

Niekonwencjonalne metody cięcia we współczesnych procesach wytwórczych

MICHAŁ STYP-REKOWSKI, IVAN L. OBORSKY, OLEG POLISHCHUK*

W artykule przedstawiono niekonwencjonalne metody przecinania materiałów konstrukcyjnych realizowanych we współczesnych procesach wytwarzania. Do tej grupy zaliczono przecinanie strugą wodną i wodno-ścierną a także przecinanie elektroerozyjne. Wskazano cechy pozytywne tych metod oraz kryteria jakimi powinno kierować się przy wyborze najlepszego sposobu przecinania.

MIEJSCE CIĘCIA W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH

Cięcie to prawdopodobnie najliczniej występująca operacja technologiczna we wszystkich procesach wytwórczych. Prawdopodobnie, gdyż w literaturze brak jest rezultatów badań dotyczących statystyki tego zagadnienia. Przyjmując, że procesy wytwarzania mogą być realizowane trzema technikami: ubytkową, bezubytkową i przyrostową [6], cięcie występuje praktycznie prawie we wszystkich procesach, w których wykorzystywane są dwie pierwsze techniki obróbki. W trzeciej z nich, możliwe jest wyeliminowanie cięcia, gdyż w jednej operacji technologicznej można wykonać elementy współpracujące ze sobą ruchowo. Przykład takiego elementu przedstawiono na rys. 1.

W obróbkach ubytkowych można wyróżnić trzy zasadnicze grupy operacji cięcia: obróbkę skrawaniem, obróbkę erozyjną oraz sposoby termiczne, natomiast w grupie obróbek bezubytkowych

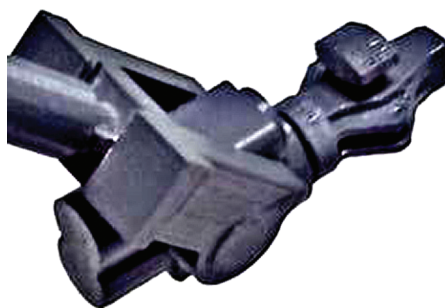
dominujące jest wykrawanie – jedna z operacji obróbki plastycznej.

Cięcie materiału na elementy o oczekiwanych gabarytach (oczywiście z pewnymi naddatkami obróbkowymi) stanowi w wielu przypadkach pierwszą operację technologiczną, po której następuje ich obróbka kształtująca. W tych przypadkach stan powierzchni po cięciu jest zagadnieniem drugorzędnym, gdyż

powierzchnie te są obrabiane, nieraz wielokrotnie.

Cięcie może też służyć do nadania odpowiednich wymiarów elementom stanowiącym półprodukt, np. długości prętom lub profilom, z których wykonuje się następnie produkt końcowy, co ma często miejsce w produkcji konstrukcji stalowych: różnego rodzaju struktur przestrzennych lub płaskich.

Cięcie może też być operacją kończącą cały proces wytwórczy (czasami jeden z jego kolejnych etapów), np. przy obróbce elementów na automatach tokarskich, w których materiał w formie pręta wprowadzany jest do strefy obróbki za pomocą podajnika. W takim przypadku stan powierzchni po cięciu jest istotny.



Rys. 1. Przegub o dwóch stopniach swobody wykonany w całości techniką przyrostową [3]

TECHNIKI I SPOSOBY PRZECINANIA

We wszystkich wymienionych wyżej przykładach w operacjach cięcia najczęściej wykorzystywana jest obróbka skrawaniem, a więc technika ubytkowa. Polega ona na usuwaniu kolejnych warstw materiału przez ostrza skrawające.

W procesach wytwórczych, w których wykorzystywana jest obróbka plastycz-

* Prof. dr hab. inż. Michał Styp-Rekowski – Bydgoska Szkoła Wyższa, m.styprekowski@wp.pl, prof. Ivan L.Oborsky – Techniczny Instytut Kijów (Ukraina), prof. Oleg Polishchuk – Narodowy Uniwersytet Techniczny Chmielnicki (Ukraina).

na cięcie materiału realizowane jest jako wykrawanie (wycinanie), polegające na przerywaniu spójności materiału w zdefiniowanych miejscach i uzyskaniu w ten sposób kształtu odpowiadającego zarysowi użytych narzędzi (w przypadku obróbki plastycznej – stempla i matrycy). Przecięcie materiału następuje wskutek działania siły mechanicznej. Nacisk powodujący przekroczenie granicy dopuszczalnych odkształceń sprężystych wywołuje plastyczne płynięcie materiału, jego pęknięcia, a w rezultacie – całkowite rozdzielanie materiału. Takie sposoby cięcia zaliczane są do technik bezubytkowych.

