zatarcie współpracujących powierzchni;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o duża efektywność wygładzania powierzchni w jednym przejściu roboczym narzędzia oraz duża wydajność obróbki;</li> <li>o duża trwałość narzędzi nagniatających;</li> <li>o możliwość stosowania narzędzi do nagniatania na obrabiarkach uniwersalnych, prosta obsługa;</li> <li>o małe zapotrzebowanie procesu na moc;</li> <li>o mniejsze straty materiału ze względu na bezwiórową obróbkę;</li> <li>o pozwala na wyeliminowanie z procesu produkcyjnego pracochłonnych operacji wykańczających;</li> <li>o w pewnych przypadkach umożliwia zastąpienie obróbki cieplnej dużych części (np. korpusów) utwardzeniem przez nagniatanie;</li> <li>o możliwość obróbki powierzchni z powłokami ochronnymi nakładanymi galwanicznie lub ciepło-chemicznie;</li> <li>o duże bezpieczeństwo i higiena pracy ze względu na brak wiórów, pyłów i iskier;</li> </ul>
WADY	
<ul style="list-style-type: none"> <li>o ograniczenie twardości obrabianego materiału w przypadku nagniatania tocznego elementami stalowymi do około 45 HRC;</li> <li>o trudność doboru właściwych parametrów obróbki;</li> <li>o łuszczenie się powierzchni przy nagniataniu z dużymi siłami docisku;</li> <li>o wymagana staranna i dokładna obróbka poprzedzająca nagniatanie;</li> <li>o trudności i ograniczenia przy obróbce elementów cienkościennych;</li> <li>o możliwość wystąpienia stref nierównomiernego zgniotu;</li> <li>o występowanie błędów technologicznych w przekroju osiowym obrabianego przedmiotu (sfaldowania materiału, deformacje krawędzi);</li> </ul>	

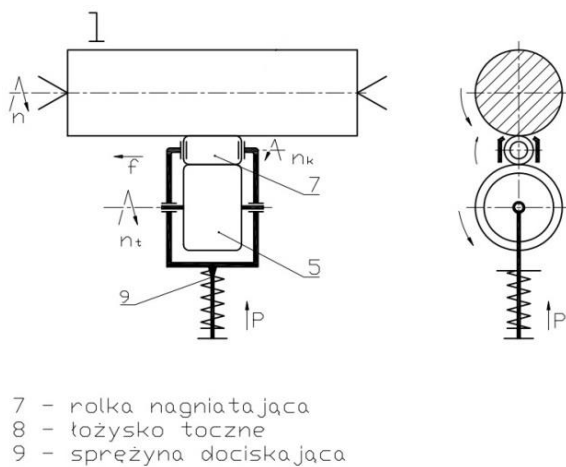
Za elementy nagniatające uważa się tę część lub części narzędzia, które mają bezpośredni kontakt z obrabianą powierzchnią. Do podstawowych elementów nagniatających należą krążki, kulki oraz rolki, stąd najprostszy podział nagniatania tocznego przedstawiono na rys. 1.1 i 1.2.

Dodatkowo, w zależności od sposobu współpracy powierzchni przedmiotu obrabianego z elementami nagniatającymi, należy wyszczególnić nagniatanie sztywne oraz sprężyste. Każdy z tych sposobów charakteryzuje się inną dokładnością obróbki oraz wymaga narzędzi różniących się pod względem konstrukcyjnym [10].

Wśród najczęściej wykorzystywanych narzędzi w procesie nagniatania znajdują się nagniataki oraz głowice nagniatające. Nagniatak jest najprostszym pod względem konstrukcyjnym narzędziem do obróbki nagniataniem, nie wykonującym w czasie obróbki ruchu obrotowego, a jedynie posuwowy. Z kolei głowice nagniatające charakteryzują się o wiele bardziej skomplikowaną konstrukcją, przede wszystkim z powodu posiadania więcej niż jednego elementu nagniatającego oraz możliwości wykonywania podczas obróbki zarówno ruchu posuwowego, jak i obrotowego [4,8].



Rys. 1.1. Schemat krążkowania (opracowanie własne na podstawie [10])



Rys. 1.2. Schemat rolkowania (opracowanie własne na podstawie [10])

### 1.2.2. Parametry technologiczne nagiatańia tocznego

Jednym z ważniejszych parametrów procesu nagiatańia jest siła docisku do obrabianego przedmiotu. Sterując parametrem siły docisku w zakresie jej zmienności, można uzyskać minimalną wartość chropowatości obrabianej po-

wierzchni, zależną od metody nagniatania oraz przyjętych warunków obróbki. W przypadku zastosowania siły mniejszej, niż jej wartość optymalna, nie dojdzie do całkowitego odkształcenia powstałych we wcześniejszej obróbce nierówności. Z kolei, gdy przyjęta zostanie większa wartość siły docisku, dojdzie do znacznego wzrostu wartości chropowatości, spowodowanego zjawiskiem łuszczenia powierzchni obrabianego przedmiotu [10].

Kolejnym parametrem mającym znaczący wpływ na stan powierzchni po obróbce nagniataniem jest posuw nagniatania  $f$ . Podobnie jak w przypadku siły docisku, jego wartość powinna być dobrana odpowiednio do danych warunków. W przypadku zastosowania podczas obróbki małych wartości posuwu istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska łuszczenia powierzchni. Natomiast przy dużych posuwach występuje dochodzi do wystąpienia falistości powierzchni nagniatanej, a także może dojść do sytuacji, w której niektóre miejsca wcale nie będą nagniatane. Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni poddanej procesowi nagniatania może mieć dwojaki charakter zależny od warunków obróbki [8]. Gdy warunki procesu nie powodują powstawania zjawiska łuszczenia powierzchni (małe siły docisku), im mniejszą przyjmie się wartość posuwu, tym niższą chropowatością będzie się charakteryzowała obrabiana powierzchnia [10]. Jeśli jednak warunki obróbki sprzyjają pojawieniu się pierwszego stadium zjawiska łuszczenia (duże siły docisku), wpływ posuwu na chropowatość jest zupełnie odmienny. Dochodzi do przekroczenia wytrzymałości materiału, z którego wykonany jest obrabiany przedmiot, następnie odkształcenia plastycznego oraz zgniotu. Przyjęcie małej wartości posuwu (mniejszej od optymalnej wartości) spowoduje wzrost chropowatości powierzchni, a także będzie sprzyjało wystąpieniu zjawiska łuszczenia, które to będzie się nasilało wraz ze spadkiem wartości posuwu. Również przyjęcie posuwu większego od jego optymalnej wartości będzie skutkowało wzrostem chropowatości. Spowodowane jest to niepełnym odkształceniem nierówności powstałych po obróbce występującej w procesie technologicznym przed nagniataniem. Dobór optymalnego posuwu, gwarantującego otrzymanie najmniejszej, możliwej w danych warunkach, chropowatości jest szczególnie istotny w przypadku obróbki gładkościowej [10].

Istotnym parametrem wpływającym na chropowatość jest również ilość przejść nagniatających. Praktycznie nie jest stosowana większa niż trzy liczba przejść nagniatających. Wynika to z faktu wystąpienia łuszczenia powierzchni, a co za tym idzie wzrostu chropowatości. W praktyce przemysłowej stosowane jest jedno przejście narzędzia, gdy nie przynosi zamierzonych rezultatów zalecane jest stosowanie trójelementowej głowicy nagniatającej [3, 10].

## 1.3. Brązy

### 1.3.1. Brązy – stopy miedzi z cyną

Brązami nazywane są stopy miedzi z innymi metalami, w których głównego składnika stopowego nie stanowi nikiel ani cynk. Temperatura topnienia w zależności od rodzaju dodatku stopowego mieści się w granicach 940 – 1084,5°C, gęstość między 7,5 g/cm<sup>3</sup> a 9,3 g/cm<sup>3</sup>. Wśród brązów można wyróżnić dwie podstawowe grupy, tj. brązy odlewnicze oraz brązy obrabiane plastycznie. Do pierwszej grupy zalicza się stopy wieloskładnikowe, natomiast brązy przerabiane plastycznie są stopami dwuskładnikowymi [11].

Najstarszym ze znanych brązów jest brąz cynowy. Wśród stopów miedzi z cyną najszersze zastosowanie znajdują stopy wieloskładnikowe o zawartości cyny na poziomie 10%. W przeróbce plastycznej zastosowanie znajdują brązy o zawartości cyny od 4 do 6%, które wcześniej muszą zostać wyżarzone w temperaturze około 730°C, w celu wytworzenia jednorodnej struktury podatnej na przeróbkę plastyczną. Jeżeli stop zawiera niewielką ilość cyny, jest przerabiany na zimno, natomiast gdy stopy zawierają większe ilości cyny, to obróbka przeprowadzana jest na gorąco. Brązy te mogą zawierać dodatki ołowiu (Pb), cynku (Zn) oraz fosforu (P). Dodatek ołowiu ułatwia skrawanie i powoduje obniżenie współczynnika tarcia. Dodatek stopowy cynku zwiększa wytrzymałość oraz polepsza lejność, natomiast fosfor ma pozytywny wpływ na odporność ścierną i wytrzymałość, jednak negatywnym skutkiem wprowadzenia go do stopu jest pogorszenie zdolności materiału do plastycznego odkształcenia, stąd w brązach poddawanych obróbce plastycznej jego zawartość w składzie stopu nie powinna przekraczać 0,3%. Brązy cynowe charakteryzują bardzo dobre własności mechaniczne, znaczna odporność na korozję i ścieranie, korzystne właściwości ślizgowe oraz odlewnicze (skurcz nie przekracza 1%). Z tychże zalet wynika ich szerokie zastosowanie w przemyśle okrętowym i chemicznym. Są one także stosowane na sprężyny oraz obciążone łożyska ślizgowe. Ograniczenia wykorzystania brązów cynowych biorą się przede wszystkim z deficytu cyny, z czego wynika ich znaczna cena. Dlatego też cyna zastępowana jest innymi pierwiastkami metalicznymi [5, 7, 11, 12].

### 1.3.2. Brązy – stopy miedzi z aluminium, berylem i ołowiem

W brązach aluminiowych dodatek aluminium mieści się w przedziale 5% - 11%. Zastąpienie cyny aluminium pozwala jeszcze bardziej zwiększyć wytrzymałość oraz zdolność do plastycznego odkształcenia. Kolejną z zalet tych brązów jest żaroodporność i odporność na działanie środowisk, które są agresywne chemicznie. Poza wspomnianymi zaletami stopy te posiadają kilka istotnych wad, mianowicie podczas odlewania wytrąca się Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a skurcz sięga 2%. Brą-

zy aluminiowe wykorzystuje się zarówno w odlewnictwie, jak i w przeróbce plastycznej (głównie na gorąco). Przy czym wraz ze wzrostem zawartości aluminium w stopie jego plastyczność maleje, w związku z czym, jeżeli przedmiot ma być obrabiany plastycznie zawartość aluminium nie powinna przekraczać 5%. Wytrzymałość brązów aluminiowych można dodatkowo zwiększyć przez zastosowanie ulepszania cieplnego [6, 9, 12].

Brązy berylowe oprócz berylu (2,1%) zawierają także dodatki niklu (Ni), kobaltu (Co) oraz niewielkie ilości (do ok. 0,25%) tytanu (Ti), które pozwalają na zaoszczędzenie berylu, który jest pierwiastkiem kosztownym i dość rzadko występującym. Ich zastosowanie, poza kosztami, ogranicza także toksyczność berylu. Ze względu na fakt silnego umacniania się tych stopów poprzez zgniot przeznaczone są do obróbki plastycznej. Można poddawać je obróbce cieplnej, która polega na utwardzaniu dyspersyjnym. W jego wyniku otrzymuje się twardość na poziomie 340 HV oraz  $R_m$  równe 1250 MPa. Stopy te charakteryzują się najwyższymi, spośród brązów, własnościami mechanicznymi. Ponadto są odporne na ścieranie, łatwo jest je polerować i nie mają tendencji do iskrzenia, co zadecydowało o ich zastosowaniu przy produkcji materiałów wybuchowych na narzędzia nieiskrzące i elementy silników elektrycznych oraz sprężyny i membrany [9, 11].

W skład brązów ołowiowych może wchodzić do 35% ołowiu. Mogą także zawierać dodatki w postaci cynku, cyny, fosforu, niklu oraz manganu, które przyczyniają się do wzrostu wytrzymałości. Stopów tych nie poddaje się obróbce cieplnej. Wytwarzane są z nich panewki łożysk ślizgowych, które pracują z dużymi prędkościami, ale przy niewielkich obciążeniach [9].

## 1.4. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach o średnicy 35 mm wykonanych z brązu berylowego CuBe2 oraz brązu cynowego CuSn10P. Skład chemiczny oraz wybrane własności mechaniczne obydwu materiałów zostały przedstawione w tab. 1.2. CuBe2 posiada najwyższe, spośród brązów, własności mechaniczne. Ze względu na wysoką wytrzymałość oraz charakterystyczną dla tej grupy stopów cechę, jaką jest nieiskrzenie, wykorzystywany jest w wytwarzaniu elementów silników elektrycznych i maszyn odlewniczych, narzędzi górniczych oraz form wtryskowych [9].

Brąz CuSn10P cechuje wysoka odporność na kwasy, ścieranie i korozję. Z tego stopu wytwarza się łożyska pracujące w trudnych warunkach, pracujące z dużymi prędkościami obrotowymi oraz armaturę chemiczną [11].

Tabela 1.2. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości brązów CuSn10P oraz CuBe2 (opracowanie własne na podstawie [9, 11])

CuSn10P		CuBe2	
Skład chemiczny (procentowa zawartość dodatków stopowych)			
Sn	P	Be	Co
9,0	0,8	2,0	0,2
Właściwości mechaniczne			
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	8,8	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	8,3
A5 [%]	3	A5 [%]	2 – 4
HB	80 – 90	HB	320 – 360
Rm [MPa]	220 – 310	Rm [MPa]	> 1150
-	-	Re [MPa]	> 1000

Do przeprowadzenia obróbki wykorzystano narzędzie jednorolkowe typu EG45 przeznaczone do obróbki metali, charakteryzujących się wytrzymałością na rozciąganie nie większą niż 1400 MPa oraz maksymalnej twardości 45 HRC.

Cechy dogniatka EG45-45T [13]:

- możliwość zastosowania zarówno w tokarkach konwencjonalnych, jak i sterowanych numerycznie,
- umożliwia obróbkę materiałów, charakteryzujących się wytrzymałością na rozciąganie niższą niż 1400 MPa oraz o twardości poniżej 45 HRC,
- obróbkę można przeprowadzić w jednym zamocowaniu.

Główne zalety:

- łatwa wymiana wyeksploatowanych elementów,
- płynna regulacja siły docisku,
- brak wiórów podczas obróbki,
- wymagane niewielkie smarowanie,
- mała wartość czasu cyklu,
- utwardzanie przez zgniot i usuwanie mikrokarbów w tym samym czasie.

Badania przeprowadzono stosując parametry przedstawione poniżej:

- prędkość obrotowa (n): 315 [obr/min],
- posuw narzędzia (f): 0,052; 0,110 [mm/obr],
- siła nagniatania (P)
  - dla CuBe2: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 [N],
  - dla CuSn10P: 300, 600, 900, 1200, 1500 [N].



## 1.5. Wyniki badań

Pomiary nierówności powierzchni wykonano z trzykrotnym powtórzeniem w odniesieniu do każdego wariantu obróbki. W tab. 1.3 - 1.6. przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych z wykorzystaniem profilometru SURTRONIC 3+ oraz średnie wartości wybranych parametrów chropowatości.

Tabela 1.3. Parametry nagniatania oraz wyniki pomiarów (CuBe2) [1]

Brąz berylowy (CuBe2)							
Parametry procesu		Wybrane parametry profilu					
Posuw [mm/obr]	Siła [N]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	Rsk [-]
0,052	100	0,448	0,617	4,210	3,350	2,460	-1,490
		0,344	0,498	3,910	3,060	2,370	-1,820
		0,467	0,641	3,910	3,260	2,410	-1,570
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,420</b>	<b>0,585</b>	<b>4,010</b>	<b>3,223</b>	<b>2,413</b>	<b>-1,627</b>
0,052	200	0,341	0,474	3,520	2,760	1,900	-1,150
		0,277	0,396	2,790	2,550	1,900	-1,710
		0,395	0,540	3,830	3,250	2,400	-1,410
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,338</b>	<b>0,470</b>	<b>3,380</b>	<b>2,853</b>	<b>2,067</b>	<b>-1,423</b>
0,052	300	0,395	0,540	3,830	3,250	2,400	-1,410
		0,291	0,370	2,250	1,950	1,250	-0,716
		0,251	0,325	2,300	1,790	1,120	-0,731
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,312</b>	<b>0,412</b>	<b>2,793</b>	<b>2,330</b>	<b>1,590</b>	<b>-0,952</b>
0,052	400	0,200	0,270	2,480	1,680	1,160	-0,817
		0,231	0,291	2,020	1,590	0,932	-0,300
		0,213	0,285	2,240	1,680	1,040	-0,706
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,215</b>	<b>0,282</b>	<b>2,247</b>	<b>1,650</b>	<b>1,044</b>	<b>-0,608</b>
0,052	500	0,284	0,357	2,220	1,700	0,949	-0,127
		0,158	0,210	1,820	1,210	0,804	-0,848
		0,202	0,262	1,880	1,440	0,896	-0,447
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,215</b>	<b>0,276</b>	<b>1,973</b>	<b>1,450</b>	<b>0,883</b>	<b>-0,474</b>
0,052	600	0,177	0,235	1,920	1,440	0,852	-0,555
		0,208	0,273	2,400	1,650	0,988	-0,467
		0,260	0,330	1,960	1,580	0,890	-0,116
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,215</b>	<b>0,279</b>	<b>2,093</b>	<b>1,557</b>	<b>0,910</b>	<b>-0,379</b>

Tabela 1.3. (c.d.)

0,052	700	0,274	0,356	2,860	1,910	1,060	-0,185
		0,267	0,333	2,550	1,690	0,924	-0,200
		0,253	0,319	2,420	1,680	0,916	-0,193
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,265</b>	<b>0,336</b>	<b>2,610</b>	<b>1,760</b>	<b>0,967</b>	<b>-0,193</b>
Posuw [mm/obr]	Siła [N]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	Rsk [-]
0,110	100	0,910	1,190	7,170	5,890	3,720	-0,905
		0,899	1,190	6,810	6,020	3,610	-0,740
		1,230	1,530	10,500	7,160	4,200	-0,515
<b>Wartości średnie</b>		<b>1,013</b>	<b>1,303</b>	<b>8,160</b>	<b>6,357</b>	<b>3,843</b>	<b>-0,720</b>
0,110	200	0,516	0,662	3,920	3,380	2,110	-0,573
		0,622	0,813	6,040	4,580	3,130	-0,885
		0,528	0,722	4,800	3,980	2,680	-1,420
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,555</b>	<b>0,732</b>	<b>4,920</b>	<b>3,980</b>	<b>2,640</b>	<b>-0,959</b>
0,110	300	0,478	0,596	3,700	3,030	1,870	-0,544
		0,463	0,608	3,870	3,240	2,190	-0,991
		0,421	0,539	3,990	2,800	1,860	-0,876
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,454</b>	<b>0,581</b>	<b>3,853</b>	<b>3,023</b>	<b>1,973</b>	<b>-0,804</b>
0,110	400	0,312	0,388	3,030	1,980	1,150	-0,068
		0,264	0,339	3,210	2,010	1,280	-0,776
		0,311	0,396	2,800	2,330	1,550	-0,684
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,296</b>	<b>0,374</b>	<b>3,013</b>	<b>2,107</b>	<b>1,327</b>	<b>-0,509</b>
0,110	500	0,308	0,380	2,640	1,890	1,040	-0,221
		0,309	0,385	2,680	2,170	1,340	-0,153
		0,251	0,313	2,100	1,750	1,040	-0,154
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,289</b>	<b>0,359</b>	<b>2,473</b>	<b>1,937</b>	<b>1,140</b>	<b>-0,176</b>
0,110	600	0,268	0,333	2,050	1,600	0,874	0,049
		0,247	0,304	1,760	1,360	0,722	0,002
		0,209	0,255	1,660	1,290	0,684	-0,018
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,241</b>	<b>0,297</b>	<b>1,823</b>	<b>1,417</b>	<b>0,760</b>	<b>0,011</b>
0,110	700	0,226	0,285	1,840	1,400	0,810	-0,326
		0,214	0,270	1,560	1,290	0,662	0,070
		0,227	0,281	2,070	1,360	0,631	0,136
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,222</b>	<b>0,279</b>	<b>1,823</b>	<b>1,350</b>	<b>0,701</b>	<b>-0,040</b>

Tabela 1.4. Parametry nagniatania oraz wyniki pomiarów (CuSn10P) [1]

Brąz cynowy (CuSn10P)							
Parametry procesu		Wybrane parametry profilu					
Posuw [mm/obr]	Siła [N]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	Rv [μm]	Rsk [-]
0,052	300	0,470	0,562	4,400	2,830	1,690	-0,328
		0,486	0,595	3,210	2,530	1,220	0,353
		0,397	0,482	2,720	2,170	1,150	0,109
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,451</b>	<b>0,546</b>	<b>3,443</b>	<b>2,510</b>	<b>1,353</b>	<b>0,045</b>
0,052	600	0,553	0,693	3,890	2,540	1,330	0,509
		0,403	0,528	3,430	2,490	1,270	0,312
		0,375	0,487	2,790	2,270	1,190	-0,092
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,444</b>	<b>0,569</b>	<b>3,370</b>	<b>2,433</b>	<b>1,263</b>	<b>0,243</b>
0,052	900	0,708	0,823	5,170	3,100	1,490	0,317
		0,502	0,603	3,680	2,420	1,190	-0,074
		0,347	0,409	2,150	1,680	0,821	0,409
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,519</b>	<b>0,612</b>	<b>3,667</b>	<b>2,400</b>	<b>1,167</b>	<b>0,217</b>
0,052	1200	0,774	0,915	4,340	3,320	1,510	0,368
		0,727	0,932	4,900	3,110	1,430	0,264
		0,552	0,631	2,960	2,240	1,080	0,003
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,684</b>	<b>0,826</b>	<b>4,067</b>	<b>2,890</b>	<b>1,340</b>	<b>0,212</b>
0,052	1500	0,422	0,521	2,720	2,000	0,966	0,042
		0,341	0,406	2,320	1,650	0,948	-0,314
		0,485	0,608	2,880	2,380	0,917	0,527
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,416</b>	<b>0,512</b>	<b>2,640</b>	<b>2,010</b>	<b>0,944</b>	<b>0,085</b>
0,110	300	0,382	0,444	2,280	1,980	1,110	-0,116
		0,490	0,589	3,490	2,390	1,160	0,207
		0,381	0,456	2,530	2,030	1,090	-0,166
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,418</b>	<b>0,496</b>	<b>2,767</b>	<b>2,133</b>	<b>1,120</b>	<b>-0,025</b>
0,110	600	0,377	0,463	2,310	1,960	0,987	0,311
		0,502	0,601	3,320	2,360	1,200	-0,018
		0,387	0,466	2,810	1,950	1,030	-0,089
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,422</b>	<b>0,510</b>	<b>2,813</b>	<b>2,090</b>	<b>1,072</b>	<b>0,068</b>

Tabela 1.4. (c.d.)

0,110	900	0,362	0,425	2,200	1,650	0,804	0,203
		0,373	0,463	3,140	2,200	1,110	0,084
		0,449	0,584	2,930	2,400	1,070	0,485
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,395</b>	<b>0,491</b>	<b>2,757</b>	<b>2,083</b>	<b>0,995</b>	<b>0,257</b>
0,110	1200	0,560	0,709	3,680	2,810	1,310	0,271
		0,651	0,806	3,910	3,110	1,790	-0,446
		0,586	0,716	3,600	2,440	1,190	0,293
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,599</b>	<b>0,744</b>	<b>3,730</b>	<b>2,787</b>	<b>1,430</b>	<b>0,039</b>
0,110	1500	0,615	0,728	3,390	2,690	1,190	0,379
		0,430	0,511	2,620	1,900	0,989	0,371
		0,389	0,451	2,340	1,820	0,849	0,260
<b>Wartości średnie</b>		<b>0,478</b>	<b>0,563</b>	<b>2,783</b>	<b>2,137</b>	<b>1,009</b>	<b>0,337</b>

## 1.6. Analiza struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu

Próbki wykonane z brązu berylowego poddane zostały procesowi nagniatania Siłą docisku zmieniano w przedziale od 100 [N] do 700 [N] dla każdej z przyjętych wartości posuwu. Siła docisku przekraczająca 700 [N] mogłaby spowodować pęknięcie cienkich ścianek próbek.

W przedziale 100 – 600 [N] średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości jest tym niższe, im mniejszy jest posuw. Przy posuwie  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] uzyskano o ponad połowę niższą wartość parametru  $R_a$  w porównaniu do jego wartości przy posuwie  $f_2 = 0,110$  [mm/obr] (przy stałej sile docisku  $P = 100$  [N]), odpowiednio 0,420 [ $\mu\text{m}$ ] i 1,013 [ $\mu\text{m}$ ]. Wraz ze zwiększaniem siły docisku rozbieżność ta staje się coraz mniejsza, aż do 600 [N], przy której można uzyskać jednakową wartość parametru  $R_a$  (równą 0,233 [ $\mu\text{m}$ ]) stosując zarówno posuw  $f_1$  jak i  $f_2$ . Przy zwiększeniu siły docisku do 700 [N] zauważono dalszy spadek wartości  $R_a$  przy posuwie  $f_2$  do wartości 0,222 [ $\mu\text{m}$ ]. Natomiast przy posuwie  $f_1$ , po przekroczeniu zakresu sił docisku 400 – 600 [N], przy którym  $R_a$  osiąga najmniejszą wartość tj, 0,215 [ $\mu\text{m}$ ], następuje wzrost tego parametru aż do 0,265 [ $\mu\text{m}$ ] przy sile docisku równej 700 [N] (tab. 1.3).

Przy wzroście siły docisku ze 100 [N] do 200 [N] uzyskano spadek wartości parametru  $R_q$  z 0,585 [ $\mu\text{m}$ ] do 0,470 [ $\mu\text{m}$ ] dla posuwu  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] oraz z 1,303 [ $\mu\text{m}$ ] do 0,732 [ $\mu\text{m}$ ] dla posuwu  $f_2 = 0,110$  [mm/obr]. Podobną wartość  $R_q$  przy obydwu posuwach uzyskać można stosując siłę docisku  $P$  równą 600 [N] (tab. 1.4).

Tabela 1.5. Wybrane profile oraz wybrane parametry chropowatości powierzchni badanych próbek, brąz berylowy CuBe2 [1]

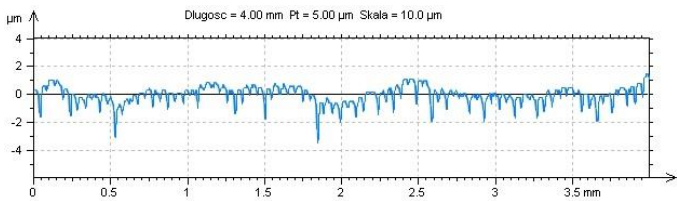



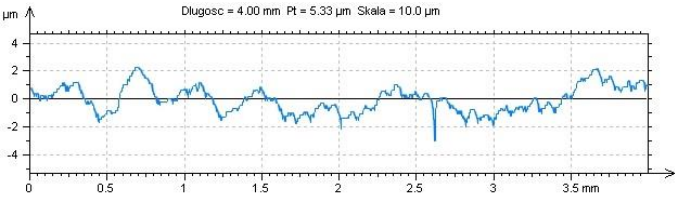
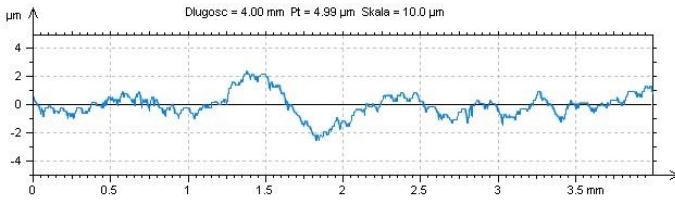
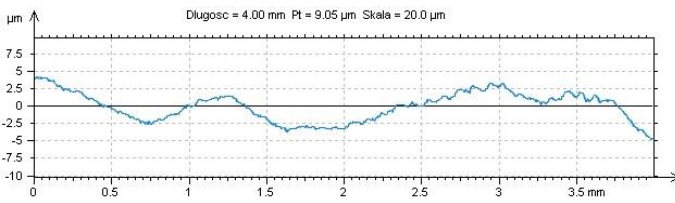
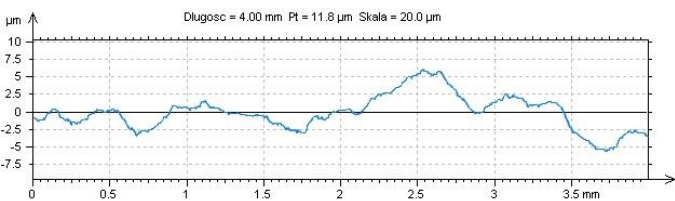
Brąz berylowy (CuBe2)	
Parametry nagniatania: $P = 100$ [N], $n = 315$ [obr/min], $f = 0,052$ [mm/obr]	Pomiary
	$R_a = 0,420$ $R_q = 0,585$ $R_t = 4,010$ $R_z = 3,223$ $R_v = 2,413$ $R_{sk} = -1,62$
Parametry nagniatania: $P = 200$ [N], $n = 315$ [obr/min], $f = 0,052$ [mm/obr]	Pomiary
	$R_a = 0,338$ $R_q = 0,470$ $R_t = 3,380$ $R_z = 2,853$ $R_v = 2,067$ $R_{sk} = -1,423$
Parametry nagniatania: $P = 300$ [N], $n = 315$ [obr/min], $f = 0,052$ [mm/obr]	Pomiary
	$R_a = 0,312$ $R_q = 0,995$ $R_t = 0,740$ $R_z = 2,330$ $R_v = 1,590$ $R_{sk} = -0,95$
Parametry nagniatania: $P = 600$ [N], $n = 315$ [obr/min], $f = 0,052$ [mm/obr]	Pomiary
	$R_a = 0,215$ $R_q = 0,279$ $R_t = 2,093$ $R_z = 1,557$ $R_v = 0,910$ $R_{sk} = -0,37$

Tabela 1.6. Wybrane profile oraz wybrane parametry chropowatości powierzchni badanych próbek, brąz cynowy (CuSn10P) [1]

<p>Parametry nagniatania:  <math>P = 300</math> [N], <math>n = 315</math> [obr/min], <math>f = 0,052</math> [mm/obr]</p>	<p>Pomiary</p>
	<p> <math>R_a = 0,451</math>  <math>R_q = 0,546</math>  <math>R_t = 3,443</math>  <math>R_z = 2,510</math>  <math>R_v = 1,353</math>  <math>R_{sk} = 0,04</math> </p>
<p>Parametry nagniatania:  <math>P = 300</math> [N], <math>n = 315</math> [obr/min], <math>f = 0,110</math> [mm/obr]</p>	<p>Pomiary</p>
	<p> <math>R_a = 0,418</math>  <math>R_q = 0,496</math>  <math>R_t = 2,767</math>  <math>R_z = 2,133</math>  <math>R_v = 1,120</math>  <math>R_{sk} = -0,02</math> </p>
<p>Parametry nagniatania:  <math>P = 600</math> [N], <math>n = 315</math> [obr/min], <math>f = 0,110</math> [mm/obr]</p>	<p>Pomiary</p>
	<p> <math>R_a = 0,422</math>  <math>R_q = 0,510</math>  <math>R_t = 2,813</math>  <math>R_z = 2,090</math>  <math>R_v = 1,072</math>  <math>R_{sk} = 0,06</math> </p>
<p>Parametry nagniatania:  <math>P = 1200</math> [N], <math>n = 315</math> [obr/min], <math>f = 0,110</math> [mm/obr]</p>	<p>Pomiary</p>
	<p> <math>R_a = 0,599</math>  <math>R_q = 0,744</math>  <math>R_t = 3,730</math>  <math>R_z = 2,787</math>  <math>R_v = 1,430</math>  <math>R_{sk} = 0,039</math> </p>

Przy posuwie  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] w zakresie sił docisku od 100 [N] do 500 [N] zależność  $R_t$  od  $P$  jest liniowa. Przy wartości 500 [N] parametr ten osiąga swoją minimalną wartość, tj. 1,973 [ $\mu\text{m}$ ]. Następnie, przy dalszym zwiększaniu siły docisku wysokość nierówności wzrasta do poziomu 2,610 [ $\mu\text{m}$ ] przy  $P = 700$  [N]. Natomiast przy posuwie  $f_2 = 0,110$  [mm/obr] zależność ta jest liniowa w zakresie 100 – 200 [N].  $R_t$  zmniejsza swoją wartość niemal dwukrotnie (odpowiednio od 8,160 [ $\mu\text{m}$ ] do 4,920 [ $\mu\text{m}$ ]) i przy zwiększaniu siły docisku wykazuje tendencję spadkową. Ustabilizowanie się wartości wysokości nierówności na stałym poziomie 1,823 [ $\mu\text{m}$ ] następuje dopiero przy sile docisku 600 [N].

Zmienność wartości parametru  $R_z$  od  $P$  jest bardzo podobna, jak w przypadku średniego arytmetycznego ( $R_a$ ) i średniego kwadratowego ( $R_q$ ) odchylenia chropowatości powierzchni, przy czym zmiany wartości  $R_z$  wraz ze wzrostem siły docisku są łagodniejsze. Dla wartości posuwu  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] parametr  $R_z$  płynnie zmienia swoją wartość od 3,223 [ $\mu\text{m}$ ] przy  $P = 100$  [N] do swojej minimalnej przy tym posuwie wartości 1,450 [ $\mu\text{m}$ ] przy 500 [N]. Gdy siła docisku przekracza wartość 500 [N],  $R_z$  zaczyna liniowo zwiększać swoją wartość do 1,760 [ $\mu\text{m}$ ] przy 700 [N]. Przy posuwie  $f_2 = 0,110$  [mm/obr]  $R_z$  zmniejsza się liniowo od 6,357 [ $\mu\text{m}$ ] przy 100 [N] do 3,980 [ $\mu\text{m}$ ] przy 200 [N]. Tuż powyżej 200 [N] następuje załamanie tendencji, po którym dalsze zmiany  $R_z$  mają charakter bardzo zbliżony do liniowego. Stan taki utrzymuje się do wartości  $F = 400$  [N], kiedy to parametr  $R_z$  przestaje zmniejszać swoją wartość i aż do 500 [N] utrzymuje się na stałym poziomie  $R_z = 2,000$  [ $\mu\text{m}$ ]. Pomiędzy 500 i 600 [N] następuje dalszy spadek jego wartości do poziomu 1,350 [ $\mu\text{m}$ ], na którym utrzymuje się, mimo zwiększenia siły docisku do 700 [N].

Równie łagodnym przebiegiem charakteryzuje się zmiana wartości parametru  $R_v$  od siły docisku. Przy posuwie  $f_1 = 0,052$  [mm/obr]  $R_v$  łagodnie zmienia swoją wartość od 2,413 [ $\mu\text{m}$ ] przy  $P = 100$  [N], przez minimalną wartość 0,875 [ $\mu\text{m}$ ], aż do ustabilizowania się na poziomie 0,967 [ $\mu\text{m}$ ] po zwiększeniu siły docisku do 700 [N]. Po obróbce z zastosowaniem posuwu  $f_2 = 0,110$  [mm/obr] obserwuje się ciągły spadek wartości  $R_v$  wraz ze wzrostem  $P$ . Taki trend utrzymuje się, dopóki siła docisku nie osiągnie wartości  $P = 600$  [N], kiedy to  $R_v$  zaczyna stabilizować swoją wartość na poziomie 0,701 [ $\mu\text{m}$ ], który utrzymuje, mimo zwiększenia siły do wartości 700 [N].

Próbki wykonane z brązu cynowego poddane zostały procesowi nagniatania z siłą docisku, zmieniającą się w przedziale od 300 N do 1500 N dla każdej z przyjętych wartości posuwu. Obróbka ta spowodowała znaczne (w niektórych zakresach sił docisku ponad trzykrotne) obniżenie wartości wszystkich parametrów profilu chropowatości.

Przy sile docisku 300 [N] wartość parametru  $R_a$  obniżyła się z 1,483 [ $\mu\text{m}$ ] (bezpośrednio po toczeniu) do 0,451 [ $\mu\text{m}$ ] przy posuwie  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] oraz do 0,418 [ $\mu\text{m}$ ] przy posuwie  $f_2 = 0,110$  [mm/obr]. Zwiększenie siły doci-

sku do 600 [N] dało znikome efekty, parametr Ra zmniejszył swoją wartość o 0,007 [ $\mu\text{m}$ ] przy posuwie  $f_1$ , natomiast przy posuwie  $f_2$  jego wartość wzrosła o 0,004 [ $\mu\text{m}$ ]. Wartość Ra próbki nagniatanej z posuwem  $f_1$  zaczyna wzrastać od wartości 0,444 [ $\mu\text{m}$ ] przy 600 [N] do maksymalnej wartości 0,684 [ $\mu\text{m}$ ] przy 1200 [N]. Po przekroczeniu przez siłę docisku wartości 1200 [N] ponownie zaczyna spadać, aż do 0,416 [ $\mu\text{m}$ ] przy 1500 [N], przy której to wartości zaczyna stabilizować się na stałym poziomie. Natomiast w przypadku próbki nagniatanej z posuwem  $f_2$ , Ra zaczyna zmniejszać się, tuż po przekroczeniu przez siłę docisku wartości 600 [N], aż do osiągnięcia minimalnej wartości 0,385 [ $\mu\text{m}$ ]. Następnie parametr Ra łagodnie zwiększa swoją wartość do 0,599 [ $\mu\text{m}$ ] przy sile docisku 1200 [N], po czym jego wartość znów spada do 0,478 [ $\mu\text{m}$ ] przy 1500 [N].

