

# Pomiar zużycia energii w trakcie cyklu wiercenia termicznego

Paweł Błaszczak, Roman Stryczek

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

**Streszczenie:** Praca przedstawia zagadnienie dotyczące pomiaru i analizy zużycia energii w trakcie cyklu wiercenia termicznego. Przedstawiono oparte na tokarce CNC stanowisko badawcze, którego elementem wyposażenia był eksperymentalny układ poboru energii oparty o licznik energii elektrycznej oraz siłomierz. Zastosowane urządzenia pomiarowe pozwalały na rejestrację obciążenia sieci energetycznej, obciążenia napędów obrabiarki, siłę osiową, moment hamujący wiertła, aktualne obroty wrzeciona obrabiarki, pozycję wiertła względem obrabianego materiału i wartości rejestrów parametrów pomocniczych w strategii adaptacyjnego sterowania posuwem. Rozważano dwa przypadki cyklu wiercenia: wykonanie pojedynczego otworu oraz wykonanie szeregu otworów w jednym cyklu. Testowano pięć strategii sterowania posuwem w trakcie cyklu wiercenia, w tym adaptacyjne sterowanie posuwem i rekurencyjną metodę optymalizacji posuwu. Dla porównania wykonano także otwory tradycyjnymi wiertłami krętymi HSS. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań można stwierdzić, że metoda wiercenia ciernego może być zaliczona do energooszczędnych metod wykonywania otworów w elementach cienkościennych.

**Słowa kluczowe:** energochłonność, optymalizacja procesu, sterowanie adaptacyjne, wiercenie termiczne

## 1. Wprowadzenie

Stale rosnący w ostatnich latach trend wzrostu cen energii oraz równocześnie coraz bardziej rygorystyczne przepisy dotyczące ochrony środowiska doprowadziły przedsiębiorstwa do zwracania większej uwagi na poszukiwania efektywnych energetycznie technik wytwarzania i opracowania kompleksowego podejścia metodologicznego do ilościowej analizy zużycia energii. Badanie energochłonności procesów obróbki mechanicznej i termicznej staje się tematem szeroko obecnym w publikacjach techniczno-naukowych. Coraz większe zainteresowanie tą tematyką wydaje się być uzasadnione, w kontekście zrównoważonego rozwoju, preferującego energooszczędne techniki produkcji, jako jeden z jego filarów. Dużą wagę przykładają się obecnie do stosowania coraz bardziej energooszczędnych maszyn i urządzeń, choć zbyt mało uwagi poświęca się wykorzystaniu potencjalnych oszczędności energetycznych, tkwiących w samych procesach formowania materiału. Tego typu badania są często elementem składowym szerszego, zintegrowanego podejścia do modelowania tzw. śladu węglowego, znanego pod akronimem ERWC

(ang. *Energy-Resource-Waste-Carbon-footprint*) [1]. Obecnie dostępne na rynku mierniki energii, pozwalają na optymalizację kosztów zużycia energii, a w rezultacie ochronę środowiska naturalnego. Zastosowana w miernikach komunikacja sprzyja integracji z wieloma systemami automatyki. W Katedrze Technologii Maszyn i Automatykacji Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej podjęto prace badawcze zmierzające do oceny i optymalizacji procesu wiercenia termicznego pod względem zużycia energii, wypełniając w ten sposób istniejącą lukę badawczą. W tym celu zbudowano stanowisko badawcze wyposażone w układ pomiarowy poboru mocy oraz opracowano metodę analizy czynników energochłonnych, pozwalającą na ilościowe określenie ich wpływu.

Wiercenie termiczne (cierne, przepływowe) [2] jako alternatywna metoda wykonywania otworów formowanych na gorąco w arkuszach blach, rurach i cienkościennych kształtownikach, wykonanych z plastycznych stopów metali, wychodzi naprzeciw współczesnym tendencjom w budowie maszyn, dążącym do redukcji wagi projektowanej konstrukcji [3]. W trakcie procesu wiercenia termicznego, w wyniku tarcia między wiertłem a przedmiotem obrabianym, następuje wzrost temperatury, co umożliwia odkształcania plastyczne przedmiotu obrabianego w obszarze działania wiertła, najczęściej wykonanego z węgla wolframu. Przemieszczony materiał formuje tuleję i kołnierz (Rys. 1), wydłużając znacząco długość formowanego otworu i w konsekwencji także czynną długość gwintu, gwarantując mocniejsze złącze śrubowe. W typowym cyklu procesu wiercenia termicznego występują następujące etapy (Rys. 2): a) szybki