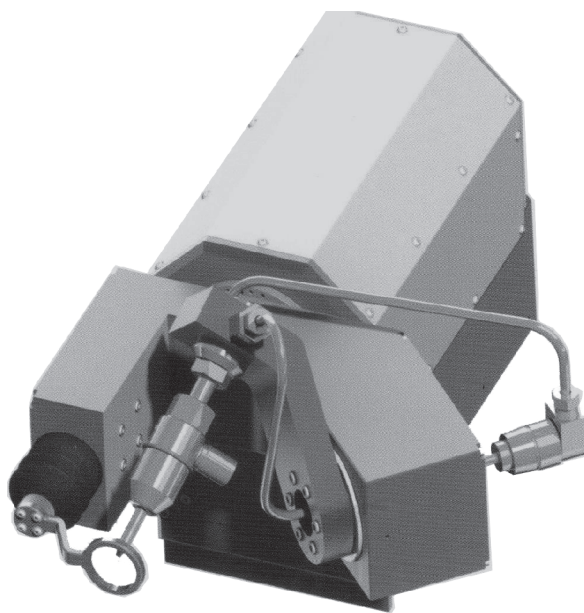
Postęp obserwowany w inżynierii materiałowej, a także ciągłe dążenie do zwiększenia efektywności procesów wytwórczych powoduje, że istniejące, znane metody nie zawsze są wystarczająco dobre (efektywne), dlatego też poszukuje się sposobów aby tę sytuację poprawić. Dotyczy to również operacji cięcia. W początkowym okresie ich stosowania opracowane nowe metody cięcia określane są jako niekonwencjonalne lub nietradycyjne.

NIEKONWENCJONALNE METODY CIĘCIA

Do grupy niezbyt jeszcze często stosowanych metod cięcia zaliczyć można przecinanie strugą wodną lub wodno-ścierną oraz przecinanie elektroerozyjne (EDM) lub hybrydowe z udziałem EDM [15]. Obserwowane od dłuższego czasu rosnące zainteresowanie wymienionymi metodami wynika przede wszystkim z ich licznych zalet.

Cięcie strugą wodną i wodno-ścierną

Prezentowane w tym fragmencie opracowania metody w literaturze fachowej oznaczane są akronimami pochodzącymi z języka angielskiego, odpowiednio: WJM (*Water Jet Machining*) oraz AWJM (*Abrasive Water Jet Machining*). Cięcie skoncentrowaną strugą, zarówno wodną jak i z dodatkiem ścierniwa, ma jedną, podstawową zaletę. Metodami tymi można efektywnie obrabiać praktycznie wszystkie materiały konstrukcyjne: od gumy i miękkich tworzyw organicznych, poprzez wszelkiego rodzaju metale po twardą ceramikę. W celu zwiększenia efektywności obróbki – zwłaszcza ma-



Rys. 2. Głowica tnąca Accustream z możliwością regulacji położenia wylotu strugi z dyszy [10]



Rys. 3. Element z surowca mineralnego wykonany metodą AWJM

teriałów twardych, do wody dodawane jest ścierniwo. Narzędziem w tej obróbce jest wysokoenergetyczna wiązka wody generowana i kształtowana w specjalnej głowicy roboczej, w której następuje mieszanie wody i ścierniwa – rys. 2. Mieszanina wody i ścierniwa wypływa z głowicy pod dużym ciśnieniem (do 600 MPa) przez dyszę o małej średnicy (dziesiąte części milimetra).

