



POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA TECHNOLOGII MASZYN
I AUTOMATYZACJI PRODUKCJI

mgr inż. ROMAN CHUDY

ROZPRAWA DOKTORSKA

**BADANIE ENERGOCHŁONNOŚCI SEKWENCYJNYCH
PROCESÓW OBRÓBKI CZĘŚCI MASZYN**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Wit Grzesik

Opole 2019

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	4
1. WPROWADZENIE.....	6
2. PRZEGLĄD LITERATURY.....	8
2.1. Produkcja energii w Polsce i Unii Europejskiej	8
2.2. Zużycie energii w Polsce.....	9
2.3. Energochłonność procesu skrawania.....	10
2.4. Pomiar mocy i energii skrawania	23
2.5. Struktura geometryczna powierzchni	29
2.5.1. Strefowa budowa warstwy wierzchniej	29
2.5.2. Charakterystyka chropowatości powierzchni	32
2.6. Obróbka materiałów w stanie utwardzonym	37
2.7. Obróbka sekwencyjna	39
2.7.1. Nagniatanie	40
2.7.2. Narzędzia do nagniatania tocznego.....	43
2.8. Optymalizacja procesu skrawania	44
3. PROBLEMATYKA BADAWCZA	48
3.1. Teza naukowa pracy	48
3.2. Cel pracy.....	49
3.3. Zakres pracy	49
4. WARUNKI I METODYKA BADAŃ	53
4.1. Plan eksperymentu.....	53
4.2. Stanowisko badawcze.....	55
4.2.1. Stanowisko do prób toczenia i nagniatana	55
4.2.2. Układ do pomiaru mocy.....	58
4.2.3. Pomiar chropowatości powierzchni	61
4.2.4. Pomiar twardości.....	62
4.3. Charakterystyka materiału obrabianego	63
4.4. Charakterystyka narzędzi skrawających użytych w badaniach.....	65
4.5. Metodyka badań	67

4.6.	Optymalizacja warunków obróbki	68
5.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	70
5.1.	Charakterystyki energetyczne procesu skrawania.....	70
5.1.1.	Moc całkowita i skrawania.....	70
5.1.2.	Energia skrawania	81
5.1.1.	Energia właściwa	89
5.1.2.	Energia właściwa powierzchniowa.....	95
5.2.	Charakterystyki energetyczne nagniatania	99
5.3.	Charakterystyki energetyczne po obróbce sekwencyjnej z jednoprzęściowym nagniataniem	103
5.4.	Charakterystyki energetyczne po obróbce sekwencyjnej z dwuprzęściowym nagniataniem	105
5.5.	Chropowatość powierzchni po obróbce sekwencyjnej.....	109
5.5.1.	Stan geometryczny powierzchni po obróbce sekwencyjnej z jednoprzęściowym nagniataniem	109
5.5.1.	Stan geometryczny powierzchni po obróbce sekwencyjnej z dwuprzęściowym nagniataniem	119
5.6.	Optymalizacja warunków obróbki sekwencyjnej w kontekście wymaganej chropowatości i energochłonności procesu	125
6.	WNIOSKI KOŃCOWE	131
7.	LITERATURA.....	134
	STRESZCZENIE.....	141
	ABSTRACT.....	142

WYKAZ OZNACZEŃ

AKRONIMY

- A_5 – wydłużenie próbki
- a_p – głębokość skrawania
- e_c – energia właściwa skrawania
- e_{cc} – składowa stała energii właściwej skrawania
- e_{cv} – składowa zmienna energii właściwej skrawania
- e_{ct} – energia właściwa całkowita
- e_{pc} – energia powierzchniowa skrawania
- e_{pt} – energia powierzchniowa całkowita
- E_t – energia całkowita
- E_c – energii skrawania
- F_n – siła nagniatania
- f – posuw
- f_b – posuw nagniatania
- I_{PN} – nominalny prąd mierzony
- M_R – wskaźnik skrawalności (*ang. machinability taring*)
- P – moc całkowita
- P_c – moc skrawania
- R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu (średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej)
- $R_{mr}(c)$ – udział materiałowy profilu
- R_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu
- R_z – najwyższa wysokość profilu chropowatości
- R_v – głębokość najniższego wgłębienia profilu
- Q_F – powierzchniowa wydajność obróbki
- Q_j – jednostkowa wydajność obróbki
- Q_v – objętościowa wydajność obróbki
- Sk – wysokość rdzenia oraz dwie wartości udziału materiałowego $Smr1$ i $Smr2$
- Spk – zredukowana wysokość wierzchołków
- Svk – zredukowana głębokość dolin
- Z – przewężenie próbki
- VB_B – średnia szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia

- v_b – prędkość nagniatania
 v_c – prędkość skrawania
 V_{mc} – objętość materiału rdzenia
 V_{mp} – objętość materiału wzniesień
 V_{vc} – objętość pusterk rdzenia
 V_{vv} – objętość pustek wgłębień
 V_{PN} – nominalne napięcie mierzone
 α_n – kąt przyłożenia normalny
 κ_r – kąt przystawienia główny
 γ_n – kąt natarcia normalny
 λ_s – kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej

SKRÓTY

- BB – nagniatanie (*ang. ball burnishing*)
N – nagniatanie
CBN – regularny azotek boru (*ang. cubic boron nitride*)
ChP – chropowatość powierzchni
CO₂ – dwutlenek węgla
CVD – chemiczne (niskotemperaturowe) osadzanie z pary
HB – twardość w skali Brinella
HM – obróbka na twardo (*ang. hard machining*)
HPM – obróbka części na twardo (*ang. hard part machining*)
HRC – twardość w skali Rockwella
HT – toczenie na twardo (*ang. hard turning*)
T – toczenie
HV – twardość w skali Vickersa
PVD – fizyczne (wysokotemperaturowe) osadzanie z pary
SGP – struktura geometryczna powierzchni
TWW – technologiczna warstwa wierzchnia
WW – warstwa wierzchnia

1. WPROWADZENIE

Racjonalne gospodarowanie energią jest bardzo istotną oraz coraz częściej rozpatrywaną kwestią we wszystkich sektorach przemysłu wytwórczego [44]. Koszty związane ze zużyciem energii stanowią kluczowy czynnik w przemyśle metalowym. Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej potrzebnej do obróbki, a także redukcja energii niezbędnej do zasilania wszelkich urządzeń i agregatów pomocniczych to jedno z największych wyzwań stawianych producentom obrabiarek [46]. Profil energetyczny obrabiarki jest uzależniony od warunków obróbki, dlatego w pracy podjęto próbę oceny energochłonności obróbki sekwencyjnej w kontekście jakości powierzchni.

Efektywność wykorzystania energii w sektorze przemysłowym stanowi ważny czynnik wpływający na wysokość kosztów produkcji. Konsekwencją nieracjonalnego użytkowania energii jest nadmierne zużycie zasobów surowców energetycznych, problemy z zanieczyszczeniem środowiska naturalnego, nadmierna emisja dwutlenku węgla oraz ograniczona konkurencyjność przedsiębiorstw [25].

Odnotowano, że obrabiarki są podstawowymi urządzeniami zużywającymi energię elektryczną w produkcji [42]. W 2013 roku Gutowski [62] zwrócił uwagę, że obrabiarka sterowana numerycznie o mocy 22 kW działająca przez rok przyczynia się do wytworzenia takiej ilości CO₂ co 66 samochodów osobowych. Ponadto ocenia się, że koszty zużycia energii przez obrabiarki stanowią około 20% całkowitych kosztów ich eksploatacji [14]. Dlatego wiedza dotycząca zużycia energii przez obrabiarki ma istotny wpływ na proces planowania produkcji. Zwiększenie efektywności wykorzystania energii wymusza na producentach wytwarzanie energooszczędnych obrabiarek. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna podaje w normie ISO 14955 (w części pierwszej i drugiej) „Ocena środowiskowa obrabiarek” procedury testowania zużycia energii oraz zalecenia co do metod projektowania energooszczędnych obrabiarek. Przewidywalnie, w przyszłości nowe obrabiarki będą klasyfikowane także według ich efektywności energetycznej. Norma ISO 14955-2:2018 określa sposób przeprowadzania pomiaru energii pobieranej przez obrabiarkę, a w kolejnych częściach tej normy planowane jest określenie zasad testowania obrabiarek pod względem efektywności energetycznej [62–64].

W literaturze przedmiotu jest wiele prac poświęconych energochłonności toczenia różnych materiałów. Brak jest natomiast wiedzy na temat energochłonności sekwencyjnych procesów obróbki części maszyn, a głównie informacji o zużyciu energii

podczas nagniatania. W tym celu, zbudowano w oparciu o istniejące rozwiązania układów do pomiaru mocy autorskie stanowisko badawcze, które umożliwia badania energochłonności w kolejnych etapach obróbki sekwencyjnej.

W niniejszej pracy skoncentrowano się na wyznaczeniu zużycia energii podczas obróbki elementów maszyn, obejmującej toczenie kształtujące i wykańczające oraz obróbkę sekwencyjną z dodatkowym nagniataniem tocznym. Ważną częścią pracy była również optymalizacja warunków obróbki sekwencyjnej w odniesieniu do wymaganej chropowatości i energochłonności procesu.

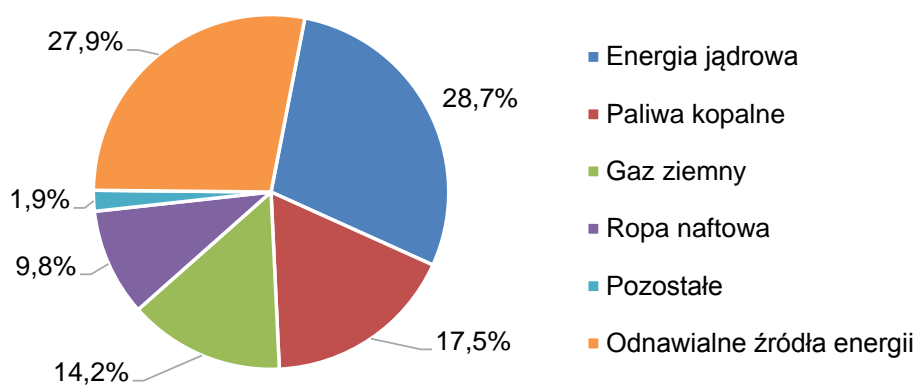
Badania eksperymentalne zrealizowano w laboratorium Obróbki Skrawaniem Katedry Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej w latach 2015-2018.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Produkcja energii w Polsce i Unii Europejskiej

Efektywne gospodarowanie energią jest jednym z podstawowych czynników umożliwiających budowanie wspólnej europejskiej polityki energetycznej. Unia Europejska traktuje zagadnienie energochłonności jako jeden z trzech strategicznych celów w zakresie polityki energetycznej [50].

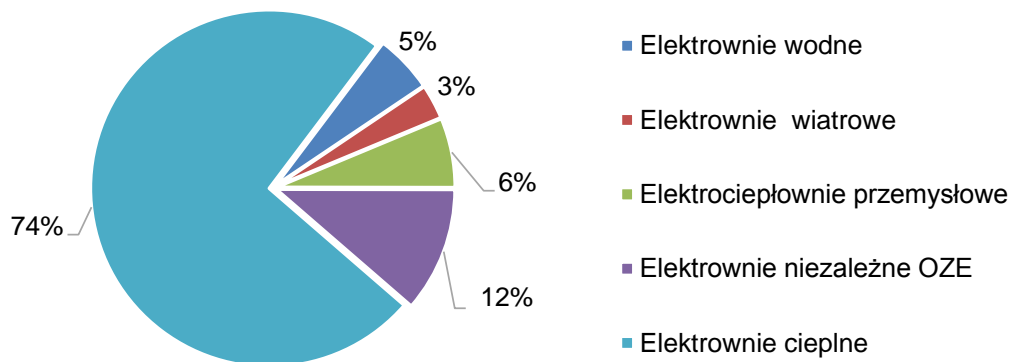
W 2016 roku największym źródłem energii pierwotnej w Unii Europejskiej było paliwo jądrowe. Z rys. 2.1 wynika, że udział energii jądrowej wyniósł 28,7% w całkowitej produkcji energii. Niewiele mniejszą produkcję można odnotować dla energii odnawialnej, którą szacuje się na 27,9%. Do produkcji energii służą również paliwa kopalne (17,5%), gaz ziemny (14,2%) oraz ropa naftowa (9,8%) (rys. 2.1) [65].



Rys. 2.1. Produkcja energii w Unii Europejskiej w 2016 roku [65]

Energochłonność polskiej gospodarki jest obecnie szacowana na dwa razy wyższym poziomie niż średnia w Unii Europejskiej [50].

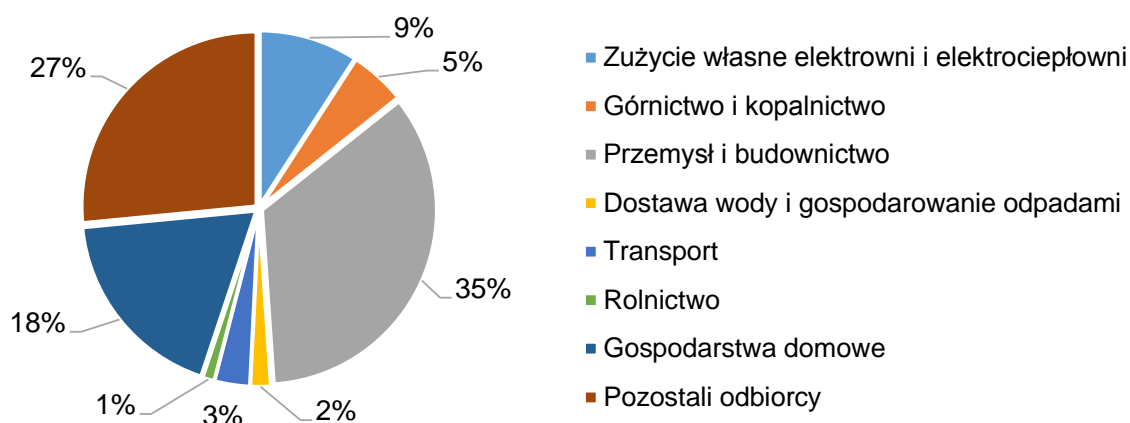
W Polsce w 2017 roku w sumie wyprodukowano 170 335 GWh energii, ale energia elektryczna jest produkowana w większości przez elektrownie ciepłne (zasilane węglem brunatnym, kamiennym, gazem oraz biomasą). Elektrownie te produkują 74% całkowitej energii. Źródła energii odnawialnej stanowiły niecałe 15%, w tym elektrownie niezależne odnawialnych źródeł energii 3% oraz elektrownie wiatrowe 11% (rys. 2.2) [66].



Rys. 2.2. Produkcja energii elektrycznej w 2017 roku w Polsce [66,67]

2.2. Zużycie energii w Polsce

W Polsce według statystyk Głównego Urzędu Statystycznego w 2017 roku zużycie energii elektrycznej wyniosło 159 TWh (rys. 2.3). Największa konsumpcja energii przypadła na przemysł i budownictwo - 33%, transport pochłonął 18% energii, zużycie własne elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni wyniosło 9%, natomiast górnictwo i kopalnictwo ma pięcioprocentowy udział w konsumpcji energii. Na produkcję rolną zużywany jest 1% energii natomiast gospodarstwa domowe konsumują 3% energii elektrycznej [68].



Rys. 2.3. Zużycie energii w Polsce w 2017 roku z podziałem na sektory [68]

Komisja i Rada Europejska w Dyrektywie 2006/32/WE zdefiniowała oszczędność energii jako „ilość zaoszczędzonej energii ustalonej poprzez pomiar oraz szacowanie zużycia przed i po wdrożeniu jednego lub kilku środków poprawy efektywności

energetycznej”[69]. Dyrektywa narzuca na państwa członkowskie konieczność podjęcia działań mających na celu efektywniejsze wykorzystywanie energii. Dlatego podjęte w dysertacji zagadnienie energochłonności sekwencyjnych procesów obróbki części maszyn może przyczynić się do poprawy efektywnego gospodarowania energią w przemyśle.

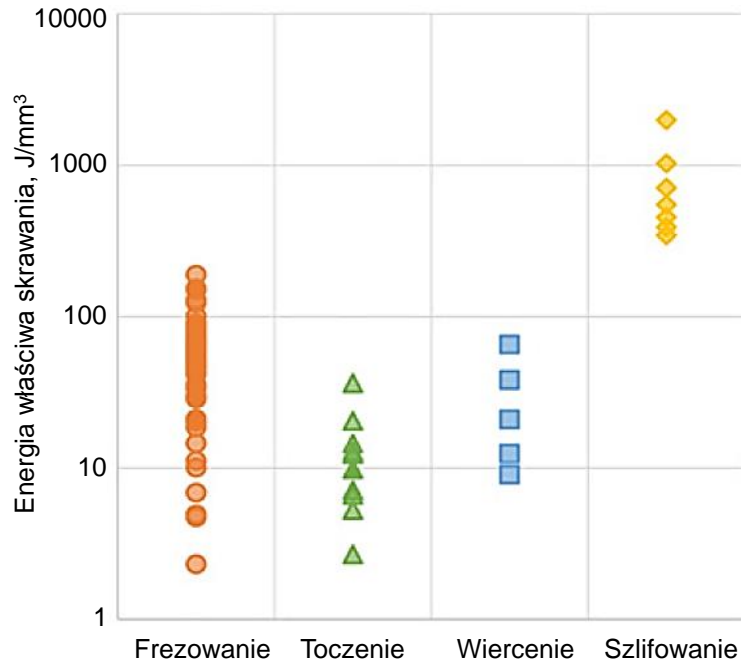
2.3. Energochłonność procesu skrawania

Jednym z najważniejszych czynników w optymalizacji procesu skrawania jest przeprowadzenie pomiarów i badań struktury zużywanych nośników energii wydatkowanych bezpośrednio w procesie wytwarzania wyrobu definiowanych jako energochłonność procesu.

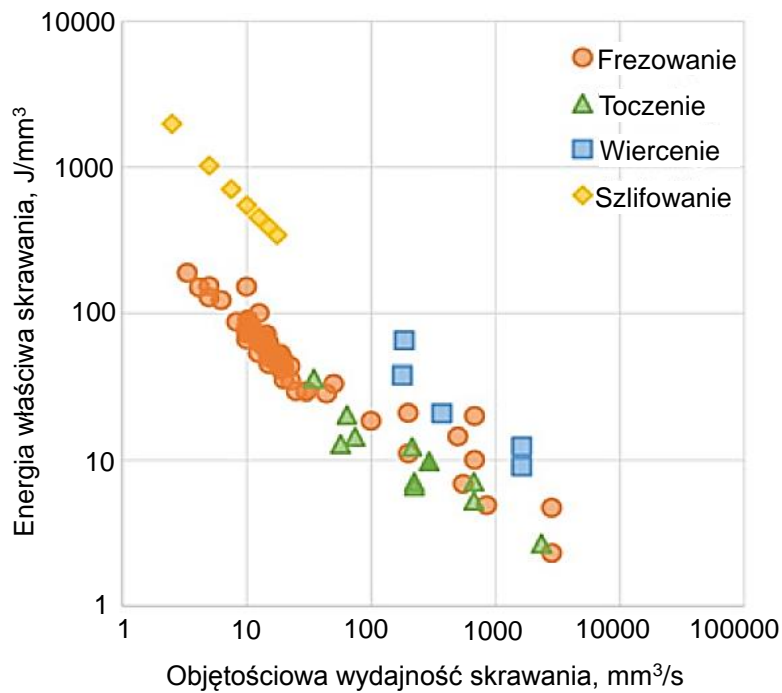
Zasadniczo, wyznaczenie mocy i energii skrawania możliwe jest za pomocą modelu empirycznego, np. korzystając z rejestracji przebiegu składowych sił skrawania. Zazwyczaj tego typu modele odnoszą się tylko do energii niezbędnej do oddzielenia materiału i pomijają dodatkowe składniki, jak np. układy wspomagające i sterujące obrabiarką [38].

Procesy obróbki skrawaniem, takie jak toczenie, frezowanie i wiercenie są szeroko stosowane w produkcji przemysłowej. Ich popularność wynika z możliwości tworzenia złożonych geometrii części o wysokiej dokładności wymiarowej i efektywności ekonomicznej [4].

W pracach poświęconych energochłonności przedstawia się wyniki zużycia energii podczas różnych procesów obróbki ubytkowej. Ocenę energochłonności dokumentuje się zarówno na podstawie wyników badań eksperymentalnych jak i wartości wyliczonych. W pracy [59] przedstawiono wyniki pomiarów energii właściwej skrawania dla toczenia, frezowania, wiercenia oraz szlifowania. Na rys. 2.4 można dostrzec, że najbardziej energochłonnym procesem jest szlifowanie. Wartości e_c dla pozostałych procesów są mniejsze, a wyniki mocno zróżnicowane, tak ze względu na różne materiały obrabiane jak, również odmienne warunki obróbki (w tym parametry obróbki) (rys. 2.4÷2.5) [59].



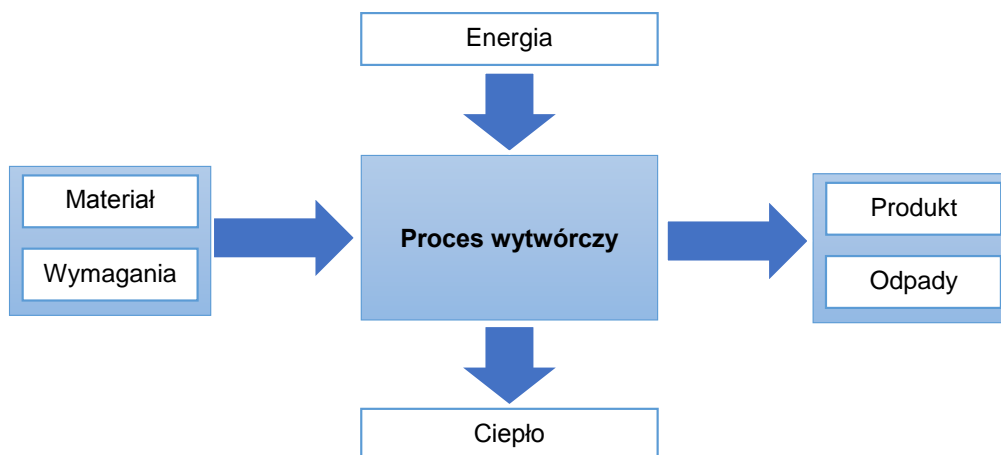
Rys. 2.4. Energia właściwa skrawania dla konwencjonalnych sposobów skrawania i szlifowania [59]



Rys. 2.5. Zależność energii właściwej skrawania od objętościowej wydajności skrawania dla różnych metod obróbki ubytkowej [59]

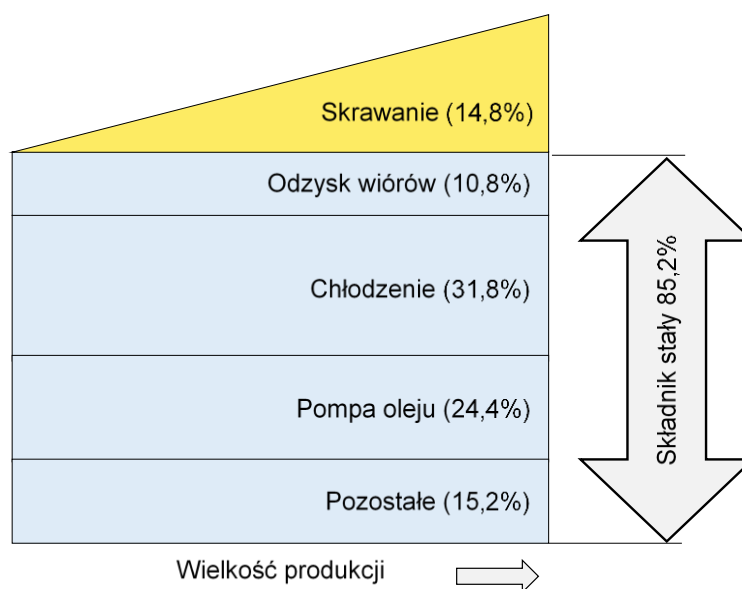
Analiza energochłonności wyrobów wytwarzanych w przemyśle maszynowym wymaga identyfikacji głównych obszarów, w których w procesie produkcji dochodzi do zużycia energii. Ustalenie zależności pomiędzy zużyciem energii a określonymi cechami

przedmiotu (materiałowymi lub geometrycznymi) pozwala na ustalenie wielkości zapotrzebowania energetycznego wymaganego do wytworzenia określonego wyrobu. Część zużywanej energii jest wielkością stałą, pozostała część zależy od przebiegu procesu wytwórczego. Identyfikacja tej drugiej zależności wspomaga podjęcie działań zmierzających do zmniejszenia energochłonności produktu [3,8]. Proces wytwórczy w aspekcie zużycia energii przedstawiono na rys. 2.6.



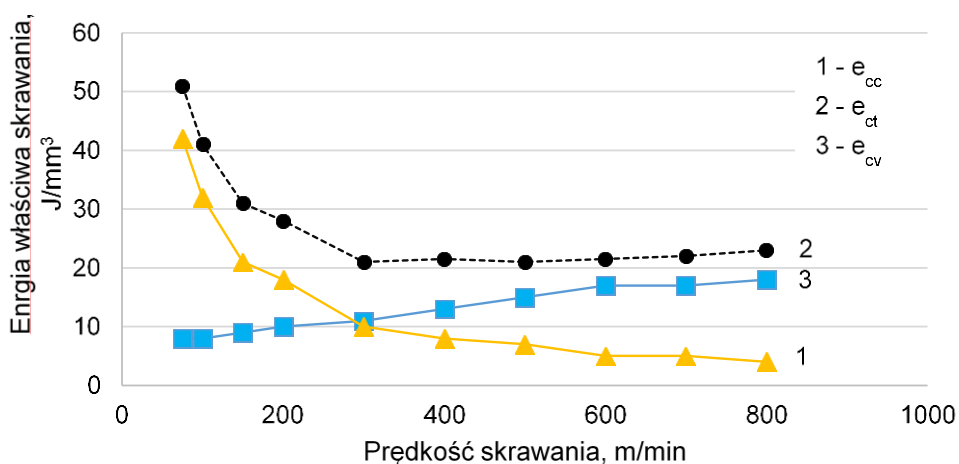
Rys. 2.6. Proces wytwórczy w aspekcie zużycia energii [3,8]

Na całkowitą energochłonność wyrobu składają się następujące składowe: energochłonność wytworzenia materiału, z którego wykonany jest wyrób, energochłonność wykonania półfabrykatu, przeprowadzenia procesu produkcyjnego oraz otoczenia procesu produkcyjnego [3,8].

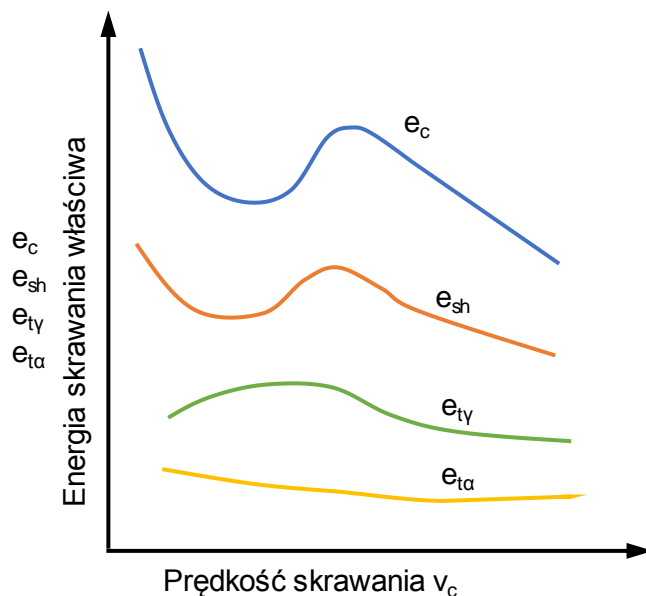


Rys. 2.7. Rozkład zużycia energii w obróbce skrawaniem w przemyśle motoryzacyjnym [31]

Nowoczesne obrabiarki skrawające wyposażone są w szereg funkcji oraz agregatów pomocniczych, ale podstawowym zadaniem obrabiarki jest usuwanie nadmiaru materiału. Poza napędami osi oraz wrzeciona, posiadają one dodatkowe agregaty niezbędne do działania (system hydrauliczny, sterowanie czy system chłodzenia). Obrabiarki mogą być doposażone w urządzenia peryferyjne takie jak: podajniki, zmieniające palet, system usuwania wirów, wirówki wiórów, system odsysania oparów ze strefy obróbki itp. W rezultacie dodatkowe urządzenia wpływają na większe zużycie energii, które może wynosić nawet kilkadziesiąt procent całego zużycia (rys. 2.7). Zmiany energii właściwej całkowitej e_{ct} i jej składowych stałej e_{cc} i zmiennej e_{cv} , wyznaczone dla zmiennej prędkości skrawania w toczeniu stali 11SMnPb30 na tokarce CNC przedstawiono na rys. 2.8. Zależność energii właściwej i jej składowych odniesionych do procesu skrawania [12] przedstawiono poglądowo na rys. 2.9.

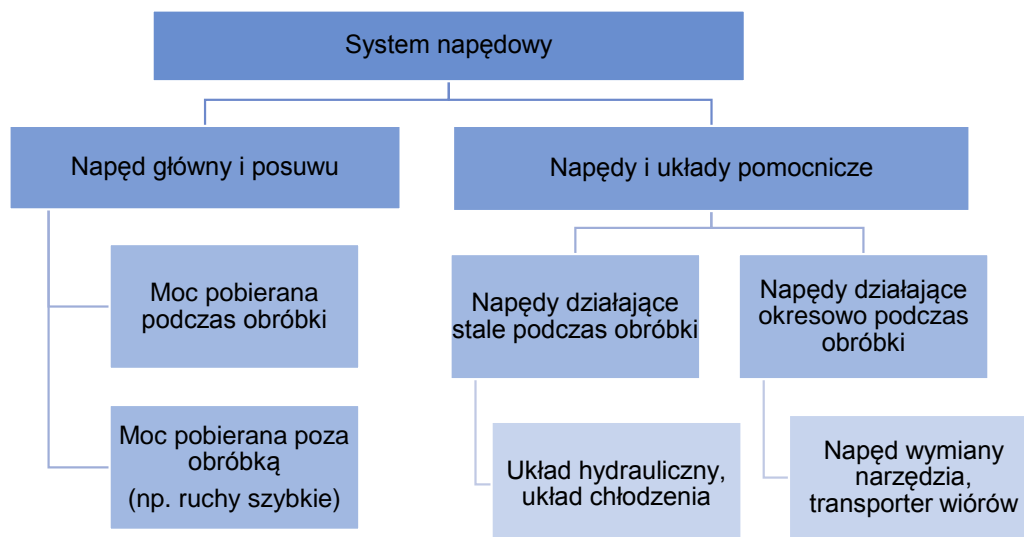


Rys. 2.8. Zmiany składowych energii skrawania w funkcji prędkości skrawania [30]



Rys. 2.9. Zależność energii właściwej i ich składowych od prędkości skrawania [26]

W strukturze systemu napędowego obrabiarki CNC (rys. 2.10) wydziela się napędy główny i posuwowy, które odpowiadają za realizację procesu skrawania. Zużycie energii przez napęd główny i posuwowy związane jest przede wszystkim z obróbką, jak również poza nią, np. poprzez realizację ruchów szybkich. System napędowy obrabiarek CNC składa się również z napędów pomocniczych działających stale podczas obróbki, jak np. układ hydrauliczny, chłodzenia czy smarowania [35]. Napędy pomocnicze pracują również okresowo podczas obróbki i są niezbędne do wymiany narzędzia czy transportu wiórów. Ocenia się, że proces usuwania materiału w nowoczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie pochłania od kilkunastu lub kilkudziesięciu procent całkowitego zapotrzebowania na energię [31].



Rys. 2.10. Struktura systemu napędowego obrabiarki CNC [61]

Na moc całkowitą pobieraną przez obrabiarkę z sieci składają się moc skrawania oraz moc stała (1). Aby określić energochłonność obróbki należy rozpatrzyć, ile energii niezbędne jest do usunięcia danej objętości materiału. Na energię właściwą całkowitą składają się składowe takie jak energia właściwa skrawania oraz energia właściwa stała. Energia właściwa skrawania wyrażona w J/mm^3 , stanowi stosunek mocy skrawania ($P_{skrawania}$) do objętości usuniętego w jednostce czasu materiału (Q_v). W podobny sposób określona jest energia właściwa stała czyli stosunek mocy stałej do objętości usuniętego materiału [30].

$$P_{całkowita} = P_{skrawania} + P_{stała} \quad (1)$$

$$e_{właściwa\ całkowita} = \frac{P_{całkowita}}{Q_v} \quad (2)$$

$$e_{właściwa\ skrawania} = \frac{P_{skrawania}}{Q_v} \quad (3)$$

$$e_{właściwa\ stała} = \frac{P_{stała}}{Q_v} \quad (4)$$

Współczesne obrabiarki CNC są zaawansowanymi urządzeniami mechatronicznymi, którym stawia się wysokie wymagania co do wydajności oraz jakości wykonywanych powierzchni, niezawodności oraz efektywności energetycznej [47].

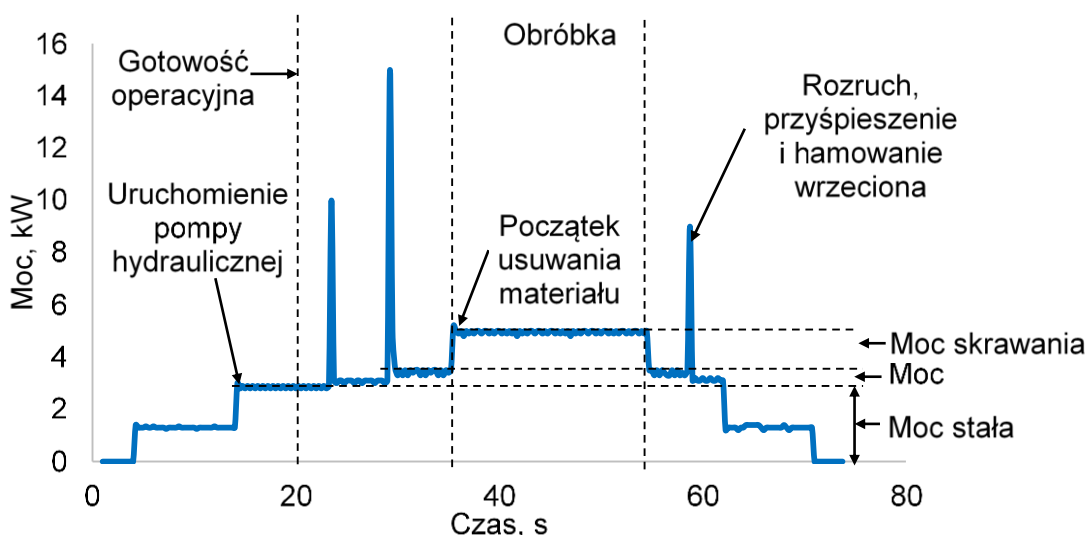
Rozpatrując potrzeby systemu wytwarzania współczesne obrabiarki powinny [37]:

- zapewniać wysoką jakość powierzchni obrobionej,

- umożliwiać realizację całej obróbki na jednej obrabiarce,
- umożliwiać szybką realizację procesów,
- zapewniać wysoką dokładność wymiarową,
- umożliwiać przeprowadzenie hybrydowych procesów wytwórczych,
- umożliwiać osiągnięcie wysokiej funkcjonalności produktu poprzez odpowiednią złożoność technologii wytwarzania.

Ze względu na ochronę środowiska naturalnego obrabiarki powinny [35,41]:

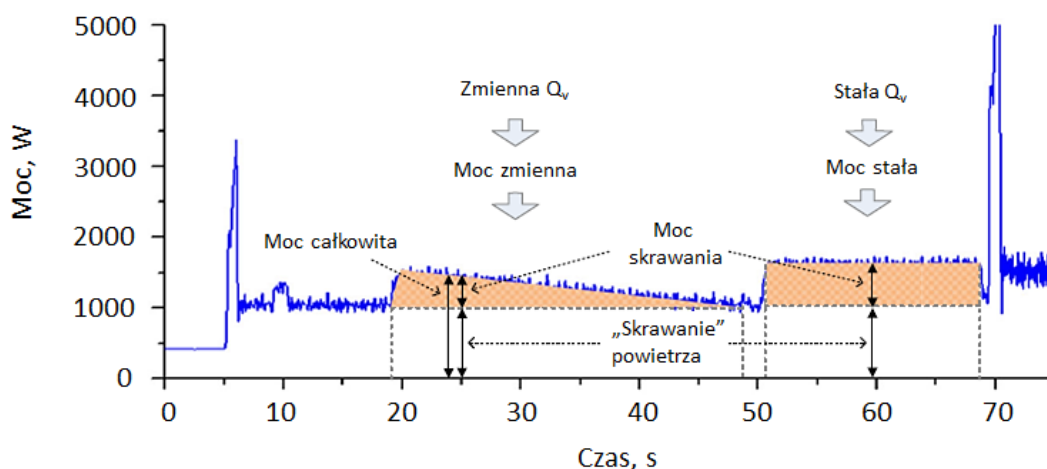
- zużywać jak najmniej energii elektrycznej na czynności pomocnicze realizowane przez układy hydrauliczne, chłodzące, usuwanie wiórów itp.,
- zużywać jak najmniej energii elektrycznej na wykonywanie ruchów posuwowych, przesuwnych i pomocniczych, a także zużywać jak najmniej smarów, olejów, płynów obróbkowych; wpływ tych mediów powinien być możliwie mało uciążliwy dla środowiska,
- nie powodować niepotrzebnego zmęczenia operatora,
- strefa robocza obrabiarki podczas skrawania powinna być szczelnie zamknięta osłonami i wyposażona w wyciąg z filtrem, aby wytworzone podczas skrawania pyły i aerozole nie rozprzestrzeniały się po hali produkcyjnej.



Rys. 2.11. Profil poboru mocy obrabiarki w procesie toczenia [1]

Zgodnie z typowym profilem poboru mocy przedstawionym na rys. 2.11, w procesie toczenia można wydzielić cztery charakterystyczne zakresy:

- moc stałą wymaganą do wprowadzenia wszystkich elementów obrabiarki w stan operacyjnej gotowości,
- moc operacyjną niezbędną do przemieszczania elementów obrabiarki w trakcie ruchów ustawczych bez kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem (określaną również jako „skrawanie powietrza”),
- moc skrawania niezbędną do usuwania naddatku przez ostrze narzędzia.



Rys. 2.12. Pobór mocy obrabiarki przy stałym i zmiennym nadadku obróbkowym [7]

Na rys. 2.12 przedstawiono profil poboru mocy dla zmiennej i stałej objętości skrawania. W trakcie usuwania materiału ze stałymi parametrami skrawania (a_p , f , v_c) należy spodziewać się poboru mocy na stałym poziomie (z minimalnymi fluktuacjami). W przypadku zmiennej wartości co najmniej jednego parametru skrawania (a_p , f , v_c) otrzymuje się zmienną wydajność objętościową Q_v , co skutkuje odmiennym zapotrzebowaniem mocy.

Do energooszczędnych rozwiązań stosowanych w obrabiarkach można zaliczyć [35]:

- energooszczędne silniki o podwyższonej sprawności,
- elektrowrzeciona i serwonapędy z odzyskiem energii, umożliwiające powtórne wykorzystanie np. podczas przyspieszania,
- układy smarowania łożysk tocznych o zredukowanej ilości podawanego do nich oleju,

- energooszczędne transformatory i elektrozawory w układach hydraulicznych i pneumatycznych,
- konstrukcje szaf sterowniczych nie wymagające wymuszonego chłodzenia,
- chłodzenie wodne wrzeciona, zespołu hydrauliki, szafy rozdzielczej przez jeden zintegrowany zespół.

Ze względu na różne wymagania dotyczące końcowego efektu obróbki, wydajności procesu nie da się określić jednolicie dla wszystkich obrabiarek, czy rodzajów obróbki. Dlatego można wyróżnić [35]:

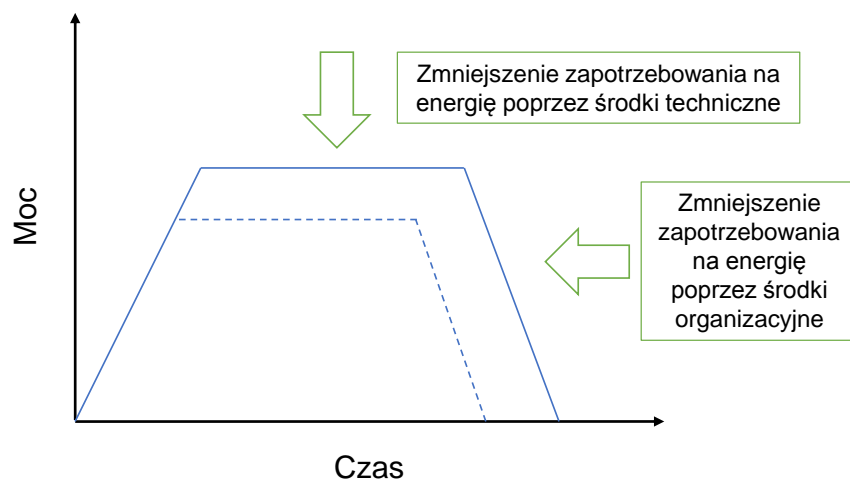
- wydajność obróbki objętościową Q_v , wyrażającą usuniętą objętość materiału (w postaci wiórów) w jednostce czasu,
- wydajność obróbki powierzchniową Q_F , określającą pole powierzchni obrobionej w jednostce czasu,
- wydajność obróbki jednostkową Q_j , podającą liczbę sztuk określonych przedmiotów obrabianych w jednostce czasu.

Energochłonność procesu wytwórczego określa ilość potrzebnej energii do przekształcenia półfabrykatu w finalny produkt o wymaganych cechach (kształcie, wymiarach, właściwościach mechanicznych i strukturze itp.)

Energochłonność skrawania określa moc napędu głównego obrabiarki potrzebną do pokonania oporu stawianego przez materiał obrabiany.

Na energochłonność obrabiarki, poza napędem głównym i posuwowym składają się urządzenia pomocnicze takie jak: pompa hydrauliczna, pompa układu chłodzenia, układ wymiany narzędzia, narzędzia napędzane, sterowanie, transporter wiórów.

W odniesieniu do zapotrzebowania na moc (rys. 2.13), redukcję zużycia energii można osiągnąć za pomocą takich środków technicznych, jak na przykład stosowanie energooszczędnych napędów czy innych oszczędnych odbiorników energii. Ponadto poprawa efektywności energetycznej może być pośrednio realizowana za pomocą środków organizacyjnych. Podczas gdy środki techniczne obejmują na przykład wymianę hydrauliki i silników na energooszczędne, środki organizacyjne koncentrują się na optymalizacji czasów operacji w oparciu o planowanie procesów technologicznych [33,60].



Rys. 2.13. Strategie przyczyniające się do zmniejszenia zużycia energii przez obrabiarkę [33,60]

W literaturze można znaleźć wiele modeli dotyczących zużycia energii. Autorzy prac dotyczących energochłonności obróbki przyjmują określone modele zużycia energii, koncentrując się na składnikach mocy całkowitej, najczęściej wyróżniając energię lub moc niezbędną do obróbki (usunięcia materiału) oraz energię używaną do czynności pomocniczych. Niektóre modele uwzględniają również trwałość narzędzia lub odnoszą się do objętości usuniętego materiału [3].

Równanie (5) zaproponowane przez Mori i innych [44] przedstawia model zużycia energii obrabiarki E (Wh) podczas jej normalnej pracy. Uwzględnia on stały składnik mocy, składnik mocy zużywanej w skrawaniu przez wrzeciono i serwonapędy, która zmienia się wraz z warunkami obróbki, moc zużywaną na pozycjonowanie przedmiotu i przyspieszanie, bądź redukcję obrotów wrzeciona do wymaganej prędkości.

$$E = P_1(t_1 + t_2) + P_2t_2 + P_3t_3 \quad (5)$$

gdzie:

P_1 – stały składnik mocy, niezależny od stanu ruchu,

t_1 – czas cyklu bez skrawania,

t_2 – czas cyklu podczas skrawania,

P_2 – składnik mocy zużywanej w skrawaniu przez wrzeciono i serwonapędy, która zmienia się wraz z warunkami obróbki,

P_3 – moc zużywana na pozycjonowanie przedmiotu i przyspieszanie, bądź opóźnianie, wrzeciona do wymaganej prędkości,

t_3 – czas wymagany do pozycjonowania stołu bądź zmiany prędkości obrotowej wrzeciona.

Model zużycia energii (6) zaproponowany przez Gutowskiego i innych [31], uwzględnia moc zużywaną przez obrabiarkę, opór właściwy skrawania oraz objętość usuniętego materiału:

$$E = (P_0 + k_c Q_v) t \quad (6)$$

gdzie:

P_0 – moc zużywana przez obrabiarkę,

k_c – opór właściwy skrawania zależny od właściwości materiału obrabianego,

Q_v – objętość usuwanego materiału,

t – czas obróbki.

Rajemi i inni [49] przedstawili model zużycia energii (7), w którym uwzględniono moc zużywaną przez obrabiarkę bez skrawania, czas skrawania oraz czas przeznaczony na wymianę narzędzia, czy czas przygotowawczy obrabiarki. W modelu (7) uwzględniono trwałość narzędzia, ilość zużytej energii przypadającej na ostrze skrawające, energię właściwą skrawania jak również objętość usuniętego materiału.

$$E = P_0 t_1 + (P_0 + k_c Q_v) t_2 + P_0 t_3 \left(\frac{t_2}{T} \right) + \gamma_E \left(\frac{t_2}{T} \right) \quad (7)$$

gdzie:

P_0 – moc zużywana przez obrabiarkę bez skrawania,

t_1 – czas przygotowawczy obrabiarki,

t_2 – czas skrawania,

t_3 – czas wymiany narzędzia,

T – okres trwałości ostrza,

γ_E – ilość energii przypadającej na ostrze skrawające,

k_c – opór właściwy skrawania,

Q_v – objętość usuwanego materiału.

Diaz i inni [15] w zaproponowanym modelu (8) wyodrębnili moc skrawania oraz moc „skrawania powietrza” czyli dojazd do materiału lub ruchy ustawcze w czasie obróbki.

$$E = (P_{skrawania} + P_{skrawania\ powietrza}) \Delta t \quad (8)$$

gdzie:

$P_{skrawania}$ – moc skrawania,

P „skrawania powietrza” – moc „skrawania powietrza”,

Δt – czas obróbki.

Model (9) zaproponowany przez Kong’a i innych [39] obejmuje energię stałą nie związaną z obróbką, energię zużywaną przez napęd wrzeciona, napędy osi oraz napęd urządzenia do wymiany narzędzi podczas utrzymywania stałych parametrów pracy, energię używaną przez napęd wrzeciona, napędy osi oraz napęd wymiany narzędzi podczas przyspieszania i zmniejszania prędkości oraz energię skrawania.

$$E = E_{stała} + E_{napędów} + E_{rozruchu\ napędów} + E_{skrawania} \quad (9)$$

gdzie:

$E_{stała}$ – energia nie związana z obróbką,

$E_{napędów}$ – energia zużywana przez napęd wrzeciona, napędy osi oraz napęd wymiany narzędzi podczas utrzymywania stałych parametrów pracy,

$E_{rozruchu\ napędów}$ – energia zużywana przez napęd wrzeciona, napędy osi oraz napęd wymiany narzędzi podczas przyspieszania i zmniejszania prędkości,

$E_{skrawania}$ – energia skrawania.

Kara i inni [38] proponują model (10), do wyznaczenia energii właściwej skrawania, który obejmuje współczynniki uzależnione od rodzaju obrabiarki oraz uwzględnia objętościową wydajność obróbki (Q_v).

$$\text{Energia właściwa skrawania} = C_0 + \frac{C_1}{Q_v} \quad (10)$$

gdzie:

C_0, C_1 – współczynniki uzależnione od rodzaju obrabiarki,

Q_v – objętościowa wydajność obróbki.

He i inni [32] proponują model (11) zużycia energii, który uwzględnia energię zużywaną przez napęd wrzeciona, energię zużywaną przez napędy posuwów, energię zużywaną przez napęd wymiany narzędzia, energię zużywaną przez pompę chłodzenia oraz energię stałą – niezależną od obróbki.

$$E = E_{\text{napędu wrzeciona}} + E_{\text{posuwu}} + E_{\text{wymiany narzędzia}} + E_{\text{pompa chłodzenia}} + E_{\text{stała}} \quad (11)$$

gdzie:

$E_{\text{napędu wrzeciona}}$ – energia zużywana przez napęd wrzeciona,

E_{posuwu} – energia zużywana przez napędy posuwów,

$E_{\text{wymiany narzędzia}}$ – energia zużywana przez napęd wymiana narzędzia,

$E_{\text{pompy chłodzenia}}$ – energia zużywana przez pompę chłodzenia,

$E_{\text{stała}}$ – energia stała.

Model zużycia energii (12) zaproponowany przez Calvanese i innych [6] uwzględnia takie składniki jak: energię stałą pobieraną po włączeniu maszyny, energię zużywaną przez silniki napędów osi do ruchów szybkich i roboczych, energię zużytą przez agregaty chłodnicze napędów osi, energię zużytą przez napęd wrzeciona (obejmującą również straty), energię zużytą przez agregaty chłodnicze napędu wrzeciona, energię zużywaną przez transporter wiórów, energię wykorzystaną do wymiany narzędzi oraz energię wykorzystaną do wymiany i mocowania palet.

$$E = E_{\text{stała}} + E_{\text{napędów osi}} + E_{\text{chłodzenia napędów osi}} + E_{\text{napędu wrzeciona}} \quad (12) \\ + E_{\text{chłodzenie napędu wrzeciona}} + E_{\text{transportera wiórów}} \\ + E_{\text{wymiany narzędzi}} + E_{\text{mocowania palet}}$$

gdzie:

$E_{\text{stała}}$ – energia zużyta po włączeniu maszyny,

$E_{\text{napędów osi}}$ – energia zużywana przez silniki napędów osi do ruchów szybkich i roboczych,

$E_{\text{chłodzenia napędów osi}}$ – energia zużyta przez agregaty chłodnicze napędów osi,

$E_{\text{napędu wrzeciona}}$ – energia zużyta przez napęd wrzeciona (obejmująca również straty),

$E_{\text{chłodzenia napędu wrzeciona}}$ – energia zużyta przez agregaty chłodnicze napędu wrzeciona,

$E_{\text{transportera wiórów}}$ – energia zużywana przez transporter wiórów,

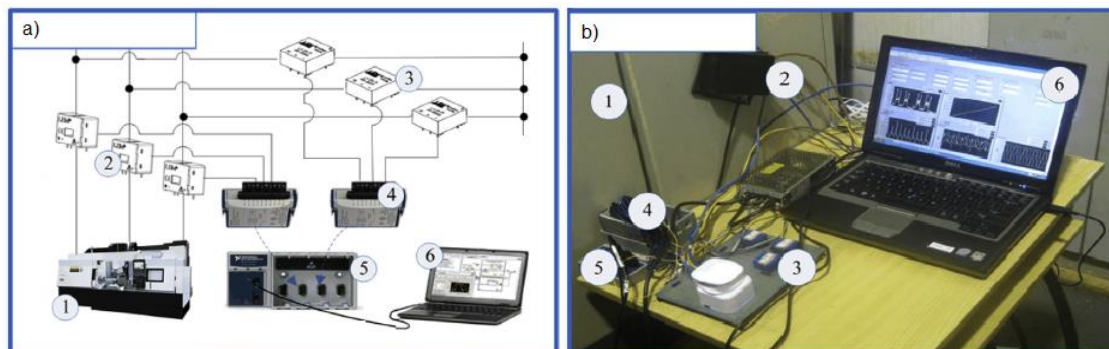
$E_{\text{wymiany narzędzi}}$ – energia wykorzystana do wymiany narzędzi,

$E_{\text{mocowania palet}}$ – energia wykorzystana do wymiany i mocowania palet.

2.4. Pomiar mocy i energii skrawania

Ocenę energochłonności obróbki można przeprowadzić za pomocą różnych metod badawczych. W pracach poświęconych energochłonności obróbki stosowane są głównie komercyjne analizatory elektryczne oraz układy oparte na przetwornikach składane z osobnych komponentów. Generalna istota pomiaru jest taka sama dla obu rozwiązań.