### Autor korespondujący:

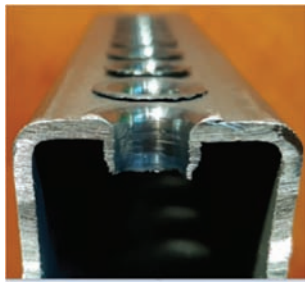
Paweł Błaszczak, p.blaszczak@vp.pl

### Artykuł recenzowany

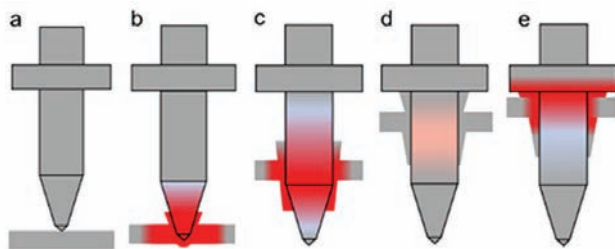
nadesłany 19.12.2022 r., przyjęty do druku 12.02.2023 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Przekrój otworu wykonanego wierceniem termicznym  
Fig. 1. Cross-section of a hole made by thermal drilling



Rys. 2. Kolejne etapy formowania otworu wiertłem termicznym  
Fig. 2. The next stages of hole formation with a thermal drill

dobieg do punktu początkowego; b) wstępne zagłębianie się w materiał w celu uplastycznienia materiału; c) kształtowanie tulei wyjściowej; d) ruch jałowy wynikający z długości wiertła; e) kształtowanie kołnierza. Istnieje jednak kilka odmian takiego zabiegu. Przykładowo kołnierz może zostać usunięty obróbką mechaniczną w jednym cyklu wiercenia termicznego.

Wiercenie termiczne rozwiązuje problemy łączenia cienkościennych elementów konstrukcyjnych w prosty, ekonomiczny, ekologiczny i efektywny sposób. Obecnie technika wiercenia termicznego szybko zdobywa nowe zastosowania, np. w branży motoryzacyjnej, przemyśle lotniczym, w produkcji urządzeń oświetleniowych, przyrządów medycznych, przemyśle meblarskim, urządzeniach wentylacyjnych, itd. Jej główne zalety to zwiększenie długości czynnej otworu, wzmocnienie wytrzymałości połączenia gwintowego, bezodpadowość, wydajność, długa – do ponad dziesięć tysięcy cykli – trwałość narzędzi, możliwość stosowania do wielu różnych materiałów konstrukcyjnych, proste oprzyrządowanie oraz czyste stanowisko pracy.

W aspekcie wyżej wymienionych korzyści wynikających ze stosowania zabiegów wiercenia termicznego należy zadać pytanie: jak kształtuje się energochłonność procesu wiercenia termicznego w odniesieniu do średnicy wiertła, strategii sterowania posuwem oraz w stosunku do wiercenia klasycznymi wiertłami krętymi wykonanymi ze stali szybko tnącej.

Dostępne prace dotyczące procesu wiercenia termicznego nie udzielają odpowiedzi na powyżej sformułowane pytanie. Prace te dotyczą najczęściej badania i modelowania wpływu różnych wielkości wejściowych, w celu lepszego poznania złożonych zjawisk fizyko-chemicznych towarzyszących temu procesowi, tj.: przepływu materiału, rozkładu temperatury, naprężeń i odkształceń, zużycia narzędzia, itd. Rezultaty tych prac badawczych pozwoliły zoptymalizować kształt narzędzia, nadal jednak brak modeli pozwalających optymalizować prędkość posuwu osiowego narzędzia. Złożoność procesu oraz duża liczba różnorodnych zmiennych procesowych [4] nie pozwoliła również do tej pory na opracowanie teoretycznych modeli, na podstawie których można by estymować zapotrzebowanie na energię w procesie. Z tego też powodu, wszystkie do tej pory wygenerowane modele procesu wiercenia termicznego mają charakter cząstkowy, ograniczając się najczęściej do trzech zmiennych wejściowych i od jednego do trzech param-