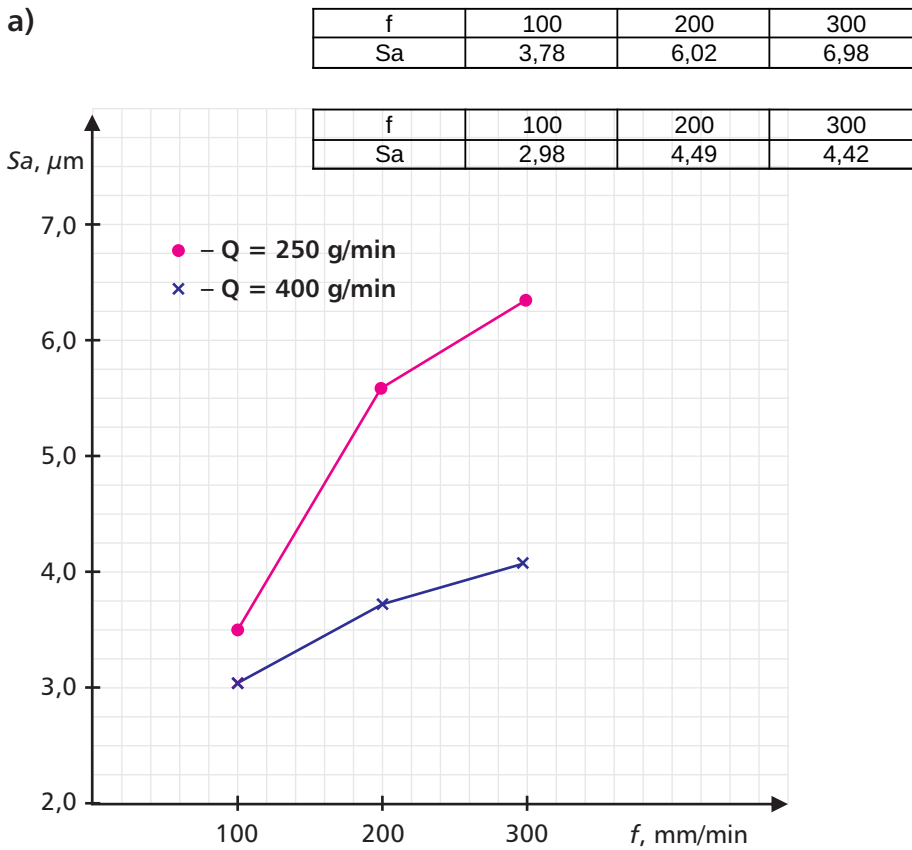
Metodą tą można obrabiać przedmioty o zarysie prosto- lub/i krzywoliniowym, przy czym jak wykazały badania opisane w pracy [1], w tym drugim przypadku obserwuje się pogorszenie dokładności geometrycznej cięcia, zwłaszcza gdy obrabiany jest materiał o dużej grubości. Przykład elementu wykonanego metodą AWJM przedstawiono na rys. 3.

Efektywność przecinania strugą wodną determinuje wiele czynników, z których najistotniejsze to:

- ciśnienie strugi,
- średnica dyszy wylotowej,
- posuw,
- odległość wylotu strugi od powierzchni przecinanego materiału.

W przypadku przecinania hydrościernego (AWJM), a więc mieszaniną wody i ścierniwa, dodatkowymi czynnikami mającymi wpływ na efektywność operacji przecinania są:

- rodzaj zastosowanego ścierniwa,
- jego granulacja,
- wydatek ścierniwa.



Wartości parametrów, przy których uzyskuje się optymalną efektywność cięcia zależą oczywiście także od rodzaju przecinanego materiału. Wzajemne relacje między niektórymi z wymienionych wyżej czynnikami przedstawiono na rys. 4.

Z analizy przytoczonych wykresów wynika, że zwiększanie posuwu powoduje początkowo szybkie zwiększanie się parametru Sa, które następnie ulega spowolnieniu. Zmiana wartości ciśnienia strugi w badanym zakresie ma mniejszy wpływ na chropowatość. Przedstawione wykresy dotyczą przecinania stali HARDOX [14], lecz taki obraz relacji potwierdzają także wyniki innych badań, np. [4, 5, 11,13]. Bardzo istotny wpływ na rezultaty cięcia ma ponadto odległość końcówki dyszy od powierzchni przecinanego elementu. Na rys. 5 przedstawiono wpływ tej odległości / na kształt powierzchni cięcia.