Charakter zmian parametru Rq jest analogiczny do zmian parametru Ra. Siła docisku  $P = 300$  [N] pozwoliła na zmniejszenie Rq z 1,787 [ $\mu\text{m}$ ] przed obróbką do 0,546 [ $\mu\text{m}$ ] po obróbce nagniataniem z posuwem  $f_1 = 0,052$  [mm/obr]. Zwiększenie siły docisku spowodowało wzrost parametru Rq do wartości 0,826 [ $\mu\text{m}$ ] przy sile docisku równej 1200 [N]. Dalsze zwiększenie siły wywołało spadek średniego kwadratowego odchylenia chropowatości w wartości minimalnej 0,512 [ $\mu\text{m}$ ], osiągniętej przy 1500 [N]. W przypadku obróbki z posuwem  $f_2 = 0,110$  [mm/obr] i siłą docisku  $P = 300$  [N] wartość parametru Rq została zredukowana do poziomu 0,496 [ $\mu\text{m}$ ]. Zwiększenie siły docisku spowodowało minimalny wzrost Rq o 0,014 [ $\mu\text{m}$ ] przy 600 [N], a następnie spadek do 0,480 [ $\mu\text{m}$ ], która to wartość jest najniższą otrzymaną po obróbce. Przy dalszym zwiększaniu siły docisku zaobserwowano wzrost parametru Rq do poziomu 0,744 [ $\mu\text{m}$ ] przy 1200 [N] i znaczny spadek do poziomu 0,563 [ $\mu\text{m}$ ] przy 1500 [N].

Wpływ posuwu i siły docisku na parametr Rt jest taki sam jak w przypadku parametrów Ra i Rq. Przy posuwie  $f_1 = 0,052$  [mm/obr] nagniatanie z siłą  $P = 300$  [N] obniżyło jego wartość z 8,607 [ $\mu\text{m}$ ] przed obróbką do 3,443 [ $\mu\text{m}$ ]. Wzrost siły do 600 [N] spowodował minimalny (o 0,073 [ $\mu\text{m}$ ]) spadek wysokości nierówności. Dalszy wzrost siły docisku wywołał wzrost Rt do poziomu 4,100 [ $\mu\text{m}$ ].

## 1.7. Wnioski

Proces nagniatania tocznego, przeprowadzony z wykorzystaniem głowicy nagniatającej EG45, może być stosowany jako obróbka gładkościowo – umacniająca, ponieważ możliwe jest uzyskanie chropowatości powierzchni Ra poniżej 0,2 [ $\mu\text{m}$ ] (Rz poniżej 1  $\mu\text{m}$ ). Narzędzie EG45 umożliwiło dokonanie znacznych modyfikacji struktury geometrycznej powierzchni. Parametry profilu chropowatości uległy ponad trzykrotnemu zmniejszeniu. Najkorzystniejsze



właściwości struktury geometrycznej powierzchni (najniższy parametr Ra) zostały osiągnięte przy następujących parametrach obróbki:

- dla brązu berylowego:  $n = 315$  [obr/min],  $f = 0,052$  [mm/obr],  $P = 500$  [N],
- dla brązu cynowego:  $n = 315$  [obr/min],  $f = 0,110$  [mm/obr],  $P = 900$  [N].

Ze względu na niewielką twardość brązu CuSn10P, podczas obróbki nagniataniem wystąpiło zjawisko płynięcia materiału. Wpłynęło to na pojawienie się falistości powierzchni. W zakresach siły docisku: do 600 [N] dla brązu berylowego i do 1300 [N] dla brązu cynowego, otrzymane parametry profilu chropowatości są niższe dla posuwu o mniejszej wartości ( $f = 0,052$  [mm/obr]).

W celu oceny struktury geometrycznej powierzchni zrealizowano szereg prób doświadczalnych w szerokim zakresie zmienności i przy zróżnicowanych wartościach parametrów procesu nagniatania. W efekcie otrzymano niemało wyników, które poddano analizie bez zastosowania metod statystycznych. Taka analiza wyników jest poprawna, natomiast wiąże się z większym nakładem pracy i kosztów, jednocześnie nie umożliwia aproksymowania zależności na cały badany zakres zmienności parametrów.

## Literatura do rozdziału 1.

- [1] Baryła K.: Analiza struktury geometrycznej powierzchni brązu po obróbce nagniataniem, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.
- [2] Erbl J. i in: Encyklopedia technik wytwarzania, T2, OWPW, Warszawa 2001.
- [3] Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej, WNT, Warszawa 1983.
- [4] Górnjak J. in: Poradnik inżyniera: obróbka skrawaniem, T1, WNT, Warszawa 1991.
- [5] Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów, WNT, Warszawa 2010.
- [6] Oczó K.E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni, OWPRz, Rzeszów 2003.
- [7] Pacyna J. in: Metaloznawstwo: wybrane zagadnienia, UWND AGH, Kraków 2005.
- [8] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem, WNT, Warszawa 1979.
- [9] Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo, WNT, Warszawa 2007.
- [10] Sieniawski J.: Metaloznawstwo i podstawy obróbki cieplnej: laboratorium, OWPRz, Rzeszów 2013.
- [11] Storch B.: Podstawy obróbki skrawaniem, WUPK, Koszalin 2001.
- [12] Instrukcja obsługi nr 422E/6 Dogniataki jednorolkowe EG45-45T, EG45-45F, EG45-40M.
- [13] <http://www.ecoroll.de> (05.01.2015).

**Beata BULIKOWSKA**  
**Lidia GAŁDA**

## **2. ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ NA CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE WĘZŁA ŚLIZGOWEGO 42CrMo4 - SiC**

### **2.1. Wprowadzenie**

Tribologia jest to nauka o tarcu i procesach mu towarzyszących. Obejmuje ona wiedzę nie tylko o zjawiskach fizycznych i chemicznych, ale też o biologicznych i cieplnych. Podczas ruchu dwóch lub więcej elementów występuje tarcie, które skutkuje powstawaniem nieodwracalnych zmian w ich warstwie wierzchniej. Proces tarcia jest powszechny w przyrodzie, nie można go wyeliminować, ale można skutecznie korygować skutki jego działania [1, 5].

Skutki tarcia mogą być zarówno pozytywne, jak i negatywne. Do negatywnych zalicza się przede wszystkim straty energetyczne oraz straty materiałowe, które są spowodowane zużyciem trących się ciał. W celu zmniejszenia zużycia się części maszyn stosowane są smarowanie oraz chłodzenie obszarów tarcia. Elementy maszyn wykonuje się z materiałów odpornych na zużycie. Mogą to być materiały nie tylko metalowe, ale też ceramika, kompozyty czy tworzywa sztuczne [7, 8].

W ostatnich latach materiały ceramiczne budzą coraz większe zainteresowanie, a w szczególności ich zastosowanie do produkcji elementów maszyn pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Elementy z ceramiki charakteryzują się o wiele dłuższą żywotnością. Wyróżnia je wysoka twardość oraz odporność na naprężenia normalne, ale materiały ceramiczne mają także ograniczenia, do których zalicza niska odporność na kruche pęknięcia. Łożyska toczne z elementami ceramicznymi mogą być stosowane w miejscach, gdzie temperatura jest bardzo niska lub też bardzo wysoka, a nawet w środowisku korozyjnym [3, 4]. Zastosowanie nowych materiałów do budowy części maszyn wiąże się z koniecznością oceny skutków takiej aplikacji. W przypadku węzłów ciernych istnieje wiele czynników, które mogą wpływać na parametry ich pracy. Pozostaje pytanie jaki wpływ na tarcie i zużycie będą wywierały chropowatość

powierzchni, twardość materiału, naprężenia wewnętrzne, warunki otoczenia i szereg innych związanych z obciążeniem węzła tarcia.

W niniejszym rozdziale opisane zostały badania tribologiczne, które zrealizowano z wykorzystaniem testera z węzłem typu kulka-tarcza. Do badań zastosowano ceramiczną kulkę z węgla krzemu. Badania zaplanowano i zrealizowano z wykorzystaniem planu badawczego statycznego zdeterminowanego kompletnego (PS/DK  $3^2$ ), przy pomocy którego przeanalizowano wpływ dwóch czynników wejściowych (twardość materiału i chropowatość powierzchni) na wartość współczynnika tarcia. Przedstawiono także informacje na temat procesów technologicznych zastosowanych do przygotowania próbek o różnicowanej chropowatości ich powierzchni.

## 2.2. Metodyka badań według planu trójpoziomowego PS/DK $3^2$

Plany trójpoziomowe, czyli takie w których czynniki wejściowe przybierają wartości na trzech poziomach zmienności, umożliwiają uzyskanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci wielomianu drugiego stopnia.

Plany trójpoziomowe stosuje się w sytuacji, gdy przybliżenie liniowe badanego procesu jest nieadekwatne. Liczba czynników wejściowych nie jest ograniczona, natomiast analiza jest bardziej efektywna, gdy prowadzona jest przy mniejszej liczbie analizowanych parametrów. Wygodnym z punktu widzenia analizy i czytelności wyników badań jest plan uwzględniający dwa czynniki wejściowe. Matrycę planu PS/DK  $3^2$  przedstawiono w poniższej tab. 2.1.

Tabela 2.1. Matryca planu PS/DK  $3^2$  (opracowanie własne w oparciu o [6])

Lp.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1 x_2$
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	0	+	0	0
3	+	+	-	+	+	-
4	+	0	+	0	+	0
5	+	0	0	0	0	0
6	+	0	-	0	+	0
7	+	-	+	+	+	-
8	+	-	0	+	0	0
9	+	-	-	+	+	+

Według planu PS/DK  $3^2$  realizuje się tylko 9 różnych doświadczeń z określoną powtarzalnością, zwykle zależną od rodzaju badanego procesu. W wyniku

analizy statystycznej istnieje możliwość uzyskania równania opisującego badany obiekt (proces). Współczynniki równania regresji oblicza się na podstawie wyników pomiarów czynnika wyjściowego, sumując wyniki kolejnych doświadczeń ze znakiem, jaki figuruje w kolumnie przypisanej danemu czynnikowi wejściowemu.

Sprawdzenie stabilności (powtarzalności) warunków realizacji doświadczeń wymaga, aby wariancje wyników pomiarów zostały porównane. Wariancja wyników jednego doświadczenia, która odbiega znacząco od pozostałych pod względem wartości, informuje o nietypowym przebiegu danego doświadczenia. W związku z tym należy takie doświadczenie powtórzyć. Oceny powtarzalności warunków doświadczeń dokonuje się w oparciu o kryterium Cohrana [6, 9]. Weryfikuje ono hipotezę o powtarzalności wariancji wyznaczając wartość testową  $G$ . Następnie porównuje się tę wartość z wartością krytyczną, przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha$  oraz w zależności od liczby stopni swobody. Poziom istotności jest to graniczne prawdopodobieństwo, że badana wartość znajdzie się poza przedziałem ufności. Przykładowo, gdy poziom istotności  $\alpha$  przyjmuje się na poziomie 0,05, to znaczy, że przedział ufności określany jest z prawdopodobieństwem 0,95. Jeśli zachodzi zależność:

$$G < G_{kr} = G_{(\alpha;f1;f2)} \quad (2.1)$$

to powtarzalność warunków doświadczeń można uznać za zadowalającą.

W kolejnym kroku dokonuje się analizy istotności współczynników regresji  $b_i$ , którą można przeprowadzić z wykorzystaniem testu t-Studenta.

Oceny, czy otrzymane równanie regresji opisuje w sposób adekwatny badany proces, dokonuje się z wykorzystaniem testu Fishera - Snedecora. Oblicza się współczynnik testowy  $F_t$  i porównuje z wartością krytyczną określoną z tablic rozkładu Fishera-Snedecora przy odpowiednim poziomie istotności  $\alpha$  i liczbie stopni swobody. Jeżeli zachodzi zależność:

$$F_t < F_{kr} = F_{(\alpha;f1;f2)} \quad (2.2)$$

to uzyskane równanie regresji (wyniki doświadczenia) można uznać za adekwatne w danym zakresie zmienności czynników wejściowych [9].

### 2.3. Metodyka badań

Badania tribologiczne zostały zrealizowane z wykorzystaniem testera typu kulka-tarcza T-11. Badanie przeprowadzono przy obciążeniu siłą  $P = 5 \text{ N}$ , prędkości obrotowej przeciwpróbki  $n = 200 \text{ obr/min}$ , promieniu tarcia  $R = 4 \text{ mm}$  (prędkość poślizgu  $V_p = 0,08 \text{ m/s}$ ) oraz w temperaturze otoczenia. Natomiast czas badania pojedynczej próbki to 30 s.

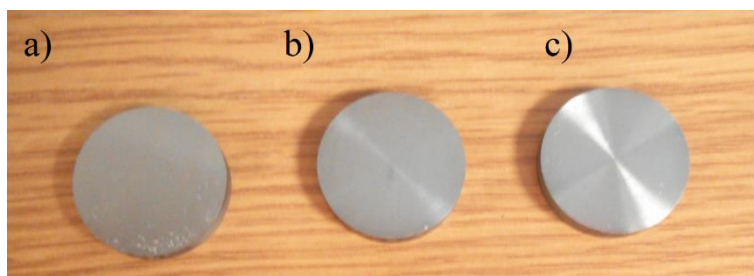
Próbki do badań zostały wykonane ze stali konstrukcyjnej 42CrMo4. Charakteryzuje się ona dużą wytrzymałością na skręcanie, wytrzymałością zmęczeniową, a także wysoką hartownością. Stal przeznaczona jest do ulepszenia cieplnego, do hartowania powierzchniowego, a także do azotowania, ale jest niespawalna. Próbki do badań zostały przygotowane w trzech wariantach:

- o twardości 22 HRC, próbki po wyżarzaniu zmiękczającym,
- o twardości 32 HRC, próbki po ulepszeniu cieplnym,
- o twardości 42 HRC, próbki po hartowaniu.

Powierzchnie próbek zostały poddane obróbce wykończeniowej w trzech różnych wariantach:

- szlifowanie – z wykorzystaniem szlifierki do płaszczyzn uzyskano chropowatość powierzchni próbek charakteryzowaną parametrem Ra wynoszącą 0,24  $\mu\text{m}$ ,
- polerowanie - próbki były przez 1 minutę polerowane z zastosowaniem pasty polerskiej, po wykonaniu obróbki wykończeniowej wartość parametru Ra wynosiła 0,14  $\mu\text{m}$ ,
- docieranie - próbki do badania były docierane papierem ściernym o granulacji 800 przez 1,5 minuty, po wykonaniu tej obróbki wykończeniowej Ra wynosiło około 0,04  $\mu\text{m}$ .

Na rys. 2.1 przedstawiono zdjęcia próbek po zastosowaniu obróbki wykończeniowej powierzchni.



Rys. 2.1. Zdjęcie próbek po obróbce szlifowaniem (a), polerowaniem (b) oraz docieraniu (c) [2]

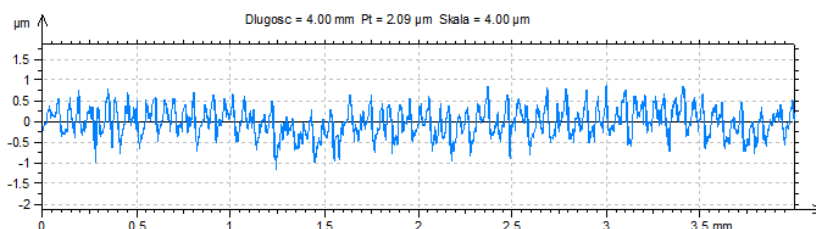
Przeciwpróbki stanowiły ceramiczne kulki SiC o średnicy 6,35 mm. Chropowatość powierzchni przeciwpróbek wynosiła około  $Ra = 0,03 \mu\text{m}$ . Główną zaletą kulek ceramicznych SiC jest wysoka twardość wynosząca około 2800 HV. Węglik krzemu charakteryzują między innymi następujące właściwości:

- gęstość 3,21  $\text{g/cm}^3$ ,
- wysoka stabilność termiczna,
- kruchość,
- wysoka przewodność cieplna, a także elektryczna.

Badania tribologiczne przeprowadzono w warunkach smarowania. Na powierzchni stalowej próbki umieszczano jedną kroplę oleju, a następnie równomiernie rozprowadzano olej specjalnym zbierakiem. Jako środek smarny wykorzystano olej maszynowy LAN-46. Oleje maszynowe LAN stosuje się głównie do smarowania lekko bądź średnioobciążonych części maszyn (na przykład łożysk tocznych i ślizgowych, prowadnic czy też przekładni mechanicznych). Oleje maszynowe LAN produkuje się na bazie gębokorafinowanych olejów mineralnych.

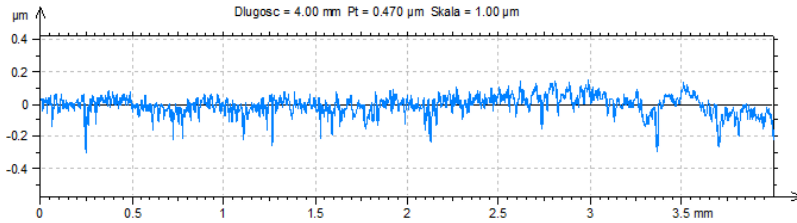
## 2.4. Wyniki badań

W wyniku realizacji poszczególnych technik obróbki otrzymano powierzchnie o zróżnicowanej strukturze geometrycznej. Najwyższa wartość parametru  $R_a$  wynosiła  $0,267 \mu\text{m}$ . Była to próbka o twardości 32 HRC, po szlifowaniu (rys. 2.2). Natomiast najniższa wartość  $R_a$  wynosiła  $0,0329 \mu\text{m}$ . Taką wartością charakteryzowała się powierzchnia próbki o twardości 42 HRC, po docieraniu (rys. 2.3). Analizując otrzymane wyniki pod względem parametru  $R_p$ , czyli wysokości najwyższego wzniesienia, to wartość maksymalna tego parametru wynosiła  $0,785 \mu\text{m}$  i była to próbka o twardości 32 HRC po szlifowaniu. Minimalną wartość  $R_p$  równą  $0,102 \mu\text{m}$  otrzymano po docieraniu powierzchni próbki o twardości 42 HRC.



$R_p$	$0.785 \mu\text{m}$
$R_v$	$0.898 \mu\text{m}$
$R_z$	$1.68 \mu\text{m}$
$R_c$	$0.840 \mu\text{m}$
$R_t$	$1.88 \mu\text{m}$
$R_a$	$0.267 \mu\text{m}$
$R_q$	$0.327 \mu\text{m}$
$R_{sk}$	$-0.0562$ <no unit>
$R_{ku}$	$2.52$ <no unit>

Rys. 2.2. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni próbki po szlifowaniu (twardość 32 HRC) [2]



Rp	0.102	µm
Rv	0.243	µm
Rz	0.345	µm
Rc	0.111	µm
Rt	0.430	µm
Ra	0.0329	µm
Rq	0.0467	µm
Rsk	-1.24	<no unit>
Rku	6.44	<no unit>

Rys. 2.3. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni próbki po docieraniu (twardość 42 HRC) [2]

Wyniki badań tribologicznych zostały przedstawione w postaci tabeli zbiorczej (tab. 2.2).

Najwyższa wartość siły tarcia wynosiła 0,58 N, przy zastosowaniu pary ciernej z próbką o twardości 22 HRC po szlifowaniu powierzchni (rys. 2.4). Natomiast najniższą wartość siły tarcia równą 0,502 N otrzymano przy badaniu próbki o twardości 22 HRC po docieraniu (rys. 2.5). Różnica pomiędzy wartością maksymalną a minimalną wynosiła około 15%.

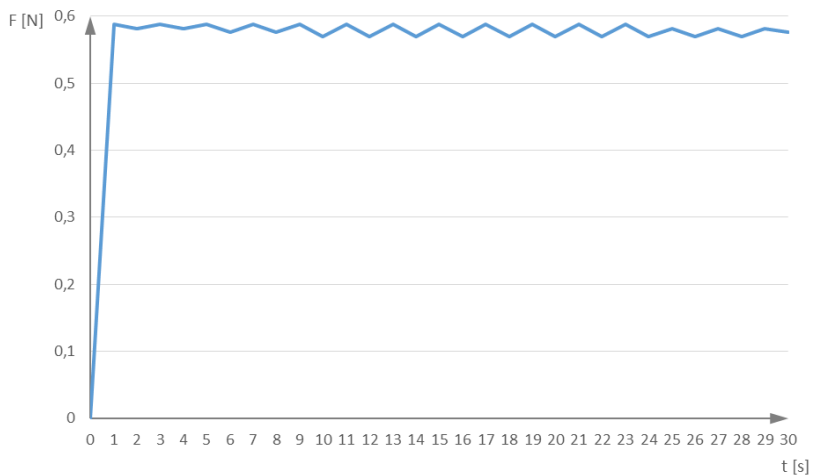
Rysunek 2.6 przedstawia wyniki pomiarów siły tarcia w próbie, w której wykorzystano kulkę stalową wykonaną z 100Cr6, współpracującą tarciowo ze stalową próbką o twardości 42 HRC po szlifowaniu powierzchni.

W przypadku zastosowania kulki stalowej średnia wartość siły tarcia wynosiła 0,64 N. Wartość ta jest wyższa o 10-27% w porównaniu z wartościami jakie uzyskano przy badaniach z wykorzystaniem kulki ceramicznej.

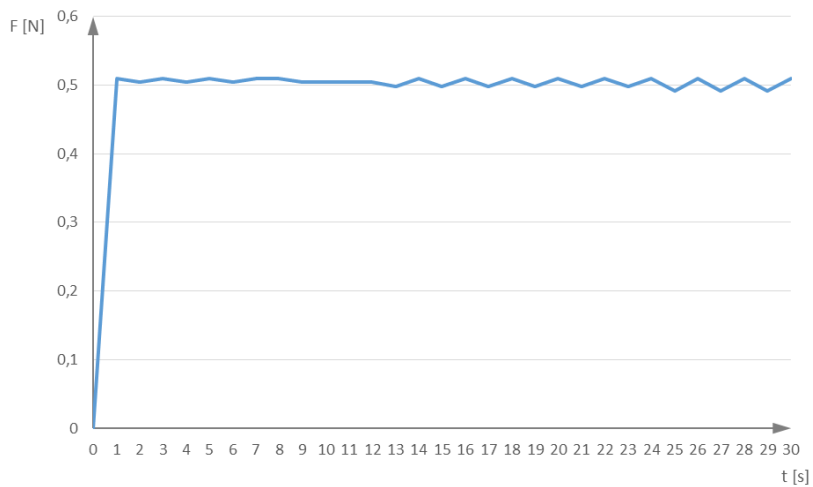
Tabela 2.2. Wartości siły tarcia z zastosowaniem próbek o różnej twardości i po różnych rodzajach obróbki wykończeniowej powierzchni [2]

Nr doświadczenia	Twardość materiału stalowej próbki T [HRC]	Chropowatość powierzchni próbki Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Siła tarcia F [N]
1	42	0,24	0,551
			0,552
			0,549
2	42	0,14	0,515
			0,527
			0,523
3	42	0,04	0,535
			0,513
			0,508
4	32	0,24	0,583
			0,581
			0,585
5	32	0,14	0,564
			0,519
			0,530
6	32	0,04	0,552
			0,513
			0,525
7	22	0,24	0,586
			0,568
			0,580
8	22	0,14	0,523
			0,507
			0,518
9	22	0,04	0,525
			0,502
			0,504

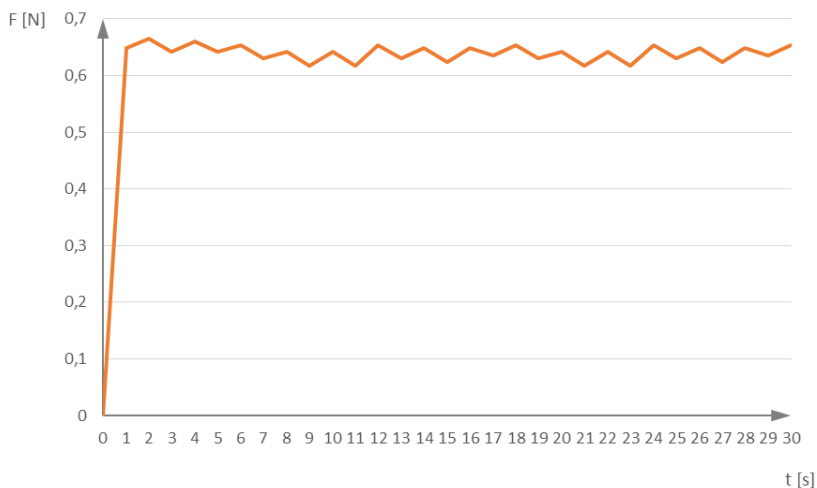




Rys. 2.4. Siła tarcia  $F$  podczas badań pary ciernej SiC- 42CrMo4; powierzchnia stali o twardości 22 HRC, po szlifowaniu [2]



Rys. 2.5. Siła tarcia  $F$  podczas badań pary ciernej SiC- 42CrMo4; powierzchnia stali o twardości 22 HRC, po docieraniu [2]



Rys. 2.6. Siła tarcia F podczas badań pary ciernej 100Cr6- 42CrMo4; powierzchnia stali o twardości 42 HRC, po szlifowaniu [2]

## 2.5. Analiza wyników badań

Do oceny wpływu chropowatości powierzchni i twardości materiału na wartość współczynnika tarcia zastosowano plan statystyczny zdeterminowany kompletny PS/DK 3<sup>2</sup>. Każdy z czynników przyjmował wartości na trzech poziomach zmienności. Analizę statystyczną przeprowadzono z uwzględnieniem skutków interakcji między czynnikami wejściowymi. Powtarzalność warunków doświadczeń oceniono z wykorzystaniem kryterium Cohrana, istotność współczynników regresji ustalono przy pomocy testu t-Studenta, a do oceny adekwatności równania zastosowano test Fishera-Snedecora.

W oparciu o wykonane obliczenia uznano, iż przeprowadzone badania były wykonane z wystarczającą powtarzalnością oraz otrzymane równanie regresji uznano za adekwatne:

$$\mu = -0,21446 - 0,007Ra + 0,021252T - 0,0018TRa + 0,4Ra^2 - 0,00035T^2$$

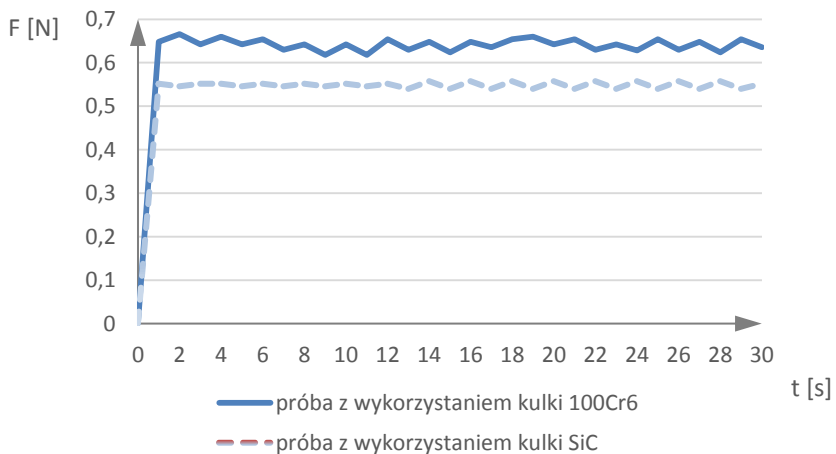
W tab. 2.3 przedstawiono wartości współczynnika tarcia otrzymane w badaniach eksperymentalnych oraz wartości obliczone według otrzymanego modelu matematycznego.

Tabela 2.3. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  [2]

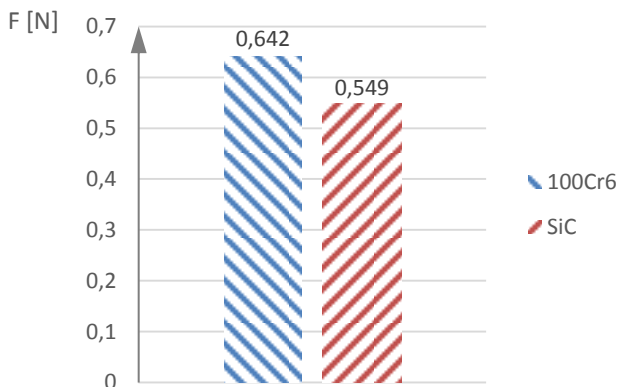
Lp.	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\bar{\mu}$	$\hat{\mu}$
1	0,1102	0,1104	0,1098	0,1101	0,11115
2	0,103	0,1054	0,1046	0,1043	0,10384
3	0,107	0,1026	0,1016	0,1037	0,10454
4	0,1166	0,1162	0,117	0,1166	0,11647
5	0,1128	0,1038	0,106	0,1075	0,10738
6	0,1104	0,1026	0,105	0,1060	0,10629
7	0,1172	0,1136	0,116	0,1156	0,11472
8	0,1046	0,1014	0,1036	0,1032	0,10384
9	0,105	0,1004	0,1008	0,1021	0,10097

W badanym zakresie zmienności analizowanych czynników istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia  $\mu$  wywierała chropowatość powierzchni (parametr Ra). Twardość materiału też miała wpływ na współczynnik tarcia, ale był on mniejszy niż w przypadku chropowatości powierzchni. Można zauważyć, że obliczone według modelu matematycznego wartości współczynnika tarcia są bliskie wartościom, które otrzymano w eksperymencie.

Poniżej w sposób graficzny porównano wartości siły tarcia w zależności od zastosowanego materiału kulki (rys. 2.7-2.8).



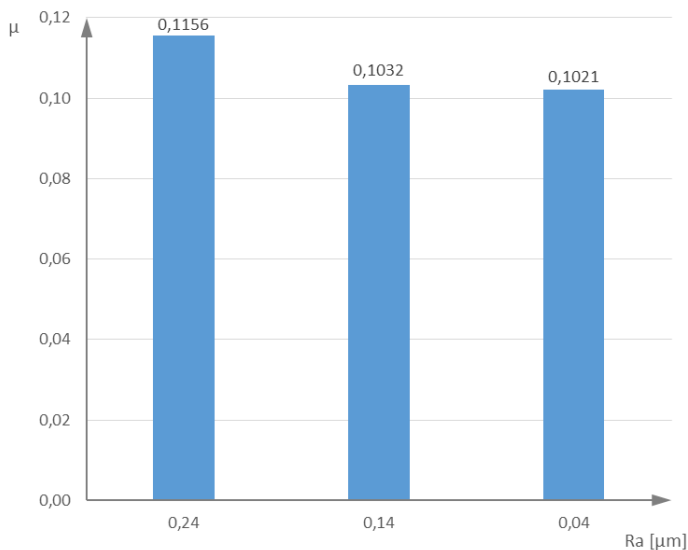
Rys. 2.7. Siła tarcia  $F$  podczas badań pary ciernej SiC- 42CrMo4 oraz pary ciernej 100Cr6-42CrMo4; powierzchnia stali o twardości 42 HRC, po szlifowaniu [2]



Rys. 2.8. Średnia wartość siły tarcia przy zastosowaniu elementu stalowego i ceramicznego w parach ciernych ze stalową tarczą o twardości 42 HRC, po szlifowaniu [2]

Powyższe wykresy przedstawiają wyniki badań, w których w węzle ciernym wykorzystano kulkę stalową 100Cr6 oraz kulkę ceramiczną SiC. Wartość siły tarcia w przypadku wykorzystania kulki 100Cr6 była większa niż w przypadku kulki SiC. Przy małym obciążeniu równym 5 N różnica w wartościach siły tarcia wynosiła około 17%.

Na rys. 2.9 przedstawiono wartości współczynnika tarcia w zależności od chropowatości powierzchni stalowych próbek o twardości materiału 22 HRC.



Rys. 2.9. Średnie wartości współczynnika tarcia w próbach tarcia przy zróżnicowanej chropowatości powierzchni tarcz o twardości materiału 22 HRC [2]

Najwyższa wartość współczynnika tarcia występowała przy badaniu próbek o Ra równym  $0,24 \mu\text{m}$  i wynosiła  $0,1156$ . Jedynie na powierzchni tych próbek zauważono ślady po przejściu kulki (rys. 2.10). Przy mniejszych wartościach chropowatości powierzchni wartość współczynnika tarcia wynosiła  $0,1032$  (dla  $Ra = 0,14 \mu\text{m}$ ) i  $0,1021$  (dla  $Ra = 0,04 \mu\text{m}$ ). Dodatkowo, na tych powierzchniach nie zauważono żadnych śladów tarcia. Oznacza to, że przy małym obciążeniu wartość parametru Ra ma wpływ na współczynnik tarcia i zużycie.



Rys. 2.10. Zdjęcie próbek po próbach tarcia na testerze T-11; od lewej: próbka po szlifowaniu, próbka po polerowaniu, próbka po docieraniu [2]

Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno materiał kulki w węzle ślizgowym, jak i chropowatość powierzchni oraz twardość materiału stalowych tarcz wywierały wpływ na proces tarcia. Zastosowanie kulki ceramicznej SiC pozwoliło na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w porównaniu z kulką stalową 100Cr6. Zmniejszenie chropowatości powierzchni również wpłynęło na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia.

## 2.6. Podsumowanie

Za pomocą planu badawczego PS/DK  $3^2$  zbadano wpływ twardości materiału w zakresie 22-42 HRC i parametru chropowatości powierzchni Ra w zakresie  $0,04$ - $0,24 \mu\text{m}$  na wartość współczynnika tarcia.

W wyniku przeprowadzonych badań węzłów ciernych stal – ceramika SiC stwierdzono, że przy małym obciążeniu równym 5 N badane właściwości, tj. nierówności powierzchni i twardość materiału miały wpływ na wartość współczynnika tarcia.

Najmniejsze wartości współczynnika tarcia otrzymano przy zastosowaniu następujących wartości czynników wejściowych: twardość materiału  $T = 22$  HRC, chropowatość powierzchni  $Ra = 0,04 \mu\text{m}$ .

Wartość współczynnika tarcia jest zależna nie tylko od chropowatości powierzchni próbek, ale też od materiału kulki w węzle ślizgowym.

Wykorzystanie kulki ceramicznej pozwoliło na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w porównaniu z kulką stalową. Istotny wpływ ma przede wszystkim chropowatość powierzchni. Im mniejsza wartość parametru Ra w badanym zakresie zmienności, tym wartość współczynnika tarcia też była mniejsza.

Podsumowując, oba badane statystycznie parametry wywierały wpływ na wartość współczynnika tarcia. Wykorzystanie materiału ceramicznego jest korzystniejsze z punktu widzenia zmniejszenia oporów ruchu, jednak wiąże się to z większymi kosztami materiałowymi. Największy wpływ na minimalizację tarcia oraz ograniczenie deformacji powierzchni miała chropowatość niezależnie od twardości materiału. W związku z tym stosowanie dodatkowej obróbki wykończeniowej stali jest jak najbardziej słuszne.

W wyniku zastosowania planu PS/DK 3<sup>2</sup> zrealizowano badania przy małym nakładzie kosztów i czasu. Uzyskano adekwatny opis badanego obiektu w postaci równania matematycznego, co umożliwi obliczenie wartości współczynnika tarcia przy innych wartościach parametrów wejściowych, pozostających w przyjętym zakresie zmienności.

## **Literatura do rozdziału 2.**

- [1] Bhushan B.: Introduction to tribology, John Wiley&Sons, INC., New York 2002.
- [2] Bulikowska B: Analiza wpływu wybranych właściwości warstwy wierzchniej na charakterystyki tribologiczne węzła ślizgowego 42CrMo4 – SiC, , praca dyplomatowa, Rzeszów 2015.
- [3] Dobrzański L.: Nietalowe materiały inżynierskie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [4] Dobrzański L.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, Warszawa 2003.
- [5] Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa 2007.
- [6] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu, WNT, Warszawa 2013.
- [7] Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [8] Nosal S.: Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [9] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.

**Adrianna KWIECIEN**  
**Lidia GALDA**

### **3. OCENA ISTOTNOŚCI WPLYWU PARAMETRU TECHNOLOGICZNEGO I CZYNNIKA LUDZKIEGO W PROCESIE NAGNIATANIA**

#### **3.1. Wprowadzenie**

Wiedza na temat znaczenia stanu warstwy wierzchniej, a w szczególności jego istotnego wpływu na właściwości eksploatacyjne, pozwoliła rozpowszechnić całą dziedzinę technologii z zakresu tzw. obróbki gładkościowo-umacniającej. Obróbka tego typu nadaje obrabianym elementom korzystne cechy, na przykład zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej, uzyskanie dużej gładkości powierzchni oraz podwyższenie mikrotwardości warstwy wierzchniej. Obróbka gładkościowo-umacniająca przejawia szereg odmian nagniatania, a wśród nich nagniatanie toczne [2, 6]. Jakość nagniatanego wyrobu silnie zależy od określenia dokładnej wartości parametrów technologicznych. Umiejętność doboru odpowiednich parametrów precyzyjnego procesu nagniatania stanowi podstawę do prawidłowego projektowania procesu technologicznego. Bezpośrednimi parametrami nagniatania często wpływającymi na właściwości wierzchniej warstwy podczas nagniatania są: posuw i prędkość nagniatającej rolki, siła nagniatania, warunki smarowania nagniatanej strefy, a także liczność wykonanych przejść. Duża liczba czynników wpływających na obróbkę nagniataniem wymaga licznych badań eksperymentalnych, które pozwolą uzyskać optymalne warunki nagniatania [2, 6].