Układ zaproponowany przez Tanga [55] składa się z kart pomiarowych rejestrujących sygnały z przetworników, które umieszczono w terminalu cDAQ (rys. 2.14). System pomiarowy podłączony jest do komputera, gdzie w środowisku LabVIEW utworzono program rejestrujący. Istotną zaletą takiego rozwiązania jest otwartość systemu, jak również możliwość rozbudowy o kolejne przetworniki lub inne czujniki. Pomiar mocy jest dobrym narzędziem diagnostycznym a dodatkowe sensory, jak na przykład siłomierz, czy czujnik emisji akustycznej mogą wspierać funkcje nadzorcze takie jak monitorowanie stanu ostrza w obrabiarkach skrawających [13]. W odróżnieniu od komercyjnych systemów pomiaru mocy, zastosowany układ wymaga znajomości środowiska LabVIEW oraz umiejętności obsługi i konfigurowania kart pomiarowych oraz przetworników.



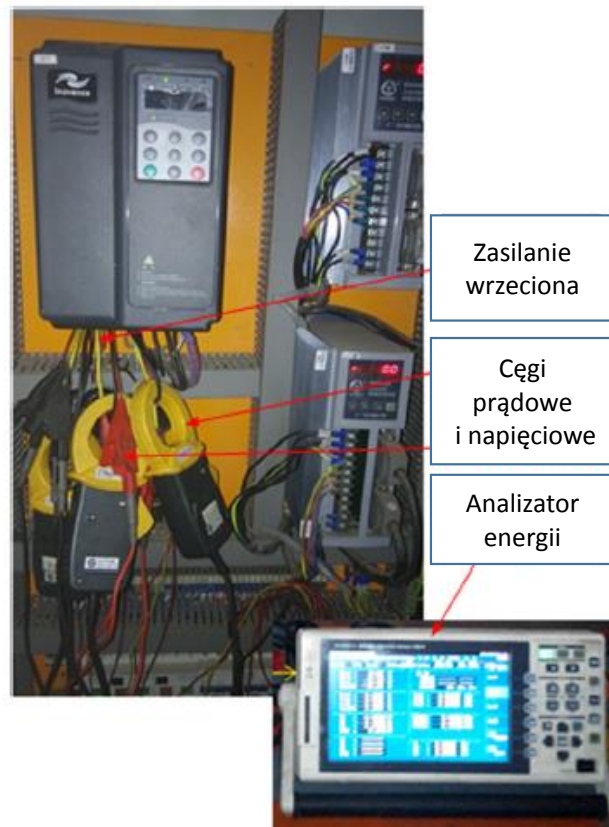
Rys. 2.14. Układ do pomiaru mocy na obrabiarce CNC: a) schemat ideowy, b) widok stanowiska, 1 – obrabiarka CNC, 2 – przetworniki prądowe, 3 – przetworniki napięciowe, 4 – karty pomiarowe, 5 – terminal cDAQ, 6 – komputer z oprogramowaniem LabVIEW [55]

W pomiarach energochłonności obróbki stosowane są analizatory elektryczne (rys. 2.15), które pozwalają monitorować parametry elektryczne obrabiarki, jak np. zużycie energii czy pobór mocy [18,70]. Stosowanie tego typu analizatorów rozszerza monitorowanie parametrów energetycznych również na inne urządzenia elektryczne. Są to urządzenia do kompleksowej analizy parametrów elektrycznych pozwalające na

akwizycję danych w czasie pomiaru. Przykłady zamontowanych przetworników w obrabiarce przedstawiono na rys. 2.16 i 2.17.



Rys. 2.15. Analizator elektryczny Fluke 438-II [70]



Rys. 2.16. Pomiar zużycia energii z użyciem analizatora HIOKI 3390 [58]



Rys. 2.17. Przetworniki prądowe podłączone w obrabiarce na linii prądu stałego [34]

Do pomiaru prądu silnika wykorzystuje się wiele różnych czujników. Czujniki mocy w układach nadzoru obrabiarek mogą być wykorzystywane jedynie wtedy, gdy moc skrawania stanowi istotną część mocy silnika [52].

Ważny obszar diagnostyczny stanowi również pomiar mocy skutecznej, która jest proporcjonalna do momentu obrotowego silnika lub wału napędowego. Pomiar mocy skutecznej pozwala na monitorowanie stanu obciążenia lub przeciążenia silnika lub napędu. Przykładem może być czujnik PS200-DGM firmy Montronix (rys. 2.18), który umożliwia pomiar z dużą rozdzielczością poboru mocy skutecznej napędów wrzeciona lub napędów posuwu oraz generuje odpowiedni analogowy sygnał wyjściowy. Taki sygnał można wykorzystać do monitorowania procesu skrawania. Czujnik ten współpracuje z silnikami prądu stałego, a także z silnikami jedno- lub trójfazowymi. Czujnik PS200-DGM umożliwia dostosowanie sygnału wyjściowego do odpowiedniego napędu i procesu dzięki dostępnym ustawieniom różnych wzmocnień i opcji filtrowania [52,71]. W połączeniu z systemem monitorowania procesów może być indywidualnie ustawiony dla każdego narzędzia skrawającego. Nadaje się do monitorowania zużycia i uszkodzeń narzędzi oraz wykrywania ich braku, niezależnie od stosowanego systemu sterowania.



Rys. 2.18. Układ do pomiaru mocy skutecznej napędu wrzeciona lub napędów posuwu PS200-DGM firmy Montronix [71]

Podobną zasadą działania charakteryzuje się przetwornik mocy skutecznej EPT 20 firmy Promotec (rys. 2.19), który wykorzystuje trzy napięcia/prądy z trzech linii zasilania (fazy L1, L2, L3) w celu obliczenia mocy skutecznej napędu [52]. Przetwornik do pomiaru prądu w dwóch fazach wykorzystuje dwa czujniki Halla typu HC 200 C i mierzy trzy napięcia fazowe. Prąd trzeciej fazy obliczany jest na podstawie dwóch zmierzonych wcześniej prądów. Przetwornik ten znajduje zastosowanie w centrach obróbkowych i wiertarskich, liniach obróbkowych i obrabiarkach zespołowych do zabezpieczenia przed przeciążeniem, monitorowania narzędzi i detekcji brakujących wiertel o średnicy od 2 mm wzwyż [52].



Rys. 2.19. Przetwornik mocy czynnej EPT20 firmy Promotec [52]

Komercyjne rozwiązania do pomiaru zużycia prądu obrabiarek sterowanych numerycznie oferują m.in. firmy Nordman [72] i Stoneycnc [73]. Firma Nordman do pomiaru poboru mocy proponuje bardzo czuły i szybko reagujący trójfazowy układ

składający się z trzech czujników prądowych, których działanie jest oparte na zjawisku Halla i urządzenia pomiarowego WLM-3 (rys. 2.20). Czujniki prądowe są montowane w skrzynce elektrycznej, bezpośrednio na przewodach zasilających obrabiarkę. Dopasowanie czujnika WLM-3 do pomiaru różnych poziomów mocy odbywa się przez dobór zakresu pomiarowego czujnika prądowego z dostępnego typoszeregu, lub/i przez dobór liczby pętli przewodu zasilającego przez otwór czujnika [52]. Na przykład, jeżeli dokonywany jest pomiar prądu w małych silnikach, to każdy przewód fazowy należy kilkakrotnie przewijać przez otwór właściwego czujnika, aby zapewnić odpowiedni poziom sygnału pomiarowego.



Rys. 2.20. Czujnik prądowy WLM-3 firmy Nordman [72]

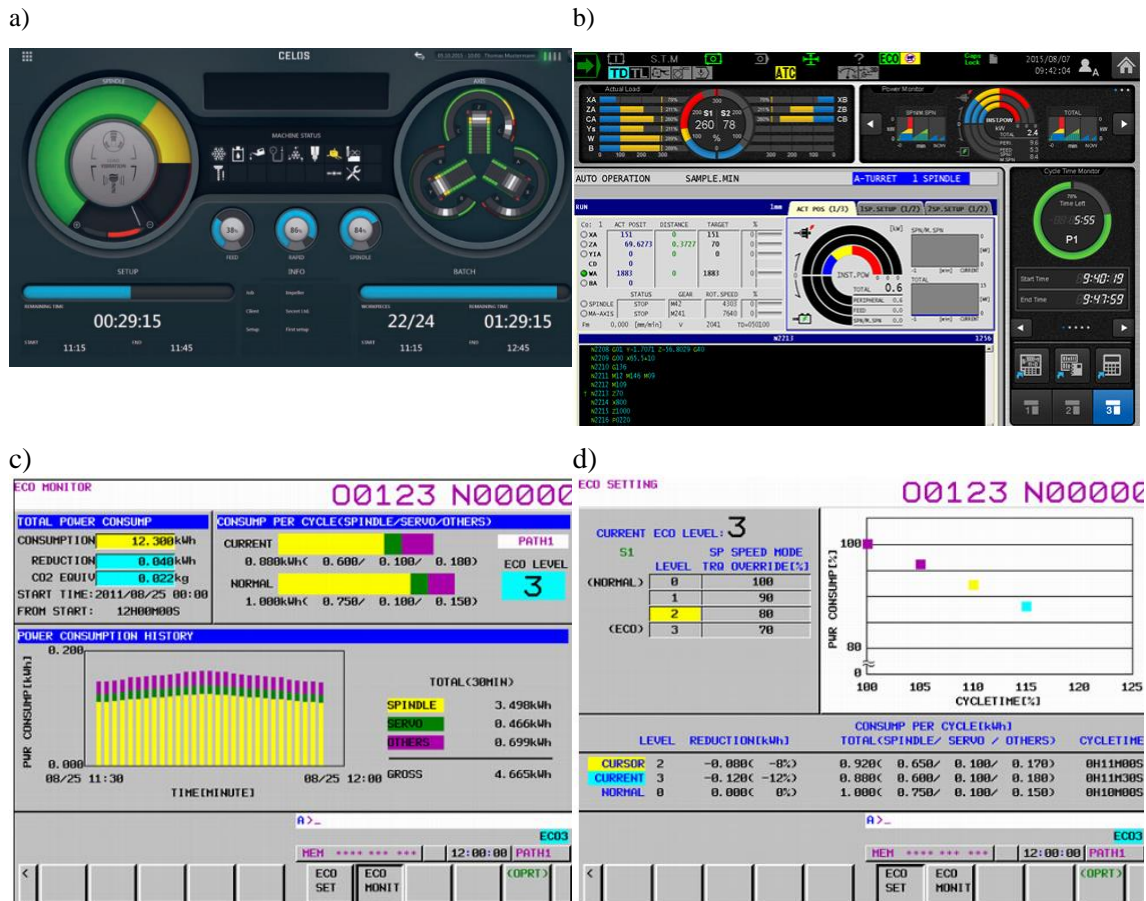
Firma Stoneycnc zaprojektowała i wdrożyła system do trójfazowego pomiaru mocy na frezarce CNC Hurco VM2. Zastosowany system do pomiaru poboru mocy wykorzystuje czujniki prądowe wpięte w szafie sterowniczej do trzech przewodów zasilających obrabiarkę (rys. 2.21). System akwizycji danych wraz z oprogramowaniem do analizy sygnałów umożliwia pobieranie tych sygnałów dla wszystkich stanów pracy obrabiarki [52]. System umożliwia zidentyfikowanie różnych stanów obrabiarki, takich jak: zmiany narzędzi, gwałtowne ruchy, rozpędzanie wrzeciona, zmianę przedmiotu obrabianego i różne stany obróbki [52].



Rys. 2.21. Czujniki prądowe wpięte w szafie sterowniczej przewodów zasilających obrabiarkę [73]

Zarówno producenci nowoczesnych obrabiarek jak i systemów sterowania nimi, oferują poza podstawowymi funkcjami, czyli generowaniem toru ruchów narzędzia oraz uruchamiania dopływu chłodziwa, włączenia podajnika wiórów czy wymiany narzędzi, szereg funkcji wspomagających operatora. Współczesne obrabiarki zazwyczaj mają możliwość podłączenia do sieci Ethernet, co pozwala na wymianę danych, np. na zdalne nadzorowanie parametrów obróbki, czy zapisywanie programów w układzie sterowania maszyną. Sterowniki w obrabiarkach mają możliwość pobierania danych z wielu czujników monitorujących stan maszyny. Dane z czujników temperatury pozwalają na kompensację termiczną maszyny, a czujniki drgań czy emisji akustycznej (AE) pozwalają na uniknięcie drgań, np. poprzez korekcję wartości parametrów obróbki [53,54].

W ostatnich latach można zauważyć coraz większy nacisk producentów urządzeń wytwórczych na proekologiczne funkcjonalności. Producenci obrabiarek implementują systemy do diagnostyki maszyny, np. do monitorowania obciążenia napędu głównego oraz osi, w tym również do kontroli zużycia energii (rys. 2.22a,b) [74–76]. Systemy takie pozwalają na monitorowanie zużycia energii przez całą obrabiarkę lub na poszczególnych napędach. Monitorowane dane są przedstawione w formie graficznej [76] (rys 2.22c,d).



Rys. 2.22. Widok interfejsu służącego do monitorowania zużycia energii w obrabiarkach CNC na przykładzie firm: a) DMG Mori, b) Okuma, c) i d) Fanuc [74–76]

2.5. Struktura geometryczna powierzchni

2.5.1. Strefowa budowa warstwy wierzchniej

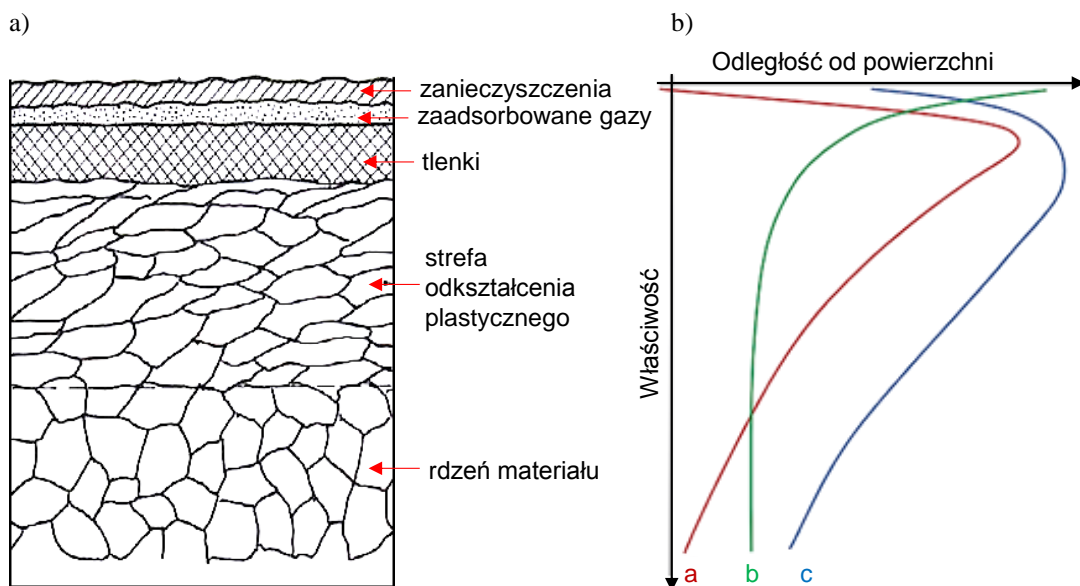
Warstwa materiału w procesie obróbki ubytkowej podlega różnym oddziaływaniom procesowym – fizycznym (ciepła, siła, dyfuzji atomów obcych pierwiastków), chemicznym (np. utlenianiu) i strukturalnym (metalograficznym). Powstała w procesie wytwarzania warstwa usytuowana poniżej fizycznie czystej powierzchni jest traktowana jako warstwa podpowierzchniowa [26].

Ponieważ w stosunku do rdzenia materiału warstwa ta przylega od strony powierzchni rzeczywistej materiału nazywana jest również warstwą wierzchnią – WW [5]. Technologiczna warstwa wierzchnia – TWW jest częścią materiału podlegającego przetworzeniu, ograniczona z góry przez rzeczywistą powierzchnię kształtowanej części,

obejmująca tę powierzchnię i warstwę materiału poniżej o zmienionych właściwościach fizycznych, czasami również chemicznych, w stosunku do wyjściowego stanu materiału.

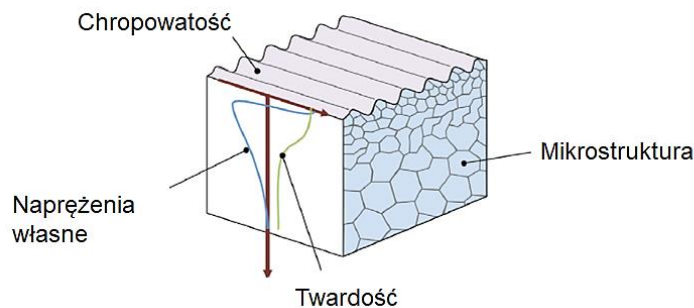
W literaturze można znaleźć wiele opracowań dotyczących modeli warstwy wierzchniej o różnej liczbie warstw. Ze względu na intensywność i zakres oddziaływań procesowych na kształtowany materiał modele opisujące budowę warstwy wierzchniej różnią się między sobą głównie stopniem szczegółowości oraz uwzględnianiem różnej liczby zjawisk obecnych w procesie. Jednakże wszystkie modele zakładają jej budowę strefową, które przechodzą jedna w drugą o różnej budowie i właściwościach [5]. Najprostsze modele uwzględniają trzy strefy charakteryzujące warstwę wierzchnią. Bardziej rozbudowane modele zakładają cztery, pięć, sześć, a nawet osiem stref charakterystycznych warstw, które przyjęto nazywać strukturalnymi modelami budowy warstwy wierzchniej [5,26]. Każda strefa ma określoną grubość i jest ograniczona zakresem występowania niektórych cech warstwy wierzchniej. Poszczególne strefy mogą w ogóle nie występować lub wzajemnie się przenikać, przechodząc jedna w drugą lub zajmować wspólnie tę samą przestrzeń [5]. Model rozwinięty warstwy wierzchniej składający się z 8 stref, najbardziej odpowiada rzeczywistej budowie warstwy wierzchniej utworzonej w wyniku obróbki skrawaniem. W praktyce zwykle wystarczy 5-strefowy model budowy warstwy wierzchniej utworzony w wyniku obróbki skrawaniem przedstawiony na rys. 2.23.

Otrzymana w wyniku obróbki skrawaniem warstwa wierzchnia o określonych parametrach jest poddawana jednej lub kilku kolejnym operacjom (np. toczenie zgrubne – toczenie wykańczające – nagniatanie czy szlifowanie), w wyniku których będą tworzyły lub modyfikowały się inne warstwy wierzchnie, o innych niż wyjściowa, właściwościach. Warstwa wierzchnia wykazuje dużą różnorodność stanu fizykochemicznego. Istnienie i grubość jej poszczególnych stref oraz całkowita grubość warstwy wierzchniej zależą od rodzaju i sposobu obróbki, składu chemicznego materiału rdzenia, jego właściwości mechanicznych, od rozkładu sił i ilości wydzielającego się ciepła, a także od reakcji chemicznych i od dyfuzji lub sublimacji składników warstwy wierzchniej z otaczającym je ośrodkiem, czy od intensywności parametrów obróbki [5].



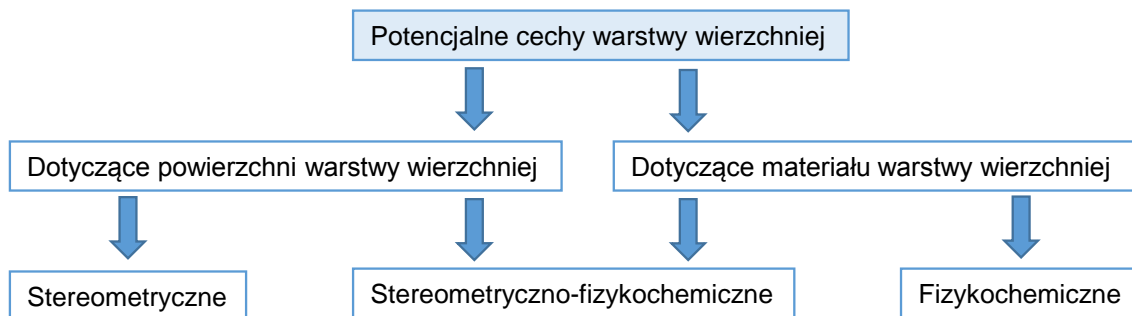
Rys. 2.23. Schematyczny przekrój warstwy wierzchniej w odniesieniu do obróbki skrawaniem oraz rozkład wybranych właściwości stref warstwy wierzchniej, (a) rozkład naprężeń, (b) skład chemiczny, (c) rozkład twardości materiału [26,45]

Zróznicowanie stref warstwy wierzchniej odnosi się do mikrostruktury (geometrycznego układu), obejmującej kształt, wymiary oraz rozmieszczenie w objętości WW. Właściwości fizykochemiczne i mechaniczne zmieniają się w głąb warstwy wierzchniej do rdzenia materiału, gdzie następuje ich stabilizacja (rys. 2.23 i 2.24) [45].



Rys. 2.24. Poglądowe przedstawienie charakterystyk technologicznej warstwy wierzchniej [7]

Właściwości warstwy wierzchniej można opisać zbiorem parametrów wzajemnie ze sobą powiązanych. Stan warstwy wierzchniej w wyniku obróbki skrawaniem można opisać parametrami stereometrycznymi (np. chropowatość, falistość, nośność) oraz stereometryczno-fizykochemicznymi, dotyczącymi fizycznej WW oraz parametrami fizykochemicznymi i stereometryczno-fizykochemicznymi dotyczącymi materiału WW (rys. 2.25).



Rys. 2.25. Podstawowe potencjalne cechy warstwy wierzchniej

O własnościach i właściwościach warstwy wierzchniej w znacznym stopniu decydują parametry stereometryczne, opisujące strukturę geometryczną powierzchni (SGP), które najczęściej stosuje się do opisu zmian zachodzących w warstwie wierzchniej [43].

Parametry struktury geometrycznej powierzchni charakteryzują się ciągłymi zmianami w trakcie procesu wytwarzania i eksploatacji dlatego dobrze opisują bieżący stan warstwy wierzchniej. Cechy fizykochemiczne i stereometryczno-fizykochemiczne, zmieniają się w zróżnicowanym stopniu i nie w każdych warunkach tak samo. Niektóre z tych parametrów w ogóle nie ulegają zmianom, szczególnie podczas eksploatacji.

2.5.2. Charakterystyka chropowatości powierzchni

Do grupy cech stereometrycznych SGP opisujących stan WW zalicza się: chropowatość, kierunkowość, izotropowość, okresowość i falistość. Istotnymi parametrami wyznaczającymi stan warstwy wierzchniej są parametry stereometryczne, a wśród nich chropowatość i kierunkowość [43].

Parametry chropowatości 2D i 3D można zaklasyfikować do określonych grup. Parametry profilu powierzchni 2D przedstawiono w tabeli 2.1, natomiast parametry przestrzenne 3D w tabeli 2.2.

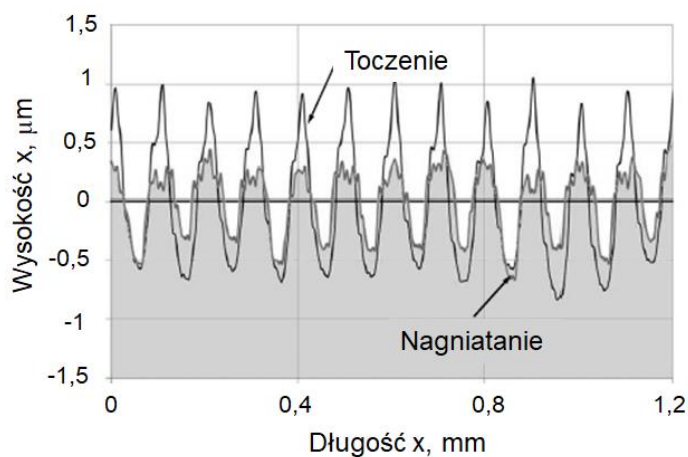
Tabela 2.1. Parametry profilu chropowatości 2D

Grupa	Parametry i funkcje	
Parametry pionowe	<i>Rp</i>	wysokość najwyższego wzniesienia profilu
	<i>Rv</i>	głębokość najniższego wgłębienia profilu
	<i>Rz</i>	najwyższa wysokość profilu chropowatości
	<i>Rc</i>	średnia wysokość elementów profilu
	<i>Rt</i>	całkowita wysokość profilu
Parametry amplitudowe	<i>Ra</i>	średnia arytmetyczna rzędnych profilu (średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej)
	<i>Rq</i>	średnia kwadratowa rzędnych profilu (średnie kwadratowe odchylenie profilu od linii średniej)
	<i>Rsk</i>	współczynnik asymetrii profilu (skośność)
	<i>Rku</i>	współczynnik nachylenia profilu (kurtoza)
Poziome	<i>RSm</i>	średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości
Mieszane (hybrydowe)	<i>RΔq</i>	średni kwadratowy wznios profilu
Krzywa udziału materiałowego, zwana krzywą Abotta Firestona (AFC)	<i>Rmr(c)</i>	udział materiałowy profilu
	<i>Rk</i>	zredukowana wysokość chropowatości (głębokość rdzenia chropowatości),
	<i>Rpk</i>	zredukowana wysokość wzniesienia profilu chropowatości
	<i>Rvk</i>	zredukowana głębokość wgłębienia profilu chropowatości
	<i>Mr1, Mr2</i>	udziały materiałowe na górnej granicy profilu rdzenia i na linii przecięcia oddzielającej głębokie wgłębienia od profilu rdzenia.
Parametry związane z obszarem plateau, wgłębień i wzniesień	<i>Rpq</i>	nachylenie prostej regresji w obszarze plateau
	<i>Rvq</i>	nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień
	<i>Rmq</i>	względny udział materiałowy na przecięciu plateau i wgłębień

Tabela 2.2. Parametry przestrzenne 3D w normy PN-EN ISO 25178-2:2012 [2,26,77]

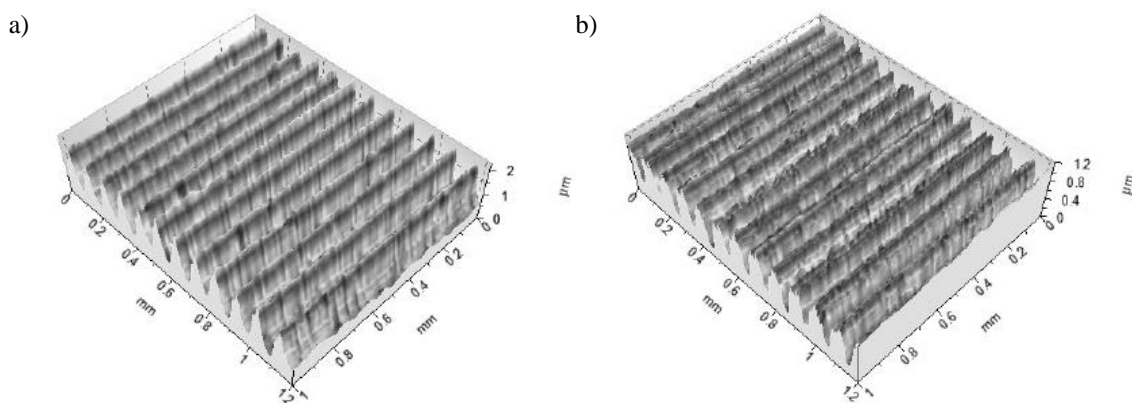
Grupa	Parametry i funkcje	
Parametry wysokościowe/ amplitudowe	<i>Sa</i>	średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni
	<i>Sq</i>	średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni
	<i>Sz</i>	maksymalna wysokość chropowatości powierzchni
	<i>Sp</i>	wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni
	<i>Sv</i>	głębokość najniższego wgłębienia powierzchni
	<i>Ssk</i>	współczynnik asymetrii powierzchni (3D skośność)
	<i>Sku</i>	współczynnik nachylenia powierzchni (3D kurtoza)
Parametry częstotliwościowe	<i>Sds</i>	gęstość wzniesień powierzchni
	<i>Str</i>	współczynnik struktury powierzchni
	<i>Sal</i>	wskaźnik (długość) autokorelacji
	<i>Std</i>	kierunkowość struktury powierzchni
Parametry hybrydowe	<i>SAq (Sdq)</i>	średnie kwadratowe pochylenie powierzchni
	<i>Ssc</i>	średnia arytmetyczna krzywizna wzniesień powierzchni
	<i>Sdr</i>	współczynnik rozwinięcia powierzchni.
Parametry funkcjonalne (krzywa nośności)	<i>Smr(c)</i>	współczynnik powierzchniowego udziału materiałowego
	<i>Smc(mr)</i>	odwrotny współczynnik powierzchniowego udziału materiałowego
	<i>Spk</i>	zredukowana wysokość wierzchołków
	<i>Svk</i>	zredukowana głębokość dolin
	<i>Sk</i>	wysokość rdzenia oraz dwie wartości udziału materiałowego <i>Smr1</i> i <i>Smr2</i>
	<i>Sbi</i>	wskaźnik nośności powierzchni
	<i>Sci</i>	wskaźnik gromadzenia środka smarnego w rdzeniu
	<i>Svi</i>	wskaźnik gromadzenia środka smarnego we wgłębieniach
Parametry objętościowe (krzywa udziału materiałowego)	<i>Vmp</i>	objętość materiału wzniesień
	<i>Vmc</i>	objętość materiału rdzenia
	<i>Vvc</i>	objętość pusterk rdzenia
	<i>Vvv</i>	objętość pustek wgłębień

Udowodniono istnienie korelacji pomiędzy chropowatością powierzchni a jej właściwościami funkcjonalnymi. Chropowatość ma wpływ, m.in. na właściwości zmęczeniowe materiału, tribologiczne czy odporność na korozję [24].



Rys. 2.26. Porównanie profili po toczeniu na twardo ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,15$ mm) oraz nagniataniu ($v_b = 25$ m/min, $f_b = 0,075$ mm/obr) [27]

Na rys. 2.26 porównano profile po toczeniu na twardo oraz nagniataniu tocznym. W tym przypadku powierzchnia po toczeniu wstępnym z parametrami $v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,15$ mm została poddana nagniataniu z parametrami: $v_b = 25$ m/min, $f_b = 0,075$ mm/obr.

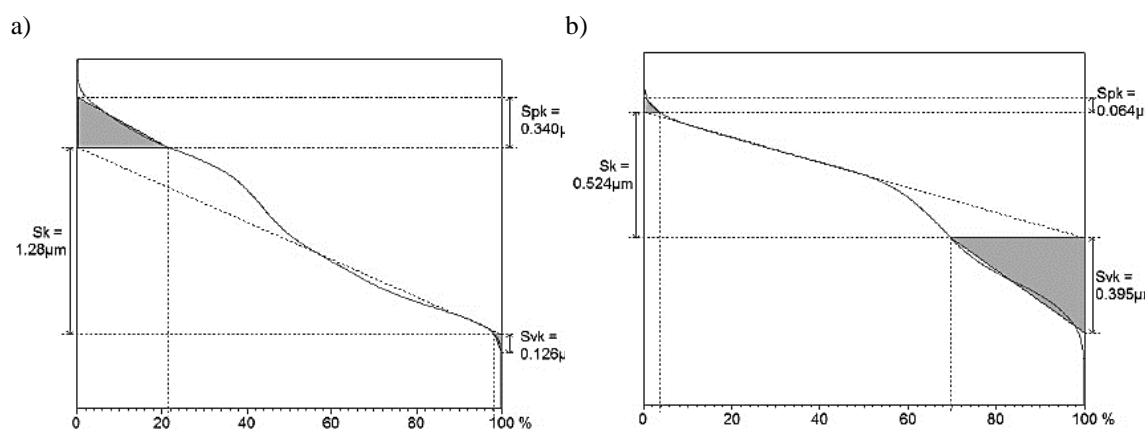


Rys. 2.27. Topografia powierzchni po: a) toczeniu na twardo ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,15$ mm), b) nagniataniu ($v_b = 25$ m/min, $f_b = 0,075$ mm/obr) [27]

Na rys. 2.27 można zauważyć zmianę profilu chropowatości, gdzie przez nagniatanie została zredukowana wysokość chropowatości, a zarejestrowany profil ma charakterystyczne tępo zakończone piki. Analizując również topografię powierzchni po

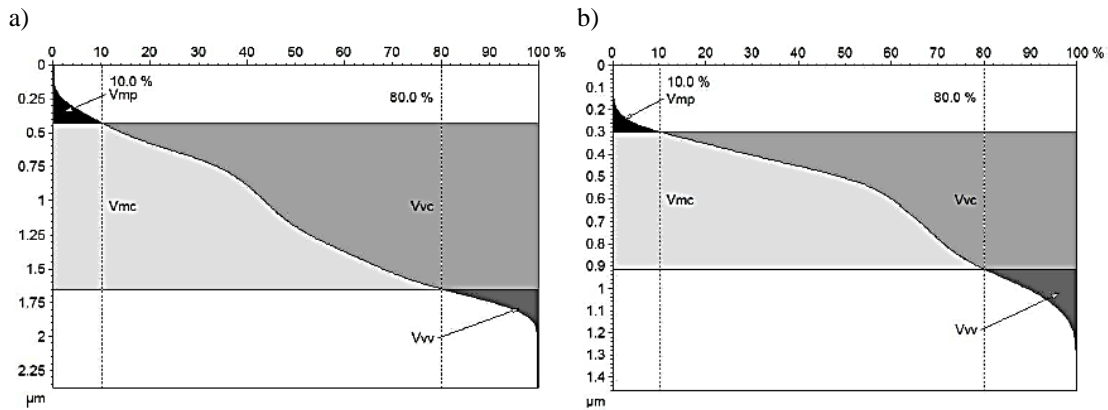
toczeniu i nagniataniu (rys. 2.27) można zaobserwować znaczną redukcję wysokości chropowatości. Po toczeniu parametr Sa wynosił $0,46 \mu\text{m}$, natomiast po nagniataniu zmniejszył się do $0,24 \mu\text{m}$. Podobnie parametr Sz zmniejszył się z $2,38 \mu\text{m}$ po toczeniu do $1,46 \mu\text{m}$ po nagniataniu.

Analizując krzywe udziału materiałowego (rys. 2.28) dla toczenia na twardo oraz nagniatania można zauważyć, że zmienił się ich charakter na bardziej progresywny. Zaobserwowano także, że po nagniataniu zmniejszył się parametr Spk oraz Sk . Nagniatanie spowodowało znaczny wzrost parametru Svk , co jest uważane za zaletę w ujęciu tribologicznym (umożliwia lepszą retencję środka smarnego) [23].



Rys. 2.28. Porównanie krzywych udziału materiałowego po: a) toczeniu na twardo ($v_c = 150 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,15 \text{ mm}$), b) nagniataniu ($v_b = 25 \text{ m/min}$, $f_b = 0,075 \text{ mm/obr}$) [27]

Na rys. 2.29 przedstawiono rozkłady związane z parametrami objętościowymi, gdzie dla toczenia na twardo uzyskano: $V_{mp} = 0,0108 \text{ ml/m}^2$, $V_{vc} = 0,679 \text{ ml/m}^2$, $V_{mc} = 0,547 \text{ ml/m}^2$, $V_{vv} = 0,0212 \text{ ml/m}^2$, natomiast dla sekwencyjnego toczenia i nagniatania zmierzono: $V_{mp} = 0,0044 \text{ ml/m}^2$, $V_{vc} = 0,285 \text{ ml/m}^2$, $V_{mc} = 0,331 \text{ ml/m}^2$, $V_{vv} = 0,0225 \text{ ml/m}^2$. Dane te świadczą o zachowaniu wspomnianej wcześniej zdolności retencji płynu w pustkach wgłębień po nagniataniu ($V_{vv} = 0,02 \text{ ml/m}^2$).



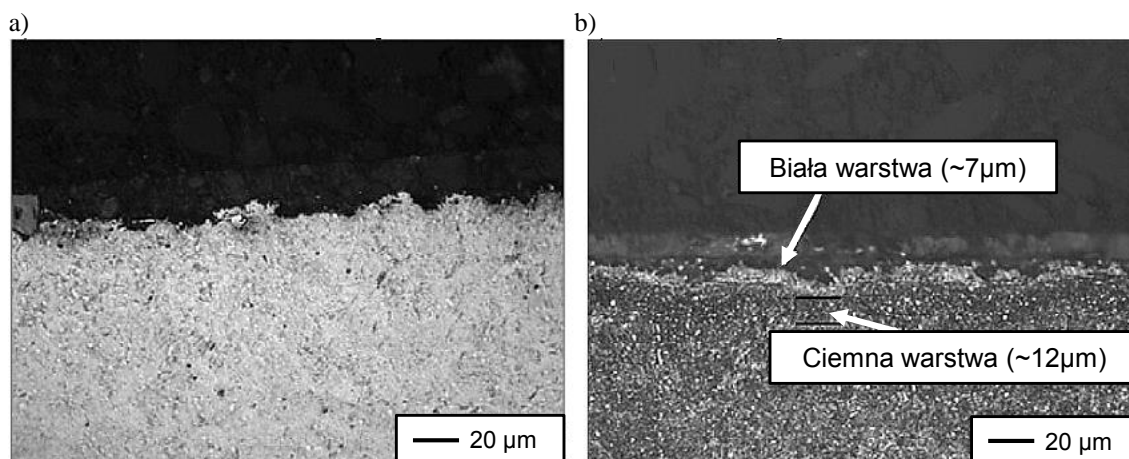
Rys. 2.29. Porównanie parametrów objętościowych po: a) toczeniu na twardo ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,15$ mm), b) nagniataniu ($v_b = 25$ m/min, $f_b = 0,075$ mm/obr [27])

2.6. Obróbka materiałów w stanie utwardzonym

Obróbka materiałów w stanie utwardzonym, zwana również obróbką na twardo (*ang. hard machining, HM lub hard part machining, HPM*) obejmuje skrawanie materiałów, których twardość po obróbce cieplnej (ulepszaniu lub hartowaniu) przekracza umownie 45 HRC [21]. W tradycyjnym procesie technologicznym obróbką wykańczającą części z materiałów w stanie utwardzonym jest szlifowanie, które może być zastępowane przez toczenie i frezowanie narzędziami o określonej geometrii ostrza z ceramiki mieszanej oraz CBN [19,26]. Poza podstawowymi sposobami do obróbki materiałów w stanie utwardzonym wykonuje się takie operacje jak: wytaczanie, rozwiercanie, wiercenie i przeciąganie.

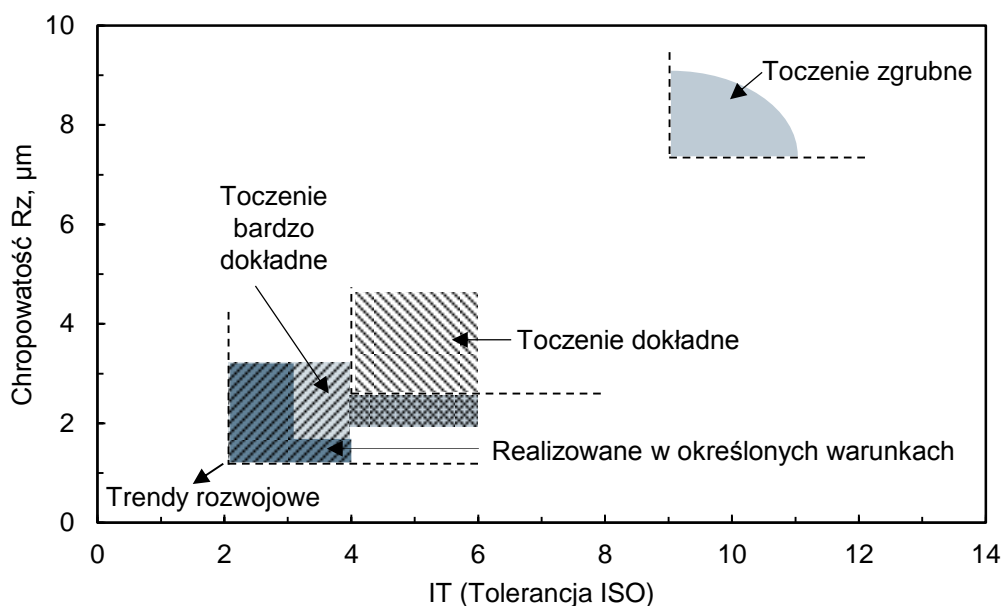
Obróbka na twardo stosowana jest do kształtowania części w przemyśle motoryzacyjnym (kół przekładni, wałków zębionych, innych elementów układów transmisji mocy), łożyskowym (pierścieni łożysk tocznych), produkcji elementów układów hydraulicznych oraz form i matryc [26].

Do zalet obróbki na twardo zalicza się możliwość wyeliminowania uciążliwego dla środowiska i energochłonnego szlifowania, kształtowanie złożonych zarysów w jednym zamocowaniu, czy zdecydowanie większą wydajność objętościową w porównaniu do szlifowania. Ograniczeniem w stosowaniu obróbki na twardo może być niezadowalająca struktura geometryczna powierzchni, w szczególności występowanie ostrych pików, co zdecydowanie zmniejsza nośność powierzchni obrobionej oraz obecność warstwy białej i ciemnej (rys. 2.30) [13–14].



Rys. 2.30. Mikrostruktura warstwy wierzchniej po toczeniu: a) ostrzem bez śladów zużycia, b) ostrzem zużytym z $VB_B \approx 0,5$ mm [20]

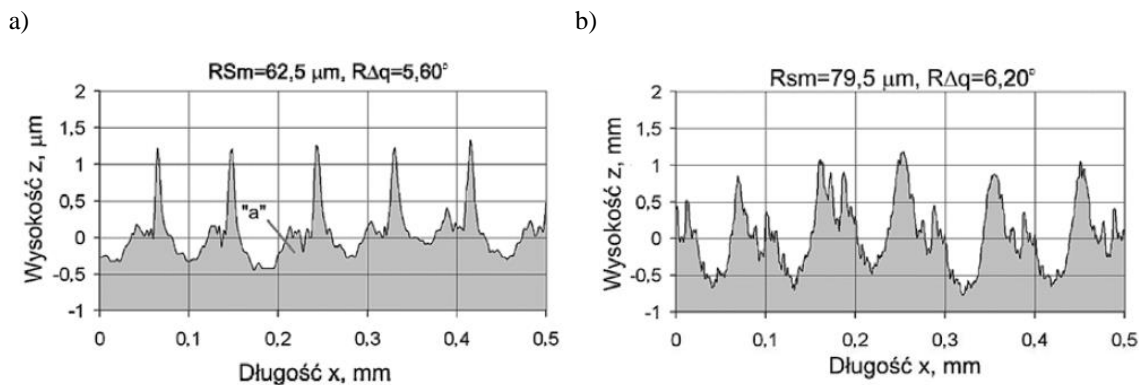
Toczenie na twardo materiałów utwardzonych narzędziami z CBN zapewnia uzyskanie chropowatości powierzchni Ra około $0,1 \mu\text{m}$ (Rz około $1 \mu\text{m}$) i dokładności wymiarowo-kształtowej IT5 (rys. 2.31) co powoduje, że coraz częściej toczenie stosuje się jako ostateczną obróbkę wykańczającą zastępującą szlifowanie [26].



Rys. 2.31. Możliwe do osiągnięcia w obróbce na twardo chropowatości powierzchni i tolerancje wymiarowe [26]

Analizując profil powierzchni po toczeniu na twardo stali 100Cr6 ostrzami z CBN oraz ceramiki mieszanej można zaobserwować bardzo ostre piki oraz charakterystyczne wypłytki oznaczone na rys. 2.32 jako „a” powstające w wyniku bocznego plastycznego płynięcia materiału. Nadmierna ostrość mikronierówności powierzchni po toczeniu na

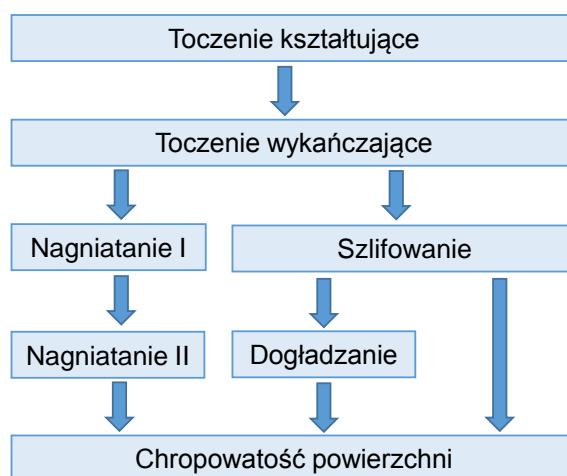
twardo ostrzami z CBN i ceramiki mieszanej Al_2O_3+TiC jest przyczyną mniejszej nośności profilu w porównaniu do powierzchni szlifowanej lub wykańczanej szlifowaniem taśmowym [19,26].



Rys. 2.32. Charakterystyczne profile powierzchni po toczeniu stali 100Cr o twardości 62 HRC: a) ostrzami z CBN, b) ceramiki mieszanej Al_2O_3+TiC . Warunki obróbki $v_c = 110 \div 115$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,1 \div 0,3$ mm [20]

2.7. Obróbka sekwencyjna

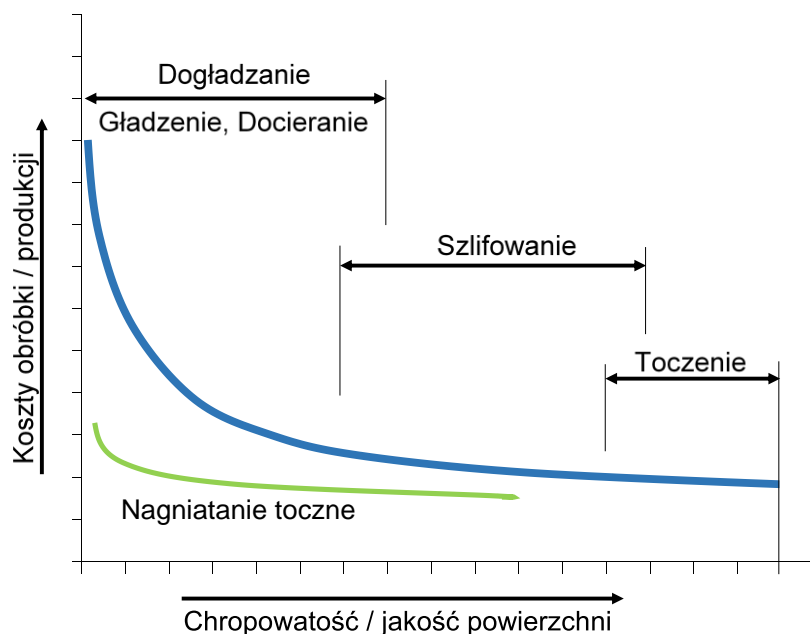
Obróbka sekwencyjna (obecnie coraz częściej nazywana hybrydową) polega na toczeniu lub frezowaniu, a następnie stosowaniu dodatkowych operacji wykańczających, takich jak szlifowanie, dogładzanie oscylacyjne lub nagniatanie toczne na jednej obrabiarce bez konieczności zmiany ustawienia przedmiotu (rys. 2.33). Stosowanie obróbki sekwencyjnej ma na celu przede wszystkim poprawienie jakości powierzchni (zmniejszenie chropowatości) oraz polepszenie jej właściwości eksploatacyjnych [21,40,51].



Rys. 2.33. Schemat wariantów obróbki sekwencyjnej w badaniach prowadzonych w KTMiAP

2.7.1. Nagniatanie

Wysokie wymagania eksploatacyjne stawiane częściom współcześnie wytwarzanych maszyn prowadzą do poszukiwania różnych technik i metod obróbki, których celem jest zwiększenie wytrzymałości i trwałości tych części przy równoczesnym zminimalizowaniu kosztów ich wytwarzania. Jedną z metod obróbki spełniającą w wielu przypadkach technologicznych te wymagania jest tzw. obróbka zgniotem na zimno, zwana popularnie obróbką nagniataniem. W ostatniej dekadzie można zauważyć znaczący wzrost zainteresowania technologią nagniatania twardych powierzchni. Zwykle jednak operacją wykańczającą części maszyn, których twardość po ulepszeniu lub hartowaniu wynosi 45–65 HRC jest szlifowanie [21]. Proces nagniatania umożliwia ograniczenie lub nawet wyeliminowanie z masowej produkcji energochłonnego i uciążliwego dla środowiska szlifowania (rys. 2.34).

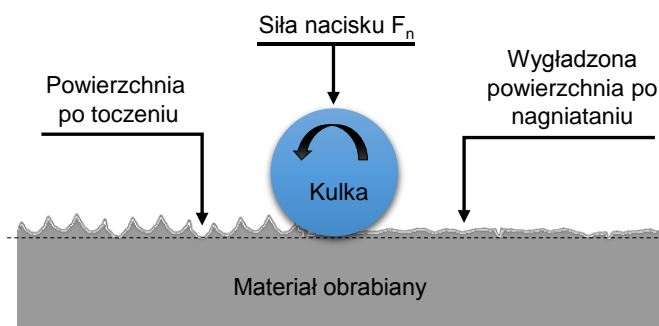


Rys. 2.34. Porównanie kosztów nagniatania tocznego, dokładnego toczenia, szlifowania i powierzchniowych obróbek ściernych według ECOROLL [27,78]

Przegląd literatury wykazał dwa podstawowe cele stosowania obróbki nagniataniem [48,56]. Pierwszym z nich jest wygładzenie powierzchni oraz uzyskanie powierzchni o dobrej nośności, drugim podstawowym celem jest umocnienie warstwy wierzchniej i wprowadzenie naprężeń ściskających. Ważnymi czynnikami powodującymi coraz szersze stosowanie technologii nagniatania utwardzonych

materiałów są względy nie tylko ekonomiczne, ale również ekologiczne. Podstawową korzyścią jest znaczne skrócenie czasu obróbki oraz prowadzenie całego procesu technologicznego w jednym ustawieniu i na jednej obrabiarce CNC, często jako kompletny proces sekwencyjny. Nagniatanie jest obróbką bezwiórową, dlatego do czynników proekologicznych można zaliczyć brak odpadów i pyłów.

Ogólna zasada procesu nagniatania polega na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego wytwarzanego w warstwie wierzchniej przedmiotu wskutek określonego, stykowego współdziałania twardego i gładkiego narzędzia (o kształcie kuli, krążka, wałka lub innym) z powierzchnią obrabianą [48,56]. Schemat procesu nagniatania tocznego przy użyciu kulki przedstawiono na rys. 2.35.



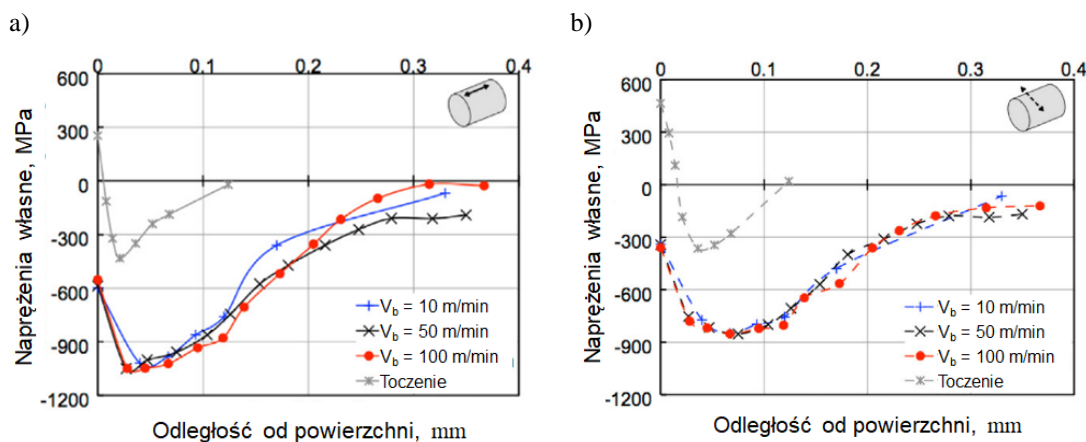
Rys. 2.35. Schemat procesu nagniatania tocznego

Obracający się element nagniatający – kulka tworzy powierzchnię o nowej topografii, o zredukowanej wysokości mikronierówności i zmienionym udziale materiałowym wskutek przemieszczania się materiału ze wzniesień (pików) w obszary wgłębień [21].

Odształcenia plastyczne są wywołane przez układ sił wywołujących naciski powierzchniowe przekraczające wartość naprężenia uplastyczniającego materiału obrabianego [48]. Powodują one oprócz przemieszczania nierówności także określony zgniot (umocnienie odkształceniowe materiału) w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu. Efektem przemieszczania nierówności powierzchni jest zmniejszenie chropowatości powierzchni obrobionej, natomiast efektem zgniotu - zasadnicza zmiana własności mechanicznych warstwy wierzchniej przedmiotu [56].

