

TRL III Wytypowanie geometrii ostrza dla trzech rodzajów średnic obrabianego materiału w kontekście dostępnych na rynku materiałów, parametrów procesowych wytwarzania ostrza, materiału wykonania ostrza, analizy sił skrawania i odkształceń plastycznych powierzchni w trakcie procesu nagniatania w odniesieniu do kształtu ostrza.

Analiza dostępnych prętów stalowych w zakresie parametrów wytrzymałościowych oraz antykorozyjnych.

Aby przeprowadzić szczegółową analizę, skupimy się na części z wymienionych wcześniej gatunkach stali, tj.: **S355J2, 42CrMo4+QT, 34CrNiMo6+QT, C45+QT, AISI 431, AISI 316L, X2CrNiMoN22-5-3**. Rozważymy kluczowe parametry wytrzymałościowe i odporność na korozję, które będą miały kluczowy wpływ na wybór odpowiednich materiałów dla danego zastosowania.

Parametry które będziemy poddawać analizie to:

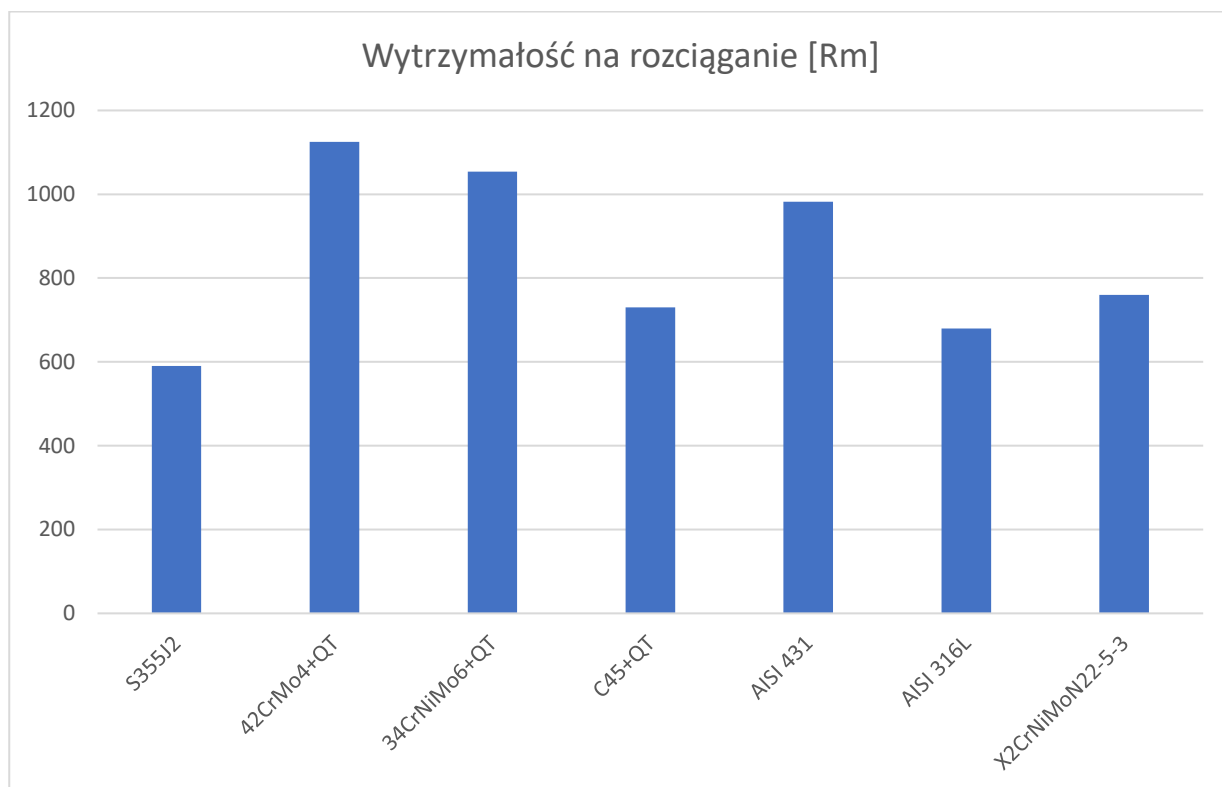
1. Granica plastyczności (Re lub Rp0,2): Minimalne naprężenie, przy którym materiał zaczyna się trwale odkształcać.
2. Wytrzymałość na rozciąganie (Rm): Maksymalne naprężenie, jakie materiał może wytrzymać przed zerwaniem.
3. Twardość: Wyrażona w skali HB, wskazuje na odporność na zużycie.
4. Udarowość (KCV): Energia absorbowana podczas łamania materiału w próbie Charpy'ego.
5. Odporność na korozję: Kwalifikacja odporności na korozję w zależności od składu chemicznego i struktury materiału.
6. Odporność na zmęczenie: Zdolność do wytrzymywania zmiennych obciążeń bez uszkodzenia.

Poniżej zamieszczamy tabele porównawczą parametrów wytrzymałościowych dla wybranych przykładowych materiałów zamawianych w celach produkcyjnych i badawczych.

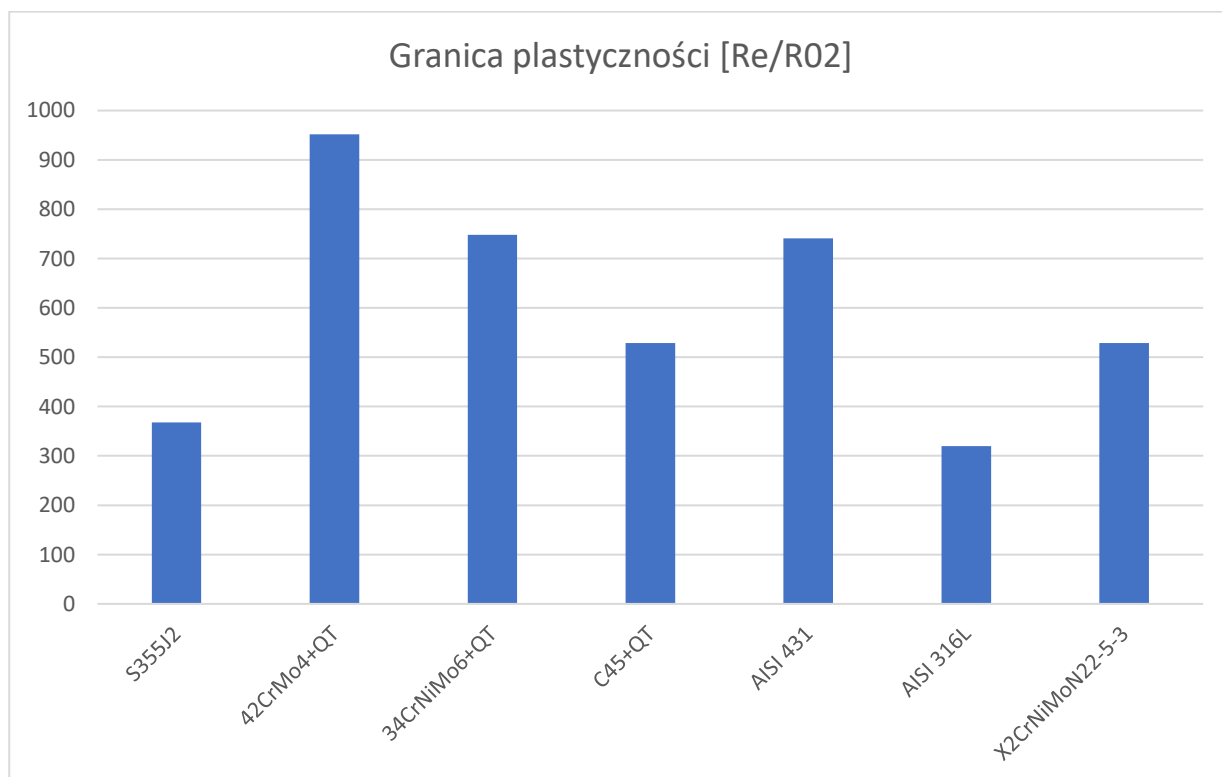
Tabela 1 Porównanie parametrów wybranych gatunków stali.

