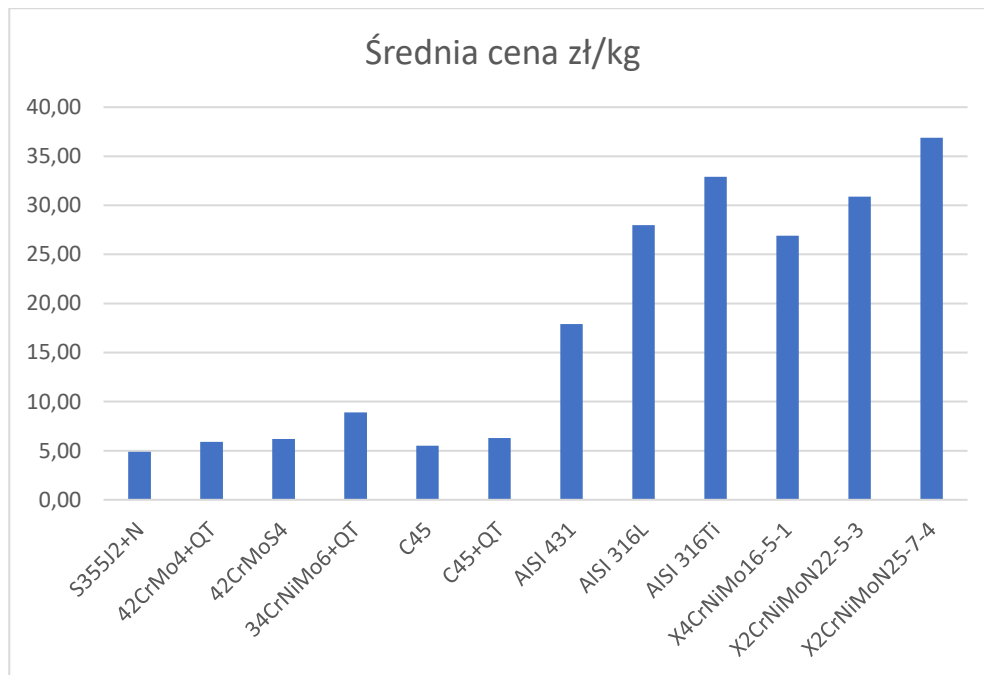


TRL II Przegląd i wytypowanie dostępnych na rynku rodzajów prętów stalowych, analiza dostępności i typowanie narzędzi, oraz przegląd dostępnych rozwiązań łączenia obróbki skrawaniem i nagniatania.

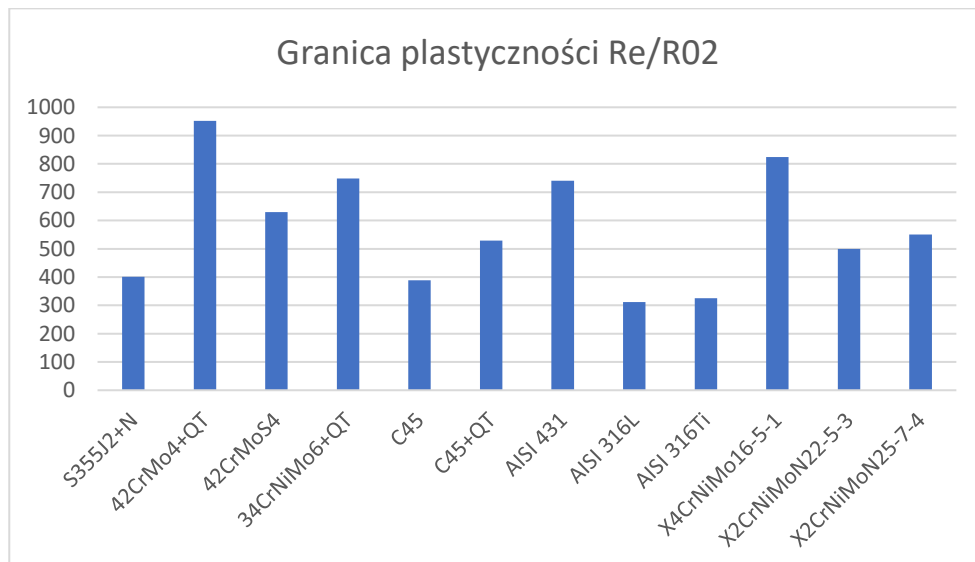
Wytypowanie materiałów dostępnych na rynku.