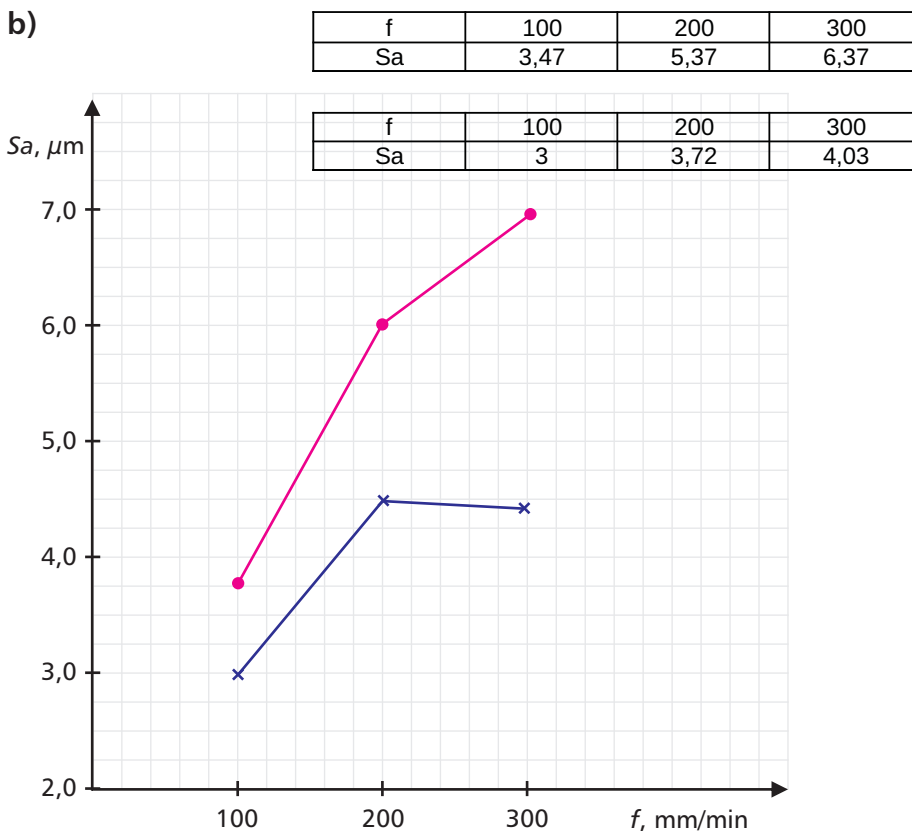
Taki obraz zmian ma uzasadnienie w fakcie, że wypływająca z dyszy struga ma kształt stożkowy, co powoduje, że jej średnica w chwili kontaktu z powierzchnią jest większa im większa jest odległość od niej. Większe wartości ciśnienia powodują z kolei to, że erozja materiału następuje głębiej.

Cięcie metodami AWJM oraz WJM znajduje zastosowanie do elementów o gabarytach małych jak i dużych. Przedstawiona na rys. 6 obrabiarka, w wersji największej w typoszeregu ma stół roboczy o wymiarach 4000 × 6000 mm

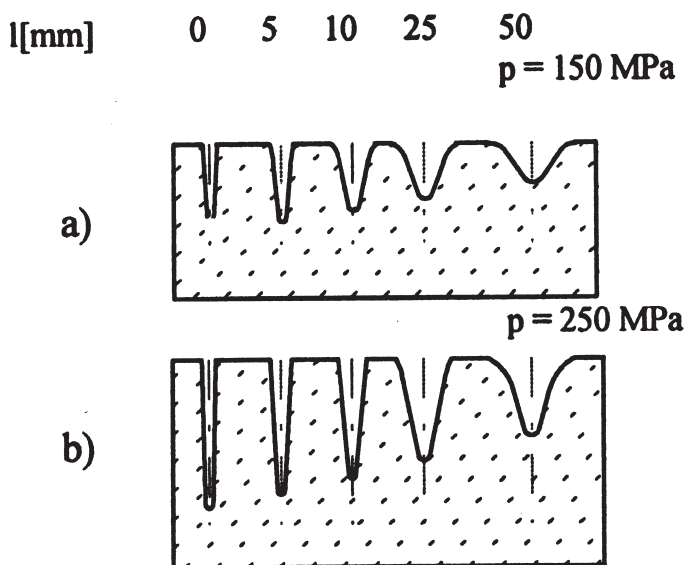
Wymiary stołu roboczego umożliwiają nie tylko obróbkę elementów wielkogabarytowych [2], lecz dzięki możliwości zainstalowania na belce prowadzącej dodatkowych głowic, a także zastosowanym elastycznym systemom sterowania mogą one być również bardzo przydatne w powtarzalnej obróbce elementów.