Gatunek	Wytrzymałość na rozciąganie [Rm]	Granica plastyczności [Re/R02]	Udarowość [J]	Odporność na korozję	Wytrzymałość zmęczeniowa	Twardość HB
S355J2	590	368	95	Niska	Umiarkowana	240
42CrMo4+QT	1125	952	121	Niska	Wysoka	302
34CrNiMo6+QT	1054	748	104	Niska	Bardzo wysoka	272
C45+QT	730	529	56	Niska	Średnia	238
AISI 431	982	741	120	Wysoka	Wysoka	260
AISI 316L	680	320	155	Bardzo wysoka	Średnia	247
X2CrNiMoN22-5-3	760	529	206	Bardzo wysoka	Bardzo wysoka	246

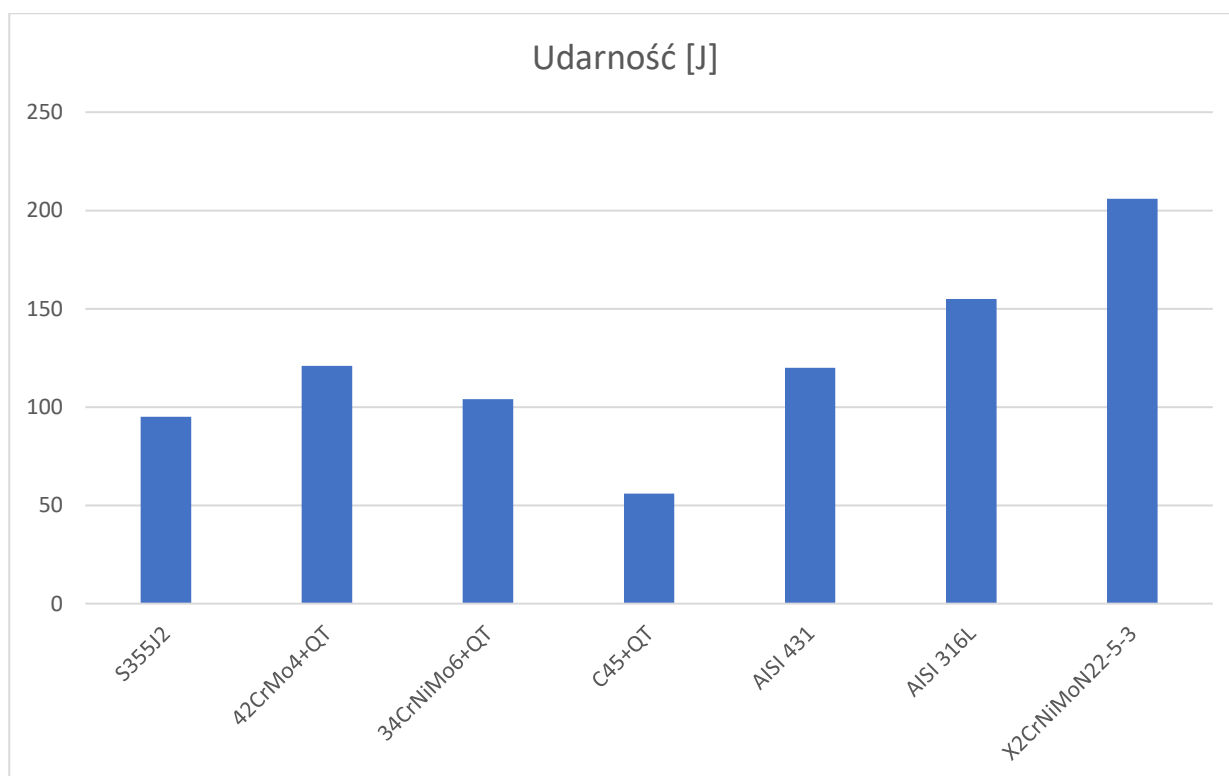
Aby zobrazować różnice występujące pomiędzy poszczególnymi gatunkami stali poniżej przedstawiamy wykresy porównujące poszczególne parametry.



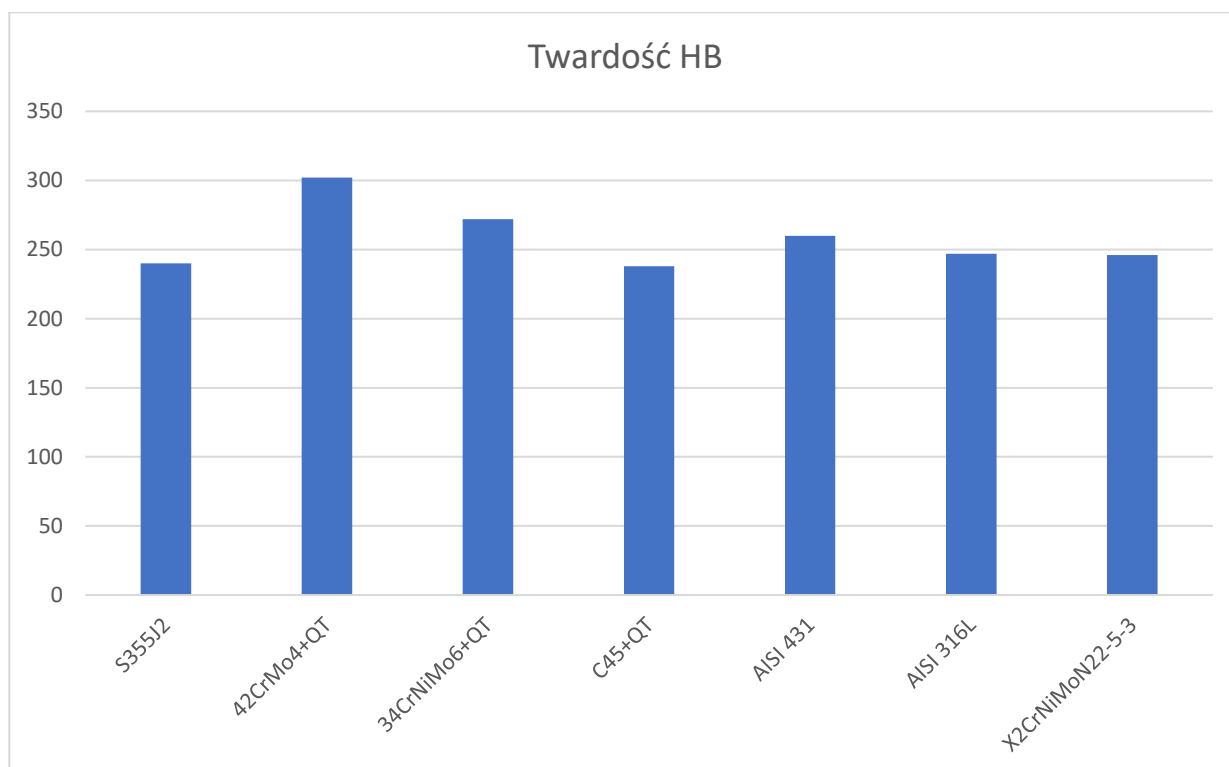
Wykres 1 Porównanie wytrzymałości na rozciąganie poszczególnych gatunków stali.