W przypadku sekwencyjnej obróbki stali 15-5PH (rys. 2.36) udokumentowano prawie trzykrotny wzrost wartości naprężeń po nagniataniu w porównaniu do toczenia. Wszystkie największe zaobserwowane zmiany kumulowały się w odległości do 0,1 mm

od powierzchni zarówno dla naprężeń mierzonych osiowo jak i promieniowo. Można zauważyć również, że prędkość nagniatania nieznacznie wpływa na rozkład naprężeń [7].



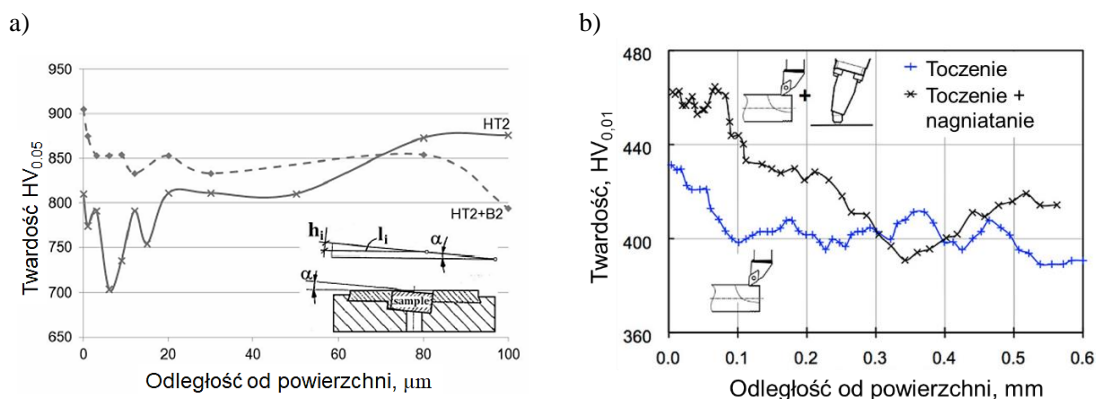
Rys. 2.36. Wpływ prędkości nagniatania na naprężenia własne osiowe (a) i obwodowe (b) stali 15-5PH [7]

W przypadku nagniatania twardych powierzchni, odkształcenia materiału mają charakter sprężysto-plastyczny, przy czym udział odkształceń sprężystych wraza w kolejnych przejściach [48].

Do zalet nagniatania można zaliczyć [21,26,29]:

- wysoką wydajność obróbki,
- możliwość osiągnięcia minimalnej chropowatości,
- znaczne umocnienie warstwy wierzchniej,
- wysoką trwałość narzędzi nagniatających,
- możliwość stosowania głowic nagniatających na uniwersalnych obrabiarkach skrawających,
- wprowadzenie naprężeń ściskających.

Rozkład mikrotwardości po sekwencyjnym toczeniu i nagniataniu (rys. 2.37) wskazuje, na wzrost twardości w warstwie przypowierzchniowej zarówno dla obróbki stali 41Cr4 (o twardości około 57 HRC) jak i stali 15-5PH (o twardości około 350 HB). Dla stali 41Cr4 odnotowano wzrost twardości na głębokości około 70 μm od powierzchni ($\text{HV}_{0,05}$), natomiast dla stali 15-5PH w głąb materiału do 0,3 mm ($\text{HV}_{0,1}$) [7,22,29].

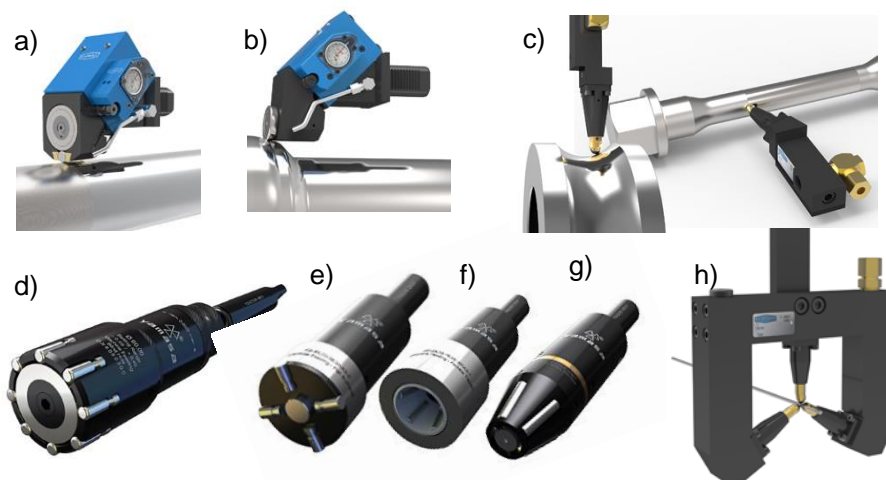


Rys. 2.37. Rozkład mikrotwardości po: a) toczeniu na twardo ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 0,15$ mm) oraz nagniataniu (HT+BB $v_b = 25$ m/min, $f_b = 0,1$ mm/obr) [29], b) toczeniu ($v_c = 150$ m/min, $f = 0,18$ mm/obr, $a_p = 0,6$ mm) i nagniataniu ($v_b = 50$ m/min, $f_b = 0,2$ mm/obr) stali 15-5PH [7,22]

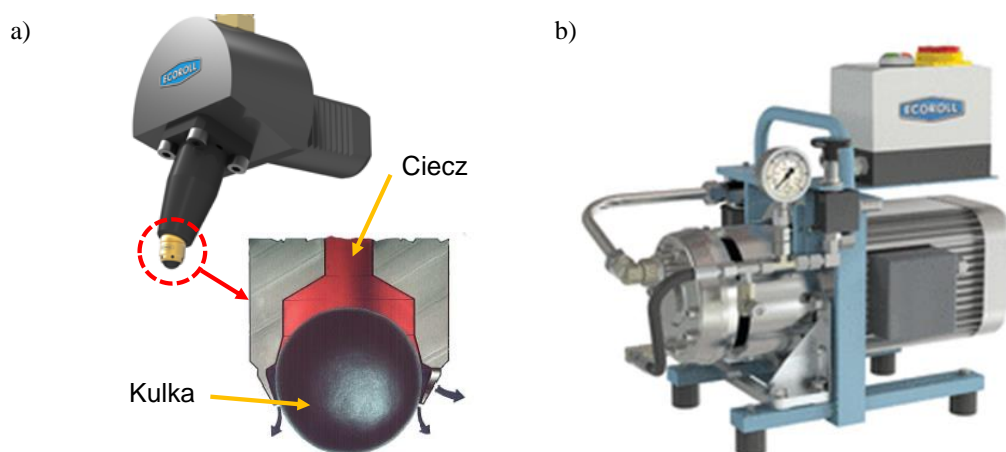
2.7.2. Narzędzia do nagniatania tocznego

Narzędzia do nagniatania tocznego mają różne rozwiązania konstrukcyjne, a elementem nagniatającym może być kulka (o średnicy od kilku do kilkudziesięciu mm), wałeczek lub rolka. Narzędzia do nagniatania tocznego mogą być stosowane do obróbki powierzchni walcowych zewnętrznych i wewnętrznych (rys. 2.38a,d), powierzchni płaskich (rys. 2.38e), stożkowych (rys. 2.38f,g) oraz kulistych. Stosowane są również narzędzia specjalne do nagniatania, np. elementów o małej sztywności.

Aby uzyskać zgmiot na obrabianej powierzchni należy użyć odpowiedniej siły nacisku, stosując zwykle sprężynę lub ciecz pod ciśnieniem tworzącą na powierzchni strefy łożysko hydrostatyczne. Ciecz pod ciśnieniem tłoczona jest do narzędzia za pomocą specjalnej pompy wbudowanej w obrabiarkę CNC (rys. 2.39b).



Rys. 2.38. Rozwiązania konstrukcji narzędzi do nagniatania powierzchni zewnętrznych: a) wałeczkiem, b) rolką, c) kulką; d) powierzchni wewnętrznych; e) powierzchni płaskich; powierzchni stożkowych f) zewnętrznych, g) wewnętrznych, h) elementów o małej sztywności [78,79]

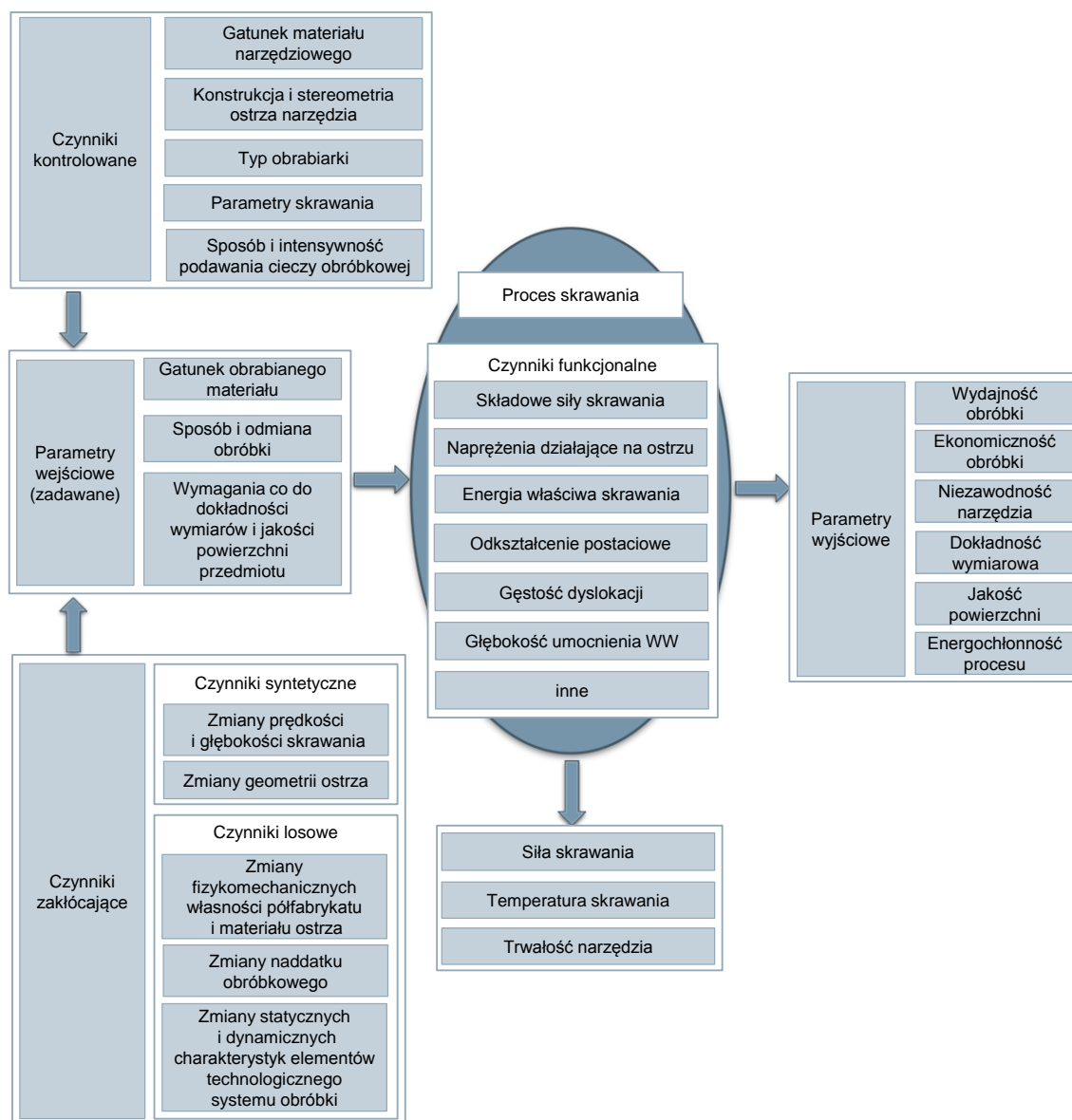


Rys. 2.39. Nagniatanie hydrostatyczne: a) głowica nagniatająca łożyskowana hydrostatycznie, b) pompa hydrauliczna zasilająca układ [21,78]

2.8. Optymalizacja procesu skrawania

Optymalizacja parametrów skrawania jest częścią problemu racjonalnego doboru warunków skrawania, który rozważany jest pod kątem czynników charakteryzujących przebieg i skutki procesu obróbki skrawaniem. Głównym celem optymalizacji jest uzyskanie jak najlepszych wyników procesu skrawania dla założonego kryterium optymalizacji i ustalonych warunków ograniczających [26].

Przedstawiony na rys. 2.40 strukturalny schemat obróbki skrawaniem jest otwartym układem zbudowanym z elementów składowych (parametry wejściowe, wyjściowe i proces skrawania) tworzących łańcuch zależności. W strukturalnym modelu procesu skrawania optymalizacji podlegają matematyczne funkcje celu, które wiążą zmienne parametry wejściowe (prędkość skrawania, posuw, głębokość skrawania) z parametrami wyjściowymi (wskaźnikami procesu) [25].

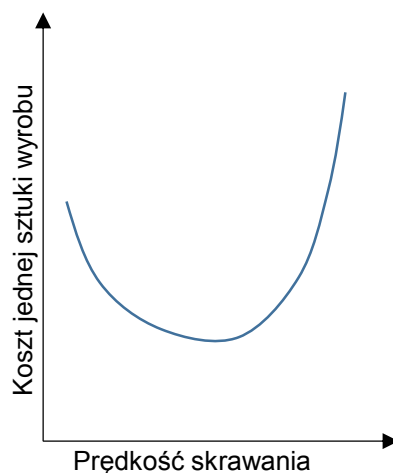


Rys. 2.40. Strukturalny schemat obróbki skrawaniem [26]

Wyniki procesu skrawania oceniane są na podstawie następujących wskaźników [26]:

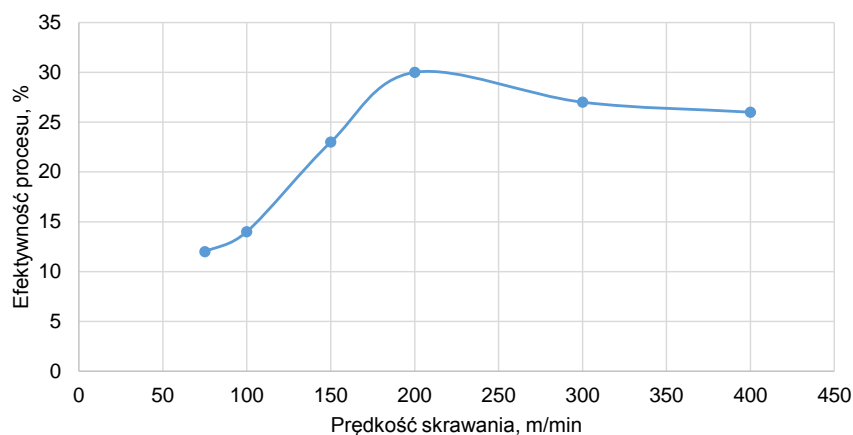
- ekonomicznych (kosztu jednostkowego),
- wydajnościowych (czas jednostkowy),

- okresu trwałości ostrza T ,
- jakościowych, tj. dokładności wymiarowo-kształtowej, parametrów chropowatości powierzchni i właściwości warstwy wierzchniej,
- fizykalnych, do których można zaliczyć siły lub moment skrawania, temperaturę oraz moc skrawania.
-



Rys. 2.41. Koszty obróbki w funkcji prędkości skrawania [8]

Wpływ prędkości skrawania na koszt produkcji jednej sztuki wyrobu przedstawiono na rys. 2.41. Ocenia się, że dla danego materiału, jednego materiału narzędziowego, posuwu oraz głębokości skrawania wzrost prędkości skrawania do pewnej wartości powoduje redukcję kosztów produkcji, jednak po jej przekroczeniu koszty rosną (np. z powodu zmniejszonej trwałości narzędzia) [8].



Rys. 2.42. Wpływ prędkości skrawania na efektywność obróbki stali 11SMnPb30 ($f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 1$ mm) [30]

Wpływ prędkości skrawania na efektywność obróbki stali 11SMnPb30 z parametrami $f = 0,1$ mm/obr, $a_p = 1$ mm przedstawiono na rys. 2.42. Przedstawione wyniki wskazują na wzrost efektywności wraz ze wzrostem prędkości skrawania, gdzie przy $v_c = 200$ m/min osiąga się maksymalną efektywność [30].

W praktyce często nie jest możliwe zminimalizowanie wszystkich funkcji celu. Jeżeli optymalizacji podlega prędkość skrawania ze względu na minimalny koszt zabiegu lub maksymalną wydajność obróbki to należy głębokość skrawania i posuw przyjąć jako wielkości ograniczające, najczęściej jednak maksymalne ze względu na moc obrabiarki, wytrzymałość narzędzia oraz jakość powierzchni.

3. PROBLEMATYKA BADAWCZA

Analiza energochłonności wyrobów wytwarzanych przez przemysł maszynowy wymaga identyfikacji głównych obszarów, w których w procesie wytwarzania dochodzi do znacznego zużycia energii. Ustalenie zależności pomiędzy zużyciem energii a określonymi cechami przedmiotu (materiałowymi lub geometrycznymi) może pozwolić na ustalenie wielkości zapotrzebowania energetycznego wymaganego do wytworzenia określonego wyrobu.

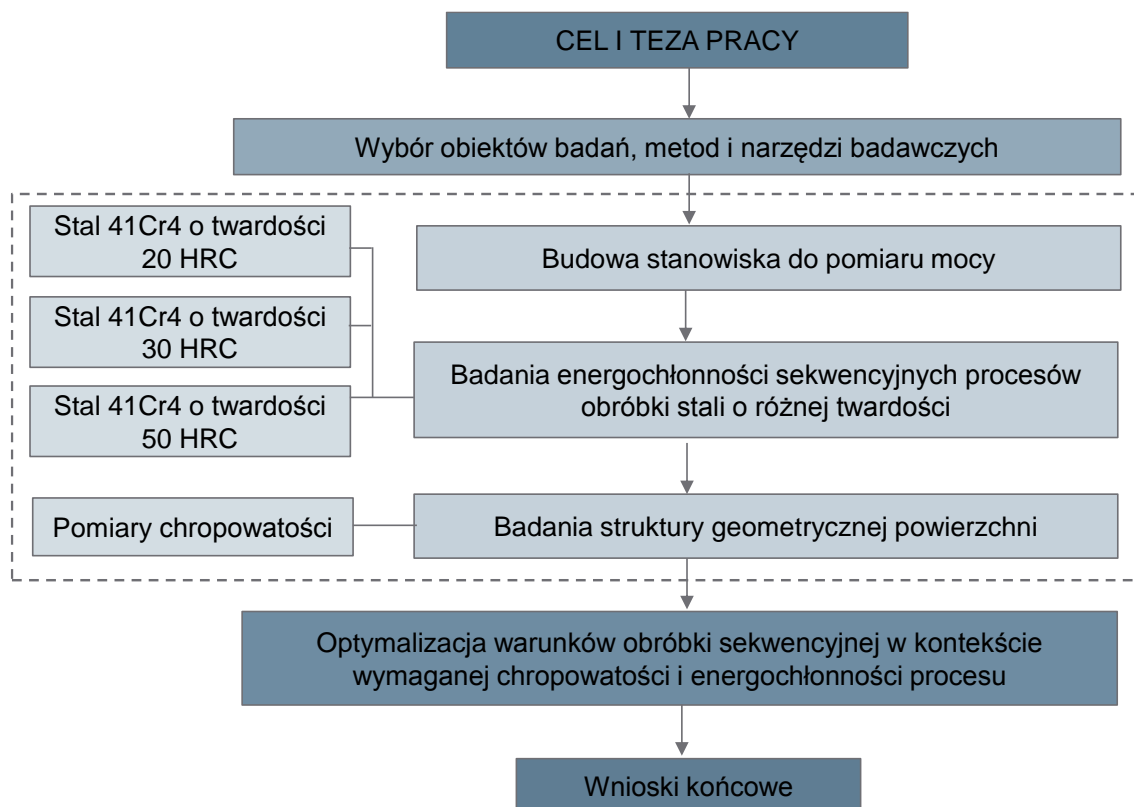
W pracach na temat obróbki nagniataniem nie zajmowano się szczegółowo jej energochłonnością, dlatego celowym wydaje się być kompleksowe badanie tego zagadnienia obejmujące udział nagniatania w obróbce sekwencyjnej.

3.1. Teza naukowa pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy zagadnienia w zakresie badania energochłonności konwencjonalnych i sekwencyjnych procesów obróbki oraz wykonanych badaniach rozpoznawczych sformułowano następującą tezę pracy:

Obróbka sekwencyjna miękkich (nie utwardzonych) i utwardzonych stali obejmująca toczenie i nagniatanie toczne o różnej liczbie przejść przyczynia się do znacznej poprawy nie tylko jakości obrobionej powierzchni, ale również bilansu energetycznego procesu.

Weryfikacja postawionej tezy wymagała przeprowadzenia szeregu prac koncepcyjnych, projektowych, przygotowawczych i badawczych, których schemat przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schematyczne przedstawienie planu realizacji pracy

3.2. Cel pracy

Za cel pracy przyjęto wyznaczenie zużycia energii podczas obróbki elementów maszyn, obejmującej toczenie kształtujące i wykańczające oraz obróbkę sekwencyjną z dodatkowym nagniataniem tocznym.

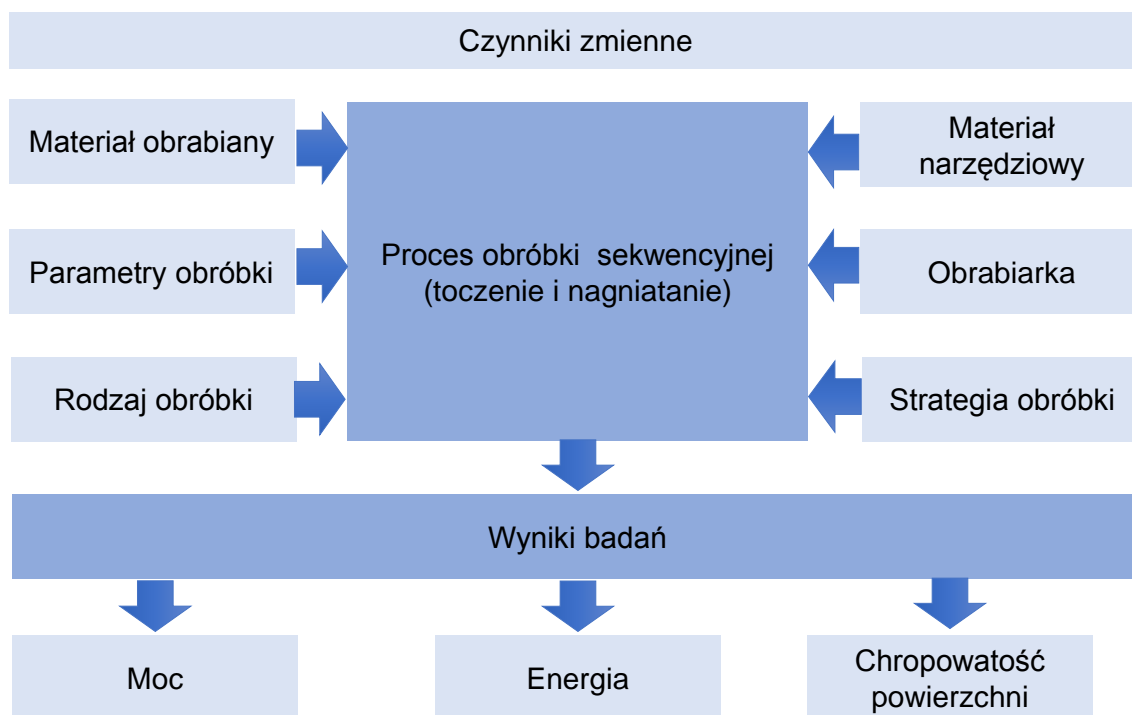
3.3. Zakres pracy

Ustalony zakres prac przygotowawczych oraz badań eksperymentalnych obejmował:

- Przeprowadzenie analizy literaturowej w zakresie:
 - energochłonności procesu skrawania,
 - stosowanych rozwiązań urządzeń i metod pomiaru mocy i energii na obrabiarkach CNC,
 - modeli zużycia energii,
 - charakterystyki chropowatości powierzchni,

- charakterystyki obróbki materiałów w stanie utwardzonym z uwzględnieniem różnych kryteriów technologicznych,
 - charakterystyki obróbki sekwencyjnej,
2. Opracowanie koncepcji stanowiska do pomiaru mocy.
 3. Budowę stanowiska do pomiaru mocy.
 4. Wzorcowanie i kalibrację układu do pomiaru mocy.
 5. Przeprowadzenie badań rozpoznawczych i selekcję czynników badanych.
 6. Przeprowadzenie badań doświadczalnych według ustalonego programu.
 7. Wyznaczenie charakterystyk energetycznych procesu skrawania na twardo.
 8. Wyznaczenie charakterystyk energetycznych dla obróbki sekwencyjnej.
 9. Optymalizację warunków obróbki sekwencyjnej w kontekście wymaganej chropowatości i energochłonności procesu
 10. Opracowanie statystyczne i graficzne otrzymanych wyników badań.
 11. Analizę otrzymanych wyników badań.
 12. Sformułowanie wniosków końcowych.

Na rys. 3.2 przedstawiono czynniki wejściowe ustalone w badaniach wstępnych wpływające na przebieg procesu i mierzone czynniki wyjściowe.



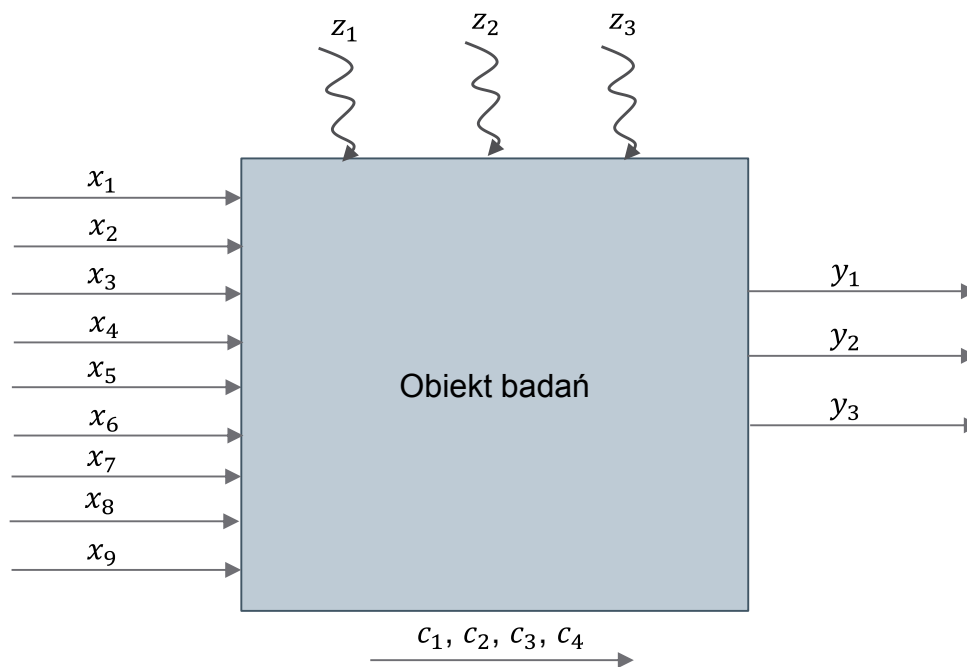
Rys. 3.2. Czynniki wejściowe wpływające na przebieg procesu i mierzone czynniki wyjściowe uwzględnione w badaniach własnych

Na przebieg obróbki sekwencyjnej mają wpływ właściwości mechaniczne materiału obrabianego, parametry obróbki (v_c , f , a_p , v_b , f_b , F_n), rodzaj obróbki (toczenie, nagniatanie), materiał narzędziowy, strategia obróbki (ilość przejść) i wielkość nacisku. Do wielkości stałych, które pozostały niezmiennie ze względu na sposób realizacji badań eksperymentalnych, zaliczono: charakterystyki metrologiczne stanowiska badawczego, aparaturę pomiarową, a także konstrukcję narzędzia do nagniatania i geometrię elementu nagniatającego narzędzia.

Wielkościami wyjściowymi, pozyskanymi z układu pomiarowego jest moc i energia zmierzona podczas obróbki oraz parametry chropowatości powierzchni. W efekcie uzyskane wyniki pozwalają określić związki między energochłonnością procesu i jakością powierzchni obrabianej.

Wielkości zakłócające charakteryzują się przypadkowym i nieokreślonym wpływem na badany obiekt i należą do nich czynniki związane z otoczeniem oraz drgania generowane w układzie OUPN.

Badania energochłonności procesów toczenia i nagniatania prowadzono w oparciu o przyjęty model badań przedstawiony na rys. 3.3 i w tabeli 3.1.



Rys. 3.3. Wielkości charakteryzujące obiekt badań

Tabela 3.1. Charakterystyka obiektu badań

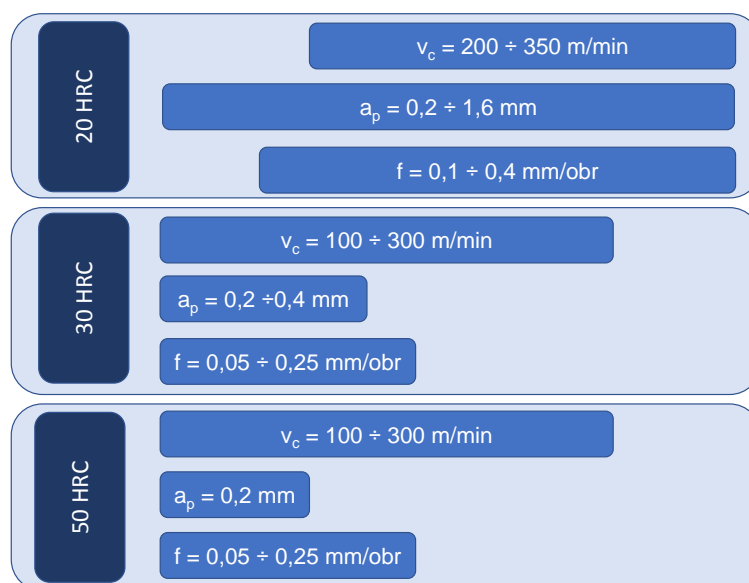
Klasyfikacja	Oznaczenie	Opis	
Wielkości wejściowe	x_1	Materiał i geometria ostrza skrawającego	
	x_2	Materiał obrabiany	
	x_3	Prędkość skrawania v_c	Toczenie
	x_4	Posuw f	
	x_5	Głębokość skrawania a_p	
	x_6	Prędkość nagniatania v_b	Nagniatanie
	x_7	Posuw nagniatania f_b	
	x_8	Siła docisku F_n	
	x_9	Ilość przejść n	
Wielkości wyjściowe	y_1	Moc P	
	y_2	Energia E	
	y_3	Parametry chropowatości powierzchni 2D	
Czynniki stałe	c_1	Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa	
	c_2	Narzędzie do nagniatania	
	c_3	Kąty ostrza w układzie narzędzia w oprawce	
	c_4	Właściwości materiału obrabianego	
Czynniki zakłócające	z_1	Warunki otoczenia	
	z_2	Drgania generowane w układzie OUPN	
	z_3	inne	

4. WARUNKI I METODYKA BADAŃ

4.1. Plan eksperymentu

Badania doświadczalne przeprowadzono w dwóch etapach (rys. 4.1÷4.2). Dla wszystkich trzech twardości stali stopowej 41Cr4 poddanej badaniu zastosowano zmienną prędkość skrawania oraz posuw, natomiast stałą głębokość skrawania ustalono dla stali o twardości około 50 HRC. W pierwszym etapie przeprowadzono toczenie stali o zróżnicowanej twardości z parametrami:

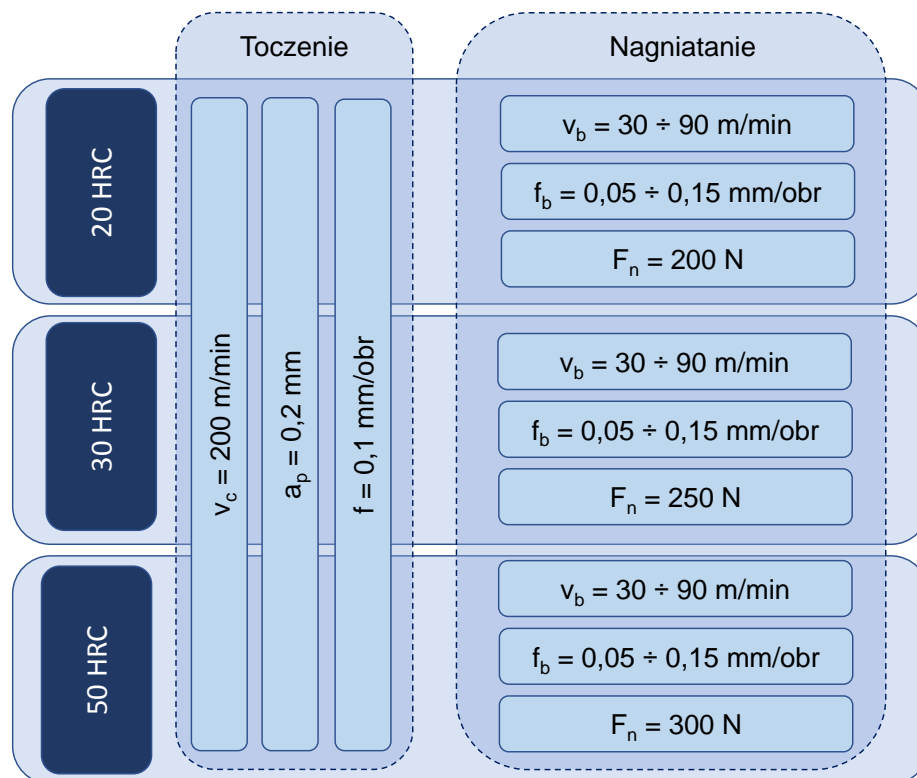
- dla stali o twardości ~20 HRC $v_c = 200, 250, 300, 350$ m/min; $f = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ mm/obr; $a_p = 0,2; 0,4; 0,8; 1,6$ mm,
- dla stali o twardości ~30 HRC $v_c = 100, 150, 200, 250, 300$ m/min; $f = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ mm/obr; $a_p = 0,2; 0,4$ mm,
- dla stali o twardości ~50 HRC $v_c = 100, 150, 200, 250, 300$ m/min; $f = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ mm/obr; $a_p = 0,2$ mm.



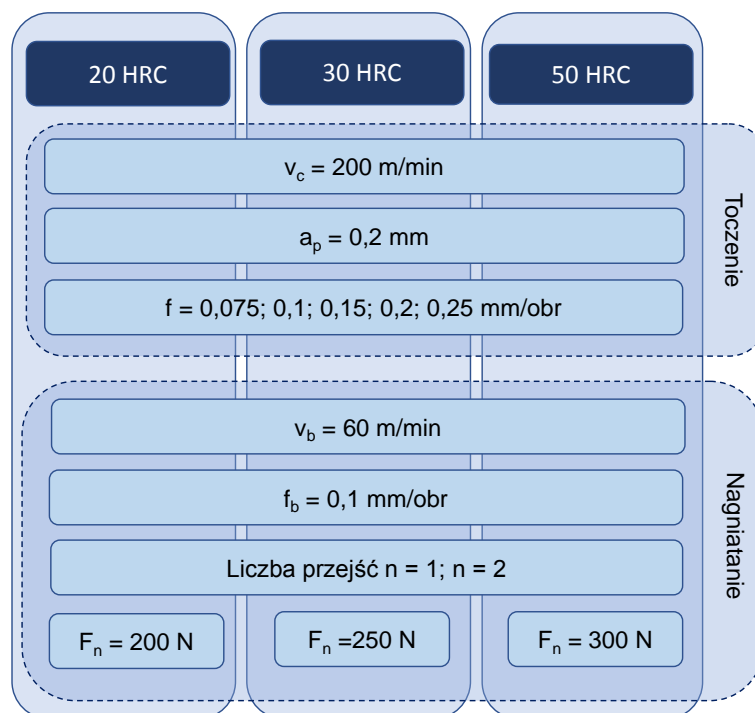
Rys. 4.1. Dobór parametrów obróbki podczas toczenia wstępnego

W drugim etapie przeprowadzono nagniatanie toczne stali o różnej twardości. Operacją poprzedzającą nagniatanie było toczenie powierzchni z takimi samymi parametrami technologicznymi dla każdej twardości obrabianej stali ($v_c = 200$ m/min; $f = 0,1$ mm/obr; $a_p = 0,2$ mm). Nagniatanie przeprowadzono ze zmienną prędkością nagniatania $v_b = 30, 60, 90$ m/min, posuwem $f_b = 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15$ mm/obr,

oraz siłą nagniatania dostosowaną do każdego obrabianego materiału. W tym przypadku zastosowano jednoprzęściowe nagniatanie (rys. 4.2). W trzecim etapie badano wpływ obróbki sekwencyjnej na energochłonność procesu z zastosowaniem nagniatania wieloprzęściowego próbek ze stali o twardości 20, 30 i 50 HRC. Toczenie poprzedzające nagniatanie przeprowadzono z parametrami: $v_c = 200$ m/min; $f = 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ mm/obr; $a_p = 0,2$ mm. Podczas nagniatania zastosowano stałą prędkość $v_b = 60$ m/min, stały posuw $f_b = 0,1$ mm/obr oraz siłę docisku kulki nagniatającej wynoszącą $F_n = 200$ N dla stali o twardości 20 HRC, $F_n = 250$ N dla stali o twardości 30 HRC, $F_n = 300$ N dla stali o twardości 50 HRC. Zmiennym parametrem podczas nagniatania była liczba przezeń wynosząca $n = 1$ i $n = 2$ (rys. 4.3).



Rys. 4.2. Dobór parametrów podczas obróbki sekwencyjnej jednoprzęściowej dla stali o twardości: 20, 30, 50 HRC

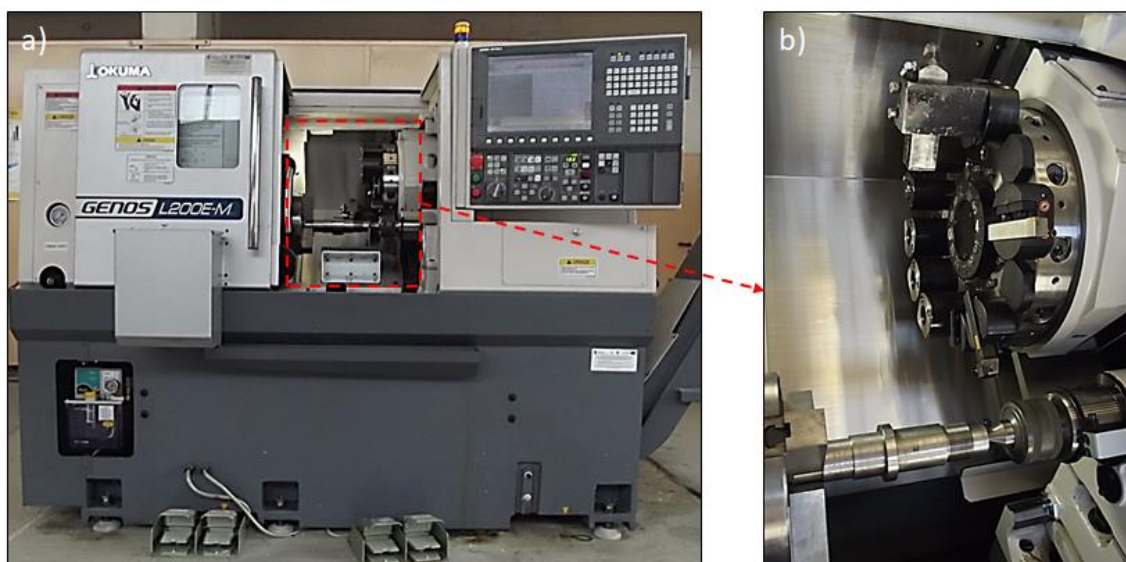


Rys. 4.3. Dobór parametrów podczas obróbki sekwencyjnej wieloprzejściowej dla stali o twardości: 20, 30 i 50 HRC

4.2. Stanowisko badawcze

4.2.1. Stanowisko do prób toczenia i nagniatana

Stanowisko do pomiaru mocy skrawania oraz nagniatania zainstalowano na wielozadaniowej obrabiarce CNC Okuma Genos L200E-M (rys. 4.4), która zaliczana jest do grupy urządzeń energooszczędnych sklasyfikowanych na liście Poleff (w Programie Finansowania Energii Zrównoważonej w Polsce). Lista ta obejmuje urządzenia/maszyny wytwórcze przyczyniające się do co najmniej 20% oszczędności energii [80].



Rys. 4.4. Obrabiarka CNC Okuma Genos L200E-M (a), widok przestrzeni roboczej (b)

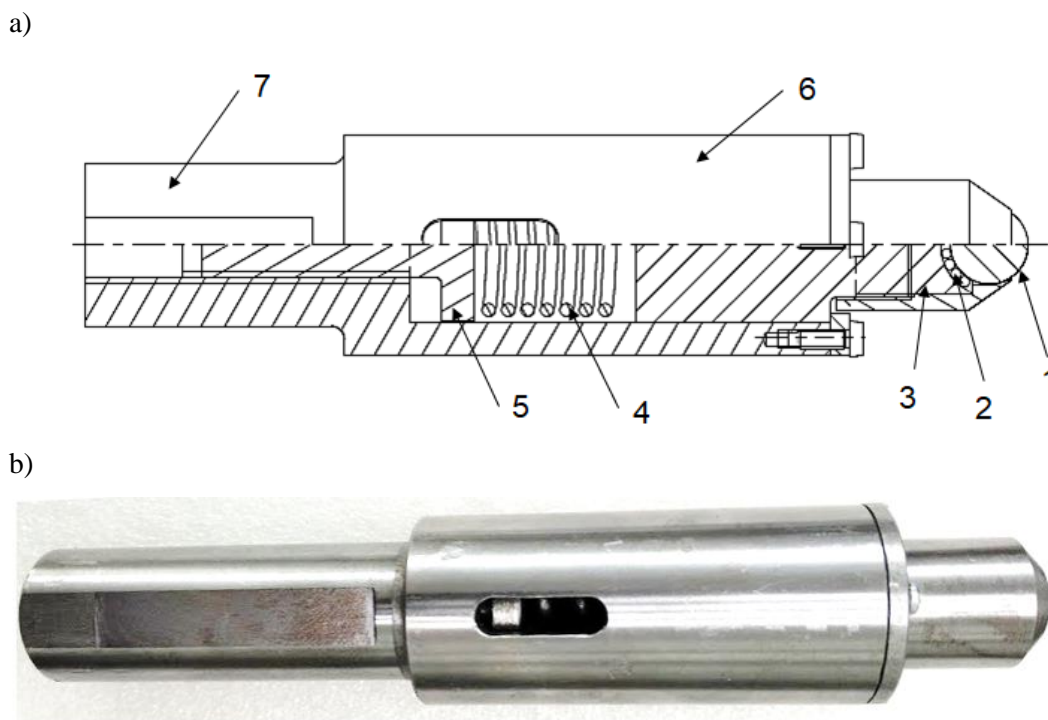
Obróbka sekwencyjna obejmująca toczenie oraz nagniatanie może być przeprowadzona na tej samej tokarce, a ta sama powierzchnia może być obrabiana w jednym zamocowaniu. Rys. 4.5 przedstawia głowicę nagniatającą zamocowaną w magazynie narzędzi tokarki CNC Okuma Genos L200E-M, która poprzez zastosowanie odpowiedniego adaptera może być zamocowana w standardowym uchwycie VDI.



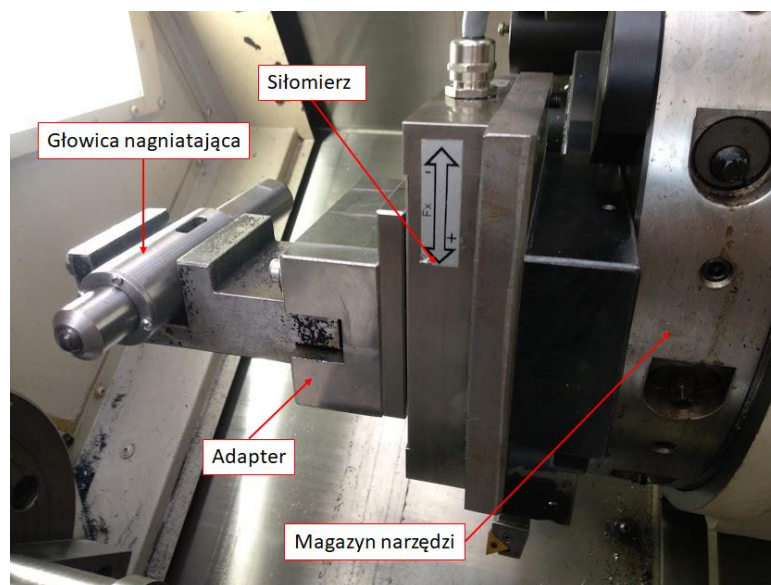
Rys. 4.5. Widok przestrzeni roboczej stanowiska do obróbki sekwencyjnej

Na rys. 4.6 przedstawiono konstrukcję głowicy nagniatającej, która została zaprojektowana i wykonana na potrzeby badań przedstawionych w pracy przez pracowników KTMiAP Politechniki Opolskiej. Urządzenie składa się z korpusu (6), w którym zamocowano element sprężysty (4), wywierający nacisk na kulkę nagniatającą (1). Śruba reguluje docisk sprężyny (5). Ceramiczna kulka nagniatająca o średnicy 12 mm została osadzona w łożysku ceramicznym. Zarówno bieżnia (3) jak i elementy pośrednie (2) (kulki o średnicy 1 mm) wykonane są z ceramiki Si_3N_4 . Głowica może być montowana zarówno na tokarce (poprzez specjalny uchwyt) jak i we frezarce za pomocą walcowej części chwytowej (7).

Jednym z podstawowych parametrów technologicznych podczas nagniatania jest siła docisku. Skonstruowane narzędzie nagniatające ma możliwość ustawienia odpowiedniej siły nacisku kulki na materiał obrabiany. Po umieszczeniu głowicy w adapterze, elementem pośrednim pomiędzy narzędziem nagniatającym a uchwytem tokarki jest siłomierz. Następnie po napięciu sprężyny przez śrubę dociskową siła docisku zostaje wymuszona poprzez zadaną korekcję osi x w tokarce. Zamocowanie narzędzia nagniatającego w siłomierzu pozwala na ustawienie siły nacisku kulki nagniatającej z dokładnością do kilku N (rys 4.7).



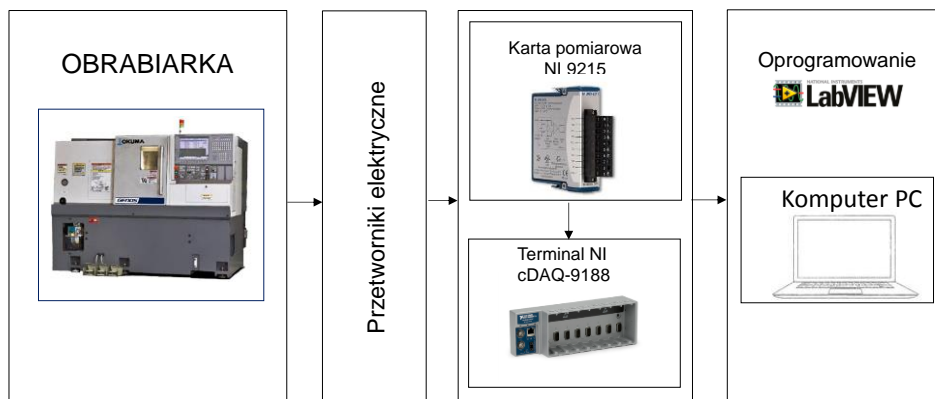
Rys. 4.6. Konstrukcja głowicy nagniatającej: a) schemat 1 – kulka, 2 – kulki łożyska, 3 – bieżnia, 4 – sprężyna, 5 – śruba dociskająca, 6 – korpus, 7 – chwyt, b) widok rzeczywisty



Rys. 4.7. Głowica nagniatąca zamocowana pośrednio w siłomierzu

4.2.2. Układ do pomiaru mocy

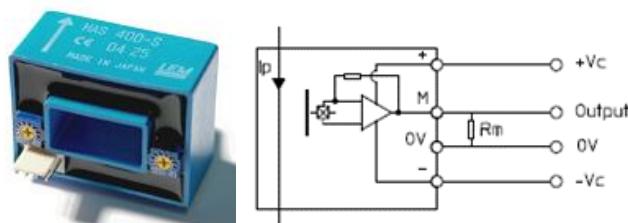
Układ pomiaru mocy zainstalowany na tokarce CNC Okuma Genos L200E-M umożliwia pomiar w czasie rzeczywistym chwilowych wartości mocy pobieranej przez obrabiarkę z sieci elektrycznej. Stanowisko do pomiaru mocy składa się z przetworników prądowych oraz napięciowych firmy Lem umieszczonych na fazowych przewodach zasilających tokarkę (rys. 4.11), co pozwala na pomiar mocy całkowitej pobieranej z sieci przez obrabiarkę (rys. 4.8). Przetworniki zasilane są symetrycznym napięciem ± 15 V. Sygnały z przetworników zbierane są za pomocą kart pomiarowych National Instruments umieszczonych w terminalu cDAQ NI. Terminal połączony jest łączem LAN z komputerem, gdzie w środowisku LabVIEW napisany został program umożliwiający pomiar i analizę otrzymanych danych [9,10]. Powyższe stanowisko badawcze stanowi uniwersalny i otwarty układ, który można rozbudować o dodatkowe elementy, jak np. siłomierz, czujnik drgań czy rejestrator emisji akustycznej lub dokonywać pomiaru temperatury.