Na rynku dostępne jest wiele materiałów stosowanych w produkcjach wałów. Poniżej przedstawiono najbardziej dostępne, wykres przedstawiający średnią cenę, oraz wykres granicy plastyczności dla poszczególnych materiałów.

- S355J2+AR (1.0570)
- S355J2+N (1.0570)
- S355J2G3 (1.0570)
- S355J2+RT (1.0570)
- 42CrMo4+QT (1.7225)
- 42CrMoS4 (1.7227)
- 34CrNiMo6+QT (1.6582)
- NV-E36
- LR-EH36
- C45 (1.0503)
- C45+QT (1.0503)
- AISI 431 (1.4057)
- AISI 316L (1.4404)
- AISI 316Ti (1.4571)
- X4CrNiMo16-5-1 (1.4418)
- X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462)
- X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410)



Wykres 1 Średnia cena materiału w zależności od gatunku materiału [zł/kg].



Wykres 2 Granica plastyczności prętów w zależności od gatunku materiału [MPa].

Analizując powyższe wartości oraz wymagania projektowe wybór materiału S355 jest najbardziej ekonomicznie uzasadnione. Umocnienie tego gatunku może poszerzyć możliwości jego zastosowania bez zwiększania kosztów produkcji.

Ocena warunków pracy wałów.

Główne warunki pracy wałów przedstawiają się następująco:

- Obciążenia udarowe,
- Obciążenia dynamiczne,
- Wytrzymałość zmęczeniowa,
- Zmienne oraz agresywne środowisko pracy,
- Temperatura pracy,
- Zmienne drgania,

- Praca pod zmiennym kontem natarcia sił,
- Wysokie wymagania dokładności wykonania.

Typowanie dostępnych rodzajów walców z uwzględnieniem rodzaju materiału wykonania oraz wytypowanie parametrów jakościowych które podlegać będą modyfikacji wraz z oceną występowania sił skrawających.

W zależności od metody nagniatania wyróżniamy następujące rodzaje walców:

- Walce gładkie – używane, gdy wymagane jest uzyskanie jednorodnej i gładkiej powierzchni. Znajduje zastosowanie gdy celem jest zmniejszenie chropowatości i utwardzenie warstwy wierzchniej.
- Walce profilowane – używane, gdy wały mają nieregularny kształt.
- Walce radelkowane – używane, gdy wymagana jest konkretna faktura na powierzchni wału.
- Walce z podzespołami sprężystymi – używane w przypadku wałów o zróżnicowanych średnicach, gdzie wymagana jest duża elastyczność narzędzia.

W zależności od materiału wykonania walców wyróżniamy następujące rodzaje walców:

- Walce stalowe – wykonane ze stali narzędziowych lub stopowych. Charakteryzujące się dużą wytrzymałością i odpornością na ścieranie. Najczęściej stosowane do nagniatania twardych materiałów.
- Walce polimerowe – wykonane ze tworzyw sztucznych lub gumy. Charakteryzujące się dużą elastycznością. Najczęściej stosowane w przypadkach wymagających delikatnego nacisku.
- Walce z węglików spiekanych – wykonane z węglików spiekanych, np. węgiel wolframu. Charakteryzują się wysoką odpornością na zużycie. Najczęściej stosowane do obróbki bardzo twardych materiałów.
- Walce ceramiczne – charakteryzują się wysoką twardością lecz są bardziej kruche. Najczęściej stosowane są w specjalnych przypadkach, gdzie wymagana jest odporność na wysokie temperatury lub obróbka materiałów kompozytowych.
- Walce pokryte powłokami ochronnymi – Wykonane ze stali lub węglików spiekanych, lecz pokryte powłokami ceramicznymi, diamentowymi lub tytanowymi dla zwiększenia odporności na ścieranie. Stosowane w zaawansowanych technologiach nagniatania.