Wykres 2 Porównanie umownej lub wyraźnej granicy plastyczności poszczególnych gatunków stali.



Wykres 3 Porównanie udarności poszczególnych gatunków stali.



Wykres 4 Porównanie twardości poszczególnych gatunków stali.

Analizując powyższą tabelę oraz wykresy na jej podstawie zrobione można dojść do następujących wniosków:

1. Wytrzymałość mechaniczna:

- 34CrNiMo6+QT i 42CrMo4+QT oferują najwyższą wytrzymałość mechaniczną, co czyni je idealnym wyborem w zastosowaniach wymagających dużej wytrzymałości.

- S355J2 oraz C45+QT charakteryzują się niższymi parametrami, odpowiednimi dla mniej wymagających zastosowań.
- 2. Odporność na korozję:
 - AISI 316L i X2CrNiMoN22-5-3 są najlepszym wyborem w środowiskach korozyjnych.
 - AISI 431 oferuje dobrą odporność na korozję, szczególnie w środowisku wodnym, co może być wystarczające dla umiarkowanych wymagań.
- 3. Udarność i odporność na zmęczenie:
 - 34CrNiMo6+QT wyróżnia się najwyższą udarnością oraz bardzo wysoką odpornością na zmęczenie, co czyni go idealnym do dynamicznych i zmiennych obciążeń.
 - 42CrMo4+QT również wykazuje dobrą kombinację tych parametrów.
- 4. Twardość:
 - 42CrMo4+QT i 34CrNiMo6+QT mają najwyższą twardość, co przekłada się na lepszą odporność na zużycie.

Analiza kształtu i geometrii ostrza skrawającego

Analiza kształtu i geometrii ostrza skrawającego jest kluczowym aspektem przy doborze narzędzi skrawających, które będą wykorzystywane w połączeniu z procesem nagniatania. Optymalizacja tych parametrów będzie miała wpływ na efektywność skrawania, jakość powierzchni detali oraz kontrolę sił podczas obróbki co jest istotnym czynnikiem podczas dalszych badań. W szczególności uwzględnia się trzy główne parametry: kąt natarcia, promień zaokrąglenia ostrza oraz kształt powierzchni przyłożenia.

1. Kąt natarcia

Kąt natarcia (znany również jako kąt przyłożenia) to kąt, pod którym ostrze narzędzia styka się z obrabianą powierzchnią. Jest to jeden z najważniejszych parametrów, który wpływa na jakość skrawania, efektywność usuwania materiału oraz żywotność narzędzia. Kąt natarcia określa również rodzaj sił, które będą oddziaływać na narzędzie i materiał w trakcie skrawania.

Rodzaje kątów natarcia:

- Kąt natarcia dodatni ($\alpha > 0^\circ$):

- Używany w narzędziach skrawających do lekkiego skrawania.
- Wpływa na łatwiejsze usuwanie materiału, co zmniejsza opory skrawania.
- Zmniejsza siłę skrawania, ale może prowadzić do szybszego zużycia narzędzia przy twardszych materiałach.
- Zastosowanie: obrabianie materiałów o niskiej twardości, np. węgiel, stal węglowa, aluminium.
- Kąty natarcia dodatnie są powszechnie stosowane w ostrzach skrawających do lekkich operacji skrawania.

- Kąt natarcia zerowy ($\alpha = 0^\circ$):

- Zwykle stosowany w narzędziach do skrawania materiałów średniej twardości, gdzie głównym celem jest uzyskanie trwałości narzędzia przy równoczesnym zachowaniu wytrzymałości na obciążenia.
- Takie ustawienie powoduje, że ostrze nie jest ustawione pod kątem, co zmniejsza obciążenie narzędzia, ale zwiększa tarcie.

- Kąt natarcia ujemny ($\alpha < 0^\circ$):

- Stosowany głównie w narzędziach do skrawania twardych materiałów, takich jak stale narzędziowe, kompozyty czy ceramika.
- Pozwala na uzyskanie bardzo wysokiej trwałości ostrza, minimalizując zużycie narzędzia, ale wiąże się z większymi siłami skrawania.
- Kąty natarcia ujemne są często wybierane w trudnych operacjach skrawania, szczególnie przy twardych materiałach.

2. Promień zaokrąglenia ostrza

Promień zaokrąglenia ostrza odnosi się do zaokrąglenia krawędzi roboczej narzędzia. Ma to duży wpływ na jakość powierzchni obrabianej, jak również na wytrzymałość narzędzia. Zbyt mały promień może prowadzić do szybszego zużycia narzędzia, podczas gdy zbyt duży promień może pogorszyć jakość wykańczanej powierzchni.

Rodzaje promieni zaokrąglenia ostrza:

- Mały promień zaokrąglenia ($r < 0,5$ mm):

- Stosowany w narzędziach skrawających do dokładnego wykańczania powierzchni.
- Zapewnia precyzyjne cięcie i dokładność wymiarową, ale może prowadzić do szybszego zużycia narzędzia przy dużych obciążeniach.
- Zastosowanie: obrabianie stali węglowych, stopów lekkich, materiałów o średniej twardości.

- Średni promień zaokrąglenia ($r \approx 0,5\text{--}1,5$ mm):

- Jest najbardziej uniwersalnym rozwiązaniem w narzędziach skrawających, szczególnie w narzędziach ogólnych.
- Umożliwia długoterminową efektywność pracy przy zachowaniu przyzwoitej jakości powierzchni.
- Zastosowanie: ogólne operacje skrawania, w tym cięcie wałów, okrągłych części.