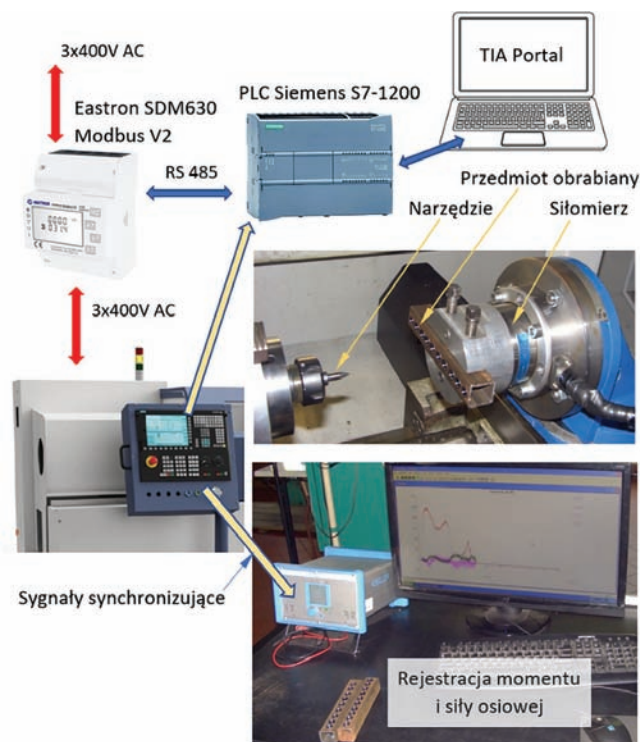
trów wyjściowych. Zakres zmienności parametrów wejściowych w prezentowanych pracach jest często zawężany i nie zawsze uwzględnia technicznie osiągalne i najbardziej ekonomicznie uzasadnione wartości. Wykorzystywane stanowiska badawcze mają istotne ograniczenia techniczne, uniemożliwiające badania szerszego zakresu parametrów procesu. Dodatkowo badania dotyczyły najczęściej zachowania się nowych wiertel, bez analizy wpływu stopnia zużycia wiertła na przebieg i parametry wyjściowe cyklu wiercenia. Do końca niezbadanym zagadnieniem jest analiza termograficzna procesu wykonanego wiertłem nowym i zużytym [5]. Odczuwa się niedostatek badań nad optymalizacją parametryczną procesu wiercenia termicznego dla zwykłej stali oraz stopów aluminium, z punktu widzenia czasu cyklu, trwałości narzędzia, obciążenia napędów obrabiarki czy wydatku energetycznego. Potencjalnego użytkownika interesują aspekty wydajnościowe i ekonomiczne procesu wytwórczego. Byłby zainteresowany więc szybkim doбором warunków obróbki gwarantujących krótki czas cyklu i równocześnie ekonomiczną trwałość narzędzia, wykorzystaniem potencjału produkcyjnego obrabiarki, automatyzacją procesu, kontrolą jego poprawnego przebiegu. Producenci wiertel termicznych informują użytkownika o zalecanych parametrach obróbki, zaznaczając jednocześnie, że dla konkretnego przypadku wymagają one weryfikacji, wraz z rosnącym doświadczeniem użytkownika. Dotychczas w masowej produkcji proces wiercenia termicznego realizuje się na specjalizowanych urządzeniach zazwyczaj wyposażonych w jedną oś przesuwną i jedno elektrowrzeciono. Aby rozszerzyć zakres zastosowania tej techniki i równocześnie zautomatyzować cykl wiercenia należałoby w tym celu adaptować uniwersalne obrabiarki, wyposażając je w proste, programowalne kontrolery procesu, np. PLC. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie brak do tej pory standardowych cykli obróbkowych dedykowanych wierceniu termicznemu.

Optymalizacja parametrów obróbki jest skutecznym sposobem zmniejszenia energochłonności procesu obróbki mechanicznej. W oparciu o podejścia statystyczne, związane z projektowaniem eksperymentów, opracowano różne metody optymalizacji warunków obróbki, opierając się na wyrzykowych badaniach doświadczalnych. Analizę charakterystyki energetycznej procesu obróbki oraz energooszczędną optymalizację parametrów skrawania za pomocą modeli zużycia energii przedstawiono w pracy [7]. Jednak metody te nie mogą być łatwo wykorzystane, gdy cel optymalizacji lub konstrukcja obrabiarki jest modyfikowana. W pracy [8] zaproponowano metodę opartą na symulacji, która wykorzystuje wirtualną obrabiarkę VMT (ang. *Virtual Machine Tool*) do optymalizacji warunków obróbki. Model VMT ma na celu skoncentrowanie się na szacowaniu zużycia energii podczas obróbki i jest rozwijany poprzez replikację rzeczywistych obrabiarek. Wykorzystano algorytm genetyczny do optymalizacji warunków obróbki w celu zmniejszenia zużycia energii. Zmiany w celu optymalizacji lub konstrukcji obrabiarki można wtedy łatwo uwzględnić. Wyniki testów symulacyjnych pokazują, że całkowite zużycie energii przez obrabiarkę zmniejsza się dzięki optymalizacji o kilkanaście procent.

Autorzy zrealizowali program badań mierzący do opracowania inteligentnych strategii sterowania procesem wiercenia termicznego, także z punktu widzenia zużycia energii. Cecha inteligentny jest tutaj rozumiana jako zdolność przystosowania się do zmian. Docelowym efektem tych prac było opracowanie użytecznej, rekurencyjnej metody, umożliwiającej łatwą, w praktycznej realizacji, optymalizację posuwu w cyklu wiercenia termicznego.

## 2. Budowa stanowiska

Stanowisko badawcze do pomiaru zużycia energii w cyklu wiercenia termicznego zostało oparte na tokarce sterowanej nume-

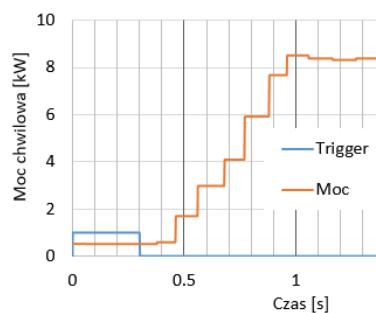


Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego  
Fig. 3. Scheme of the measuring setup

rycznie TUG-56. Obrabiarka ta jest pozbawiona urządzeń pomocniczych, takich jak układ pneumatyczny, hydrauliczny, dodatkowe siłowniki czy układ usuwania wiórów, które są głównymi odbiorcami energii w obrabiarkach. Pompa emulsji obróbkowej, w trakcie cyklu wiercenia termicznego, jest nie używana, więc nie zakłóca wyników pomiarów. Stąd należało oczekiwać, że głównym konsumentem energii w zbudowanym stanowisku będzie napęd wrzeciona głównego.

