

# Wybrane zagadnienia technologii cięcia plazmą

PAWEŁ ADAMCZYK, MAŁGORZATA SŁOMION, ANDRZEJ WOJCIECHOWSKI,  
MACIEJ MATUSZEWSKI, OLEG POLISHCHUK

W artykule przedstawiono technologię cięcia plazmą. W szczególności scharakteryzowano uwarunkowania technologiczne determinujące efekty stosowania tej technologii. Zidentyfikowano najważniejsze zalety i wady cięcia plazmą.

## Wprowadzenie

Technologia cięcia plazmą jest stosowana już od lat 50 ubiegłego stulecia. Z uwagi na dobre możliwości automatyzacji procesu, co z kolei przekłada się na jego wydajność i dokładność kształtowo-wymiarową obrabianego przedmiotu, technologia cięcia plazmą jest jedną z bardziej powszechnych metod cięcia. Istotą tej technologii jest cięcie metalu przez wytapianie szczeliny ciepłem łuku elektrycznego, jarzącego się między przedmiotem i elektrodą. Łuk plazmowy to silnie zjonizowany gaz, posiadający dużą energię kinetyczną, zwężający się w dyszy plazmowej. Wiązka plazmy jest skupiona na bardzo niewielkim polu materiału ciętego. U wyjścia z dyszy posiada prędkość zbliżoną do prędkości dźwięku, a temperatura mieści się w granicach 10 000÷30 000 K. Topniejący metal ciętego materiału tworzy szczelinę. Maszyna zasilana jest z inwertorowych lub prostownikowych źródeł prądu. Ważnym do spełnienia warunkiem technologicznym jest przewodzenie prądu elektrycznego w obszarze cięcia. Jeśli cięciu podlegają materiały metaliczne, które przewodzą prąd, to stosuje się wówczas do cięcia palniki o łuku zależ-

nym [1, 5]. Przy takim cięciu występuje klasyczny układ czyli katoda–elektroda wolframowa lub miedziana, oraz anoda – cięty materiał. W przypadku cięcia materiałów nieżelaznych konieczne jest użycie palnika o łuku niezależnym.

Budowa palników jest zbliżona do tych używanych przy technologii spawania plazmowego. Ogólny schemat palnika oraz jego charakterystyczne parametry geometryczne przedstawiono na rysunku 1.