- Duży promień zaokrąglenia ($r > 1,5$ mm):

- Stosowany do obróbki zgrubnej, gdzie celem jest usuwanie dużych ilości materiału przy minimalnym zużyciu narzędzia.
- Takie ostrza są mniej podatne na uszkodzenia, ale mają większe trudności w uzyskaniu wysokiej jakości powierzchni.
- Zastosowanie: obróbka materiałów twardych, narzędzia do cięcia stali nierdzewnej, materiałów kompozytowych.

3. Kształt powierzchni przyłożenia

Kształt powierzchni przyłożenia, czyli geometrii kontaktu ostrza z obrabianym materiałem, wpływa na równomierność i siłę przyłożenia narzędzia do materiału, co bezpośrednio przekłada się na jakość powierzchni oraz efektywność obróbki.

Rodzaje kształtów powierzchni przyłożenia:

- Powierzchnia przyłożenia płaska (prosta):

- Jest to najczęściej stosowana geometria w narzędziach skrawających, w których krawędź robocza narzędzia ma stały kontakt z obrabianą powierzchnią.
- Zapewnia równomierne rozłożenie sił skrawania, ale wymaga odpowiedniego doboru kąta natarcia i promienia zaokrąglenia.
- Zastosowanie: obrabianie elementów o dużej powierzchni, takich jak bloki stalowe, wały.

- Powierzchnia przyłożenia w kształcie łuku (krzywoliniowa):

- Stosowana w narzędziach do skrawania, które mają bardziej złożony kształt. Krzywoliniowa powierzchnia kontaktu narzędzia z materiałem pozwala na bardziej efektywne przekazywanie sił skrawania i minimalizuje ryzyko powstawania mikropęknięć w materiale.
- Jest to geometryczna cecha wykorzystywana w ostrzach do skrawania detali o nietypowych kształtach (np. wały, krzyżówki).
- Powierzchnia przyłożenia wielokątna:
 - Jest stosowana w bardziej zaawansowanych narzędziach skrawających, takich jak narzędzia skrawająco-nagiatające, w których kontakt z materiałem nie jest jednorodny. Pozwala na uzyskanie bardziej złożonych efektów obróbczych, takich jak poprawa twardości powierzchni oraz zmniejszenie chropowatości.
 - Stosowane w narzędziach do skrawania i nagiatania, jak np. w narzędziach z rolkami nagiatającymi.

W zależności od materiału, kształtu detalu oraz rodzaju operacji obróbczej, dobór odpowiednich parametrów ostrza skrawającego ma kluczowe znaczenie dla efektywności procesu. Dla wałów o różnych średnicach, które będą obrabiane w procesie skrawania, a następnie nagiatane, dobieramy geometrię ostrza w następujący sposób:

1. Dla wałów o małych średnicach (do celów badań przyjęliśmy średnicę 100mm):
 - Kąt natarcia - Dla wałów o mniejszych średnicach, zaleca się stosowanie kąta natarcia dodatniego w zakresie od 5° do 10° . Kąt ten umożliwia skuteczne usuwanie materiału przy minimalnym zużyciu narzędzia.
 - Promień zaokrąglenia - Ze względu na małą średnicę wału, odpowiedni promień zaokrąglenia ostrza to 0,2 mm do 0,5 mm, co zapewnia precyzyjne skrawanie i odpowiednią jakość powierzchni.
 - Kształt powierzchni przyłożenia - Powierzchnia przyłożenia powinna być płaska, aby uzyskać równomierne i kontrolowane skrawanie, co jest ważne przy obróbce małych średnic.
2. Dla wałów o średnich średnicach (do celów badań przyjęliśmy średnicę 300mm):
 - Kąt natarcia - Dla wałów średniej wielkości, kąt natarcia powinien wynosić 5° do 8° . Kąt ten pozwala na optymalizację sił skrawania, zmniejszając ryzyko szybszego zużycia narzędzia przy średniej twardości materiałów.
 - Promień zaokrąglenia - Odpowiedni promień zaokrąglenia ostrza to 0,5 mm do 1 mm, co pozwala na uzyskanie dobrej jakości powierzchni, a także zapewnia odpowiednią trwałość narzędzia przy obróbce materiałów średniej twardości.
 - Kształt powierzchni przyłożenia - Powierzchnia przyłożenia powinna być lekko krzywoliniowa, aby umożliwić lepsze rozkładanie sił skrawania oraz zapewnić wyższą trwałość narzędzia przy średnich średnicach wałów.
3. Dla wałów o dużych średnicach (do celów badań przyjęliśmy średnicę 600mm):
 - Kąt natarcia - Dla dużych średnic wałów, należy zastosować kąt natarcia zerowy lub lekko ujemny (w zakresie od 0° do -5°). Taki kąt pomaga w kontrolowaniu dużych sił skrawania, zmniejszając ryzyko uszkodzenia ostrza przy wysokich obciążeniach.
 - Promień zaokrąglenia - W tym przypadku odpowiedni promień zaokrąglenia to 1 mm do 2 mm, co zapewnia odporność na duże siły skrawania i wydłuża trwałość narzędzia w trudnych warunkach obróbczych.

- Kształt powierzchni przyłożenia - Powierzchnia przyłożenia powinna być wielokątna lub lekko krzywoliniowa, aby lepiej rozprzodzać siłę skrawania i minimalizować ryzyko uszkodzeń materiału w czasie skrawania i nagniatania.

Uwzględniając powyższe wytyczne wytypowaliśmy odpowiednie parametry dla narzędzi z uwzględnieniem rozmiaru badanego wału.

Dobór parametrów procesowych wytwarzania ostrza oraz dobór materiału wykonania.

Wybór parametrów procesowych wytwarzania ostrza tokarskiego jest kluczowy, ponieważ decyduje o jego trwałości, efektywności pracy i jakości obrabianej powierzchni. Szczególne znaczenie mają następujące aspekty:

1. Prędkość skrawania i posuw podczas obróbki ostrza.
Prędkość skrawania i posuw wpływa na trwałość ostrza oraz jakość powierzchni obrabianego materiału. Wybór prędkości zależy od materiału ostrza
2. Precyzja wykonania ostrza i jego powierzchni roboczej.
Precyzja wykonania ostrza wpływa na stabilność procesu skrawania i jakość wykończenia powierzchni. Szczególną uwagę należy zwrócić na powierzchnię przyłożenia, promień zaokrąglenia oraz tolerancję wymiarowe.
3. Dokładność wymiarowa i tolerancje wytwarzania.
Tolerancje wykonania ostrza wpływają na dokładność obróbki i jednorodność procesu. Przy doborze parametrów należy uwzględnić: prostopadłość powierzchni ostrza względem uchwytu narzędzia, symetrię krawędzi tnącej oraz jednorodność promienia zaokrąglenia.