Podczas produkcji wałów maszyn i urządzeń jest wiele czynników jakościowych, które mają wpływ na końcową użyteczność danego wyrobu. Spośród wszystkich wyróżnić należy cztery, nad którymi będą prowadzone prace w dalszej części projektu. Są to chropowatość, twardość, udarność i wytrzymałość.

Analizując powyższe rodzaje walców oraz ich dostępność na rynku, najlepszym wyborem są walce gładkie wykonane ze stali narzędziowej. Jako typ powłoki wytypowaliśmy twardą powłokę PVD w celu zwiększenia odporności na ścieranie. Ten typ narzędzia będzie najbardziej odpowiedni w celu polepszenia powyżej wytypowanych parametrów jakościowych.

Wytypowanie poszczególnych czynności procesu skrawania mającego wpływ na powierzchnię obrabianego detalu.

Czynności wykonywane podczas procesu skrawania przed nagniataniem mają kluczowy wpływ na jakość powierzchni detalu, a także na skuteczność i efekty nagniatania. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich.

- Dokładność wymiarowa i kształtowa - powierzchnia po skrawaniu powinna być możliwie bliska wymiarom końcowym. Nadmierne odchyłki wymiarowe lub błędy kształtu (np. owalność, falistość) utrudniają równomierne nagniatanie i mogą powodować defekty powierzchni. Aby zapobiec odchyłką wymiarowym i kształtowym należy starannie wykonać obróbkę wykańczającą, szczególnie uwzględniając parametry skrawania, na czym skupimy się podczas dalszych badań. Niemniej jednak ważne jest użycie odpowiednich narzędzi o wysokiej precyzji geometrycznej.
- Chropowatość powierzchni - im gładsza powierzchnia po skrawaniu, tym łatwiej uzyskać wymaganą chropowatość po nagniataniu. Zbyt duża chropowatość początkowa może wymagać większej liczby przejść narzędzia podczas nagniatania. Aby osiągnąć jak najlepszą chropowatość powierzchni należy: dobrać odpowiednie ostrze narzędzia (użyć noża o mniejszym promieniu naroża do obróbki wykańczającej), dokonać redukcji posuwu z jednoczesnym zwiększeniem prędkości skrawania oraz użycie chłodziwa w celu zmniejszenia tarcia i wpływu ciepła.
- Siły skrawania i stabilność procesu obróbki ubytkowej - niestabilności podczas procesu skrawania (np. wibracje, nieregularna siła skrawania) mogą powodować nierówności powierzchni, falistość lub inne defekty. Te niedoskonałości mogą pogarszać skuteczność nagniatania i utrudniać uzyskanie równomiernej warstwy utwardzonej. W związku z tym ważne jest utrzymanie odpowiedniego docisku narzędzia, stabilizacja układu obrabiarka-narzędzie-uchwyt, zmniejszenie głębokości skrawania w końcowym etapie obróbki wykańczającej.
- Wpływ struktury materiału po obróbce skrawaniem - skrawanie może powodować zmiany w mikrostrukturze materiału, takie jak naprężenia własne lub utwardzenie warstwy wierzchniej. Te zmiany mogą wpływać na równomierne rozłożenie naprężeń w procesie nagniatania. W celu zwiększenia kontroli nad tym procesem można skupić się na stosowaniu odpowiednich parametrów obróbkowych aby zminimalizować nagrzewanie i utwardzanie warstwy wierzchniej. Można też zastosować dodatkowy zabieg zmniejszający naprężenia. Dwie najpopularniejsze metody niwelowania naprężeń to obróbka cieplna oraz odprężanie wibracyjne.
- Czystość powierzchni przed nagniataniem - resztki chłodziwa, wióry lub inne zanieczyszczenia mogą negatywnie wpływać na kontakt walców z powierzchnią wału, powodując nierówności lub uszkodzenia powierzchni podczas nagniatania. Przed przystąpieniem do procesu nagniatania należy dokładnie oczyścić powierzchnie.
- Dobór chłodziwa i jego wpływ - użycie niewłaściwego chłodziwa lub brak chłodzenia może prowadzić do przegrzania powierzchni, co skutkuje nierówną strukturą materiału i pogorszeniem efektów nagniatania. Należy stosować chłodziwo dostosowane do rodzaju materiału oraz zapewnić odpowiedni jego przepływ.