Układy pomiarowe zużycia energii są budowane najczęściej w oparciu o dedykowane liczniki energii oraz układy PLC. Pozwalają one na kwantyfikację sygnałów przy wysokich częstotliwościach próbkowania. Przykładem może być, przedstawiony w pracy [6], układ pomiarowy oparty o zaawansowany analizator parametrów sieci Siemens Sentron PAC4200. W prezentowanym tutaj stanowisku badawczym jako analizator użyto wielofunkcyjny, trójfazowy, dwukierunkowy licznik energii elektrycznej Eastron SDM630 Modbus V2. Pozwala on m.in. na monitoring energii pobieranej z sieci oraz monitoring energii oddawanej do sieci z uwzględnieniem faz na przyłączy. Zastosowanie powszechnie dostępnego elektronicznego licznika energii pozwoliło ograniczyć złożoność i koszt układu pomiarowego przy porównywalnych parametrach dokładności. Do rejestracji mierzonych wielkości użyto sterownik PLC Siemens S7-1200 z modułem komunikacyjnym CB1241. Wymiana informacji pomiędzy licznikiem a sterownikiem PLC realizowana była magistralą RS-485 za pomocą asynchronicznego protokołu Modbus RTU. Modbus RTU jest najczęściej stosowanym obecnie protokołem w sieciach automatyki przemysłowej. Sterownik odczytywał rejestr licznika zawierający chwilową moc trójfazową jaką obrabiarka obciąża sieć. Przy starcie cyklu wiercenia, układ sterowania obrabiarki wystawiał na wyjściu cyfrowym krótki impuls wyzwalający do sterownika i siłomierza w celu synchronizacji zapisu danych i ułatwienia późniejszej ich analizy. Schemat zbudowanego stanowiska zaprezentowany jest na rysunku 3.

Sterowniki Siemens S7-1200 umożliwiają rejestrację wewnętrznych zmiennych dla każdego cyklu pętli programowej za pomocą narzędzia śledzenia (Traces), zawartego w środowisku programistycznym TIA Portal. W trakcie konfiguracji sterownika użyt-



Rys. 4. Przebieg mocy chwilowej oraz zarejestrowany sygnał wyzwalacza  
Fig. 4. Waveform of the instantaneous power and the recorded trigger signal

kownik wybiera jakie zmienne mają być rejestrowane. Następnie konfigurator przesyła je do sterownika. Zewnętrzny sygnał startu rejestracji lub rozkaz z aplikacji rozpoczynają zapis. Dla każdej próbki zapisany jest znacznik czasowy z dokładnością do nano sekund oraz wartości rejestrowanych zmiennych. Rejestracja realizowana jest sprzętowo przez procesor sterownika do jego wewnętrznej pamięci. Zapis danych można zatrzymać z aplikacji lub zatrzymywany jest automatycznie po zapełnieniu pamięci procesora sterownika PLC. Następnie dane przesyłane są do komputera i możliwy jest eksport danych do pliku w formacie CSV (ang. *Coma Separated Value*) oraz ewentualna ich analiza w arkuszu kalkulacyjnym.

W celu synchronizacji pomiarów, ułatwiających ich późniejszą analizę, układ sterowania obrabiarki wystawia binarnie, poprzez wyjście cyfrowe, sygnał wyzwalacza (Rys. 4), o czasie trwania 0,3 s. Maksymalne opóźnienie zapisu danych ze strony sterownika PLC to jedna pętla programowa. Wynosi ona maksymalnie 3,5 ms, natomiast minimalna częstotliwość wymiany informacji z licznikiem to około 27 Hz, czyli 37 ms. Producent licznika nie podaje czasu i metody uśredniania mocy chwilowej oraz częstotliwość odświeżania rejestrów, ale na podstawie zmiany wartości mocy przy rozpędzaniu wrzeciona czas ten można oszacować na 0,1 s. Nałożenie na siebie trzech działań asynchronicznych powoduje zmienny czas występowania obszaru z taką samą mocą chwilową, co skutkuje na wykresie zmienną szerokość schodka. Na podstawie danych katalogowych licznika maksymalny czas odpowiedzi na skokową zmianę obciążenia wynosi 1 s, a pomiar energii zawiera się w pierwszej klasie dokładności.