Podsumowując, dokładne dopasowanie parametrów procesowych, takich jak prędkość skrawania, kąt natarcia czy precyzja wykonania powierzchni roboczej, ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia optymalnych wyników zarówno w procesie skrawania, jak i późniejszego nagniatania.

Wybór materiału ostrza skrawającego jest kolejnym z najważniejszych kroków w procesie projektowania i wytwarzania narzędzia tokarskiego. W zależności od rodzaju obrabianego materiału (np. stal konstrukcyjna, stal nierdzewna, stal stopowa) oraz warunków pracy (prędkość skrawania, obciążenia, temperatura), dobiera się odpowiedni materiał ostrza. Wybieramy ten krok z pośród poniżej opisanych szczegółowe właściwości i zastosowania różnych materiałów.

1. Węglik spiekane
W przypadku spieków węglowych (węglików spiekanych), charakteryzują się one wyjątkowo wysoką twardością, sięgającą nawet 1800 HV, co czyni je odpornymi na ścieranie. Są one zbudowane z węgla wolframu spiekane z kobaltem jako spoiwem, co zapewnia stabilność podczas pracy w wysokich temperaturach, dochodzących do 1000°C. Dzięki temu doskonale nadają się do obróbki twardych materiałów, takich jak stal stopowa (np. 42CrMo4+QT) oraz stal narzędziowa. Ich zastosowanie jest szczególnie korzystne podczas obróbki wałów wykonanych z materiałów konstrukcyjnych, takich jak S355J2 czy C45+QT, a także ze stali nierdzewnych, np. AISI 316L.
Ważnym elementem w przypadku tych materiałów są powłoki ochronne, które zwiększają ich wydajność. Powłoki TiN (azotek tytanu) zmniejszają tarcie, a TiAlN (azotek tytanu i

aluminium) zwiększa odporność na działanie wysokich temperatur, co umożliwia pracę przy dużych prędkościach skrawania, wynoszących nawet 300 m/min.

2. Stopy metaliczne

Stopy metaliczne są lekkimi i jednocześnie bardzo wytrzymałymi materiałami, które powstają w wyniku połączenia takich metali jak kobalt, chrom, molibden i nikiel. Ich główną cechą jest wyjątkowa odporność na korozję oraz zmęczenie materiałowe, co czyni je idealnym wyborem w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Dzięki temu znajdują zastosowanie w środowiskach, gdzie narzędzia są narażone na intensywne zużycie i jednocześnie wymagana jest redukcja ich masy.

3. Stale narzędziowe szybko tnące

Jeśli chodzi o stal narzędziową szybko tnącą (HSS), jest to materiał o umiarkowanej twardości, która wynosi do 850 HV, z dobrą wytrzymałością mechaniczną. Stal HSS, ze względu na zawartość molibdenu, chromu i wolframu, jest łatwa do ostrzenia i regeneracji. Narzędzia wykonane z tego materiału są odporne na temperatury do 600°C, co sprawia, że są odpowiednie do obróbki materiałów o średniej twardości, takich jak S355J2 i C45+QT. Jest to również rozwiązanie bardziej ekonomiczne w porównaniu do innych materiałów narzędziowych, choć ograniczone do niższych prędkości skrawania, nieprzekraczających 80–100 m/min.

4. Ceramika

Natomiast ceramika jest materiałem, który wyróżnia się najwyższą twardością (do 2500 HV) i odpornością na działanie temperatur do 1200°C. Z tego względu jest niezastąpiona w obróbce materiałów trudnoskrawalnych, takich jak nierdzewne stale AISI 316L i AISI 431. Narzędzia ceramiczne są jednak kruche, co wymaga ostrożności w trakcie pracy, zwłaszcza przy wykańczaniu powierzchni, gdzie kluczowe jest zachowanie precyzji i odporności na zużycie.

W przypadku wałów o różnych średnicach dobór materiału ostrza powinien być dostosowany do ich wymiarów i specyfiki obróbki. Dla wałów o średnicy 100 mm zaleca się stosowanie spieków węglowych z powłoką TiAlN, co umożliwia pracę przy wysokich prędkościach skrawania i zapewnia dobrą jakość wykończenia powierzchni. Wały o średnicy 300 mm najlepiej obrabiać za pomocą ostrzy wykonanych ze stali HSS lub spieków węglowych, które zapewniają uniwersalność i możliwość pracy w średnich warunkach obciążeniowych. Natomiast wały o dużych średnicach, takich jak 600 mm, wymagają zastosowania ceramiki lub stopów metalicznych, które są w stanie wytrzymać większe obciążenia i zapewnić stabilność wymiarową przy wolniejszych prędkościach skrawania.

Wybór procesu obróbki cieplnej ostrza i narzędzia skrawającego.

W procesie produkcji narzędzi skrawających i ostrzy kluczowym etapem jest dobór odpowiedniego procesu obróbki cieplnej. Proces ten ma na celu modyfikację właściwości mechanicznych i struktury materiału narzędzia, co pozwala na uzyskanie parametrów niezbędnych w trudnych warunkach pracy. W zależności od wybranego materiału oraz wymagań związanych z daną operacją obróbką, można zastosować następujące procesy:

1. Hartowanie – to proces cieplny, który polega na podgrzaniu materiału do temperatury austenityzacji, a następnie na szybkim ochłodzeniu w odpowiednim medium (np. oleju, wodzie lub gazie). Głównym celem tego procesu jest zwiększenie twardości materiału poprzez przemianę struktury w martenzyt. W przypadku narzędzi skrawających hartowanie pozwala na znaczną poprawę odporności na ścieranie, co jest kluczowe przy obróbce materiałów trudnoskrawalnych. Jednak nadmierna twardość może prowadzić do kruchości, dlatego proces hartowania często łączy się z odpuszczaniem, co nazywane jest ulepszeniem cieplnym.
2. Odpuszczanie – przeprowadza się po hartowaniu, aby zredukować naprężenia wewnętrzne w materiale i zwiększyć jego odporność na pękanie. Proces ten polega na podgrzaniu zahartowanego materiału do temperatury poniżej temperatury austenityzacji i utrzymaniu go przez określony czas, a następnie na powolnym chłodzeniu. Efektem jest poprawa właściwości mechanicznych, takich jak udurowienie i elastyczność, co zapobiega uszkodzeniom narzędzia w trakcie pracy przy dużych obciążeniach.
3. Azotowanie – jest procesem termochemicznym, który polega na wzbogaceniu warstwy powierzchniowej materiału w azot w wysokiej temperaturze (zwykle 500–580°C). Tworzy się wówczas bardzo twarda warstwa azotków, która zwiększa odporność powierzchniową na zużycie oraz poprawia odporność na korozję. Azotowanie jest szczególnie korzystne w przypadku narzędzi pracujących w warunkach intensywnego tarcia i wysokich temperatur, gdyż zapewnia doskonałą stabilność wymiarową.
4. Wyżarzanie odprężające – proces ten stosuje się w celu usunięcia naprężeń wewnętrznych powstałych w trakcie obróbki mechanicznej, hartowania lub innych procesów technologicznych. Materiał jest podgrzewany do temperatury 500–600°C, a następnie chłodzony w kontrolowany sposób. Dzięki temu zwiększa się stabilność wymiarowa narzędzi oraz poprawia ich żywotność podczas pracy.
5. Obróbka cieplno-chemiczna – w tym procesie wprowadzane są jednocześnie węgiel i azot do warstwy powierzchniowej materiału. Zwiększa on twardość powierzchniową oraz odporność na zużycie i korozję. Jest to proces stosowany głównie dla stali narzędziowych, gdzie wymagana jest wysoka trwałość powierzchni ostrza.