W celu jeszcze większej poprawy efektywności przecinania strugą wodno-ścieraną opracowano obrabiarki hybrydowe. W firmie Eckert opracowano przecinarkę, w której do obróbki (cięcia) materiału wykorzystuje się dwie technologie [8]:

- cięcie plazmą, a więc topienie i usuwanie roztopionego materiału ze szczeliny silnie skoncentrowanym łukiem plazmy,
- cięcie AWJM.



Rys. 4. Relacje między posuwem f a parametrem chropowatości S_a przy różnych masowych natężeniach przepływu Q , dla ciśnień roboczych strugi: a) $p = 350$ MPa, b) $p = 400$ MPa wg [14]



Rys. 5. Kształt powierzchni przecinanej w funkcji odległości dyszy l od powierzchni przecinanej, przy ciśnieniu: a) $p = 150 \text{ MPa}$, b) $p = 250 \text{ MPa}$ [1]



Rys. 6. Obrabiarka Mach 500 Flow Waterjet [9]

Takie synergiczne połączenie tych dwóch technologii pozwala znacząco skrócić czas cięcia (ok. 50% w stosunku do cięcia AWJM), zachowując przy tym korzyści jakie ze stosowania AWJM wynikają.

Cięcie elektroerozyjne

Erozję wspomaganą prądem elektrycznym także wykorzystuje się w operacjach cięcia. Należy zauważyć, że obróbki z tej grupy mogą mieć charakter ubytkowy jak i przyrostowy [12]. W zbiorze technologii ubytkowych stosowanych w przecinaniu materiałów konstrukcyjnych najczęściej wykorzystywane są:

- przecinanie anodowo-mechaniczne AMM (*Anodic Mechanical Machining*),

– elektroerozyjne przecinanie elektrodą drutową WEDM (*Wire Electrodischarge Machining*).

Jak wszystkie metody elektro-erozyjne, te wymienione wyżej także mają jedno podstawowe ograniczenie: można je stosować jedynie w odniesieniu do tworzyw konstrukcyjnych (metali) przewodzących prąd elektryczny, a wynika to z mechanizmu obróbki – rys. 7.

Przedmiot obrabiany podłączony jest do dodatniego bieguna źródła zasilania prądem elektrycznym stanowi więc anodę. Cienka (ok. 1 mm) tarcza jest katodą. Pod wpływem prądu, w środowisku nieprzewodzącego elektrolitu zachodzi erozja roztwarzająca materiał ciętego elementu. Elektrolit doprowa-

dzany do strefy obróbki, wspomagany przez wirującą tarczę usuwa z niej mechanicznie produkty erozji, zapobiegając w ten sposób przed zvarciami w strefie, które w znaczący sposób pogarszają intensywność procesu, a także jakość przecinanych powierzchni. Doprowadzane medium ma ponadto za zadanie działanie dejonizacyjne w szczelinie oraz chłodzenie, dlatego też tak istotne jest jego skuteczne doprowadzenie do strefy obróbki i odprowadzenie z niej.

Podczas procesu przecinania płyt lub prętów wirująca jest tarcza, natomiast przy przecinaniu prętów obrotowych, wirować mogą obydwa elementy, tzn. tarcza i przecinany pręt.