Rys. 4.8. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru mocy

Do pomiaru natężenia prądu użyto przetwornika HAS 50-S o następującej charakterystyce (rys. 4.9) [81]:

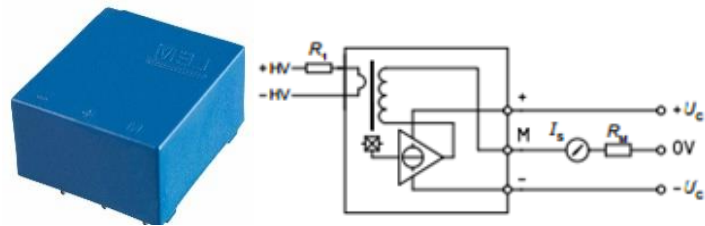
- Nominalny prąd mierzony $I_{PN} - 50A$
- Maksymalny prąd mierzony $I_{PNmax} - 150A$
- Zasilanie przetwornika +/- 15V
- Sygnał wyjściowy przetwornika $V_{OUT} - 4V +/- 40 mV$
- Błąd liniowości $< 1\% I_{PN}$



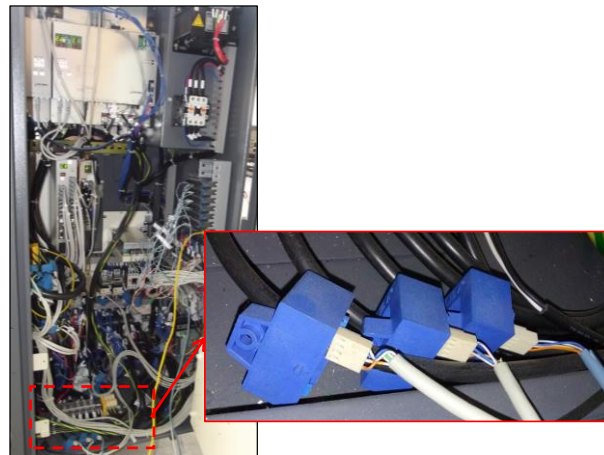
Rys. 4.9. Widok oraz schemat podłączenia przetwornika prądowego HAS 50-S

Do pomiaru napięcia użyto przetwornika LV 25-P o następującej charakterystyce (rys. 4.10) [81]:

- Nominalne napięcie mierzone $V_{PN} - 10 \div 500 V$
- Zasilanie przetwornika +/- 15V
- Nominalny prąd przetwornika - 10 mA
- Błąd liniowości $< 1\% V_{PN}$

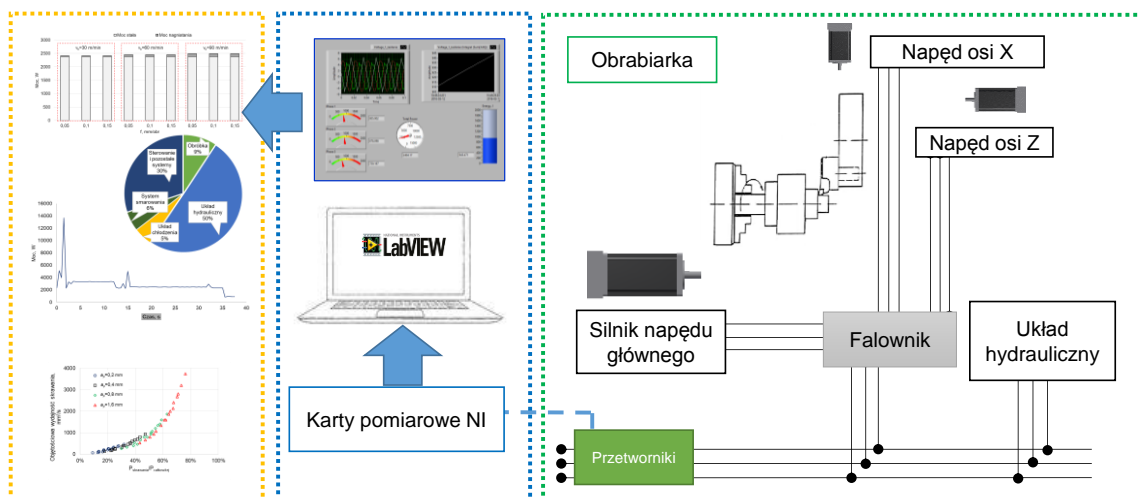


Rys. 4.10. Widok oraz schemat podłączenia przetwornika napięciowego LV 25-P



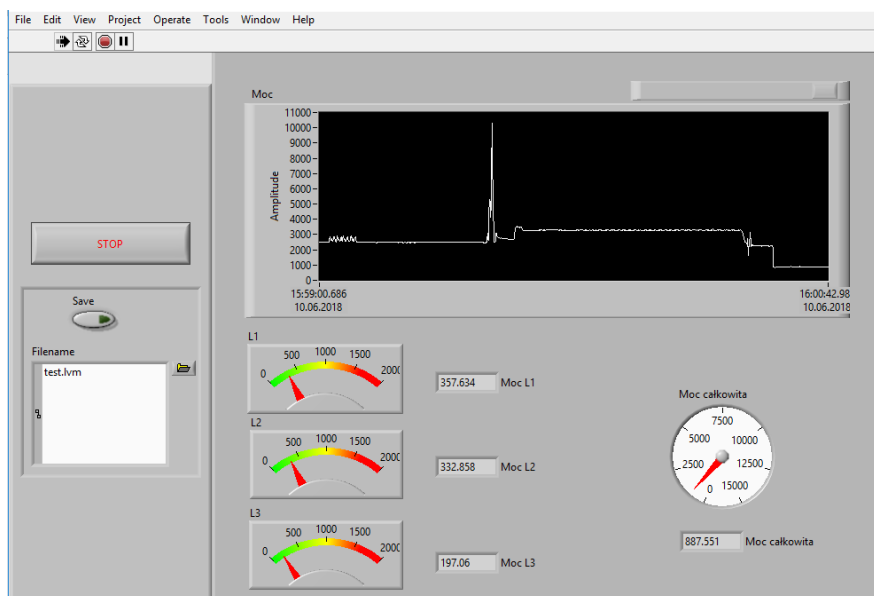
Rys. 4.11. Przetworniki prądowe umieszczone na przewodach zasilających

Zbudowany układ pomiarowy pozwala uzyskać wiele praktycznych informacji o przebiegu procesu. W pierwszej kolejności można identyfikować źródła zużycia energii w stanie gotowości operacyjnej obrabiarki i podczas obróbki (rys. 4.12). Układ dostarcza bowiem informacji o zużyciu energii przez niezbędne urządzenia i agregaty towarzyszące (układ hydrauliczny, smarowania, chłodzenia itp.).



Rys. 4.12. Schemat układu pomiarowego

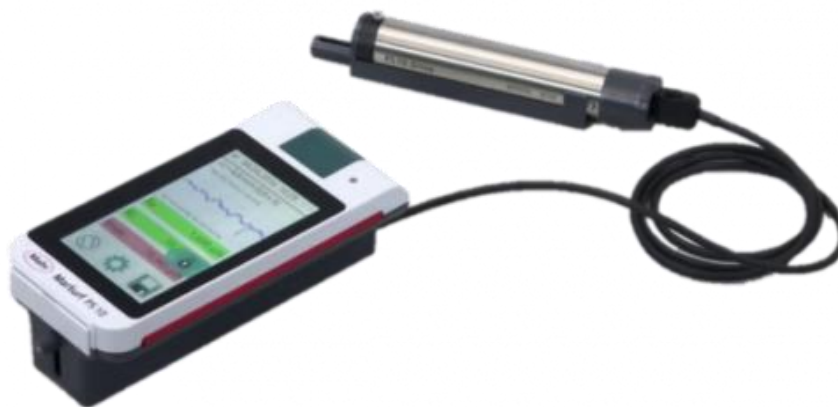
Na rys. 4.13 przedstawiono widok panelu frontowego programu utworzonego w środowisku LabView. Oprogramowanie umożliwia odczyt sygnałów z przetworników oraz akwizycję uzyskanych danych. Tor pomiarowy jest ułożony w konfiguracji umożliwiającej rejestrowanie aktualnych wartości mocy mierzonych na przewodach zasilających tokarkę CNC.



Rys. 4.13. Widok panelu frontowego programu rejestrującego – LabView

4.2.3. Pomiar chropowatości powierzchni

Do pomiaru chropowatości 2D użyto profilometr stykowy Mahr PS10 z głowicą pomiarową PHT 6-350 (rys. 4.14). Jest to urządzenie przenośne pozwalające na pomiary bezpośrednio po obróbce na przedmiocie zamocowanym w uchwycie obrabiarki. Wbudowana pamięć pozwala na zapis danych pomiarowych, a wyświetlacz umożliwia pogląd profilu oraz wartości podstawowych parametrów chropowatości. Profilometr posiada końcówkę stykową o średnicy około 2 μm . Pomiar realizowany jest poprzez indukcyjną głowicę ślizgaczową z naciskiem około 0,7 mN. [82]. Pomiary realizowano pięciokrotnie w zbliżonych odstępach na obwodzie każdej próbki. Do analizy uzyskanych profili wykorzystano oprogramowanie MountainsMap 7.4 firmy Digital Surf.



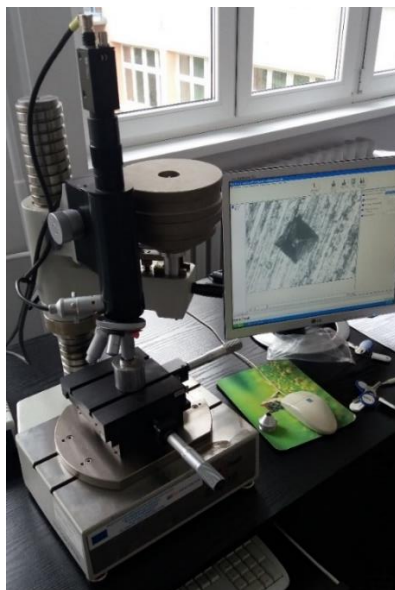
Rys. 4.14. Profilometr stykowy Mahr PS10

4.2.4. Pomiar twardości

Twardość z punktu widzenia konstrukcyjnego i technologicznego (skrawalności) jest jedną z bardzo istotnych własności materiału. Twardość definiowana jest jako odporność materiału na trwałe odkształcenie, które powstaje wskutek działania sił skupionych na małą powierzchnię materiału, wywołanych przez wciskanie odpowiedniego wgłębnika [16].

Zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1:2002 pomiar twardości metodą Rockwella polega na dwustopniowym wciskaniu w badany materiał wgłębnika oraz pomiarze trwałego przyrostu głębokości odcisku po odciążeniu. Pomiar twardości metodą Rockwella za pomocą stożka stosuje się do twardych metali i stopów, a zwłaszcza stali ulepszonych cieplnie.

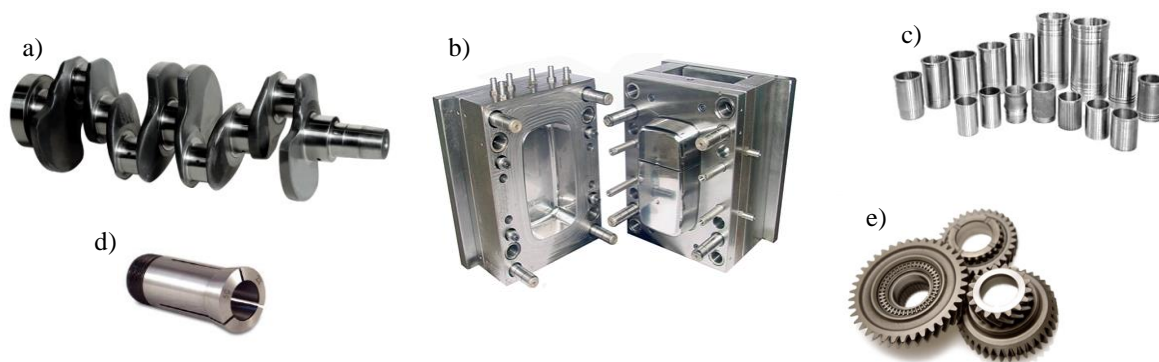
Do pomiaru twardości badanych materiałów wykorzystano twardościomierz Zwick/Roell ZHV (rys. 4.15). Pomiar twardości metodą Rockwella przeprowadzono wzorcowym stożkiem diamentowym o kącie wierzchołkowym 120° i promieniu zaokrąglenia 0,2 mm dla skali C. Każda próbka była mierzona w kilku miejscach po obwodzie. Próbki nie mieszczące się w założonym przedziale twardości (± 2 HRC) zostały odrzucone.



Rys. 4.15. Stanowisko do pomiaru twardości - twardościomierz Zwick/Roell ZHV

4.3. Charakterystyka materiału obrabianego

Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach ze stali konstrukcyjnej 41Cr4. Stal 41Cr4 (AISI 4340) jest powszechnie stosowana w przemyśle maszynowym do produkcji wałów korbowych, tulei, osi, kół zębatach, elementów złącznych, korpusów urządzeń oraz form (rys. 4.16). Jest to stal dobrze skrawalna (o wskaźniku skrawalności $M_R \approx 80\%$), nadająca się do obróbki cieplnej [16]. Skład chemiczny obrabianego materiału przedstawiono w tabeli 4.1. Materiał ten w stanie wyjściowym według normy PN-EN ISO 683-2:2018-08 ma granicę plastyczności $R_e = 780$ MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie $R_m \approx 980$ MPa. Wydłużenie próbki $A_5 \geq 10\%$, a przewężenie Z wynosi 45%.

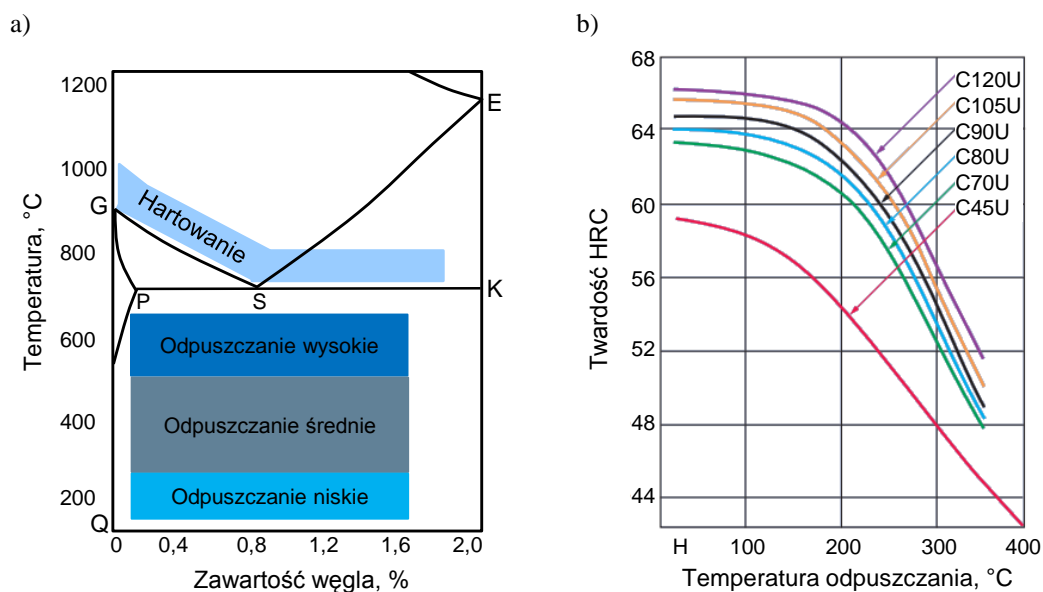


Rys. 4.16. Przykładowe zastosowanie stali 41Cr4: a) wał korbowy, b) formy (w tym rdzenie), c) tuleje d) tuleje zaciskowe e) koła zębata

Tabela 4.1. Skład chemiczny stali 41Cr4 (AISI 4340)

Pierwiastek	C	Si	Mn	P _≤	S _≤	Cr	W	Mo	V
[%]	0,40	0,30	0,70	0,025	0,025	1,00	≤0,25	-	-

Materiał poddano obróbce cieplnej, aby uzyskać różną twardość materiału obrabianego. Zakres zmian temperatury dla hartowania i odpuszczania przy różnej zawartości węgla w stali oraz zależność twardości stali od temperatury odpuszczania pokazano na rys. 4.17

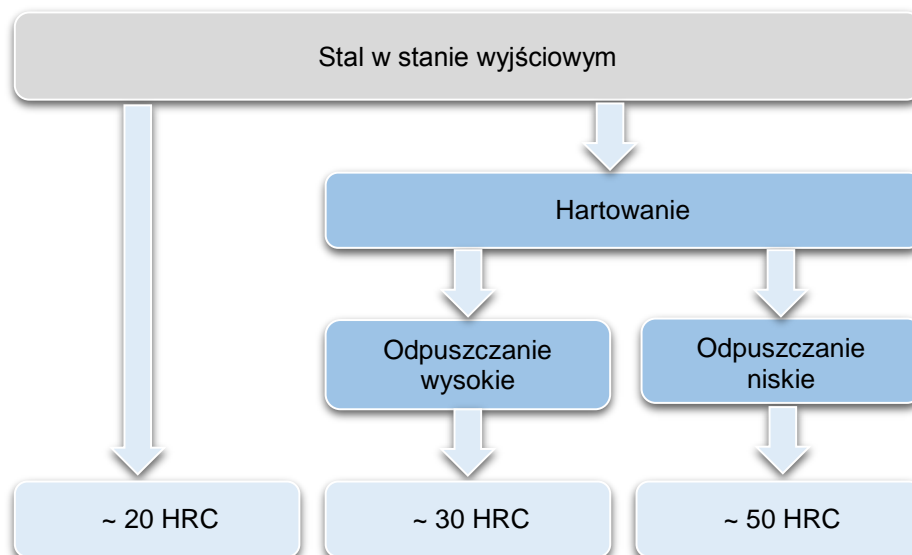


Rys. 4.17. Zakres temperatury dla hartowania i odpuszczania przy różnej zawartości węgla w stali (a) [57], zależność twardości stali od temperatury odpuszczania (b) [17]

Stanem wyjściowym była twardość około 200 ÷ 220 HB (około 20 HRC) po wyżarzaniu normalizującym. Po hartowaniu i po wysokim odpuszczaniu uzyskano twardość około 30 ± 2 HRC, natomiast po hartowaniu i po niskim odpuszczaniu uzyskano twardość około 50 ± 2 HRC (rys. 4.18). Do obróbki cieplnej użyto pieca LAC LMH04/12. Warunki obróbki cieplnej przedstawiono tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Warunki obróbki cieplnej stali 41Cr4

Oznaczenie	Hartowanie	Odpuszczanie	Twardość
41Cr4 (AISI 4340)	Temperatura: 920°C	Temperatura: 650°C	~ 30 ± 2 HRC
	Chłodzenie: woda	Temperatura: 150°C	~ 50 ± 2 HRC



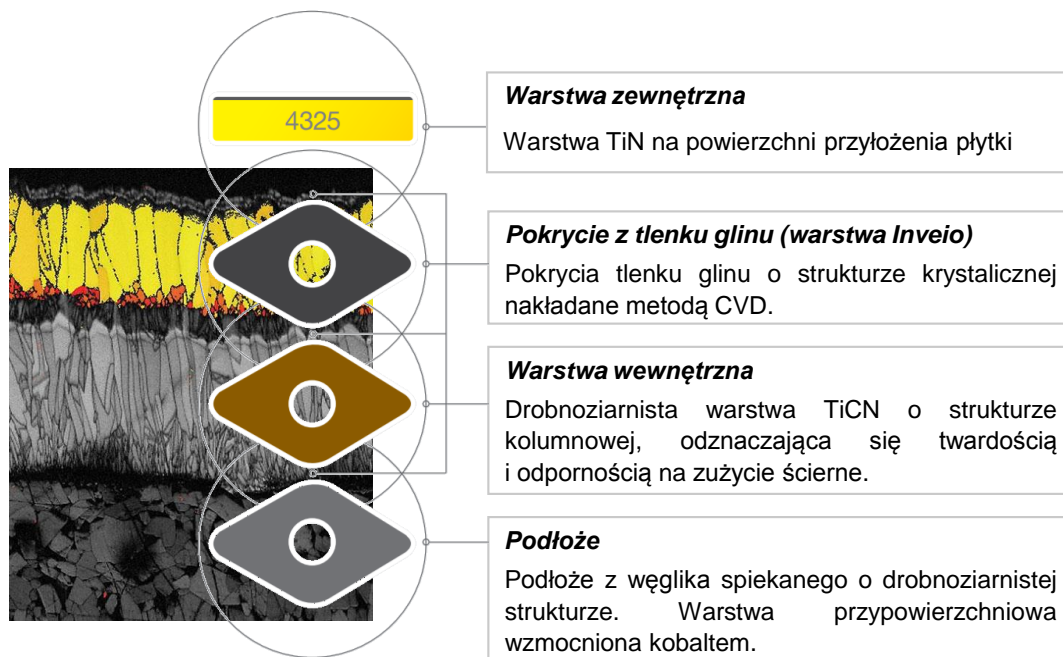
Rys. 4.18. Schemat obróbki cieplnej materiału obrabianego dla różnych twardości wyjściowych

4.4. Charakterystyka narzędzi skrawających użytych w badaniach

W badaniach doświadczalnych do toczenia stali w stanie wyjściowym po normalizowaniu (stal o twardości 20 HRC) użyto płytek ostrzowych z węglika spiekanego z powłoką wielowarstwową $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$ z pokryciem CVD o oznaczeniu TNMG160408-PM gatunku 4325 firmy Sandvik Coromant (rys. 4.20a). Płytki wykonane z węglików spiekanych w gatunku GC4325 z powłoką wielowarstwową, dla uzyskania której zastosowano technologię Inveio są przeznaczone do toczenia stali [83]. Złożoną strukturę materiału ostrza przedstawiono na rys. 4.19. Zalecane parametry skrawania przez producenta firmę Sandvik Coromant do obróbki narzędziami użytymi w badaniach doświadczalnych przedstawiono w tabeli 4.3.

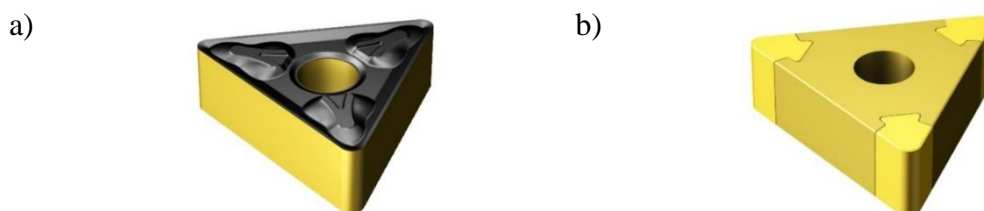
Tabela 4.3. Zalecane przez producenta płytek skrawających parametry skrawania [83]

Parametry skrawania	Rodzaj płytki skrawającej	
	TNMG160408-PM gatunek 4325	TNGA160408S01030A gatunek CB7015
Prędkość skrawania v_c , m/min	300 ÷ 440	160 ÷ 250
Głębokość skrawania a_p , mm	0,5 ÷ 5	0,07 ÷ 0,4
Posuw f , mm/obr	0,1 ÷ 0,45	0,05 ÷ 0,25



Rys. 4.19. Budowa płytki skrawającej firmy Sandvik Coromant o symbolu GC4325 [83]

Do skrawania stali ulepszonej cieplnie użyto płytki ostrzowe z narożami z CBN CB 7015 o oznaczeniu TNGA160408S01030A. Płytki ostrzowe z narożami z CBN w gatunku CB7015 zawierają 50% drobnoziarnistego regularnego azotku boru połączonego spoiwem ceramicznym Al_2O_3 oraz zewnętrzną powłokę TiN. Pokrycie powłoką TiN metodą PVD stanowi powłokę wskaźnikową, która ułatwia wykrycie zużycia (rys. 4.20b) [83].



Rys. 4.20. Płytki skrawające użyte podczas badań: a) gatunek 4325, b) gatunek CB7015

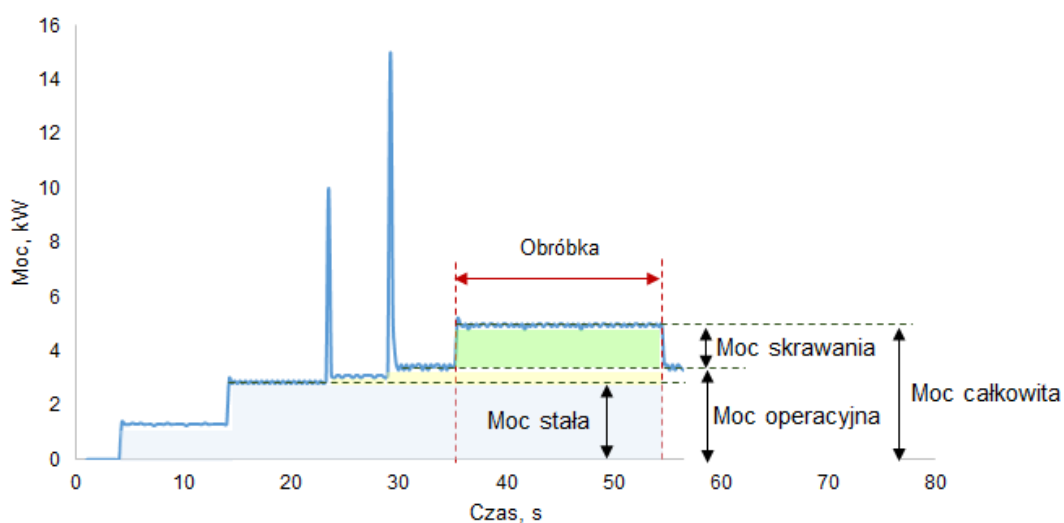
Płytki ostrzowe użyte w eksperymencie, zarówno płytka węglkowa jak i z regularnego azotku boru były zamocowane w oprawce o symbolu PTGNL 2020K16. Kąty ostrza po zamocowaniu płytki w oprawce PTGNL 2020K16 były następujące:

- kąt natarcia normalny $\gamma_n = -6^\circ$,
- kąt przyłożenia normalny $\alpha_n = 6^\circ$,
- kąt przystawienia główny $\kappa_r = 91^\circ$,
- kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej $\lambda_s = -6^\circ$.

4.5. Metodyka badań

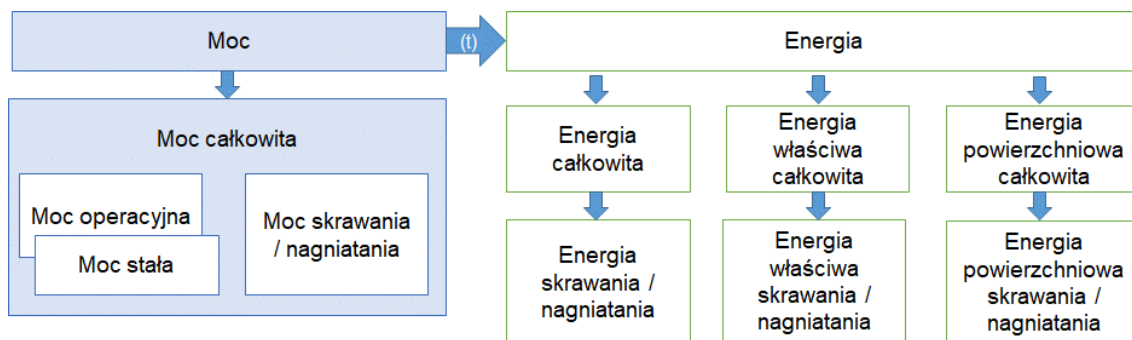
Poprzez układ pomiarowy rejestrujący moc pobieraną z sieci przez obrabiarkę możliwe jest zapisywanie mocy całkowitej (14) jak również jej składowych. Na moc całkowitą składa się moc operacyjna (zawierająca również moc stałą) oraz moc skrawania (rys. 4.21). Moc skrawania jest wyodrębnionym składnikiem mocy całkowitej uwzględniającym wyłącznie moc używaną w czasie usuwania nadmiaru materiału. Moc skrawania jest różnicą między mocą całkowitą i mocą obejmującą tzw. „skrawanie powietrza”, czyli mocą stałą i uruchomionym wrzecionem do pełnej zadanej prędkości oraz posuwem roboczym. Moc stałą oraz tzw. moc „skrawania powietrza” określa się jako moc operacyjną [30].

$$P_{\text{całkowita}} = P_{\text{skrawania}} + P_{\text{operacyjna}} \quad (14)$$



Rys. 4.21. Przebieg poboru mocy dla toczenia z wyodrębnionymi składnikami mocy wg badań własnych [9–12,28]

Ze składników mocy wyodrębniono moc całkowitą, moc stałą i operacyjną, a także elementy mocy odnoszące się do obróbki, czyli moc skrawania oraz moc nagniatania. Zapis mocy w zdefiniowanym czasie pozwala na określenie energii niezbędnej do realizacji badanego procesu obróbki. W pracy analizowano energię całkowitą (pobieraną przez maszynę), jak również wyodrębniono energię obróbki (skrawania oraz nagniatania). Analogicznie postępowano dla energii właściwej skrawania oraz energii powierzchniowej (rys. 4.22).

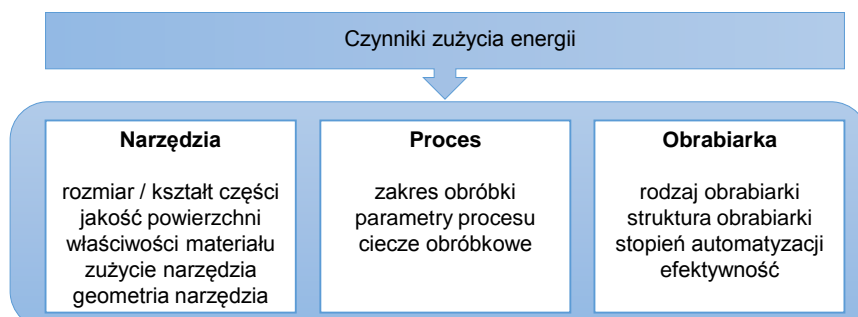


Rys. 4.22. Schemat wyodrębnienia i pomiaru składowych mocy i energii

W pracy podjęto działania mające na celu wyznaczenie energochłonności obróbki sekwencyjnej obejmującej toczenie oraz nagniatanie. Aby ocenić celowość danych zabiegów obróbki sekwencyjnej wykonano również pomiary chropowatości powierzchni oraz przeprowadzono analizy zmierzające do uzyskania założonej chropowatości powierzchni przy najmniejszym możliwym zużyciu energii.

4.6. Optymalizacja warunków obróbki

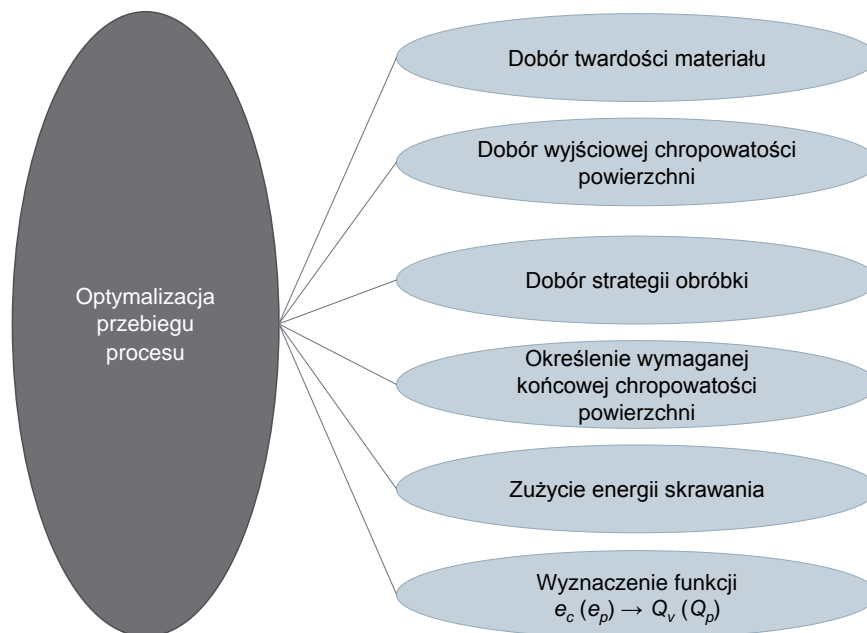
Głównymi przyczynami wpływającym na zużycie energii w obrabiarkach sterowanych numerycznie są czynniki związane z narzędziami, procesem oraz funkcjonowaniem obrabiarki (rys. 4.23). Istotnymi czynnikami są rozmiar oraz kształt przedmiotu obrabianego, wymagana jakość powierzchni, właściwości materiału, stan oraz stereometria narzędzia, parametry procesu, stosowanie cieczy obróbkowych, rodzaj obróbki, struktura obrabiarki oraz stopień jej zautomatyzowania i efektywność.



Rys. 4.23. Czynniki wpływające na zużycie energii w obrabiarkach

Odpowiedni dobór kryteriów optymalizacji jest najważniejszym elementem pozwalającym na jej realizację. Podczas obróbki sekwencyjnej czynnikami istotnymi

w ujęciu optymalizacji jest dobór stanu wyjściowego materiału, strategia obróbki, uzyskanie odpowiedniej chropowatości powierzchni oraz zużycie energii (rys. 4.24).

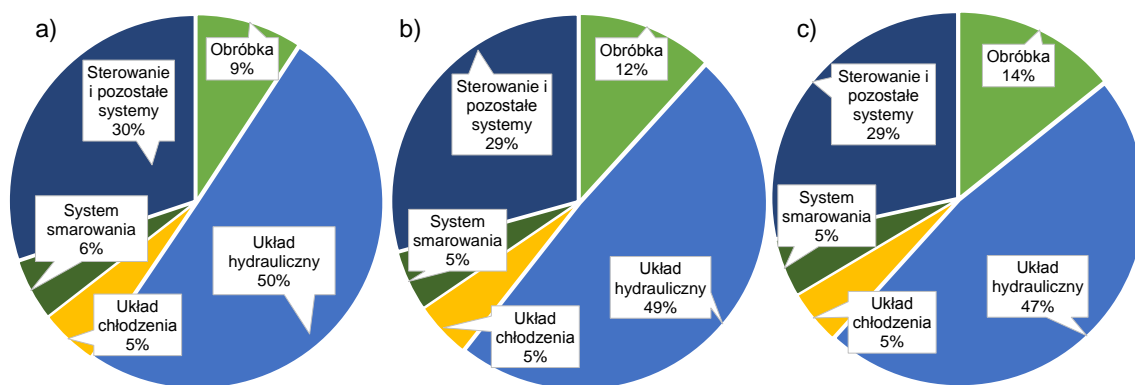


Rys. 4.24. Dobór kryteriów optymalizacji obróbki sekwencyjnej

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

5.1. Charakterystyki energetyczne procesu skrawania

W obrabiarkach CNC moc zużywana w skrawaniu stanowi często niewielki procent całkowitego poboru mocy. Najwięcej mocy zużywa układ hydrauliczny niezbędny do mocowania przedmiotu obrabianego oraz układ sterowania wraz z dodatkowymi systemami. Chłodzenie czy smarowanie pobiera kilka procent mocy. Usuwanie nadmiaru materiału jest składnikiem zmiennym i zależy głównie od technologicznych parametrów obróbki. Dla przykładu przy skrawaniu stali o różnej twardości dla $v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm, $f = 0,1$ mm/obr na usunięcie materiału w zależności od twardości materiału obrabianego zużyto od 9 do 14% mocy pobieranej przez obrabiarkę (rys. 5.1).



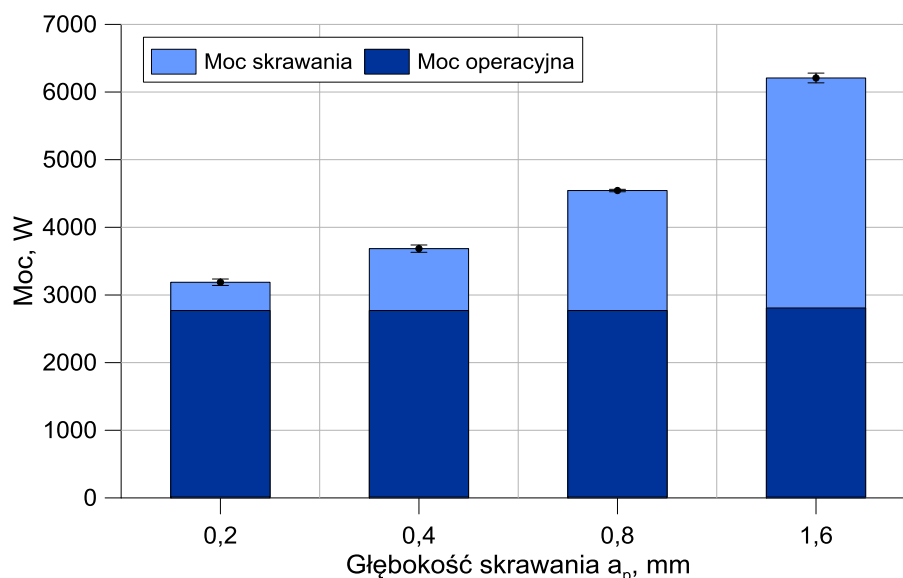
Rys. 5.1. Rozkład mocy pobieranej przez tokarkę CNC podczas toczenia stali o twardości: a) 20 HRC, b) 30 HRC, c) 50 HRC z parametrami $v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm, $f = 0,1$ mm/obr

5.1.1. Moc całkowita i skrawania

Moc całkowitą określa się jako sumę mocy operacyjnej oraz mocy skrawania. Moc operacyjna składa się z mocy stałej, która umożliwia utrzymanie gotowości do pracy obrabiarki oraz mocy koniecznej do utrzymania w ruchu napędów posuwów oraz wrzeciona w tzw. „skrawaniu powietrza”. Moc skrawania klasyfikowana jest jako niezbędna do usunięcia nadmiaru materiału. Analizując charakterystyki energetyczne toczenia materiałów o różnej twardości można zauważyć, że wraz ze wzrostem technologicznych parametrów obróbki tj. głębokości skrawania, posuwu czy prędkości

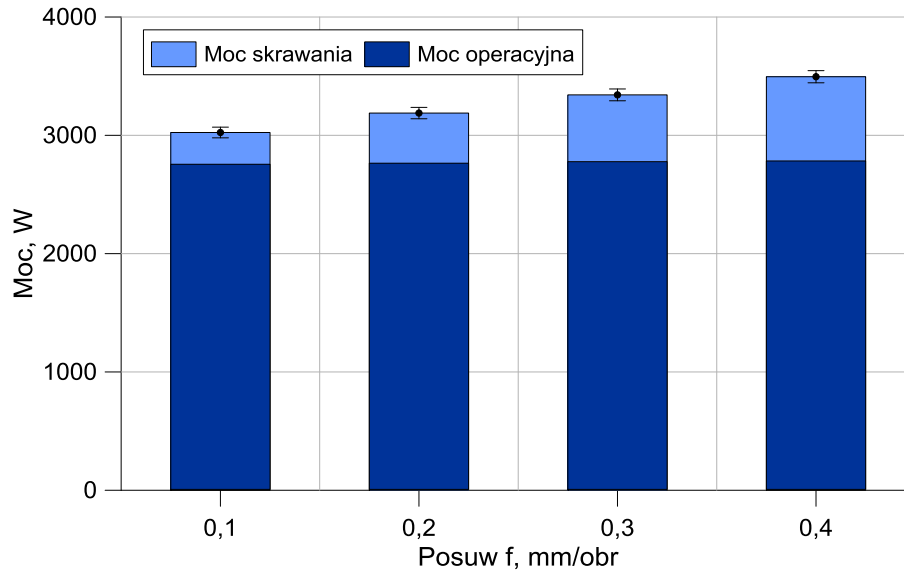
skrawania, następuje wyraźny wzrost mocy. Największy udział w mocy całkowitej ma moc skrawania, która jest czynnikiem zmiennym.

Analizując wpływ głębokości skrawania, prędkości skrawania oraz posuwu na moc skrawania stali miękkiej (~20 HRC) można zauważyć największy wzrost mocy skrawania gdy zwiększa się głębokość skrawania. Dla zmiennej głębokości skrawania (od 0,2 do 1,6 mm) zarejestrowano przyrost mocy całkowitej od 3,2 kW do 6,2 kW dla prędkości skrawania 200 m/min oraz posuwu 0,2 mm/obr (rys. 5.2). Dla podanych warunków obróbki wydzielono moc skrawania wynoszącą od ~0,43 do ~3,41 kW. Moc skrawania dla zmiennej głębokości skrawania stanowiła od 13% dla $a_p = 0,2$ mm do 55% dla $a_p = 1,6$ mm mocy całkowitej.



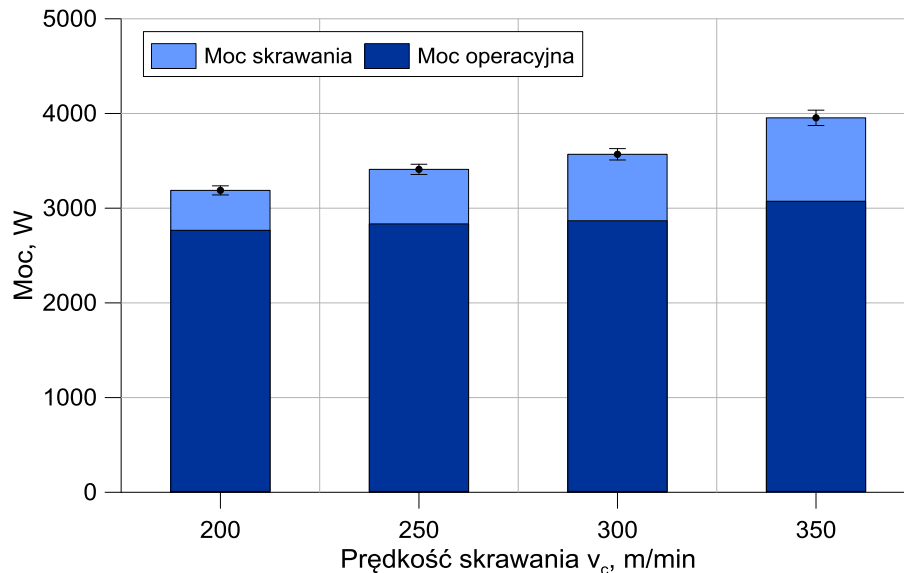
Rys. 5.2. Wpływ głębokości skrawania na moc całkowitą i moc skrawania dla stali o twardości 20 HRC ($v_c = 200$ m/min, $f = 0,2$ mm/obr)

Dla prędkości skrawania 200 m/min, głębokości skrawania 0,2 mm oraz zmiennego posuwu (od 0,1 do 0,4 mm/obr) moc skrawania wynosiła od ~0,28 do ~0,72 kW, co stanowiło około 9% do 20% mocy całkowitej wynoszącej od 3 do 3,5 kW (rys. 5.3).

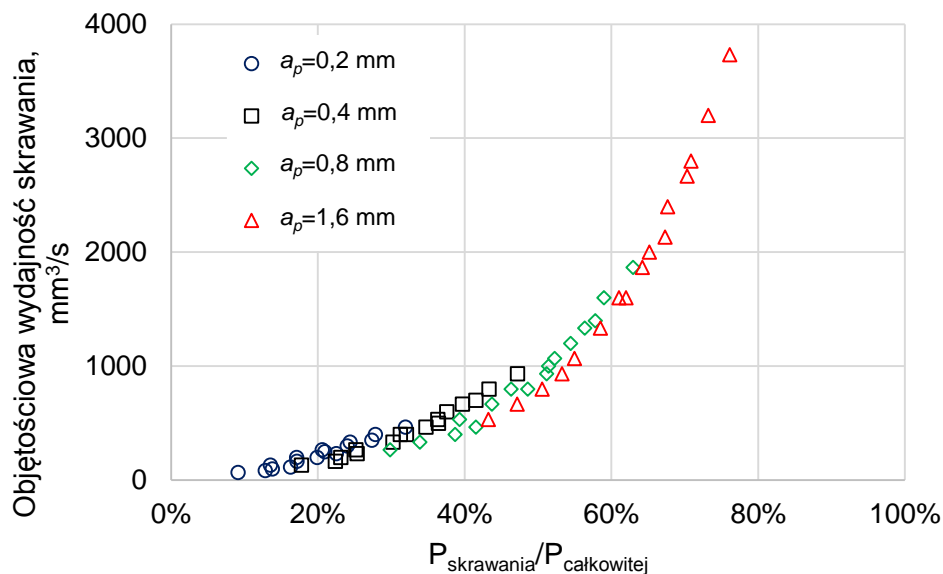


Rys. 5.3. Wpływ posuwu na moc całkowitą i moc skrawania dla stali o twardości 20 HRC ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm)

Dla zmiennej prędkości skrawania (od 200 do 350 m/min) przy głębokości skrawania 0,2 mm i posuwie 0,2 mm/obr moc skrawania wynosiła od ~0,43 do ~0,89 kW natomiast moc całkowita wynosiła od ~3,2 do ~3,9 kW (rys. 5.4). Odnotowano, że moc skrawania w tym przedziale prędkości skrawania wynosi od 13% do 22% mocy całkowitej.



Rys. 5.4. Wpływ prędkości skrawania na moc całkowitą i moc skrawania dla stali o twardości 20 HRC ($f = 0,2$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm)

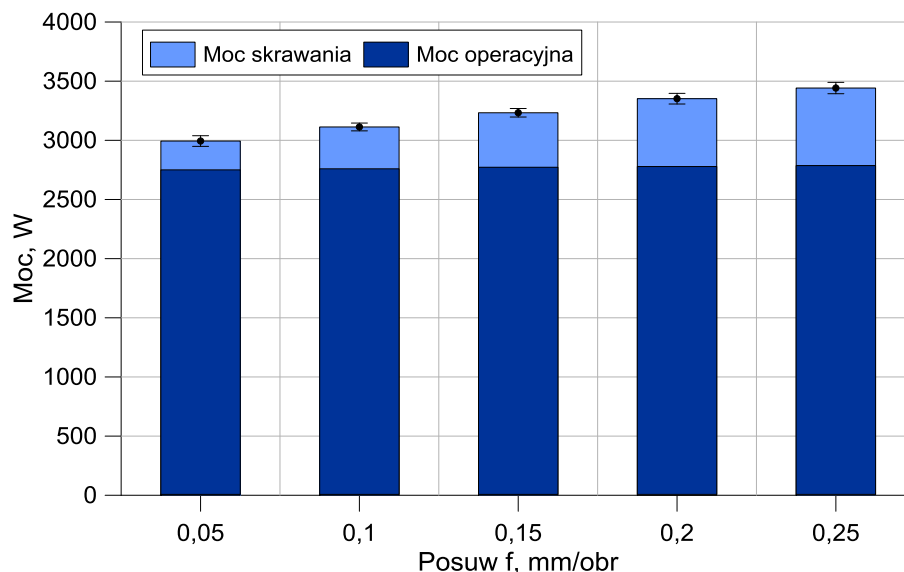


Rys. 5.5. Stosunek mocy całkowitej do mocy skrawania dla stali o twardości 20 HRC

($v_c = 200 \div 350$ m/min, $f = 0,1 \div 0,4$ mm/obr, $a_p = 0,2 \div 1,6$ mm)

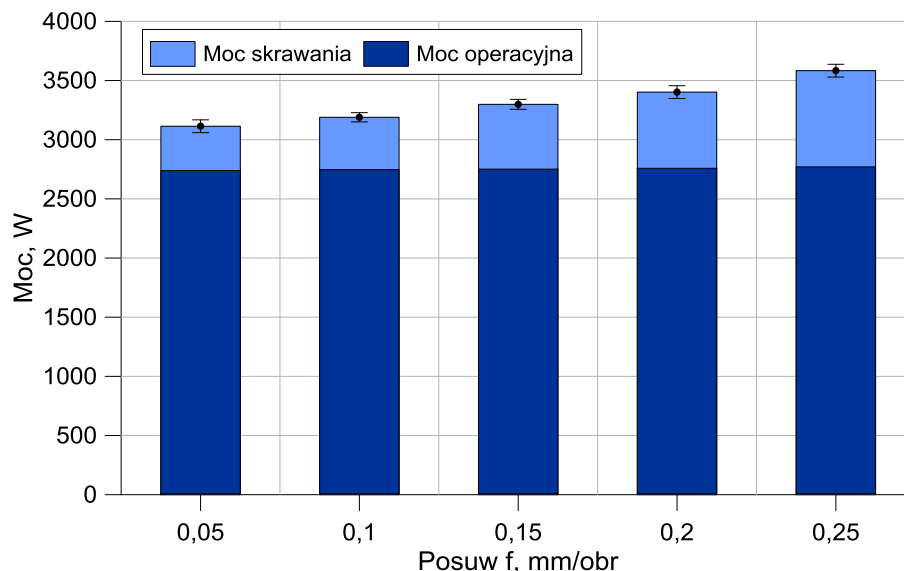
W zależności od stosowanych parametrów obróbki (objętościowej wydajności skrawania Q_v) udział mocy skrawania zmienia się w szerokim zakresie jak na rys. 5.5. Dla stali o twardości około 20 HRC odnotowano moc skrawania w przedziale 9÷76% mocy całkowitej. Moc skrawania wynoszącą poniżej 50% całkowitej mocy odnotowano dla prób z głębokością skrawania poniżej 0,4 mm oraz części prób dla $a_p = 0,8$ mm. Natomiast wartości powyżej 65% mocy całkowitej odnotowano przy próbach z głębokością skrawania powyżej 1,6 mm.

Podczas toczenia stali o twardości około 30 HRC dla $a_p = 0,2$ mm i $v_c = 200$ m/min oraz $f = 0,05 \div 0,25$ mm/obr, tak moc skrawania jak i moc całkowita rosną w całym badanym zakresie. Odnotowano moc całkowitą w zakresie 3÷3,4 kW, natomiast moc skrawania wyniosła od 0,25 kW do 0,66 kW, co stanowi od 8% do 19% mocy całkowitej (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Wpływ parametrów technologicznych toczenia stali o twardości 30 HRC na moc operacyjną oraz moc skrawania przy $a_p = 0,2$ mm i $v_c = 200$ m/min

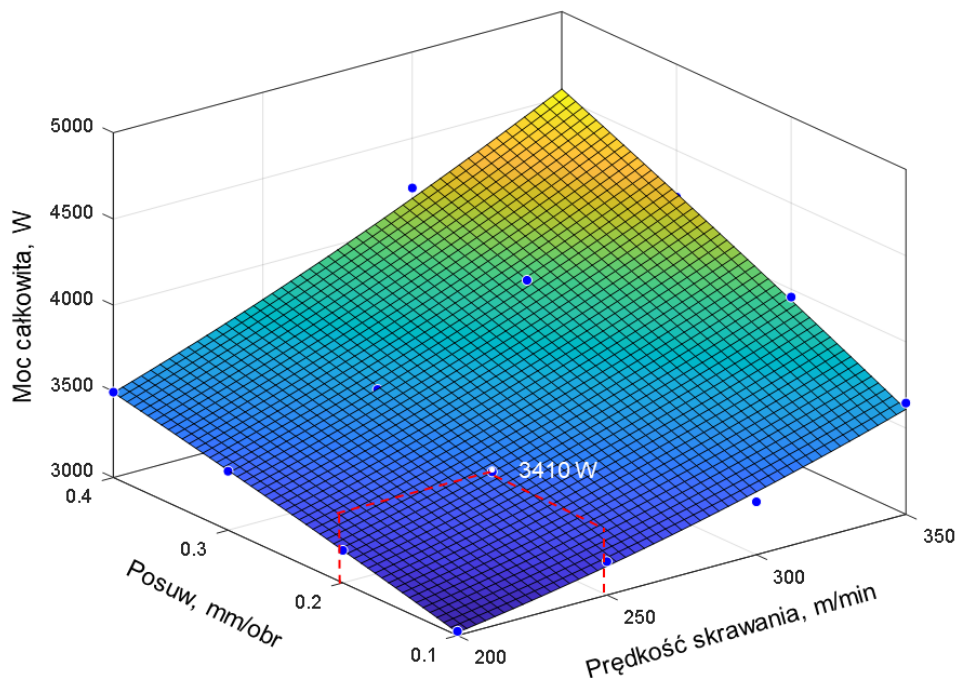
Wpływ posuwu na moc całkowitą i jej składowe podczas toczenia stali o twardości 50 HRC z parametrami $a_p = 0,2$ mm, $v_c = 200$ m/min i $f = 0,05 \div 0,25$ mm/obr przedstawiono na rys. 5.7. Moc skrawania wraz ze wzrostem wartości posuwu zmienia się w przedziale od 0,38 do 0,82 kW, natomiast moc całkowita wynosi od 3,1 kW do 3,6 kW.



Rys. 5.7. Wpływ parametrów technologicznych toczenia stali o twardości 50 HRC na moc operacyjną oraz moc skrawania przy $a_p = 0,2$ mm i $v_c = 200$ m/min

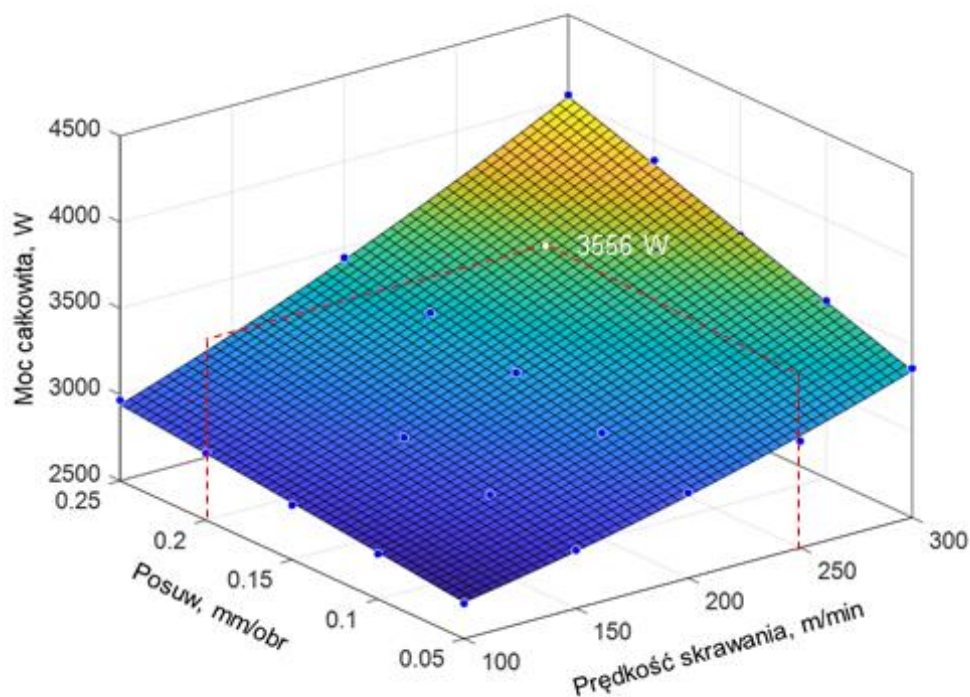
Analizując wpływ parametrów technologicznych na moc całkowitą dla obróbki stali w stanie wyjściowym miękkim (20HRC), największy wpływ wykazuje wzrost

głębokości skrawania. Dla zmiennych wartości posuwu (od 0,1 do 0,4 mm/obr) oraz prędkości skrawania (od 200 do 350 m/min) uzyskano dla $a_p = 0,2$ mm wartości mocy od ~3 kW do ~4,5 kW (rys. 5.8).