Równie istotną rolę w procesach technologicznych odgrywa niezawodność operatora, oznaczająca zdolność wykonywania zadań produkcyjnych z minimalnym ryzykiem popełnienia błędu w określonych warunkach i czasie. W przypadku, gdy działania operatora istotnie wpływają na wyniki pracy, należy dokonać analiz służących wykryciu odchyień od pracy standardowej oraz zastosować działania redukujące odchylenia tego typu [4]. W przypadku realizacji obróbki z wykorzystaniem obrabiarek uniwersalnych część czynności, takich jak mocowanie przedmiotu obrabianego czy narzędzia w uchwycie, wykonywane jest przez operatora. Biorąc pod uwagę dynamikę sprawności czło-

wieka istnieje możliwość, że pojawią się błędy w realizowanym procesie. Procesy, w których człowiek może wpływać na jakość wykonywanych dóbr należy poddać badaniom.

W celu dokonania oceny istotności wpływu operatorów oraz parametrów procesu nagniatania tocznego na parametry chropowatości powierzchni przeprowadzono doświadczenie procesu nagniatania powierzchni wałków wykonanych ze stali X46Cr13 z udziałem trzech operatorów. Ocena istotności wpływu została zrealizowana z wykorzystaniem programów statycznych randomizowanych: kompletnie oraz blokowo.

### 3.2. Metodyka badań

Zakres badań obejmował obróbkę nagniataniem wykonaną na trzech wałkach ze stali nierdzewnej X46Cr13 o twardości 32 HRC. Średnica wałków wynosiła 33 mm. Powierzchnię elementów przed nagniataniem poddano szlifowaniu. Po obróbce szlifowaniem wartość parametru chropowatości Ra wynosiła 0,45  $\mu\text{m}$ . Proces nagniatania powierzchni wałków zrealizowano z wykorzystaniem tokarki uniwersalnej TUJ 560M, na której zamocowano dogniatak jedno-rolkowy EG 45T. W przeprowadzonym procesie funkcję chłodziwa pełnił olej. Proces obróbki poprzedzało ustalenie parametrów stałych: prędkości obrotowej  $n = 315 \text{ obr/min}$  oraz siły docisku  $P = 55 \text{ N}$ . Zmiennymi wejściowymi procesu był posuw  $f (0,038 \div 0,125 \text{ mm/obr})$  oraz trzech operatorów. W trakcie procesu dokonywano zmiany operatorów oraz wartości posuwu  $f$  zgodnie z tab. 3.1.

Tabela 3.1. Warianty procesu nagniatania [3]

Nr wariantu	Operator	Posuw $f$ [mm/obr]
1	Operator 1	0,038
2		0,052
3		0,077
4		0,125
5	Operator 2	0,038
6		0,052
7		0,077
8		0,125
9	Operator 3	0,038
10		0,052
11		0,077
12		0,125



Pomiary chropowatości powierzchni po obróbce nagniataniem uzyskano przy użyciu przyrządu warsztatowo-laboratoryjnego, tj. profilometru stykowego Surtronic 3+ firmy Taylor Hobson Polska oraz oprogramowania TalyProfile Lite. Aby wykonać obliczenia statystyczne, pomiary te wykonano z trzykrotnym powtórzeniem dla każdego wariantu z tab. 3.1. Zebrane pomiary służyły ocenie istotności wpływu badanych czynników na chropowatość powierzchni analizowanych wałków. Istotność wpływu czynnika ludzkiego oraz parametru technologicznego procesu nagniatania (posuwu  $f$ ) na parametry chropowatości powierzchni wyliczono za pomocą programów statycznych randomizowanych kompletnie oraz blokowo.

Program statyczny randomizowany kompletnie umożliwia dokonanie badań istotności wpływu jednego czynnika wejściowego na jeden czynnik wyjściowy. Pozostałe parametry wejściowe są na stałym poziomie. Wartość testową  $F_t$ , obliczaną ze wzoru (3.1) porównano z wartością krytyczną  $F_{kr}$  odczytaną z tablic Fishera – Snedecora przy określonych stopniach swobody oraz poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  [1].

$$F_t = \frac{\sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 (n - p)}{\left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \right] (p - 1)} \quad (3.1)$$

gdzie:

$n$  - całkowita liczba wszystkich pomiarów,

$n_i$  - liczba wszystkich pomiarów czynnika wejściowego danego poziomu,

$\bar{y}_i$  - uśrednione wyniki pomiarów  $i$ -tego wiersza,

$\bar{y}$  - średnia wyników wszystkich doświadczeń,

$y_{ij}$  - wielkość  $j$ -tego czynnika wyjściowego na poziomie  $i$ ,

$p$  - liczba poziomów zmienności wejściowego czynnika.

Program statyczny randomizowany blokowo z jednokrotnym powtórzeniem wyników badań ma na celu ocenę wpływu dwóch czynników wejściowych na czynnik wynikowy jednocześnie. Aby zweryfikować hipotezę o istotności wpływu czynników wejściowych konieczne było przeprowadzenie analizy wariancji z użyciem wartości współczynników  $F_t$  dla każdego czynnika wejściowego. Wartości te wyznaczono z następujących wzorów (3.2) [5, 7]:

$$F_I = \frac{S_I}{S_R} \cdot \frac{(p - 1)(q - 1)}{p - 1} \quad (3.2)$$

$$F_{II} = \frac{S_{II}}{S_R} \cdot \frac{(p - 1)(q - 1)}{p - 1}$$

Sumy kwadratów umieszczone we wzorach (3.2) obliczono z zależności (3.3, 3.4, 3.5):

$$S_I = q \sum_{i=1}^p \bar{y}_i^2 - pq\bar{y}^2 \quad (3.3)$$

$$S_{II} = p \sum_{j=1}^q \bar{y}_j^2 - pq\bar{y}^2 \quad (3.4)$$

$$S_R = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q y_{ij}^2 - q \sum_{i=1}^p \bar{y}_i^2 - p \sum_{j=1}^q \bar{y}_j^2 + pq\bar{y}^2 \quad (3.5)$$

Uzyskane wartości  $F_I$ ,  $F_{II}$  porównano z wartością rozkładu  $F$  Fishera – Snedecora.

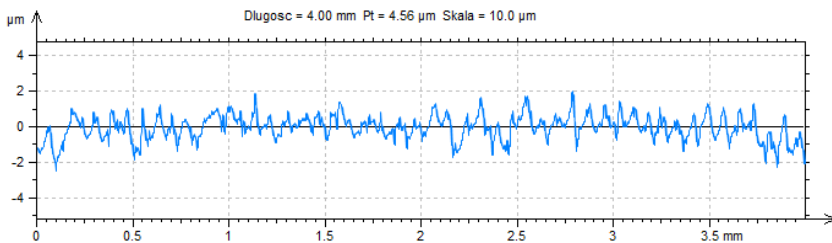
Analizowano następujące parametry chropowatości powierzchni  $Rz$ ,  $Rc$ ,  $Ra$ ,  $Rdc$  obliczane według normy PN-EN ISO 4287:1999 [8] oraz  $Rda$ .

### 3.3. Wyniki i analiza badań

#### 3.3.1. Chropowość powierzchni stali po nagniataniu

Wyniki pomiarów ukazano przy pomocy profilogramów pierwotnych oraz wartości parametrów chropowatości (tab. 3.2) uzyskanych dzięki filtracji filtrem Gaussa.

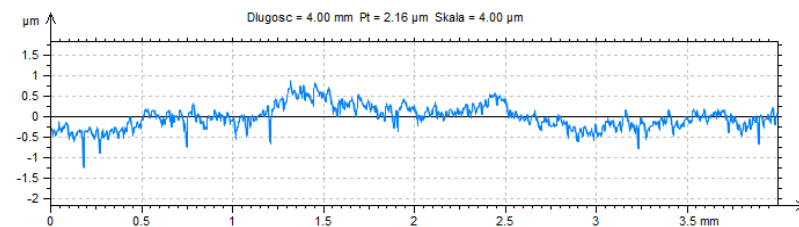
Rys. 3.1 zawiera wyniki pomiaru powierzchni wałka przed obróbką nagniataniem. Rys. 3.2 przedstawia wyniki pomiaru chropowatości powierzchni wałka obrabianego przez operatora 1, rys. 3.3 wyniki pomiaru chropowatości wałka operatora 2, natomiast rys. 3.4 wyniki pomiaru chropowatości elementu poddanego obróbce przez operatora 3, na każdym poziomie zmienności posuwu  $f$  (0,038 ÷ 0,125 mm/obr).



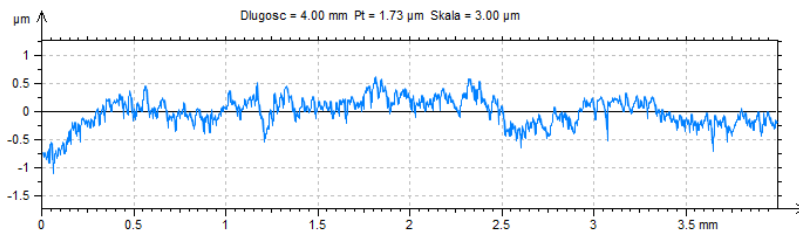
Rys. 3.1. Profil pierwotny powierzchni wałka po szlifowaniu, przed obróbką nagniataniem [3]

Z powyższego profilogramu zauważyć można, iż powierzchnia wałka przed obróbką nagniataniem charakteryzowała się dużymi wzniesieniami oraz wgłębieniami profilu, o czym świadczy wysoka wartość parametru  $R_z = 3,04 \mu\text{m}$ .

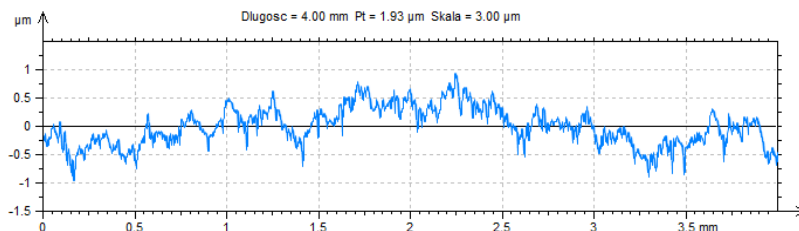
a)



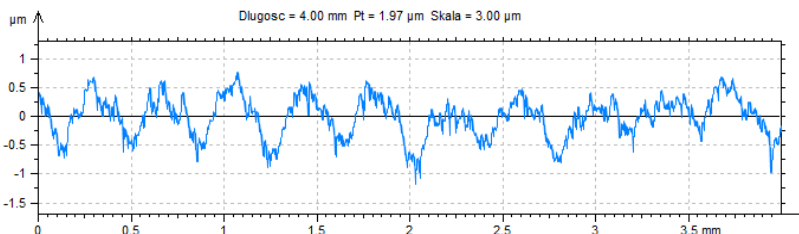
b)



c)

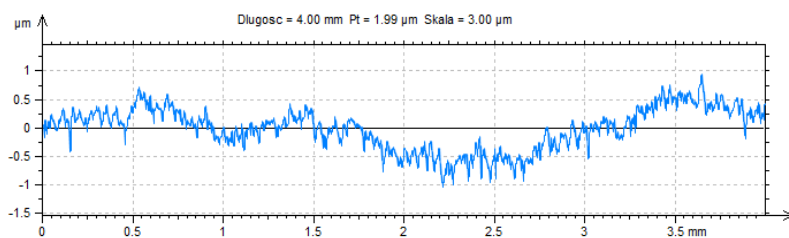


d)

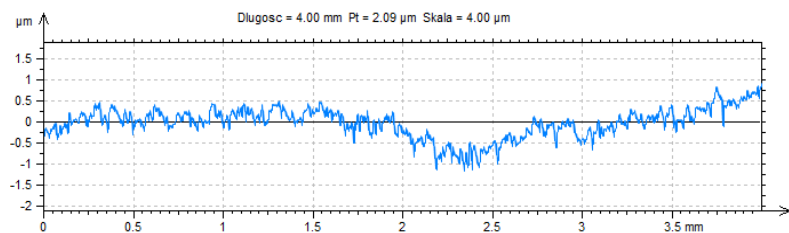


Rys. 3.2. Profilogramy pierwotne powierzchni wałka obrabiane przez operatora 1 przy posuwie: 0,038 mm/obr (a) 0,052 mm/obr (b) 0,077 mm/obr (c) 0,125 mm/obr (d) [3]

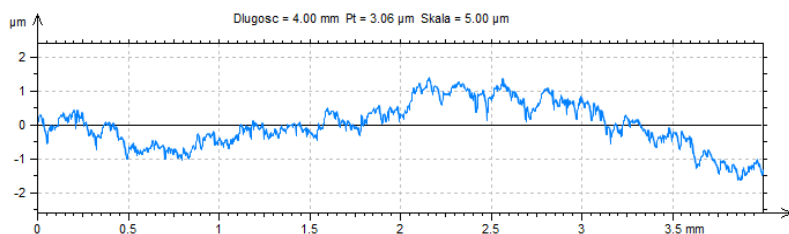
a)



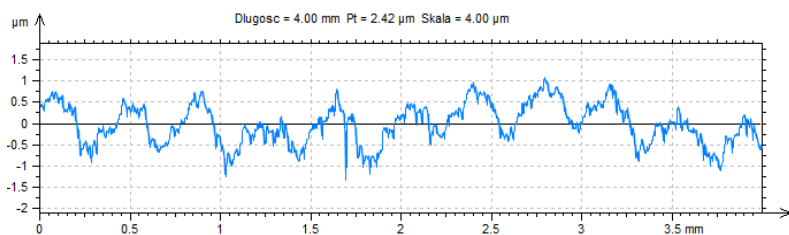
b)



c)

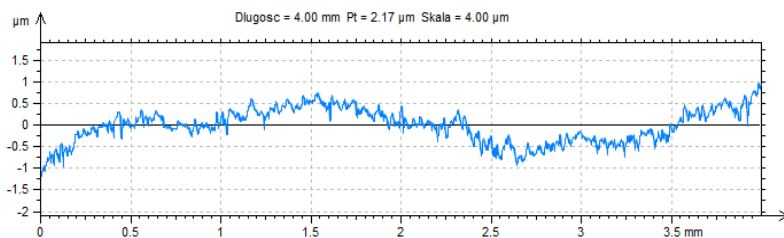


d)

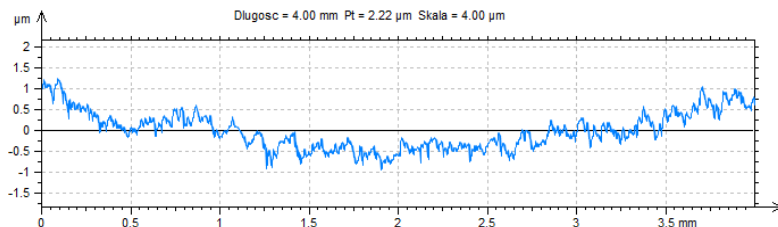


Rys. 3.3. Profilogramy pierwotne powierzchni wałka obrabiane przez operatora 2 przy posuwie: 0,038 mm/obr (a) 0,052 mm/obr (b) 0,077 mm/obr (c) 0,125 mm/obr (d) [3]

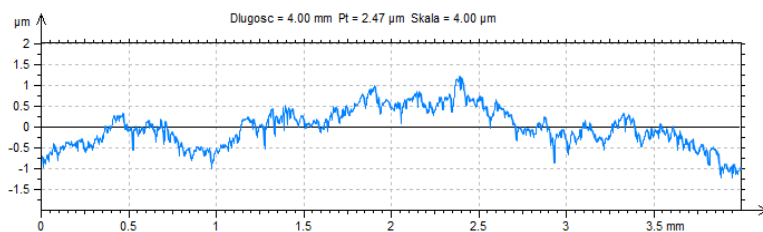
a)



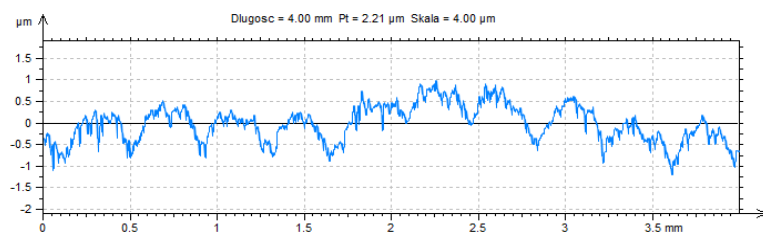
b)



c)



d)



Rys. 3.4. Profilogramy pierwotne powierzchni wałka obrabiane przez operatora 3 przy posuwie: 0,038 mm/obr (a) 0,052 mm/obr (b) 0,077 mm/obr (c) 0,125 mm/obr (d) [3]

Z zaprezentowanych graficznie wyników pomiarów chropowatości po obróbce nagniataniem zauważono, iż najbardziej wygładzone profile uzyskano przy najmniejszym posuwie (0,038 mm/obr). Obrabione powierzchnie uzyskały najwyższe wzniesienia profilu oraz największe głębokości wgłębień przy posuwie 0,125 mm/obr.

Tabela 3.2. Zestawienie wszystkich wyników pomiarów parametrów chropowatości [3]

Nr doświadczenia	Czynnik II - operator	Czynnik I - posuw	Badane parametry chropowatości		
			Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rc [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
1	1	0,038	0,855	0,321	0,113
			1,04	0,347	0,116
			0,770	0,352	0,109
2		0,052	0,830	0,314	0,109
			0,877	0,336	0,119
3		0,077	0,897	0,339	0,117
			1,12	0,382	0,142
			0,975	0,421	0,151
4		0,125	1,00	0,390	0,139
			1,41	0,608	0,256
			1,59	0,591	0,276
5		2	0,038	1,50	0,563
	0,930			0,329	0,113
	0,860			0,333	0,115
6	0,052		0,910	0,339	0,126
			0,867	0,391	0,125
			0,870	0,367	0,127
7	0,077		1,01	0,374	0,131
			1,02	0,427	0,158
			1,09	0,480	0,168
8	0,125		1,47	0,570	0,178
			1,73	0,682	0,306
			1,54	0,867	0,327
9	3	0,038	1,47	0,712	0,276
			0,772	0,303	0,105
			0,910	0,296	0,111
10		0,052	0,815	0,282	0,103
			0,840	0,354	0,128
			1,02	0,434	0,157
11		0,077	0,800	0,325	0,102
			0,855	0,348	0,131
			1,06	0,399	0,148
12		0,125	1,10	0,483	0,173
			1,22	0,505	0,201
			1,29	0,536	0,242
			1,26	0,535	0,229

Tabela 3.2. c.d. Zestawienie wszystkich wyników pomiarów parametrów chropowatości [3]

Nr doświadczenia	Czynnik II - Operator	Czynnik I - posuw	Badane parametry chropowatości		
			Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	Rda [ $^\circ$ ]
1	1	0,038	0,230	0,970	1,29
			0,239	1,41	1,35
			0,230	0,740	1,36
2		0,052	0,230	0,960	1,31
			0,241	1,07	1,25
			0,240	1,00	1,32
3		0,077	0,290	1,29	1,46
			0,340	1,17	1,46
			0,290	1,15	1,46
4		0,125	0,580	1,52	1,48
			0,631	1,76	1,67
			0,481	2,01	1,66
5	0,038	0,240	1,08	1,29	
		0,240	0,960	1,41	
		0,269	1,10	1,34	
6	0,052	0,270	0,920	1,32	
		0,270	0,990	1,40	
		0,270	1,14	1,40	
7	0,077	0,341	1,12	1,45	
		0,371	1,31	1,43	
		0,388	1,81	1,44	
8	0,125	0,712	2,10	1,47	
		0,780	1,65	1,54	
		0,650	1,64	1,53	
9	0,038	0,211	0,870	1,24	
		0,229	0,940	1,25	
		0,201	0,910	1,22	
10	0,052	0,280	0,990	1,23	
		0,331	0,970	1,41	
		0,219	0,990	1,29	
11	0,077	0,270	0,990	1,38	
		0,301	1,11	1,35	
		0,381	1,23	1,38	
12	0,125	0,430	1,30	1,40	
		0,569	1,61	1,41	
		0,511	1,37	1,46	

Parametry pionowe Rz oraz Rc osiągnęły największą wartość przy posuwie  $f$  równym 0,125 mm/obr, a najmniejszą dla posuwu 0,038 mm/obr. Pionowy parametr amplitudowy (Ra), wyznaczający wartość średnią rzędnych, ukazał najniższą wartość przy posuwie  $f$  wynoszącym 0,052 mm/obr, z kolei największą przy maksymalnej wartości posuwu 0,125 mm/obr. Minimalne wartości parametrów chropowatości Rdc, Rda i Rmax odnotowano przy posuwie 0,038 mm/obr, natomiast największe wartości tych parametrów dla  $f$  równego 0,125 mm/obr. Największymi wysokościami profilu chropowatości charakteryzowała się powierzchnia wałka obrobionego przez operatora 2, gdzie średnia wartość parametru Rz wynosiła 1,15  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.2. Analiza wyników badań według programu statycznego randomizowanego kompletnie

Ocena istotności wpływu przy użyciu programu statycznego randomizowanego kompletnie została zrealizowana dla dwóch czynników wejściowych oddzielnie. Pierwszy analizie poddano posuw  $f$ . Wyniki pomiarów parametru  $R_a$  zostały przedstawione w tab. 3.3 według matrycy planowania programu statycznego randomizowanego kompletnie dla posuwu  $f$  w przyjętym zakresie zmienności, sile docisku  $P = 550$  N oraz prędkości obrotowej  $n = 315$  obr/min. Według hipotezy zerowej, należało założyć, iż czynnik wejściowy posuw  $f$  nie wpływa istotnie na parametr wynikowy chropowatości  $R_a$ . W celu potwierdzenia, bądź odrzucenia założonej hipotezy dokonano obliczeń testowych statystyki  $F_t$  i porównano ją do wartości krytycznej, określonej z tablicy Fishera-Snedecora ( $\alpha = 0,05$ ).

Tabela 3.3. Wyniki pomiarów wartości parametru  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] [3]

Czynnik wejściowy zmienny: posuw $f$ [mm/obr]	Nr doświadczenia			$\overline{Ra}_i$
	1	2	3	
0,038	0,113	0,116	0,109	0,113
0,052	0,109	0,119	0,117	0,115
0,077	0,142	0,151	0,139	0,144
0,125	0,256	0,276	0,223	0,252
Średnia wszystkich doświadczeń $\overline{Ra}$				0,156

Po dokonaniu obliczeń wartość empiryczna współczynnika  $F_t$  wyniosła 64,62 i przekroczyła wartość krytyczną  $F_{kr} = 4,066$ . Świadczy to zatem o konieczności odrzucenia hipotezy zerowej. Czynnik wejściowy posuw  $f$  w analizowanym zakresie zmienności wpływa istotnie na parametr chropowatości powierzchni  $R_a$  po obróbce nagniataniem.

Następnie analizie według programu statycznego randomizowanego kompletnie poddano operatorów. Wyniki pomiarów parametru  $R_a$  zostały przedstawione w tab. 3.4 według matrycy planowania programu statycznego randomizowanego kompletnie dla trzech operatorów i posuwu 0,077 mm/obr, siły docisku 550 N oraz prędkości obrotowej 315 obr/min.



Tabela 3.4. Wyniki pomiarów wartości parametru Ra [ $\mu\text{m}$ ] [3]

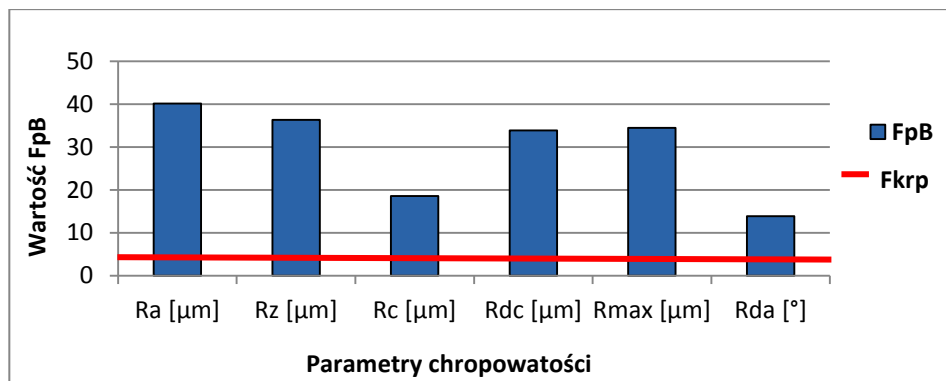
Czynnik wejściowy zmienny: operator	Nr doświadczenia			$\overline{Ra}_i$
	1	2	3	
I	0,142	0,151	0,139	0,144
II	0,158	0,168	0,178	0,168
III	0,131	0,148	0,173	0,151
Średnia wszystkich doświadczeń $\overline{Ra}$				0,154

Obliczona wartość testowa wyniosła  $F_t = 2,359$  i jest mniejsza od wartości krytycznej ( $2,359 < 5,143$ ). Niezależnie który operator (1 - 3) dokonywał obróbki nagniataniem, nie wpływał on w sposób istotny na parametr chropowatości powierzchni Ra uzyskany po przeprowadzonej obróbce.

### 3.3.3. Analiza wyników badań według programu statycznego randomizowanego blokowo z jednokrotnym powtórzeniem doświadczenia

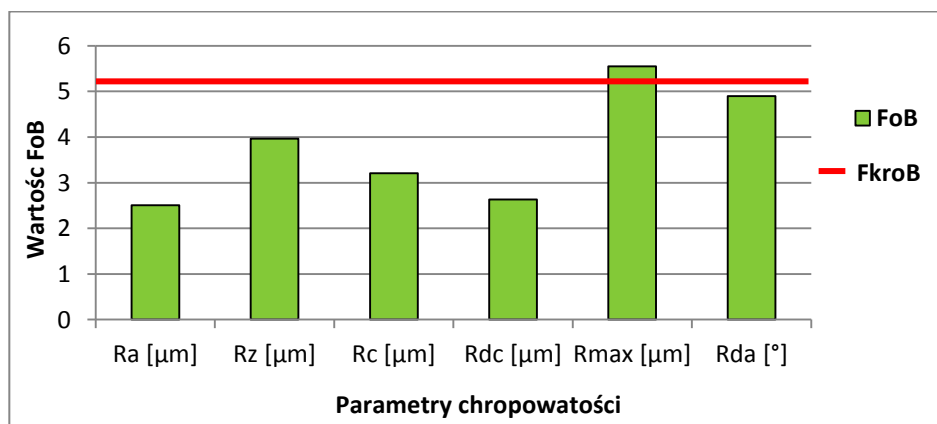
W trakcie realizacji programu statycznego randomizowanego blokowo z jednokrotnym powtórzeniem doświadczenia badaniom podlegały dwa wejściowe czynniki jednocześnie. Posuw  $f$  zmieniał się na czterech poziomach zmienności: 0,038; 0,052; 0,077; 0,125 [mm/obr], z kolei operatorzy stanowili drugi czynnik wejściowy. Dla każdego zestawu czynników wejściowych realizowany był tylko jeden pomiar. Niezmiennie parametrami stałymi w przeprowadzonym procesie była prędkość obrotowa równa 315 obr/min oraz siła docisku wynosząca 550 N.

W celu weryfikacji hipotezy zerowej dokonano obliczeń wartości testowych współczynnika  $F_t$  badanych czynników wejściowych. Obliczone wartości ( $F_{p_B}$  dla posuwu,  $F_{o_B}$  dla operatora) porównano z wartościami krytycznymi  $F_{kr_B}$  określonymi zgodnie z rozkładem  $F$  Fishera-Snedecora. Na rys. 3.5 oraz 3.6 zaprezentowano graficznie wartości testowe  $F_t$  odnoszące się do poszczególnych parametrów chropowatości na tle wartości krytycznych analizowanych zmiennych wejściowych - posuw ( $F_{p_B}$ ), operator ( $F_{o_B}$ ).



Rys. 3.5. Wartości testowe wybranych parametrów chropowatości powierzchni dla zmiennego posuwu wg metody z jednokrotnym powtórzeniem badań [3]

Na podstawie zestawionych wyników analizy wpływu posuwu na chropowatość powierzchni nagniatanej należy stwierdzić, że zmienna wejściowa – posuw istotnie wpływa na wszystkie analizowane parametry chropowatości. Wartości testowe tych parametrów ( $R_a = 40,095 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 36,346 \mu\text{m}$ ;  $R_c = 18,527 \mu\text{m}$ ;  $R_{dc} = 33,844 \mu\text{m}$ ;  $R_{max} = 34,433 \mu\text{m}$ ;  $R_{da} = 13,857^\circ$ ) przekraczają wartość krytyczną  $F_{krP_W} = 4,757$ .



Rys. 3.6. Wartości testowe wybranych parametrów chropowatości powierzchni dla zmiennych operatorów wg metody z jednokrotnym powtórzeniem badań [3]

Badając wpływ operatorów na parametry chropowatości według programu statycznego randomizowanego blokowo z jednokrotnym powtórzeniem badań wykazano, że mają oni istotny wpływ wyłącznie na parametr  $R_{max}$ , gdyż  $F_{O_B} > F_{krO_B}$  ( $5,552 > 5,143$ ).

### 3.4. Wnioski

Badania eksperymentalne przeprowadzone przy użyciu wałków wykonanych ze stali X46Cr13, mające na celu ustalenie istotności wpływu parametru technologicznego – posuwu, występującego na czterech poziomach zmienności (0,038; 0,052; 0,077; 0,125 [mm/obr]) i czynnika ludzkiego (trzech operatorów) na wybrane parametry chropowatości powierzchni dowiodły, że zgodnie z programem statycznym randomizowanym kompletnie wzrost posuwu  $f$  występującego w badanym zakresie zmienności wpływa istotnie a zmiana operatorów realizujących analizowany proces obróbki wpływa nieistotnie na analizowany parametr  $R_a$ . Według programu statycznego randomizowanego blokowo z jednokrotnym powtórzeniem wyników badań posuw  $f$  wpływa istotnie na wszystkie z analizowanych parametrów wynikowych. W przypadku operatorów dokonujących procesu nagniatania, według programu bez uwzględnienia skutków interakcji, wywierają oni istotny wpływ wyłącznie na parametr  $R_{max}$ .

Zastosowanie wybranych metod do oceny istotności wpływu pozwala sprawdzić czy praca operatora jest standardowa czy też wpływa negatywnie na uzyskiwane wyniki. Programy randomizowane sprawdzają się również w przypadku eliminacji wielkości nieistotnych, gdyż nie wszystkie czynniki wejściowe oddziałują w stopniu jednakowym na czynnik wynikowy.

### Literatura do rozdziału 3.

- [1] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu – planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych, WNT, Warszawa 2006.
- [2] Kukielka L., Kułakowska A.: Problematyka przygotowania powierzchni w procesie toczenia w aspekcie jakości technologicznej wyrobu nagniatanego, Czasopismo Pomiar, Automatyka, Kontrola nr 7/2008.
- [3] Kwiecień A.: Ocena istotności wpływu parametru technologicznego i czynnika ludzkiego w procesie nagniatania stali X46Cr13, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.
- [4] Obora H.: Metoda analizy błędów pracownika w układzie ergonomicznym HRA, Zeszyty Naukowe nr 648 Akademii Ekonomicznej w Krakowie, 2004.
- [5] Pająk E., Wieczorowski K.: Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach, PWN, Warszawa – Poznań 1982.
- [6] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem, WNT, Warszawa 1987.
- [7] Szmigiel Cz. Mercik J.: Ekonometria, WSZiF, Wrocław 2000.
- [8] PN – ISO 4287: Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, Polski Komitet Organizacyjny, listopad 1999.

**Kamil MROZOWSKI**  
**Sławomir ŚWIRAD**

## **4. OBRÓBKA GŁADKOŚCIOWA STALI X37CrMoV51 Z WYKORZYSTANIEM NARZĘDZI HYDROSTATYCZNYCH**

### **4.1. Wprowadzenie**

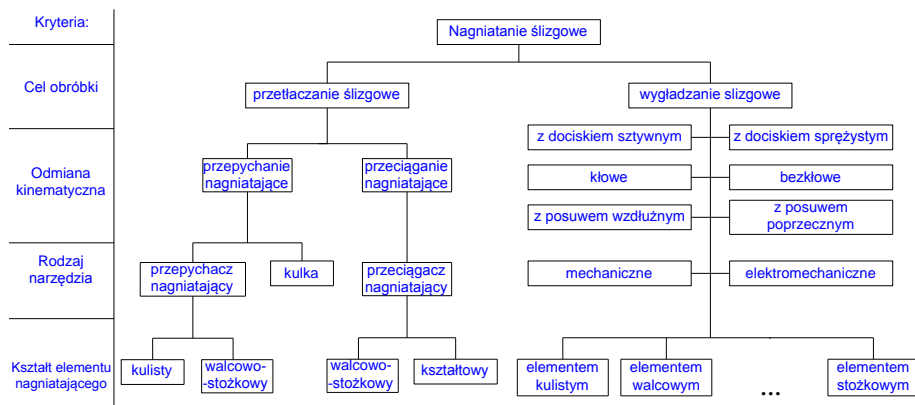
Jednym z ważniejszych problemów współczesnej technologii jest stosunek jakości do kosztów produkcji wytwarzanych wyrobów przy zachowaniu możliwie wysokiej wydajności. Jakość i koszt produkcji wyrobu są od siebie uzależnione, co ma wpływ na doskonałość konstrukcji, jakość i rodzaj stosowanych materiałów oraz procesu technologicznego. Zastosowanie obróbki wykończeniowej korzystnie wpływa na własności warstwy wierzchniej.

Obróbka nagniataniem jest jedną z metod obróbki wykończeniowej, podczas której na powierzchni obrabianego materiału zachodzą odkształcenia plastyczne na zimno. Powierzchnia po obróbce nagniataniem charakteryzuje się mniejszą chropowatością, w obszarze nagniatania zachodzi również umocnienie materiału, co również korzystnie wpływa na trwałość wyrobu. Stosując optymalne narzędzia do procesu nagniatania można zwiększyć dokładność wymiarowo – kształtową obrabianych części. Obróbka nagniataniem umożliwia również zmniejszenie kosztów produkcji poprzez częściową lub całkowitą eliminację droższych i bardziej czasochłonnych operacji wykończeniowych tj.: szlifowania, polerowania.

#### **4.1.1. Metody statyczne procesu nagniatania**

Rysunek 4.1 przedstawia metody nagniatania ślizgowego, które należą do grupy naporowo statycznych, charakteryzujących się celowym poślizgiem występującym podczas obróbki pomiędzy powierzchnią obrabianą, a narzędziem nagniatającym. Podczas obróbki nagniatania ślizgowego gładkie i twarde narzędzie nagniatające dociskane jest do powierzchni z zadaną siłą, a na skutek ruchu względnego przesuwa się po niej, w efekcie czego powstaje tarcie ślizgowe w strefie nagniatania. Powierzchnia staje się bardziej wygładzona, a własności warstwy wierzchniej zmieniają się na korzystniejsze po przejściu

narzędzia nagniatającego. Większe dokładności wymiarowe uzyskuje się po zastosowaniu docisku sztywnego podczas nagniatania ślizgowego. Wyróżniamy dwie grupy nagniatania: wygładzanie ślizgowe i przetłaczanie ślizgowe [8, 15].



Rys. 4.1. Obróbka nagniataniem naporowo ślizgowym (opracowanie własne na podstawie [16])

Wygładzanie ślizgowe stosuje się do obróbki wałków, płaszczyzn, otworów oraz powierzchni kształtowych, których twardość wynosi 60 – 65 HRC. Elementy nagniatające w tej metodzie charakteryzują się dużą twardością i niewielkim współczynnikiem tarcia. Produkuje się je z diamentu syntetycznego, korundu, diamentów naturalnych i węglików spiekanych [10].

#### 4.1.2. Metody dynamiczne procesu nagniatania

Nagniatanie dynamiczne stosuje się przede wszystkim do umocnienia warstwy wierzchniej części maszyn, które pracują przy obciążeniu zmiennym. Cechą odróżniającą metody dynamiczne od statycznych jest sposób wywierania siły na powierzchnię nagniatanego materiału. W metodach dynamicznych siła docisku do nagniatanej powierzchni jest zmienna ze względu na charakter kontaktu elementu nagniatającego z przedmiotem obrabianym. Element nagniatający okresowo uderza o powierzchnię nagniataną. Energia kinetyczna zamieniana jest w energię odkształcenia plastycznego. W metodach dynamicznych tj.: kulowanie, śrutowanie, młotkowanie narzędzia nagniatające nie mają ciągłego styku z powierzchnią obrabianą, w wyniku czego powstałe ślady pracy narzędzia usytuowane są w oddzielnych względem siebie obszarach. Narzędzia nagniatające charakteryzują się losowym rozkładem odcisków części nagniatających np.: kulek. Losowość ta wpływa na nierównomierne mikro-odkształcenia powierzchni i rozkład odkształceń. Dlatego wymagane jest, aby sumaryczna powierzchnia śladów nagniatania była przynajmniej taka sama jak powierzchnia

obrabiana. Głębokość zgniotu reguluje się poprzez ilość uderzeń na jednostkę powierzchni.