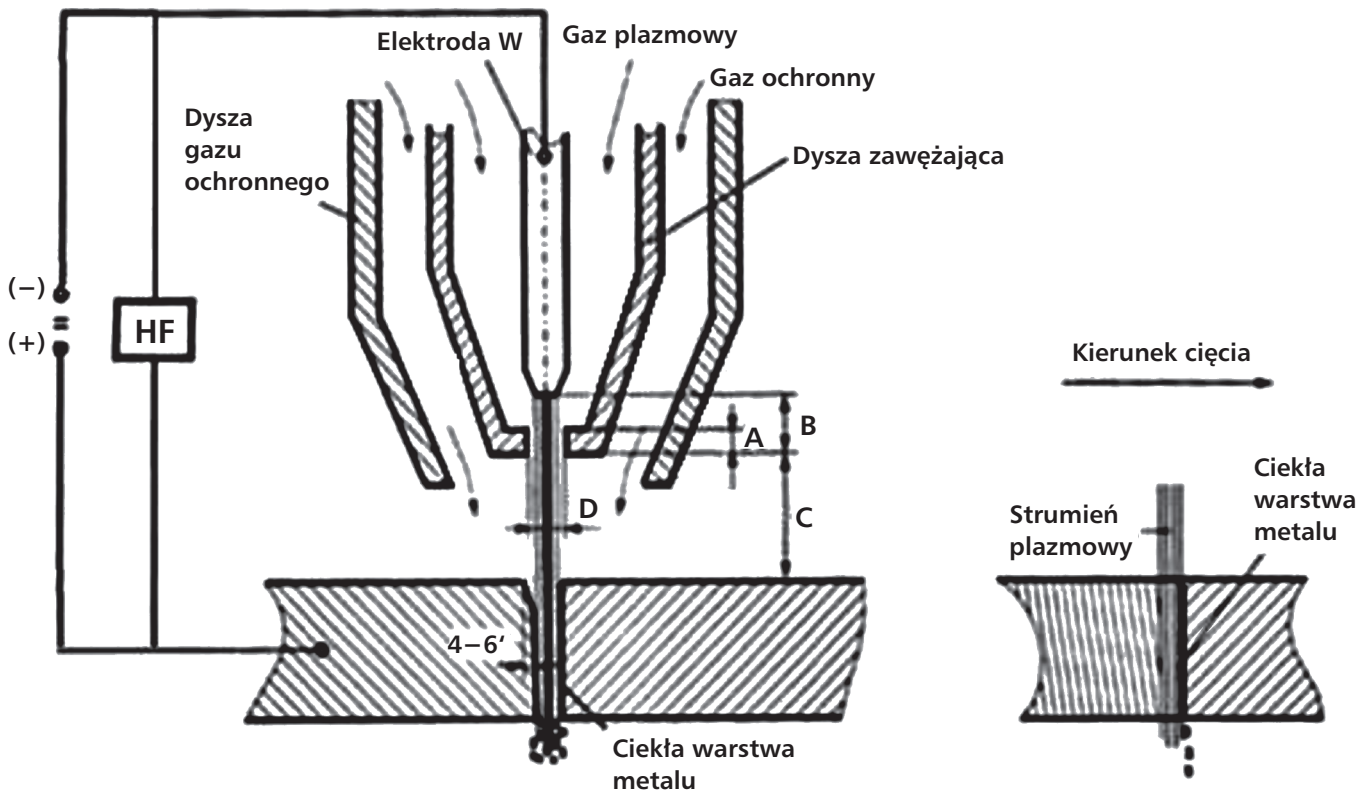
Konstrukcja palnika umożliwia centralne doprowadzenie plazmy, która topi oraz wyrzuca ciekły materiał z obszaru obróbki. Dodatkowo doprowadzany jest gaz ochronny, zabezpieczający strefę cięcia przed dostępem powietrza, a także chłodzi ją. Najczęściej gazem plazmowym jest argon lub też jego mieszanka z helem bądź azotem, natomiast gaz ochronny należy dobrać, ze względu na rodzaj ciętego materiału.

Występują również palniki, w których podawane medium ochronne ma za zadanie zawężanie łuku plazmowego, a tym samym zwiększanie temperatury plazmy, przez co uzyskuje się możliwość szybszego cięcia materiału. Tym medium poza typowymi gazami ochronnymi może być

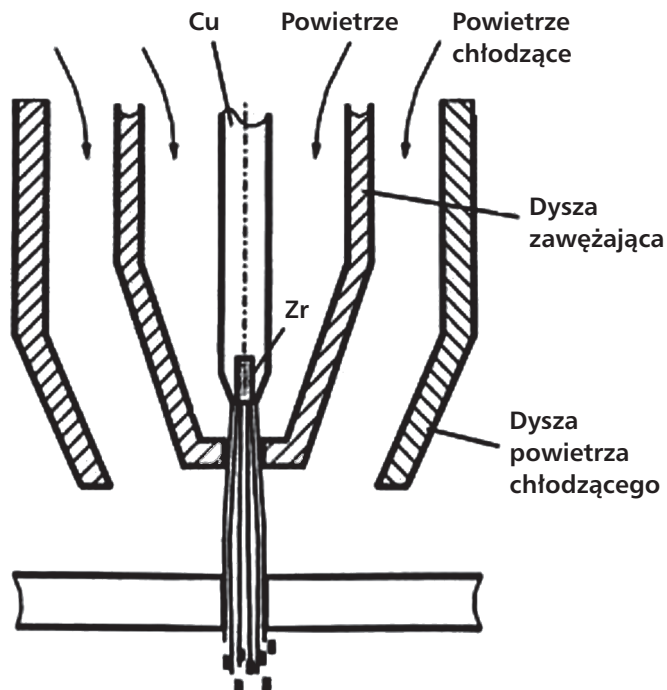
również woda. Zastosowanie obróbki z wtryskiem wody zapewnia zawężenie łuku plazmowego, czego efektem jest oczywiście mniejsza szczelina oraz dokładniejsza obróbka. Dodatek wody gwarantuje wzrost temperatury do 30000 K oraz zwiększenie żywotności dyszy. Palnik z kurtyną wodną zamiast gazu ochronnego, oprócz zwiększenia prędkości cięcia, redukuje zanieczyszczenia oraz hałas wytwarzane podczas obróbki [5].