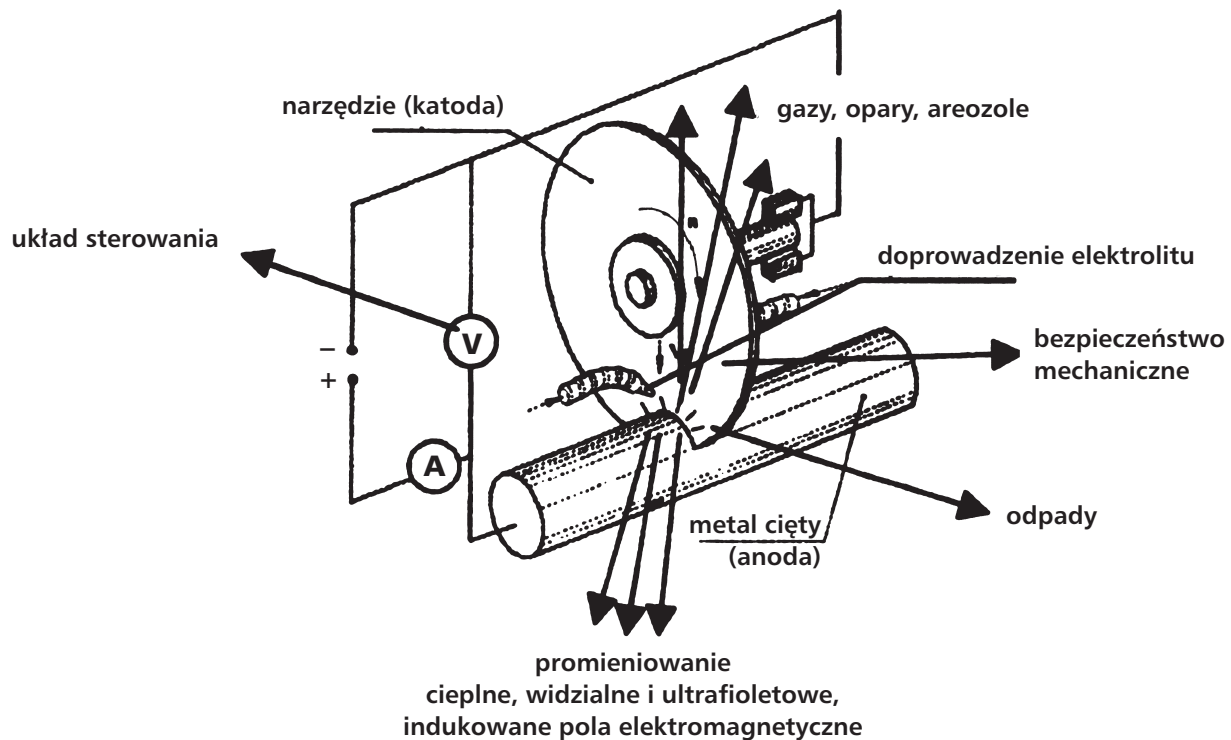
Efektywność procesu przecinania anodowo-mechanicznego determinują przede wszystkim poniższe czynniki:

- cechy przecinanego materiału:
 - struktura i skład chemiczny,
 - twardość,
 - właściwości fizyczne;
- geometryczne cechy konstrukcyjne materiału:
 - gabaryty,
 - kształt;
- wymagania dotyczące przecinanej powierzchni:
 - chropowatość,
 - struktura;
- cechy procesu:
 - licznosc produkcji,
 - ekonomicznosc,
 - mozliwosc automatyzacji procesu.

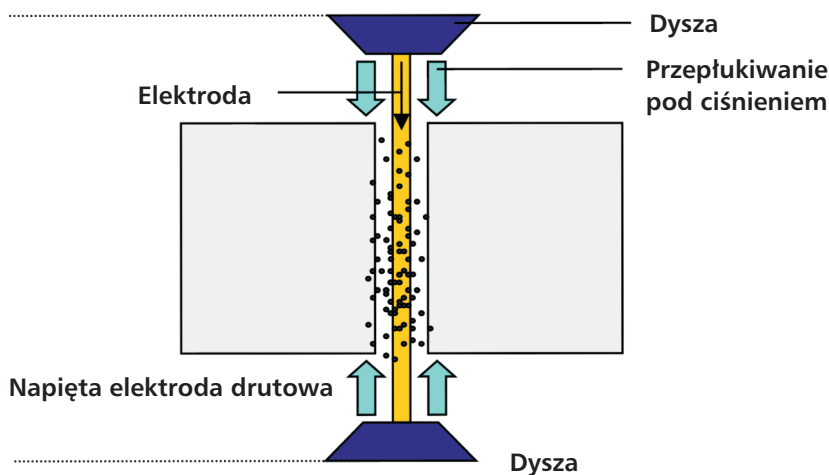
Są to czynniki, które należy uwzględniać także przy innych metodach przecinania, jednakże w iposzczególnych przypadkach waga tych czynników, ich znaczenie może być inne.

Erozyjne cięcie elektrodą drutową

Cięcie tą metodą polega na roztwarzaniu materiału obrabianego za pomocą erozji wspomaganej prądem elektrycznym i następnie usuwanie cząstek tego



Rys. 7. Czynniki istotne w obróbce anodowo-mechanicznej [7]



Rys. 8. Mechanizm obróbki WEDM

materiału za pomocą medium, doprowadzanego do strefy roztwarzania. Najczęściej jest nim zdejonizowana woda o przewodności mniejszej niż $15 \mu\text{S}/\text{cm}$. Mechanizm tej obróbki przedstawiono schematycznie na rys. 8.