Swobodna kinematyka metod dynamicznych negatywnie wpływa na geometrię nagniatanych przedmiotów co skutkuje:

- uzyskaniem znacznie większej różnorodności warstwy wierzchniej w porównaniu z metodami statycznymi,
- zmniejszeniem gładkości powierzchni po nagniataniu,
- brakiem opcji zmniejszenia błędów geometrycznych, wyjątek stanowi zmiana chropowatości,
- uszkodzeniem powierzchni poprzez oderwanie się elementów roboczych podczas kulkowania czy śrutowania.

Do zalet nagniatania dynamicznego w stosunku do statycznego można zaliczyć:

- szybsze oddawanie ciepła ze strefy obróbki,
- brak ciągłej fali materiału przed narzędziem dzięki przerywanemu kontaktowi narzędzia z przedmiotem,
- siły nagniatania są mniejsze,
- zastosowanie do nagniatania powierzchni kształtowych nieobrotowych [1, 16].

#### **4.1.3. Metoda nagniatania hydrostatycznego**

Narzędzia hydrostatyczne stosowane są do dogniatania gładkościowego i umacniającego dowolnych powierzchni. Narzędzia te można stosować w maszynach konwencjonalnych, jak i sterowanych numerycznie maszynach CNC. Twardość obrabianego materiału może wynosić do 65 HRC. Głównym elementem nagniatającym narzędzia jest kulka dogniatająca wykonana ze spieków ceramicznych [2].

Kulka dogniatająca może obracać się w dowolnym kierunku z dużymi prędkościami podczas obróbki dzięki zjawisku łożyskowania hydrostatycznego. Zjawisko to polega na wypływności sprężonej cieczy pomiędzy kulką a oprawką, tworząc cienką warstwę cieczy, która zapobiega zatarciu kulki oraz umożliwia jej swobodne obracanie się. Ciśnienie wywierane przez ciecz utrzymuje stałą siłę docisku kulki do powierzchni obrabianej [2].

Dogniatanie umacniające polega na mechanicznej obróbce warstwy wierzchniej, w wyniku czego zwiększa się ich wytrzymałość na działanie naprężeń dynamicznych. Obróbka ta najczęściej stosowana jest na detale obrotowe – symetryczne, a dzięki nowej technologii można ją zastosować do obróbki dowolnych powierzchni oraz detali cienkościennych.

Dogniatanie umacniające znacząco zwiększa wytrzymałość zmęczeniową i czas pracy obrabianych elementów. W wyniku dogniatania w warstwie wierzchniej powstają naprężenia wewnętrzne ściskające. Powierzchnia zostaje wygładzona poprzez zmniejszenie nierówności powierzchni. Warstwa wierzchni-

nia materiału ulega umocnieniu poprzez zgniot, natomiast stopień umocnienia zależy od struktury materiału [3, 5].

Technologia dogniatania umacniającego polega na dociśnięciu do powierzchni obrabianej jednej lub kilku rolek lub kulek z taką siłą, aby nacisk na powierzchni styku przekroczył granicę plastyczności obrabianego materiału. Powierzchnia materiału w wyniku tak dużego oddziaływania uplastycznia się i zmienia się jej kształt. Według rozkładu Hertza największy nacisk występuje tuż pod powierzchnią, a wewnątrz materiału jego wartość spada niemal do zera. Z rozkładu wynika, że wewnątrz materiału zachodzą wyłącznie naprężenia sprężyste, gdy warstwa wierzchnia poddawana jest odkształceniom plastycznym. Wywołuje to wewnętrzne własne naprężenia ściskające o rozkładzie minimum na powierzchni lub tuż pod materiałem [14].

Podczas dogniatania największe obciążenia występują na wierzchołkach nierówności obrabianego detalu. W wyniku nacisku, wierzchołki są wciskane w materiał, który uplastycznia się i „płyynie” wypełniając zagłębienia i tym samym podnosząc ich poziom. Wymiary detali po dogniataniu ulegają zmianie, dlatego na etapie obróbki wstępnej należy założyć odpowiednie naddatki. Deformacja plastyczna nagniatanej powierzchni zachodzi poniżej temperatury rekrytalizacji w wyniku tej zależności zachodzi proces utwardzania poprzez zgniot. Wprowadza to zaburzenia siatki krystalicznej materiału, zwiększa się gęstość, która wpływa na wzrost wytrzymałości powierzchni oraz niweluje powstawanie pęknięć [12].

Proces dogniatania umacniającego nie różni się pod względem kinematycznym od toczenia czy frezowania. Proces ten może się odbywać na kilka sposobów:

- z posuwem wglębnym dla małych promieni,
- z posuwem poprzecznym,
- z posuwem złożonym z zastosowaniem opcji wierszowania dla dowolnych powierzchni.

Ze względu na mało skomplikowaną kinematykę procesu, obróbkę tą metodą można stosować na obrabiarkach konwencjonalnych, bezpośrednio po obróbce skrawaniem bez zmiany zamocowania detalu, co zwiększa dokładność obróbki i zaoszczędza czas. Narzędzia hydrostatyczne do dogniatania umacniającego stosuje się również na tokarkach i frezarkach sterowanych numerycznie [2].

Obróbkę narzędziami hydrostatycznymi można stosować do umacniania powierzchni obrotowo – symetrycznych oraz płaskich i zakrzywionych płaszczyn. Narzędzie przesuwają się po powierzchni detalu po najlepiej dobranych ścieżkach dla danego materiału np.: po spirali lub bokach zagnieżdżonych prostokątów. Łożyskowanie hydrostatyczne zapewnia kulce nagniatającej ruch we

wszystkich kierunkach, zmiana kierunku ruchu może być realizowana pod pełnym obciążeniem kulki.

Ciśnienie cieczy w łożysku hydrostatycznym jest najważniejszym parametrem podczas procesu nagniatania. Kulka nagniatająca powinna być dociskana z jednakową siłą podczas trwania obróbki. Pomiar siły w narzędziach mechanicznych określa się na podstawie ugięcia sprężyny, które jest mierzone przez czujnik zegarowy lub sensor ruchu. W narzędziach hydrostatycznych siła nagniatania jest określana na podstawie pomiaru ciśnienia cieczy mierzonej manometrem [17].

#### 4.1.4. Łożyskowanie hydrostatyczne

Zastosowanie łożyskowania hydrostatycznego oraz kulek ceramicznych umożliwiło zwiększenie wydajności procesu nagniatania. Wartość siły docisku kulki do powierzchni obrabianej przedmiotu reguluje się poprzez odpowiednie ustawienie ciśnienia na agregacie hydraulicznym.

Najczęściej stosowanymi materiałami do produkcji kulek ceramicznych są:

- tlenek glinu  $Al_2O_3$ , twardość 80 HRC,
- azotek krzemu  $Si_3N_4$ , twardość 75-80 HRC,
- tlenek cyrkonu  $ZrO_2$ , twardość 70 HRC.

W skład narzędzia wchodzi element nagniatający w postaci kulki lub rolki. Z wykorzystaniem narzędzia można nagniatć powierzchnie stalowych elementów o twardości powyżej 40 HRC. Podczas nagniatania materiałów o twardości poniżej 40 HRC, zwiększając siłę docisku narzędzia materiał odkształca się plastycznie, ale również nadmiar materiału przemieszcza się przed elementem nagniatającym wypełniając nierówności. Natomiast podczas nagniatania materiałów twardych (<40 HRC) płynięcie materiału jest ograniczone, a największe obciążenia przenoszone są przez wierzchołki nierówności obrabianej powierzchni. Proces nagniatania twardych stali polega na wywieraniu dużych nacisków powierzchniowych na wierzchołki nierówności. Duże obciążenie wierzchołków powoduje poślizg materiału na zboczach wypełniając zagłębienia. Duże naciski powodują łamanie się ostrych wierzchołków mikro nierówności, co również wpływa na zmniejszenie chropowatości. Duże naciski powierzchniowe i proces tarcia wpływają również na stan powierzchni kulki nagniatającej. W efekcie wszystkie powstałe wady powierzchniowe na kulce są kopiowane na powierzchnie obrabiane w dalszym procesie nagniatania [4]. W łożysku hydrostatycznym podczas procesu nagniatania pomiędzy kulką a oprawką utrzymywana jest cienka warstwa filmu olejowego, który umożliwia swobodne obracanie się kulki oraz zapobiega jej zatarciu. Rozkład naprężeń powstający w kulce ceramicznej podczas nagniatania wynika z równoważenia się siły nacisku i ciśnienia podawanego oleju. Wypadkowe naprężenia działające w przeciwnym kierunku powstają pomiędzy kulką, a materiałem obrabianym



i to one mają główny wpływ na uszkodzenia kulki. Wzrost siły wypadkowej na poszczególnych wierzchołkach może spowodować przekroczenie lokalnych naprężeń krytycznych, które mogą uszkodzić powierzchnię kulki. Na powierzchni kulki mogą się pojawić przetarcia, wykruszenia oraz pęknięcia. Warstwa filmu olejowego ściśle jest związana z luzem między kulką a oprawką. W wyniku powstających dynamicznych sił działających na kulkę kulka może się przemieszczać w granicach luzu pomimo utrzymywanego filmu olejowego. Taka sytuacja może występować przy dynamicznym wejściu kulki w stal lub gwałtownym wzroście twardości warstwy wierzchniej [4, 13].

## 4.2. Metodyka badań

### 4.2.1. Materiał i próbka

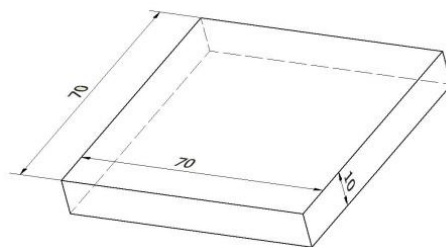
Przeprowadzone badania wpływu nagniatania głowicą hydrostatyczną na właściwości warstwy wierzchniej przeprowadzono dla stali narzędziowej X37CrMoV51. Jest to stal przeznaczona do pracy na gorąco charakteryzująca się bardzo dobrymi właściwościami żarowytrzymałościowymi, wysoką odpornością na ścieranie pod wpływem ciepła oraz dobrą przewodnością cieplną. Twardość robocza materiału wynosiła 50 – 54 HRC.

Ze stali tej produkowane są: matryce kuźnicze, formy ciśnieniowe, wytłaczarki ślimakowe, uzbrojenia, noże do nożyc do cięcia na gorąco, cylindry i ślimaki do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych, narzędzia do obróbki plastycznej pracujące przy wysokim ciśnieniu wewnętrznym. Skład chemiczny stali przedstawiono w tab. 4.1.

Tabela 4.1. Skład chemiczny stali X37CrMoV51, wg PN – EN ISO 4957:2002U [17]

<i>Skład chemiczny [%]</i>							
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
0,33-0,41	0,8-1,2	0,25-0,5	0,03	0,02	4,8-5,5	1,1-1,5	0,3-0,5

Do nagniatania hydrostatycznego wykorzystano płaskie próbki przedstawione na rys. 4.2. Próbkę przed procesem nagniatania poddane zostały obróbce szlifowaniem, po której uzyskano chropowatość  $S_a \approx 0,4 \mu\text{m}$ . Rysunek 4.3 przedstawia stanowisko, na którym przeprowadzono obróbkę próbek.



Rys. 4.2. Rysunek poglądowy próbki [11]



Rys. 4.3. Stanowisko do nagniatania [11]

#### 4.2.2. Metodyka badań według planu Hartley'a PS/DS-P:Ha<sub>3</sub>

Eksperyment i obliczenia przeprowadzono zgodnie z planem statystycznym zdeterminowanym, sekwencyjnym, poliselekcyjnym Hartley'a. Jest to zalecany plan do realizacji doświadczeń w dziedzinie technologii maszyn [7]. Budowa planów wynika z zależności od odległości i usytuowania punktów doświadczalnych (w przestrzeni czynników wejściowych) względem punktu centralnego (zerowego). Rozróżnia się dwa typy planów Hartley'a zbudowane na hiperkuli i hipersześcianie. Plany budowane na hipersześcianie wymagają przeprowadzenia doświadczeń tylko na trzech równo odległych od siebie poziomach zmienności czynników wejściowych. W planie tym model matematyczny jest wielomianem drugiego stopnia w którego skład wchodzi trzy bloki doświadczeń [7]:

- powtórzenie ułamkowe doświadczenia typu PS/DK2<sup>n</sup>,
- doświadczenia w punktach gwiazdnych o ramieniu  $\alpha = 1$ ,
- doświadczenie w punkcie centralnym planu.

Matryca planu Hartley'a dla trzech czynników wejściowych przedstawiona została w tab. 4.2.

Tabela 4.2. Matryca planu Hartley'a PS/DS – P:Ha<sub>3</sub> (opracowanie własne na podstawie [7])

Lp.	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	$\bar{y}_i$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
2	+	-	-	+	+	+	-	-	+	
3	-	+	-	+	+	+	-	+	-	
4	-	-	+	+	+	+	+	-	-	
5	+	0	0	+	0	0	0	0	0	
6	-	0	0	+	0	0	0	0	0	
7	0	+	0	0	+	0	0	0	0	
8	0	-	0	0	+	0	0	0	0	
9	0	0	+	0	0	+	0	0	0	
10	0	0	-	0	0	+	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Model matematyczny obiektu zbudowany na podstawie wyników badań wielkości wyjściowej.

- model matematyczny drugiego stopnia o ogólnej postaci:

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (4.1)$$

- model matematyczny drugiego stopnia dla trzech czynników wejściowych:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (4.2)$$

Ocena adekwatności równania regresji według testu Fishera – Snedecora:

- obliczenie wariancji adekwatności:

$$S_{ad}^2 = \frac{r_i \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1} \quad (4.3)$$

gdzie:  $k$  – liczba wyrazów równania regresji, bez wyrazu wolnego po odrzuceniu wyrazów nieistotnych,  $\bar{y}_i$  – średnia wartość czynnika wynikowego z pomiarów równoległych w  $i$ -tym doświadczeniu,  $\hat{y}_i$  – wartość obliczona z równania regresji dla poziomów czynników wejściowych i wyjściowych  $i$  – tego doświadczenia,

- określenie krytycznej wartości współczynnika  $F_t$  (z tablicy Fishera-Snedecora):  $F_{kr} = F_{(\alpha; f_i; f_m)}$

Jeżeli  $F_t < F_{kr}$ , to równanie regresji należy uznać za adekwatne na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Powyższy tok obliczeń wykonano dla każdego z badanych parametrów wyjściowych, otrzymując zależności przedstawione w formie wielomianów drugiego stopnia, które obrazują wpływ parametrów wejściowych procesu nagniatania hydrostatycznego na wartość badanego czynnika.

### 4.3. Wyniki badań

Parametry obróbki i ich zakres dobrano na podstawie analizy profili z badań wstępnych prowadzonych w szerokim zakresie zmienności. Analiza polegała na wybraniu parametrów wejściowych obróbki, przy których uzyskano najlepsze wyniki pomiarów parametrów chropowatości z punktu widzenia wygładzenia powierzchni. W celu opisu zachodzących zależności między parametrami wejściowymi procesu nagniatania a wybranymi parametrami topografii powierzchni zastosowano plan PS/DS – P:Ha<sub>3</sub>. Wybrane parametry obróbki przedstawiono w tab. 4.3 i 4.4.

Tabela 4.3. Parametry nagniatania [11]

Parametr	Wartości		
Ciśnienie $p$ [MPa]	10	15	20
Posuw $f_{wf}$ [mm/min]	1000	2000	3000
Skok wierszowania $f_{wn}$ [mm]	0,04	0,06	0,08

Wybrane wyniki pomiarów: mapa warstwicowa, widok powierzchni, profile chropowatości i wartości parametrów chropowatości, przedstawiono w tab. 4.5 i 4.6.

Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości zawarto w tab. 4.7. Dla wyników przedstawionych w tab. 4.7 przeprowadzono obliczenia zgodne z metodyką przedstawioną w podrozdz. 4.2.2, a rezultaty przedstawiono w tab. 4.8-4.10.

Tabela 4.4. Parametry obróbki według matrycy planu [11]

Lp.	$x_1 - p$ [MPa]	$x_2 - f_{wf}$ [mm/min]	$x_3 - f_{wn}$ [mm]
1	20	3000	0,08
2	20	1000	0,04
3	10	3000	0,04
4	10	1000	0,08
5	20	2000	0,06
6	10	2000	0,06
7	15	3000	0,06
8	15	1000	0,06
9	15	2000	0,08
10	15	2000	0,04
11	15	2000	0,06

Tabela 4.5. Pomiar dla parametrów:  $p = 20$  [MPa],  $f_{wf} = 2000$  [mm/min],  $f_{wn} = 0,06$  [mm] [11]

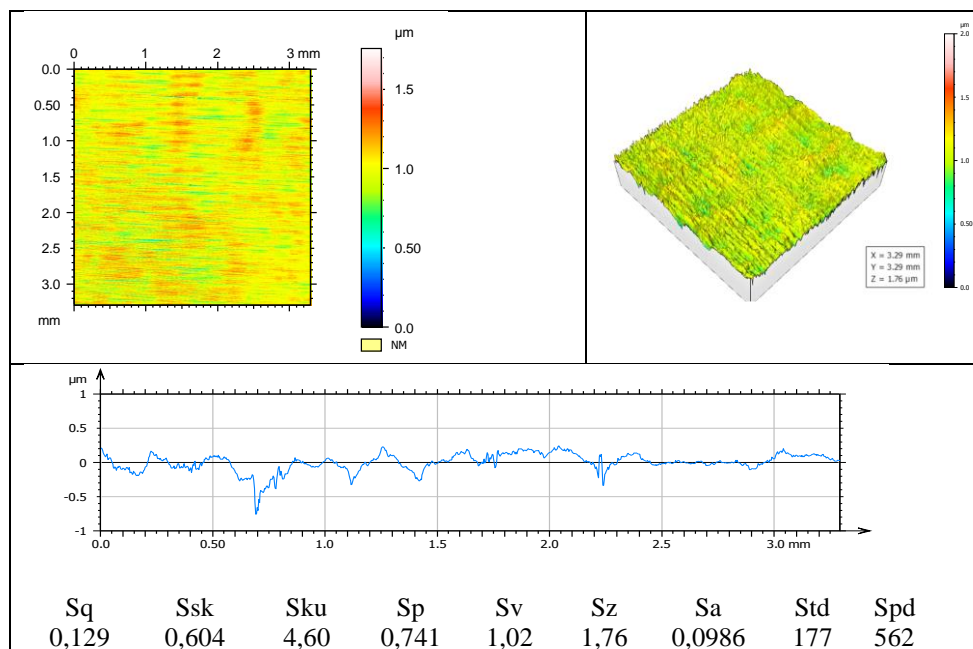


Tabela 4.6. Pomiar dla parametrów:  $p = 10$  [MPa],  $f_{wf} = 3000$  [mm/min],  $f_{wn} = 0,04$  [mm] [11]

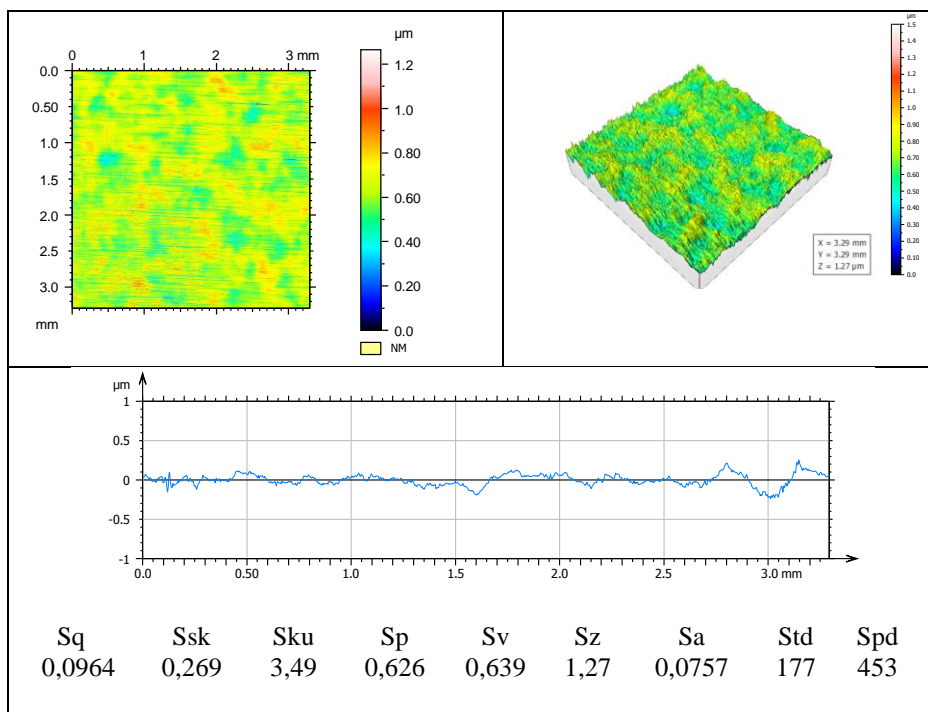


Tabela 4.7. Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości (wartości średnie) [11]

Wariant obróbki wg tab. 5.4.	(Sp)	(Sv)	(Sz)	(Sa)	(Std)	(Sku)
1	0,777	0,659	1,44	0,0803	179	3,7
2	0,525	0,536	1,06	0,0839	177	3,21
3	0,741	1,02	1,76	0,0986	177	4,6
4	0,915	1,28	2,2	0,142	179	4,54
5	0,523	0,622	1,14	0,0862	179	3,39
6	0,791	1,51	2,3	0,113	179	5,34
7	0,643	1,29	1,94	0,0815	179	4,16
8	0,603	0,789	1,39	0,0815	179	3,95
9	0,664	0,895	1,56	0,0946	179	3,99
10	0,626	0,639	1,27	0,0757	177	3,49
11	0,697	1,63	2,32	0,114	0,483	5,73

Tabela 4.8. Wartości współczynników regresji dla poszczególnych równań [11]

Współczynnik	Parametr					
	<i>Sp</i>	<i>Sv</i>	<i>Sz</i>	<i>Sa</i>	<i>Std</i>	<i>Sku</i>
$b_0$	0,6251	1,1921	1,8154	0,0922	124,8248	4,5815
$b_1$	-0,1037	-0,3322	-0,4367	-0,0172	0	-0,6967
$b_2$	0,0197	0,0607	0,0817	-0,0078	0	0,1267
$b_3$	0,0773	0,1065	0,1850	0,0098	1,0000	0,1550
$b_{11}$	0,0525	-0,0131	0,0370	0,0132	23,7521	0,0863
$b_{22}$	0,0185	-0,0396	-0,0180	-0,0049	23,7521	-0,2240
$b_{33}$	0,0405	-0,3124	-0,2683	-0,0012	22,7512	-0,5393
$b_{12}$	0,1065	0,0958	0,2050	0,0100	1,0000	0,1075
$b_{13}$	0,0195	-0,0343	-0,0150	-0,0118	0	0,1375
$b_{23}$	-0,0885	-0,2763	-0,3650	-0,0191	0	-0,5575

Tabela 4.9. Ocena istotności współczynników regresji [11]

Współczynnik	Parametr					
	<i>Sp</i>	<i>Sv</i>	<i>Sz</i>	<i>Sa</i>	<i>Std</i>	<i>Sku</i>
$b_0$	istotny	istotny	istotny	istotny	istotny	istotny
$b_1$	istotny	istotny	istotny	istotny	nieistotny	istotny
$b_2$	nieistotny	istotny	nieistotny	istotny	nieistotny	nieistotny
$b_3$	istotny	istotny	istotny	istotny	nieistotny	nieistotny
$b_{11}$	nieistotny	nieistotny	nieistotny	istotny	istotny	nieistotny
$b_{22}$	nieistotny	nieistotny	nieistotny	nieistotny	istotny	nieistotny
$b_{33}$	nieistotny	istotny	istotny	nieistotny	istotny	istotny
$b_{12}$	istotny	istotny	istotny	istotny	nieistotny	nieistotny
$b_{13}$	nieistotny	nieistotny	nieistotny	istotny	nieistotny	nieistotny
$b_{23}$	istotny	istotny	istotny	istotny	nieistotny	istotny

Równania regresji po odrzuceniu czynników nieistotnych oraz odkodowaniu :

$$Sp = 0.8123 - 0.000054 \times f_{wf} + 12.715 f_{wn} - 0.004425 \times f_{wf} \times f_{wn}$$

$$- 0.006334 \times p + 2.13 \times 10^{-6} \times f_{wf} \times p$$

$$Sv = -2.1469 + 0.0006022 \times f_{wf} + 126.675 \times f_{wn} -$$

$$0.013815 \times f_{wf} \times f_{wn} - 781 \times f_{wn}^2 - 0.010476 \times p + 1.916 \times 10^{-6} \times f_{wf} \times p$$

$$Sz = -0.8046 + 0.00048 \times f_{wf} + 126.24 \times f_{wn} - 0.01825 \times f_{wf} \times f_{wn}$$

$$- 670.75 \times f_{wn}^2 - 0.016934 \times p + 4.1 \times 10^{-6} \times f_{wf} \times p$$

$$Sa = 0.101341 + 0.0000275293f_{wf} + 3.68764f_{wn} - 0.000958822f_{wf}f_{wn} - 0.00162p + 2 \times 10^{-7} f_{wf}p - 0.0118f_{wn}p + 5.28 \times 10^{-6} p^2$$

$$Std = 638.355 - 0.095008f_{wf} + 0.000023752f_{wf}^2 - 6825.3f_{wn} + 56877.5f_{wn}^2 - 2.85024p + 0.0095008p^2$$

$$Sku = -1.5276 + 0.0016725f_{wf} + 217.54f_{wn} - 0.027875f_{wf}f_{wn} - 1348.25f_{wn}^2 - 0.013934p$$

Ocenę adekwatności równań regresji zestawiono w tab. 4.10.

Tabela 4.10. Ocena adekwatności równań regresji [11]

Współczynnik	Parametr					
	$S_p$	$S_v$	$S_z$	$S_a$	$Std$	$Sku$
$S_{ad}^2(y)$	0.03159	0.2368	0.3306	0.00104	3243.49	0.8831
$F_t$	3.27	16.55	2.13	2.07	11.31	3.8
$f_l$	4	6	5	7	3	3
$f_m$	22	22	22	22	22	22
$F_{kr}$	3.57	2.57	2.63	2.42	3.005	3.005
	$F < F_{kr}$	$F < F_{kr}$	$F < F_{kr}$	$F < F_{kr}$	$F < F_{kr}$	$F < F_{kr}$
Adekwatne	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE

#### 4.4. Wnioski

Po przeprowadzeniu procesu nagniatania uzyskano znaczną poprawę jakości powierzchni. Metoda nagniatania hydrostatycznego jest jednym z łatwiejszych sposobów obróbki gładkościowej powierzchni w porównaniu do innych technik nagniatania, ponieważ kulka nagniatająca przemieszcza się swobodnie w wybranych kierunkach. Dużą zaletą jest również możliwość wykorzystania narzędzi hydrostatycznych na obrabiarkach CNC, gdyż umożliwia to dokładniejsze i szybsze przeprowadzenie obróbki. Na frezarkach 3-osiowych oraz 5-osiowych narzędzia hydrostatyczne można wykorzystać do nagniatania powierzchni o nieregularnym kształcie, np.: form wtryskowych.

W wyniku zrealizowanych badań z wykorzystaniem planu Hartley'a PS/DS – P:Ha<sub>3</sub> uzyskano równania regresji dla sześciu wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni. Na podstawie otrzymanych równań można określić teoretyczną wartość parametru chropowatości dla zadanych parametrów wejściowych. Parametry wejściowe, które mogą być stosowane do równań powinny mieścić się w zakresie parametrów wybranych do obliczeń



w planie Hartley'a. Wykorzystując równania regresji do określania parametrów topografii powierzchni oszczędzamy czas, materiał, narzędzia oraz nie zajmujemy niepotrzebnie obrabiarki, która może być obciążona na linii produkcyjnej. W rzeczywistości uzyskanie wymaganej chropowatości zależy od wielu czynników tj.: sztywność układu o–p–n, jakość i struktura materiału, jakość i stan narzędzi nagniatających. Wszelkie mikrouszkodzenia wpływają na uzyskaną jakość powierzchni po procesie nagniatania.

Równania regresji dla parametrów  $S_v$ ,  $Std$ ,  $Sku$ , uznano za nieadekwatne na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , obrazują zatem błędne zależności pomiędzy parametrami wejściowymi procesu nagniatania a uzyskanymi wartościami konkretnego parametru struktury geometrycznej powierzchni. W takiej sytuacji należałoby zastosować inny zakres zmienności parametrów wejściowych lub inny plan badań eksperymentalnych.

#### Literatura do rozdziału 4.

- [1] Andrzejewski M.: Dokładność kształtowa powierzchni przedmiotów ze stali 45 ulepszonej po nagniataniu wibracyjnym, Bydgoszcz, SIMP ATR 1980.
- [2] Ecoroll: Rozwiązania technologiczne prowadzące do poprawy własności warstwy wierzchniej metali, Dogniatanie gładkościowe, Dogniatanie umacniające, Łuszczenie z dogniataniem, opracowanie firmy Ecoroll.
- [3] Górski E.: Obróbka gładkościowa, Warszawa, WNT, 1970.
- [4] Grochała D.: Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC, Szczecin, Rozprawa doktorska, 2011.
- [5] Jezierski J.: Wpływ krzywizny narzędzia dogniatającego na efekt umocnienia powierzchniowego – cz. I, Warszawa, Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 1975.
- [6] Korzyński M.: Doświadczalna optymalizacja technologii, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1991.
- [7] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu – planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych, Warszawa, WNT 2013.
- [8] Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe, Warszawa, WNT, 2007.
- [9] Korzyński M.: Technologia ślizgowego nagniatania diamentowego stali konstrukcyjnych, Mechanik 1980, nr 9.
- [10] Kozłowski M.: Podstawy procesu nagniatania naporowego, Bydgoszcz, ATR 1982.
- [11] Mrozowski K.: Obróbka gładkościowa stali X37CrMoV51 z wykorzystaniem narzędzi hydrostatycznych, praca dyplomowa, Rzeszów 2014.
- [12] Ocoś K. E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2003.
- [13] Osiecki A.: Hydrostatyczny napęd maszyn, Warszawa, WNT, 1998.
- [14] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem, Warszawa, WNT, 1987.
- [15] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem, Warszawa, WNT, 1979.
- [16] Ściborski B.: Wybrane problemy nagniatania tocznego stali twardych ceramiką na tokarce CNC, Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2013.
- [17] Norma stali X37CrMoV51: PN – EN ISO 4957:2004.

**Marek PARANIAK**  
**Barbara CIECIŃSKA**

## **5. ZASTOSOWANIE PLANU PS/DK 2<sup>3</sup> DO OKREŚLENIA WPLYWU PARAMETRÓW TOCZENIA NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI WAŁKA ZE STALI 42CrMo4**

### **5.1. Wprowadzenie**

Stan powierzchni wywiera znaczący wpływ na właściwości eksploatacyjne maszyn i urządzeń. Przykładowo, szczególnie często wymienia się w tym kontekście procesy tarcia i zużywanie się skojarzonych powierzchni toczonej i ślizgowych, odporność na korozję, szczelność połączeń, a także jakość nanoszonych powłok ochronnych (w tym sam proces ich nanoszenia i przyczepność). Struktura geometryczna powierzchni wpływa również w istotny sposób na koncentrację naprężeń i wytrzymałość zmęczeniową części maszyn, ich ewentualne odkształcenia i wytrzymałość stykową oraz na cechy takie jak: właściwości magnetyczne, rezystancja, sposób i charakter wypromieniowywania, odbijania, pochłaniania i przenikania fal świetlnych, elektromagnetycznych, właściwości aero- i hydrodynamiczne [6]. W literaturze można znaleźć przykłady wpływu stanu struktury na właściwości eksploatacyjne – np. zmniejszenie parametru chropowatości Ra z wartości 1,25 do 0,16  $\mu\text{m}$  powoduje zwiększenie odporności na obciążenia dynamiczne o 130% w temp. +20°C, a w temp. -80°C nawet o 210%. Z kolei w przypadku powierzchni trących, zwiększenie Ra z 0,02 do 0,08  $\mu\text{m}$  powoduje prawie dwukrotny wzrost wartości współczynnika tarcia [6].

W kontekście jakości powierzchni oprócz samych parametrów charakteryzujących nierówności ważna jest ich kierunkowość. Przykładowo, przy połączeniu szlifowanego wałka ze szlifowanym otworem stwierdza się większą szczelność, niż w przypadku wałka toczonego i otworu wytaczanego, a jeszcze mniejszą – gdy otwór jest przeciągany [6].

Można zatem wnioskować, że walory użytkowe powierzchni są zależne od specyfiki procesu ich kształtowania (można wówczas różnicować powierzchnie ze względu na charakter i rozkład przestrzenny śladów poobróbkowych).

W takim ujęciu ważne jest, aby konstruktor określił parametry powierzchni, odpowiednie dla późniejszego sposobu eksploatacji powierzchni. Na rysunkach konstrukcyjnych zamieszczane są informacje dotyczące wymaganej chropowatości powierzchni i jej ostatecznego ukształtowania. Zadaniem technologa z kolei jest zaplanowanie przebiegu procesu technologicznego w celu zrealizowania postanowień konstruktora.

## **5.2. Grupy powierzchni w budowie maszyn**

### **5.2.1. Typowe powierzchnie - klasyfikacja**

Walory eksploatacyjne struktury geometrycznej powierzchni bezpośrednio związane są z ich przeznaczeniem konstrukcyjnym. Stąd z uwagi na różnorodność występujących konstrukcji można wyodrębnić wiele struktur. W klasyfikacji przyjęto wyodrębniać typowe grupy powierzchni charakteryzujące się specyficznymi cechami. Powierzchnie można sklasyfikować na stykowe i bezstykowe [6]. Powierzchnie stykowe to powierzchnie elementów będących w kontakcie mechanicznym, tj. ciała stałego z innym ciałem stałym, cieczą lub gazem. Takie powierzchnie występują we wszystkich pasowaniach, styk może być sprężysty, zachodzący między ciałem odkształcalnym a nieodkształcalnym, albo sztywny, kiedy stykają się ze sobą powierzchnie ciał nieodkształcalnych. Powierzchnie bezstykowe nie pozostają w kontakcie z innym ciałem.

Według kryterium występowania obciążenia wyróżniamy powierzchnie obciążone, jeśli występują naprężenia mechaniczne, a jeśli takie nie występują, wówczas mówi się o powierzchniach nieobciążonych, najczęściej są to powierzchnie przeznaczone do malowania, lakierowania, klejenia (nanoszenia powłok).

Wśród grupy powierzchni stykowych obciążonych wymienić można powierzchnie ruchome i nieruchome. O powierzchniach ruchomych mówimy wtedy, gdy zachodzi ruch posuwisty, obrotowy lub obrotowo-posuwisty, natomiast powierzchnie nieruchome mogą występować ze stykiem sprężystym, sztywnym lub elektrostrykowe.

### **5.2.2. Sposoby kształtowania powierzchni**

W celu otrzymania warstwy wierzchniej o potrzebnych właściwościach wykorzystuje się wiele różnych technik wytwarzania, w tym obróbkę powierzchniową. Można wyróżnić tu szereg zróżnicowanych sposobów obróbki, m. in. [1, 5]:

- obróbkę ubytkową – chemiczną (odtłuszczanie, trawienie, polerowanie), skrawaniem (toczenie, frezowanie, wiercenie, przeciąganie), stosowaną w celu usunięcia wad powierzchniowych, będących wynikiem wcześniejszej obróbki, poprawienia właściwości fizykochemicznych i geometrycznych materiału, usu-

nięcia określonej warstwy i ukształtowanie jej wyższej dokładności lub innych cech użytkowych;

- ścierną (polerowanie, gładzenie, dogładzanie) – stosowaną w celu podwyższenia określonych cech – uzyskania dokładniejszego wymiaru, lepszej gładkości, itp.;

- obróbkę bezubytkową (jak nagniatanie w różnych odmianach, obróbka cieplna, jak np. hartowanie) – dającą różne korzyści, jak np. zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej, wzrost twardości, zmianę struktury w warstwie wierzchniej, itp.;

- na drodze nakładania powłok – wyróżnia się także zróżnicowane sposoby, jak np. nasycanie dyfuzyjne, stopowanie, natryskiwanie cieplne, metalizowanie, galwanotechnikę – wówczas oczekiwane są cechy np. poprawa odporności na wilgoć, chemikalia, lepsza odporność na ścieranie.

W innym ujęciu wyróżnia się sześć podstawowych grup metod obróbki: mechaniczne, fizyczne, chemiczne, elektrochemiczne, cieplne, cieplno-chemiczne i cieplno-mechaniczne, w zależności od sposobu oddziaływania na powierzchnię i zróżnicowania czynnika, który na nią oddziałuje. Najnowsze techniki obróbki to niejednokrotnie połączenie tradycyjnych metod, ulepszone i dające znacznie lepsze rezultaty w kształtowaniu pożądanych cech powierzchni.