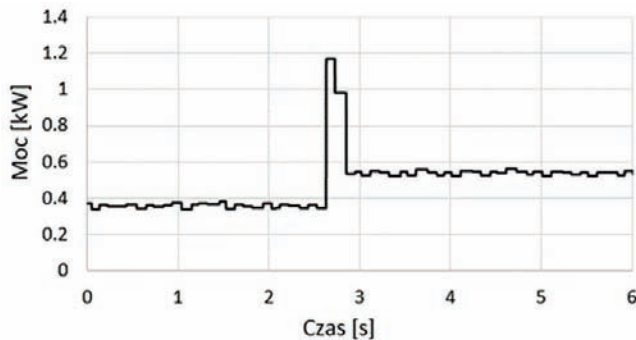
### 3. Analiza energochłonności

Wstępne pomiary obejmowały pomiar energii potrzebnej do zasilania układu sterowania, chłodzenia napędów i sterowania oraz utrzymywania momentu trzymającego w napędach. Moc jałowa obrabiarki użytej w badaniach wynosi około 0,36 kW przy otwartej osłonie i rozbrojonych napędach oraz około 0,54 kW z momentem trzymającym na silnikach (Rys. 5). Po rozpędzeniu wrzeciona do zaprogramowanej wartości 2400 obr./min pobierana moc ulega zmniejszeniu do 1,7 kW (Rys. 6). Podane wartości są specyficzne dla danej obrabiarki i zaprogramowanych obrotów. Warto mieć świadomość jak duże oszczędności energetyczne można odnieść, ograniczając okresy jałowe w czasie eksploatacji stanowiska produkcyjnego. Na wykresie (Rys. 5) widoczny jest chwilowy zwiększony pobór energii przy uzbrajaniu napędów po zamknięciu osłony w obrabiarence.

Do analizy zużycia energii w trakcie procesu przyjęto następujące założenia:

- Energia pobierana przez obrabiarkę w określonym przedziale czasu  $\Delta t$  obliczana jest z zależności (1), gdzie  $P(t)$  jest mocą chwilową zarejestrowaną w tym przedziale czasowym. Przy-





Rys. 5. Moc pobierana przez obrabiarkę w stanie jałowym  
Fig. 5. The power absorbed by the machine tool when idling

rost czasu obliczany jest jako znacznik czasu próbki bieżącej minus znacznik czasu próbki poprzedniej;

$$E = P(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

- Obrabiarka ma możliwość zwrotu energii do sieci elektrycznej podczas hamowania napędów. W obliczeniach energię oddawaną do sieci przyjmuje się ze znakiem ujemnym;
- Energia netto wrzeciona (napęd główny obrabiarki)  $E_W$  jest obliczana wg zależności (2), gdzie  $E_{WR}$  i  $E_{WH}$  oznaczają odpowiednio zmierzoną energię w okresie rozruchu  $T_R$  oraz hamowania w okresie  $T_H$  (wartość ujemna). Czas rozruchu  $T_R$  obliczany jest od opadającego zbocza sygnału wyzwalacza do ustalonego czasu rozpędzania, natomiast czas hamowania odnosi się do okresu od pierwszej do ostatniej zarejestrowanej ujemnej wartości mocy;

$$E_W = E_{WR} + E_{WH} \quad (2)$$

- Energia procesu wiercenia  $E_P$  obliczona jest jako energia pobierana od stałego punktu czasowego po rozpędzeniu wrzeciona do pierwszej, zarejestrowanej wartości ujemnej,
- Energia całkowita cyklu  $E_C$  to całość energii od pierwszej rejestracji po znaczniku czasowym do pierwszej wartości nieujemnej po zatrzymaniu wrzeciona;
- Energia formowania otworu  $E_F$  (3) to energia całkowita wiercenia minus energia całkowita z eksperymentu bez fizycznego wiercenia  $E_{C-NT}$  (wiercenie bez narzędzia),

$$E_F = E_C - E_{C-NT} \quad (3)$$

- Czas formowania otworu liczony jest od styku wiertła z materiałem do zakończenia formowania kołnierza. Czas ten nie obejmuje dobiegu narzędzia i wyprowadzania narzędzia z otworu;
- Czas całkowity (pełnego cyklu) liczony jest od opadającego zbocza wyzwalacza do końca hamowania wrzeciona.

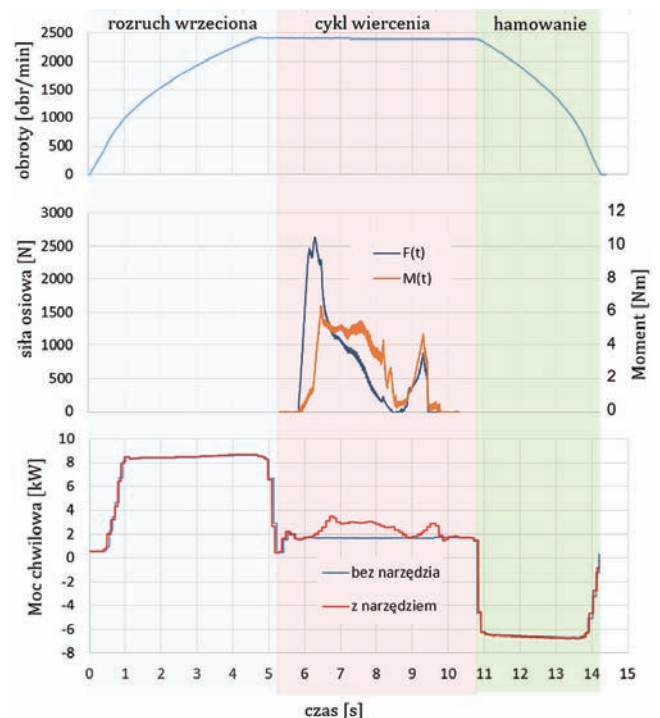
Wzór (4) na energię formowania może być zastosowany do wszystkich badanych strategii wiercenia termicznego z wyjątkiem adaptacyjnego sterowania posuwem. Energia formowania dla cyklu adaptacyjnego  $E_{AC}$  może być jedynie porównywana dla pełnego cyklu z innymi strategiami sterowania posuwem. W ten sposób jesteśmy w stanie określić straty energii  $E_L$  wynikające z braku optymalnej strategii sterowania posuwem:

$$E_L = E_{AC} - E_F, \quad (4)$$

gdzie  $E_F$  jest energią zużytą w innej strategii sterowania posuwem.