Czasami jako gaz plazmowy stosuje się powietrze. Prowadzi to do zmniejszenia kosztów samego gazu, co jest niewątpliwą zaletą, jednak podstawową wadą takiego rozwiązania jest konieczność stosowania specjalnych elektrod. Wykonane są one z cyrkonu lub hafnu i osadzone w miedzianym korpusie intensywnie odprowadzającym ciepło (rys. 2). Tego typu palnik stosowany jest przy cięciu ręcznym [5].

Z uwagi na to, że cięcie ręczne charakteryzuje się na małą dokładnością ten sposób cięcia jest stosowany tylko przy produkcji jednostkowej. W przypadku produkcji powtarzalnej, w celu stabilizacji operacji cięcia plazmą używa się często podzespoły zmechanizowane lub zrobotyzowane, wykorzystywane w sterowaniu numerycznym.



Rys. 1. Schemat budowy oraz parametry geometryczne klasycznego palnika plazmowego [5]: HF – wysokoczęstotliwościowy układ zajarzania łuku plazmowego, A – wysokość układu zawężającego dyszy, B – odległość elektrody od układu zawężającego, C – odległość materiału ciętego od układu zawężającego, D – średnica dyszy zawężającej



Rys. 2. Schemat budowy palnika wykorzystującego powietrze jako gaz plazmowy [5]

### Uwarunkowania technologiczne cięcia plazmą

Jednym z ważnych czynników technologicznych cięcia plazmą, który ma bezpośredni wpływ na jakość obróbki jest zjonizowany gaz – jego rodzaj i prędkość strumienia. Najczęściej używane gazy to: tlen, powietrze, azot, argon jak i mieszanki argonu i wodoru oraz azotu i wodoru. Początkowo stosowany był głównie argon, lecz ze względu na cenę oraz rozwój samej technologii, obecnie wykorzystuje się jego tańsze zamienniki. Zredukowano jego użycie zastępując go stopniowo azotem, a później tlenem i powietrzem. Każdy z gazów ochronnych ma obszar zastosowania, w którym jego oddziaływanie jest optymalne [5]:

**tlen** – stosowany jest do cięcia stali o małej zawartości węgla oraz dodatków stopowych. Zmniejsza napięcie powierzchniowe stopionego metalu, ułatwiając usunięcie go ze szczeliny. Dzięki przyspieszonej reakcji egzotermicznej zwiększa się prędkość cięcia, co powoduje zmniejszenie się strefy wpływu ciepła oraz możliwych odkształceń;

**azot** – wydłuża żywotność dyszy oraz elektrody, wykorzystywany jest przy



arkuszach blachy o grubości w zakresie 25 ÷ 75 mm i natężeniu prądu do 750 A;

**mieszanek argonu i azotu oraz argonu i wodoru** – występują zwykle w ilości 10 ÷ 35% azotu lub wodoru wraz z argonem, wykorzystywane są przy cięciu stali odpornych na korozję oraz aluminium, Stosowane są przy grubości arkusza stali nierdzewnej sięgającej nawet 130 ÷ 150 mm.