### **5.3. Eksperymenty oparte o plany badań**

#### **5.3.1. Planowanie eksperymentu**

Realizacja eksperymentu to badanie pewnego zjawiska poprzez doświadczenie, które polega na świadomym jego wywoływaniu bądź jego modyfikacji i obserwacji, co umożliwia poznanie jego podstawowych cech i właściwości. Zebrane informacje pozwalają opracować model zjawiska, który ukazuje jego najważniejsze cechy. Najczęściej wybierany jest model matematyczny, będący charakterystyką zjawiska przedstawioną za pomocą liczb, funkcji, zmiennych itp. Jego znajomość pozwala przewidzieć przebieg określonego zjawiska w odmiennych warunkach [3, 4]. Model matematyczny uzyskuje się dzięki możliwemu zastosowaniu [3]:

- metod analitycznych – analiza przeprowadzana jest z pomocą prostych obiektów badawczych,

- metod biernego eksperymentu – polegających na badaniu określonego zjawiska podczas jego trwania, gdy się zakończy, kolejne obserwacje są uniemożliwione,

- metod czynnego eksperymentu – polegających na wykonaniu badań z daną zmiennością wartości wejściowych oraz obranym tokiem badań.

Wyodrębnia się określone programy badawcze:

- dynamiczne – wówczas wartości czynników wejściowych są wartościami startowymi, następujące po nich dalsze etapy badań zależą od wyników etapów wcześniejszych,
- statyczne – wartości czynników wejściowych znane są przed wykonaniem badań.

Podczas planowania eksperymentu ustala się określoną kolejność czynności, są to kolejno [4]:

- a) charakterystyka badanego obiektu – polega na określeniu zagadnienia, które wymaga rozwiązania poprzez doświadczenia, przyjęciu wielkości charakteryzujących badany obiekt (wielkości wejściowe i wyjściowe, zakłócające oraz stałe), jak również określeniu liczby poziomów zmiennych wejściowych;
- b) określenie celu badań doświadczalnych, mogą nimi być: optymalizacja empiryczna, badania eliminacyjne lub identyfikacja modelu badanego obiektu;
- c) wygenerowanie lub wybór planu eksperymentu, który będzie w jak największym stopniu dopasowany do badanego obiektu i celu doświadczeń;
- d) wykonanie pomiarów – według przyjętego planu doświadczenia;
- e) analiza danych empirycznych – powinna dążyć do osiągnięcia przyjętego celu badań doświadczalnych;
- f) analiza merytoryczna rezultatów badań prowadząca do analitycznej oceny zjawisk powiązanych z obiektem badań,
- g) sformułowanie wniosków z przeprowadzonych badań.

Planowanie eksperymentu i jego metody mają uniwersalny i niezależny charakter. Jest to możliwe poprzez uzyskanie uniwersalnego, przyczynowo-skutkowego modelu obiektu badań. Taki obiekt badań charakteryzują wielkości modelujące:

- wejściowe wielkości niezależne:  $\{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_s\}$ ,  $k=1, 2, \dots, s$ ;
- wyjściowe wielkości zależne:  $\{y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_w\}$ ,  $p=1, 2, \dots, w$ ;
- wielkości stałe  $\{c\}$ , wpływające na funkcjonowanie układu, lecz ich wartości pozostają niezmiennie w czasie, co może skutkować pominięciem ich w analizie;

- wielkości zakłócające {h}, powiązane z oddziaływaniem czynników przypadkowych w obiekcie na wielkości wyjściowe i występowaniem niedoskonałości metod i pomiarów [2, 8].

### **5.3.2. Optymalizacja procesu kształtowania cech powierzchni**

Proces, którego efektem będzie uzyskanie najlepszego rozwiązania określonego problemu, nazywa się optymalizacją. By przeprowadzić badanie optymalizacyjne muszą być spełnione określone kryteria. Warunki procesu mają zapewnić maksymalną wydajność, jakość przy jak najmniejszych kosztach wytwarzania. Przyjmując kryteria optymalizacji w badaniach technologicznych najczęściej wybiera się warunki czysto techniczne, do których zalicza się m.in. wydajność produkcyjną, przewidywaną jakość, ekologiczność, ekonomikę, które można określić dzięki parametrom mierzalnym [2, 3].

Aby optymalizacja była możliwa należy opracować model matematyczny. Wówczas należy:

- opracować możliwie najbardziej szczegółowe zestawienie czynników, które mogą mieć wpływ na dany proces i podzielić je na grupy,
- wyodrębnić obszar badań,
- określić ważność przyjętych czynników wejściowych,
- wyodrębnić poziomy wartości czynników określonych jako stałe;
- zestawić przedziały zmienności czynników wejściowych,
- określić model matematyczny,
- wykonać badania optymalizacyjne na modelu matematycznym,
- ocenić prawidłowość uzyskanych wyników na drodze empirycznej.

Proces tworzenia planów optymalizacyjnych można rozpatrywać z poziomu dwóch sytuacji. Pierwsza ma miejsce w momencie, gdy ekstremum funkcji nie jest ustalone, wtedy to oblicza się je stosując plany sekwencyjne (PS/OS) oraz plany ekstremalne (PS/OE). Gdy ekstremum funkcji jest znane, jako kryterium wykorzystuje się plany adaptacyjne (PS/OA), ich istota sprowadza się do sprawdzenia jak obiekt zachowuje się w danych, optymalnych warunkach [4].

### **5.4. Eksperymentalne określenie wpływu parametrów toczenia na chropowatość powierzchni wałka ze stali 42CrMo4**

W celu określenia charakteru wpływu parametrów toczenia toczono wałek ze stali stopowej 42CrMo4, stosowanej do produkcji wałów, piast, sworzni i innych części maszyn.

Aby ustalić charakter wpływu parametrów toczenia na chropowatość powierzchni, zastosowano plan dwupoziomowy, który jest określany jako kompletny, jeśli przeprowadzone zostały wszystkie ustalone doświadczenia. Oznacza się go symbolem PS/DK  $2^n$ , gdzie n – liczba czynników wejściowych.

Liczbę wszystkich doświadczeń  $N$  przeprowadzonych w planie kompletnym określa się wzorem:

$$N=2^n \quad (5.1)$$

W celu zastosowania planu dwupoziomowego zakodowano czynniki wejściowe, obliczono wartości współczynników regresji oraz opracowano wyniki według schematu [4].

Kodowanie czynników wejściowych odbywa się wg wzoru:

$$x_k = \frac{x_k - x_{k0}}{\Delta x_k} \quad (5.2)$$

gdzie:

$x_k$  - zakodowany  $k$ -ty czynnik wejściowy,

$x_{k0}$  - centralna wartość  $k$ -tego czynnika obliczana za pomocą wzoru:

$$x_{k0} = \frac{x_{k \max} + x_{k \min}}{2} \quad (5.3)$$

a  $\Delta x_k$  – jednostka zmienności  $k$ -tego czynnika wyrażona wzorem:

$$\Delta x_k = \frac{x_{k \max} - x_{k \min}}{2} \quad (5.4)$$

Proces toczenia zrealizowano wg matrycy, podanej w tabeli 6.1.

Na badanym wałku wyznaczono 8 odcinków testowych (rys. 5.1), przeprowadzono obróbkę na każdym odcinku z wykorzystaniem zmiennych parametrów skrawania (wyznaczonych zgodnie z matrycą planu – tab. 5.2). Obróbkę wykonano na tokarce uniwersalnej LZ-360 nożem tokarskim z wymiennymi płytkami (SNMG432-SMR).

Tabela 5.1. Matryca planu PS/DK 2<sup>3</sup> (opracowanie własne na podstawie [3])

Lp.	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Y
1.	+	+	+	1,56
2.	+	+	-	2,73
3.	+	-	+	2,22
4.	+	-	-	2,66
5.	-	+	+	3,38
6.	-	+	-	3,78
7.	-	-	+	3,4
8.	-	-	-	3,04



Rys. 5.1. Odcinki testowe na badanym wałku [7]

Tabela 5.2. Parametry skrawania wyznaczone w eksperymencie [7]

$x_i$	Parametr obróbkowy	Poziom +1	Poziom -1
$x_1$	Prędkość obrotowa [obr/min]	820	410
$x_2$	Posuw [mm/obr]	0,125	0,063
$x_3$	Głębokość skrawania [mm]	1	0,5

Na każdym odcinku testowym wykonano pomiary chropowatości powierzchni, uśrednione wyniki (parametr Ra) zapisywano w kolumnie oznaczonej jako Y w tab. 5.1.

Po zrealizowaniu eksperymentu opracowano wyniki i otrzymano równanie opisujące proces toczenia, zgodnie z zależnością:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (5.5)$$

Współczynniki regresji obliczono stosując wzór:

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ki} \bar{y}_i \quad (5.6)$$

gdzie:

$b_k$  – wartość  $k$ -tego współczynnika regresji,

$x_{ki}$  – poziom zmienności  $k$ -tego parametru wejściowego w  $i$ -tym doświadczeniu z uwzględnieniem znaku czynnika jaki występuje w kolumnie (+1 lub -1),



$\bar{y}_i$  – średnia wartość wejściowego czynnika z pomiarów równoległych w  $i$ -tym doświadczeniu,

$N$  – całkowita liczba eksperymentów wynikająca z matrycy planowania.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  otrzymano jednostki zmienności:

- dla prędkości obrotowej:

$$\Delta x_1 = \frac{n_{max} - n_{min}}{2} = 205 [obr/min] \quad (5.7)$$

- dla posuwu:

$$\Delta x_2 = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} = 0,031 [mm/obr] \quad (5.8)$$

- dla głębokości skrawania:

$$\Delta x_3 = \frac{a_{p max} - a_{p min}}{2} = 0,25 [mm] \quad (5.9)$$

Wyznaczone wartości centralne parametrów wejściowych wyniosły:

- dla prędkości obrotowej:

$$x_{10} = \frac{n_{max} + n_{min}}{2} = 615 [obr/min] \quad (5.10)$$

- dla posuwu:

$$x_{20} = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} = 0,094 [mm/obr] \quad (5.11)$$

- dla głębokości skrawania:

$$x_{30} = \frac{a_{p max} + a_{p min}}{2} = 0,75 [mm] \quad (5.12)$$

Parametry zakodowane miały postać:

- dla prędkości obrotowej:

$$x_1 = \frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} = \frac{n - 615}{205} \quad (5.13)$$

- dla posuwu:

$$x_2 = \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} = \frac{f - 0,094}{0,031} \quad (5.14)$$

- dla głębokości skrawania:

$$x_3 = \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} = \frac{a_p - 0,75}{0,25} \quad (5.15)$$

Oszacowano wartość wariancji błędów pomiarowych (tab. 5.3) z zależności:

$$S^2(y)_i = \frac{\sum_{i=1}^r (y_{ui} - y_i)^2}{r - 1} \quad (5.16)$$

Tabela 5.3. Matryca planu PS/DK 2<sup>3</sup> z wyznaczoną wariancją [7]

Lp.	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	$\bar{y}$	S <sup>2</sup> (y) <sub>i</sub>
1	+	+	+	+	+	+	+	+	1,56	0,0196
2	+	+	+	-	+	-	-	-	2,73	0,0049
3	+	+	-	+	-	+	-	-	2,22	0,0146
4	+	+	-	-	-	-	+	+	2,66	0,0098
5	+	-	+	+	-	-	+	-	3,38	0,0114
6	+	-	+	-	-	+	-	+	3,78	0,0052
7	+	-	-	+	+	-	-	+	3,4	0,0138
8	+	-	-	-	+	+	+	-	3,04	0,0028

Wartości współczynników równania regresji wyniosły:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i} \bar{y}_i = 2,8462 \quad (5.17)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{1i} \bar{y}_i = -0,5537 \quad (5.18)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{2i} \bar{y}_i = 0,01625 \quad (5.19)$$

$$b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{3i} \bar{y}_i = -0,2062 \quad (5.20)$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{12i} \bar{y}_i = -0,1637 \quad (5.21)$$

$$b_{13} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{13i} \bar{y}_i = -0,1962 \quad (5.22)$$

$$b_{23} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{23i} \bar{y}_i = -0,1862 \quad (5.23)$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{123i} \bar{y}_i = -0,00375 \quad (5.24)$$

Wariancja błędów pomiarów:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(y)_i = 0,0103 \quad (5.25)$$

Kolejno przeprowadzono ocenę powtarzalności wyników doświadczeń i obliczono:

- współczynnik G:

$$G = \frac{S^2(y)_{i_{max}}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} = 0,2389 \quad (5.26)$$

- liczbę stopni swobody:

$$f_1 = N = 8 \quad (5.27)$$

$$f_2 = r - 1 = 2 \quad (5.28)$$

- wyznaczono wartość krytyczną współczynnika  $G_{kr}$

$$G_{kr} = G_{\alpha; f_1; f_2} = 0,5157 \quad (5.29)$$

Otrzymana wartość oznacza, że warunki realizacji doświadczenia zostały przeprowadzone na odpowiednim poziomie powtarzalności, ponieważ  $G < G_{kr}$ .

Kolejnym krokiem była ocena istotności współczynników równania regresji.

W tym celu:

- wyznaczono liczbę stopni swobody

$$f = N(r - 1) = 16 \quad (5.30)$$

- określono wartość krytyczną dla współczynnika  $t$  stosując rozkład t-Studenta:

$$t_{kr} = t_{(\alpha; f)} = 2,12 \quad (5.31)$$

- obliczono wartość krytyczną współczynników regresji:

$$b_{kr} = t_{(\alpha; f)} \sqrt{\frac{S^2(y)}{N \cdot r}} = 0,0439 \quad (5.32)$$

Następnie porównano wartość krytyczną z obliczonymi wcześniej współczynnikami równania regresji. Stwierdzono, że:

- $|b_0| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_0$  jest istotny,
- $|b_1| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_1$  jest istotny,
- $|b_2| < b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_2$  jest nieistotny,
- $|b_3| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_3$  jest istotny,
- $|b_{12}| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_{12}$  jest istotny,
- $|b_{13}| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_{13}$  jest istotny,
- $|b_{23}| > b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_{23}$  jest istotny,
- $|b_{123}| < b_{kr}$ , wpływ współczynnika  $b_{123}$  jest nieistotny.

Równanie regresji przyjmuje zatem następującą postać:

$$\hat{y} = 2,8462 - 0,5537x_1 - 0,2062x_3 - 0,1637x_{12} - 0,1962x_{13} - 0,1862x_{23} \quad (5.33)$$

Obliczone wartości  $\hat{y}$  z równania regresji zostały zamieszczone w tab. 5.4.

Tabela 5.4. Matryca planu PS/DK  $2^3$  z wartościami  $\hat{y}$  [7]

Lp.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$\bar{y}$	$S^2(y)_i$	$\hat{y}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	1,56	0,0196	1,5402
2	+	+	+	-	+	-	-	-	2,73	0,00495	2,7174
3	+	+	-	+	-	+	-	-	2,22	0,0146	2,24
4	+	+	-	-	-	-	+	+	2,66	0,0098	2,6724
5	+	-	+	+	-	-	+	-	3,41	0,0114	3,3674
6	+	-	+	-	-	+	-	+	3,78	0,0052	3,7598
7	+	-	-	+	+	-	-	+	3,33	0,0138	3,4124
8	+	-	-	-	+	+	+	-	3,04	0,0028	3,06

Dokonano oceny adekwatności otrzymanego równania:

- obliczono wartości wariancji adekwatności:

$$S_{ad}^2(y) = \frac{r \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - k - 1} = 0,003338 \quad (5.34)$$

- obliczono wartości współczynnika  $F_t$ :

$$F_t = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} = 0,3240 \quad (5.35)$$

- obliczono liczbę stopni swobody dla licznika:

$$f_l = f_1 = N - k - 1 = 2 \quad (5.36)$$

- obliczono liczbę stopni swobody dla mianownika:

$$f_m = f_2 = N(r - 1) = 16 \quad (5.37)$$

- określono krytyczną wartość współczynnika  $F$  za pomocą rozkładu Fishera-Snedecora:

$$F_{kr} = F_{(\alpha; f_l; f_m)} = 3,6337 \quad (5.38)$$

Współczynniki  $F_t$  i  $F_{kr}$  spełniają nierówność  $F_t < F_{kr}$ , dlatego otrzymane równanie regresji można uznać za adekwatne. Dopiero wówczas zasadne jest odkodowanie równania regresji. Dla badanego procesu toczenia po uporządkowaniu ma ono postać:

$$Ra = 4,0799 + 0,00365n - 1,567f - 0,8248a_p - \\ - 2,24fa_p - 0,00079nf - 0,0038na_p \quad (5.39)$$

Minimalną wartością funkcji jest  $Ra = 1,5292$  [ $\mu\text{m}$ ] i uzyskuje się tą wartość dla następujących parametrów toczenia: prędkość obrotowa  $n = 820$  [obr/min], posuw  $f = 0,125$  [mm/obr] i głębokość skrawania  $a_p = 0,5$  [mm].

## 5.5. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie wybranego planu eksperymentu pozwala ograniczyć liczbę wykonywanych prób w celu wyznaczenia równania opisującego proces w wybranym obszarze zmienności parametrów obróbkowych. Oprócz równania, możliwe jest również znalezienie wyników ekstremalnych – najmniejszej i największej chropowatości powierzchni ( $Ra$ ), jakie pojawiały się w eksperymencie. W tym ujęciu najlepszy wynik uzyskano dla próbki 1 dla której wartość

$R_a = 1,56$  [ $\mu\text{m}$ ]. Parametry obróbki to  $n = 820$  [obr/min],  $f = 0,125$  [mm/obr] oraz  $a_p = 1$  [mm]. Zaś dla próbki 6 otrzymano  $R_a = 3,78$  [ $\mu\text{m}$ ] i był to najgorszy wynik, dla którego parametry były następujące  $n = 410$  [obr/min],  $f = 0,125$  [mm/obr] oraz  $a_p = 0,5$  [mm]. Dla innych próbek wartości nieznacznie odbiegały od siebie.

Wykorzystanie planu statycznego dwupoziomowego PS/DK 2<sup>3</sup> z uwzględnieniem skutków interakcji pozwala wyznaczyć racjonalne parametry obróbki dla badanego wału. Ułatwia to dobór parametrów toczenia w kontekście specyfikacji (np. zadanej tolerancji wymiaru), ale także w kontekście opłacalności obróbki (minimalne  $R_a$  nie musi być wymagane).

## **Literatura do rozdziału 5.**

- [1] Blicharski M.: Inżynieria powierzchni, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [2] Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej, WNT, Warszawa 1983.
- [3] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu: planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych, WNT, Warszawa 2006.
- [4] Kukielka L. Podstawy badań inżynierskich, PWN, Warszawa 2002.
- [5] Młynarczyk A., Jakubowski J.: Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [6] Oczóś K., Lubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni: podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [7] Paraniak M.: Analiza chropowatości powierzchni po toczeniu, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.
- [8] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.

**Anna SIĘBOR**  
**Lidia GAŁDA**

## **6. ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH OBRÓBKII NAGNIATANIEM NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STALI 40CrMnMoS8–6**

### **6.1. Wprowadzenie**

Stosowanie nowych technik wytwarzania wyrobów lub doskonalenie już istniejących wiąże się z koniecznością oceny wprowadzonych zmian na właściwości produkowanych elementów. W wyniku wprowadzonych zmian kilka właściwości może ulec poprawie, natomiast istnieje ryzyko, że niektóre parametry mogą nie spełnić wymagań klientów. Proces, który chcemy doskonalić powinien zostać poddany ocenie. Rozwój z zakresu technologii następuje za sprawą poszerzania wiedzy z zakresu eksploatacji. Przykładowo dzięki identyfikacji właściwości użytkowych warstwy wierzchniej można wpłynąć na jakość, trwałość oraz niezawodność części maszyn poprzez zastosowanie określonej obróbki technologicznej przy odpowiednio dobranych parametrach [1]. W sytuacji, kiedy wprowadzamy innowacyjne rozwiązania technologiczne należy określić miejsce i zakres stosowalności nowego rozwiązania. Zarówno w przypadku doskonalenia procesu, jak i wprowadzania zupełnie nowych rozwiązań można zastosować metody statystyczne, które służą między innymi do oceny istotności wpływu czynników wejściowych, określenia wpływu wybranych czynników na ważne parametry oraz optymalizacji otrzymanych wyników.

Proces nagniatania jest jedną z metod obróbki wykończeniowej, która umożliwia nadanie korzystnych właściwości warstwie wierzchniej. Zastosowanie obróbki nagniataniem umożliwia umocnienie mechaniczne warstwy wierzchniej oraz zwiększenie gładkości obrabianej powierzchni, a przy zastosowaniu odpowiedniego oprzyrządowania, pozwala na poprawę dokładności wymiarowo-kształtowej. Umożliwia ona również ograniczenie wydatków związanych z wykończeniową obróbką ścierną (szlifowanie, dogładzanie, gładzenie,

polerowanie oraz inne) ze względu na narzędzia nagniatające, które posiadają większą trwałość w stosunku do narzędzi skrawających, co stanowi źródło oszczędności materiałowych [2, 3, 4].

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań procesu nagniatania z zastosowaniem elementu nagniatającego z węgliku krzemu. Celem badań było określenie wpływu dwóch czynników wejściowych procesu nagniatania posuwu i siły docisku na wybrane parametry chropowatości powierzchni stali 40CrMnMoS8-6. Wyniki badań poddane zostały analizie w oparciu o plan statyczny zdeterminowany kompletny trójpoziomowy PS/DK 3<sup>2</sup>.

## 6.2. Metodyka badań

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na próbkach wykonanych ze stali 40CrMnMoS8-6 stosowanej do produkcji korpusów, form do przerobu tworzyw sztucznych, ram form ciśnieniowych, pojemników pras do wyciskania oraz innych. Powierzchnia stali 40CrMnMoS8-6 poddana została obróbce nagniataniem (rys. 6.1). Twardość badanej stali wynosiła 30 ÷ 32 HRC.

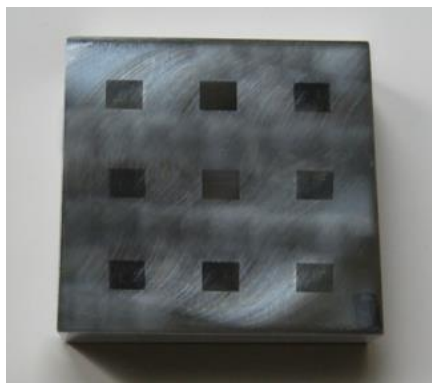
Przyjęte wartości parametrów technologicznych podczas obróbki nagniataniem przedstawione zostały w tab. 6.1. Parametry wejściowe określono na trzech poziomach zmienności.

Tabela 6.1. Wartości parametrów technologicznych procesu nagniatania [5]

Nr doświadczczenia	Parametry technologiczne	
	Posuw $f$ [mm/min]	Siła docisku $P$ [N]
1.	120	150
2.	120	100
3.	120	50
4.	80	150
5.	80	100
6.	80	50
7.	40	150
8.	40	100
9.	40	50

Obróbka nagniataniem przeprowadzona została na tokarce sterowanej numerycznie Haas Automation VF-2SS [7]. Proces nagniatania zrealizowano za pomocą narzędzia z kulką nagniatającą o średnicy 6,35 mm wykonanej z węgliku krzemu (SiC). Jako narzędzie zastosowano głowicę nagniatającą DB-3 (rys. 6.2).





Rys. 6.1. Zdjęcie próbki wykonane po obróbce nagniataniem [5]



Rys. 6.2. Zdjęcie głowicy nagniatającej DB-3 i próbki zamocowanych na tokarce VF-2SS [5]

Po przeprowadzeniu obróbki nagniataniem powierzchnia przedmiotu obrabianego poddana została pomiarom ze względu na wielkość parametrów chropowatości powierzchni. Wartości zmierzone zostały za pomocą profilometru Surtronic 3+ dla każdego z dziewięciu wariantów z powtarzalnością równą trzy. Następnie, za pomocą planu statycznego zdeteminowanego kompletnego trójpoziomowego PS/DK 3<sup>2</sup>, zbadany został wpływ parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na wybrane parametry chropowatości powierzchni.

Za pomocą profilometru zmierzone zostały profile powierzchni, następnie obliczono wybrane parametry chropowatości:

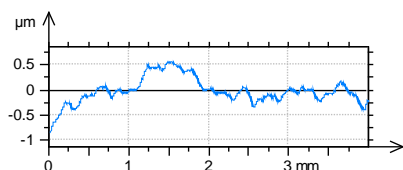
- parametry amplitudy:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,
- parametr stosunku materiałowego:  $R_{dc}$ ,
- parametr rozmieszczenia:  $R_{Sm}$ .

### 6.3. Prezentacja wyników

Obliczenia dotyczące parametrów chropowatości powierzchni wykonane zostały w programie komputerowym TalyProfile Lite. Jest to oprogramowanie w pełni kompatybilne z urządzeniem Surtronic 3+, za pomocą którego dokonano pomiarów chropowatości powierzchni próbek [6].

Na poniższych wykresach (rys. 6.3–6.11) przedstawione zostały wybrane profile pierwotne powierzchni wykonane po procesie nagniatania zgodnie z matrycą planowania.

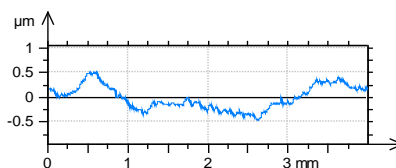
Length = 4.00 mm Pt = 1.47  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,153	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,167	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,320	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0572	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0721	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,254	
Rku	2,67	
Rdc	0,120	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,241	[mm]

Rys. 6.3. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 120 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 150 \text{ N}$  [5]

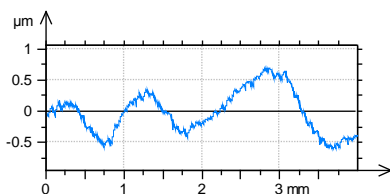
Length = 4.00 mm Pt = 1.00  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,128	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,132	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,260	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0415	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0556	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,0158	
Rku	3,30	
Rdc	0,0897	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,124	[mm]

Rys. 6.4. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 120 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 100 \text{ N}$  [5]

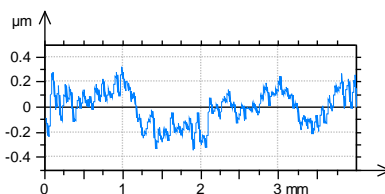
Length = 4.00 mm Pt = 1.31  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,155	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,173	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,327	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0573	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,071	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	0,0817	
Rku	2,58	
Rdc	0,120	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,114	[mm]

Rys. 6.5. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 120 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 1 = 50 \text{ N}$  [5]

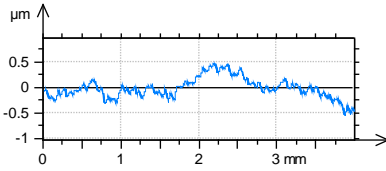
Length = 4.00 mm Pt = 0.670  $\mu\text{m}$  Scale = 1.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,159	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,151	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,310	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0519	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0669	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,015	
Rku	2,74	
Rdc	0,120	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,184	[mm]

Rys. 6.6. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 80 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 150 \text{ N}$  [5]

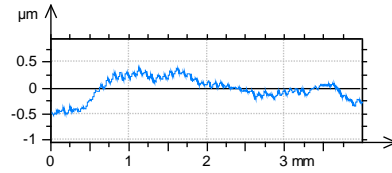
Length = 4.00 mm Pt = 1.02  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,163	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,159	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,332	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0577	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0726	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,0367	
Rku	2,65	
Rdc	0,130	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,137	[mm]

Rys. 6.7. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 80 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 100 \text{ N}$  [5]

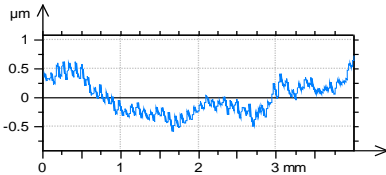
Length = 4.00 mm Pt = 0.940  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,108	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,122	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,230	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0346	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0451	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,346	
Rku	3,35	
Rdc	0,0701	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,111	[mm]

Rys. 6.8. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 80 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 50 \text{ N}$  [5]

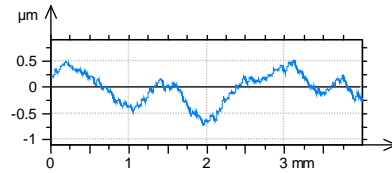
Length = 4.00 mm Pt = 1.28  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,218	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,182	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,400	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0713	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0876	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	0,0993	
Rku	2,50	
Rdc	0,150	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,101	[mm]

Rys. 6.9. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 40 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 150 \text{ N}$  [5]

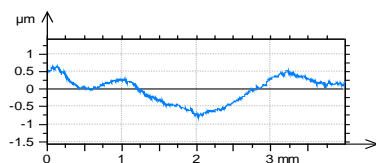
Length = 4.00 mm Pt = 1.27  $\mu\text{m}$  Scale = 2.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,167	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,188	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,355	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0645	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0791	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,172	
Rku	2,57	
Rdc	0,130	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,184	[mm]

Rys. 6.10. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 40 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 100 \text{ N}$  [5]

Length = 4.00 mm Pt = 1.48  $\mu\text{m}$  Scale = 3.00  $\mu\text{m}$



Parametr	Wartość	Jednostka
Rp	0,0934	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	0,129	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	0,222	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	0,0342	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	0,0442	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	-0,454	
Rku	3,58	
Rdc	0,080	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	0,0894	[mm]

Rys. 6.11. Profil pierwotny i parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu próbki przy  $f = 40 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  oraz  $P = 50 \text{ N}$  [5]

Najmniejsze wartości parametru Ra zaobserwowano przy obróbce nagniataniem przy parametrach  $f = 40 \text{ mm/min}$  oraz  $P = 50 \text{ N}$ . Maksymalne wartości parametru Ra przy sile docisku 150 N i posuwie 40 mm/min.

## 6.4. Analiza wyników badań

Analizę wyników badań przeprowadzono w oparciu o plan PS/DK  $3^2$ , w którym to przyjęto dwa czynniki wejściowe: posuw  $f$  [mm/min] oraz siłę docisku  $P$  [N]. Czynniki wejściowe osiągnęły wartości na trzech poziomach zmienności. Liczba pomiarów dla każdego poziomu zmienności wyniosła trzy. W tab. 6.2 zostały przedstawione czynniki wejściowe obrazujące wartości parametrów technologicznych.

W tab. 6.3 zamieszczono średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni Rp, Rv, Rdc i RSm.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wartości współczynników równań regresji w odniesieniu do poszczególnych parametrów chropowatości (tab. 6.4).

Tabela 6.2. Zestawienie wyników dla poszczególnych czynników wejściowych [5]

Lp.	Czynniki wejściowe	f [mm/min]	P [N]
1	Poziom górny (+)	120	150
2	Poziom zerowy (0)	80	100
3	Poziom dolny (-)	40	50
4	Przedział zmian	40	50
5	Kodowanie zmiennych	$x_2 = \frac{f - 80}{40}$	$x_1 = \frac{P - 100}{50}$
6	Czynnik wynikowy	$y = R_p, R_v, R_{dc}, R_{Sm}$	

Tabela 6.3. Średnie wartości parametrów chropowatości z pomiarów równoległych [5]

Lp.	$\bar{y}_i$			
	Rp [μm]	Rv [μm]	Rdc [μm]	RSm [mm]
1.	0,1800	0,1733	0,1467	0,2100
2.	0,1256	0,1263	0,0863	0,1473
3.	0,1437	0,1687	0,1137	0,1307
4.	0,1720	0,1647	0,1266	0,1523
5.	0,1390	0,1467	0,0967	0,1210
6.	0,1220	0,1206	0,0801	0,1300
7.	0,2110	0,2047	0,1400	0,0939
8.	0,1507	0,1583	0,0966	0,1363
9.	0,1091	0,1267	0,0801	0,1128

Tabela 6.4 . Współczynnik równania regresji [5]

Współczynnik równania regresji	Rp [μm]	Rv [μm]	Rdc [μm]	RSm [mm]
$b_0$	0,1503	0,1544	0,1074	0,1372
$b_1$	-0,0036	-0,0036	0,0050	0,0242
$b_2$	0,0314	0,0211	0,0232	0,0138
$b_{11}$	0,1533	0,1597	0,1106	0,1385
$b_{22}$	0,1563	0,1598	0,1145	0,1383
$b_{12}$	-0,0164	-0,0183	-0,0067	0,0246

W celu sprawdzenia powtarzalności warunków wykonywania doświadczenia zastosowano test Cohrana. Wartości empiryczne współczynnika G przeprowadza się według wzoru:

$$G = \frac{S^2(y)_{i \max}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} \quad (6.1)$$

gdzie:  $S^2(y)_i$  - wariancja wyników pomiarów na poszczególnych poziomach zmienności.

W tab. 6.5 zamieszczono obliczone wartości współczynnika  $G$ .

Tabela 6.5. Wartość empiryczna współczynnika  $G$  [5]

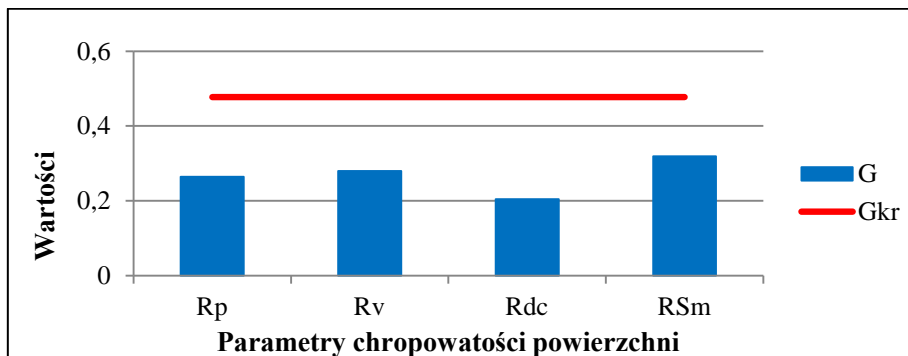
Lp.	Czynnik wynikowy	Wartość empiryczna współczynnika $G$
1.	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	0,2642
2.	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	0,2794
3.	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	0,2044
4.	RSm [mm]	0,3192

Wartość krytyczna współczynnika  $G$  zgodnie ze statystyką Cochra:na:

$$G_{kr} = G(\alpha; f1; f2)$$

$$G_{(0,05;9;2)} = 0,4775$$

Zestawienie wyników dotyczących sprawdzenia powtarzalności warunków wykonywania doświadczenia dokonano na wykresie (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Zestawienie wartości testowych  $G$  z  $G_{kr}$  [5]

Dla analizowanych parametrów chropowości powierzchni: Rp, Rv, Rdc i RSm obliczono wartość empiryczną współczynnika  $G$ , a następnie wyznaczono, przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , współczynnik  $G_{kr}$ . Ponieważ, dla każdego czynnika wynikowego  $G < G_{kr}$ , to powtarzalność uznano za odpowiednią.

Z wykorzystaniem testu t-Studenta obliczono wartości krytyczne współczynników  $b_{kr}$ . Wartości krytyczne współczynnika  $b_{kr}$  przeprowadzono według wzoru:

$$b_{kr} = t_{kr} \frac{\sqrt{S^2(y)}}{N * r} \quad (6.2)$$

W tab. 6.6 zamieszczono wyliczone wartości współczynnika  $b_{kr}$ .

Tabela 6.6. Krytyczna wartość współczynnika dla poszczególnych parametrów chropowości [5]

Lp.	Czynnik wynikowy	Wartość współczynnika $b_{kr}$
1.	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	0,0108
2.	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	0,0083
3.	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	0,0091
4.	RSm [mm]	0,0135

Ocenę istotności współczynników równania regresji zamieszczono w tab. 6.7.

Tabela 6.7. Ocena istotności współczynników regresji [5]

Współczynnik regresji	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	RSm [mm]
$b_0$	istotny	istotny	istotny	istotny
$b_1$	nieistotny	nieistotny	nieistotny	istotny
$b_2$	istotny	istotny	istotny	istotny
$b_{11}$	istotny	istotny	istotny	istotny
$b_{22}$	istotny	istotny	istotny	istotny
$b_{12}$	istotny	istotny	nieistotny	istotny

Po odrzuceniu wyrazów nieistotnych równania regresji przyjęły postać:

$$\text{Rp: } y_1 = 0,1324 + 0,0314x_2 + 0,0179x_2^2 - 0,0164x_1x_2$$

$$\text{Rv: } y_2 = 0,1333 + 0,0211x_2 + 0,0157x_1^2 + 0,016x_2^2 - 0,0183x_1x_2$$

$$\text{Rdc: } y_3 = 0,0869 + 0,0232x_2 + 0,0094x_1^2 + 0,0213x_2^2$$

$$\text{RSm: } y_4 = 0,1322 + 0,0242x_1 + 0,0138x_2 + 0,0246x_1x_2$$

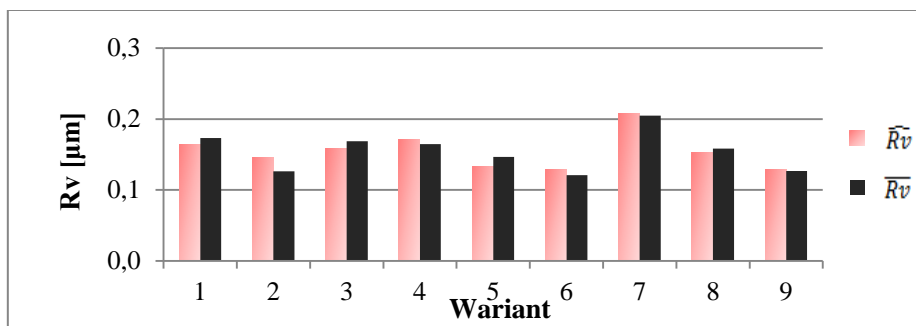
Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że posuw ma istotny wpływ na parametry chropowości powierzchni, takiej jak: Rp, Rv, Rdc oraz RSm. Natomiast siła docisku w istotny sposób wpływa na współczynniki chropowości powierzchni (w kwadracie oraz w interakcji). W oparciu o otrzymane równania obliczono wartości analizowanych parametrów wyjściowych (tab. 6.8).