Analiza stanu techniki dostępności urządzeń o dużej sile dogniatania.

Aby uzyskać dużą siłę dogniatania podczas procesu nagniatania wałów, potrzebne są odpowiednie urządzenia o wysokiej wytrzymałości i precyzji. Poniżej przedstawione pozostają maszyny i urządzenia używane do tego celu:

- tokarki CNC o dużej mocy,
- walcarki do nagniatania wałów,
- głowice do nagniatania z systemem hydraulicznym,
- prasy hydrauliczne,
- obrabiarki wielkogabarytowe do nagniatania wałów,
- roboty przemysłowe z systemem docisku,

- narzędzia nagniatające z aktywnym systemem docisku.

Wytypowanie narzędzi skrawających pod kątem kształtów oraz materiałów wykonania z uwzględnieniem rodzajów powłok.

Obróbka wałów przed nagniataniem wymaga szczególnej uwagi przy wyborze narzędzia skrawającego, które zapewni odpowiednią jakość powierzchni. Wybieramy z pośród:

- noży tokarskich – są to narzędzia jednolite z krawędzią skrawającą wykonaną z jednego materiału. Używane są głównie do mniej wymagających zastosowań. Często wymagają ponownego ostrzenia.
- płytki wymienne – montowane są w uchwytach narzędziowych, co zwiększa możliwość łatwej wymiany po zużyciu. Wykonywane są z materiałów o wysokiej odporności na ścieranie, takich jak węgiel spiekany, ceramika, CBN (azotek boru) czy PCD (diament polikrystaliczny) oraz dostępne w różnych kształtach i z różną geometrią. Dzięki wysokiej trwałości i różnorodności geometrii mają szeroki wachlarz zastosowań.

Pod względem materiału wykonania narzędzia skrawającego wybieramy z pośród: węglików spiekanych, stali szybko tnących oraz ceramiki.

Oprócz materiału wykonania ważny jest także rodzaj powłoki narzędzia. Dla stali S355 wybierać będziemy z pośród następujących powłok: TiAlN, TiN, DLC oraz AlTiN.

Do dalszych prac wybieramy jako narzędzie węgiel spiekany z płytką wymienną o małym promieniu naroża $r=0,4\text{mm}$ oraz $r=0,8\text{mm}$ aby porównać wpływ tego parametru na efekt obróbki. Płytkę ma kąt natarcia o wartości 10° . Kształt wybranej płytki to rombowy a materiał to węgiel spiekany z powłoką TiAlN. Tak dobrane narzędzie pozwoli na uzyskanie powierzchni o odpowiedniej chropowatości i jakości, co zapewni optymalne warunki do późniejszego procesu nagniatania.

Wyznaczenie krytycznych funkcji dla ostrza skrawającego oraz parametrów wytrzymałościowych walców w zależności od gatunku stali z którego zostały wykonane.

Wyznaczenie krytycznych funkcji dla ostrza skrawającego oraz parametrów wytrzymałościowych walców wymaga analizy wzajemnych zależności pomiędzy gatunkiem stali, jej właściwościami mechanicznymi, procesem skrawania i nagniatania. Poniżej przedstawiono poszczególne kroki tych zależności.

1. Krytyczne funkcje ostrza skrawającego.

Ostrze skrawające musi sprostać różnym wyzwaniom związanym z gatunkiem stali i warunkami obróbki. Oto kluczowe funkcje ostrza oraz zależności od gatunku stali:

- Wytrzymałość na obciążenia mechaniczne - ostrze musi wytrzymać siły skrawania, które zależą od twardości i wytrzymałości obrabianego materiału.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$F_{\text{ostrza}} = \sigma_{\text{skrawania}} \cdot A_{\text{ostrza}}$, gdzie:

- $\sigma_{\text{skrawania}}$ – naprężenia podczas skrawania (zależne od wytrzymałości stali i siły skrawania),
- A_{ostrza} – powierzchnia efektywna krawędzi tnącej.