Rys. 5.8. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc całkowitą podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

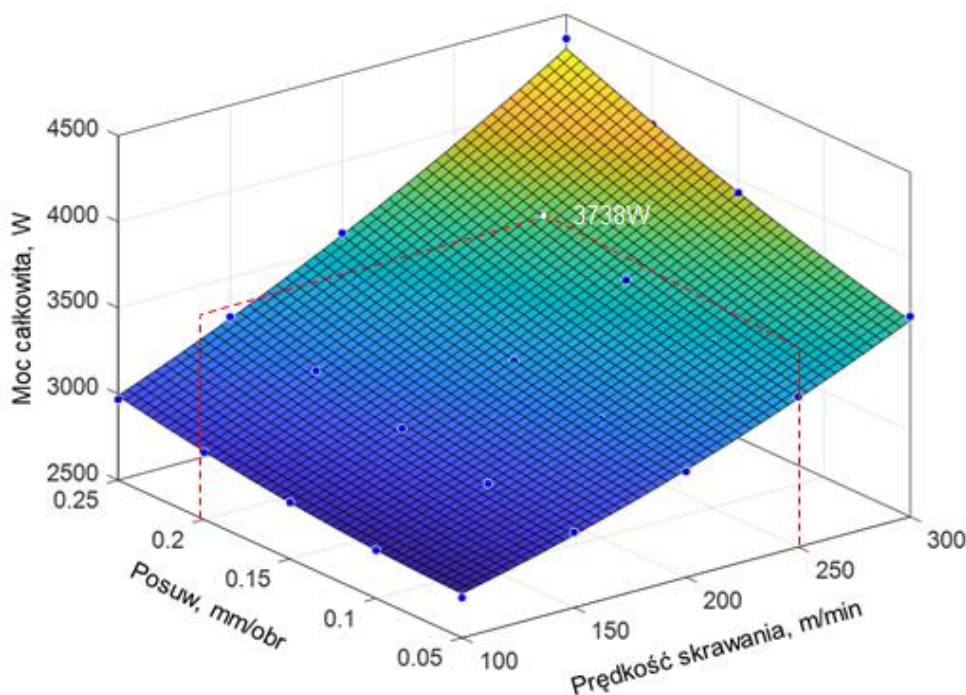
Dla stali o twardości około 30 HRC dla zmiennych wartości prędkości skrawania (od 100 do 300 m/min) i posuwu (od 0,05 do 0,25 mm/obr) oraz $a_p = 0,2$ mm moc całkowita wynosiła od ~2,5 do ~3,9 kW, natomiast dla $a_p = 0,4$ mm od ~2,7 do ~5 kW (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc całkowitą podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

W przypadku stali o twardości około 50 HRC dla zmiennych wartości prędkości skrawania (od 100 do 300 m/min) i posuwu (od 0,05 do 0,25 mm/obr) oraz $a_p = 0,2$ mm moc całkowita wynosiła od ~2,7 do ~4,3 kW (rys. 5.10).

Jeśli porównamy wartości mocy dla tych samych parametrów skrawania ($v_c = 250$ m/min, $f = 0,2$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm) to widoczny jest wpływ twardości obrabianej stali ($P = 3410$ W na rys. 5.8, $P = 3556$ W na rys. 5.9 i $P = 3738$ W na rys. 5.10). Oznacza to przyrost odpowiednio o 4% i 5% w stosunku do poprzedzającej twardości materiału.



Rys. 5.10. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc całkowitą podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

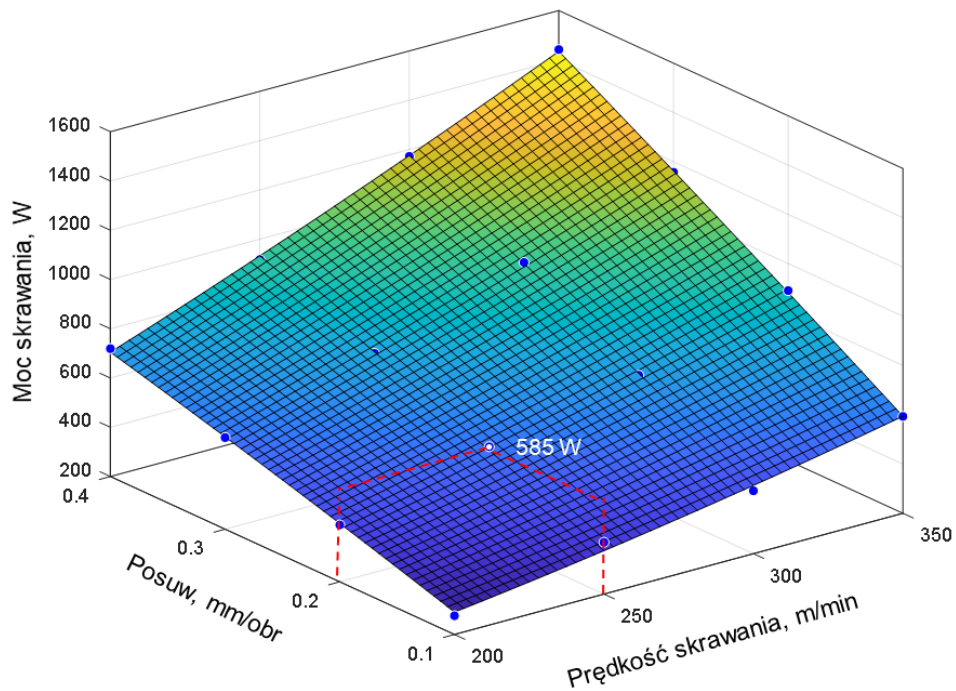
Równania regresji opisujące wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc całkowitą toczenia zostały wyznaczone dla stali o trzech twardościach i przedstawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Równania regresji mocy całkowitej

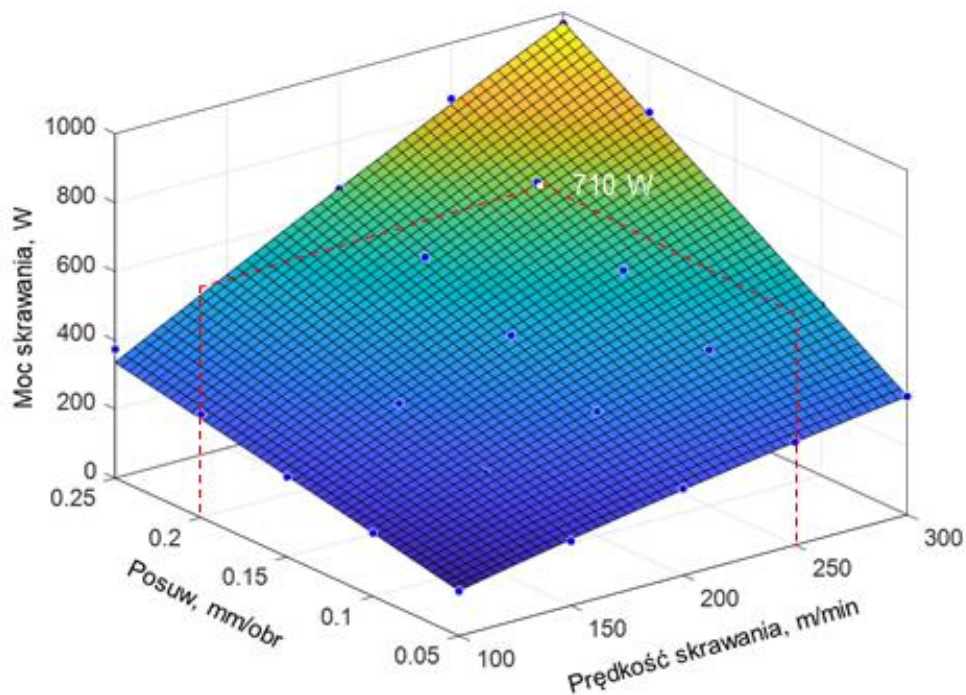
Twardość stali, HRC	Równanie regresji mocy całkowitej, P	R^2
20	$P = 2481 - 0,4047 * v_c - 341,4 * f + 0,007928 * v_c^2 + 10,52 * v_c * f - 456,4 * f^2$	0,988
30	$P = 2547 + 0,4848 * v_c + 169,9 * f + 0,005379 * v_c^2 + 11,11 * v_c * f - 449,5 * f^2$	0,996
50	$P = 2595 - 0,8709 * v_c - 1286 * f + 0,007504 * v_c^2 + 10,78 * v_c * f + 4551 * f^2$	0,997

Wpływ parametrów technologicznych (posuwu oraz prędkości skrawania) na moc skrawania dla wszystkich twardości stali przedstawiono na rys 5.11 – 5.13. Dla $v_c = 250$ m/min i $a_p = 0,2$ mm zarejestrowano moc równą 585 W dla stali o twardości 20 HRC, dla stali o twardości 30 HRC moc 710 W, a dla stali o twardości 50 HRC moc

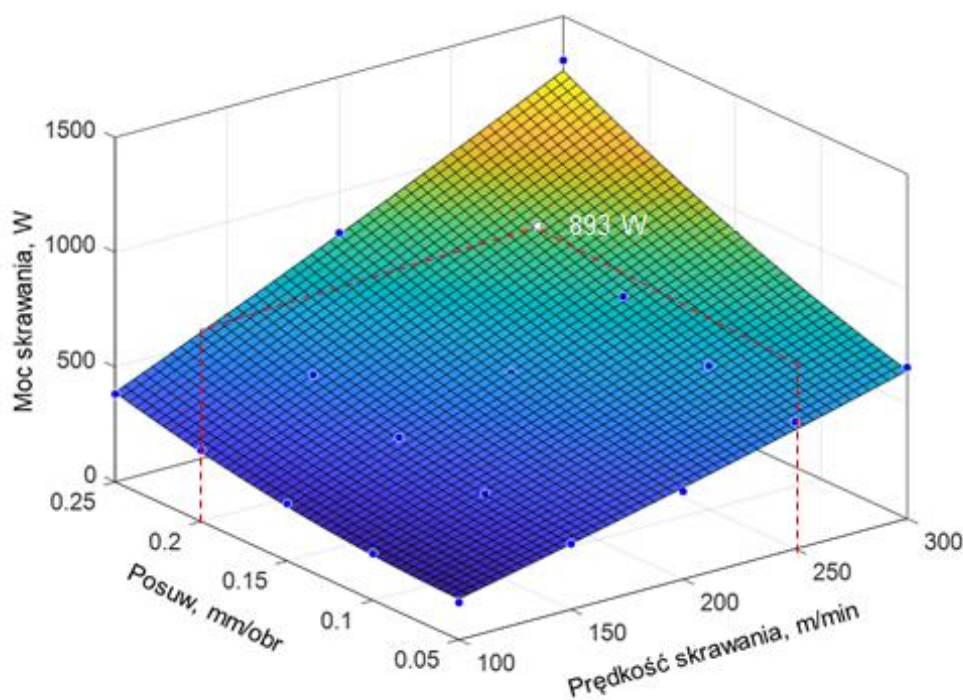
893 W, co wskazuje na znaczny wzrost zużycia mocy wraz ze zmianą twardości materiału obrabianego (odpowiednio o 21% i 26%).



Rys. 5.11. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc skrawania podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.12. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc skrawania podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.13. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc skrawania podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Równania regresji opisujące wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na moc skrawania podczas toczenia zostały wyznaczone dla stali o trzech twardościach i przedstawione w tabeli 5.2.

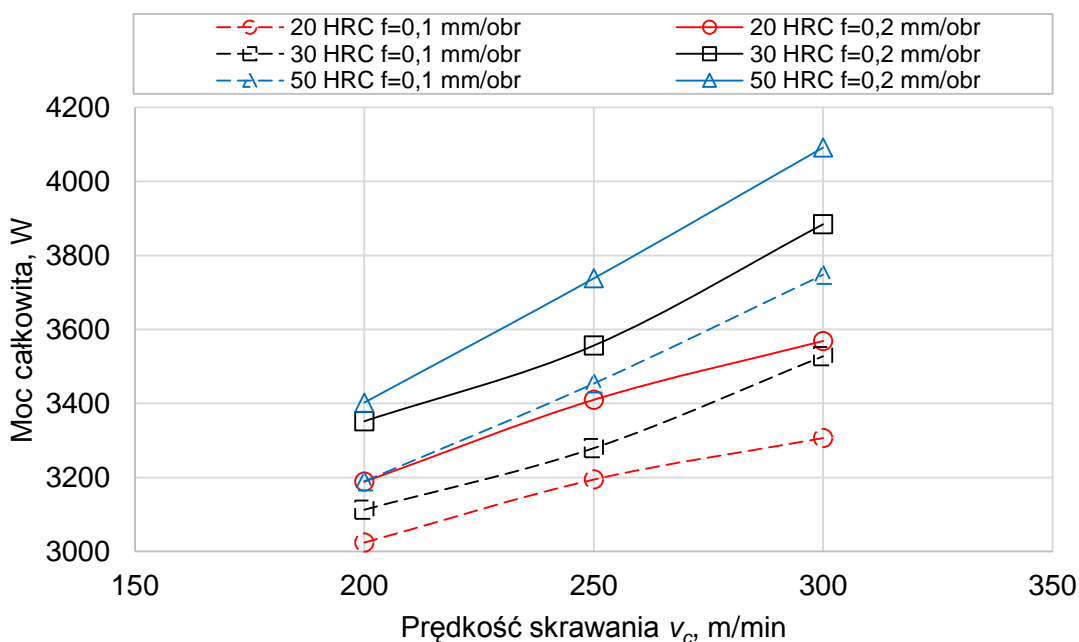
Tabela 5.2. Równania regresji mocy skrawania

Twardość stali, HRC	Równanie regresji mocy skrawania, P_c	R^2
20	$P_c = 562,8 - 5,235 * v_c - 384,3 * f + 0,01078 * v_c^2 + 10,49 * v_c * f - 481,4 * f^2$	0,998
30	$P_c = -9,384 + 0,976 * v_c + 3,01 * f - 0,001101 * v_c^2 + 10,59 * v_c * f - 232,4 * f^2$	0,992
50	$P_c = 39,71 + 1,319 * v_c - 1363 * f + 0,001258 * v_c^2 + 10,17 * v_c * f + 4671 * f^2$	0,995

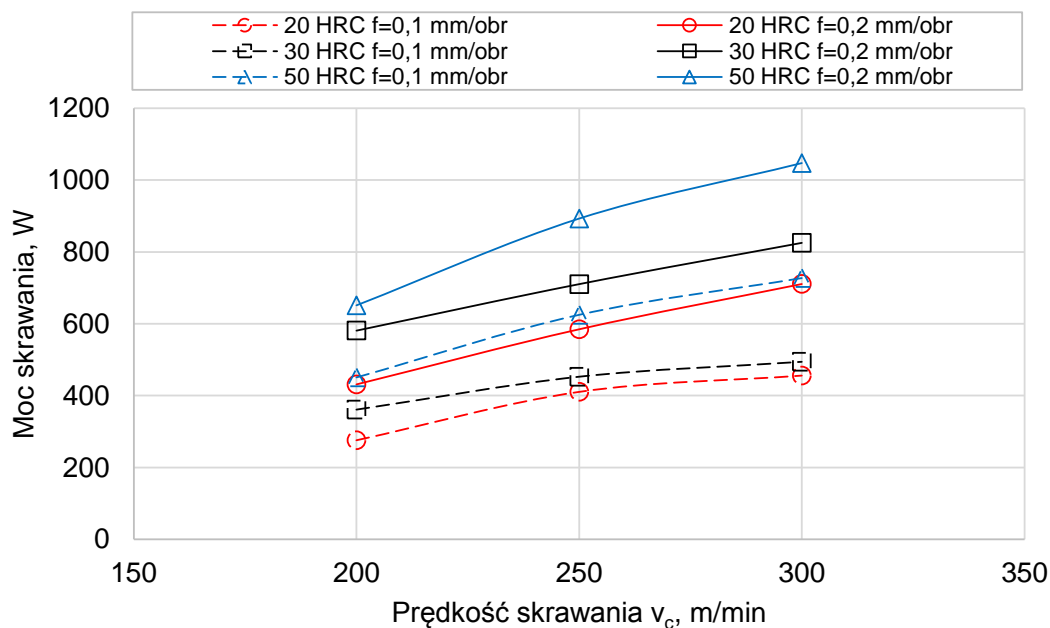
Porównując moc całkowitą dla toczenia stali o różnej twardości można zauważyć wyraźny wpływ parametrów technologicznych jak i twardości materiału obrabianego. Największy wzrost można odnotować dla zmiennej prędkości skrawania, wynikający między innymi ze wzrostu prędkości obrotowej wrzeciona (rys. 5.16). Odnotowano

również, że wraz ze wzrostem posuwu oraz twardości materiału obrabianego moc całkowita wzrasta.

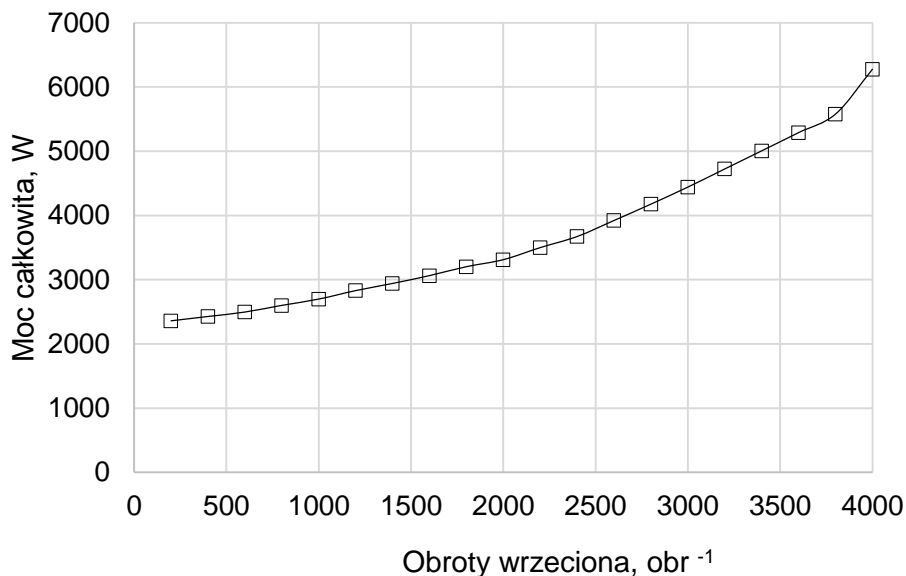
Porównując wpływ parametrów technologicznych oraz twardości materiału na moc całkowitą (rys. 5.14) i moc skrawania (rys. 5.15) można dostrzec duży wpływ twardości (stanu) materiału, jak i posuwu oraz prędkości skrawania.



Rys. 5.14. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na moc całkowitą dla stali o twardości 20 ÷ 50 HRC ($v_c = 200 \div 350$ m/min, $f = 0,1 \div 0,2$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm)



Rys. 5.15. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na moc skrawania dla stali o twardości 20 ÷ 50 HRC ($v_c = 200 \div 350$ m/min, $f = 0,1 \div 0,2$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm)



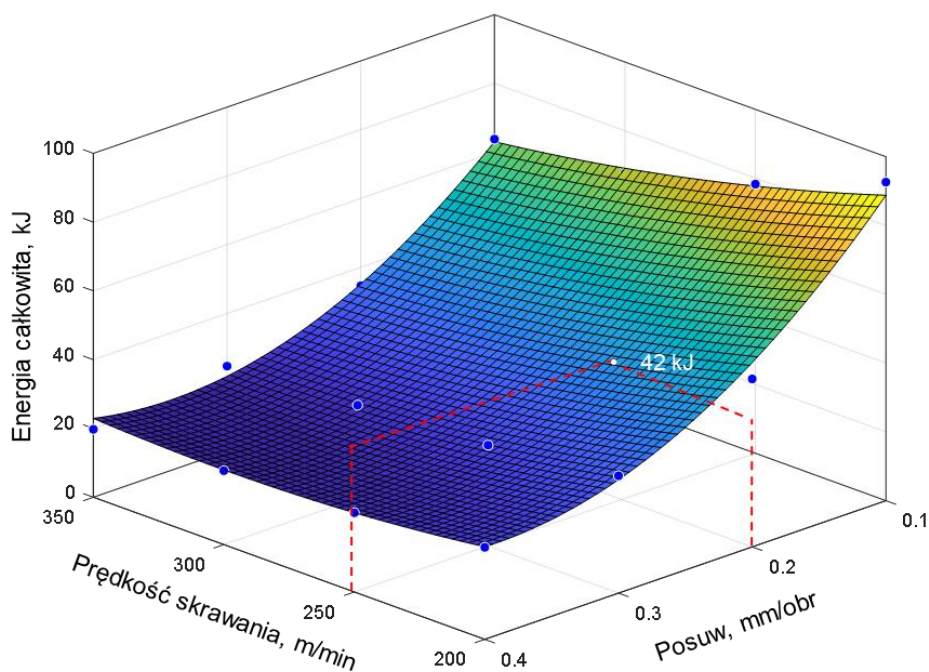
Rys. 5.16. Zależność poboru mocy od obrotów wrzeciona tokarki Okuma Genos L200E-M

Moc operacyjna zależy w głównej mierze od wartości mocy stałej (niezbędnej do utrzymania obrabiarki w stanie gotowości) oraz prędkości obrotowej wrzeciona (prędkości skrawania).

Zależność mocy pobieranej przez obrabiarkę od obrotów wrzeciona przedstawiono na rys. 5.16. Wyniki wskazują na nieliniowy charakter zależności $P = f(n)$.

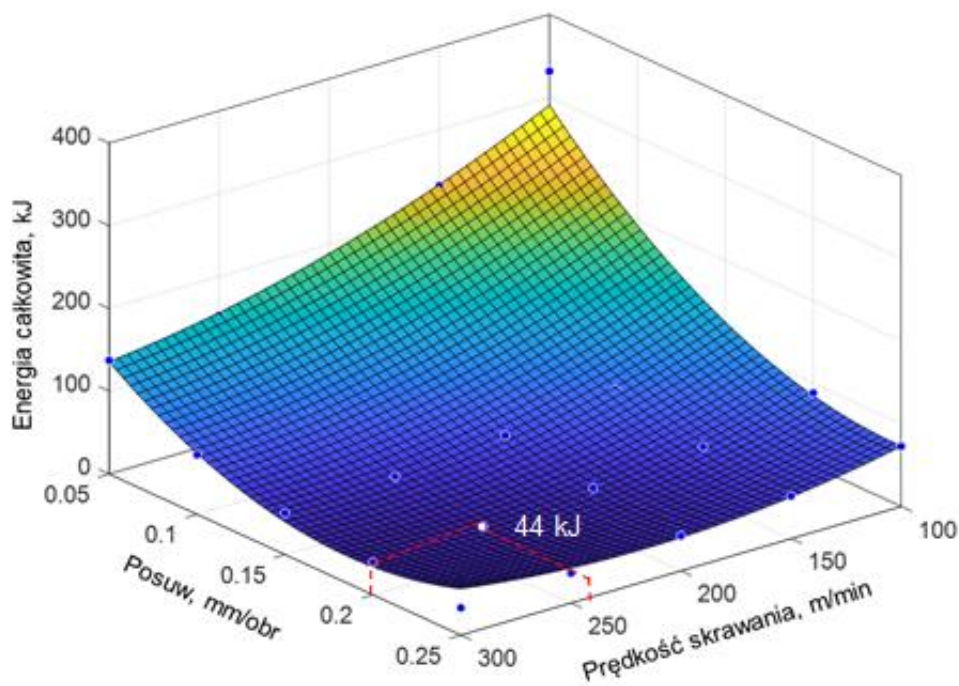
5.1.2. Energia skrawania

W przypadku oceny energii zużytej przez obrabiarkę można zauważyć, że wzrost parametrów skrawania powoduje redukcję energii niezbędnej do usunięcia materiału. Przy toczeniu stali o twardości 20 HRC z $a_p = 0,2$ mm oraz ze zmiennym posuwem i prędkością skrawania odnotowano wartości energii całkowitej od 20 do 93 kJ (rys. 5.17). Największy wpływ na energię całkowitą ma posuw, a jego zwiększenie do 0,4 mm/obr skutkuje redukcją mocy o około 70%. Zmiana prędkości skrawania z 200 do 350 m/min powoduje redukcję mocy całkowitej do maksymalnie 30%.



Rys. 5.17. Wpływ parametrów skrawania na energię całkowitą podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

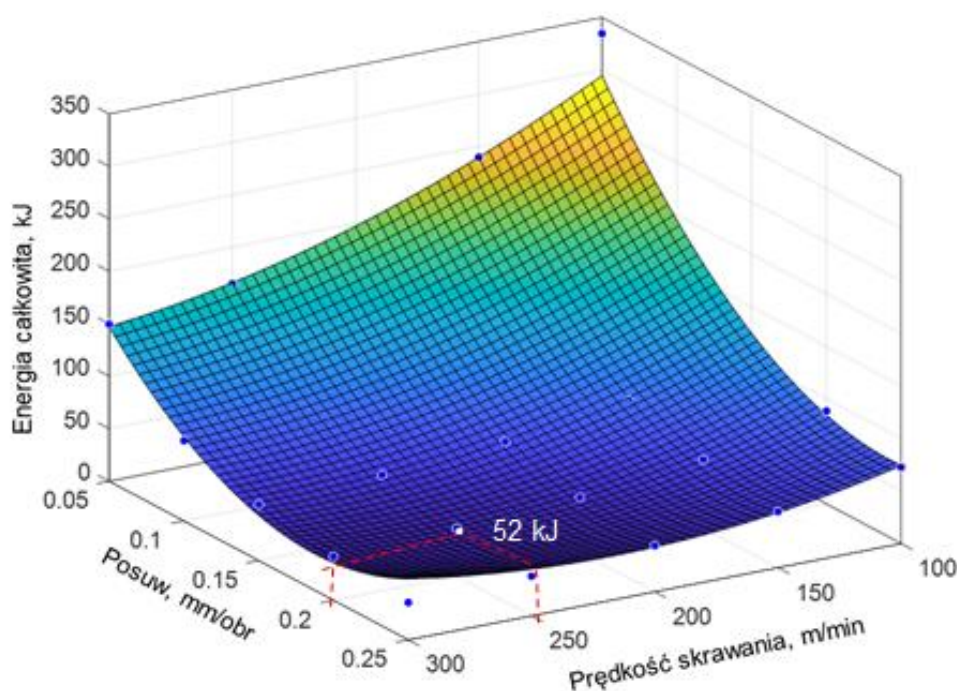
W przypadku skrawania stali o twardości 30 HRC największą redukcję energii całkowitej uzyskano stosując największy posuw i prędkość skrawania (rys. 5.18). Wraz ze wzrostem posuwu z 0,05 mm/obr do 0,25 mm/obr zaobserwowano redukcję energii całkowitej o ponad 70%, natomiast wzrost prędkości skrawania ze 100 m/min do 300 m/min powoduje spadek wartości energii o około 50 ÷ 60%.



Rys. 5.18. Wpływ parametrów skrawania na energię całkowitą podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Po toczeniu na twardo stali można odnotować największą zarejestrowaną wartość energii przy najmniejszej wartości posuwu ($f = 0,05$ mm/obr) oraz prędkości skrawania ($v_c = 100$ m/min) wynoszącą 335 kJ (rys. 5.19). Na redukcję energii całkowitej największy wpływ ma posuw jak i prędkość skrawania, tak że wraz ze wzrostem tych parametrów energia maleje. Zwiększenie posuwu może prowadzić do prawie 80% redukcji energii, gdy skrawa się z maksymalną prędkością skrawania $v_c = 300$ m/min.

Z rys. 5.17, 5.18 i 5.19 można ustalić wpływ twardości materiału na wartość energii skrawania (odpowiednio 40, 44 i 55 kJ). Trend jest odmienny niż mocy skrawania przedstawiony w rozdziale 5.1.1.



Rys. 5.19. Wpływ parametrów skrawania na energię całkowitą podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

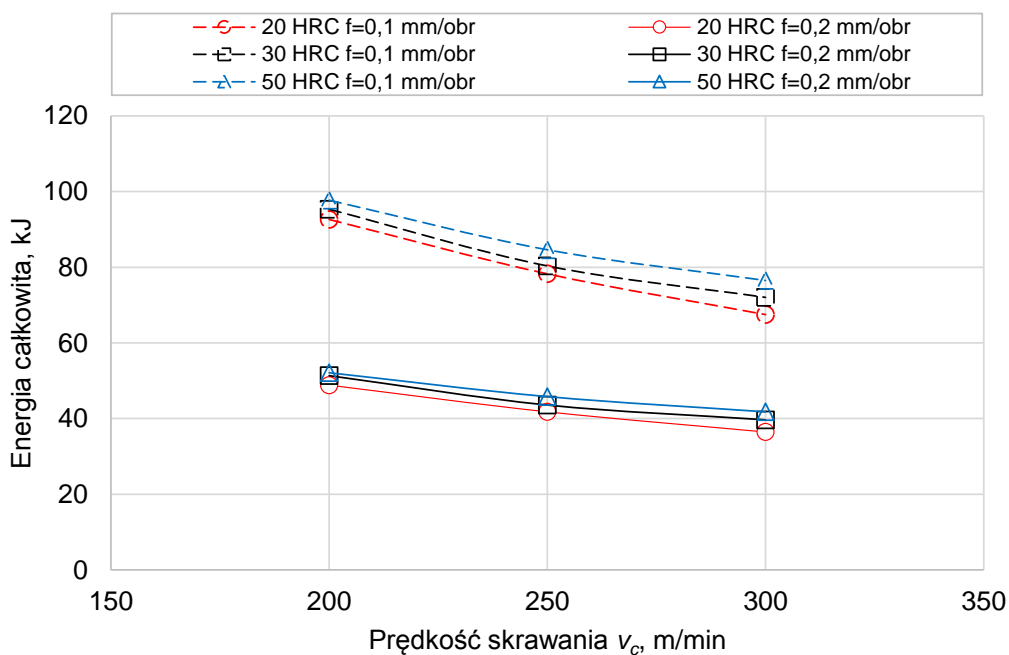
Równania regresji opisujące wpływ parametrów skrawania na energię całkowitą w toczeniu zostały wyznaczone dla trzech twardości stali i przedstawione w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Równania regresji dla energii całkowitej

Twardość stali, HRC	Równanie regresji dla energii całkowitej, E_t	R^2
20	$E_t = 198,1 - 0,4031 * v_c - 635,9 * f + 0,0003969 * v_c^2 + 0,4069 * v_c * f - 714,3 * f^2$	0,988
30	$E_t = 582,1 - 1,916 * v_c - 3118 * f - 0,002428 * v_c^2 + 3,447 * v_c * f + 5622 * f^2$	0,960
50	$E_t = 586,2 - 1,856 * v_c - 3223 * f + 0,002384 * v_c^2 + 3,289 * v_c * f + 5974 * f^2$	0,961

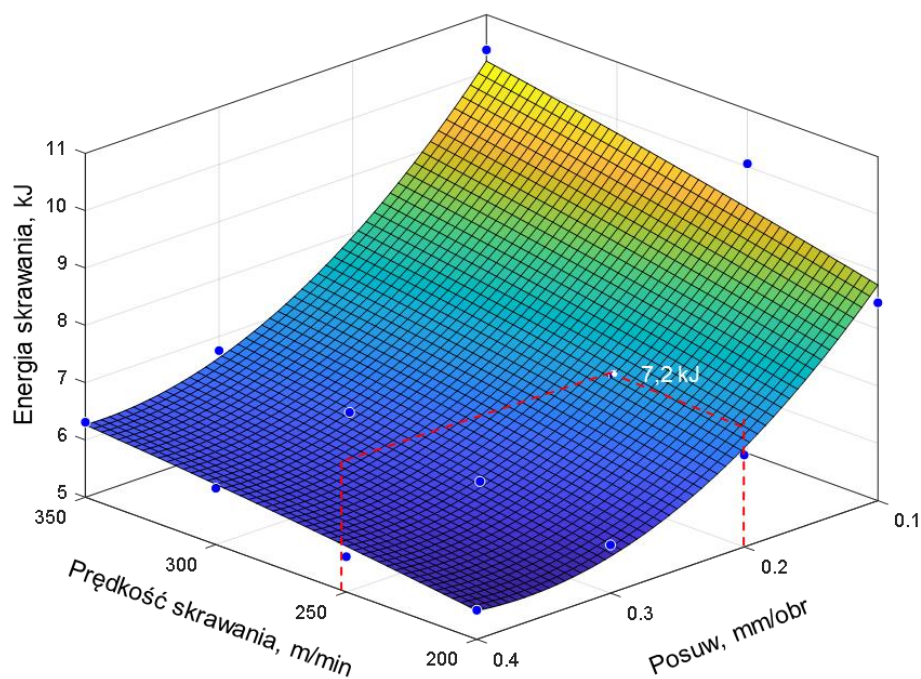
Analizując wyznaczone wartości energii całkowitej można zauważyć, że dominującym czynnikiem wpływającym na energię całkowitą jest posuw. Wraz ze wzrostem posuwu odnotowano znaczący wzrost energii całkowitej. Zwiększenie prędkości skrawania prowadzi do redukcji energii całkowitej. Wynika to z faktu, iż wzrost prędkości skraca czas obróbki mimo wyższej mocy całkowitej (rys. 5.16).

Najmniejszy wpływ na energię całkowitą ma twardość materiału, gdzie wraz ze wzrostem twardości odnotowano nieznaczny wzrost wartości energii całkowitej (rys. 5.20).



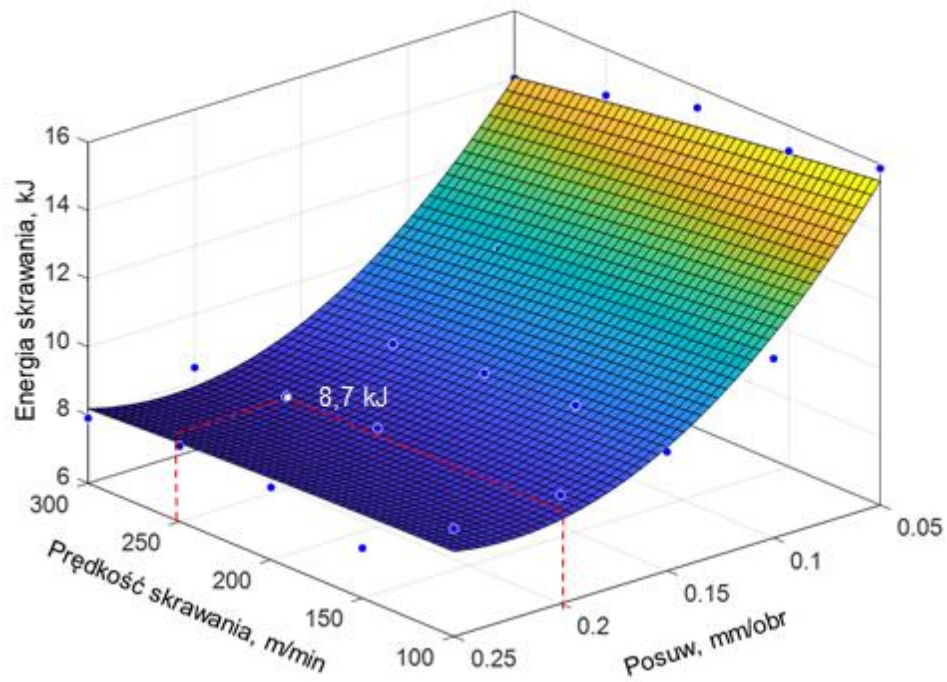
Rys. 5.20. Wpływ prędkości skrawania i posuwu na energię całkowitą dla stali o twardości 20 ÷ 50 HRC ($v_c = 200 \div 350$ m/min, $f = 0,1 \div 0,2$ mm/obr, $a_p = 0,2$ mm)

Analizując wpływ parametrów technologicznych toczenia na energię skrawania można zauważyć, że największe wartości odnotowano dla najmniejszej wartości posuwu, nieznaczny wzrost zaobserwowano wraz ze zwiększaniem prędkości skrawania. Najwyższą wartość odnotowano dla $v_c = 350$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr, a cały zakres zmian mieścił się w przedziale 5,5 ÷ 10,4 kJ (rys. 5.21).



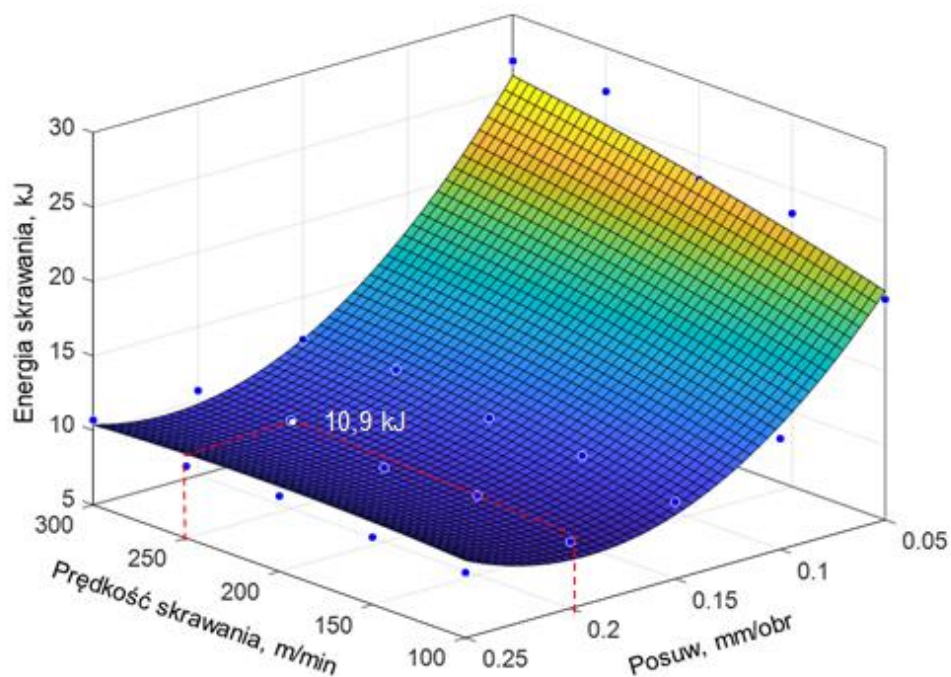
Rys. 5.21. Wpływ parametrów skrawania na energię skrawania podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Energia skrawania podczas toczenia stali o twardości 30 HRC zmieniała się w przedziale $7,5 \div 15,9$ kJ. Największe wartości odnotowano dla posuwu $f = 0,05$ mm/obr w całym badanym zakresie prędkości skrawania, a energia skrawania zmniejszała się wraz ze wzrostem posuwu. Prędkość skrawania wykazała minimalny wpływ na wartość energii skrawania (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Wpływ parametrów skrawania na energię skrawania podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Podczas skrawania stali o twardości 50 HRC głównym parametrem decydującym o wartości energii skrawania jest posuw. Wraz ze wzrostem posuwu energia skrawania zmniejsza się z około 27 kJ do 9 kJ (rys. 5.23). Poza toczeniem z posuwem 0,05 mm/obr prędkość skrawania ma minimalny wpływ na energię skrawania.



Rys. 5.23. Wpływ parametrów skrawania na energię skrawania podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

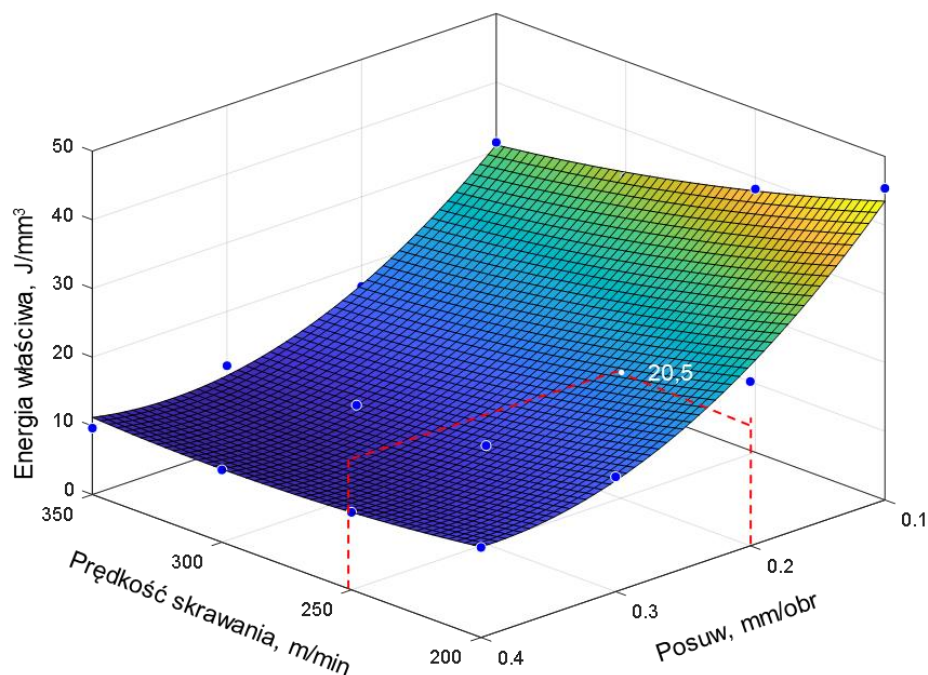
Równania regresji opisujące wpływ parametrów skrawania na energię skrawania zostały wyznaczone dla trzech twardości stali i przedstawione w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Równania regresji dla energii skrawania

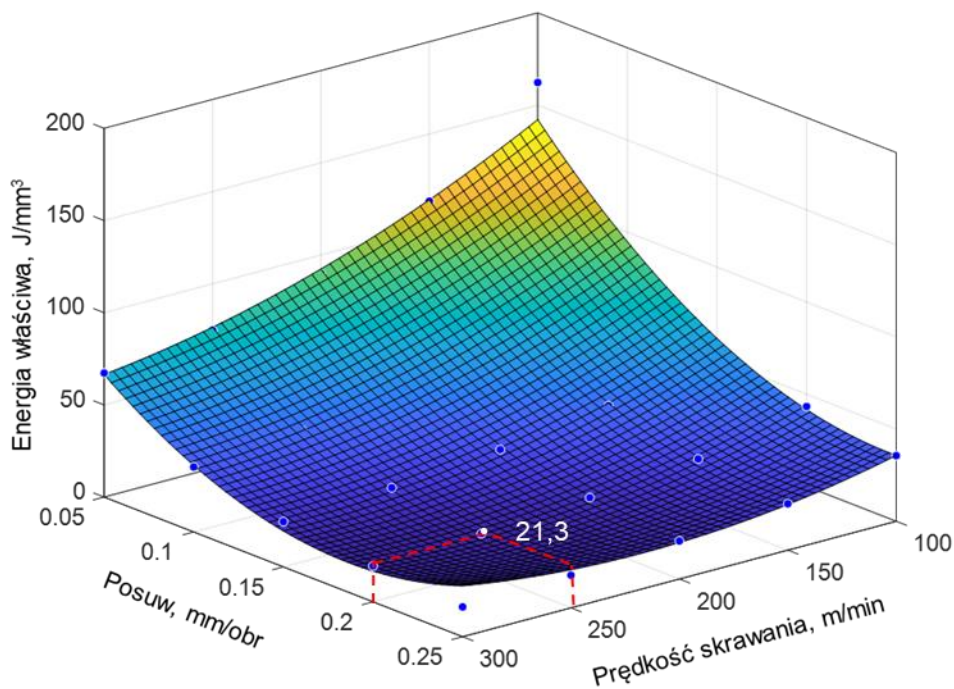
Twardość stali, HRC	Równanie regresji dla energii skrawania, E_c	R^2
20	$E_c = 1,917 - 0,008327 * v_c + 16,22 * f + 0,00005737 * v_c^2 - 0,03922 * v_c * f - 9,056 * f^2$	0,893
30	$E_c = 20,91 - 0,006329 * v_c - 109,1 * f - 0,000005719 * v_c^2 + 0,0282 * v_c * f + 237,7 * f^2$	0,961
50	$E_c = 25,68 + 0,05114 * v_c - 216,7 * f - 0,00004186 * v_c^2 - 0,134 * v_c * f + 597,5 * f^2$	0,954

5.1.1. Energia właściwa

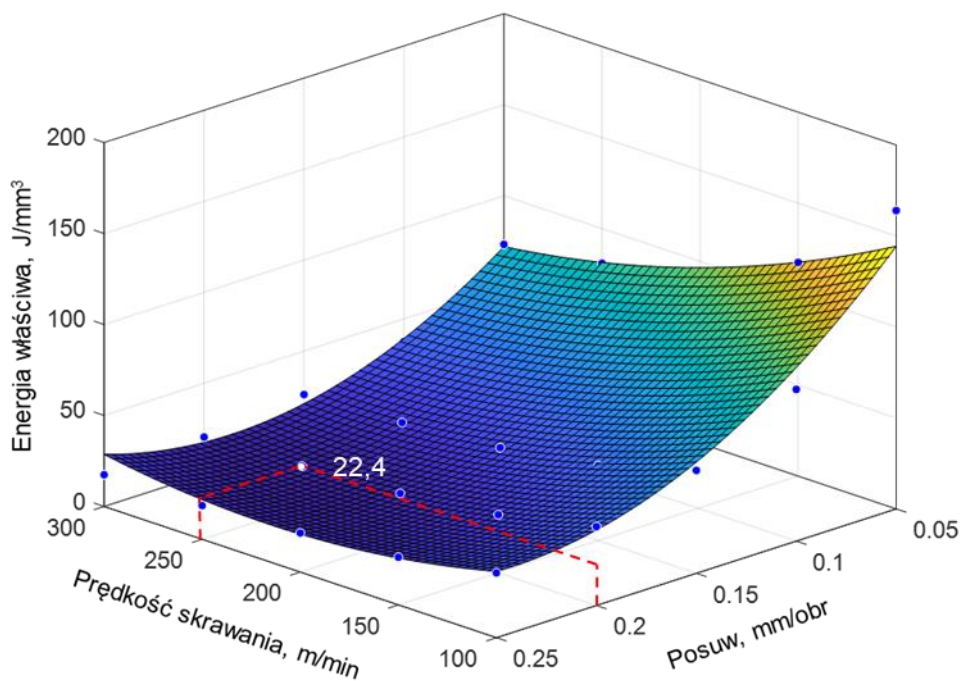
Energia właściwa skrawania, określa wielkość energii jaką należy użyć do usunięcia jednostkowej objętości materiału. Na rys 5.24 – 5.26 przedstawiono wpływ posuwu i prędkości skrawania na energię właściwą skrawania obejmującą toczenie stali o różnej twardości. Wyniki badań wskazują, że wzrost technologicznych parametrów skrawania (prędkości skrawania, posuwu, głębokości skrawania) wpływa na obniżenie wartości energii właściwej skrawania.



Rys. 5.24. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.25. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



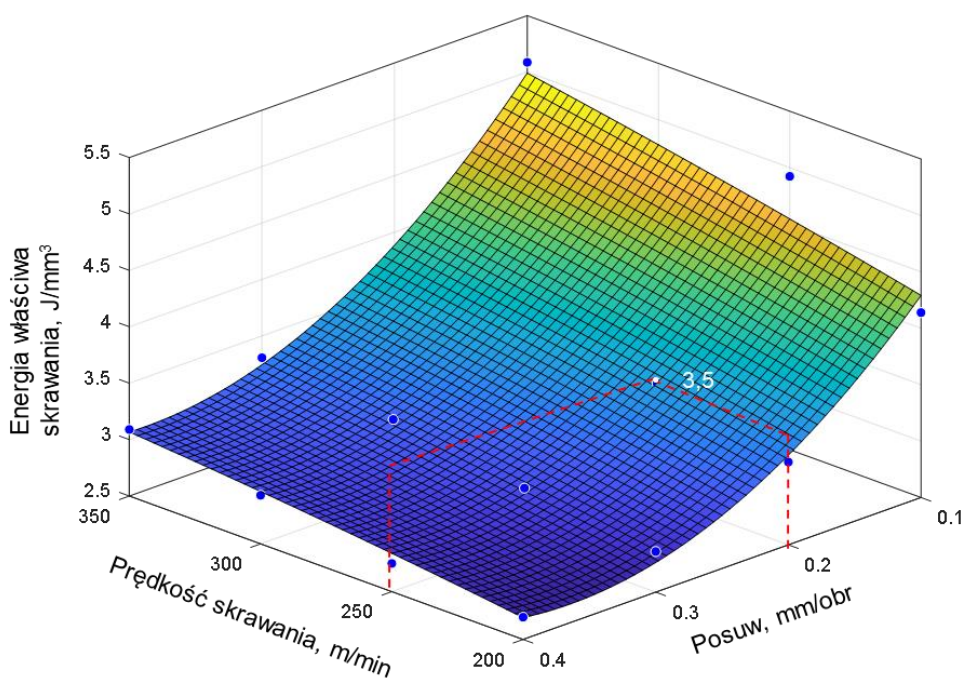
Rys. 5.26. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Równania regresji opisujące wpływ parametrów skrawania na energię właściwą całkowitą zostały wyznaczone dla trzech twardości stali i przedstawione w tabeli 5.5.

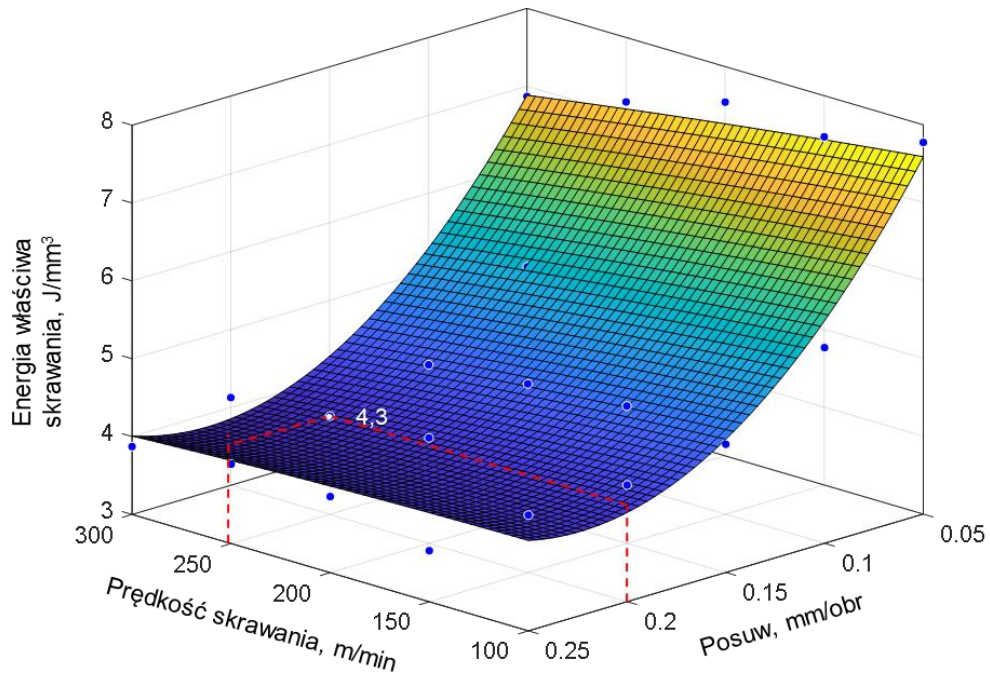
Tabela 5.5. Równania regresji dla energii właściwej całkowitej w funkcji parametrów skrawania

Twardość stali, HRC	Równanie regresji energii właściwej całkowitej, e_{ct}	R^2
20	$e_{ct} = 97,03 - 0,1974 * v_c - 311,4 * f + 0,0001943 * v_c^2 + 0,1993 * v_c * f + 349,8 * f^2$	0,988
30	$e_{ct} = 285 - 0,9382 * v_c - 1527 * f + 0,001189 * v_c^2 + 1,688 * v_c * f + 2753 * f^2$	0,960
50	$e_{ct} = 287,1 - 0,9088 * v_c - 1578 * f + 0,001168 * v_c^2 + 1,611 * v_c * f + 2925 * f^2$	0,961

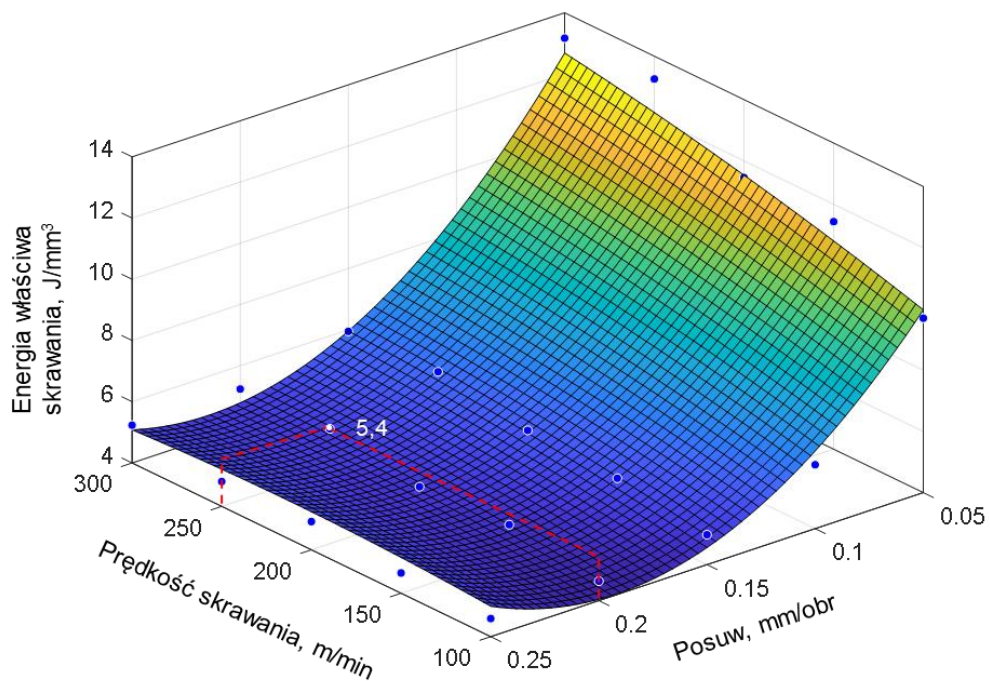
Na rys. 5.27 – 5.29 przedstawiono wpływ prędkości skrawania i posuwu na energię właściwą skrawania. Dominującym czynnikiem jest posuw, co jest szczególnie widoczne dla stali o twardości powyżej 30 HRC, gdzie wzrost wartości posuwu powoduje redukcję energii właściwej skrawania.