Na rys. 6.13 zaprezentowano średnie wyniki pomiarów parametru Rv oraz wartości obliczone z równania regresji.

Na podstawie wykresu (rys. 6.13) można stwierdzić, że zarówno w przypadku średniej wartości parametru  $R_v$  z pomiarów, jak i wartości obliczone z równania regresji, maksymalna wielkość parametru  $R_v$  uzyskana została w wariancie siódmym, gdzie posuw wyniósł 40 mm/min, a siła docisku 150 N. Minimalne wartości otrzymano w wariancie szóstym przy posuwie równym 80 mm/min i sile docisku 50 N.

Tabela. 6.8. Wartości z równania regresji dla poszczególnych poziomów czynników wejściowych i-tego doświadczenia [5]

Lp.	$\hat{y}_i$			
	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	RSm [mm]
1.	0,1707	0,1642	0,1392	0,2022
2.	0,1378	0,1455	0,1014	0,1604
3.	0,1407	0,1586	0,1061	0,1255
4.	0,1817	0,1704	0,1315	0,1494
5.	0,1324	0,1333	0,0869	0,1322
6.	0,1189	0,1282	0,0850	0,1218
7.	0,2106	0,2080	0,1426	0,1047
8.	0,1450	0,1526	0,0913	0,1121
9.	0,1151	0,1291	0,0827	0,1262



Rys. 6.13. Wykres wartości średnich i obliczonych z równania regresji [5]

Oceny adekwatności równania regresji dokonano w oparciu o test Fishera - Snedecora poprzez obliczenie wariancji adekwatności i empirycznej wartości współczynnika  $F_t$ , następnie dokonano porównania z wartością  $F_{kr}$ . Wartości krytyczne współczynnika  $F_{kr}$  zamieszczono w tab. 6.9, natomiast empiryczne wartości współczynnika  $F_t$  zestawiono w tab. 6.10.



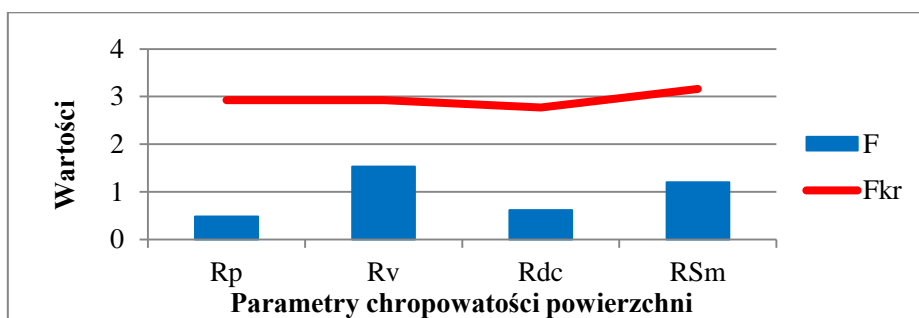
Tabela 6.9. Krytyczna wartość współczynnika  $F$  [5]

Lp.	Czynnik wynikowy	Wartość współczynnika $F_{kr}$
1.	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	2,9277
2.	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	2,9277
3.	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	2,7729
4.	RSm [mm]	3,1599

Tabela 6.10. Empiryczna wartość współczynnika  $F_t$  [5]

Lp.	Czynnik wynikowy	Wartość empiryczna współczynnika $F_t$
1.	Rp [ $\mu\text{m}$ ]	0,4859
2.	Rv [ $\mu\text{m}$ ]	1,5290
3.	Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	0,6158
4.	RSm [mm]	1,2004

Zestawienie wyników dotyczących wartości  $F$  i  $F_{kr}$  przedstawione zostało w sposób graficzny na rys. 6.14.

Rys. 6.14. Wartości testowe  $F_t$  i krytyczne  $F_{kr}$  dotyczących sprawdzenia adekwatności równania regresji [5]

Dla czterech parametrów chropowatości powierzchni: Rp, Rv, Rdc i RSm obliczono wartość empiryczną współczynnika  $F_t$ , a następnie wyznaczono współczynnik  $F_{kr}$ . Ponieważ, dla każdego czynnika wynikowego  $F_t < F_{kr}$ , to analizowane równania regresji uznano za adekwatne na poziomie istotności  $\alpha$  równym 0,05.

Po odkodowaniu równania regresji i uporządkowaniu działań otrzymano równania:

$$R_p = 0,0756 - 0,001f + 0,000652P + 0,0000112f^2 - 0,0000082Pf$$

$$R_v = 0,0171 + 0,003f - 0,00052P + 0,0000063P^2 + 0,00001f^2 - 0,00000915 Pf$$

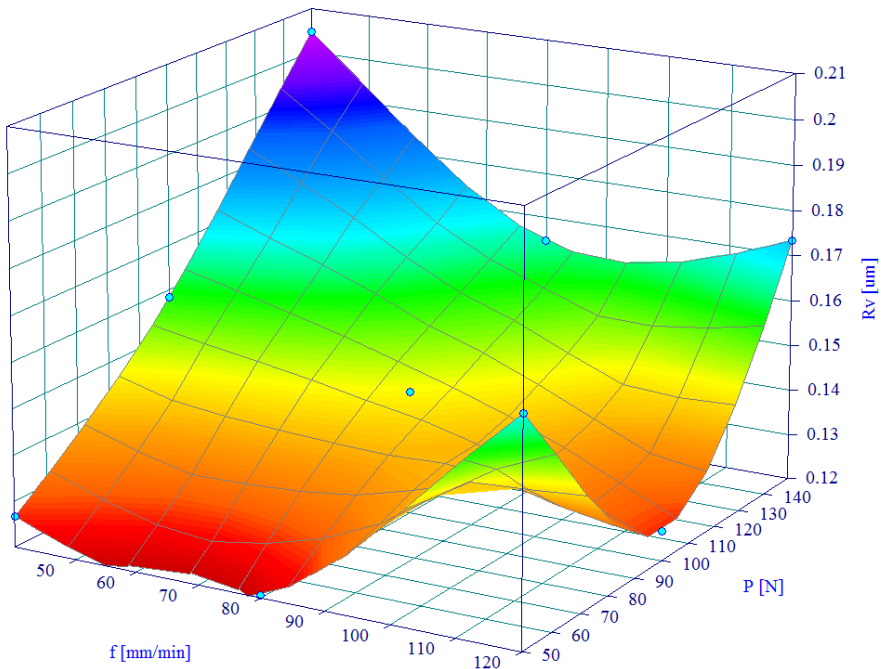
$$R_{dc} = 0,1653 - 0,00156f - 0,000752P + 0,0000038P^2 + 0,0000135f^2$$

$$R_{Sm} = 0,1542 - 0,00064f - 0,0005P + 0,0000123 Pf$$

Równania regresji wyrażają zależność poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni od parametrów nagniatania: posuwu i siły docisku w badanym zakresie zmienności.

Wykonane obliczenia pozwoliły stwierdzić, że badania przeprowadzone zostały w warunkach powtarzalnych. Parametry technologiczne ustalone w procesie nagniatania miały istotny wpływ na parametry chropowatości powierzchni, takie jak  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{dc}$  oraz  $R_{Sm}$ . Przy przyjętym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  uzyskane równania regresji uznane zostały za adekwatne w badanym zakresie zmienności parametrów.

Na rys. 6.15 przedstawiona została w sposób graficzny zależność wartości parametru chropowatości powierzchni  $R_v$  od posuwu i siły docisku w analizowanym zakresie zmienności.



Rys. 6.15. Powierzchnia odpowiedzi na podstawie modelu matematycznego dla parametru  $R_v$  [5]

Najmniejszą wartość parametru  $R_v$  uzyskano przy posuwie wynoszącym 80 mm/min i sile docisku równej 50 N. Ze względu na ekonomiczność i praco-chłonność korzystniej jest obrabiać elementy przy większej wartości posuwu wynoszącej w tym przypadku 120 mm/min i sile docisku stanowiącej około 100 N, uzyskując przy tym podobne wartości parametru  $R_v$ .

## 6.5. Wnioski

Za pomocą planu statycznego zdeterminowanego kompletnego trójpoziomowego PS/DK  $3^2$  zbadany został wpływ parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na wybrane parametry chropowatości powierzchni:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{dc}$  i  $R_{Sm}$ . Czynniki zmiennymi podczas procesu były: posuw  $f$  [mm/min] oraz siła docisku  $P$  [N]. Wartości parametrów wynosiły dla posuwu: 40, 80, 120 [mm/min] oraz dla siły docisku: 50, 100, 150 [N].

W pierwszej kolejności dokonano sprawdzenia powtarzalności warunków wykonywania doświadczenia, która dla każdego badanego parametru chropowatości powierzchni uznana została za odpowiednią.

Kolejno przeprowadzono ocenę istotności poszczególnych współczynników równania regresji. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że posuw miał istotny wpływ na parametry chropowatości powierzchni:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{dc}$  i  $R_{Sm}$ . Natomiast siła docisku w istotny sposób wpływała na współczynniki chropowatości powierzchni w kwadracie oraz w interakcji z posuwem.

Ostatnim etapem realizacji planu PS/DK  $3^2$  było sprawdzenie adekwatności równania regresji. Po przeprowadzeniu obliczeń ustalono, że analizowane równania regresji były adekwatne w badanym zakresie zmienności parametrów na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

## Literatura do rozdziału 6.

- [1] Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.
- [2] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem: technologia i oprzyrządowanie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- [3] Przybylski W.: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie Tom 3, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
- [4] Przybylski W.: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie Tom 4, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2014.
- [5] Siębor A.: Analiza wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem stali 40CrMnMoS8-6, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.
- [6] <http://www.taylor-hobson.com/talyprofile-software>.
- [7] [http://int.hascnc.com/we\\_spec1.asp?intLanguageCode=1045&id=VF2SS&sizeID=30\\_40INCH\\_VMC](http://int.hascnc.com/we_spec1.asp?intLanguageCode=1045&id=VF2SS&sizeID=30_40INCH_VMC).

**Magdalena SŁONKA**  
**Lidia GAŁDA**

## **7. ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH PROCESU NAGNIATANIA NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI STALI X46Cr13**

### **7.1. Wprowadzenie**

Parametry technologiczne realizowanych procesów mogą wpływać istotnie na właściwości obrabianych elementów. Siła oddziaływania poszczególnych parametrów technologicznych może być zróżnicowana. Jakość wykonywanych komponentów zależy w dużej mierze od rodzaju zastosowanej obróbki wykończeniowej, w czasie której zostają osiągnięte określone właściwości warstwy wierzchniej. W celu osiągnięcia jak najwyższej jakości produkowanych wyrobów należy określić zależność między sterowalnymi parametrami technologicznymi a oczekiwanymi właściwościami przedmiotu.

Obróbka nagniataniem pozwala na uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni przy jednoczesnym jej umocnieniu mechanicznym oraz uzyskanie większej dokładności wymiarowej. Metoda nagniatania polega na wykorzystaniu odkształcenia plastycznego, wytworzonego w warstwie wierzchniej danego przedmiotu na skutek oddziaływania twardego i gładkiego narzędzia z obrabianą powierzchnią [2]. Układ obróbkowy, w skład którego wchodzi narzędzie nagniatające i przedmiot obrabiany, powinien dawać możliwość uzyskania określonych sił dociskających, które są konieczne do uzyskania odkształceń plastycznych powierzchni [2]. Naciski powierzchniowe powodują przemieszczenia się nierówności oraz zgniot w warstwie wierzchniej przedmiotu. Przemiany skutkują zmianą chropowatości powierzchni oraz zmianą właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu. Zjawiska te występują równolegle, jednak z różną intensywnością. W zależności od tego jaki efekt końcowy chcemy uzyskać, należy w sposób świadomy sterować parametrami realizowanej obróbki. Dzięki zastosowaniu narzędzi o odpowiedniej konstrukcji oraz precyzyjnej ob-

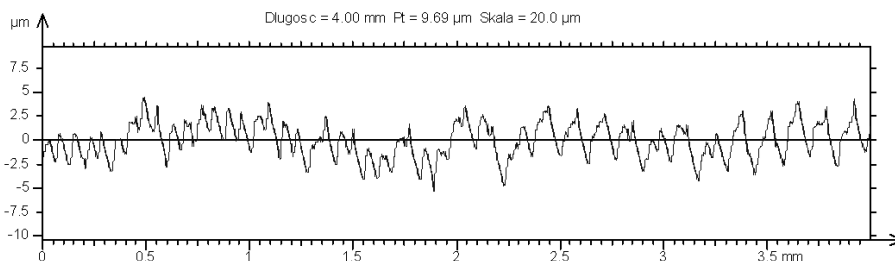
rabiarki można uzyskać większą dokładność wymiarową oraz lepszą dokładność kształtu przedmiotu obrabianego [2, 3].

Warstwa wierzchnia jest warstwą danego materiału, ograniczoną rzeczywistą powierzchnią przedmiotu i sięgającą w głąb na głębokość, gdzie materiał wykazuje zmienione cechy fizyczne (i chemiczne) w stosunku do cech rdzenia [1, 4]. Elementami składającymi się na warstwę wierzchnią są między innymi chropowatość i falistość powierzchni. Chropowatość jest to jedna z cech powierzchniowych przedmiotów, oznacza dające się wyczuć nierówności powierzchni, które nie wynikają z kształtu przedmiotu. Falistość jest to błąd związany z obróbką, wykrzywienia materiału wchodzą w skład powierzchni rzeczywistej. Chropowatość powierzchni są to nierówności znajdujące się na powierzchni rzeczywistej danego przedmiotu takie jak: zagłębienia czy wzniesienia. Wielkość chropowatości zależy przede wszystkim od rodzaju obróbki, której zostaje poddany przedmiot. Czynniki wpływającymi na chropowatość powierzchni są czynniki wejściowe procesu obróbki, kształt i ustawienie ostrza, drgania, zużycie narzędzia, odkształcenia układu OPN. Chropowatość powierzchni ma duży wpływ na odporność zmęczeniową, korozyjną, zużycie tribologiczne oraz na przewodnictwo cieplne i elektryczne [1, 5].

W rozdziale przedstawiono badania wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem, tj. siły docisku oraz posuwu na chropowatość powierzchni stali X46Cr13 z wykorzystaniem planu statycznego trójpoziomowego kompletnego PS/DK 3<sup>2</sup>.

## 7.2. Metodyka badań

Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem wałków wykonanych ze stali chromowej X46Cr13 o średnicy 30 mm bez ulepszenia cieplnego. Chropowatość powierzchni wałków przed wykonaniem procesu nagniatania, określona parametrem Ra, wynosiła około 1,31  $\mu\text{m}$ , natomiast profil powierzchni przed wykonaniem nagniatania przedstawia rys. 7.1.



Rys. 7.1. Profil powierzchni przed wykonaniem procesu nagniatania [6]

W ramach realizacji badań według planu PS/DK 3<sup>2</sup> wykonano 9 doświadczeń (N=9). Czynnikiami wejściowymi zmiennymi przyjmowanymi na trzech poziomach zmienności były: siła docisku P [N] oraz posuw f [mm/obr]. Parametrem stałym była prędkość obrotowa n równa 460 obr/min. W tab. 7.1 przedstawiono wartości parametrów zmiennych.

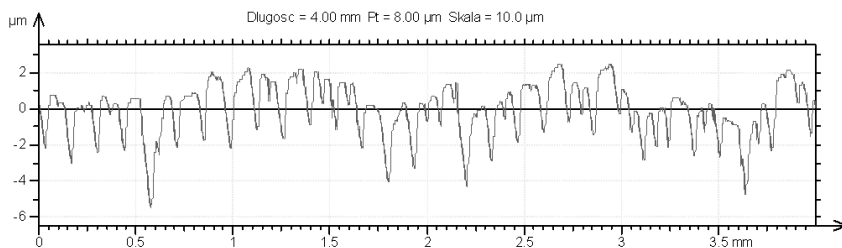
Tabela 7.1. Wartości czynników wejściowych [6]

Lp.	P [N]	f [mm/obr]
1.	140	0,25
2.	140	0,1
3.	140	0,04
4.	80	0,25
5.	80	0,1
6.	80	0,04
7.	20	0,25
8.	20	0,1
9.	20	0,04

Proces nagniatania powierzchni zrealizowano z zastosowaniem tokarki uniwersalnej LZ 360. Do procesu nagniatania został użyty dogniatak z głowicą DB-3, natomiast jako materiał kulki do nagniatania zastosowano węgiel krzemu (SiC). Średnica kulki wynosiła 12,7 mm. Po wykonaniu nagniatania powierzchnie poddano pomiarom chropowatości. Do tego celu wykorzystano profilometr Surtronic 3+. Wykonano po trzy pomiary dla każdego wariantu powierzchni obrobionej.

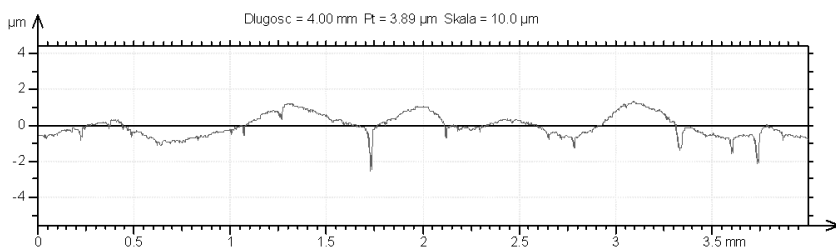
### 7.3. Prezentacja wyników badań i analiza

Profile powierzchni zostały zobrazowane za pomocą programu TalyProfile Lite. W celu obliczenia wartości parametrów chropowatości został wykorzystany filtr Gaussa. Na rys. 7.2-7.4 zostały zaprezentowane wybrane profile pierwotne powierzchni oraz wartości wybranych parametrów chropowatości.



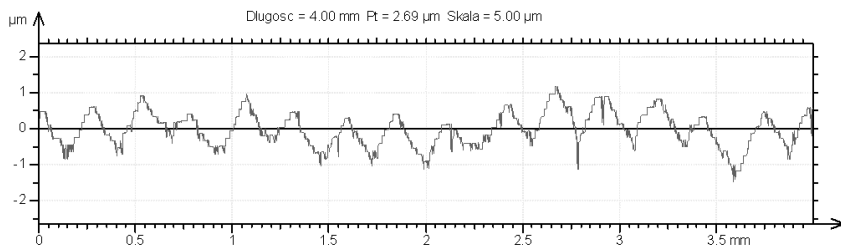
Rp	1.69	µm	Rq	1.21	µm
Rv	3.65	µm	Rsk	-0.894	
Rz	5.34	µm	Rku	3.23	
Rc	2.90	µm	Rmr	20.5	%
Rt	6.67	µm	Rdc	2.12	µm
Ra	0.982	µm	RSm	0.103	Mm

Rys. 7.2. Profil powierzchni oraz parametry chropowości powierzchni po nagniataniu dla parametrów:  $P=20$  N,  $f=0,25$  mm/obr [6]



Rp	0.618	µm	Rq	0.326	µm
Rv	1.44	µm	Rsk	-0.967	
Rz	2.06	µm	Rku	6.56	
Rc	1.10	µm	Rmr	87.9	%
Rt	3.40	µm	Rdc	0.494	µm
Ra	0.245	µm	RSm	0.376	Mm

Rys. 7.3. Profil powierzchni oraz parametry chropowości powierzchni po nagniataniu dla parametrów:  $P=80$  N,  $f=0,1$  mm/obr [6]



Rp	0.757	μm	Rq	0.384	μm
Rv	1.08	μm	Rsk	-0.091	
Rz	1.83	μm	Rku	2.50	
Rc	1.10	μm	Rmr	57.2	%
Rt	2.46	μm	Rdc	0.719	μm
Ra	0.319	μm	RSm	0.179	Mm

Rys. 7.4. Profil powierzchni oraz parametry chropowatości powierzchni po nagniataniu dla parametrów:  $P=140$  N,  $f=0,25$  mm/obr [6]

### 7.3.1. Analiza wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na wybrane parametry chropowatości powierzchni z wykorzystaniem PS/DK 3<sup>2</sup> bez uwzględnienia skutków interakcji

Badanie istotności wpływu przeprowadzono stosując plan trójpoziomowy PS/DK 3<sup>2</sup> dla dwóch zmiennych czynników wejściowych siły docisku i posuwu oraz dla stałej prędkości obrotowej. Każdy parametr technologiczny występował na trzech poziomach zmienności. Liczba powtórzeń pomiarów czynników wynikowych wynosiła trzy.

Obliczenia zostały przeprowadzone dla parametru chropowatości powierzchni Ra. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z metodologią prowadzenia badań wg PS/DK 3<sup>2</sup>.

Obliczenia wstępne:

a) Obliczenie jednostki zmienności według wzoru:

$$\Delta x_k = \frac{x_{kmax} - x_{kmin}}{2} \quad (7.1)$$

gdzie:  $x_{kmax}$  - maksymalna wartość parametru wejściowego,

$x_{kmin}$  - minimalna wartość parametru wejściowego.



Dla siły:  $\Delta x_1 = \frac{140-20}{2} = 60$

Dla posuwu:  $\Delta x_2 = \frac{0,25-0,04}{2} = 0,105$

b) Obliczenie wartości centralnych czynników wejściowych według wzoru:

$$x_{k0} = \frac{x_{kmax} + x_{kmin}}{2} \quad (7.2)$$

Dla siły:  $x_{10} = \frac{140+20}{2} = 80$

Dla posuwu:  $x_{20} = \frac{0,25+0,04}{2} = 0,145$

c) Zakodowanie czynników wejściowych:

$$x_n = \frac{x_k - x_{k0}}{\Delta x_k} \quad (7.3)$$

Dla siły:  $x_1 = \frac{P-80}{60}$

Dla posuwu:  $x_2 = \frac{f-0,145}{0,105}$

W tab. 7.2 przedstawiona została macierz planowania oraz wyniki pomiarów dla parametru Ra. W tab. 7.2 znajdują się również średnie obliczone z pomiarów oraz wariancja obliczona ze wzoru:

$$S^2(Ra) = \frac{\sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{r-1}. \quad (7.4)$$

d) Obliczenie wartości współczynników regresji według wzorów:

$$b_0 = \frac{1}{9} (-\bar{y}_1 + 2\bar{y}_2 - \bar{y}_3 + 2\bar{y}_4 + 5\bar{y}_5 + 2\bar{y}_6 - \bar{y}_7 + 2\bar{y}_8 - \bar{y}_9) \quad (7.5)$$

$$b_1 = \frac{1}{6} (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_7 - \bar{y}_8 - \bar{y}_9) \quad (7.6)$$

$$b_2 = \frac{1}{6} (\bar{y}_1 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - \bar{y}_6 + \bar{y}_7 - \bar{y}_9) \quad (7.7)$$

$$b_{11} = \frac{1}{6}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - 2\bar{y}_4 - 2\bar{y}_5 - 2\bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8 + \bar{y}_9) \quad (7.8)$$

$$b_{22} = \frac{1}{6}(\bar{y}_1 - 2\bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - 2\bar{y}_5 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 - 2\bar{y}_8 + \bar{y}_9) \quad (7.9)$$

$$b_{12} = \frac{1}{4}(\bar{y}_1 - \bar{y}_3 - \bar{y}_7 + \bar{y}_9) \quad (7.10)$$

gdzie:  $b_0, b_1, b_2$ - współczynniki równania regresji,

$b_{11}, b_{22}, b_{12}$ - współczynniki równania regresji, z uwzględnieniem skutków interakcji pomiędzy czynnikami wejściowymi,

$\bar{y}_1 \div \bar{y}_9$  - średnie arytmetyczne obliczone dla każdego poziomu zmienności, (uwzględnia znak widniejący w macierzy planowania w odpowiednim miejscu oraz to czy dany współczynnik regresji jest istotny).

Przy analizie wpływu bez uwzględniania skutków interakcji obliczymy jedynie  $b_0, b_1$  i  $b_2$ .

$$b_0 = 0,2143$$

$$b_1 = -0,185$$

$$b_2 = 0,0257$$

Tabela 7.2. Matryca planu PS/DK  $3^2$  i wyniki pomiarów [6]

Lp.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$Ra_1$	$Ra_2$	$Ra_3$	$\bar{Ra}$	$S^2(Ra)_i$	$\widehat{Ra}$
1.	+	+	+	0,319	0,332	0,359	0,3367	0,0004	0,0293
2.	+	+	0	0,231	0,24	0,473	0,3147	0,0188	0,0293
3.	+	+	-	0,607	0,573	0,876	0,6853	0,0276	0,0293
4.	+	0	+	0,447	0,453	0,38	0,4267	0,0016	0,2143
5.	+	0	0	0,245	0,288	0,123	0,2187	0,0073	0,2143
6.	+	0	-	0,131	0,158	0,148	0,1457	0,0002	0,2143
7.	+	-	+	0,982	1,01	0,746	0,9127	0,0210	0,3993
8.	+	-	0	0,839	1,09	0,601	0,8433	0,0598	0,3993
9.	+	-	-	0,745	0,774	0,553	0,6907	0,0144	0,3993

e) Sprawdzenie powtarzalności wykonanych doświadczeń:

Obliczenie współczynnika G wg wzoru:

$$G = \frac{S^2(y)_{imax}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} \quad (7.11)$$

gdzie:  $S^2(y)_{imax}$ - maksymalna wartość wariancji,

$\sum_{i=1}^N S^2(y)_i$ - suma wszystkich wartości wariancji.

$$G = 0,3955$$

Obliczenie liczby stopni swobody:

$$f_1 = N \quad (7.12)$$

$$f_2 = r - 1 \quad (7.13)$$

$$\alpha = 0,05 \quad (7.14)$$

gdzie: N - liczba wszystkich doświadczeń,  
r - liczba pomiarów na danym poziomie zmienności,  
 $\alpha$  - przyjęty poziom istotności.

$$f_1 = 9$$

$$f_2 = 2$$

$$G_{kr} = G_{(0,05;9;2)} = 0,4775$$

$G < G_{kr}$ , zatem powtarzalność doświadczenia uznajemy za odpowiednią.

f) Sprawdzenie istotności współczynników równania regresji:

Obliczenie wariancji błędów z pomiarów wg wzoru:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(y)_i \quad (7.15)$$

gdzie: N- liczba wszystkich doświadczeń

$S^2(y)_i$ - wariancja policzona dla każdego poziomu zmienności

$$S^2(y) = 0,0168$$

Obliczenie liczby stopni swobody według wzoru:

$$f = N(r - 1) \quad (7.16)$$

$$f = 9 \times (3 - 1) = 18$$

Określenie wartości  $t_{kr}$  według wzoru:

$$t_{kr} = t_{(\alpha;f)} \quad (7.17)$$

$$t_{kr(0,05;18)} = 2,10092$$

Obliczenie współczynników równania regresji według wzoru:

$$b_{kr} = t_{kr} \sqrt{\frac{S^2(y)}{N \times r}} \quad (7.18)$$

$$b_{kr} = 2,10092 \times \sqrt{\frac{0,0168}{9 \times 3}} = 0,0524$$

Ponieważ:

$|b_0| > b_{kr}$ , to uznajemy ten współczynnik za istotny,

$|b_1| > b_{kr}$ , to uznajemy ten współczynnik za istotny,

$|b_2| < b_{kr}$ , to uznajemy ten współczynnik za nieistotny.

Równanie regresji po odrzuceniu współczynników nieistotnych:

$$y = 0,2143 - 0,1850x_1$$

g) Sprawdzenie adekwatności równania:

Obliczenie wariancji adekwatności według wzoru:

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1} \quad (7.19)$$

gdzie:  $\bar{y}_i$  - średnia z pomiarów w i-tym doświadczeniu,

$\hat{y}_i$  - wartość obliczona z danego równania regresji, przy uwzględnieniu poziomu czynnika wejściowego,

k- liczba wyrazów równania regresji, nie wliczając wyrazu wolnego.

$$S_{ad}^2 = 0,5150$$

Obliczenie współczynnika  $F_t$  według wzoru:

$$F_t = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} \quad (7.20)$$

$$F_t = \frac{0,0168}{0,5150} = 30,6575$$

Obliczenie liczby stopni swobody dla licznika i mianownika według wzorów:

$$f_l = N - k - 1 \quad (7.21)$$

$$f_m = N(r - 1) \quad (7.22)$$

$$f_l = 7$$

$$f_m = 18$$

Określenie współczynnika  $F_{kr}$ :

$$F_{kr} = F_{(0,05;7;18)} = 2,5767$$

$F_t > F_{kr}$ , dlatego otrzymane równanie regresji uznajemy za nieadekwatne.

h) Odkodowanie równania regresji.

$$Ra = 0,4609 - 0,00308 \times P$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń powtarzalność doświadczeń uznano za odpowiednią. Czynnikiem, który miał istotny wpływ na doświadczenie to siła docisku. Po porównaniu wartości krytycznej i obliczeniowej współczynnika  $F_t$  równanie uznajemy za nieadekwatne.

### **7.3.2. Analiza wpływu parametrów technologicznych obróbki nagniataniem na wybrane parametry chropowatości powierzchni z wykorzystaniem PS/DK 3<sup>2</sup> z uwzględnienia skutków interakcji**

Obliczenia zostały przeprowadzone dla parametru chropowatości powierzchni  $Ra$ . Są one analogiczne do obliczeń z podrozdziału 7.4.1, zostały jednak uzupełnione o obliczenia skutków interakcji pomiędzy parametrami technologicznymi. Poniżej (tab. 7.3.) przedstawiona została matryca planowania oraz wyniki pomiarów dla parametru  $Ra$ . W tabeli znajduje się również średnia obliczona z pomiarów oraz wariancja obliczona ze wzoru:

$$S^2(Ra) = \frac{\sum_{u=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{r - 1}$$

Obliczenie wartości współczynników regresji uwzględniając skutki interakcji według wzorów (7.8-7.10):

$$b_{11} = 0,3669$$

$$b_{22} = 0,0741$$

$$b_{12} = -0,1427$$

Sprawdzenie istotności współczynników równania regresji:

$|b_o| > b_{kr}$ , współczynnik istotny,

$|b_1| > b_{kr}$ , współczynnik istotny,  
 $|b_2| < b_{kr}$ , współczynnik nieistotny,  
 $|b_{11}| > b_{kr}$ , współczynnik istotny,  
 $|b_{22}| > b_{kr}$ , współczynnik istotny,  
 $|b_{12}| < b_{kr}$ , współczynnik istotny.

Tabela 7.3. Matryca planu PS/DK  $3^2$  i wyniki pomiarów [6]

Lp.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$Ra_1$	$Ra_2$	$Ra_3$	$\bar{Ra}$	$S^2(Ra)_i$	$\widehat{Ra}$
1.	+	+	+	0,319	0,332	0,359	0,3367	0,0004	0,3276
2.	+	+	0	0,231	0,24	0,473	0,3147	0,0188	0,3962
3.	+	+	-	0,607	0,573	0,876	0,6853	0,0276	0,6129
4.	+	0	+	0,447	0,453	0,38	0,4267	0,0016	0,2884
5.	+	0	0	0,245	0,288	0,123	0,2187	0,0073	0,2143
6.	+	0	-	0,131	0,158	0,148	0,1457	0,0002	0,2884
7.	+	-	+	0,982	1,01	0,746	0,9127	0,0210	0,9829
8.	+	-	0	0,839	1,09	0,601	0,8433	0,0598	0,7662
9.	+	-	-	0,745	0,774	0,553	0,6907	0,0144	0,6976

Równanie regresji, po odrzuceniu współczynników nieistotnych:

$$y = 0,2143 - 0,1850x_1 + 0,3669x_{11} + 0,0741x_{22} - 0,1427x_1x_2$$

Ponieważ  $F_t = 2,7869 < F_{kr} = 2,9277$ , dlatego otrzymane równanie regresji, uznajemy za adekwatne.

Po odkodowaniu i uporządkowaniu otrzymano następujące równanie regresji:

$$Ra = -2,4957 - 0,02 \times P + 1,81 \times f + 0,0003 \times P^2 + 92,625 \times f^2 - 0,02 \times P \times f$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń powtarzalność doświadczeń uznano za odpowiednią. Czynniki, które miały istotny wpływ na doświadczenie to siła docisku, posuw oraz interakcja parametrów zmiennych: siły  $P^2$ , posuwu  $f^2$ , a także interakcja siły docisku i posuwu  $P \cdot f$ .

## 7.4. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, iż podczas obróbki nagniataniem następuje znaczna poprawa jakości powierzchni obrabianej poprzez zmniejszenie nierówności i jej wygładzenie.

Podczas dokonywania obliczeń bez uwzględnienia skutków interakcji pomiędzy czynnikami wejściowymi otrzymano nieadekwatne równanie regresji. Natomiast po uwzględnieniu skutków interakcji uzyskano adekwatność modelu matematycznego.

Najniższą wartość parametru chropowatości  $R_a$  uzyskano przy sile docisku 80 N oraz posuwie 0,04 mm/obr. Podczas zastosowania siły docisku 20 N, chropowatość powierzchni charakteryzowała się wyższymi wartościami, bez względu na wartość posuwu, gdyż występuje zbyt mały docisk do powierzchni obrabianej.

Analizując obydwie przypadki analizy wpływu można zauważyć, że obliczenia bez uwzględnienia skutków interakcji nie dają pełnego obrazu wpływu danych parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni. Natomiast adekwatne równanie regresji otrzymano dzięki uwzględnieniu interakcji pomiędzy czynnikami technologicznymi w obliczeniach.

Znacznie korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie planu zdeterminowanego kompletnego  $PS/DK 3^2$  z uwzględnieniem interakcji pomiędzy czynnikami, jednak należy zauważyć, iż duża liczba czynników wejściowych znacznie zwiększa pracochłonność badania.

## Literatura do rozdziału 7.

- [1] Pawlus P.: Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
- [2] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem: technologia i oprzyrządowanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- [3] Przybylski W.: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008.
- [4] Norma PN-EN ISO 4287:1999: Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni, Polski Komitet Organizacyjny, listopad 1999.
- [5] Materiały dotyczące chropowatości powierzchni, Centrum Transferu Nowoczesnych Technologii Wytwarzania Politechniki Rzeszowskiej, <http://www.ctntw.prz.edu.pl>.
- [6] Słonka M.: Analiza wpływu parametrów technologicznych procesu nagniatania stali X46Cr13, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.

**Agnieszka SOBOLAK**  
**Lidia GALDA**

## **8. OCENA ISTOTNOŚCI WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESU NAGNIATANIA POWIERZCHNI STALI 40CrMnMoS8-6**

### **8.1. Wprowadzenie**

Poprzez zastosowanie obróbki wykończeniowej można uzyskać jednocześnie żądane wymiary obrabianego przedmiotu oraz określoną jakość powierzchni, co ma znaczenie w kontekście oczekiwanych własności użytkowych. Jedną z metod należących do grupy metod obróbki wykończeniowej należy nagniatanie. Metoda ta wyróżnia się wśród innych wykorzystaniem miejscowego plastycznego odkształcenia, które wytwarzane jest w wierzchniej warstwie obrabianego przedmiotu. Dodatkowymi zaletami tego rodzaju obróbki jest wysoka ekonomiczność i prostota tej metody, przy jednoczesnym uzyskaniu wysokich właściwości eksploatacyjnych obrabianych przedmiotów [1, 2].

Jednym z celów obróbki nagniataniem jest uzyskanie wysokiego poziomu jakości technologicznej. Pod tym pojęciem można rozumieć stan obrabianej powierzchni, stan mikrostruktury i dokładność wymiarowo - kształtową. W celu uzyskania zadowalającego poziomu jakości technologicznej należy dążyć do doboru odpowiednich parametrów technologicznych (posuw, siła dogniatania, ilość przejść narzędzia nagniatającego, chropowatość powierzchni przed obróbką nagniataniem, rodzaj chłodziwa). Niewłaściwie dobrane parametry technologiczne mogą skutkować uzyskaniem niekorzystnej chropowatości powierzchni z punktu widzenia właściwości użytkowych. Zważając na to, jak wiele czynników ma wpływ na jakość technologiczną powierzchni, zasadnym jest ustalenie parametrów obróbki przy użyciu badań eksperymentalnych. Dają one możliwość doboru najbardziej optymalnych warunków obróbki nagniataniem dla badanego obiektu [4, 6, 7]. W pierwszej kolejności należy ocenić, które parametry technologiczne w sposób istotny wpływają na proces. Do oceny istotności wpływu można stosować różne programy randomizowane, prowadzące do eliminacji z dalszej analizy te parametry, których oddziaływanie na badany obiekt



jest pomijalnie małe. Dobór programu do oceny istotności wpływu oraz ewentualnych odmian wybranego programu jest niezwykle ważne, ponieważ niewłaściwa metoda analizy może doprowadzić do błędnych wniosków.

W rozdziale przedstawiono analizę istotności wpływu na przykładzie programu statycznego randomizowanego blokowo.

## 8.2. Metodyka badań

Obróbce nagniataniem została poddana powierzchnia próbki w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 100 mm x 100 mm x 20 mm (rys. 8.1 i 8.2) wykonanej ze stali 40CrMnMoS8-6. Stal bardzo często stosowana jest do budowy form wtryskowych, posiada bardzo dobre właściwości do obróbki skrawaniem, jednakże nie nadaje się do karbowania, polerowania czy chromowania.



Rys. 8.1. Próbkę po obróbce nagniataniem [5]



Rys. 8.2. Obróbka nagniataniem [5]

Proces nagniatania został przeprowadzony z wykorzystaniem pionowego centrum VM-3, którego producentem jest firma Haas Automation Inc. W uchwycie frezarki zamontowano głowicę nagniatającą DB-3. Kulka nagniatająca wykonana była z węglika krzemu (SiC), jej średnica wynosiła 6,35 mm.