Rysunek 6 przedstawia typowy przebieg zapotrzebowania na energię w cyklu wiercenia termicznego. Na wykresie tym przed-

stawione są dwie rejestracje mocy chwilowej obrabiarki podczas wiercenia wiertłem termicznym z wykorzystaniem strategii schodkowej zmiany posuwu oraz taki sam eksperyment bez fizycznego wiercenia, przy zdemontowanym narzędziu. Cały cykl obejmuje rozruch wrzeciona, cykl wiercenia oraz hamowanie wrzeciona. Ruch dosuwowy do materiału powinien rozpocząć się po osiągnięciu zaprogramowanej wartości obrotów wrzeciona roboczego. Właściwy cykl wiercenia obejmuje dobieg narzędzia, wiercenie i wycofanie narzędzia do pozycji wyjściowej. Dopiero po utracie kontaktu narzędzia z przedmiotem celowe jest wyłączenie obrotów wrzeciona. Na wykresie można zaobserwować, że w trakcie braku kontaktu narzędzia, wykresy obciążenia z narzędziem i bez narzędzia pokrywają się. Różnice w poborze mocy występują w obszarach wzrostu momentu obrotowego. Niewielki wzrost poboru mocy, na początku ruchu dosuwowego, jest spowodowany rozpędzaniem napędu osiowego.



Rys. 6. Zapotrzebowanie na moc w trakcie cyklu wiercenia  
Fig. 6. Power demand during a drilling cycle

Na wykresie (Rys. 6) można zaobserwować duży obszar obrazujący pobór energii na rozpędzenie wrzeciona. Środkowa część wykresu przedstawia zróżnicowane zapotrzebowanie na moc w czasie formowania otworu, co wynika z zaprogramowanego posuwu, stanu materiału oraz wymiarów wiertła. Końcowa część przedstawia zwrot energii do sieci przy hamowaniu wrzeciona. Sprawność odzysku energii, obliczana jako stosunek energii odzyskanej przy hamowaniu do energii pobranej na rozpędzenie wrzeciona, wynosi około 50 %. W czasie hamowania część odzyskiwanej energii pobierana jest przez układ sterowania numerycznego obrabiarki.

Wykres zarejestrowanej siłomierzem siły i momentu zawiera typowe cechy procesu wiercenia termicznego, takie jak: szczyt siły osiowej występujący przed szczytem momentu obrotowego oraz jednoczesny wzrost tych wartości w końcowej fazie wykonania otworu, przy formowaniu kołnierza. Algorytm adaptacyjny, podobnie jak strategia sterowania posuwem optymalizowana rekurencyjnie, powodują poszerzenie okresów występowania wartości około szczytowych. Skracza to wydatnie czas procesu, jednocześnie gwarantując nie przekraczanie bezpiecznych wartości obciążenia narzędzia.

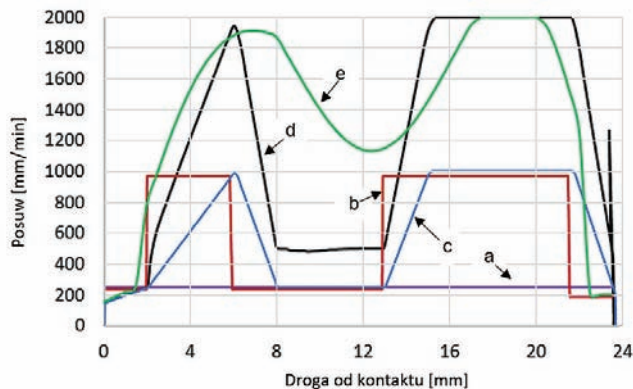
## 4. Testy i wyniki badań

Badania przeprowadzono dla pięciu strategii sterowania posuwem w trakcie cyklu wiercenia:

- Posuw stały;
- Posuw zmienny skokowo (zgodny z zaleceniami producenta wiertła);
- Posuw zmienny liniowo;
- Posuw zmienny adaptacyjnie metodą on-line;
- Posuw optymalizowany rekurencyjnie metodą off-line.