Materiał cięty, podobnie jak w metodzie opisaney wyżej jest podłączony do dodatniego bieguna źródła prądu elektrycznego, jest więc w tym układzie anodą, natomiast elektroda drutowa stanowi w tym układzie katodę. Elektroda w for-

mie drutu o średnicy $0,02 \div 0,50 \text{ mm}$, przewijana jest z jednego bębna na drugi, przemieszczając się względem przecinanego materiału z prędkością $0,5$ do $20 \text{ m}/\text{min}$. Elektroda wykonana jest z mosiądzu, miedzi, wolframu lub molibdenu. W celu poprawy cech elektrycznych drut może być pokryty powłoką, np. ocynkowany mosiądz. Elektrolit podawany jest przemiennie z dyszy górnej lub dolnej – rys. 8, co powoduje lepsze usuwanie roztworzonych cząstek materiału ze strefy obróbki.

W obróbce WEDM drut jest elektrodą uniwersalną, dzięki temu nie trzeba wykonywać elektrod o skomplikowanych kształtach – wycinany kształt generowany jest numerycznie. W celu uzyskania oczekiwanej dokładności kształtu przecinanej powierzchni drut musi być napięty z odpowiednią siłą. W zależności od kształtu przecinanej powierzchni napięcie to mieści się w zakresie $(5; 20)\text{N}$.

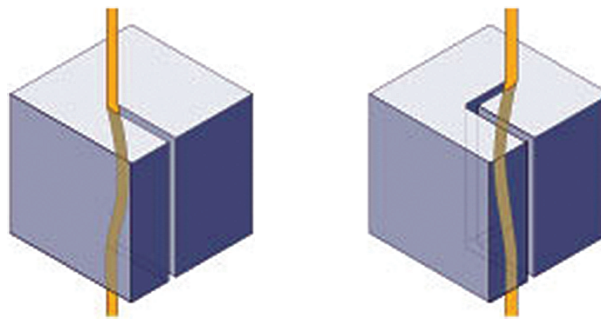
W przypadku przecinania powierzchni płaskiej niedostateczne napięcie elektrody nie pogarsza praktycznie dokładności obróbki. Wpływ ten pojawia się natomiast przy nieliniowej trajektorii przecinania – rys. 9.

Szerokość szczeliny cięcia tą metodą jest o kilka mikrometrów większa niż średnica elektrody drutowej, a jej dokładność zależna jest od zastosowanych parametrów obróbki.

Współczesne obrabiarki WEDM wyposażone są w zaawansowane układy sterowania numerycznego. Jako efekt niezależnego przemieszczania się głowic prowadzących drut (górnej i dolnej). możliwe jest wykonanie skomplikowanych powierzchni. Pochylenie drutu podczas wycinania może być zmienne w czasie i dochodzić nawet do $\pm 45^\circ$.

Ponieważ w przecinaniu WEDM istnieje potencjalnie duże prawdopodobieństwo zerwania się drutu podczas obróbki, obrabiarki te mają automatyczną procedurę przewlekania drutu w przypadku jego zerwania.

Należy w tym miejscu wspomnieć, że przecinanie metodami elektroerozyjnymi znajduje zastosowanie w dynamicznie obecnie rozwijających się: mikro- i nanotechnologii.



Rys.9. Odchyłki kształtu mogące wystąpić w obróbce WEDM jako skutek nieodpowiedniego napięcia

PODSUMOWANIE

Powyżej przedstawiono jedynie dwie techniki cięcia materiałów konstrukcyjnych, które obecnie uznawane są jako niekonwencjonalne lub nietradycyjne. Na wstępie zaznaczono też, że cięcie jest jedną z najczęściej realizowaną operacją technologiczną, co spowodowało, że znanych jest bardzo wiele sposobów ich realizacji. Wybór metody właściwej w danym zastosowaniu jest więc zagadnieniem złożonym, a w podjęciu prawidłowej decyzji mogą być pomocne poniższe wskazówki. W wyborze powinno uwzględnić się takie czynniki jak:

- rodzaj materiału – w odniesieniu do materiałów nieprzewodzących prąd elektryczny, nieprzydatne są wszystkie metody erozyjne,
- grubość materiału – do 6 mm przydatny jest laser, od 30 do 200 mm efektywna jest technika strumieniowa (WJM lub AWJM), zaś powyżej 200 mm przydatne są metody cięcia termicznego oraz erozyjnego,
- wydajność – najlepszą wydajność i jakości wykonania uzyskuje się przecinając materiał metodami WEDM oraz metodami strumieniowymi,
- koszty – ze znanych metod przecinania najbardziej opłacalną, tj. zapewniającą nieduże koszty obróbki i eksploatacji sprzętu jest technika tlenowa,
- wpływ ciepła – gdy obrabiany materiał jest czuły na ciepło, najlepszą metodą jest niewątpliwie cięcie wodne.

Podane wyżej czynniki są jedynie przykładowe i z pewnością nie wyczerpują zagadnienia. Najczęściej przy wyborze metody cięcia niezbędne jest uwzględnienie jednocześnie wielu czynników

i wówczas wybór jest czynnością zdecydowanie trudniejszą.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono rozważania dotyczące przecinania w ograniczonym zakresie. Postęp przede wszystkim w inżynierii materiałowej powoduje, że powstają nowe metody obróbki, w tym także w zakresie przecinania i te, które dzisiaj uznawane są jako niekonwencjonalne, tracą swój charakter, a w ich miejsce pojawiają się nowe.

Literatura

1. Borkowski J., Gul J., Chudy J., Reczko M.: Badania procesu liniowego i kształtowego cięcia materiałów konstrukcyjnych wysokoenergetyczną strugą hydrościerną. Materiały konferencji EM'97 (*Electromachining*), Bydgoszcz – Golub Dobrzyń 1997, s. 107 ÷ 114.
2. Bromberek F, Matuszewski M., Styp-Rekowski M, Węgrzyniak T.: Obróbka elementów wielkogabarytowych. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo POZKAL, Inowrocław 2022.
3. Falkowski P.: Druk 3D w aspekcie zalet i opłacalności. *Automatyka* nr 4/2021, s. 40 ÷ 42.
4. Hashish M.: Economics of abrasive waterjet cutting at 600 MPa pressure. *Proceedings of WJTA American Waterjet Conference*. Houston, Texas, 2005, pp 356 ÷ 370.
5. Hashish M.: Waterjet cutting at-600 MPa. *17th International Conference on Water Jetting – Advances and Future Needs*. Mainz, Germany, 2004, pp. 47 ÷ 60.
6. Kosmol J. (red.): Techniki wytwarzania. *Obróbka wiórowa i ścierna*. Wydaw-

nictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.

7. Kowalski S., Wieczorowski K.: Ekologiczne aspekty procesów zgrubnego stykowego przecinania na przykładzie cięcia anodowo-mechanicznego. *Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Rolniczej* z. 225. Bydgoszcz 2000, s. 69 ÷ 75.
8. Materiały firmy Eckert (Polska).
9. Materiały firmy Flow (USA).
10. Materiały firmy Kimla (Polska).
11. Ohman J.L.: Abrasive: their characteristics and effect on waterjet cutting. *7th American Waterjet Conference*, Seattle, Washington, USA, 1993, pp. 363 ÷ 374.
12. Ozimina D., Radek N.: Modyfikowanie cech warstwy wierzchniej. *Obróbka Metalu* nr 3/2021, s. 38-43.
13. Perec A.: Przecinanie tekstolitu wysokoenergetyczną strugą hydrościerną o obniżonym ciśnieniu. w: Styp-Rekowski M. (redakcja): *Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii*. Wydawnictwo Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Bydgoszcz 2003, s. 217 ÷ 225.
14. Perec A.: Wpływ głównych parametrów wysokociśnieniowej strugi wodno-ściernej na jakość powierzchni przeciętej stali HARDOX 500. *Obróbka Metalu* nr 2/2021, s. 34 ÷ 39.
15. Styp-Rekowski M.: Obróbki hybrydowe i nietradycyjne jako uzupełnienie zbioru technik wytwarzania skoncentrowanymi nośnikami energii. w: Styp-Rekowski M. (redakcja): *Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii*. Wydawnictwo Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Bydgoszcz 2003, s. 213 ÷ 216.