Podczas procesu technologicznego nagniataniem zmieniano parametry technologiczne zgodnie z tab. 8.1. W przeprowadzonym eksperymencie siła docisku  $P$  [N] występowała na czterech poziomach zmienności, natomiast posuw  $f$  [mm/min] na trzech poziomach zmienności. Parametrem stałym w przeprowadzonym doświadczeniu był krok wierszowania, jego wartość była równa 0,04 mm. Jako chłodziwo zastosowano olej maszynowy.

Po realizacji obróbki nagniataniem dokonano pomiarów chropowatości powierzchni za pomocą profilometru Surtronic 3+ dla każdego doświadczenia określonego w tab. 8.1. Przeprowadzono trzykrotny pomiar chropowatości na

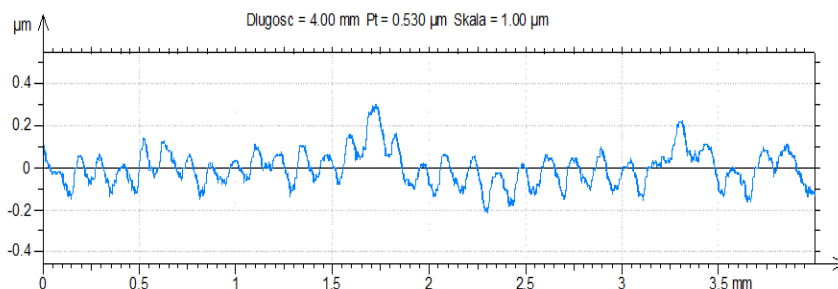
odcinku pomiarowym równym 4 mm. Do przeprowadzenia analizy istotności wpływu parametrów technologicznych z uwzględnieniem i bez uwzględnienia skutków interakcji na parametry chropowatości powierzchni zastosowano program statyczny randomizowany blokowo.

Tabela 8.1. Parametry procesu nagniatania [5]

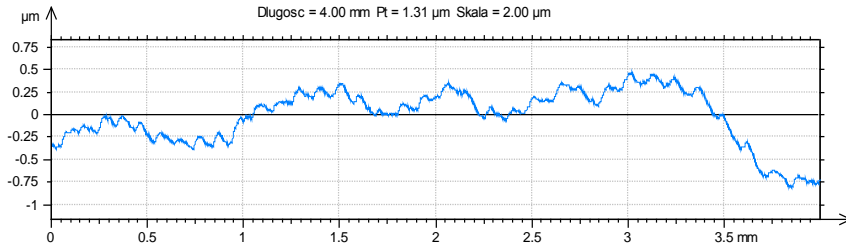
Nr doświadczenia	Siła docisku P [N]	Posuw f [mm/min]
1	20	35
2	20	75
3	20	150
4	60	35
5	60	75
6	60	150
7	100	35
8	100	75
9	100	150
10	150	35
11	150	75
12	150	150

### 8.3. Wyniki badań i ich analiza

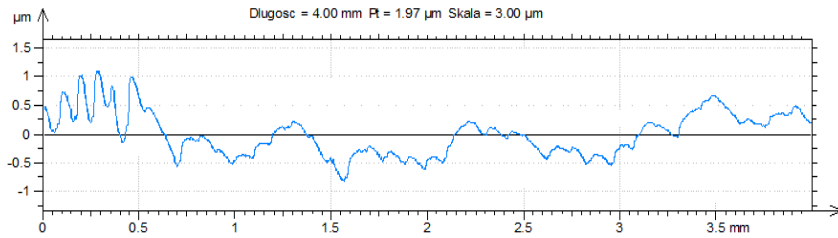
Wyniki z przeprowadzonych pomiarów zostały przedstawione za pomocą wykresów profili pierwotnych po wykonanej obróbce zgodnie z tab. 8.1 wraz z wyliczonymi parametrami chropowatości. Na rys. 8.3-8.14 przedstawiono wybrane profile powierzchni.



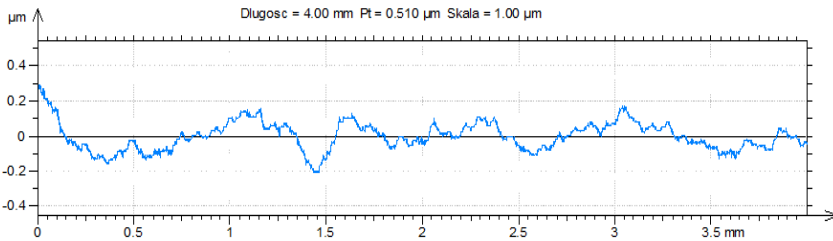
Rys. 8.3. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 1 - siła dogniatania 20 N, posuw 35 mm/min ( $R_a = 0,050 \mu\text{m}$ ) [5]



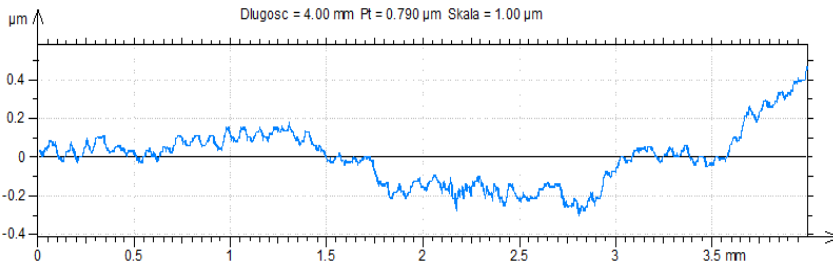
Rys. 8.4. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 2 - siła dogniatania 20 N, posuw 75 mm/min ( $R_a = 0,057 \mu\text{m}$ ) [5]



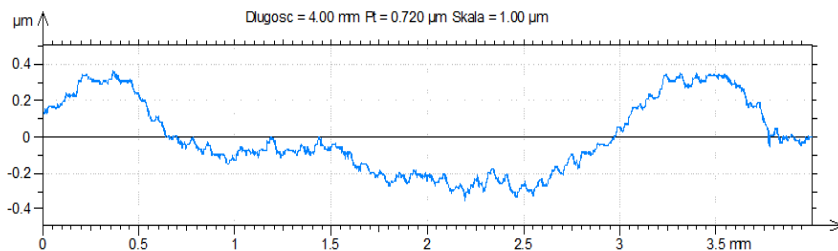
Rys. 8.5. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 3 - siła dogniatania 20 N, posuw 150 mm/min ( $R_a = 0,059 \mu\text{m}$ ) [5]



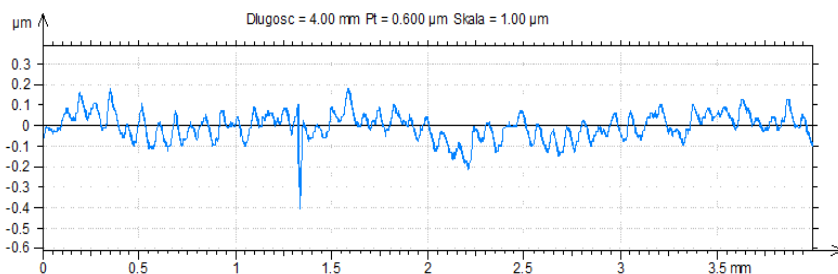
Rys. 8.6. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 4 - siła dogniatania 60 N, posuw 35 mm/min ( $R_a = 0,032 \mu\text{m}$ ) [5]



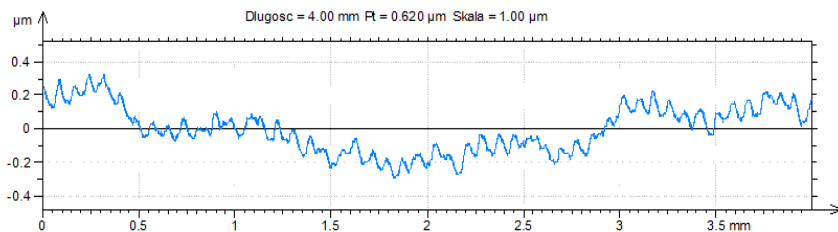
Rys. 8.7. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 5 - siła dogniatania 60 N, posuw 75 mm/min ( $R_a = 0,032 \mu\text{m}$ ) [5]



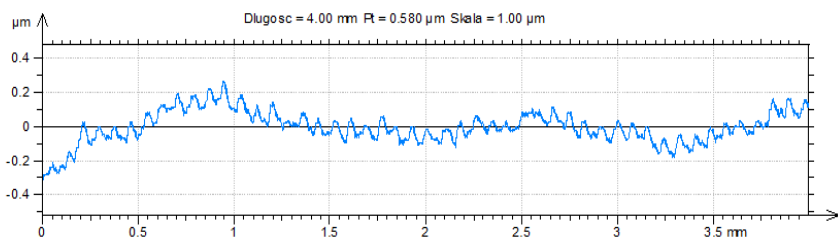
Rys. 8.8. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 6 - siła dogniatania 60 N, posuw 150 mm/min ( $R_a = 0,024 \mu\text{m}$ ) [5]



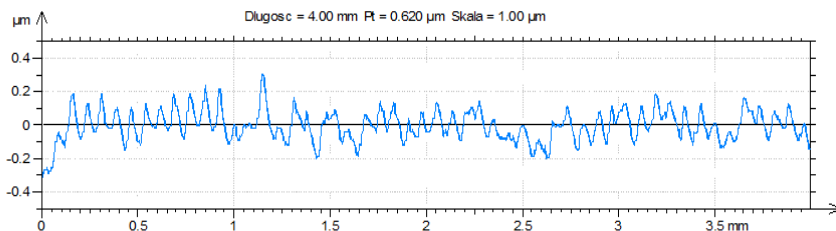
Rys. 8.9. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 7 - siła dogniatania 100 N, posuw 35 mm/min ( $R_a = 0,036 \mu\text{m}$ ) [5]



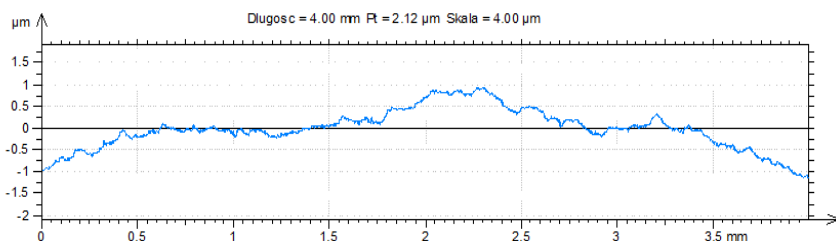
Rys. 8.10. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 8 - siła dogniatania 100 N, posuw 75 mm/min ( $R_a = 0,036 \mu\text{m}$ ) [5]



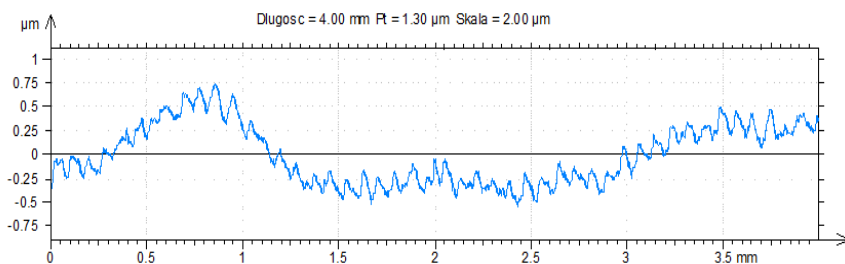
Rys. 8.11. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 9 - siła dogniatania 100 N, posuw 150 mm/min ( $R_a = 0,117 \mu\text{m}$ ) [5]



Rys. 8.12. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 10 - siła dogniatania 150 N, posuw 35 mm/min ( $R_a = 0,056 \mu\text{m}$ ) [5]



Rys. 8.13. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 11 - siła dogniatania 150 N, posuw 75 mm/min ( $R_a = 0,099 \mu\text{m}$ ) [5]



Rys. 8.14. Profil pierwotny powierzchni z doświadczenia 12 - siła dogniatania 150 N, posuw 150 mm/min ( $R_a = 0,072 \mu\text{m}$ ) [5]

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że największą wartość parametru chropowatości  $R_a$  otrzymano przy sile dogniatania równej 100 N i posuwie wynoszącym 150 mm/min. Przy takich wartościach parametrów technologicznych średnie odchylenie nierówności  $R_a$  wynosi około  $0,117 \mu\text{m}$ . Najmniejszą wartość parametru  $R_a$  osiągnięto przy sile docisku wynoszącej 60 N i posuwie równym 150 mm/min ( $R_a = 0,024 \mu\text{m}$ ).

### 8.3.1. Analiza wyników z zastosowaniem programu statycznego randomizowanego blokowego z jednokrotnym powtórzeniem wyników badań

Program statyczny randomizowany blokowo zastosowano w celu określenia istotności wpływu dwóch czynników wejściowych jednocześnie: posuwu i siły nagniatania. Czynnikiem pierwszy - siła dogniatania  $P$  [N] - przyjmowano na czterech poziomach zmienności: 20, 60, 100, 150. Czynnikiem drugi – posuw  $f$  [mm/min] – przyjmowano na trzech poziomach zmienności: 35, 75, 150. Parametrem stałym w procesie był krok wierszowania  $i = 0,04$  mm.

Ocenie istotności wpływu poddano parametry technologiczne na wybrany parametr chropowatości powierzchni po obróbce nagniataniem.

Dokonując oceny istotności wpływu przy zastosowaniu programu statycznego randomizowanego blokowo należy założyć, że analizowane czynniki wejściowe: siła nagniatania i posuw nie wywierają istotnego wpływu na badaną zmienną wynikową (wybrany parametr chropowatości). W kolejnym kroku należy obliczyć wartości testowe  $F_I$  dla siły dogniatania i  $F_{II}$  dla posuwu oraz porównać je z wartościami krytycznymi  $F_{kr}$ , odczytanymi z tablic Fishera - Snedecora. Porównanie wartości testowych z krytycznymi ma na celu stwierdzenie czy postawiona na wstępie hipoteza jest słuszna i wskazanie czy hipotezę należy przyjąć lub odrzucić.

Pierwszym parametrem wyjściowym, który poddano analizie istotności wpływu czynników wejściowych był parametr  $Ra$ . Wartości uzyskane po przeprowadzonej obróbce nagniataniem dla parametru  $Ra$  zebrano w tab. 8.2.

Tabela 8.2. Wartości parametru  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] [5]

Siła dociskania [N]	Posuw [mm/min]						$\overline{Ra}_i$
	35	$\overline{Ra}_{i1}$	75	$\overline{Ra}_{i2}$	150	$\overline{Ra}_{i3}$	
20	0,0505	0,04993	0,064	0,05717	0,077	0,0591	0,0554
	0,049		0,0567		0,035		
	0,0503		0,0508		0,0653		
60	0,0245	0,03237	0,0313	0,03217	0,0217	0,024	0,02951
	0,0315		0,0368		0,0246		
	0,0411		0,0284		0,0257		
100	0,0379	0,03627	0,037	0,0356	0,0347	0,11673	0,06287
	0,0375		0,0342		0,0315		
	0,0334		0,0356		0,284		
150	0,0544	0,0563	0,0995	0,0992	0,0781	0,0716	0,0757
	0,0562		0,0987		0,066		
	0,0583		0,0994		0,0707		
$Ra_j$		0,04372		0,05603		0,06786	0,05587

Dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,5$  i liczbie stopni swobody:  $f_{II} = 3$ ,  $f_m = 6$  wartość krytyczna  $F_{kr}$  dla czynnika wejściowego pierwszego, siły docisku, wynosi  $F_{krl} = 4,7571$ .

Dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,5$  i liczbie stopni swobody:  $f_{III} = 2$ ,  $f_m = 6$  wartość krytyczna  $F_{kr}$  dla czynnika wejściowego drugiego, posuwu, wynosi  $F_{krII} = 5,1433$ .

Wyniki obliczonych wartości  $F_t$  zarówno dla siły docisku jak również dla posuwu nie spełniają zależności  $F_t \geq F_{kr} = F_{(\alpha, f_{II}, f_m)}$ , gdyż obliczone wartości są niższe od wartości krytycznej.

$1,615126 < 4,7571 = F_{(0,5;3;6)}$  oraz  $0,827878 < 5,1433 = F_{(0,5;2;6)}$

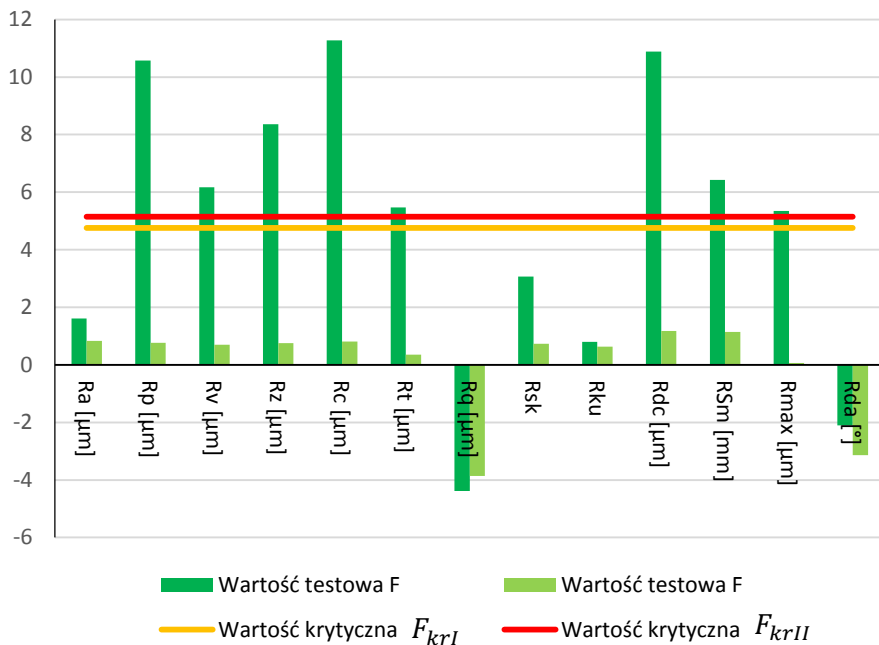
Założoną na początku badania hipotezę należy uznać za słuszną, gdyż w analizowanym zakresie zmienności badane czynniki wejściowe (siła docisku, posuw) nie wywierają istotnego wpływu na parametr Ra.

Po zrealizowaniu wszystkich obliczeń sporządzono zestawienie policzonych wartości testowych i porównano je z wartościami krytycznymi, które znajdują się w tablicach Fishera-Snedecora. Zestawienie to przedstawiono w tab. 8.3.

Tabela 8.3. Wartości testowe obliczone wg programu randomizowanego statycznego blokowego z jednokrotnym powtórzeniem [5]

Parametry wynikowe	Wartość testowa F	
	$F_t$ zmienna wejściowa: siła dociskania P [N]	$F_{II}$ zmienna wejściowa: posuw f [mm/obr]
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,62	0,83
Rp [ $\mu\text{m}$ ]	10,58	0,76
Rv [ $\mu\text{m}$ ]	6,17	0,70
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	8,36	0,75
Rc [ $\mu\text{m}$ ]	11,28	0,81
Rt [ $\mu\text{m}$ ]	5,47	0,35
Rq [ $\mu\text{m}$ ]	-4,38	-3,86
Rsk	3,07	0,73
Rku	0,80	0,63
Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	10,88	1,18
RSm [mm]	6,43	1,14
Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	5,35	0,07
Rda [ $^\circ$ ]	-2,10	-3,14
<b>Wartość krytyczna <math>F_{kr}</math></b>	<b>4,76</b>	<b>5,14</b>

Na podstawie uzyskanych wyników zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami wartości testowych sporządzono wykres (rys. 8.15) obrazujący relacje wartości testowych do wartości krytycznych obu czynników wejściowych.



Rys. 8.15. Wartości testowe w porównaniu do wartości krytycznych dla dwóch czynników wejściowych obliczone wg programu randomizowanego statycznego blokowego z jednokrotnym powtórzeniem doświadczenia [5]

Na podstawie uzyskanych wyników, zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami wartości testowych dla czynnika I - siły docisku, można stwierdzić, że siła docisku ma istotny wpływ w zakresie zmienności 20÷150 N na takie parametry chropowatości jak: Rp, Rv, Rz, Rc, Rt, Rdc, RSm, Rmax. W przypadku Ra, Rq, Rsk, Rku, Rda czynnik ten nie ma istotnego wpływu. Wpływ posuwu w zakresie 35÷150 mm/min należy uznać za nieistotny dla wszystkich obserwowanych parametrów chropowatości.

### 8.3.2. Analiza wyników z zastosowaniem programu statycznego randomizowanego blokowego z wielokrotnym powtarzaniem wyników badań

Program statyczny randomizowany blokowo z uwzględnieniem skutków interakcji został użyty do zbadania istotności wpływu tych samych dwóch czynników wejściowych, analizowanych w podrozdziale 8.3.1, tj. posuwu i siły nagniatania jednocześnie oraz do zbadania istotności interakcji tych dwóch badanych czynników na czynnik wynikowy. Czynnikiem pierwszym – siła nagniatania – przyjmowano również cztery poziomy zmienności: 20, 60, 100, 150 [N]. Czynnikiem drugim – posuw – przyjmowano też trzy poziomy zmienności: 35, 75,



150 [mm/min]. Parametrem stałym, podobnie jak wcześniej, był krok wierszowania  $i = 0,04$  mm. Zmienne wynikowe stanowiły parametry chropowatości powierzchni po obróbce nagniataniem.

Pierwszym czynnikiem wyjściowym, który poddano analizie istotności wpływu parametrów technologicznych z uwzględnieniem skutków interakcji była parametr chropowatości Ra. Wartości uzyskane po przeprowadzonej obróbce nagniataniem dla parametru Ra zebrano w tab. 8.2.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń i w oparciu o schemat przedstawiony w tab. 8.4 zbudowano tablicę wariancji dla parametru Ra (tab. 8.5).

Tabela 8.4. Budowa tablicy wariancji [3]

<b>Źródło zmienności</b>	<b>S</b>	<b>f</b>	<b>s<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>t</sub></b>
Siła docisku (P)	$S_P$	$f_P$	$s_P^2$	$F_P$
Posuw (f)	$S_f$	$f_f$	$s_f^2$	$F_f$
Wzajemne oddziaływanie (P x f)	$S_{Pxf}$	$f_{Pxf}$	$s_{Pxf}^2$	$F_{Pxf}$
Błąd (R)	$S_R$	$f_R$	$s_R^2$	X
Suma	$S$	$f$	X	X

Tabela 8.5. Budowa tablicy wariancji dla parametru chropowatości Ra [ $\mu\text{m}$ ] [5]

<b>Źródło zmienności</b>	<b>S</b>	<b>f</b>	<b>s<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>t</sub></b>
Siła docisku (P)	0,010235	3	0,003412	1,891673
Posuw (f)	0,003497	2	0,001749	0,96963
Wzajemne oddziaływanie (P x f)	0,012674	6	0,002112	1,171224
Błąd (R)	0,043283	24	0,001803	x
Suma	0,069689	35	x	x

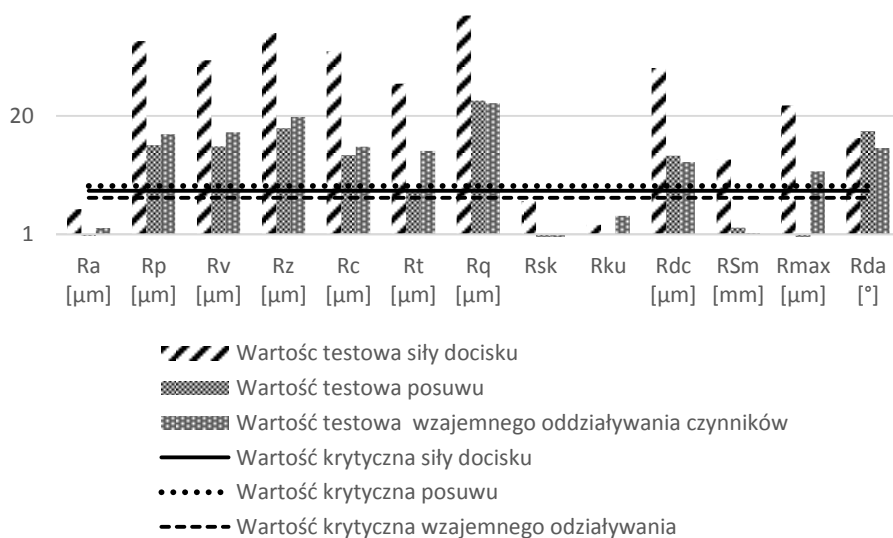
Po dokonaniu obliczeń wartości testowych w odniesieniu do parametru chropowatości Ra stwierdzono, że wzajemne oddziaływanie czynników wejściowych nie wywiera istotnego wpływ na badany czynnik wyjściowy oraz czynniki wejściowe, tj. siła docisku i posuw również nie mają istotnego wpływu na parametr Ra.

Po realizacji pozostałych obliczeń sporządzono tabelę zbiorczą z zestawieniem wszystkich wartości testowych w porównaniu z wartościami krytycznymi pochodzącymi z tablic Fishera-Snedecora (tab. 8.6).

Tabela 8.6. Wartości testowe analizowanych czynników wejściowych [5]

Parametry wynikowe	Wartość testowa $F$		
	$F_D$	$F_f$	$F_{Dxf}$
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,89	0,97	1,17
Rp [ $\mu\text{m}$ ]	133,55	9,63	12,63
Rv [ $\mu\text{m}$ ]	82,13	9,25	13,31
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	164,3	14,77	19,65
Rc [ $\mu\text{m}$ ]	103,51	7,46	9,18
Rt [ $\mu\text{m}$ ]	45,34	2,92	8,29
Rq [ $\mu\text{m}$ ]	255,21	29,62	27,75
Rsk	2,32	0,55	0,76
Rku	1,28	1	1,6
Rdc [ $\mu\text{m}$ ]	67,85	7,35	6,23
RSm [mm]	6,66	1,18	1,04
Rmax [ $\mu\text{m}$ ]	26,28	0,33	4,92
Rda [ $^\circ$ ]	11,48	13,73	8,9
<b>Wartość krytyczna <math>F_{kr}</math></b>	<b>3,01</b>	<b>3,4</b>	<b>2,51</b>

W celu zobrazowania uzyskanych wyników opracowano wykres w skali logarytmicznej (rys. 8.16). Pozwala on czytelnie przedstawić uzyskane wyniki i lepiej zobrazować zaistniałe zależności.

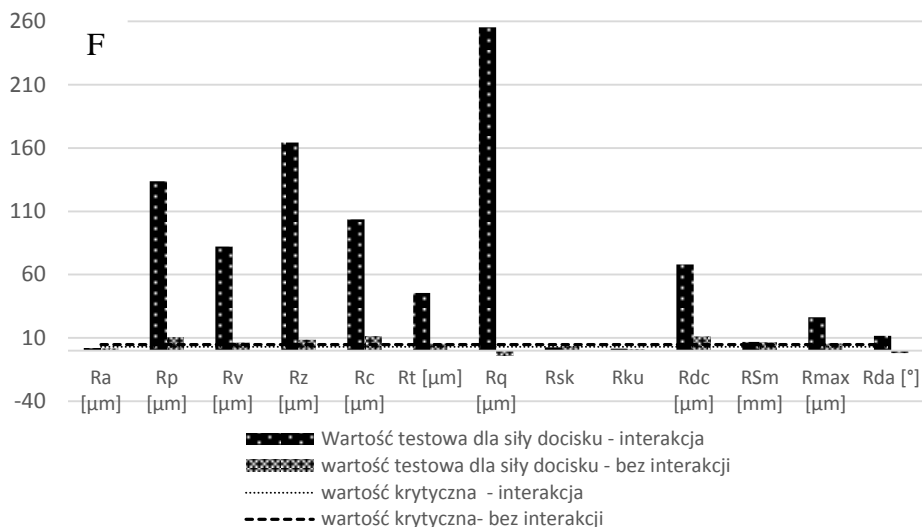


Rys. 8.16. Wartości testowe w porównaniu do wartości krytycznych dla dwóch czynników wejściowych - skala logarytmiczna [5]

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wg programu statycznego randomizowanego blokowego z uwzględnieniem skutków interakcji, zwrócono uwagę, że efekt interakcji pomiędzy siłą docisku a posuwem często wywiera istotny wpływ na parametry chropowatości. Zjawisko to można zauważyć w przypadku analizy takich parametrów chropowatości jak:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_{max}$ ,  $R_{da}$ . Dla tych parametrów analiza istotności przeprowadzona z wykorzystaniem programu statycznego randomizowanego blokowo z jednokrotnym powtórzeniem wyników okazała się niewystarczająca a wyniki mogą być niewiarygodne. Okazało się, że czynniki wejściowe w analizowanym zakresie są od siebie zależne.

W przypadku RSm można zauważyć, że efekt interakcji nie ma istotnego wpływu na uzyskane wartości tego parametru, a istotny wpływ ma siła docisku. Dla takich parametrów jak  $R_a$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  można stwierdzić, że efekt interakcji, siła docisku i posuw nie wywierają istotnego wpływu na uzyskiwane wartości w badanym zakresie zmienności.

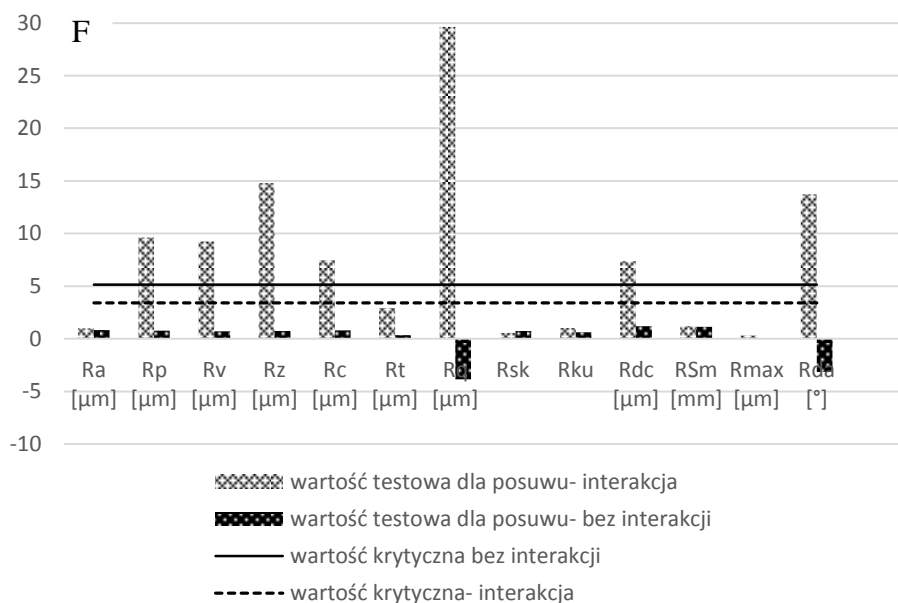
Porównując wyniki uzyskane według obliczeń zgodnie z programem statycznym randomizowanym blokowym z uwzględnieniem skutków interakcji i ten sam program z jednokrotnym powtarzaniem doświadczenia, można zauważyć różnicę pomiędzy uzyskanymi wynikami. Dane te przedstawione są na rys. 8.17 dla czynnika pierwszego – siły docisku.



Rys. 8.17. Wartości testowe i krytyczne przy analizie istotności siły docisku wg obliczeń realizowanych zgodnie z dwoma programami (z uwzględnieniem i bez uwzględnienia skutków interakcji) [5]

Na rys. 8.17 można zauważyć niewielką różnicę pomiędzy wartościami krytycznymi. Słuszne jest jednak stwierdzenie, że w przypadku obu programów, siła docisku wywiera istotny wpływ na te same parametry chropowatości. W przypadku dwóch parametrów chropowatości –  $R_q$  i  $R_{da}$  – wg programu statycznego randomizowanego z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania czynników siła docisku wywiera istotny wpływ na czynniki wyjściowe, ale według programu statycznego randomizowanego blokowego bez analizy interakcji wpływ tego czynnika w badanym zakresie zmienności nie występuje.

Przy zastosowaniu planu statycznego randomizowanego blokowego bez uwzględnienia skutków interakcji uzyskano brak istotnego wpływu posuwu na parametry chropowatości, natomiast w przypadku obliczeń dotyczących wzajemnego oddziaływania czynników, posuw ma istotny wpływ na większość właściwości struktury geometrycznej powierzchni (rys. 8.18). Podobnie jak przy analizie siły docisku na parametry  $R_q$  i  $R_{da}$ , posuw nie wywiera istotnego wpływu wg programu statycznego blokowego bez uwzględnienia skutków wzajemnego oddziaływania czynników (wartość testowa F spada poniżej 0). Jednak wg programu statycznego z uwzględnieniem skutków interakcji posuw wywiera istotny wpływ na parametry chropowatości  $R_q$  i  $R_{da}$ .



Rys. 8.18. Wartości testowe i krytyczne przy analizie istotności posuwu wg obliczeń realizowanych zgodnie z dwoma programami (z uwzględnieniem i bez uwzględnienia skutków interakcji) [5]

## 8.4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników z zastosowaniem programu statycznego randomizowanego blokowego z wielokrotnym powtarzaniem doświadczenia (z uwzględnieniem skutków interakcji) występuje:

- wzajemne oddziaływanie pomiędzy dwoma rozpatrywanymi czynnikami, tj. siłą docisku  $P$  [N] i posuwem  $f$  [mm/min] i ma ono istotny wpływ na parametry chropowatości;
- istotny wpływ interakcji można zauważyć w przypadku takich parametrów chropowatości jak:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_q$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_{max}$ ,  $R_{da}$ . W przypadku  $R_{Sm}$  można zauważyć, że wzajemne oddziaływanie czynników nie ma istotnego wpływu na uzyskane wartości tego parametru, jednak istotny wpływ ma siła docisku;
- nieistotny efekt interakcji, siły docisku i posuwu na uzyskiwane wartości parametrów  $R_a$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ .

Na podstawie otrzymanych wyników z zastosowaniem programu statycznego randomizowanego blokowego z jednokrotnym powtórzeniem doświadczenia stwierdzono, że:

- siła docisku ma istotny wpływ w zakresie zmienności  $20 \div 150$  [N] na takie parametry chropowatości jak:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ ,  $R_{dc}$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_{max}$ . W przypadku  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{da}$  czynnik ten nie ma istotnego wpływu;
- wpływ posuwu w zakresie  $35 \div 150$  [mm/min] należy uznać za nieistotny dla wszystkich obserwowanych parametrów chropowatości.

Z porównania metod wynika, iż nie można bezkrytycznie wnioskować o istotności wpływu w przypadku, gdy czynniki wejściowe mogą być od siebie zależne. W tym przypadku, przy zastosowaniu elementu nagniatającego z materiału, który nie jest stosowany standardowo, właściwe jest stosowanie metod eksperymentalnych przy doborze odpowiednich parametrów technologicznych podlegających sterowaniu. Ustalenie istotności wpływu parametrów technologicznych pozwoliło na wyodrębnienie ważnych parametrów technologicznych z punktu widzenia uzyskania odpowiedniej jakości technologicznej powierzchni.

## Literatura do rozdziału 8.

- [1] Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe, WNT Warszawa 2007.
- [2] Labuda W.: Proces nagniatania jako metoda obróbki wykańczającej czopów wałów pomp okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, październik 2009.

- [3] Pająk E., Wieczorowski K.: Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach, PWN, Warszawa – Poznań 1982.
- [4] Skoczylas A.: Wpływ warunków nagniatania tocznego na chropowatość powierzchni stali C45 po cięciu laserem, Obróbka skrawaniem: synergia nauki z przemysłem: VIII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Szczecin 2014.
- [5] Sobolak A.: Ocena istotności wpływu parametrów procesu nagniatania stali 40CrMnMoS8-6, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.
- [6] Materiały dydaktyczne Politechniki Lubelskiej dotyczące nagniatania naporowego tocznego z dnia 13.05.2015, <http://pldocs.docdat.com/docs/index-198818.html>.
- [7] [www.wtc.wat.edu.pl/images/dydaktyka/katedra/lyszkowski/Nagniatanie\\_naporowe\\_czesci\\_maszyn.pdf](http://www.wtc.wat.edu.pl/images/dydaktyka/katedra/lyszkowski/Nagniatanie_naporowe_czesci_maszyn.pdf), dostęp 11.05.2015, godz. 17.55.

Małgorzata SZCZERBA  
Andrzej DZIERWA

## 9. WPŁYW NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ELEMENTÓW ZE STALI 34CrNiMo6

### 9.1. Wprowadzenie

Procesy tribologiczne przebiegają z największą intensywnością na powierzchni tarcia i w warstwie podpowierzchniowej. Wpływ głębszych warstw maleje w miarę oddalania się w głąb materiału pary trącej. W rozważaniach tribologicznych istotną rolę odgrywa zatem warstwa wierzchnia styku tarciego, którą definiuje się jako warstwę materiału styku tarciego, ograniczoną z jednej strony powierzchnią, a z drugiej granicą wewnątrz materiału, określającą kres zaniku zmian fizykochemicznych i strukturalnych spowodowanych zjawiskami tarciovymi na powierzchni tarcia. Zmiany właściwości warstwy wierzchniej występują już na etapie wytwarzania wężła tarcia w procesie technologicznym. Stąd wyróżnia się warstwy technologiczne i eksploatacyjne. Technologiczna warstwa wierzchnia w procesie tarcia w pewnych jej obszarach na powierzchni i/lub w całej warstwie poddawana jest oddziaływaniom zewnętrznym. Właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej są określone przez jej właściwości fizykochemiczne. Podstawową rolę odgrywa struktura metalograficzna, która określa pozostałe inne właściwości, takie jak [15]:

- mechaniczne (twardość, plastyczność, naprężenia własne, wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne),
- chemiczne (adsorpcja, chemisorpcja, reakcje tribochemiczne, odporność na korozję),
- elektrochemiczne (odporność na korozję elektrochemiczną),
- termofizyczne (przewodność cieplna, rozszerzalność, adhezja),
- elektryczne,
- magnetyczne.