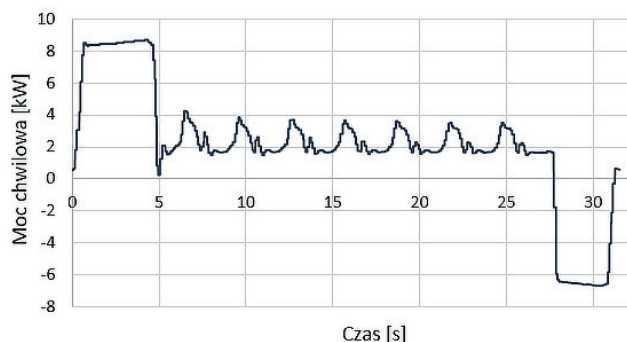
W badaniach wykorzystano wiertła termiczne firmy Strojsen o rozmiarach M5 (4,5 mm), M8 (7,2 mm), M10 (9 mm) oraz wiertło firmy Flowdrill 8.2-long. Producenci wiertel zazwyczaj kodują swoje produkty nie średnicami a przeznaczeniem otworu pod daną średnicę gwintu. Wiertło firmy Flowdrill 8.2-long zostało wykonane na specjalne zamówienie do wykonywania tulei pod sworznię. Do zaprogramowania posuwów zmiennych skokowo wykorzystano wytyczne firmy Flowdrill w postaci tabeli z prędkościami posuwu na poszczególnych etapach procesu wiercenia oraz prędkością obrotową wrzeciona. W badaniach zachowano proporcjonalny wzrost prędkości obrotowej wiertła w miarę zmniejszania się średnicy wiertła.

Rysunek 8 przedstawia wykresy mocy chwilowej dla procesu wiercenia siedmiu otworów w jednym cyklu. Można zauważyć, że kolejne otwory wykonywane są mniejszym nakładem energii. Związane jest to z silnym nagrzewaniem się wiertła w trakcie kolejnych cykli. Część ciepła z rozgrzanego wiertła przechodzi do materiału w miejscu nowego otworu skracając czas na uplastycznienie się metalu i zmniejszając moment hamujący wiertło.

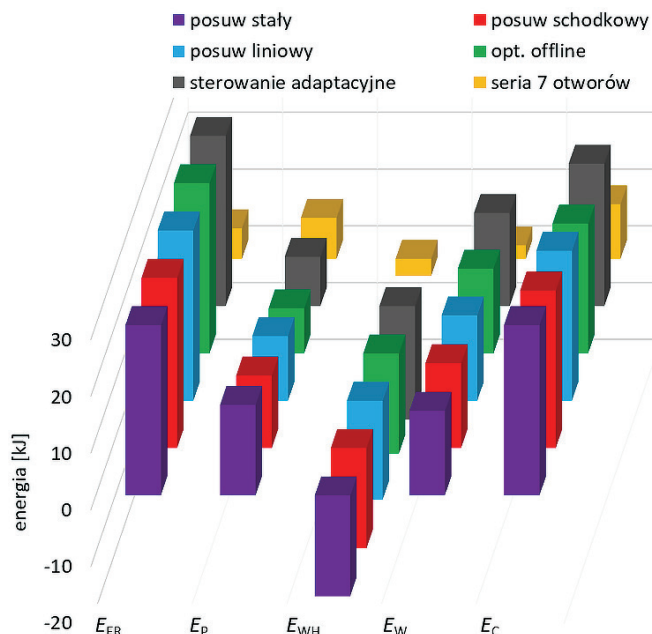


Rys. 7. Przykład przebiegu posuwu dla wiertła ø8.2: (a) posuw stały, (b) posuw zmienny skokowo, (c) posuw zmienny liniowo, (d) posuw zmienny adaptacyjnie, (e) posuw ustalony rekurencyjnie

Fig. 7. An example of the feed pattern for a ø8.2 drill: (a) constant feed, (b) step-variable feed, (c) linear-variable feed, (d) adaptive variable feed, (e) recursively determined feed



Rys. 8. Pobór mocy dla sekwencji wiercenia siedmiu otworów  
Fig. 8. Power consumption for a 7-hole drilling sequence



Rys. 9. Pobór energii dla różnych strategii sterowania posuwem  
Fig. 9. Energy consumption for different feed control strategies

Rysunek 9 prezentuje zbiorcze wyniki przeprowadzonych pomiarów zużycia energii dla różnych strategii sterowania posuwem. Najlepszy rezultat uzyskano dla strategii sterowania posuwem ustalonym rekurencyjnie, w pierwszych kilku nastu cyklach wiercenia. Wynik ten determinuje najniższa energia procesu  $E_p$ . Ostatni (żółty) szereg przedstawia zużycie energii odpowiadające uśrednionej wartości dla jednego otworu, w cyklu wiercenia kolejno siedem otworów, z aktywnym sterowaniem adaptacyjnym. Oprócz oczywistych korzyści wynikających z braku konieczności każdorazowego rozruchu i hamowania wrzeciona, dochodzą kolejne. Rozgrzane wiertło łatwiej formuje materiał w pierwszej fazie wiercenia, zmniejsza się także znacząco liczba szoków temperaturowych narzędzia, co powinno mieć pozytywny wpływ na jego trwałość.