Rys. 5.27. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą skrawania podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.28. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą skrawania podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.29. Wpływ parametrów skrawania na energię właściwą skrawania podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

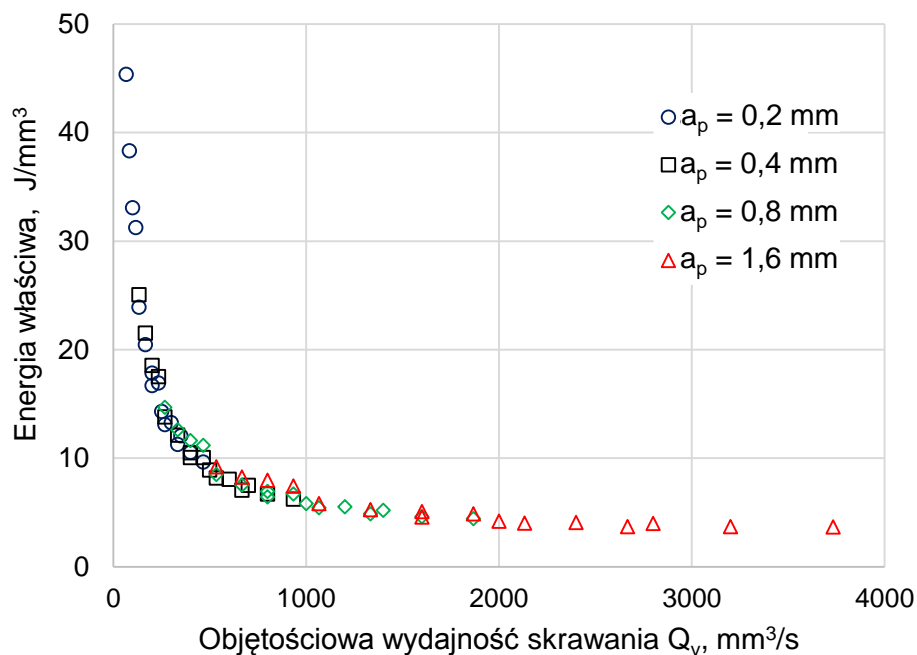
Równania regresji opisujące wpływ parametrów skrawania na energię właściwą skrawania wyznaczono dla trzech twardości stali i przedstawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Równania regresji dla energii właściwej skrawania

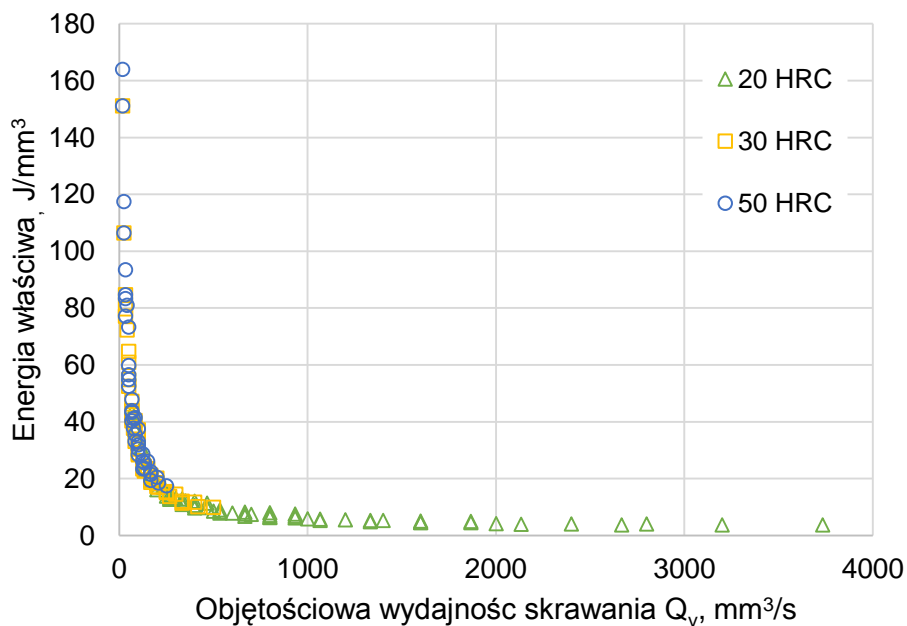
Twardość stali, HRC	Równanie regresji energii właściwej skrawania, e_c	R^2
20	$e_c = 0,9389 - 0,004078 * v_c + 7,943 * f + 0,00002809 * v_c^2 - 0,0192 * v_c * f - 4,435 * f^2$	0,893
30	$e_c = 10,24 - 0,003099 * v_c - 53,45 * f - 0,00002801 * v_c^2 + 0,01381 * v_c * f + 116,4 * f^2$	0,961
50	$e_c = 12,58 + 0,02504 * v_c - 106,1 * f - 0,0000205 * v_c^2 - 0,06562 * v_c * f + 292,6 * f^2$	0,954

Zależność energii właściwej skrawania od objętościowej wydajności skrawania dla stali o twardości 20 HRC przedstawiono na rys 5.30. Energia właściwa została zarejestrowana dla całego badanego zakresu w przedziale od 3,7 do 43,3 J/mm³. Poprzez zastosowanie zmiennych parametrów skrawania dla stali o twardości 20 HRC ($a_p = 0,2 \div 1,6$ mm; $f = 0,1 \div 0,4$ mm/obr; $v_c = 200 \div 350$ m/min) uzyskano objętościową wydajność skrawania w zakresie 66,6 ÷ 3733 mm³/s. Najwyższe wartości energii właściwej zaobserwowano dla toczenia z najmniejszą głębokością skrawania (w zakresie 9,8-43 J/mm³) natomiast wraz ze wzrostem głębokości skrawania odnotowano spadek od 3,7 do 9 J/mm³.

Porównując skrawanie stali o różnej twardości można odnotować najwyższą energię właściwą dla toczenia stali utwardzonej (50 HRC), stale o mniejszej twardości wykazują odpowiednio mniejsze wartości e_c (rys. 5.31). Wraz ze wzrostem objętościowej wydajności skrawania Q_v można zauważyć znaczący spadek energii właściwej skrawania dla wszystkich badanych materiałów.



Rys. 5.30. Zależność energii właściwej skrawania od objętościowej wydajności skrawania dla toczenia stali o twardości 20 HRC



Rys. 5.31. Zależność energii właściwej od objętościowej wydajności skrawania dla toczenia stali o twardości 20, 30 i 50 HRC

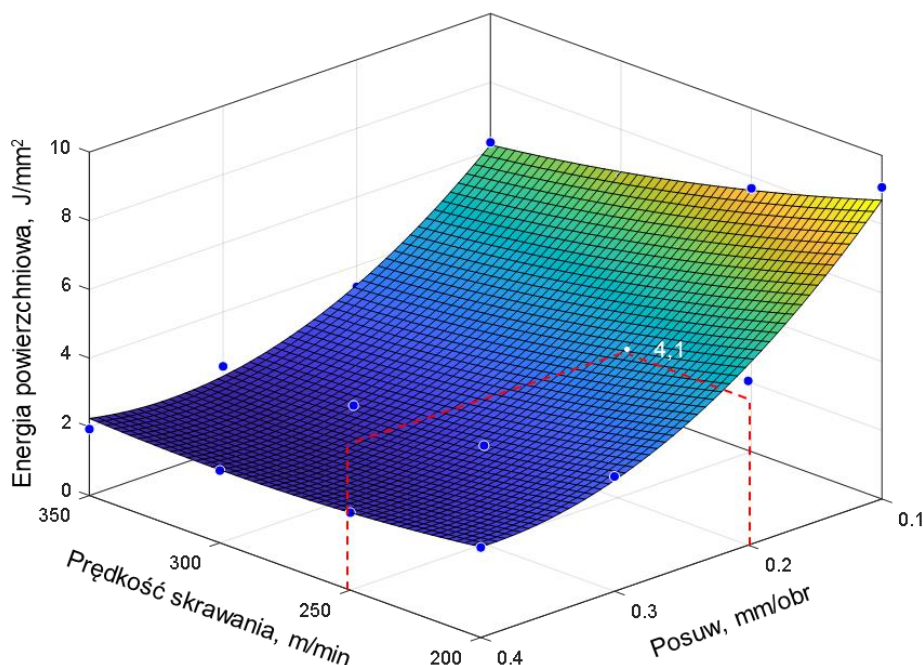
Porównując energię właściwą w funkcji wydajności objętościowej na rys. 5.31 można zauważyć znacznie wyższe wartości energii właściwej uzyskane dla stali po

hartowaniu. Wpływa na to większa twardość materiału obrabianego, ale również odmienne parametry skrawania zastosowane w toczeniu stali o twardości 20 i 50 HRC.

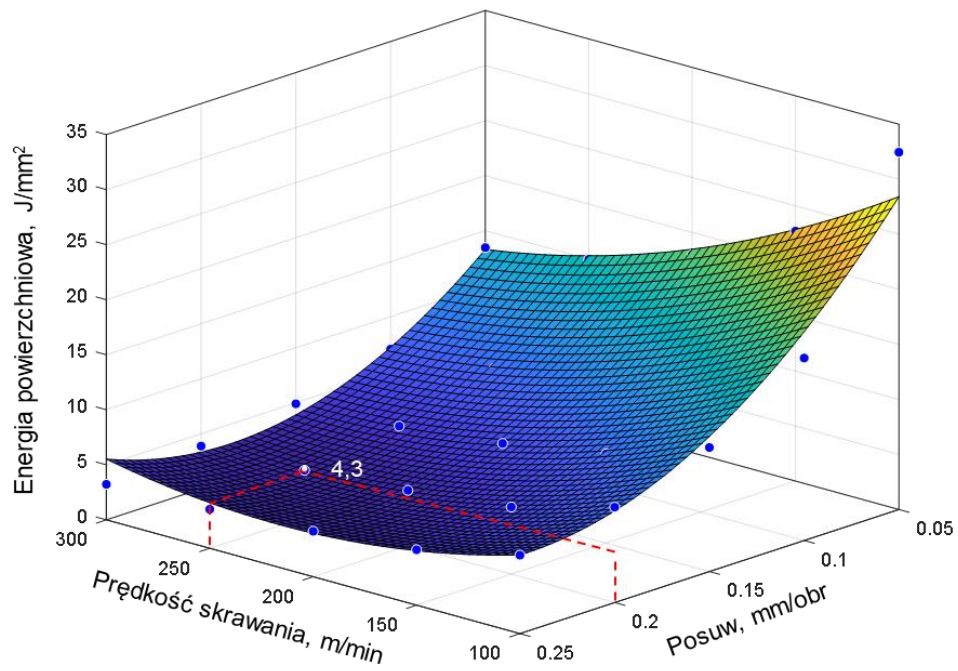
5.1.2. Energia właściwa powierzchniowa

Energia powierzchniowa jest parametrem, który odnosi się do zużycia energii jaka jest niezbędna do obrobienia jednostki powierzchni. Dla porównania energia właściwa skrawania odnosi się do objętości usuniętego materiału. Energia powierzchniowa jest przydatnym parametrem służącym do oceny w aspekcie energetycznym obróbki powierzchniowej bezwiórowej (np. nagniatania), ale także bardzo dokładnego skrawania.

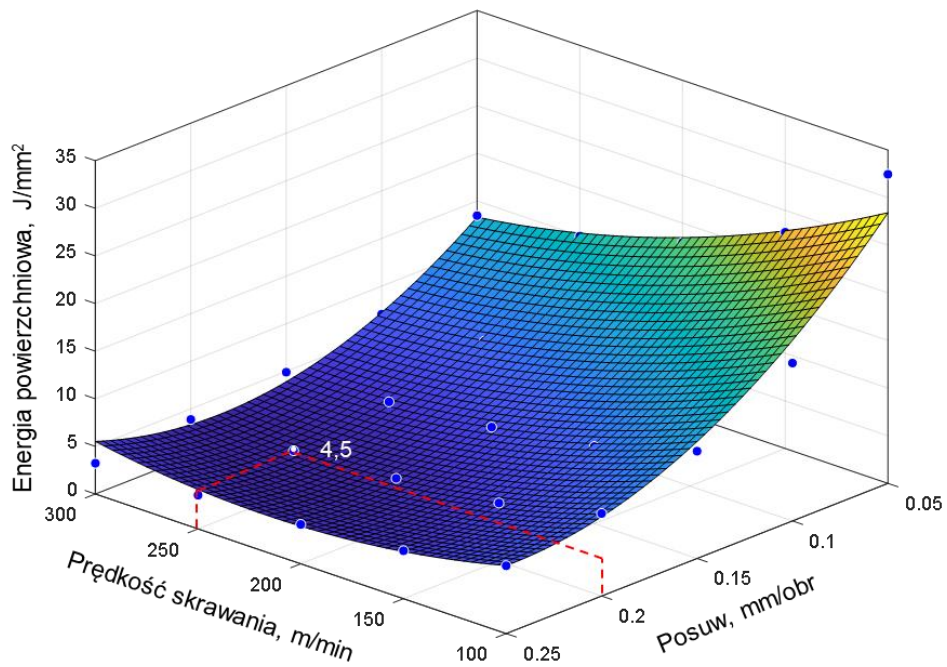
Podczas toczenia stali o różnej twardości można zauważyć, że wraz ze wzrostem twardości stali energia powierzchniowa wzrosła od 3,9 do 4,5 J/mm² (przy $a_p = 0,2$ mm, $f = 0,2$ mm/obr, $v_c = 250$ m/min). Dla wszystkich badanych stali przy zmiennych parametrach skrawania można zauważyć, że wraz ze wzrostem posuwu energia powierzchniowa jest redukowana (rys. 5.32 ÷ 5.34). Wyższa prędkość skrawania również prowadzi do redukcji energii powierzchniowej, głównie dla mniejszych wartości posuwu.



Rys. 5.32. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.33. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



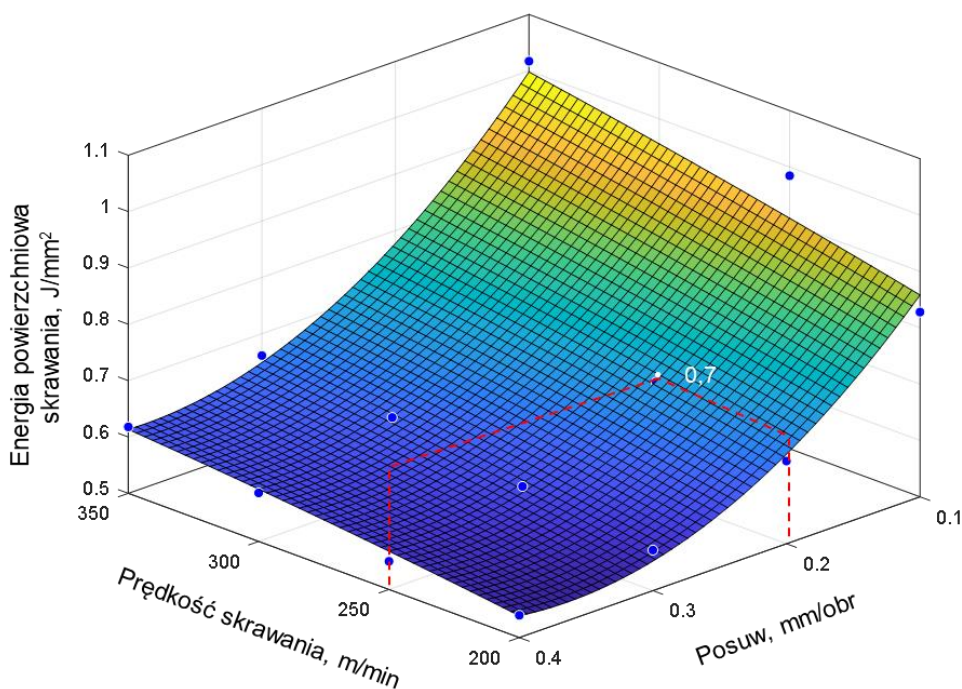
Rys. 5.34. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Równania regresji opisujące wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową toczenia zostały wyznaczone dla trzech twardości stali i przedstawione w tabeli 5.7.

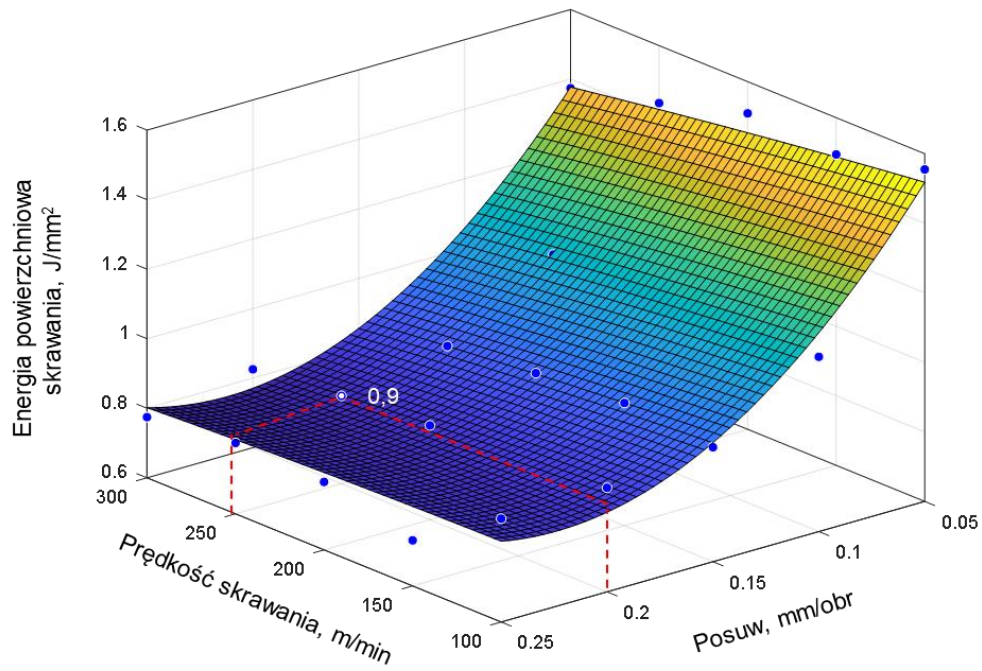
Tabela 5.7. Równania regresji dla energii powierzchniowej całkowitej e_{pt}

Twardość stali, HRC	Równanie regresji dla energii powierzchniowej całkowitej, e_{pt}	R^2
20	$e_{pt} = 19,41 - 0,03948 * v_c - 62,28 * f + 0,00003887 * v_c^2 + 0,03985 * v_c * f + 69,96 * f^2$	0,988
30	$e_{pt} = 57,01 - 0,1876 * v_c - 305,3 * f + 0,0002378 * v_c^2 + 0,3376 * v_c * f + 550,6 * f^2$	0,960
50	$e_{pt} = 57,41 - 0,1818 * v_c - 315,6 * f + 0,0002335 * v_c^2 + 0,3222 * v_c * f + 585,1 * f^2$	0,961

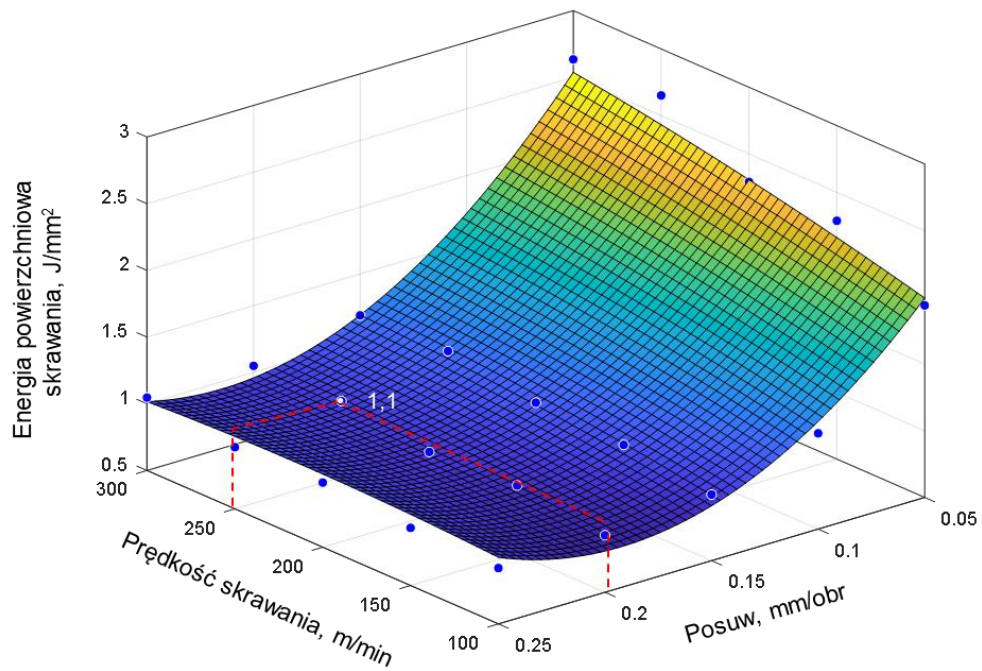
Zależność energii powierzchniowej skrawania od parametrów technologicznych dla stali o odmiennej twardości przedstawiono na rys. 5.35 – 5.37. Zasadniczo im niższa wartość posuwu tym większa wartość energii właściwej powierzchniowej, gdzie dla stali o twardości 30 i 50 HRC dla posuwu $f=0,2$ i $0,25$ mm/obr uzyskano najniższe wartości.



Rys. 5.35. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową skrawania podczas toczenia stali o twardości 20 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.36. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową skrawania podczas toczenia stali o twardości 30 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm



Rys. 5.37. Wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową skrawania podczas toczenia stali o twardości 50 HRC dla głębokości skrawania $a_p = 0,2$ mm

Równania regresji opisujące wpływ prędkości skrawania oraz posuwu na energię powierzchniową skrawania podczas toczenia zostały wyznaczone dla trzech twardości stali i przedstawione w tabeli 5.8.

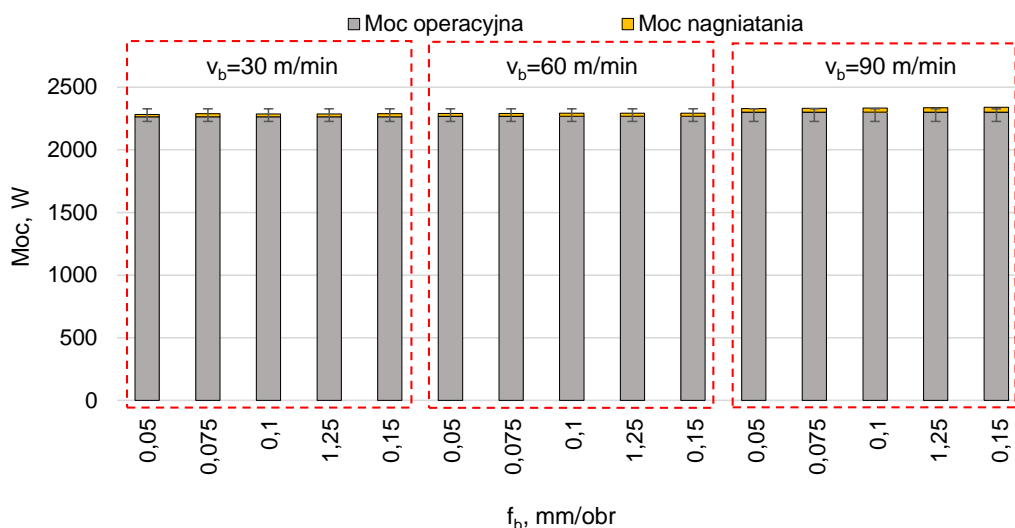
Tabela 5.8. Równania regresji dla energii powierzchniowej skrawania

Twardość stali, HRC	Równanie regresji dla energii powierzchniowej skrawania, e_{pc}	R^2
20	$e_{pc} = 0,1878 - 0,0008156 * v_c + 1,589 * f - 0,0008156 * v_c^2 - 0,003841 * v_c * f - 0,8869 * f^2$	0,893
30	$e_{pc} = 2,048 - 0,0006198 * v_c - 10,69 * f - 0,0000005602 * v_c^2 + 0,002762 * v_c * f + 23,28 * f^2$	0,961
50	$e_{pc} = 2,515 + 0,005008 * v_c - 21,22 * f - 0,0000041 * v_c^2 - 0,01312 * v_c * f + 58,52 * f^2$	0,954

5.2. Charakterystyki energetyczne nagniatania

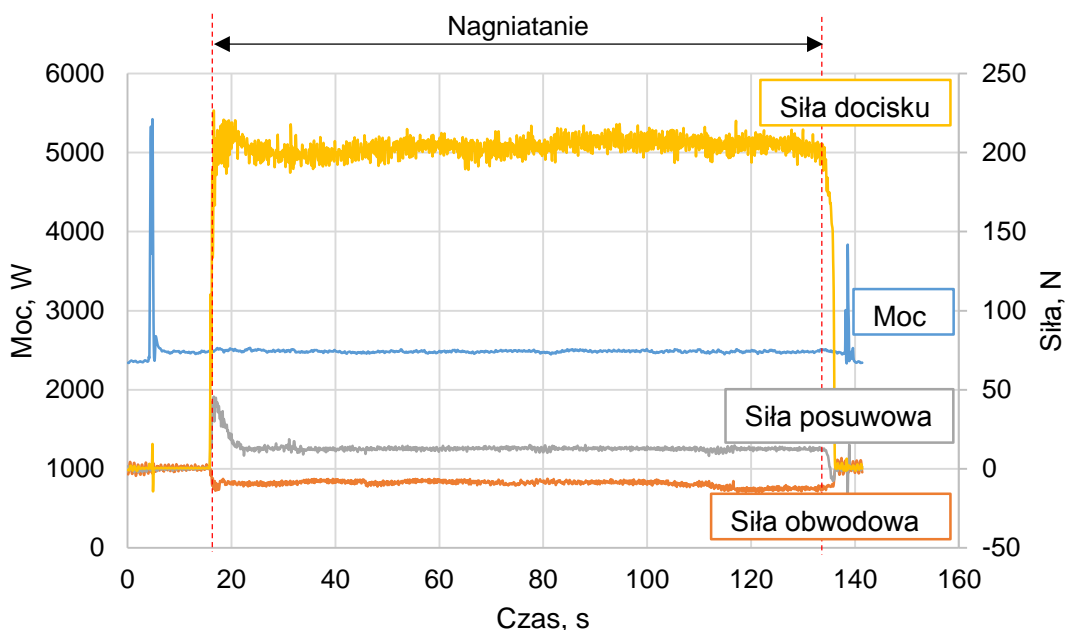
W pracy podjęto analizę energochłonności nagniatania dla materiałów w stanie wyjściowym (po normalizowaniu), jak również po hartowaniu i po odpuszczaniu średnim i niskim. Przewidywalnie, rodzaj materiału obrabianego ma marginalny wpływ na moc i energię nagniatania, dlatego ze względu na bardzo zbliżone wyniki pomiarów mocy i energii w pracy przedstawiono uśrednione wyniki dla jednej stali (rys. 5.38).

W przypadku nagniatania moc operacyjna stanowi dominujący składnik mocy całkowitej. Moc nagniatania dla wszystkich badanych przypadków ($v_b = 30 \div 90$ m/min, $f_b = 0,05 \div 0,15$ mm/obr) stanowi niewielki składnik zawierający się w przedziale 1÷2% (rys. 5.38). Niewielki udział mocy nagniatania może być wynikiem stosowania niższej prędkości nagniatania w porównaniu do toczenia, jak również braku sił związanych z dekohezją materiału. Moc całkowita zawiera się w przedziale 2283 ÷ 2340W dla całego badanego zakresu parametrów skrawania. Podczas nagniatania parametrem mającym znaczący wpływ na moc jest prędkość nagniatania, natomiast posuw oraz siła docisku mają minimalny wpływ na moc.



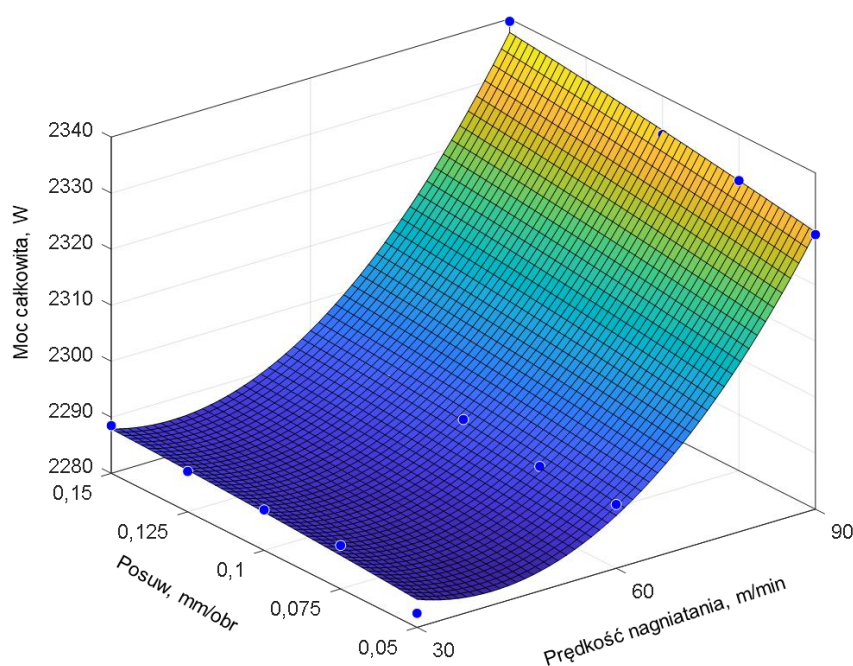
Rys. 5.38. Wpływ parametrów nagniatania na moc operacyjną oraz moc nagniatania

Siły rejestrowane podczas nagniatania to siła docisku, siła posuwowa oraz siła obwodowa. Dominująca jest siła docisku stosowana w zakresie kilkunastu do kilkuset Newtonów. Siła posuwowa i obwodowa są o znacznie mniejszej wartości. Dla parametrów nagniatania $v_b = 90$ m/min; $f = 0,1$ mm/obr; $F = 200$ N zmierzono około 10 N dla siły obwodowej oraz około 12 N dla siły posuwowej (rys. 5.39). Wartości te wskazują na niewielkie obciążenie obrabiarki, co wpływa na niewielki pobór mocy przez maszynę. Dlatego wpływ takich parametrów jak posuw i siła docisku ma niewielki wpływ na mierzoną wartość mocy.



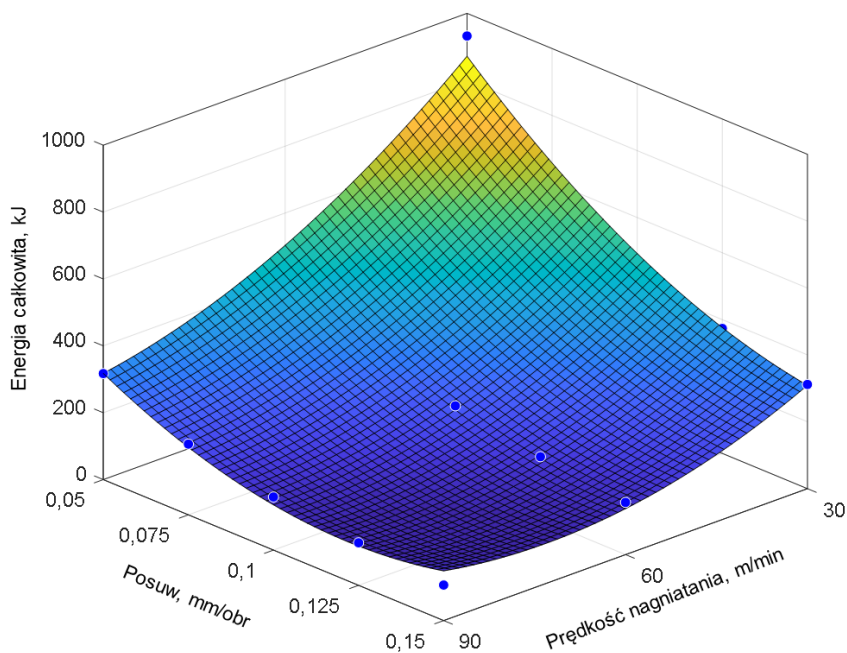
Rys. 5.39. Przebieg zmian mocy oraz sił nagniatania ($v_b = 90$ m/min; $f = 0,1$ mm/obr; $F = 200$ N)

Podczas nagniatania stali można zauważyć minimalny wzrost mocy całkowitej wraz ze wzrostem posuwu, natomiast większy wpływ następuje wraz ze wzrostem prędkości nagniatania i praktycznie jest to główny czynnik determinujący zmiany mocy pobieranej przez obrabiarkę. Moc nagniatania stanowiąca składnik mocy całkowitej wynosi zaledwie kilka do kilkunastu W. Stanowi to mało znaczący składnik mocy całkowitej. Przyrost mocy całkowitej wywołany wzrostem prędkości nagniatania ma praktycznie liniowy charakter (rys. 5.40).

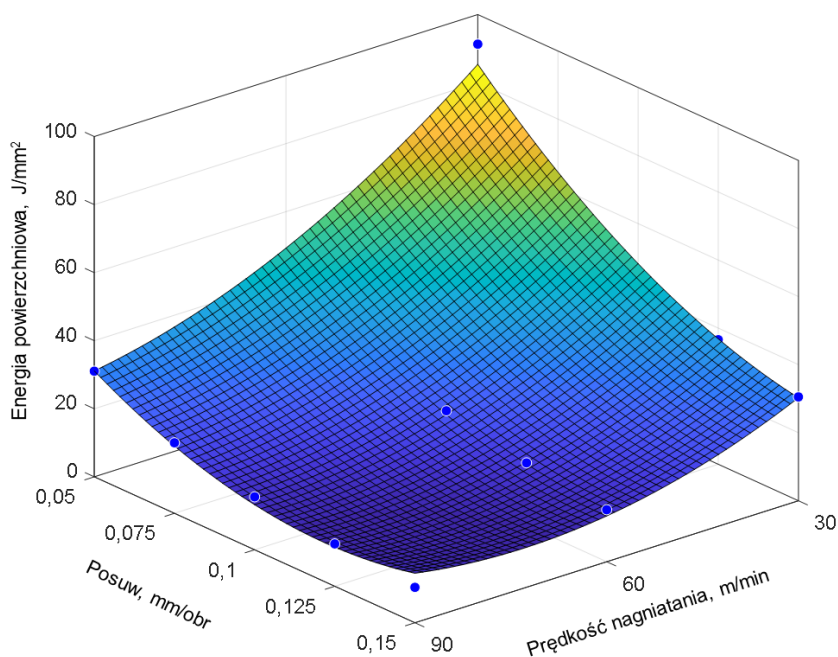


Rys. 5.40. Wpływ parametrów nagniatania na moc całkowitą

Energia całkowita nagniatania maleje wraz ze wzrostem parametrów technologicznych obróbki praktycznie w całym badanym zakresie. Energia została zredukowana z 933 do 108 kJ przy $v_b = 90$ m/min i $f_b = 0,15$ mm/obr (rys. 5.41). Relatywnie niska prędkość procesu nagniatania (w porównaniu do toczenia) powoduje wydłużenie czasu obróbki generując wysoką energochłonność.



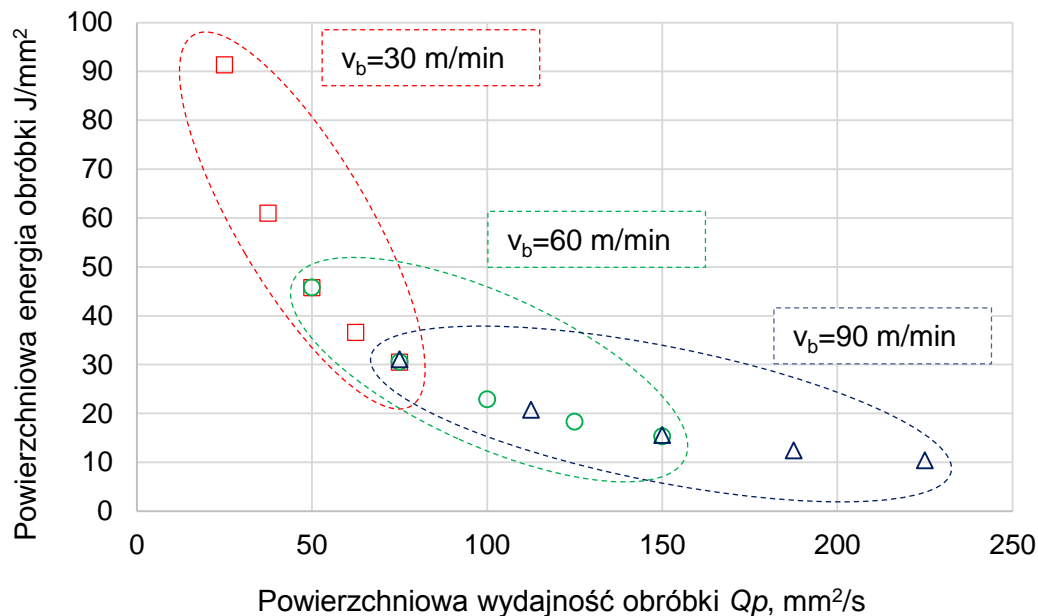
Rys. 5.41. Wpływ parametrów nagniatania na energię całkowitą



Rys. 5.42. Wpływ parametrów nagniatania na energię powierzchniową

Na powierzchniową energię obróbki największy wpływ ma prędkość nagniatania oraz posuw (rys. 5.42). Zwiększenie prędkości nagniatania oraz posuwu zwiększa powierzchniową wydajność obróbki, jednocześnie redukując powierzchniową energię obróbki. Największą wartość powierzchniowej energii obróbki wynoszącą $91,3 \text{ J/mm}^2$

odnotowano dla $v_b = 30$ m/min i $f_b = 0,05$ mm/obr (rys. 5.43). Najniższa odnotowana wartość energii powierzchniowej wyniosła $10,4$ J/mm² dla $v_b = 90$ m/min i $f_b = 0,15$ mm/obr. Należy zauważyć, że zwiększenie prędkości nagniatania z 30 do 90 m/min powoduje trzykrotną redukcję wartości energii powierzchniowej.

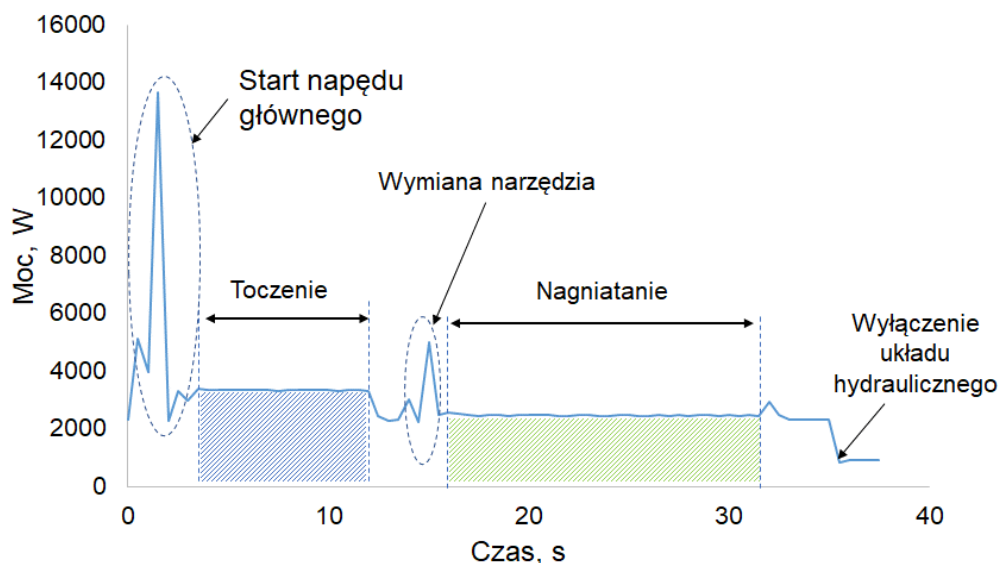


Rys. 5.43. Powierchniowa energia obróbki w funkcji powierchniowej wydajności obróbki dla nagniatania z parametrami $v_b = 30 \div 90$ m/min; $f_b = 0,05 \div 0,15$ mm/obr

5.3. Charakterystyki energetyczne po obróbce sekwencyjnej z jednoprzęściowym nagniataniem

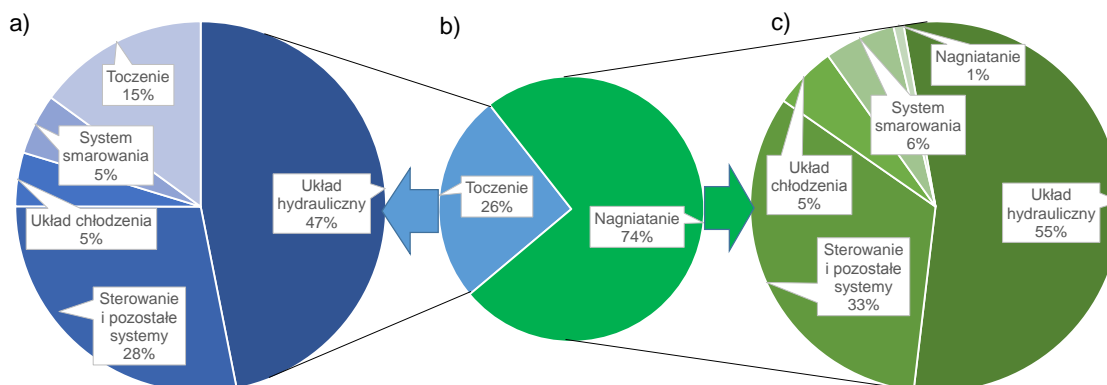
Na rys. 5.44 przedstawiono przebieg zmian mocy całkowitej dla obróbki sekwencyjnej. Charakterystyczne piki odnotowano dla rozruchu wrzeciona oraz wymiany narzędzia. Dla toczenia odnotowano wyraźnie wyższą wartość mocy niż dla operacji nagniatania. Dla toczenia dominującymi składnikami wpływającymi na moc całkowitą są przede wszystkim parametry technologiczne oraz właściwości materiału obrabianego. Analizując moc całkowitą podczas nagniatania można stwierdzić, że parametry technologiczne wpływają w znacznie mniejszym stopniu niż podczas obróbki ubytkowej, z powodu stosowania znacznie mniejszej prędkości procesu. Nie dochodzi również do dekohezji materiału, a jedynie do plastycznego, powierchniowego

odkształcenia materiału obrabianego wskutek oddziaływania kulki narzędzia nagniatającego, wywołującego nieporównywalnie mniejszy opór dla napędu wrzeciona.



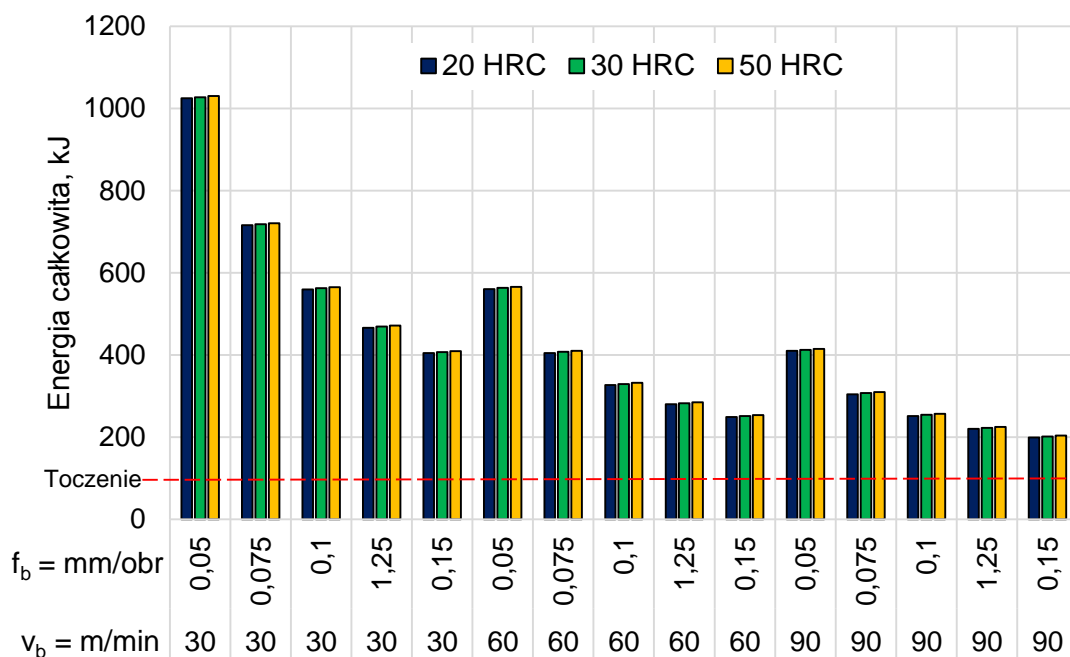
Rys. 5.44. Profil przebiegu mocy dla obróbki sekwencyjnej (T+N1)

Analizując rozkład energii dla obróbki sekwencyjnej można zauważyć, że toczenie wstępne ($v_c = 200$ m./min $a_p = 0,2$ mm i $f = 0,1$ mm/obr) poprzedzające naganianie zużywa 26 % energii (rys. 5.45b). Mimo iż sam proces nagniatania nie obciąża nadmiernie obrabiarki to sumarycznie wraz z innymi odbiornikami energii jest dominującym czynnikiem w obróbce sekwencyjnej (rys. 5.45c). Głównym składnikiem jest działanie układu hydraulicznego, a system sterowania oraz pozostałe składniki nie ujęte szczegółowo są również istotnymi odbiorcami energii. Kilka procent zużycia odnotowano dla składników takich jak system smarowania prowadnic oraz system chłodzenia, które działają stale lub okresowo. Dane te przedstawiono na rys. 5.45.



Rys. 5.45. Rozkład energii całkowitej dla: a) toczenia wstępnego (T), b) toczenia i nagniatania (T+N1), c) nagniatania (N)

Wpływ prędkości nagniatania oraz posuwu nagniatania na zużycie energii w procesie sekwencyjnym z toczeniem wstępnym ($v_c = 200$ m./min $a_p = 0,2$ mm i $f = 0,1$ mm/obr) oraz jednym przejściem nagniatającym ilustruje rys. 5.46. Głównymi czynnikami wpływającymi na sumaryczną energię całkowitą są parametry technologiczne nagniatania. Twardość materiału obrabianego ma niewielki wpływ na wartość energii całkowitej obróbki sekwencyjnej, różnice wynikają z poprzedzającej obróbki toczeniem gdzie stan materiału obrabianego ma znaczący wpływ. Na rysunku 5.46 zaznaczono wartość energii całkowitej uzyskaną po toczeniu wstępnym, która wynosiła poniżej 100 kJ dla wszystkich twardości stali. Zwraca uwagę fakt, że ze względu na oszczędność energii należy stosować możliwie wysoką prędkość nagniatania i duży posuw.



Rys. 5.46. Wpływ parametrów technologicznych dla toczenia i jednoprzęściowego nagniatania na energię całkowitą

5.4. Charakterystyki energetyczne po obróbce sekwencyjnej z dwuprzęściowym nagniataniem

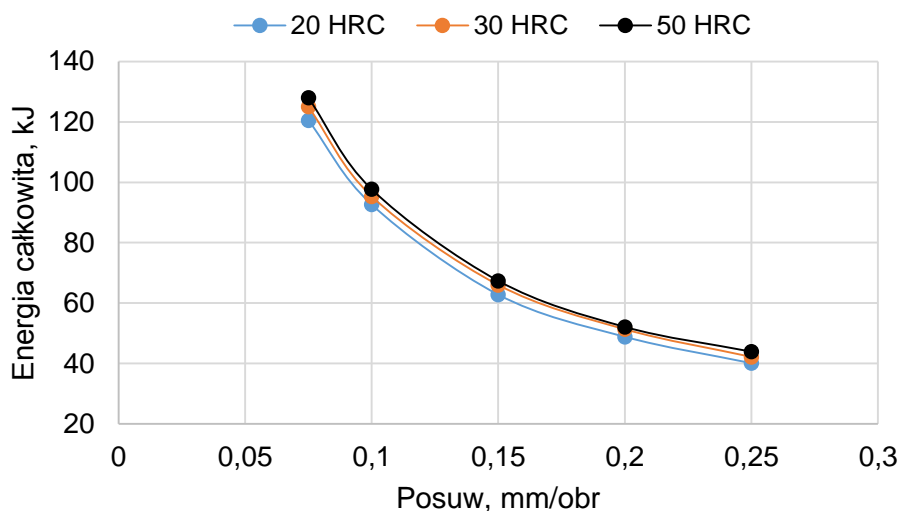
W pracy podjęto próbę wyznaczenia nowych charakterystyk energetycznych dla sekwencyjnego toczenia i nagniatania wieloprzęściowego. Przed nagniataniem toczono

powierzchnię ze stałą prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min i stałą głębokością skrawania $a_p = 0,2$ mm oraz ze zmiennym posuwem $f = 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ mm/obr dla wszystkich materiałów obrabianych (tabela 5.9). W kolejnym etapie materiał nagniatano ze stałą prędkością nagniatania oraz stałym posuwem ($v_b = 60$ m/min, $f_b = 0,1$ mm/obr), ale stosując zmienną siłę docisku kulki nagniatającej dla każdego materiału obrabianego.

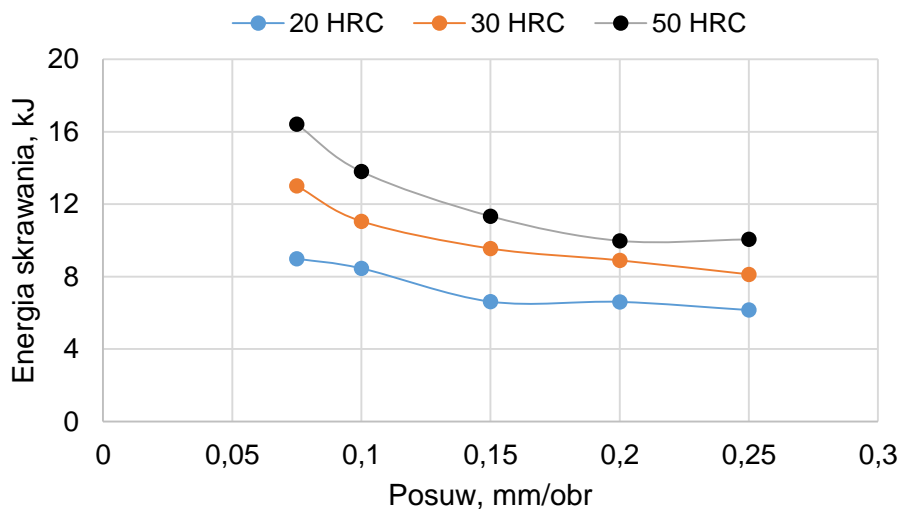
Tabela 5.9. Parametry obróbki sekwencyjnej wieloprzejsiowej

Toczenie (T)	Nagniatanie jednorzejsiowe (T+N1)	Nagniatanie dwuprzejsiowe (T+N1+N2)
$v_c = 200$ m/min $a_p = 0,2$ mm $f = 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ mm/obr	$v_b = 60$ m/min $f_b = 0,1$ mm/obr	$v_b = 60$ m/min $f_b = 0,1$ mm/obr

Podczas toczenia wstępnego poprzedzającego nagniatanie zarejestrowano energię dla zmiennego posuwu od 40 do 121 kJ dla stali o twardości 20 HRC, od 42 do 125 kJ dla stali o twardości 30 HRC oraz od 44 do 128 kJ dla stali o twardości 50 HRC (rys. 5.47). Dane te wskazują na prawie trzykrotną redukcję energii z powodu wzrostu posuwu. Wartości energii całkowitej są zbliżone dla wszystkich twardości materiału obrabianego. Analizując zużycie energii obróbki można zauważyć znaczne różnice pomiędzy materiałami obrabianymi od 9 kJ do 16,4 kJ dla stali 30 i 50 HRC dla $f = 0,075$ mm/obr (rys. 5.48).