Każdy z powyższych procesów jest dobierany w zależności od gatunku materiału, geometrii narzędzia oraz specyficznych wymagań technologicznych. Dla narzędzi wykorzystywanych w obróbce wałów o średnicach od 100 mm do 600 mm zaleca się połączenie hartowania i odpuszczania, aby osiągnąć kompromis między twardością a odpornością na pękanie. W przypadku szczególnie trudnych warunków pracy warto rozważyć dodatkowe procesy, takie jak azotowanie, dla poprawy odporności na zużycie i korozję.

Szczegółowa analiza sił skrawania

W procesie obróbki skrawaniem siły generowane na narzędziu mają kluczowe znaczenie dla stabilności procesu, jakości powierzchni oraz trwałości narzędzia. Wpływ na siły skrawania mają takie czynniki, jak geometria ostrza, materiał obrabianego wału, prędkość skrawania oraz głębokość skrawania. Niniejsza analiza koncentruje się na wpływie promienia zaokrąglenia ostrza oraz średnicy obrabianego wału na wielkość sił skrawania.

1. Wpływ promienia zaokrąglenia ostrza
Promień zaokrąglenia narzędzia wpływa na sposób odkształcenia materiału w strefie skrawania. Większy promień zaokrąglenia skutkuje większym oporem materiału i generuje

wyższe siły skrawania. Mniejszy promień umożliwia łatwiejsze cięcie, ale może obniżać trwałość ostrza.

2. Wpływ średnicy wału

Średnica wału determinuje ilość materiału usuwanego podczas skrawania i wielkość strefy kontaktu między narzędziem a obrabianym przedmiotem. Wzrost średnicy wału prowadzi do wzrostu oporu skrawania i sił generowanych w procesie.

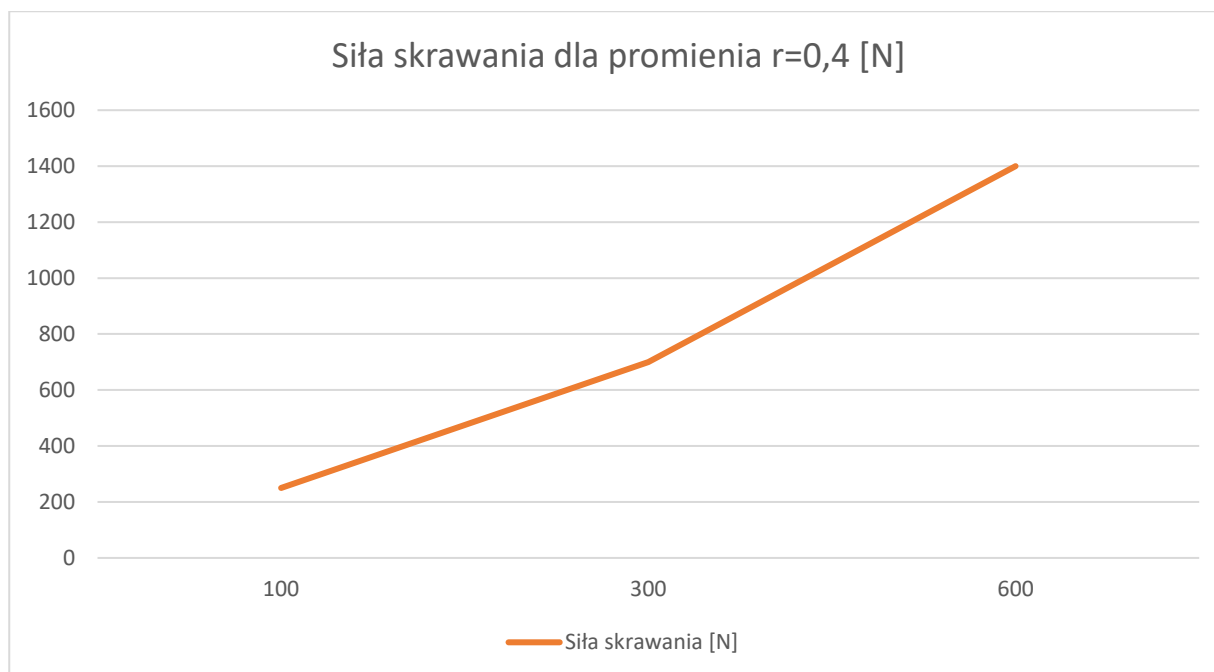
3. Stabilność procesu

Zwiększone siły skrawania mogą powodować wibracje i odkształcenia narzędzia oraz obrabiarki, co negatywnie wpływa na jakość powierzchni i żywotność narzędzi. Dlatego optymalizacja geometrii narzędzia i parametrów procesowych jest kluczowa.

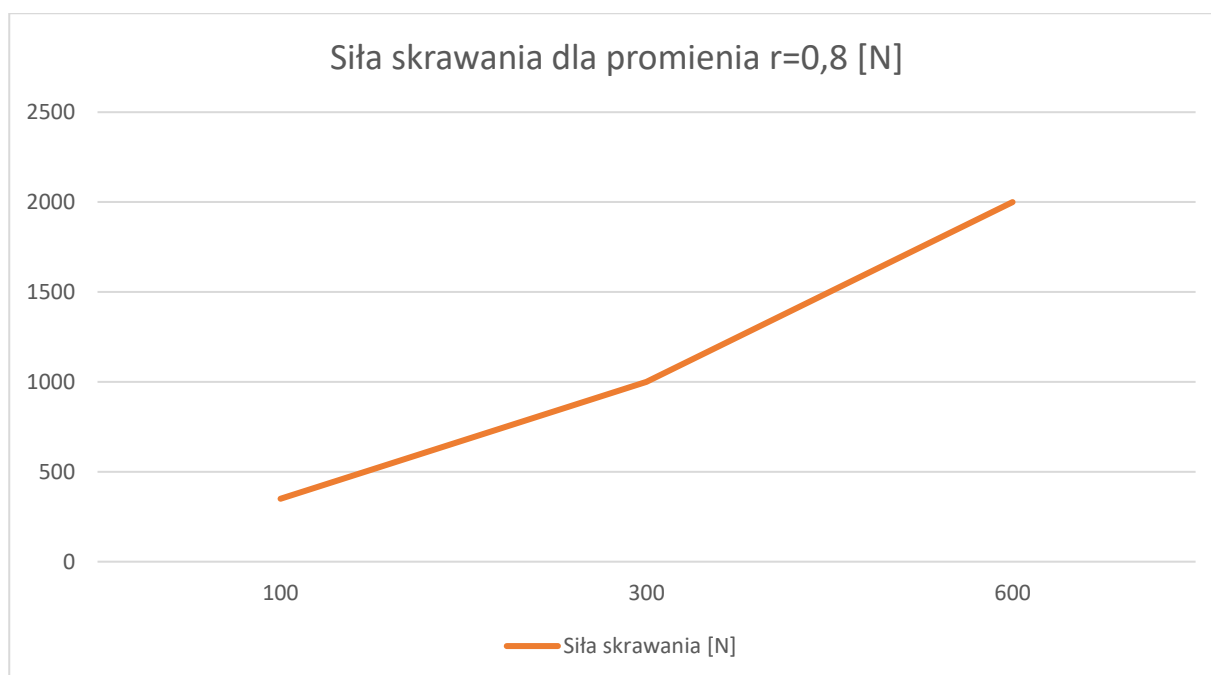
Poniżej przedstawiono tabelę wartości sił skrawania w zależności od promienia zaokrąglenia narzędzia oraz średnicy wału. Oraz przedstawiono wartości siły na wykresie.