- Odporność na zużycie - krawędź tnąca musi być odporna na ścieranie spowodowane kontaktem z powierzchnią materiału o różnej twardości i strukturze.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$W = k \cdot V_c \cdot t$, gdzie:

- W – zużycie ostrza,
- k – współczynnik zużycia (zależny od materiału ostrza i powłoki),
- V_c – prędkość skrawania,
- t – czas obróbki.

- Odporność na wysokie temperatury - przy obróbce stali w podwyższonych prędkościach skrawania ostrze może osiągać temperatury rzędu 800–1000°C.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$T = f(V_c, F_{skrawania}, \lambda_{ostrza})$, gdzie:

- T – temperatura na ostrzu,
- λ_{ostrza} – przewodność cieplna materiału narzędzia.

2. Krytyczne funkcje wytrzymałościowe walców.

Walcowanie wymaga precyzyjnie dobranych parametrów wytrzymałościowych, które zapewnią trwałość i efektywność narzędzia. Poniżej kluczowe zależności:

- Wytrzymałość na siły nagniatania - walce muszą wytrzymać siły działające na ich powierzchnię podczas procesu nagniatania.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$\sigma_{walca} = A_{walca} / F_{nagniatania}$, gdzie:

- $F_{nagniatania}$ – siła nagniatania (zależna od materiału obrabianego, głębokości zgniotu i geometrii walców),
- A_{walca} – powierzchnia kontaktu walca z obrabianym materiałem.

- Odporność na ścieranie - powierzchnia walca jest narażona na intensywne zużycie wskutek tarcia z obrabianym materiałem.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$Z_{walca} = k_{walca} \cdot p_{nagniatania} \cdot v \cdot t$, gdzie:

- Z_{walca} – stopień zużycia walca,
- k_{walca} – współczynnik ścieralności (zależny od twardości materiału walca),
- $p_{nagniatania}$ – nacisk powierzchniowy.

- Elastyczność i odporność na zmęczenie materiału - walce muszą wytrzymać powtarzalne obciążenia bez deformacji plastycznej i pęknięć zmęczeniowych.

Funkcje tą można przedstawić następującą zależnością:

$N_{zmęczenia} = f(\sigma_{zmęczenia}, R_{walca})$, gdzie:

- $N_{zmęczenia}$ – liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego,
- R_{walca} – granica zmęczenia materiału walca.

Kamień milowy – wytypowanie rozwiązań pozwalających na wprowadzenie w jednym czasie obróbki skrawaniem i nagniatania

Wprowadzenie jednoczesnej obróbki skrawaniem i nagniatania wymaga precyzyjnego doboru narzędzi oraz optymalizacji procesu, aby zintegrować oba etapy w jednej operacji technologicznej. Wybieramy z spośród poniżej przedstawionych rozwiązań.

1. Specjalne narzędzia zintegrowane (skrawająco-nagniatające)

Możemy wyróżnić dwa główne rodzaje specjalnych narzędzi:

- Kombinowane narzędzia tokarskie - to nowoczesne rozwiązanie pozwalające na połączenie obróbki skrawaniem i nagniatania w jednym narzędziu. W ich konstrukcji znajdziemy dwie główne sekcje, jedną przeznaczoną do skrawania materiału, a drugą odpowiedzialną za proces nagniatania.

Kombinowane narzędzia są wyposażone w płytkę skrawającą i sekcję nagniatającą. Płytkę skrawającą wykonuje obróbkę zgrubną lub wykańczającą powierzchni. Materiał płytki to zazwyczaj węgiel spiekany, który pozwala na precyzyjne usuwanie materiału przy wysokich prędkościach. Sekcja nagniatająca natychmiast po procesie skrawania wygładza powierzchnię detalu, poprawiając jej chropowatość i zwiększając twardość powierzchniową. Te dwa elementy są rozmieszczone tak, aby proces nagniatania odbywał się bezpośrednio po skrawaniu, eliminując konieczność zmiany narzędzia czy przerwy w procesie.