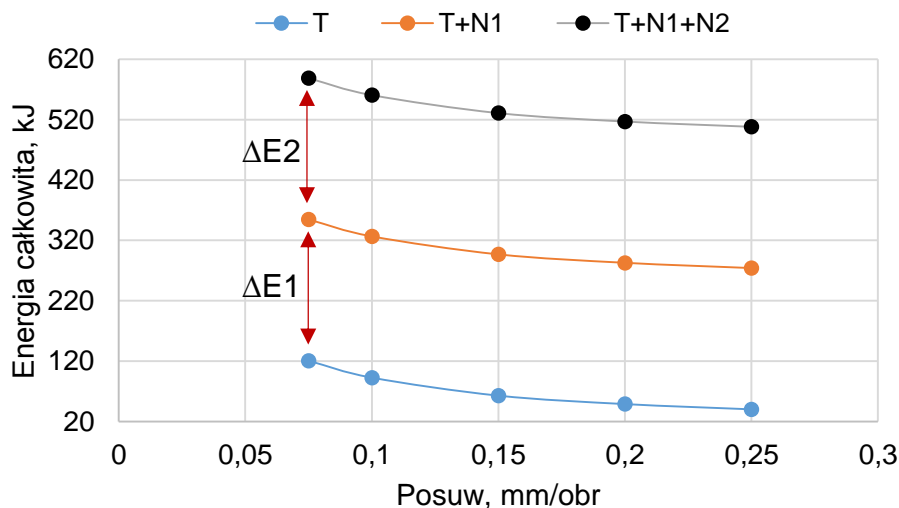


Rys. 5.47. Energia całkowita w toczeniu stali o twardości 20, 30 i 50 HRC ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm)

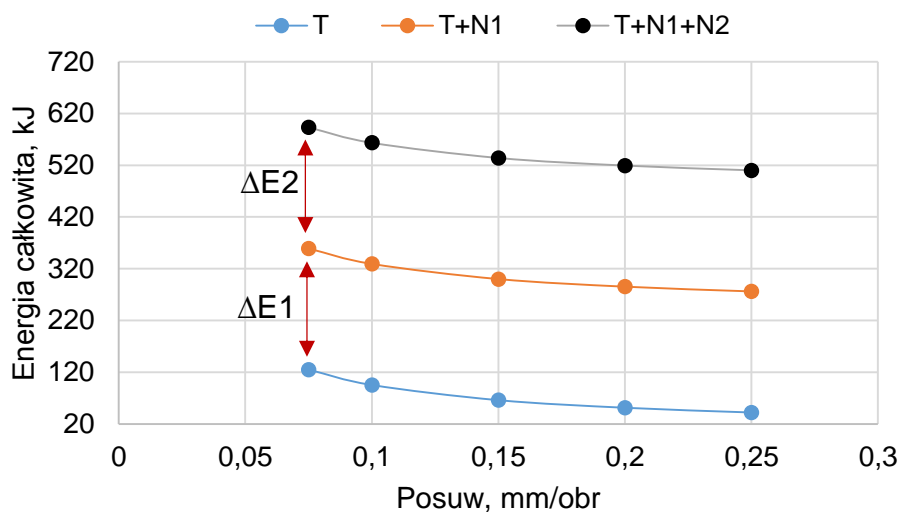


Rys. 5.48. Energia skrawania w toczeniu stali o twardości 20, 30 i 50 HRC
($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm)

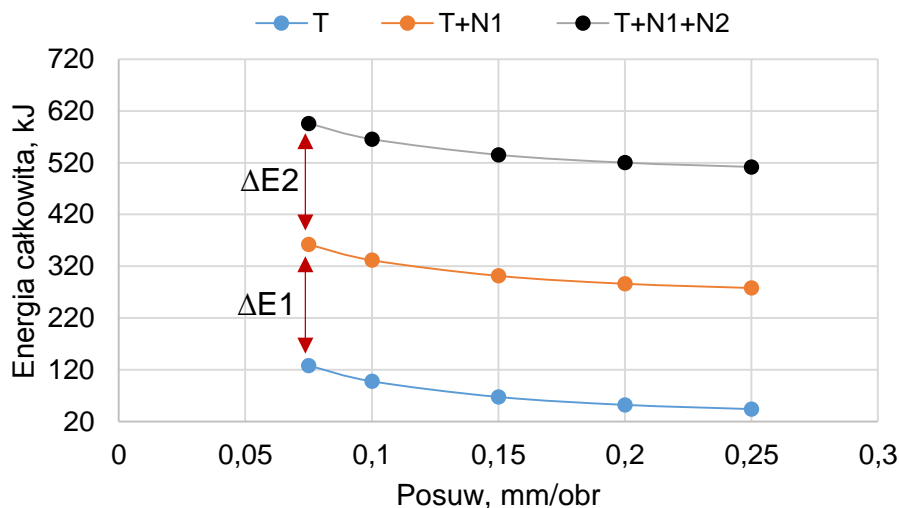
Analizując wyniki pomiaru energii całkowitej dla sekwencyjnego toczenia i nagniatania wieloprześciowego, można zauważyć znaczący wzrost zużycia energii podczas dodatkowych operacji nagniatania. Jednoprześciowe nagniatanie spowodowało wzrost energii od około 270 do 360 kJ dla całego badanego zakresu posuwu, natomiast kolejne przejście nagniatania spowodowało dodatkowo wzrost zużycia energii do około $500 \div 600$ kJ (rys. 5.49). Różnice w wyznaczonej energii całkowitej pomiędzy materiałami obrabianymi o różnej twardości są minimalne i uzależnione w głównej mierze od zastosowanego posuwu podczas toczenia, natomiast dominującym czynnikiem jest strategia nagniatania (ilość przejść). Zwiększenie energii przez dodatkowe operacje nagniatania przedstawiono jako $\Delta E1$ i $\Delta E2$. Podczas każdego dodatkowego przejścia nagniatania nastąpił wzrost energii o około 230 kJ. Analogiczne porównania dla trzech wariantów obróbki stali o wyższej twardości przedstawiono na rys. 5.50 i 5.51.



Rys. 5.49 Energia całkowita toczenia (T) i nagniatania jednoprzęściowego (T+N1) oraz nagniatania dwuprzęściowego (T+N1+N2) stali o twardości 20 HRC ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm; $v_b = 60$ m/min $f_b = 0,1$ mm/obr)



Rys. 5.50. Energia całkowita w toczeniu (T) i nagniataniu jednoprzęściowym (T+N1) oraz nagniataniu dwuprzęściowym (T+N1+N2) dla stali o twardości 30 HRC ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm; $v_b = 60$ m/min $f_b = 0,1$ mm/obr)



Rys. 5.51. Energia całkowita w toczeniu (T) i nagniataniu jednoprzęściowym (T+N1) oraz nagniataniu dwuprzęściowym (T+N1+N2) dla stali o twardości 50 HRC ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm; $v_b = 60$ m/min $f_b = 0,1$ mm/obr)

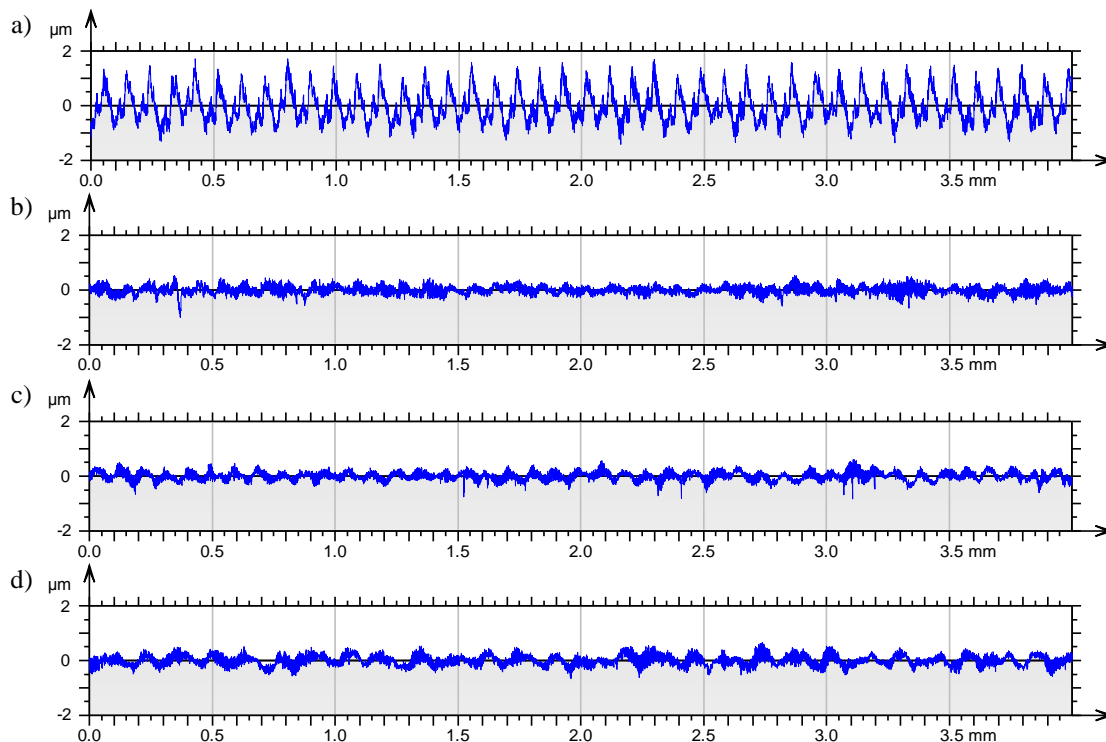
5.5. Chropowość powierzchni po obróbce sekwencyjnej

Jednym z głównych celów nagniatania jest redukcja chropowości powierzchni, ponieważ w operacji nagniatania tworzy się nową powierzchnię o zredukowanej wysokości wierzchołków mikronierówności. W celu scharakteryzowania powierzchni po obróbce sekwencyjnej użyto pionowych parametrów chropowości, amplitudowych parametrów chropowości, jak i parametrów związanych z krzywą udziału materiałowego.

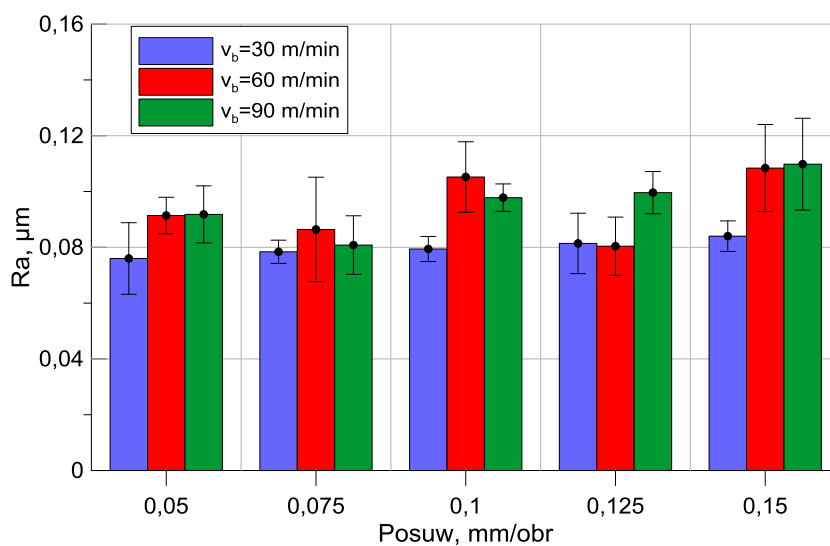
5.5.1. Stan geometryczny powierzchni po obróbce sekwencyjnej z jednoprzęściowym nagniataniem

Uzyskane powierzchnie po sekwencyjnym toczeniu oraz nagniataniu wykazują znaczną redukcję chropowości (rys. 5.52, 5.55, 5.58). Analizując parametr R_a dla stali o twardości około 20 HRC można zauważyć, że dla całego badanego przedziału wartości parametrów technologicznych uzyskano wartości R_a w przedziale 0,08 do 0,11 μm . Najmniejsze wartości uzyskano dla prędkości nagniatania $v_b=30$ m/min. Po toczeniu wstępnym uzyskano wartość parametru R_a około 0,44 μm , co wskazuje na redukcję parametru R_a o minimum 75% dla całego zakresu posuwu (rys. 5.53). Na rysunku 5.52

przedstawiono profile uzyskane po wstępnym toczeniu (a) oraz po sekwencyjnym nagniataniu ze zmiennym posuwem (b-d). Nowo wytworzona powierzchnia (po nagniataniu) charakteryzuje się niższą chropowatością o tępo zakończonych pikach.

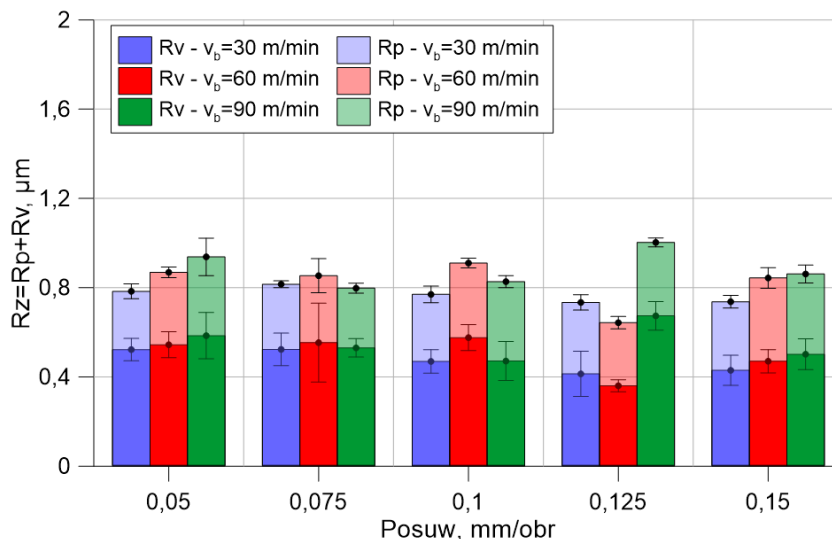


Rys. 5.52. Profil powierzchni stali o twardości 20 HRC: a) po toczeniu z parametrami $v_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr oraz $a_p = 0,2$ mm; oraz po nagniataniu jednoprzęciowym z prędkością $v_n = 60$ m/min i zmiennym posuwem: b) $f_n = 0,05$ mm/obr, c) $f_n = 0,1$ mm/obr, d) $f_n = 0,15$ mm/obr



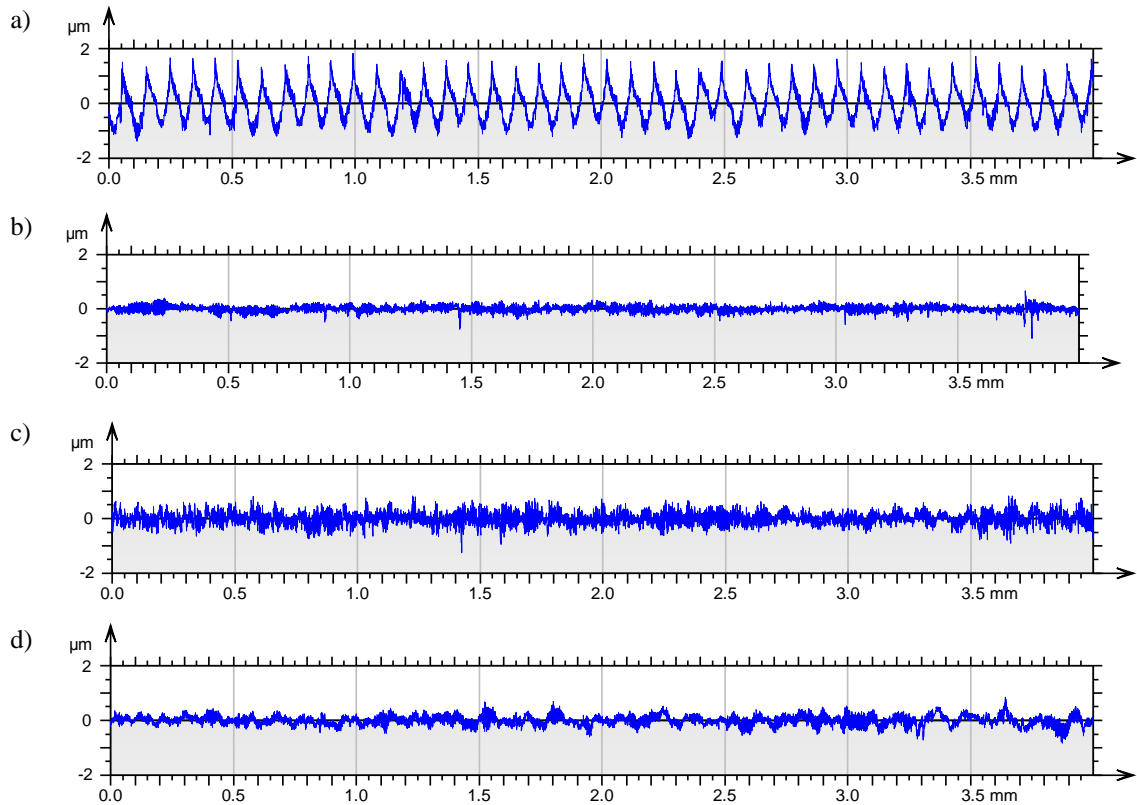
Rys. 5.53. Wpływ parametrów nagniatania na parametry chropowatości Ra dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 20 HRC

Analizując pionowe parametry chropowatości, można zauważyć znaczne różnice pomiędzy wartościami parametrów R_p i R_v . Mniejsze wartości pików (R_p) są charakterystyczne dla powierzchni poddanych nagniataniu, co odnotowano dla wszystkich badanych przypadków. Analizując parametr R_z można zauważyć, że zmierzone wartości mieszczą się w przedziale od $0,64 \mu\text{m}$ do $0,99 \mu\text{m}$. Wartość parametru R_z poniżej $1 \mu\text{m}$ jest charakterystyczna dla obróbki dokładnej [22] (rys. 5.54).



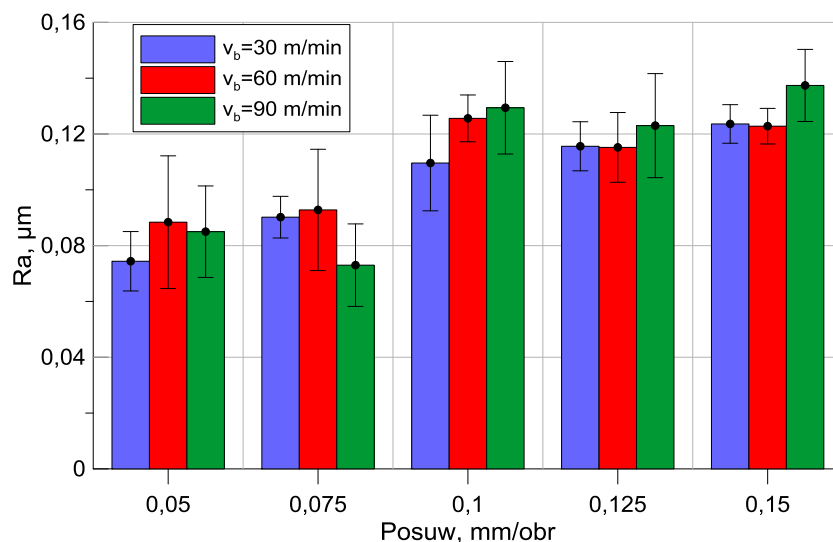
Rys. 5.54. Wpływ parametrów nagniatania na parametry chropowatości R_z (R_p+R_v) dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 20 HRC

Po toczeniu wstępnym stali o twardości 30 HRC z parametrami $v_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr oraz $a_p = 0,2$ mm uzyskano profil powierzchni jak na rys. 5.55a oraz $R_a = 0,54 \mu\text{m}$, $R_v = 1,17 \mu\text{m}$, $R_p = 1,57$, $R_z = 2,74 \mu\text{m}$. Przykładowe profile chropowatości po nagniataniu jednoprzęściowym stali o twardości 30 HRC ze zmiennym posuwem i prędkością nagniatania $v_b = 60$ m/min przedstawiono na rys. 5.55a,b,c.



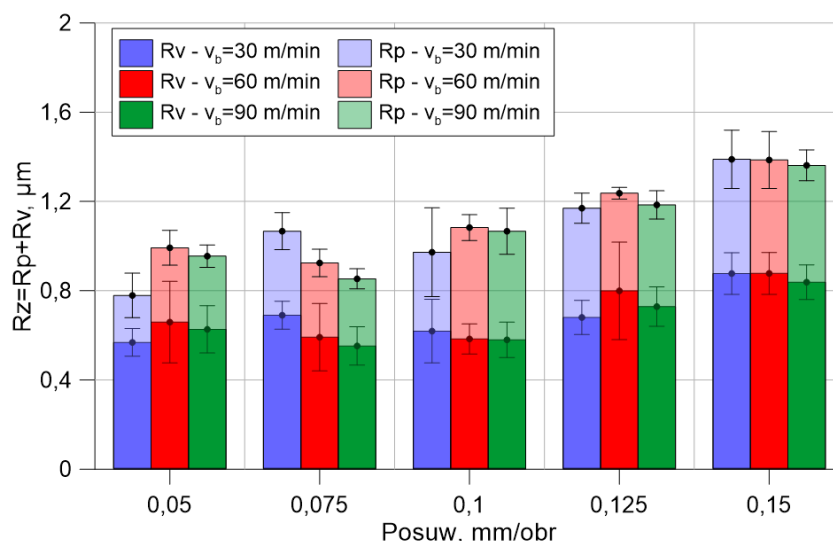
Rys. 5.55. Profil powierzchni stali o twardości 30 HRC: a) po toczeniu z parametrami $v_c = 200$ m/min, $f = 0,1$ mm/obr oraz $a_p = 0,2$ mm; oraz po nagniataniu jednoprzęściowym z prędkością $v_n = 60$ m/min i zmiennym posuwem: b) $f_n = 0,05$ mm/obr, c) $f_n = 0,1$ mm/obr, d) $f_n = 0,15$ mm/obr

Analizując otrzymane wartości średniej arytmetycznej rzędnych profilu (Ra) na rys. 5.56 można zauważyć najmniejszą wartość Ra dla posuwu $f_b = 0,075$ mm/obr i prędkości $v_b = 90$ m/min wynoszącą $0,073$ μm oraz dla $f_b = 0,05$ mm/obr i $v_b = 30$ m/min odpowiednio $0,074$ μm . Powyżej wartości posuwu $f_b = 0,1$ m/min dla wszystkich prędkości v_b odnotowano wzrost Ra powyżej $0,1$ μm . Największą wartość parametru Ra odnotowano dla $f_b = 0,15$ mm/obr i $v_b = 90$ m/min równą $0,14$ μm (rys. 5.56).



Rys. 5.56. Wpływ parametrów nagniatania na parametr chropowatości R_a dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 30 HRC

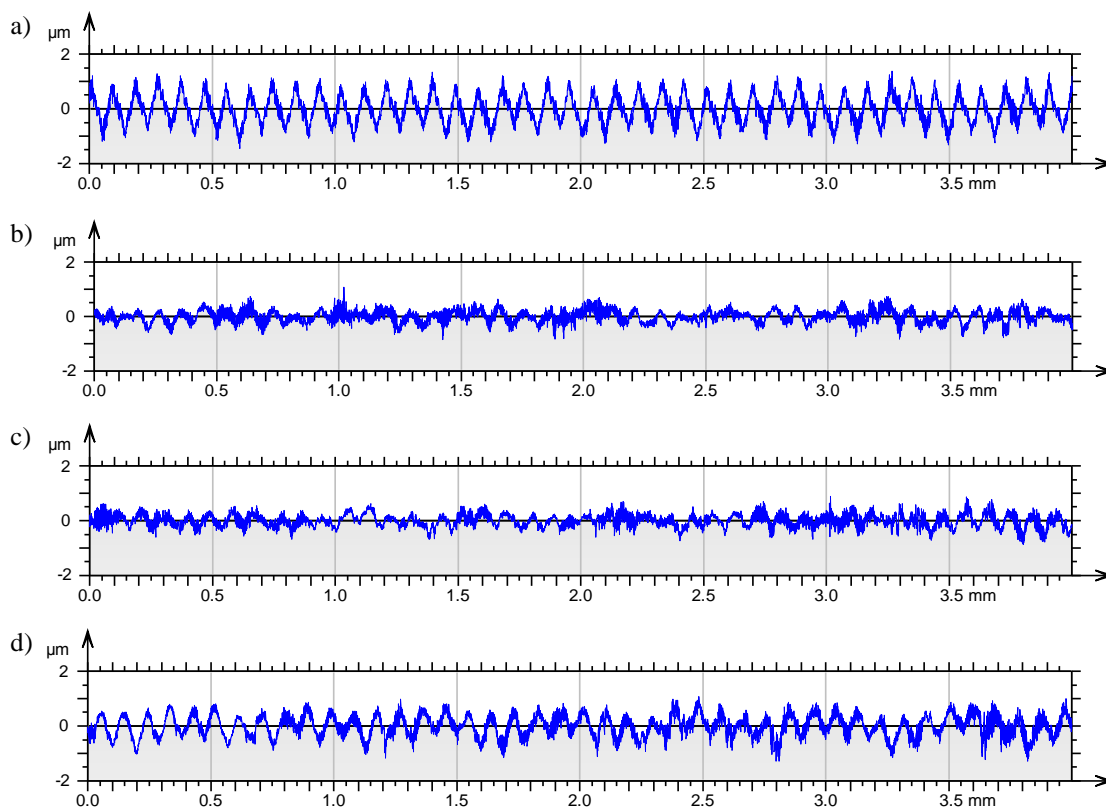
Analizując zmiany pionowych parametrów chropowatości po sekwencyjnym toczeniu i nagniataniu stali o twardości 30 HRC można zauważyć znaczną redukcję parametru R_z . Z wyjściowej wartości po toczeniu wynoszącej 2,74 μm zredukowano ją po nagniataniu do minimalnej wartości 0,78 μm dla $v_b=30$ m/min i $f_b=0,05$ mm/obr i maksymalnej wartości 1,39 μm dla $v_b=30$ m/min $f_b=0,15$ mm/obr (rys. 5.57).



Rys. 5.57. Wpływ parametrów nagniatania na parametry chropowatości R_z (R_p+R_v) dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 30 HRC

Obróbka sekwencyjna hartowanej stali o twardości około 50 HRC obejmuje toczenie ostrzem z CBN z parametrami $v_c=200$ m/min, $f=0,1$ mm/obr oraz $a_p=0,2$ mm. Po toczeniu uzyskano średnie wartości parametrów chropowatości:

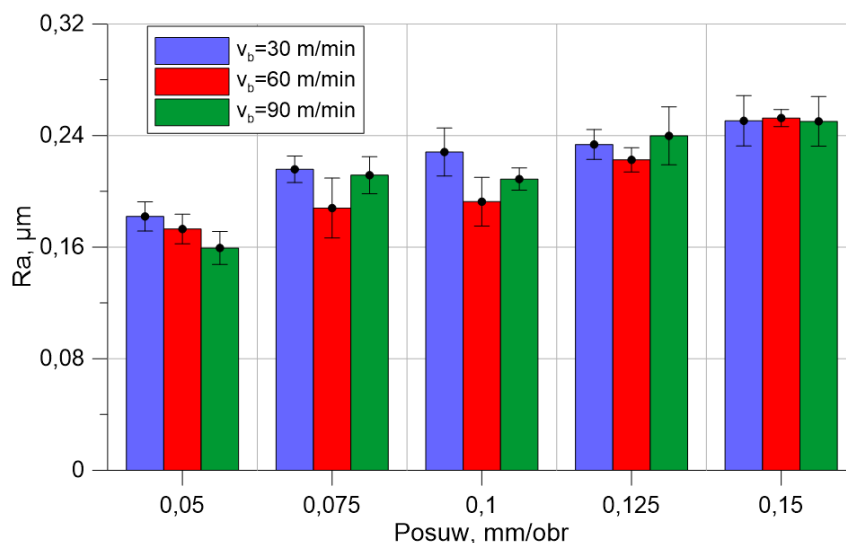
$Ra = 0,48 \mu\text{m}$, $Rv = 1,28 \mu\text{m}$, $Rp = 1,20 \mu\text{m}$, $Rz = 2,74 \mu\text{m}$. Na rys. 5.58 przedstawiono przykładowe profile chropowatości po toczeniu i nagniataniu jednoprzęciowym ze zmiennym posuwem dla prędkości nagniatania $v_n = 60 \text{ m/min}$. W porównaniu ze stalami o mniejszej twardości można odnotować mniejszą redukcję chropowatości. Zauważalna jest tendencja do ścinania wierzchołów profilu szczególnie dla wyższych wartości posuwu nagniatania (rys. 5.58d).



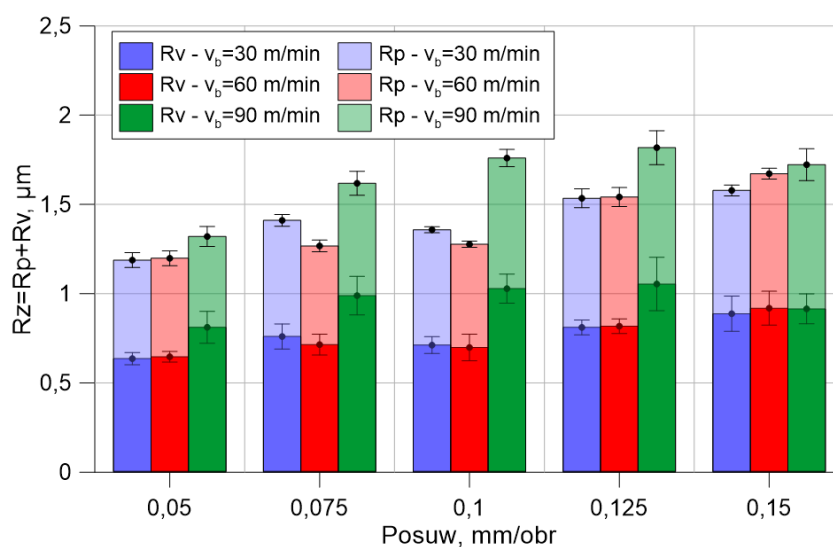
Rys. 5.58. Profil powierzchni stali o twardości 50 HRC: a) po toczeniu z parametrami $v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/obr}$ oraz $a_p = 0,2 \text{ mm}$; oraz po nagniataniu jednoprzęciowym z prędkością $v_n = 60 \text{ m/min}$ i zmiennym posuwem: b) $f_n = 0,05 \text{ mm/obr}$, c) $f_n = 0,1 \text{ mm/obr}$, d) $f_n = 0,15 \text{ mm/obr}$

Analizując zmierzone wartości parametru Ra przewidywalnie można zauważyć ich wzrost wraz ze wzrostem posuwu nagniatania (rys. 5.59). Najmniejszą wartość parametru Ra równą $0,16 \mu\text{m}$ uzyskano dla $v_b = 90 \text{ m/min}$ i $f_b = 0,05 \text{ mm/obr}$, natomiast Ra około $0,25 \mu\text{m}$ uzyskano dla wszystkich analizowanych prędkości nagniatania i posuwu $f_b = 0,15 \text{ mm/obr}$. Analizując wartości pionowych parametrów chropowatości zestawione na rys. 5.60 można odnotować wartości w zakresie od $1,18 \mu\text{m}$ dla $v_b = 30 \text{ m/min}$ i $f_b = 0,05 \text{ mm/obr}$ do $1,81 \mu\text{m}$ dla $v_b = 90 \text{ m/min}$ i $f_b = 0,125 \text{ mm/obr}$. Ogólny trend wskazuje na wzrost wartości parametru Rz i składowych wraz ze wzrostem

posuwu nagniatania. Wpływ prędkości nagniatania ma również wpływ na zwiększenie parametru R_z .

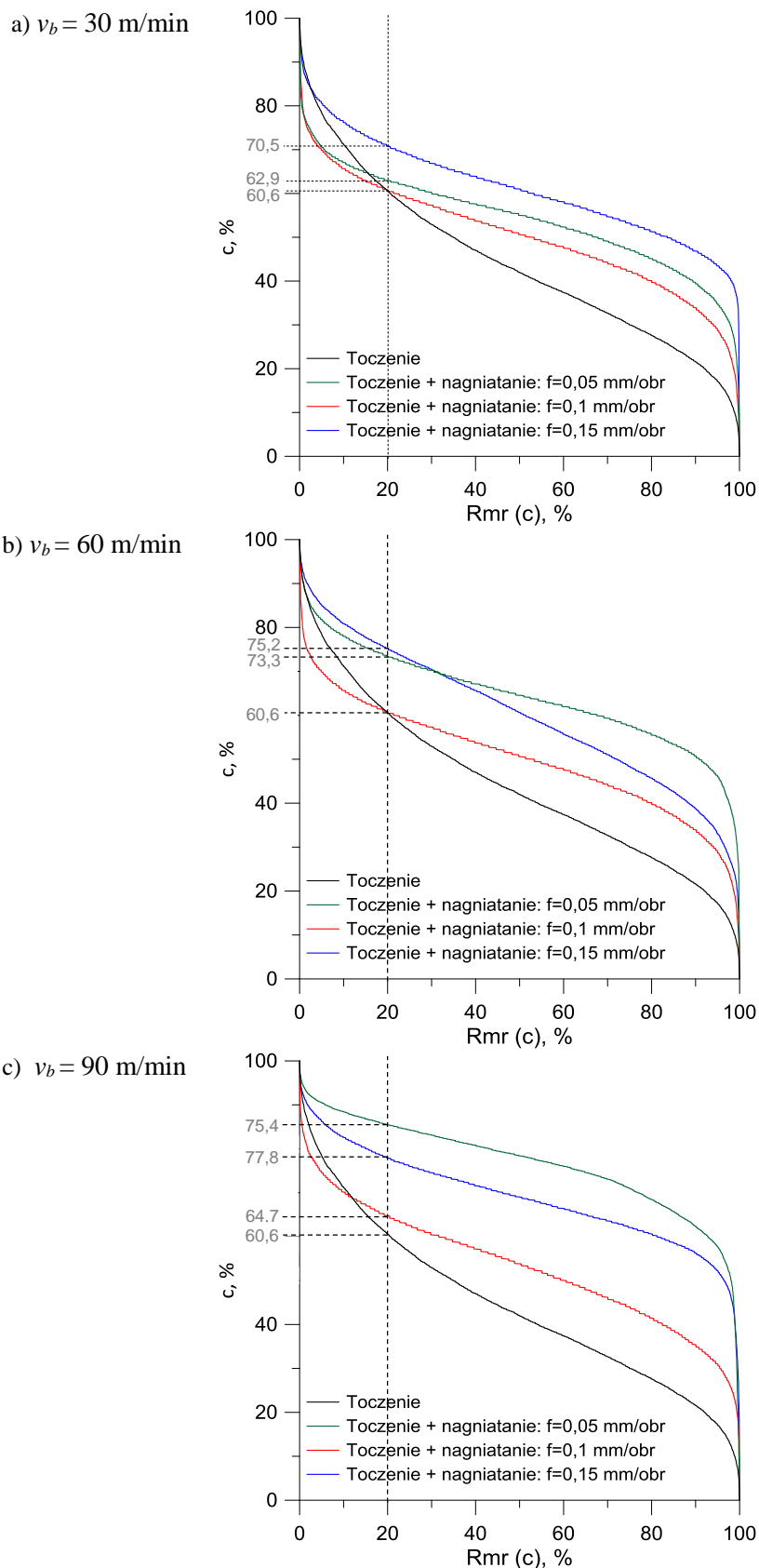


Rys. 5.59. Wpływ parametrów nagniatania na parametry chropowatości R_a dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 50 HRC

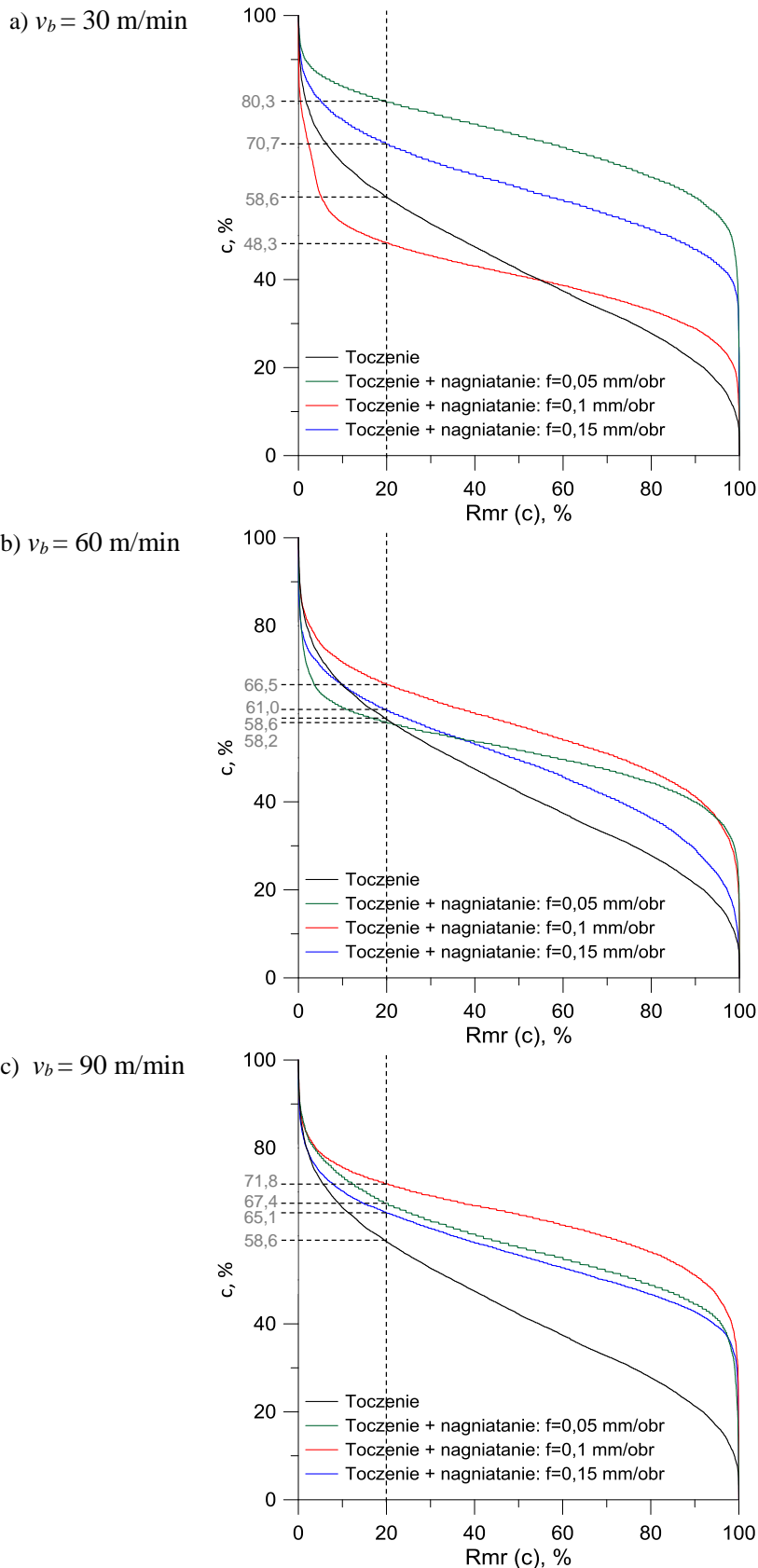


Rys. 5.60. Wpływ parametrów nagniatania na parametry chropowatości R_z (R_p+R_v) dla sekwencyjnej obróbki stali o twardości 50 HRC

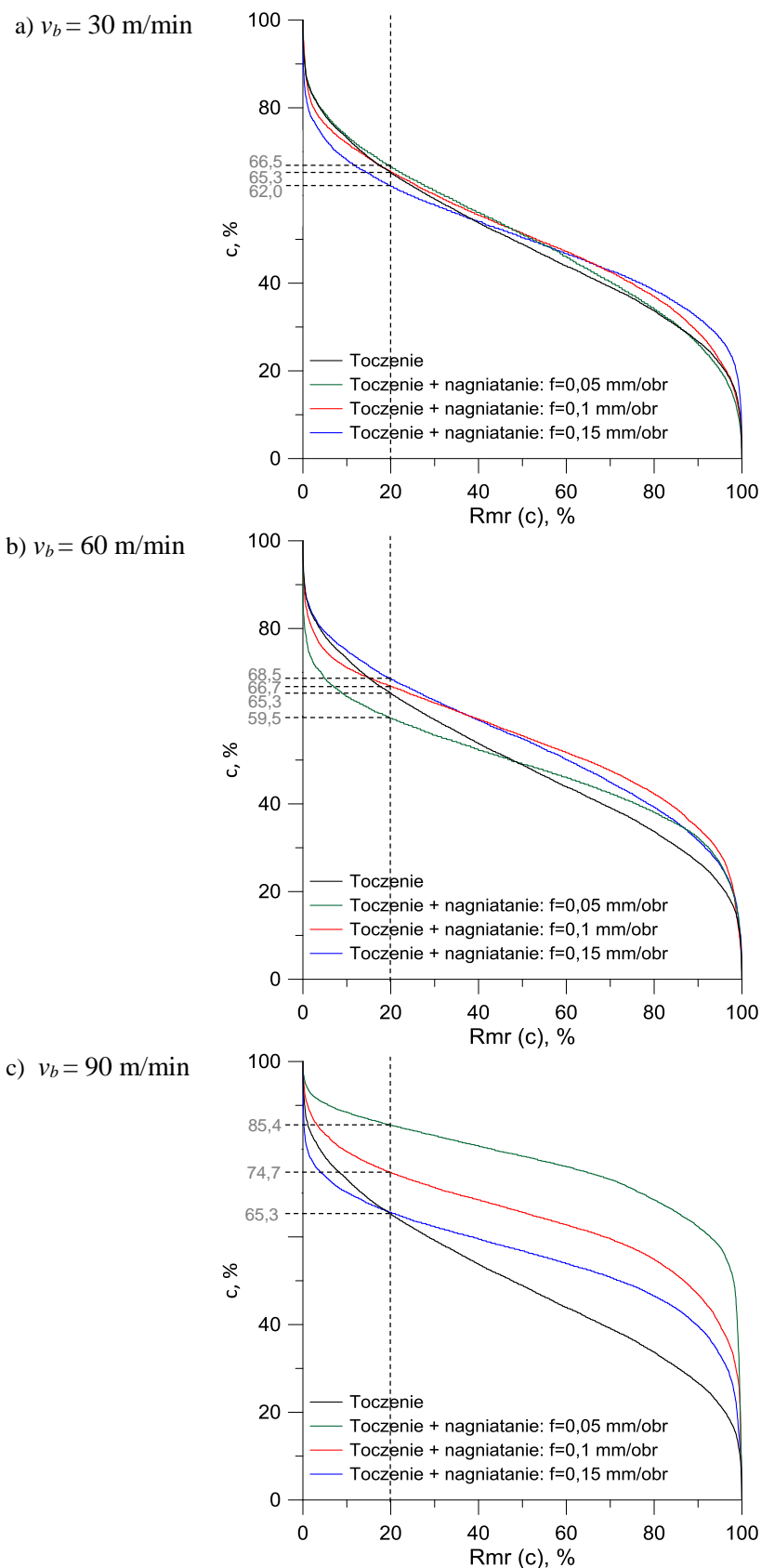
Na rys. 5.61 ÷ 5.63 przedstawiono krzywe udziału materiałowego dla sekwencyjnego toczenia oraz nagniatania. Powierzchnie po nagniataniu charakteryzują się dla większości przypadków korzystniejszym rozkładem materiału na wysokości profilu R_t . Jedynie dla stali o twardości 50 HRC dla nagniatania z prędkością $v_b = 30$ i 60 m/min krzywe udziału materiałowego przyjmują rozkład zbliżony jak dla toczenia.



Rys. 5.61. Krzywe udziału materiałowego po toczeniu oraz sekwencyjnym nagniataniu stali o twardości 20 HRC dla zmiennej prędkości nagniatania: a) $v_b = 30$ m/min, b) $v_b = 60$ m/min, c) $v_b = 90$ m/min



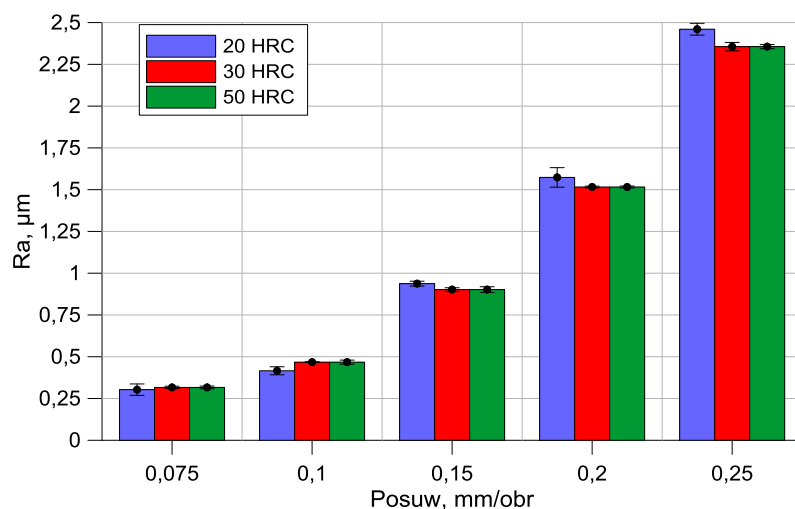
Rys. 5.62. Krzywe udziału materiałowego po toczeniu oraz sekwencyjnym nagniataniu stali o twardości 30 HRC dla zmiennej prędkości nagniatania: a) $v_b = 30$ m/min, b) $v_b = 60$ m/min, c) $v_b = 90$ m/min



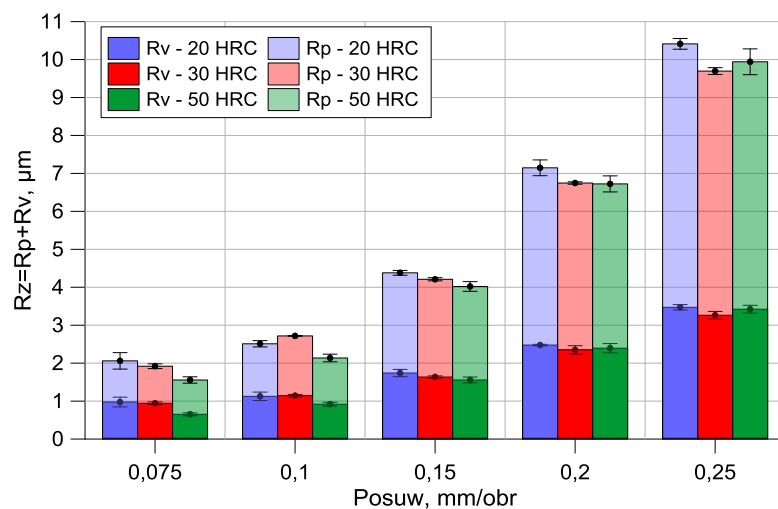
Rys. 5.63. Krzywe udziału materiałowego po toczeniu oraz sekwencyjnym nagniataniu stali o twardości 50 HRC dla zmiennej prędkości nagniatania: a) $v_b = 30$ m/min, b) $v_b = 60$ m/min, c) $v_b = 90$ m/min

5.5.1. Stan geometryczny powierzchni po obróbce sekwencyjnej z dwuprzejściowym nagniataniem

Dla obróbki sekwencyjnej z dwuprzejściowym nagniataniem przyjęto stałą wartość parametrów technologicznych nagniatania $v_b = 60$ m/min, $f_b = 0,1$ mm/obr oraz zmienną siłę docisku dostosowaną do twardości obrabianej stali. Przed operacją nagniatania zastosowano toczenie z parametrami $v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,2$ mm oraz posuw w zakresie $f = 0,075$ do $0,25$ mm/obr, co pozwoliło na uzyskanie różnej chropowatości powierzchni.



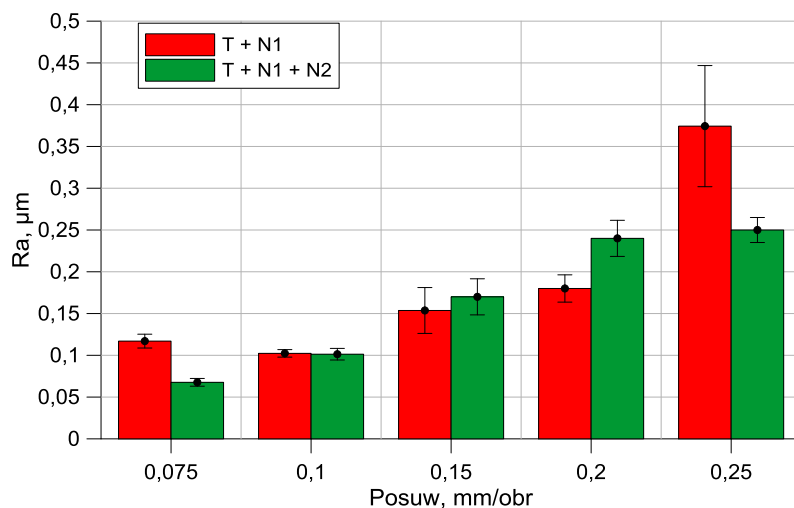
Rys 5.64. Wpływ parametrów toczenia na parametr R_a dla stali o twardości 20, 30 i 50 HRC



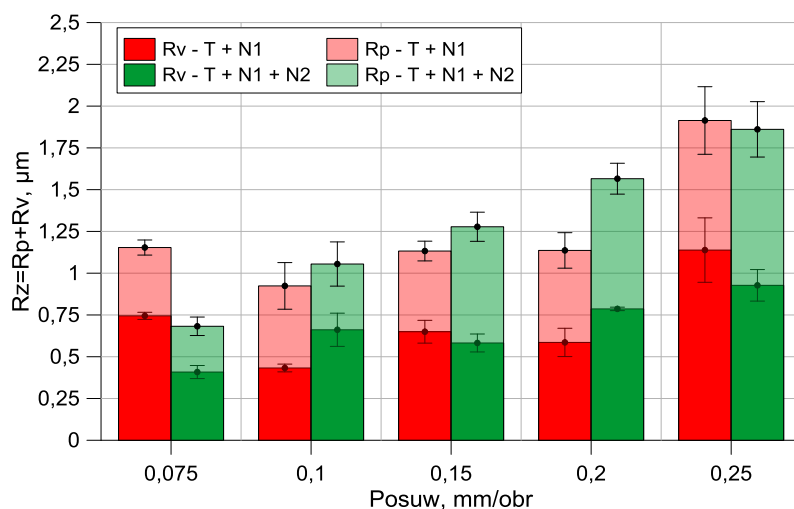
Rys 5.65. Wpływ parametrów toczenia na parametr R_z dla stali o twardości 20, 30 i 50 HRC

Po toczeniu wstępnym dla stali o twardości 20 HRC uzyskano Ra w zakresie 0,3 do 2,46 μm , $Rz = 2,04 \div 10,4 \mu\text{m}$; dla stali o twardości 30 HRC uzyskano $Ra = 0,32 \div 2,36 \mu\text{m}$ $Rz = 1,9 \div 9,7 \mu\text{m}$; dla stali o twardości 50 HRC uzyskano $Ra = 0,27 \div 2,4 \mu\text{m}$ $Rz = 1,54 \div 9,92 \mu\text{m}$ (rys. 5.64 i 5.65).