Tabela 2 Wartość sił skrawania w zależności od promienia zaokrąglenia narzędzia i średnicy wału.

Promień zaokrąglenia (r) [mm]	Średnica wału (d) [mm]	Siła skrawania [N]
0,4	100	250
0,4	300	700
0,4	600	1400
0,8	100	350
0,8	300	1000
0,8	600	2000



Wykres 5 Przedstawienie sił skrawania dla promienia $r=0,4$ mm



Wykres 6 Przedstawienie sił skrawania dla promienia $r=0,8\text{mm}$

Dobór narzędzi skrawających oraz jego zwymiarowanie do trzech rodzajów średnic.

Dostosowanie narzędzi skrawających do różnych średnic wałów jest kluczowym elementem zapewniającym efektywność i jakość procesu obróbki. W zależności od wielkości obrabianych detali, narzędzia skrawające muszą spełniać różne wymagania w zakresie wytrzymałości, precyzji oraz stabilności. Poniżej opisano szczegóły którymi się kierowaliśmy podczas doboru narzędzi skrawających dla trzech kategorii średnic wałów.

1. Małe średnice

Dla wałów o średnicy do 300 mm, wymagania dotyczące narzędzi skrawających koncentrują się głównie na precyzji i lekkości konstrukcji narzędzi. W tej kategorii narzędzia muszą spełniać poniższe wymagania podstawowych parametrów.

- kąt natarcia – dla małych średnic kąt natarcia powinien wynosić od 5° do 10° . Taki kąt zapewnia odpowiednią efektywność skrawania przy zachowaniu kontroli nad siłą skrawania.
- promień zaokrąglenia – w przypadku małych średnic należy stosować mniejsze promienie zaokrąglenia ostrza (np. 0,2 mm do 0,4 mm), co pozwala na precyzyjne cięcie w miejscach wymagających szczególnej dokładności.
- kształt powierzchni przyłożenia – powierzchnia przyłożenia narzędzia powinna być stosunkowo płaska i mała, aby umożliwić precyzyjne usuwanie materiału z małych detali.

2. Średnie średnice

Wały o średnicy od 301 mm do 600 mm wymagają narzędzi o zwiększonej wytrzymałości, ponieważ proces skrawania wiąże się z większymi obciążeniami i wyższymi prędkościami skrawania. W tej kategorii narzędzia muszą spełniać poniższe wymagania podstawowych parametrów.

- kąt natarcia – kąt natarcia dla średnich średnic powinien wynosić od 10° do 15° , co zapewnia lepszą stabilność narzędzia i skuteczne odprowadzanie ciepła z miejsca skrawania.

- promień zaokrąglenia – dla średnich średnic zaleca się stosowanie promieni zaokrąglenia ostrza w przedziale 0,4 mm do 0,6 mm. Większy promień pozwala na lepsze rozłożenie sił skrawania, co zmniejsza ryzyko uszkodzenia narzędzia i detalu.
- kształt powierzchni przyłożenia – powierzchnia przyłożenia narzędzia w tej kategorii może być lekko zaokrąglona, co pozwala na bardziej równomierne rozłożenie sił oraz zmniejsza ryzyko mikro-uszkodzeń obrabianego materiału.

3. Duże średnice

Dla wałów o średnicy 601 mm i większych, narzędzia skrawające muszą być dostosowane do pracy w bardzo trudnych warunkach. W tej kategorii wymagana jest zwiększona wytrzymałość konstrukcji narzędzia oraz stabilność, ponieważ obróbka wiąże się z bardzo dużymi siłami i temperaturami. Wymagania dla narzędzi skrawających są następujące.

- kąt natarcia – powinien wynosić od 15° do 25°, aby zminimalizować ryzyko zbyt dużego obciążenia narzędzia oraz poprawić odprowadzanie ciepła w wyniku intensywnego skrawania.
- promień zaokrąglenia – dla dużych średnic stosuje się większe promienie zaokrąglenia, w przedziale 0,6 mm do 1 mm. Większy promień poprawia stabilność narzędzia i zmniejsza ryzyko jego zniszczenia w wyniku kontaktu z twardym materiałem.
- kształt powierzchni przyłożenia – powierzchnia przyłożenia powinna być dość szeroka, lekko zaokrąglona, aby rozłożyć siły skrawania na większym obszarze i zapewnić równomierne zużycie narzędzia.

Analiza odkształceń plastycznych powierzchni w trakcie procesu nagniatania związanych z kształtem ostrza użytego w obróbce poprzedzającej operację nagniatania oraz wstępne próby na materiałach stalowych.

Na tym etapie prac badawczych kluczowym celem jest zrozumienie, w jaki sposób kształt ostrza skrawającego wpływa na powierzchnię wału w trakcie procesu nagniatania, oraz jak te zmiany oddziałują na właściwości mechaniczne powierzchni, takie jak twardość, gładkość i odporność na zmęczenie. Aby uzyskać jak najlepszy efekt końcowy nagniatania, przeanalizujemy kilka aspektów oraz zastosujemy odpowiednie metody analityczne.

Metody analizy odkształceń plastycznych do których będziemy się odnosić to:

1. Symulacje numeryczne (MES).

Symulacje MES są jedną z najskuteczniejszych metod analizy odkształceń plastycznych. Dzięki temu podejściu można modelować cały proces nagniatania, uwzględniając geometrię ostrza oraz materiał wału. Symulacje umożliwiają dokładne określenie rozkładu odkształceń, temperatury, oraz sił działających na powierzchnię wału. Do wykonania tej analizy musimy wykonać następujące kroki:

- zbudowanie modelu geometrycznego wału i ostrza w programie do symulacji.
- zastosowanie odpowiednich materiałów (własności plastyczne stali) oraz ustawienie warunków brzegowych, takich jak siła nacisku ostrza, prędkość skrawania i kąt natarcia.
- analiza wyników, takich jak rozkład odkształceń plastycznych, temperatura w obrabianym materiale, oraz naprężenia skrawania.