## 5. Wnioski

- Zaproponowany układ pomiarowy pozwolił na analizę zapotrzebowania na moc w cyklu wiercenia termicznego, pozwalając zarazem na ocenę różnych strategii sterowania posuwem pod względem zużycie energii.
- Energia netto obliczona z licznika energii jest zbliżona do energii obliczonej z zapisów siłomierza. Można oszacować, że sprawność przekształcania energii elektrycznej na mechaniczną wynosi około 90 %.
- Zastosowanie optymalizacji posuwu metodą adaptacyjną (on-line) lub rekurencyjnie (off-line) pozwala na obniżenie zużycia energii 7–19 %.
- Efektywność energetyczna wiercenia termicznego zdecydowanie wzrasta w przypadku cyklu wiercenie kolejno kilku otworów, bez zatrzymania wrzeciona obrabiarki.
- Bilans energii na rozpędzenie i hamowanie wrzeciona był zbliżony we wszystkich próbach i wynosił średnio 16,6 kJ, co stanowi ponad pięciokrotność energii netto procesu. Energia oddawana do sieci dochodzi do 50 % energii pobieranej z sieci.
- Różnica energii całkowitej w poszczególnych próbach, w stosunku do różnicy czasów cykli, daje nam moc strat równą około 1,93 kW, co jest zbliżone do mocy obrabiarki w cyklu jałowym, wynosząca ok. 1,70 kW. Pozwala to wnioskować, że optymalizacja posuwu pozwala zredukować zużycie ener-

gii w procesie wiercenia termicznego, głównie (w 90 %) ze względu na skrócenie czasu cyklu, a tym samym zmniejsza straty na podtrzymanie obrotów wrzeciona oraz zasilanie układu sterowania i chłodzenia.

## Bibliografia

1. Afsharizand B., *Investigation on quantitative assessment of energy consumption and the associated sustainability performance of CNC milling machines*, PhD Theses, Brunel University School of Engineering and Design, 2012.
2. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A., Brząkała P., Paś M., *Technologia floudrill wiercenia i gwintowania bezwiórowego*, „Stal Metale & Nowe Technologie”, Nr 5-6/2018, 27–32.
3. Eliseev A., Kolubaev E., *Friction drilling: a review*, “The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, Vol. 116, 2021, 1391–1409, DOI: 10.1007/s00170-021-07544-y.
4. Stryczek, R., Błaszczak P., *Optimal feed rate control strategies for friction drilling*, “Facta Universitatis. Ser. Mechanical Engineering”, Vol. 18, No. 4, 2020, 545–564, DOI: 10.22190/FUME200510021S.
5. Szwałek K., Nadolny K., *Characteristics of tool used in the friction drilling method*, “Journal of Mechanical and Energy Engineering”, Vol. 2, No. 2, 2018, 109–114, DOI: 10.30464/jmee.2018.2.2.109.
6. Lenz J., Kotschenreuther J., Westkaemper E., *Energy Efficiency in Machine Tool Operation by Online Energy Monitoring Capturing and Analysis*, “Procedia CIRP”, Vol. 61, 2017, 365–369, DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.202.
7. Chen X., Li C., Tang Y., Li L., Li H., *Energy efficient cutting parameter optimization*, “Frontiers of Mechanical Engineering”, Vol. 16, No. 2, 2021, 221–248, DOI: 10.1007/s11465-020-0627-x.
8. Lee W., Kim S.H., Park J., Min B.K., *Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction*, “Journal of Cleaner Production”, Vol. 150, 2017, 352–360, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.178.

## Measurement of Energy Consumption During a Thermal Drilling Cycle

**Abstract:** The work presents the issue of measuring and analyzing energy consumption during a thermal drilling cycle. A research stand based on a CNC lathe was presented, the equipment of which was an experimental energy consumption system based on an electricity meter and a force gauge. The measuring devices used allowed for recording the load on the power grid, the load on the machine tool drives, the axial force, the drill braking torque, the current rotation of the machine tool spindle, the position of the drill in relation to the workpiece and the values of auxiliary parameter registers in the strategy of adaptive feed control. Two cases of a drilling cycle were considered: making a single hole and making a series of holes in one cycle. Five feed control strategies were tested during the drilling cycle, including adaptive feed control and a recursive feed optimization method. For comparison, holes were also made with traditional HSS twist drills. Based on the obtained test results, it can be concluded that the friction drilling method can be included in the energy-saving methods of making holes in thin-walled elements.

**Keywords:** energy consumption, process optimization, adaptive control, thermal drilling

### mgr inż. Paweł Błaszczak

p.blaszczak@vp.pl

ORCID: 0000-0003-1770-8243

Doktorant na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej. Do zainteresowań należą: automatyka przemysłowa, systemy wizyjne, sztuczna inteligencja, projektowanie urządzeń elektronicznych, programowanie robotów przemysłowych oraz druk 3D. Aktualnie prowadzi badania z wiercenia termicznego i energochłonności procesów wytwórczych.



### dr hab. inż. Roman Stryczek, prof. AT-H

rstryczek@ath.bielsko.pl

ORCID: 0000-0003-1662-972X

Profesor w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Specjalista w zakresie komputerowego projektowania procesów wytwórczych, optymalizacji parametrycznej i strukturalnej, elastycznego programowania obrabiarek, sterowania adaptacyjnego obrabiarek, sieci Petriego oraz metod sztucznej inteligencji w wytwarzaniu maszyn.