Analizując wyniki uzyskane po sekwencyjnym toczeniu i nagniataniu jedno i wieloprześciowym można zauważyć znaczną redukcję chropowatości powierzchni. Największą redukcję można dostrzec dla stali o najmniejszej twardości, w tym przypadku parametr Ra został zredukowany prawie 10-cio krotnie natomiast parametr Rz ponad 5-cio krotnie (dla $f = 0,25$ i nagniataniu z dwoma przejściami) (rys. 5.66 i 5.67). Można zauważyć również zmianę proporcji parametru Rv do Rp , po nagniataniu wysokość Rp maleje.

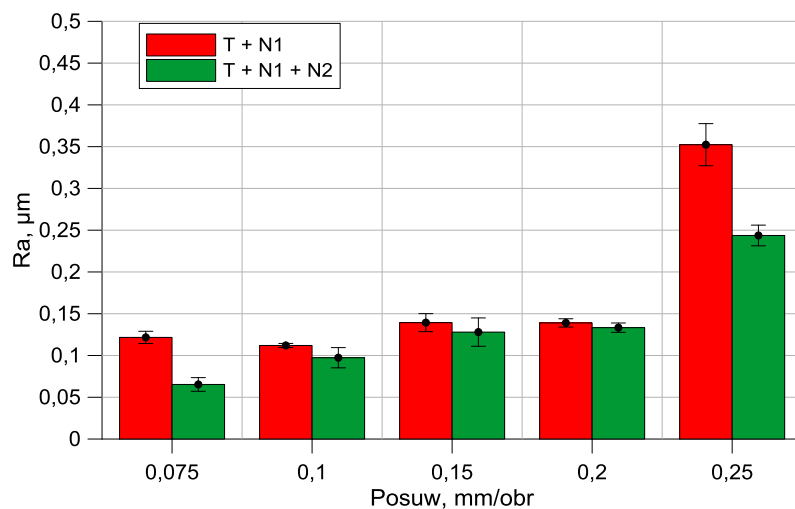


Rys. 5.66. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr Ra stali o twardości 20 HRC

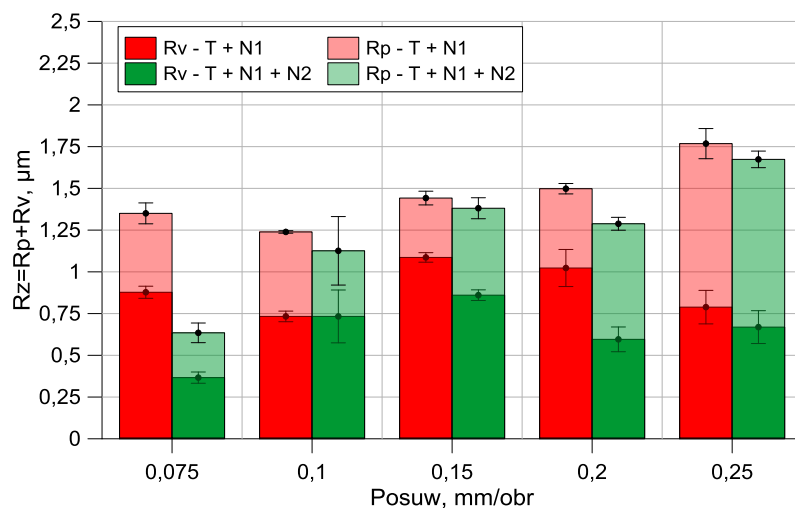


Rys. 5.67. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr Rz stali o twardości 20 HRC

W przypadku sekwencyjnego nagniatania stali o twardości 30 HRC można zauważyć podobną tendencję co poprzednio dla miękkiej stali. Nastąpiła znaczna redukcja parametrów chropowatości, szczególnie dla największego posuwu poprzedzającego nagniatanie ($f = 0,25$ mm/obr) (rys. 5.68 i 5.69).

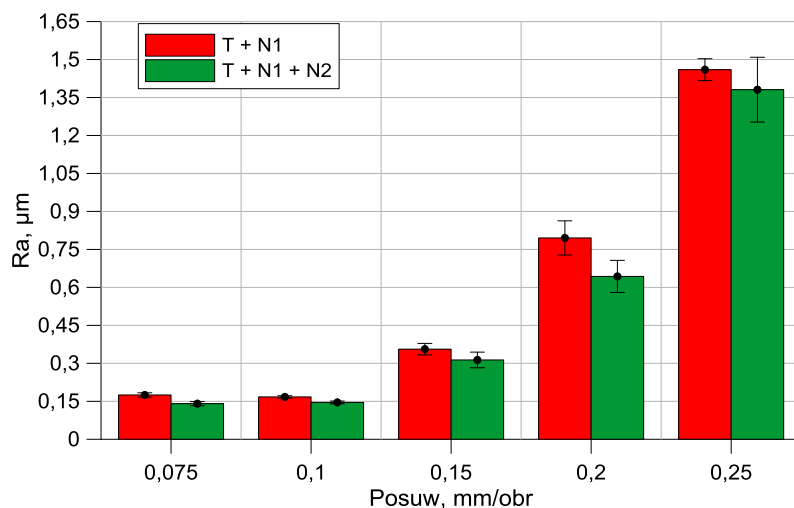


Rys. 5.68. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr R_a stali o twardości 30 HRC

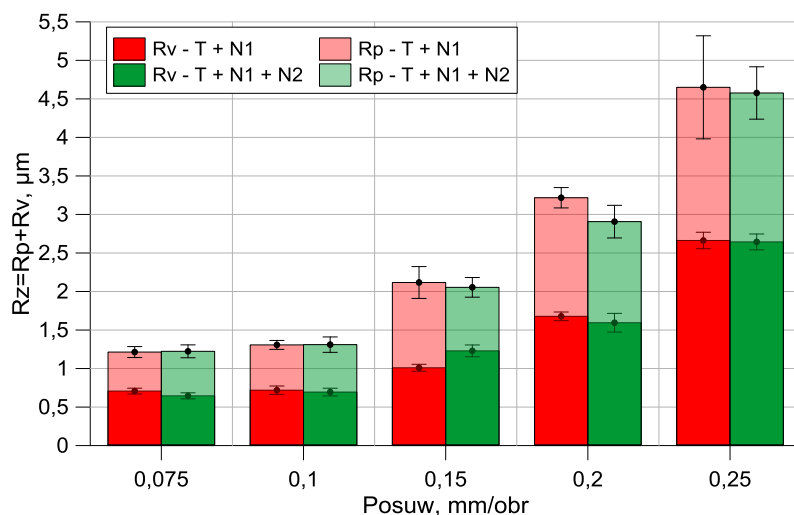


Rys. 5.69. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr R_z stali o twardości 30 HRC

Dla materiału najtwardszego (50 HRC) odnotowano mniejszą redukcję chropowatości. Obróbka sekwencyjna pozwoliła na redukcję parametru R_a do 4 razy, natomiast parametr R_z został zredukowany ponad 2-u krotnie (rys. 5.70 i 5.71).



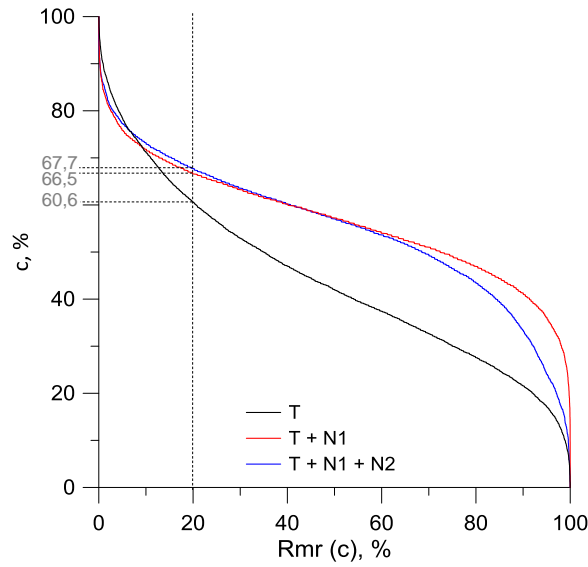
Rys. 5.70. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr R_a stali o twardości 50 HRC



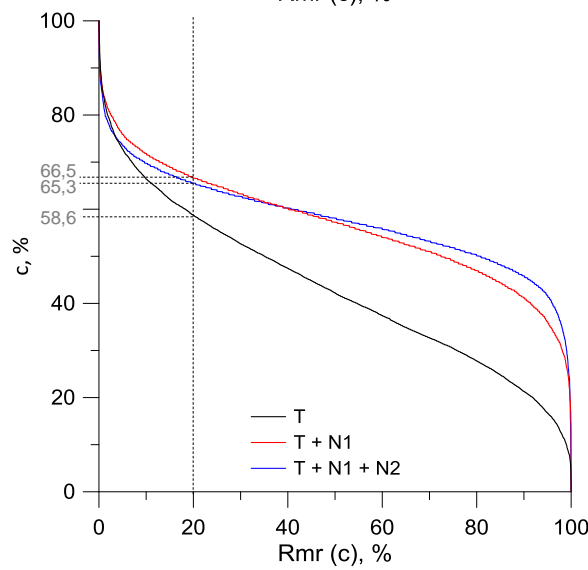
Rys. 5.71. Wpływ parametrów obróbki sekwencyjnej na parametr R_z stali o twardości 50 HRC

Na rysunku 5.72 przedstawiono krzywe udziału materiałowego po toczeniu wstępnym (T) z posuwem $f = 0,1$ mm/obr oraz dwuprzejściowym nagniataniu (N1 i N2) z posuwem $f_b = 0,1$ mm/obr i prędkością nagniatania $v_b = 60$ m/min. Można zauważyć wpływ nagniatania na zmianę charakteru krzywej udziału materiałowego, szczególnie zauważalny jest korzystny rozkład krzywej dla stali o twardości 20 i 30 HRC, dla stali o twardości 50 HRC zmiana jest mniej wyraźna.

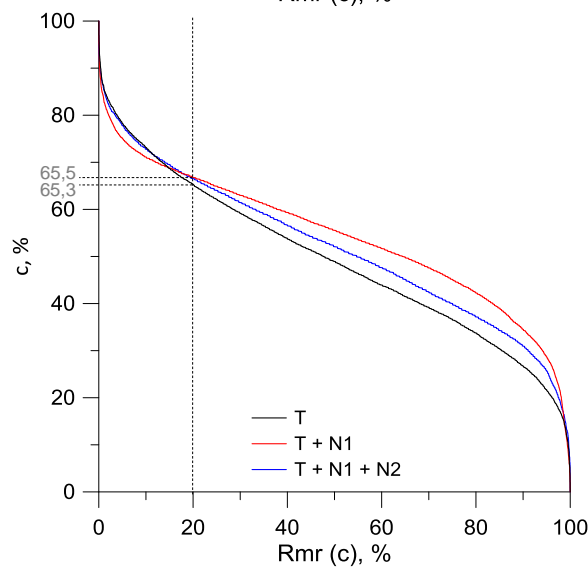
a) 20 HRC



b) 30 HRC

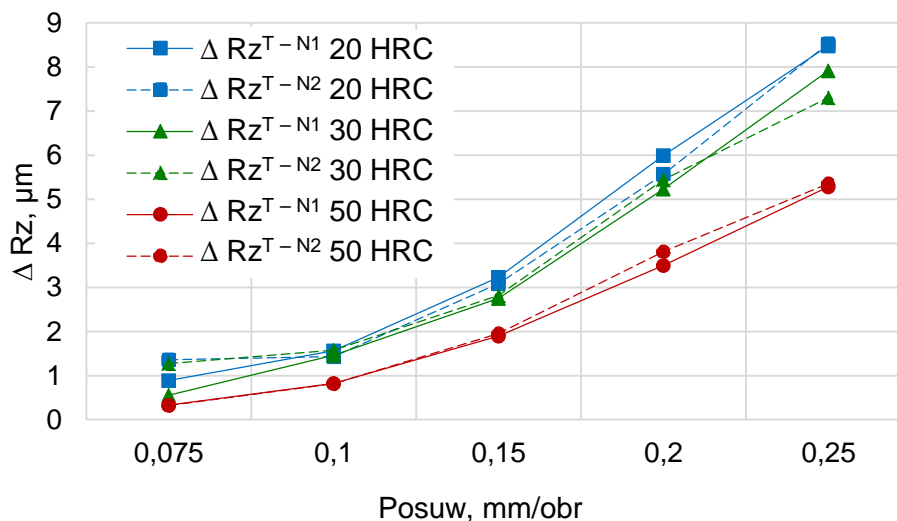


c) 50 HRC



Rys. 5.72. Krzywe udziału materiałowego po toczeniu $z f = 0,1$ mm/obr oraz sekwencyjnym dwuprzejściowym nagniataniu stali o twardości: a) 20 HRC, b) 30 HRC, c) 50 HRC

Wpływ strategii nagniatania na redukcję wartości parametru chropowatości Rz przedstawiono na rysunku 5.73, gdzie odnotowano zmniejszenie wyjściowej chropowatości. Największą redukcję odnotowano dla stali o twardości 20 i 30 HRC, przewidywalnie mniejsza redukcja nastąpiła po nagniataniu stali o twardości 50 HRC.

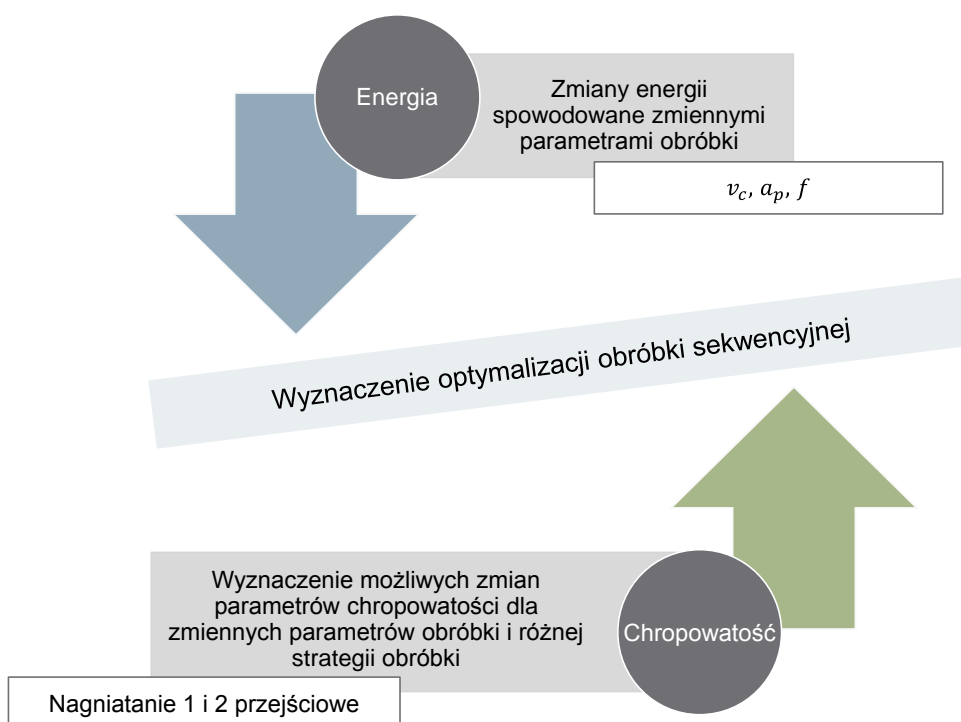


Rys. 5.73. Zmniejszenie parametru Rz dla sekwencyjnego toczenia i nagniatania wieloprzejściowego dla stali o twardości 20 ÷ 50 HRC

Obróbka sekwencyjna wieloprzejściowa pozwala na stopniową redukcję chropowatości, szczególnie dla materiałów miękkich o twardości poniżej 30 HRC. Dla stali o twardości 20 HRC możliwe było zmniejszenie chropowatości w jednym przejściu nagniatania, a kolejne przejście w większości przypadków (powyżej $f = 0,1$ mm/obr) nie prowadziło już do wyraźnej redukcji chropowatości powierzchni. W przypadku dwuprzejściowego nagniatania stali o twardości 30 HRC możliwa była wyraźna redukcja chropowatości w pierwszym przejściu oraz odnotowano dodatkową redukcję dla kolejnego przejścia. Drugie przejście nagniatające jest również skuteczne dla twardej stali (50 HRC) w szczególności dla powierzchni uzyskanej toczeniem wstępnym z posuwami $f_n = 0,15 \div 0,25$ mm/obr.

5.6. Optymalizacja warunków obróbki sekwencyjnej w kontekście wymaganej chropowatości i energochłonności procesu

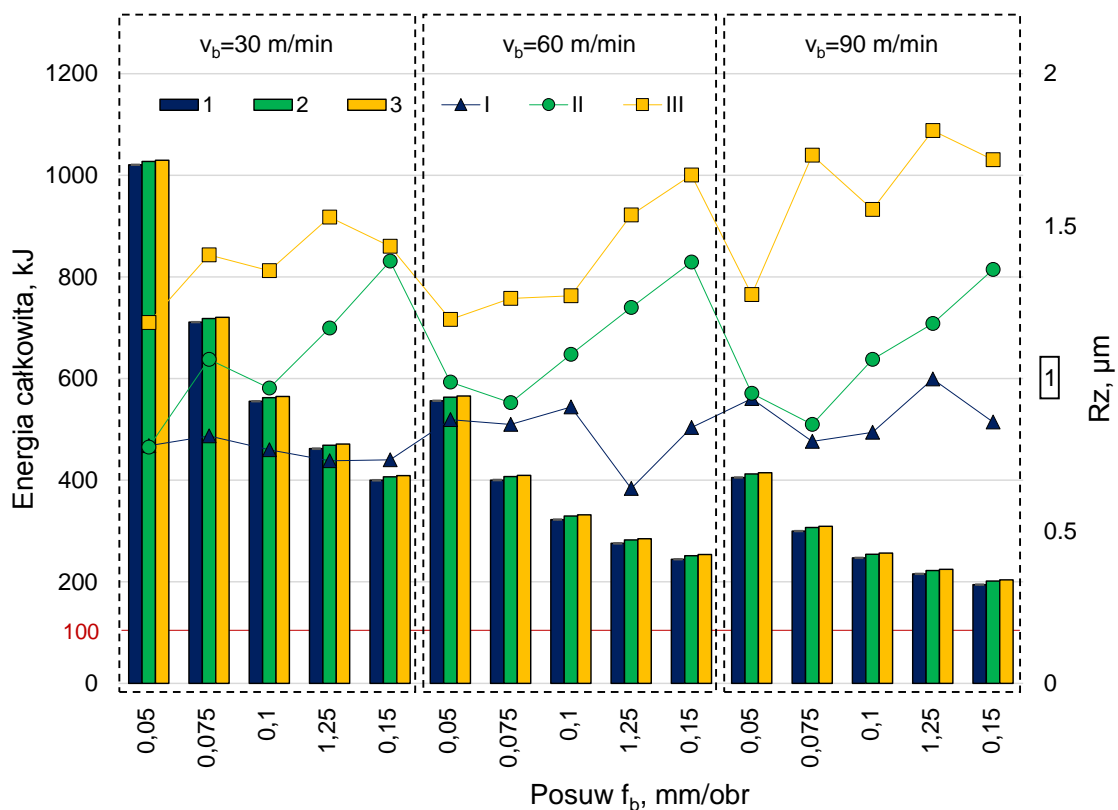
W pracy podjęto próbę optymalizacji warunków obróbki sekwencyjnej w kontekście wymaganej chropowatości powierzchni i energochłonności procesu według schematu przedstawionego na rys. 5.74. Rozpatrywano czynniki wpływające na energochłonność procesu takie jak parametry technologiczne obróbki, czy strategię obróbki sekwencyjnej. Te same czynniki skorelowane są z efektami obróbki, czyli stanem powierzchni (chropowatość).



Rys. 5.74. Optymalizacja warunków obróbki sekwencyjnej w kontekście wymaganej chropowatości i energochłonności procesu

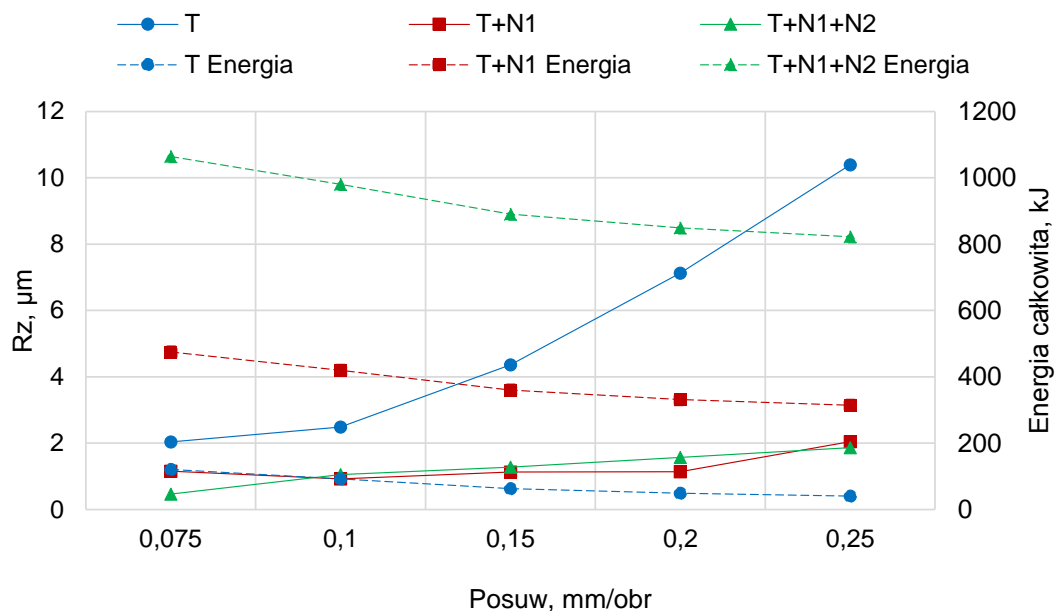
Zmiany energii całkowitej jako pierwsze podstawowe kryterium optymalizacji ($E \rightarrow E_{\min}$) zarejestrowanej dla toczenia oraz nagniatania przedstawiono na rys. 5.75. Wyniki obejmują wstępne toczenie stali o twardości $20 \div 50$ HRC (przy $a_p = 0,2$ mm, $f = 0,1$ mm/obr, $v_c = 200$ m/min dla każdego rodzaju materiału) oraz sekwencyjne nagniatanie ze zmiennymi parametrami technologicznymi. Dominujący wpływ na energię całkowitą ma prędkość nagniatania oraz posuw, przy czym największą wartość energii wynoszącą ponad 1000 kJ odnotowano podczas nagniatania z parametrami: $v_b = 30$ m/min i $f = 0,05$ mm/obr, dla wszystkich badanych stali. Zwiększenie prędkości

nagniatania z 30 do 90 m/min pozwoliło na redukcję energii całkowitej o około 50 ÷ 60% dla całego badanego zakresu parametrów. Należy odnotować, że dla toczenia poprzedzającego operację nagniatania zużycie energii nie przekraczało 100 kJ. Odpowiednio dla stali o twardości 20 HRC - 88 kJ, dla stali o twardości 30 HRC 95 kJ natomiast dla stali o najwyższej twardości 98 kJ (zmiany energii opisano w rozdziale 5.1), co stanowi od 10% do 50% całej zarejestrowanej wartości. Analizując drugie kryterium optymalizacji ($ChP \rightarrow ChP_{min}$) dotyczące wartości parametru R_z można zauważyć, że dla stali o twardości 20 HRC wartość R_z nie przekracza 1 μm dla całego badanego zakresu. Dla stali o twardości 30 HRC zauważalny wpływ ma posuw – mniejsza wartość parametru determinuje niższą wartość chropowatości. Prędkość nagniatania nie wpływa w znaczący sposób na wartość R_z dla stali o twardość 20 i 30 HRC, natomiast w przypadku stali o twardości 50 HRC zwiększenie prędkości nagniatania z 30 do 90 m/min powoduje wzrost R_z o około 0,3 μm dla posuwów 0,075 ÷ 0,15 m/min. Łączną analizę energochłonności i chropowatości powierzchni przedstawiono na rys. 5.75.

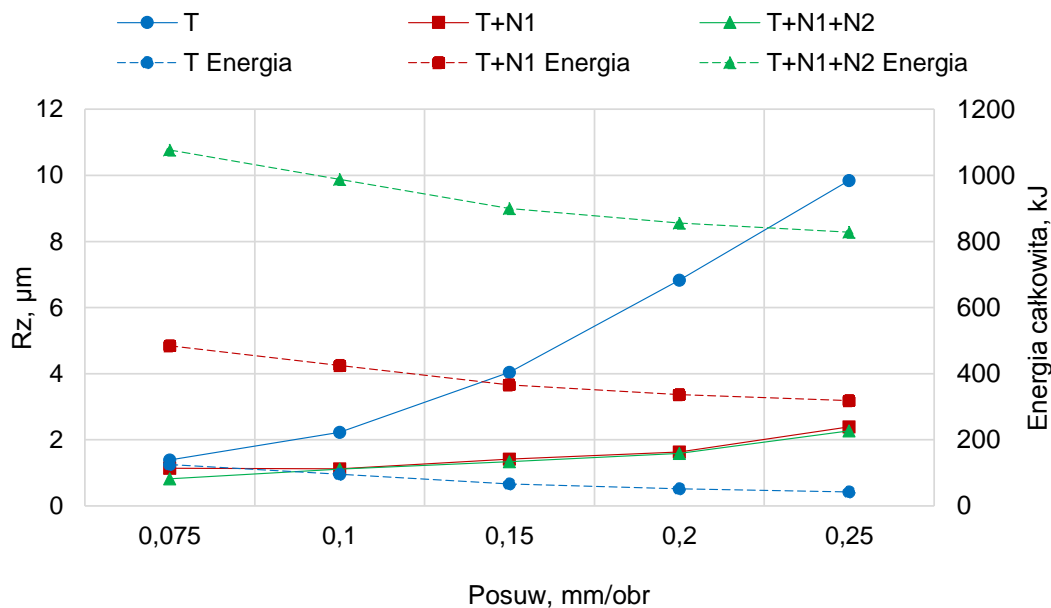


Rys. 5.75. Zestawienie wartości energii całkowitej (1-3) oraz parametru R_z (I-III) po sekwencyjnym toczeniu i nagniataniu stali o twardości 20 HRC (1 i I), 30 HRC (2 i II) oraz 50 HRC (3 i III)

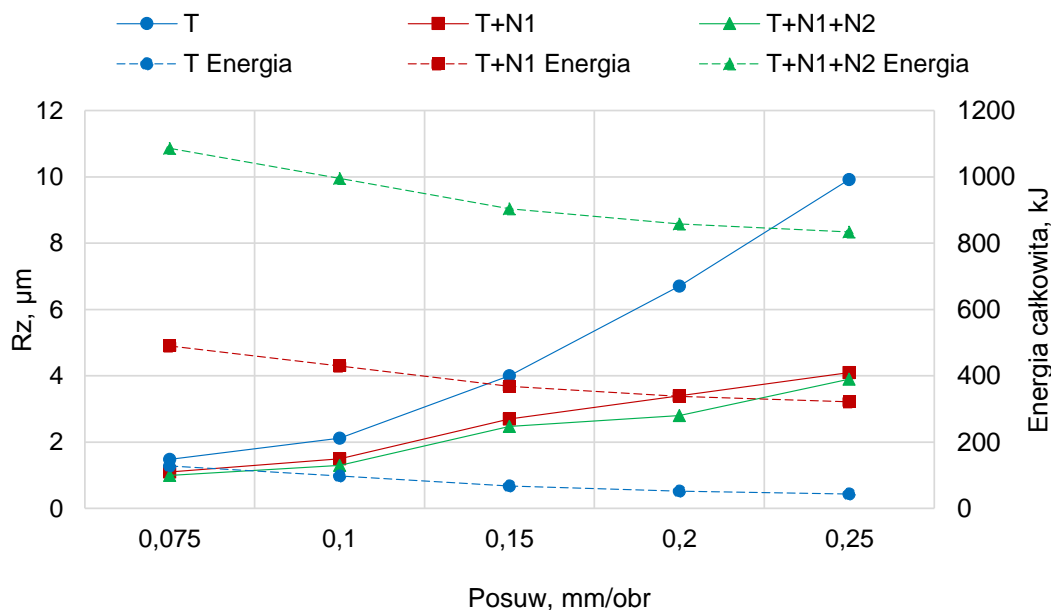
Na rysunkach 5.76 do 5.78 przedstawiono związki energii całkowitej i chropowatości powierzchni dla różnych warunków obróbki stali o twardości 20 ÷ 50 HRC. Po toczeniu wstępnym stali przy $a_p = 0,2$ mm, $v_c = 200$ m/min, $f = 0,075 \div 0,25$ mm/obr dla każdego rodzaju materiału przeprowadzono sekwencyjne nagniatanie ze stałymi parametrami $v_b = 60$ m/min, $f_b = 0,1$ mm/obr oraz zmienną siłą docisku dla każdej stali. Odnotowano znaczący wzrost energii podczas nagniatania w pierwszym i kolejnym przejściu dla każdego badanego materiału. Sekwencyjne toczenie i nagniatanie pozwala na wysoką redukcję chropowatości szczególnie dla stali o twardości 20 i 30 HRC, którą można uzyskać po sekwencji z jedną operacją nagniatania. Dla najtwardszej stali uzyskano wyraźnie mniejszą redukcję parametru R_z , szczególnie powyżej posuwu $f = 0,1$ mm/obr poprzedzającego toczenia.



Rys. 5.76. Związki energii całkowitej i chropowatości powierzchni dla różnych warunków obróbki stali o twardości 20 HRC



Rys. 5.77. Związki energii całkowitej i chropowatości powierzchni dla różnych warunków obróbki stali o twardości 30 HRC



Rys. 5.78. Związki energii całkowitej i chropowatości powierzchni dla różnych warunków obróbki stali o twardości 50 HRC

Udowodniono, że uzyskanie optymalnych parametrów zużycia energii w aspekcie chropowatości powierzchni (możliwość uzyskania R_z poniżej $1 \mu\text{m}$) dla stali o twardości 20 HRC można uzyskać stosując jednoprzęściowe nagniatanie z różnymi wariantami parametrów, a E_{min} uzyskano dla $v_b = 90 \text{ m/min}$ i posuwu $f_b = 0,15 \text{ mm/obr}$. Możliwe jest stosowanie obróbki poprzedzającej z posuwem do $f = 0,15 - 0,2 \text{ mm/obr}$. Dla stali

o twardości 30 HRC należy stosować nagniatanie jednoprzęściowe z posuwem poniżej 0,1 mm/obr dla wszystkich badanych prędkości nagniatania, natomiast podczas nagniatania wieloprzęściowego możliwe jest uzyskanie wymaganego kryterium powierzchni tylko dla toczenia poprzedzającego z posuwem $f = 0,075$ mm/obr.

Stwierdzono, że stosowanie podczas operacji nagniatania maksymalnych parametrów technologicznych obróbki przyczynia się do mniejszego zużycia energii przez obrabiarkę. W pracy udowodniono, że wysoka jakość powierzchni (niska chropowatość) jest w wysokim stopniu powiązana z wysokim zużyciem energii.

W tabeli 5.10 przedstawiono (na podstawie badań własnych) wpływ parametrów technologicznych toczenia i nagniatania na moc, energię i chropowatość powierzchni. Wraz ze wzrostem technologicznych parametrów toczenia i nagniatania jak również zmianą strategii obróbki (nagniatanie z jednym lub dwoma przejściami) wskazano obszary wpływu parametrów na moc całkowitą, energię całkowitą i chropowatość (R_a , R_z). Dojmujący wpływ na moc całkowitą ma głębokość skrawania, wysoki wpływ odnotowano dla posuwu oraz prędkości skrawania. Niewielki wpływ na moc całkowitą ma posuw oraz prędkość nagniatania (różnica wynika głównie ze zwiększonej prędkości obrotowej wrzeciona). Siła docisku oraz ilość przejść ma wpływ marginalny na moc. Wraz ze wzrostem parametrów technologicznych podczas toczenia i nagniatania (prędkość skrawania i posuw) stwierdzono wyraźną redukcję energii całkowitej (wynikająca głównie ze skrócenia czas trwania danej operacji), natomiast głębokość skrawania wpływa na zwiększone zużycie energii. Zwiększona ilość przejść generuje znacznie większe zużycie energii dla operacji nagniatania. Rozpatrując znaczenie parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni, jak powszechnie wiadomo, największy wpływ ma zwiększenie posuwu. Prędkość skrawania i głębokość skrawania mają mniejsze znaczenie. Zasadniczo zwiększona ilość przejść nagniatania prowadzi do redukcji chropowatości, natomiast zwiększenie siły docisku nie zawsze prowadzi do wygładzenia powierzchni (na przykład może przyczynić się do powstania wypływki).

Tabela. 5.10. Wpływ zwiększenia parametrów technologicznych toczenia i nagniatania na moc, energię i chropowatość powierzchni

	Parametr	Moc	Energia	Chropowatość
Toczenie	Prędkość skrawania, $v_c \uparrow$	++	--	-
	Posuw, $f \uparrow$	++	---	+++
	Głębokość skrawania, $a_p \uparrow$	+++	++	- / +
Nagniatanie	Prędkość nagniatania, $v_b \uparrow$	+	---	+
	Posuw, $f_b \uparrow$	+	---	+
	Siła docisku, $F_n \uparrow$	o	o	- / +
	Ilość przejść, $n \uparrow$	o	+++	--

+ zwiększenie, - zmniejszenie, o - bez wyraźnego wpływu

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły sformułować przedstawione poniżej wnioski poznawcze, utylitarne oraz rozwojowe.

WNIOSKI POZNAWCZE

1. Odnotowano znaczący wzrost mocy skrawania, wraz ze wzrostem paramentów technologicznych skrawania, jak i ze wzrostem twardości materiału obrabianego.
2. Stosując kryterium energii powierzchniowej, możliwe jest łączne uwzględnienie toczenia wykańczającego i nagniatania tocznego, czyli obróbki ubytkowej i bezubytkowej.
3. Zwiększenie parametrów technologicznych obróbki pozwala na redukcję zużycia energii całkowitej.
4. Operacje nagniatania nie obciążają nadmiernie napędów posuwu obrabiarki, ponieważ zarejestrowana moc nagniatania nie przekracza kilku procent mocy całkowitej.
5. W operacjach wykańczającego toczenia wszystkich badanych materiałów generowana moc skrawania stanowi mniej niż 30% mocy całkowitej.
6. Dla stali o twardości 20 HRC obróbka sekwencyjna z jednoprzęściowym nagniataniem pozwala na uzyskanie chropowatości około (Ra) 0,1 μm bez wyraźnego wpływu parametrów nagniatania.
7. W większości przypadków udział materiałowy powierzchni po nagniataniu podlega modyfikacji w stosunku do wyników operacji toczenia wykańczającego.
8. W operacjach toczenia energia całkowita w dużym stopniu zależy od urządzeń utrzymujących ją w stanie gotowości operacyjnej.
9. Nagniatanie dwuprzęściowe dla stali o twardości 20 HRC nie wpływa wyraźnie na zmianę parametrów chropowatości powierzchni.
10. Nagniatanie dwuprzęściowe powoduje mniejsze zmiany chropowatości powierzchni, natomiast znacząco podwyższa zużycie energii.
11. Zastosowanie odpowiedniej chropowatości powierzchni po toczeniu znacząco wpływa na uzyskaną chropowatość powierzchni po nagniataniu.

12. Dominujący wpływ na energię całkowitą ma prędkość nagniatania oraz posuw, przy czym największą wartość energii wynoszącą ponad 1000 kJ odnotowano podczas nagniatania z parametrami: $v_b = 30$ m/min i $f = 0,05$ mm/obr, dla wszystkich badanych stali.
13. Zwiększenie prędkości nagniatania z 30 do 90 m/min pozwoliło na redukcję energii całkowitej o około 50 ÷ 60% dla całego badanego zakresu parametrów.
14. Zauważono, że dla toczenia poprzedzającego operację nagniatania zużycie energii obróbki nie przekraczało 100 kJ.
15. Energia właściwa powierzchniowa przyjęta jako kryterium oceny energochłonności procesu obróbki sekwencyjnej zmienia się, dla ustalonych warunków badań, w zakresie 3,9 ÷ 4,5 J/mm² dla toczenia i 10 ÷ 90 J/mm² dla nagniatania tocznego. Dane te są bardzo ważne dla optymalizacji sekwencyjnego procesu obróbki.
16. Stwierdzono, że dla stali o twardości 20 HRC wartości parametru R_z nie przekracza 1 μ m dla całego badanego zakresu, czyli spełnia warunek obróbki bardzo dokładnej.
17. Dla nagniatania stali o twardości 30 HRC zauważalny wpływ na wartość parametru R_z ma posuw – mniejsza wartość tego parametru determinuje niższą chropowatość.
18. Prędkość nagniatania nie wpływa w znaczący sposób na wartość R_z dla stali o twardość 20 i 30 HRC.

WNIOSKI UTYLITARNE

1. Zbudowane stanowisko badawcze pozwala na ocenę energochłonności obróbki na obrabiarkach CNC dla różnych procesów obróbki. Ograniczeniem jest możliwość uzbrojenia głowicy rewolwerowej.
2. Istotnym postępowaniem w ocenie energochłonności procesu obróbki jest zabudowa siłomierza piezoelektrycznego i możliwości oceny energochłonności na podstawie różnych danych, tj. rejestracji sił i mocy skrawania.
3. Zastosowanie odpowiedniej konstrukcji głowicy nagniatającej pozwala na stosowanie jej na różnych obrabiarkach CNC.

4. W aspekcie chropowatości powierzchni zasadne wydaje się zastosowanie jednoprzęściowego nagniatania dla obróbki sekwencyjnej stali miękkiej o twardości 20 HRC.
5. Obróbka sekwencyjna z wieloprzęściowym nagniataniem zwiększa zużycie energii. W tym przypadku należy jeszcze wskazać wpływ nacisków w poszczególnych przejściach.

WNIOSKI ROZWOJOWE

1. W rozszerzonym wariantcie optymalizacji obróbki sekwencyjnej należy uwzględnić kryterium trwałości ostrza podczas obróbki wstępnej.
2. Zasadne jest przeprowadzanie poszerzonej analizy struktury geometrycznej powierzchni po obróbce sekwencyjnej (pomiarzy 3D powierzchni).
3. W dalszych badaniach energochłonności obróbki można uwzględnić inne sposoby obróbki (np. frezowanie) i materiały, w których stosuje się operację nagniatania, np. stopy aluminium.
4. Wskazane jest uwzględnienie wpływu strategii obróbki sekwencyjnej na mikrotwardość powierzchni i naprężenia własne.
5. Można uwzględnić wpływ cieczy obróbkowych na energochłonność procesu skrawania w tym ze zminimalizowanym chłodzeniem (MQL).

7. LITERATURA

1. Abdoli S., Semere D.T.: Investigation on Machine Tools Energy Consumptions, *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, nr 8(6), 2014, s. 1136–1143.
2. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, WNT, 2009.
3. Apostolos F., Alexios P., Georgios P., Panagiotis S., George C.: Energy efficiency of manufacturing processes: A critical review, *Procedia CIRP* 7, 2013, s. 628–633.
4. Aramcharoen A., Mativenga P.T.: Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy: *Journal of Cleaner Production*, nr 78(1), 2014, s. 63–74.
5. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
6. Calvanese M.L., Albertelli P., Matta A., Taisch M.: Analysis of energy consumption in CNC machining centers and determination of optimal cutting conditions, w Nee A., Song B., Ong SK.: *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, Springer, s. 227–232.
7. Chomienne V., Valiorgue F., Rech J., Verdu C.: Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, nr 13, 2016, s. 90–96.
8. Chryssolouris G.: *Manufacturing systems: theory and practice*, Springer, 2013.
9. Chudy R., Grzesik W.: Przykłady zastosowań systemu do pomiaru mocy zainstalowanego na tokarce CNC, *Mechanik*, nr 12, 2016, s. 1866–1867.
10. Chudy R., Grzesik W.: Investigation of sequential machining processes in terms of power consumption and surface quality, *Journal of Machine Engineering*, nr 16(3), 2016, s. 67–74.
11. Chudy R., Grzesik W.: Możliwości zmniejszenia energochłonności obróbki sekwencyjnej stali utwardzonej, *Mechanik*, nr 10, 2016, s. 1462–1463.
12. Chudy R., Grzesik W., Żak K.: Influence of machining conditions on the energy consumption and productivity in finish hard turning, w: Hamrol A., Ciszak O., Legutko S., Jurczyk M.: *Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2018, s. 697–705.

13. Ciecianiak S., Karbowski K.: Nadzorowanie procesu wiercenia głębokich otworów, *Inżynieria Maszyn*, nr 15(3), 2010, s. 82–91.
14. Denkena B., Helmecke P., Hülsemeyer L.: Energy Efficient Machining with Optimized Coolant Lubrication Flow Rates, *Procedia CIRP*, nr 24, 2014, s. 25–31.
15. Diaz N., Redelsheimer E., Dornfeld D.: Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use, w Hesselbach J., Herrmann C.: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Springer 2011, s. 263–267.
16. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo: materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
17. Dobrzański L.A.: *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
18. Edem I.F., Mativenga P.T.: Impact of feed axis on electrical energy demand in mechanical machining processes, *Journal of Cleaner Production*, nr 137, 2016, s. 230–240.
19. Grzesik W.: Polepszenie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. I. Obróbka wspomaganą i hybrydową, *Mechanik*, nr 7, 2011, s. 564–569.
20. Grzesik W.: Polepszenie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. II Integracja skrawania na twardo i wykończeniowej obróbki ścierniej, *Mechanik*, nr 8-9, 2011, s. 650-657.
21. Grzesik W., Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych Cz. III. Nagniatanie toczne i ślizgowe twardych stali, *Mechanik*, nr 7, 2012, s. 558–563.
22. Grzesik W.: Functional properties of hardened steel parts generated by turning and ball burnishing operations, *Advances in Manufacturing Science and Technology* nr 36(4), 2012, s. 5–17.
23. Grzesik W.: Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn, *Mechanik*, nr 8-9, 2015, s. 587–593.
24. Grzesik W.: Prediction of the Functional Performance of Machined Components Based on Surface Topography: State of the Art, *Journal of Materials Engineering and Performance*, nr 25(10), 2016, s. 4460–4468.

25. Grzesik W.: Podstawy projektowania i optymalizacji ekologicznych procesów obróbki skrawaniem, *Mechanik*, nr 3, 2013, s 153-164.
26. Grzesik W., Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
27. Grzesik W., Żak K., Comparison of surface textures produced by finish cutting, abrasive and burnishing operations in terms of their functional properties, *Journal of Machine Engineering*, nr 13(2), 2013, s. 46–58.
28. Grzesik W., Żak K., Chudy R.: Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools, *Journal of Machine Engineering*, nr 17(2), 2017, s. 56–64.
29. Grzesik W., Żak K., Prazmowski M.: Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing, *Journal of Machine Engineering*, 12(1), 2012, s. 18–27.
30. Guo Y., Loenders J., Duflou J., Lauwers B.: Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning, *Procedia CIRP*, nr 1, 2012, s. 512–517.
31. Gutowski T., Dahmus J., Thiriez A.: Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes, 13 Th CIRP International Conference Life Cycle Engineering, 2006.
32. He Y., Liu F., Wu T., Zhong F.-P., Peng B.: Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, nr 226(2), s. 255–266.
33. Herrmann C., Thiede S., Ihlenfeldt S.: Energy Efficiency of Machine Tools: Extending the Perspective, *Proceedings of the 42nd CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, Francja 2009.
34. Holkup T., Vyroubal J., Smolik J.: Improving energy efficiency of machine tools, 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Niemcy 2013, s. 125–130.
35. Honczarenko J., *Obrabiarki sterowane numerycznie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
36. Honczarenko J., *Ekologiczne obrabiarki*, *Mechanik*, nr 5-6, 2012, s. 371–372.
37. Jędrzejewski J., *Kierunki rozwoju obrabiarek*, *Inżynieria Maszyn*, nr 3-4, 2008, s. 7–28.
38. Kara S., Li W.: Unit process energy consumption models for material removal processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, nr 60(1), 2011, s. 37–40.

39. Kong D., Choi S., Yasui Y., Pavanaskar S., Dornfeld D., Wright P.: Software-based tool path evaluation for environmental sustainability, *Journal of Manufacturing Systems*, nr 30(4), 2011, s. 241–247.
40. De Lacalle L.N.L., Rodríguez A., Lamikiz A., Celaya A., Alberdi R.: Five-Axis Machining and Burnishing of Complex Parts for the Improvement of Surface Roughness, *Materials and Manufacturing Processes*, nr 26(8), 2011, s. 997–1003.
41. Larek R., Brinksmeier E., Meyer D., Pawletta T., Hagendorf O.: A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes, *Production Engineering*, nr 5, 2011, s. 575–579.
42. Liu F., Wang Q., Liu G.J., Content architecture and future trends of energy efficiency research on machining systems, *Journal of Mechanical Engineering*, nr 49, 2013, s. 87–94.
43. Matuszewski M.: Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej. Rozprawa nr 170, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2013.
44. Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y.: A study on energy efficiency improvement for machine tools, *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, nr 60(1), 2011, s. 145–148.
45. Niemczewska-Wójcik M.: Dualny system charakteryzowania powierzchni technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów trących, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Kraków. 2018.
46. Owodunni O.O., Zhang T., Gao J.: Energy consideration in machining operations - towards explanatory models for optimisation results, 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Niemcy 2013, s. 153–158.
47. Piórkowski P., Stembalski M.: Sensory we współczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie, *Mechanik*, nr 11, 2016, s. 1740–1747.
48. Przybylski W., Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
49. Rajemi M.F., Mativenga P.T., Aramcharoen A.: Sustainable machining: Selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations, *Journal of Cleaner Production*, nr 18(10–11), 2010, s. 1059–1065.

50. Sadowska I.: Metody analizy energochłonności w przemyśle, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 33, 2013, s. 12–14.
51. Shiou F.-J., Huang S.-J., Shih A.J., Zhu J., Yoshino M.: Fine surface finish of a hardened stainless steel using a new burnishing tool, *Procedia Manufacturing*, nr 10, 2017, s. 208–217.
52. Skoczyński W.: Sensory w obrabiarkach CNC, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
53. Sokołowski A.: Automatyizacja wytwarzania: zastosowania sztucznej inteligencji w diagnostyce obrabiarek i procesu skrawania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
54. Szulewski P.: Nowoczesne funkcje diagnostyczne we współczesnych sterownikach NC, *Mechanik* nr 1, 2016, s. 5–12.
55. Tang R.: Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part, *Energy*, nr 121, 2017, s. 292–305.
56. Tubielewicz K.: Technologia nagniatania żeliwnych części maszyn, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2000.
57. Wesołowski K.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna, WNT, Warszawa 1972.
58. Xie J., Liu F., Qiu H.: An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, nr 85(5-8), 2016, s. 1339–1346.
59. Yoon H.-S., Lee J.-Y., Kim H.-S., Kim M.-S., Kim E.-S., Shin Y.-J., Chu W.-S., Ahn S.-H.: A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, nr 1(3), 2014, s. 261–279.
60. Zein A., Li W., Herrmann C., Kara S.: Energy efficiency measures for the design and operation of machine tools: an axiomatic approach, w: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Springer, Berlin 2011, s. 274–279.
61. Zhao G., Zhao Q., Zheng G., Zhai J.: Specific Energy Consumption Prediction Method Based on Machine Tool Power Measurement, *Sensors & Transducers*, nr 174(7), 2014, s. 115–122.

62. Zhou L., Li J., Li F., Meng Q., Li J., Xu X.: Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, *Journal Cleaner Production*, nr112, 2015, s. 3721–3734.
63. Norma ISO 14955-2:2018. Machine tools. Environmental evaluation of machine tools. Part 2: Methods for measuring energy supplied to machine tools and machine tool components.
64. Norma ISO 14955-1:2014. Machine tools. Environmental evaluation of machine tools. Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools.
65. www.ec.europa.eu
66. www.rynek-energii-elektrycznej.cire.pl
67. www.are.waw.pl
68. www.stat.gov.pl
69. Dyrektywa 2006/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5.04.2006.
70. www.fluke.com
71. www.montronix.com
72. www.toolmonitoring.com
73. www.stoneycnc.co.uk
74. www.dmgmori.com
75. www.okuma.com
76. www.fanucamerica.com
77. Norma PN-EN ISO 25178-2:2012. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna. Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni
78. www.ecoroll.de
79. www.kyocera-unimerco.se
80. www.polseff.org
81. www.lem.com
82. www.mahr.com
83. www.sandvik.coromant.com

STRESZCZENIE

W pracy dokonano oceny energochłonności sekwencyjnych procesów obróbki części maszyn obejmujących toczenie oraz nagniatanie toczne stali stopowej o różnej twardości wyjściowej. W części literaturowej pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat energochłonności obróbki, stosowanych wskaźników i metod pomiaru. Określono celowość stosowania obróbki sekwencyjnej/hybrydowej oraz określono efekty technologiczne.

W części badawczej pracy skoncentrowano się na pomiarach mocy i składowych sił, które umożliwiają wyznaczenie zużycia energii podczas obróbki elementów maszyn obejmującej toczenie kształtujące i wykańczające oraz obróbki sekwencyjnej z dodatkowym nagniataniem tocznym. Obróbkę realizowano z różnymi parametrami technologicznymi oraz strategiami obróbki. Badania doświadczalne przeprowadzono na próbkach ze stali konstrukcyjnej 41Cr4, poddanej obróbce cieplnej w celu uzyskania twardości materiału obrabianego w zakresie od 20 do 50 HRC.

W ramach pierwszego etapu pracy zaprojektowano i zbudowano stanowisko badawcze do pomiaru mocy pobieranej przez obrabiarkę w którym autorski program rejestrujący umożliwiał kondycjonowanie sygnałów pomiarowych. W rezultacie dokonywano oceny energetycznej procesów obróbki realizowanych na tokarce CNC w trybie *in-process*. W badaniach doświadczalnych mierzono moc, wyznaczano energię oraz ich składowe, jak również energię właściwą skrawania oraz energię powierzchniową obróbki, która umożliwia porównanie energochłonności ubytkowych i bezubytkowych procesów obróbki.

Ważną częścią pracy jest optymalizacja warunków obróbki sekwencyjnej w odniesieniu do energochłonności procesu i wymaganej chropowatości powierzchni. Określono źródła (czynniki) zużycia energii podczas obróbki sekwencyjnej w aspekcie chropowatości powierzchni, która jest wynikiem prowadzonych operacji.

Analiza wyników badań pozwoliła stwierdzić, że stosowanie podczas operacji nagniatania możliwie maksymalnych parametrów technologicznych obróbki, przyczynia się do mniejszego zużycia energii przez obrabiarkę. W pracy potwierdzono, że wysoka jakość powierzchni (niska chropowatość) i jej funkcjonalność jest w dużym stopniu powiązana ze zwiększonym zużyciem energii. Możliwe jest jednak stosowanie materiału o różnej twardości wyjściowej, co zmienia bilans energetyczny procesu sekwencyjnego.

ABSTRACT

The paper assesses the energy consumption of sequential machining processes of machine parts including turning and ball burnishing of alloy steel of different output hardness. The literature part of the paper presents the current state of knowledge on the energy consumption of processing, indicators and measurement methods. The purpose of sequential/hybrid machining was established and the technological effects were determined.

The research part of the paper focuses on the measurement of power and force components, which enable the determination of energy consumption during machining of machinery elements including forming and finishing turning and sequential machining with additional ball burnishing. The machining was carried out with different technological parameters and machining strategies. Experimental tests were carried out on samples of 41Cr4 structural steel, heat-treated to obtain hardness of the processed material in the range between 20 to 50 HRC.

In the first stage of the work, a research station was designed and built to measure the power consumed by the machine tool, in which the author's registration program enabled the conditioning of measurement signals. As a result, the energy assessment of machining processes carried out on a CNC lathe in the in-process mode was made. In experimental studies, power, energy and their components were measured, as well as specific cutting energy and surface energy of machining, which makes it possible to compare the energy consumption of removal and non-removal machining processes.

An important part of the work is the optimization of the conditions of sequential processing in relation to the energy consumption of the process and the required surface roughness. The sources (factors) of energy consumption during sequential machining in the aspect of surface roughness, which is the result of the operations, were determined.

The analysis of the test results showed that the use of the maximum possible technological parameters of machining during the burnishing operation contributes to lower energy consumption by the machine tool. The study confirmed that high surface quality (low roughness) and functionality are to a large extent related to increased energy consumption. However, it is possible to use a material of different initial hardness, which changes the energy balance of the sequential process.