2. Metody eksperymentalne.

W tym przypadku można zastosować metody eksperymentalne w celu bezpośredniego pomiaru odkształceń plastycznych na powierzchni wału. Pomocne będą tensometry, które umożliwiają monitorowanie zmian odkształceń w czasie rzeczywistym, a także cyfrowe kamery do analizy odkształceń powierzchni. W tym przypadku możemy wykonać to następującymi metodami:

- poprzez zainstalowanie tensometrów na powierzchni wału w wybranych miejscach aby monitorować odkształcenia podczas procesu nagniatania.
- poprzez użycie cyfrowych kamer do uchwycenia mikro-odkształceń na powierzchni materiału.

Analiza danych z tensometrów i kamer, co pozwoli na ocenę skuteczności procesu nagniatania oraz jego wpływu na właściwości mechaniczne powierzchni wału.

3. Mikrostruktura elektronowa (SEM) i analiza struktury materiału.

Po procesie nagniatania warto przeprowadzić analizę mikrostrukturalną powierzchni materiału, aby ocenić zmiany, jakie zaszły w strukturze materiału w wyniku odkształceń plastycznych.

Aby uzyskać najlepszy efekt końcowy nagniatania, należy połączyć metody analizy numerycznej, eksperymentalnej i mikrostrukturalnej, a także optymalizować kształt ostrza pod kątem jego wpływu na odkształcenia plastyczne. Poprzez systematyczne testowanie różnych wariantów geometrii ostrza można znaleźć najskuteczniejsze rozwiązanie, które zapewni wysoką jakość powierzchni wału oraz zwiększoną jego wytrzymałość.

Następnie przeprowadzenie prób na próbkach stalowych pozwoli na ocenę skuteczności procesu nagniatania oraz oceny wytrzymałości powierzchni. Wstępne próby niszczące umożliwią ocenę granic wytrzymałości materiałów i narzędzi, identyfikując potencjalne problemy, które mogą wystąpić w trakcie pełnowymiarowego procesu.

Pomiar i analiza drgań która ma za zadanie potwierdzić możliwość otrzymania zadowalających parametrów powierzchni z wykorzystaniem ostrza skrawająco-dogniatającego, jak i wytrzymałości obrabiarki.

Wykonanie pomiaru i analizy drgań, który odnosi się do monitorowania wpływu drgań na jakość procesu nagniatania i skrawania, jest kluczowe dla zapewnienia stabilności obróbki oraz uzyskania odpowiednich parametrów powierzchni. Drgania w obrabiarce mogą negatywnie wpłynąć na skuteczność procesu, prowadząc do zmniejszenia precyzji, pogorszenia jakości powierzchni oraz nawet uszkodzenia narzędzi i obrabiarki.

Aby dokładnie ocenić wpływ drgań na jakość powierzchni i wytrzymałość obrabiarki, należy zastosować odpowiednie techniki pomiarowe:

1. Czujniki piezoelektryczne i akcelerometry - akcelerometry i czujniki piezoelektryczne są popularnymi narzędziami do pomiaru drgań. Umieszczane są na różnych częściach obrabiarki (np. na wrzecionie, narzędziu, czy stołach roboczych), rejestrując zmiany w przyspieszeniu i prędkości drgań.
2. Analiza modalna - metoda ta polega na określeniu naturalnych częstotliwości drgań obrabiarki oraz narzędzia w różnych warunkach obróbczych. Dzięki analizie modalnej

możliwe jest określenie, które częstotliwości drgań mogą prowadzić do niestabilności procesu.

3. Pomiar wibracji przy użyciu systemów monitorowania w czasie rzeczywistym - nowoczesne systemy monitorowania mogą śledzić drgania obrabiarki w czasie rzeczywistym, a także wykrywać wszelkie nieprawidłowości, takie jak zmieniające się amplitudy drgań.
4. Diagnostyka za pomocą analizy sygnałów drgań - analiza sygnałów drgań z narzędzi skrawających pozwala na wyodrębnienie informacji o stanie ostrza i jego interakcji z materiałem. Wykorzystując metody analizy sygnałów można uzyskać informacje o charakterze drgań oraz o ich wpływie na proces.

Brak dostosowania odpowiednich parametrów obróbczych niwelujących drgania, ma poważny wpływ na jakość powierzchni, a co za tym idzie wytrzymałość zmęczeniową. Drgania mogą powodować nieregularności w powierzchni wałów, co skutkuje gorszą jakością powierzchni. Zmiany w amplitudzie i częstotliwości drgań mogą prowadzić do mikropęknięć, nierówności oraz pogorszenia twardości powierzchni. Dodatkowo drgania mogą przyspieszyć proces pęknięcia zmęczeniowego, zwłaszcza jeśli występują w miejscu o wysokim stężeniu naprężeń. Analiza drgań pozwala na ocenę ryzyka zmniejszenia trwałości materiału w wyniku tego efektu. Lecz na podstawie wyników analizy drgań, można dostosować różne parametry procesu, aby zapewnić optymalną stabilność. Są to: zmiana prędkości skrawania, dostosowanie siły nacisku oraz modyfikacja geometrii narzędzia.

Podsumowując, pomiar i analiza drgań to istotne narzędzie które pozwoliło nam monitorować i optymalizować proces nagniatania i skrawania. Dzięki pomiarom drgań mogliśmy skutecznie poprawić stabilność procesu, co ma bezpośredni wpływ na jakość powierzchni wałów oraz wytrzymałość obrabiarki. Właściwa analiza drgań pozwala na dostosowanie parametrów obróbczych, eliminację niepożądanych wibracji i zapewnienie wysokiej jakości i trwałości obrabianych wałów.

Kamień milowy – wytypowanie geometrii ostrza dla trzech rodzajów średnic obrabianego materiału.

Na tym etapie projektu, kluczowe będzie wytypowanie odpowiedniej geometrii ostrza dla różnych wielkości wałów (małych, średnich i dużych średnic). Dostosowanie geometrii ostrza do różnych wymiarów wałów zapewni optymalną efektywność procesu i jakość obrabianej powierzchni, a także umożliwi osiągnięcie założonych parametrów wytrzymałościowych. Wybór należy zróżnicować względem każdego z rodzajów średnic. Jednak do dalszych badań wybraliśmy narzędzia które łączą następujące parametry.

- Promień naroża $r=0,4\text{mm}$ i $r=0,8\text{mm}$ – aby porównać wpływ tego parametru na efekt obróbki.
- Kąt natarcia będzie zmienny dla każdego z szeregu średnic testowo obrabianych wałów.
- Materiał narzędzia to węgiel spiekany z powłoką TiAlN
- Rombowy kształt płytki