- Głowice tokarskie z systemem nagniatania - to bardziej zaawansowane technologicznie rozwiązanie, które znajduje zastosowanie w przypadku większych detali lub bardziej wymagających operacji. Tego typu narzędzia składają się z: narzędzia skrawającego, umieszczonego na przedniej krawędzi głowicy tokarskiej, które precyzyjnie obrabia materiał oraz systemu rolkowego lub kulkowego do nagniatania, który jest zainstalowany tuż za krawędzią tnącą. Rolki te dociskają obrabianą powierzchnię, wygładzając ją i zmieniając strukturę powierzchniową metalu w celu poprawy parametrów takich jak twardość i wytrzymałość.

Dzięki zintegrowanym systemom amortyzacji siła nagniatania może być precyzyjnie kontrolowana, co jest kluczowe przy obróbce większych detali, takich jak wały o średnicy 300–600 mm.

2. Automatyczne obrabiarki wielofunkcyjne – wyszczególnić możemy tu tokarki CNC z funkcją nagniatania oraz centra obróbcze z głowicami do nagniatania.

3. Specjalistyczne systemy nagniatania w narzędziach tokarskich.

Proces jednoczesnego skrawania i nagniatania wymaga zaawansowanych technologicznie narzędzi, które mogą skutecznie połączyć te dwie operacje w ramach jednej konfiguracji. W poniższych przykładach rozważamy dwa rozwiązania dedykowane takim zadaniom.

- Rolki nagniatające zintegrowane z uchwytami tokarskimi - to specjalistyczne elementy narzędziowe, które umożliwiają przeprowadzenie procesu nagniatania w jednym ciągu roboczym z obróbką skrawaniem. Narzędzia te wyposażone są w system rolek nagniatających zamontowanych w uchwycie tokarskim, który jest instalowany na tokarce obok płytki skrawającej. Rolki są ustawione w odpowiedniej pozycji względem płytki, co pozwala na bezpośrednie nagniatanie powierzchni bez zmiany narzędzia. Po zakończeniu skrawania przez płytkę, obrabiana powierzchnia natychmiast przechodzi pod rolki

nagniatające, które wygładzają jej strukturę, zmniejszają chropowatość oraz zwiększają jej wytrzymałość. Siła docisku rolek jest kontrolowana poprzez system mechaniczny lub hydrauliczny, co pozwala na precyzyjne ustawienie parametrów nagniatania.

- Narzędzia z kulkami hydrostatycznymi - to narzędzia, które wyróżniają się zdolnością do równomiernego rozkładania nacisku na obrabianą powierzchnię, co jest kluczowe przy wysokich wymaganiach dotyczących jakości powierzchni. Narzędzie składa się z kulki wykonanej z bardzo twardego materiału, która osadzona jest w specjalnym mechanizmie z tłumikiem hydraulicznym. Tłumik hydrauliczny pozwala na dynamiczne dostosowywanie siły nacisku kulki na powierzchnię, eliminując ryzyko nierównomiernego nagniatania. Kulka porusza się po obrabianej powierzchni bezpośrednio po skrawaniu. Dzięki precyzyjnej regulacji nacisku, proces ten minimalizuje mikro nierówności i zwiększa gęstość powierzchniową materiału.

Do dalszych badań zostały wytypowane specjalistyczne narzędzia tokarskie. Wybór kombinowanych narzędzi tokarskich jako rozwiązania do przeprowadzenia badań jest uzasadniony przede wszystkim ich wszechstronnością i elastycznością, które są kluczowe w procesach badawczych. Takie narzędzia umożliwiają łatwą adaptację do zmiennych warunków testowych oraz pozwalają na szybką wymianę zarówno sekcji skrawającej, jak i nagniatającej, co ma istotne znaczenie w kontekście prowadzenia eksperymentów nad różnymi parametrami procesowymi. Główne powody którymi się kierowaliśmy to łatwość zmiany narzędzia skrawającego oraz nagniatającego.