W wyniku mechanicznych oddziaływań podczas procesu tarcia technologiczna warstwa wierzchnia ulega zmianie i tworzy się warstwa eksploatacyjna. W styku tarciovym wyróżnia się trzy podstawowe przemiany: mechaniczne,

cieplne i fizykochemiczne, które przebiegają równocześnie, ale z różną intensywnością.

Zużycie tribologiczne jest rodzajem zużycia spowodowanego procesami tarcia, w którym występuje zmiana masy oraz struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków. Intensywność zużycia tribologicznego zależy przede wszystkim od odporności obszarów tarcia warstw wierzchnich oraz od rodzaju oddziaływania. Procesy zużycia tribologicznego można podzielić między innymi na [2]:

- zużycie ściernie,
- zużycie adhezyjne,
- scuffing,
- zużycie z udziałem utleniania,
- zużycie zmęczeniowe.

*Zużycie ściernie* występuje wtedy, gdy w obszarach tarcia współpracujących elementów występują utwierdzone lub luźne cząstki ścierniwa, albo wystające nierówności twardego materiału [13]. Zużycie ściernie może następować przez:

- ziarna zagnieżdżone we współpracujących powierzchniach,
- luźne pojedyncze ziarna ściernie, w tym również powstające w obszarze tarcia w wyniku utleniania produktów zużycia,
- warstwę ścierną występującą między współpracującymi powierzchniami,
- strumień ścierny, tj. strumień płynu, w którym są zawieszony cząstki ścierniwa,
- ścieranie w środowisku, gdy styk ziarna ze ścieraną powierzchnią następuje pod wpływem sił wykonujących pracę ścierania i zgniatania materiału ścierniwa.

*Zużycie adhezyjne* polega na lokalnym szczepianiu metalicznym (adhezji) powierzchni trących w mikroobszarach odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej, a w szczególności najwyższych wierzchołków chropowatości zbliżonych na odległość działania sił molekularnych i ich rozrywaniu, związanym z odrywaniem cząstek metalu lub jego rozmazywaniem na powierzchni tarcia.

*Scuffing* to rodzaj zużycia, który łączy w sobie elementy zużycia ściernego i adhezyjnego. Polega na szczepieniu się i następnym rozrywaniu połączeń wierzchołków nierówności w mikroobszarach styku. Scuffing powoduje zachwianie równowagi termicznej i mechanicznej w wyniku przerwania warstwy olejowej. Zaczepianie nierówności powierzchni i podwyższenie temperatury w warunkach, gdy warstwa olejowa istnieje, lecz jest zbyt cienka w porównaniu do wysokości nierówności, jest przyczyną gwałtownego zużycia [2].

*Zużycie z udziałem utleniania* występuje w przypadku, gdy intensywność niszczenia powierzchni przez ścieranie jest mniejsza od intensywności tworze-



nia warstw tlenków. Zużycie to polega na niszczeniu warstwy wierzchniej metali i stopów w warunkach tarcia poprzez oddzielanie warstw tlenków utworzonych w strefie tarcia wskutek adsorpcji tlenu oraz warstw roztworów stałych, które powstały w wyniku dyfuzji tlenu w odkształcone plastycznie lub sprężyste obszary metalu. W przypadku tarcia tocznego, zużyciu z udziałem utleniania zawsze towarzyszy zużycie zmęczeniowe.

Istotę *zużycia zmęczeniowego* stanowi miejscowa utrata spójności i związane z tym ubytki masy [2]. Zużycie zmęczeniowe jest spowodowane cyklicznym oddziaływaniem naprężeń kontaktowych w warstwach wierzchnich współpracujących elementów tarciovych a więc zmęczeniem materiału. Ubytek masy następuje po przekroczeniu przez poszczególne mikroobszary materiału granicznej liczby cykli obciążenia i granicy zmęczenia. W zależności od parametrów, rodzaju tarcia oraz od wielkości obciążenia ubytek masy poprzedza powstawanie mikropęknięć, a następnie makropęknięć materiału.

Ślizgowe węzły tarcia jako struktury tribologiczne są funkcją materiałów konstrukcyjnych oraz zastosowanych w procesie wytwarzania technologii. Właściwości tribologiczne węzła trącego są wypadkową konstrukcji węzła i właściwości współpracujących tarciowo powierzchni a pośrednio stanu warstwy wierzchniej elementów węzła ciernego [9]. Stan warstwy wierzchniej można konstituować w procesach technologicznych poprzez dobór odpowiednich materiałów na te elementy i technologii ich obróbki powierzchniowej. Prawidłowo ukształtowana warstwa wierzchnia powinna zapewnić optymalne właściwości tribologiczne w czasie eksploatacji, a przez to trwałość i niezawodność konstrukcji. Ze względu na różnorodność warunków pracy, obciążenie węzłów ślizgowych i rodzaju występującego zużycia bardzo ważny jest wybór rodzaju obróbki powierzchniowej. Obecnie znanych jest wiele metod wytwarzania warstw powierzchniowych chroniących przed zużyciem tribologicznym [1, 8, 11, 12]. Różnorodność warunków pracy i obciążenia węzłów ślizgowych, konstrukcja i rodzaj dominującego rodzaju zużycia jest podstawą wyboru materiału i rodzaju obróbki powierzchniowej elementów węzła [10, 16].

Zużywaniu w maszynach powinno się przeciwdziałać zawsze [7, 14]. Jest ono bowiem przyczyną mniejszej trwałości elementów maszyn a czasem prowadzi do ich awarii (zatarcie). Przeciwdziałamy zużyciu, starając się je albo wyeliminować, albo ograniczyć do minimum. Przeciwdziałanie to realizowane jest już w procesie konstruowania poprzez opracowanie odpowiedniej geometrii węzłów ciernych, dobór materiałów i sposobów smarowania, umożliwiających minimalizację zużycia.

Innym sposobem zapobiegania nadmiernemu zużyciu jest zastosowanie odpowiednich technologii, wśród nich możemy wyróżnić:

- obróbkę cieplną (hartowanie powierzchniowe: płomieniowe, indukcyjne i laserowe);

- obróbkę cieplno-chemiczną (nawęglanie, azotowanie utwardzające, cyjanowanie, cyjanonasiarczanie kąpielowe, azotonasiarczanie gazowe, chromowanie dyfuzyjne, tytanowanie dyfuzyjne);
- obróbkę plastyczną (np. dogniatanie, śrutowanie, młotkowanie) [4-6];
- nanoszenie powłok (np. niklowanie chemiczne, fosforowanie, napawanie) [3].

Jednym ze sposobów opóźniania procesów zużycia może być również obróbka nagniataniem ślizgowym, stąd też celem prezentowanej pracy było określenie wpływu procesu nagniatania ślizgowego na tribologiczne właściwości stali 36NiCrMo16 w warunkach tarcia suchego.

## 9.2. Metodyka badań

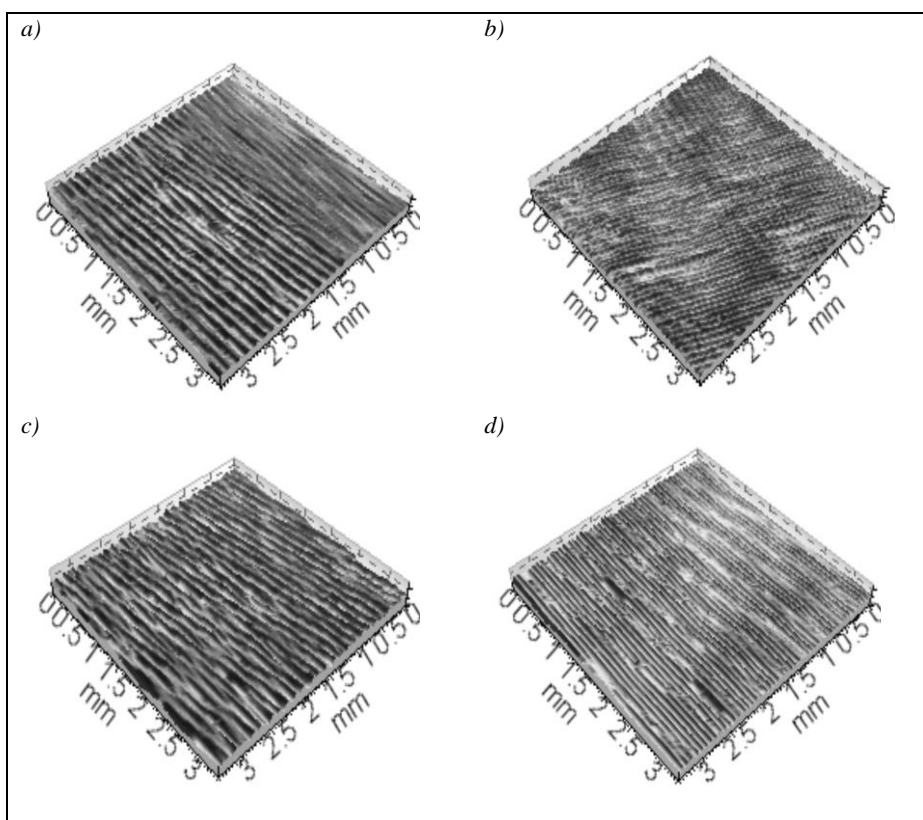
Badania zostały przeprowadzone przy użyciu testera tribologicznego kulka/trzpień – tarcza T-11 (rys. 9.1). Materiał tarczy stanowiły próbki wykonane ze stali 34CrNiMo6 ulepszonej cieplnie do twardości  $40\pm 2$  HRC. Materiał kulki o średnicy  $d=6,35$  mm stanowiła stal 100Cr6 o twardości 60 HRC. Tarcze stalowe zostały poddane obróbce nagniatania ślizgowego na tokarce TUJ560M, gdzie różnicując wartości siły docisku narzędzia w zakresie 70-170 N uzyskano średnie arytmetyczne odchylenie nierówności powierzchni  $S_a$  na poziomie niższym niż  $0,5 \mu\text{m}$ .



Rys. 9.1. Widok testera tribologicznego T-11

Obciążenie podczas badań tribologicznych wyniosło 10 N. Testy wykonano przy różnych średnicach tarcz (10 i 20 mm), stosując identyczną prędkość obro-

tową  $n=300$  obr/min oraz czas testów  $t = 30$  min., dzięki czemu dla każdej średnicy uzyskano różne wartości prędkości ślizgowej  $v$ . Widoki izometryczne powierzchni przed badaniami przedstawiono na rys. 9.2, natomiast w tab. 9.1 zaprezentowano wybrane parametry topografii powierzchni przyjętych do badań. W trakcie badań rejestrowano siłę tarcia, natomiast po przeprowadzeniu badań wielkość zużycia określono przy pomocy profilometru optycznego Talysurf CCI Lite. Po zeskanowaniu powierzchni, generowano profile w kierunku prostopadłym do śladów zużycia, dzięki czemu możliwym było wyznaczenie pola powierzchni zużycia badanych tarcz. Obliczono również przebytą drogę tarcia, zużycie objętościowe oraz współczynniki tarcia. W trakcie testów produkty zużycia znajdujące się w komorze testera, a pojawiające się wskutek współpracy elementów były usuwane na bieżąco przy pomocy sprężonego powietrza.



Rys. 9.2. Widoki izometryczne próbek przyjętych do badań a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]

Tabela 9.1. Wybrane parametry topografii powierzchni próbek przyjętych do badań [17]

Próbka	Parametry SGP				
	Sa, $\mu\text{m}$	Ssk	Sku	Str	Sal, mm
<b>R1</b>	0,28	-0,764	4,68	0,026	0,039
<b>R2</b>	0,15	-0,720	4,26	0,039	0,029
<b>R3</b>	0,10	-0,605	3,51	0,034	0,021
<b>R4</b>	0,20	-0,701	3,56	0,011	0,015

### 9.3. Omówienie wyników badań

W tab. 9.2 zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań. Dla każdej powierzchni określono zużycie objętościowe VD, dystans niezbędny do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia DSS oraz średnią wartość siły tarcia uzyskaną po osiągnięciu stabilnej wartości DSS –  $F_{av}$ . Zużycie objętościowe obliczono jako:

$$VD = \pi d S \quad (9.1)$$

gdzie: d – średnica drogi tarcia (10 i 20 mm),

S – pole powierzchni zużycia próbki (szary obszar na profilach zużycia zaprezentowanych na rys. 9.3 i 9.4).

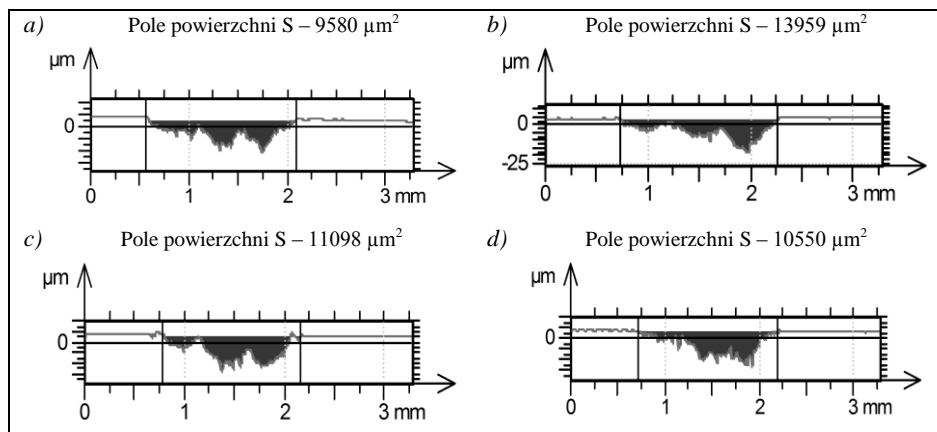
Rysunki 9.5 i 9.6 przedstawiają wykresy sił tarcia badanych par. Z kolei na rys. 9.7 i 9.8 zaprezentowano obliczone współczynniki tarcia. W przypadku średnicy tarcia  $d=10$  mm prędkość ślizgania wynosiła 0,157 m/s, natomiast przy średnicy  $d=20$  mm prędkość ta wyniosła odpowiednio 0,314 m/s. Droga tarcia w przypadku średnicy tarcia  $d=10$  mm wynosiła 282,6 m natomiast przy średnicy  $d=20$  mm było to odpowiednio 565,2 m.

W przypadku średnicy tarcia  $d=10$  mm największym zużyciem objętościowym charakteryzowała się próbka R2. Zużycie to wyniosło  $0,415 \text{ mm}^3$ .

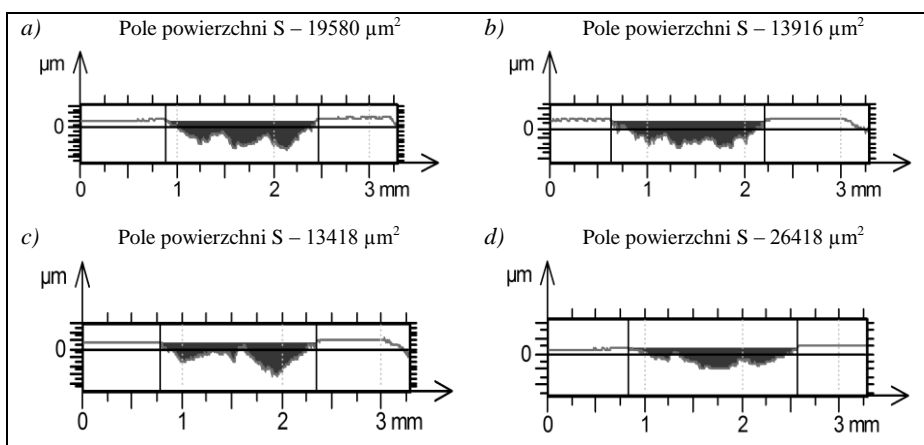
Tabela 9.2. Wyniki przeprowadzonych badań [17]

Próbka	d=10 mm			d=20 mm		
	VD, $\text{mm}^3$	DSS, m	$F_{av}$ , N	VD, $\text{mm}^3$	DSS, m	$F_{av}$ , N
<b>R1</b>	0,280	26,4	7,60	1,230	16,22	7,92
<b>R2</b>	0,415	9,71	8,56	0,877	20,04	8,09
<b>R3</b>	0,367	10,8	7,92	0,844	9,96	7,76
<b>R4</b>	0,358	14,1	7,82	1,559	29,68	7,99

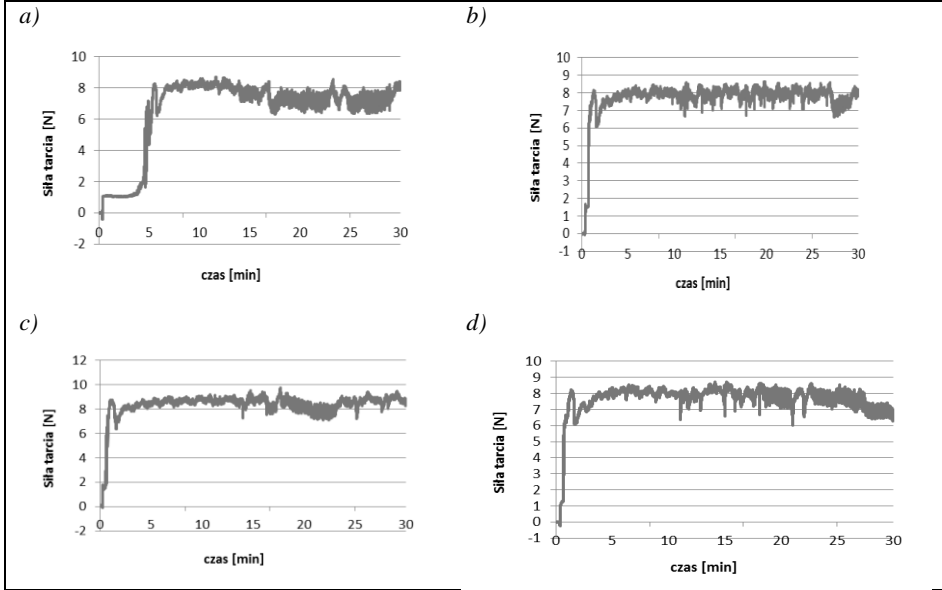
W tym przypadku (R2) otrzymano najkrótszą drogę do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia ( $DSS=9,71$  m) oraz najwyższą średnią wartość siły tarcia  $F_{av}$  na poziomie 7,92 N. Najmniejszym zużyciem objętościowym charakteryzowała się próbka R1 ( $VD=0,28$  mm<sup>3</sup>), dla której uzyskano wyraźnie najdłuższą drogę tarcia do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia ( $DSS=26,4$  m) oraz najniższą średnią wartość siły tarcia  $F_{av}$  równą 7,60 N. Próbka R1 charakteryzowała się najwyższą wartością parametru Sa ( $0,28$  μm) – co może być przyczyną stosunkowo długiej drogi niezbędnej do osiągnięcia stabilnej wartości siły tarcia.



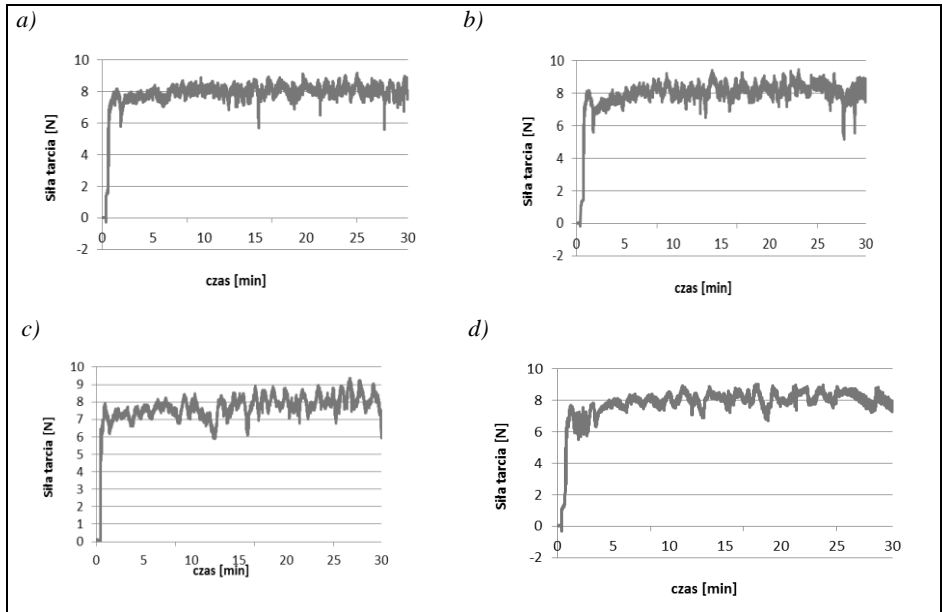
Rys. 9.3. Pole powierzchni zużytej dla średnicy 10 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]



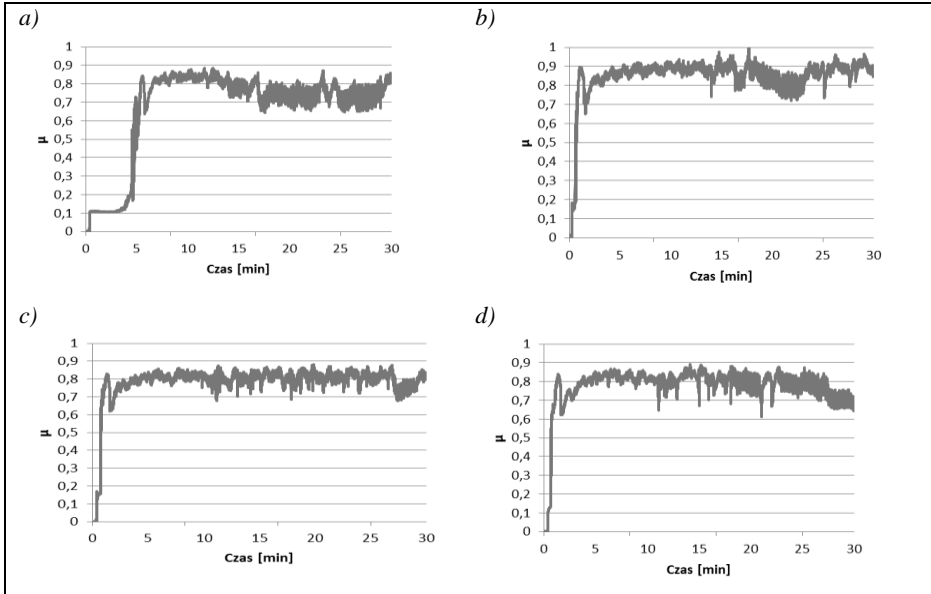
Rys. 9.4. Pole powierzchni zużytej dla średnicy 20 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]



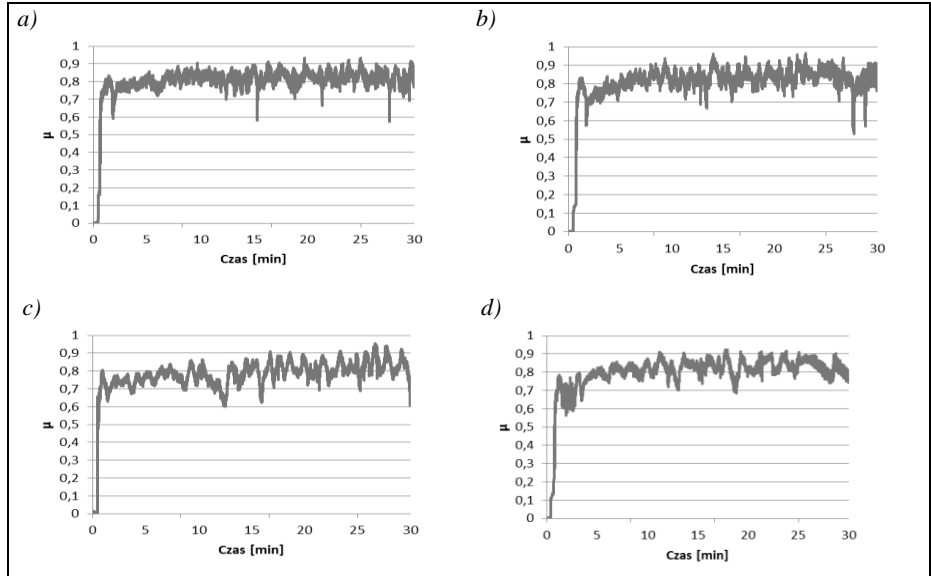
Rys. 9.5. Wykresy sił tarcia dla średnicy 10 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]



Rys. 9.6. Wykresy sił tarcia dla średnicy 20 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]

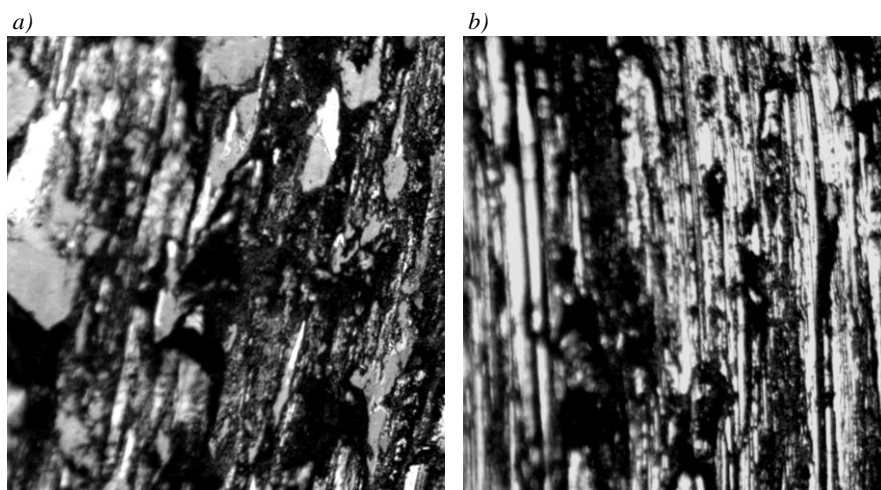


Rys. 9.7. Współczynniki tarcia dla średnicy 10 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]



Rys. 9.8. Współczynniki tarcia dla średnicy 20 mm: a) R1, b) R2, c) R3, d) R4 [17]

W przypadku średnicy  $d=20$  mm największe zużycie objętościowe zaobserwowano w odniesieniu do wariantów o większej nierówności powierzchni (R1 i R4). Zużycie to wyniosło odpowiednio  $1,23$  i  $1,56$   $\text{mm}^3$ . Dla powierzchni z największą wartością zużycia objętościowego R4 zaobserwowano również najdłuższą drogę do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia. Z kolei dla powierzchni charakteryzującej się najmniejszą wartością parametru Sa zarówno zużycie objętościowe, droga do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia, jak i średnia wartość siły tarcia przyjmowały wartości najmniejsze. Największą średnią wartość siły tarcia zaobserwowano w przypadku powierzchni R2 i była to wartość na poziomie  $8,09$  N. Widoki mikroskopowe powierzchni z najwyższą (a) i najniższą (b) wartością zużycia objętościowego przedstawiono na rys. 9.9.



Rys. 9.9. Widoki mikroskopowe (zoom x 200) próbek po pracy: a) R4 ( $d=20\text{mm}$ ), b) R1 ( $d=10\text{mm}$ ) [17]

W przypadku średnicy  $d=10$  mm współczynnik tarcia najwyższe wartości przyjmował dla powierzchni R2 ( $\mu=0,9$ ), z kolei wartość najniższą zaobserwowano dla próbki R1 i było to odpowiednio  $\mu=0,75$ . W przypadku średnicy  $d=20$  mm współczynnik tarcia przyjmował zbliżone wartości dla poszczególnych próbek. Najwyższą wartość zaobserwowano dla powierzchni R2 ( $\mu=0,88$ ), z kolei wartość najniższą dla próbki R3 i było to odpowiednio  $\mu=0,83$ .

Zużycie kulek użytych w przeprowadzonych badaniach tribologicznych było pomijalnie małe. Tym niemniej przeprowadzono próbę analizy ich zużycia przy pomocy interferometru światła białego Talysurf CCI Light, które wykazało podobne zużycie poszczególnych kulek (wzajemne różnice zamykały się w 10% - owym przedziale).



## 9.4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych stwierdzono, że sposób ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni w wyniku procesu nagniatania ślizgowego może wpływać na wielkość zużycia elementów wykonanych ze stali 34CrNiMo6.

Badania przeprowadzono przy dwóch prędkościach ślizgania 0,157 m/s oraz 0,314 m/s. W przypadku większej prędkości ślizgowej wyższą wartość zużycia objętościowego zaobserwowano dla powierzchni o większej wartości średniego arytmetycznego odchylenia nierówności powierzchni - Sa. Tendencji tej nie zaobserwowano przy prędkości ślizgowej  $v=0,157$  m/s.

Dłuższą drogę niezbędną do uzyskania stabilnej wartości siły tarcia zaobserwowano w przypadku bardziej chropowatych powierzchni R1 i R4. Z kolei najwyższa wartość średnia siły tarcia w przeprowadzonych badaniach miała miejsce w przypadku powierzchni R2 (niezależnie od prędkości ślizgowej), a więc dla wariantu gdzie średnie arytmetyczne odchylenie nierówności powierzchni Sa wynosiło 0,15  $\mu\text{m}$ .

Badania przeprowadzone w warunkach tarcia suchego pokazały, że dominującym rodzajem zużycia współpracujących par było zużycie ściernie. Jednakże w przypadku niektórych próbek zauważono również ślady zużycia adhezyjnego. Badania przeprowadzono dla wybranych wariantów wykończenia powierzchni, więcej informacji o badanym procesie zużycia można by uzyskać przy zastosowaniu metodyki eksperymentu. Wiąże się to z oceną i wyborem parametrów istotnie wpływających na proces zużycia w analizowanym przypadku, określeniem zakresu zmienności tych parametrów oraz doбором odpowiedniego planu prowadzenia eksperymentu.

### Literatura do rozdziału 9.

- [1] Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali – podstawy, urządzenia, technologie, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Dobrzański L.A.: Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library, 2009, Vol.001, [dostęp 02 sierpień 2015 r.].
- [3] Dobrzański L.A., Polok M., Adamiak M.: Struktura i własności przeciwzużyciowych powłok przeznaczonych do pracy w podwyższonej temperaturze, naniesionych na podłoże ze stali narzędziowej do pracy na gorąco, Materiały konferencyjne – 11th International Scientific Conference – Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Gliwice-Zakopane 2005, s. 139-142.
- [4] Dzierwa A.: Charakterystyka właściwości tribologicznych stali 36NiCrMo16 po procesie kulowania, Mechanik, R. 87, nr 11CD, 2014, s. 41-49.
- [5] Dzionk, S. Ścibiorski, B. Waszczur, P.: Nagniatanie ślizgowe stali hartowanej Cf53 kulkami ceramicznymi, Mechanik, R. 87, nr 11CD, 2014, s. 60-69.

- [6] Gryglicki, R. Kukielka, L.: Kształtowanie przeciwzużyciowej warstwy wierzchniej słupów nośnych form wtryskowych metodą nagniatania ślizgowego, *Mechanik*, R. 87, nr 11CD, 2014, s. 111-117.
- [7] Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Instytut Technologii i Eksploatacji, Warszawa 2007.
- [8] Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej, Politechnika Łódzka, Łódź 2000.
- [9] Lubas J.: Właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej stali modyfikowanej borem w warunkach tarcia mieszanego *Czasopismo techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 7-M/2008, s. 295-301.
- [10] Lubas J.: Wpływ sposobu przygotowania powierzchni czopa na współpracę z panwią łożyska ślizgowego w zespołach środków transportowych. Raport końcowy, Kraków 2001.
- [11] Michalczewski R., Szczerek M.: Wpływ powłok przeciwzużyciowych na elementy trące na nośność warstwy smarowej, *Tribologia*, nr 1, 2000, s.111-119.
- [12] Nakonieczny A.: Powierzchniowe obróbki wyrobów metalowych, IMP, Warszawa 2000.
- [13] Nosal S.: Analiza pojęć związanych z zacieraniem adhezyjnym. Nowa definicja zacierania, *MOTROL*, 11c, 2009, s. 141-150.
- [14] Nosal S.: *Tribologia, wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [15] Płaza S., Margielewski L., Celichowski G.: *Wstęp do tribologii i tribochemia*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2005.
- [16] Sęp J., Zielecki W.: Preliminary evaluation of the application possibility of bearing journal with two component surface layer. *Tribologia*, nr 3, 1995, s. 811-819.
- [17] Szczerba M.: *Badanie właściwości tribologicznych stali 34CrNiMo6*, praca dyplomowa, Rzeszów 2015.

## Podsumowanie

Stosowanie metod statystycznych w praktyce ma kluczowe znaczenie w sytuacji wprowadzania nowych rozwiązań inżynierskich oraz w przypadku doskonalenia istniejących metod wytwarzania. Planowanie badań eksperymentalnych oraz analiza uzyskanych wyników badań z wykorzystaniem odpowiednich metod statystycznych ma wiele zalet. Programy statyczne randomizowane umożliwiają selekcję czynników istotnie wpływających na badany proces. Wyeliminowanie czynników nieistotnych we wczesnej fazie badań, zwykle na etapie badań wstępnych, pozwala ograniczyć czas i zmniejszyć koszty prowadzonych badań. W praktyce przemysłowej na realizowane procesy wpływa szereg czynników, natomiast siła ich oddziaływania jest różna. Po dokonaniu oceny istotności wpływu poszczególnych czynników wejściowych, do dalszej analizy wprowadzamy tylko te, których wpływ jest znaczący na określony wynik.

Programy statyczne randomizowane można stosować również w sytuacji, gdy badane czynniki wejściowe są od siebie zależne. Uzyskujemy wtedy odpowiedź o wzajemnej interakcji. Mimo często wysokiej automatyzacji produkcji, ciągle bardzo aktualnym problemem jest niewystarczająca niezawodność człowieka w procesach wytwarzania. Występowanie zakłócenia w procesie ze strony operatora obrabiarki można ocenić z wykorzystaniem odpowiednich metod statystycznych, przykładowo programu statycznego randomizowanego blokowo.

W celu określenia wpływu wybranych parametrów na badany proces można zastosować plany badawcze w szerokim lub interesującym nas zakresie zmienności czynników wejściowych. W wyniku tak zrealizowanego eksperymentu istnieje możliwość uzyskania adekwatnych zależności matematycznych między parametrami sterowanymi a właściwościami wyjściowymi. Na podstawie otrzymanych równań można wyznaczyć wartości czynników wyjściowych, podstawiając inne wartości czynników wejściowych niż badane, ale pozostające w zakresie ich zmienności. W oparciu o otrzymane adekwatne równania regresji można przeprowadzić optymalizację i zidentyfikować parametry, przy których funkcja osiągnie ekstremum ze względu na wybrane kryterium.

W praktyce planowanie eksperymentu z wykorzystaniem metod statystycznych dosyć łatwo zastosować w badaniach technologicznych, ponieważ czynniki wejściowe stanowią parametry technologiczne, które można ustawić na określoną wartość. Trudniej zrealizować eksperyment, jeśli czynnik wejściowy stanowi wynik innego procesu lub często kilku procesów, przykładowo twardość materiału lub chropowatość powierzchni, ale w ten sposób można ocenić wpływ wybranych cech warstwy wierzchniej materiału na właściwości eksploatacyjne analizowanych wyrobów.

## Streszczenie

W monografii przedstawiono zagadnienia dotyczące planowania eksperymentu. Dokonano analizy istotności wpływu parametrów technologicznych procesu nagniatania stali 40CrMnMoS8-6 z wykorzystaniem programów randomizowanych kompletnie i blokowo. Te same programy wykorzystano do oceny istotności wpływu czynnika ludzkiego i technologicznego. Do oceny wpływu parametrów technologicznych na wybrane parametry chropowatości powierzchni zastosowano plany PS/DK 3<sup>2</sup>, PS/DK 2<sup>3</sup> oraz Hartley'a. Plan PS/DK 3<sup>2</sup> wykorzystano również do oceny wpływu twardości materiału i chropowatości powierzchni na charakterystyki tribologiczne węzłów ciernych. Analizie poddano również topografię powierzchni po nagniataniu powierzchni brązu oraz stali X37CrMnV51. Określono także zużycie elementów ciernych po zastosowaniu zróżnicowanej obróbki wykończeniowej powierzchni.

## Summary

The monograph presents the issues concerning the experiment planning. The analysis of the impact significance regarding the technological parameters of burnishing process of steel 40CrMnMoS8-6 with the usage of randomized programs completely and block was performed. The same programs were used to assess the impact significance of human factor and technology parameter. To evaluate the effect of technological parameters on the selected surface roughness parameters the plans PS/DK 3<sup>2</sup>, PS/DK 2<sup>3</sup> and Hartley were used. The plan PS/DK 3<sup>2</sup> was also used to assess the effect of material hardness and surface roughness on tribological characteristics of friction assembly. The surface topography after burnishing process of bronze and steel X37CrMnV51 was also analyzed. Wear of the friction elements after different surface finishing application was described, too.