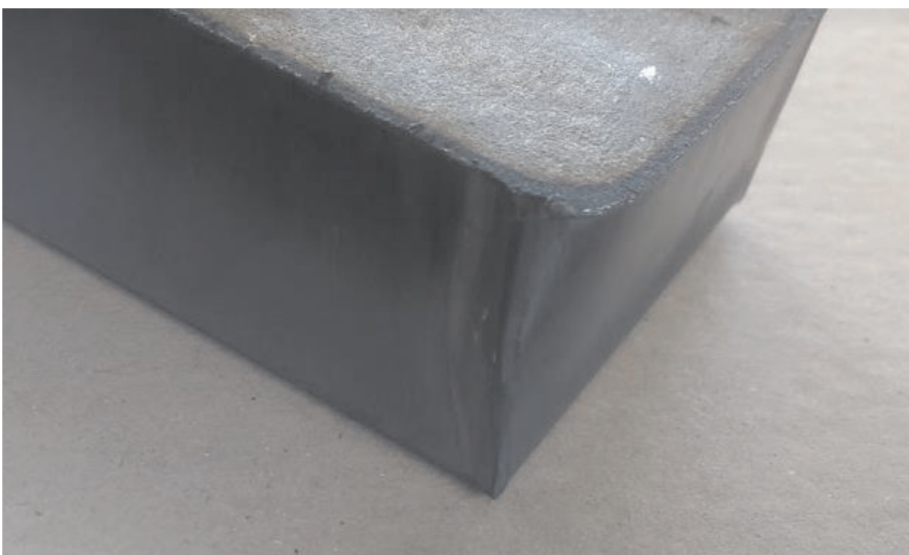
Pozostałe parametry technologiczne, które w zróżnicowanym stopniu wpływają na jakość cięcia to [5]:

- natężenie prądu, decydujące o temperaturze i energii łuku plazmowego,
- napięcie łuku plazmowego, wpływające na efektywność procesu cięcia,
- rodzaj i budowa elektrody,
- średnica dyszy zawężającej łuk plazmowy,
- położenie palnika względem materiału,
- prędkość cięcia,
- rodzaj, ciśnienie oraz natężenie przepływu gazu plazmowego jak i gazu ochronnego.

W przypadku cięcia łukiem plazmowym etap rozpoczęcia cięcia, czyli tzw. punkt przebicia, jest zbliżony do wpalenia przy cięciu laserem, przy czym moc i siła naporu metody jest znacznie większa. Podczas zajarzenia łuku występuje gwałtowny wzrost temperatury w rejonie obróbki, sięgającej 16 000 C. Zajarzenie łuku powstaje dopiero w chwili zbliżenia głowicy zawierającej elektrodę, która pełni funkcję katody, do materiału spełniającego zadania anody. Oznacza to, że jeżeli obróbka zaczyna się na krawędzi arkusza, musi zostać dobrana odpowiednia odległość, aby łuk mógł się zajarzyć. Zazwyczaj jest to około 5 ÷ 15 mm. Gdy wpalenie ma miejsce wewnątrz arkusza blachy należy uwzględnić jego lokalizację od pełnego materiału lub wewnątrz odpadowych elementów, jak choćby krążki powstałe przy wycinaniu otworów. Czas przebicia całej grubości blachy zależy głównie od natężenia prądu, odległość C (rys. 1) cięcia, grubości materiału oraz rodzaju i geometrii dyszy. Podczas programowania obróbki, technolog najczęściej ma możliwość wyboru umiejscowienia punktu wpalenia, a co się z tym wiąże kąta oraz długości dojazdu do ścieżki cięcia. Powinny one posiadać jak najłagodniejsze przejście na drogę obróbki. Geometria wejścia w materiał oraz roz-



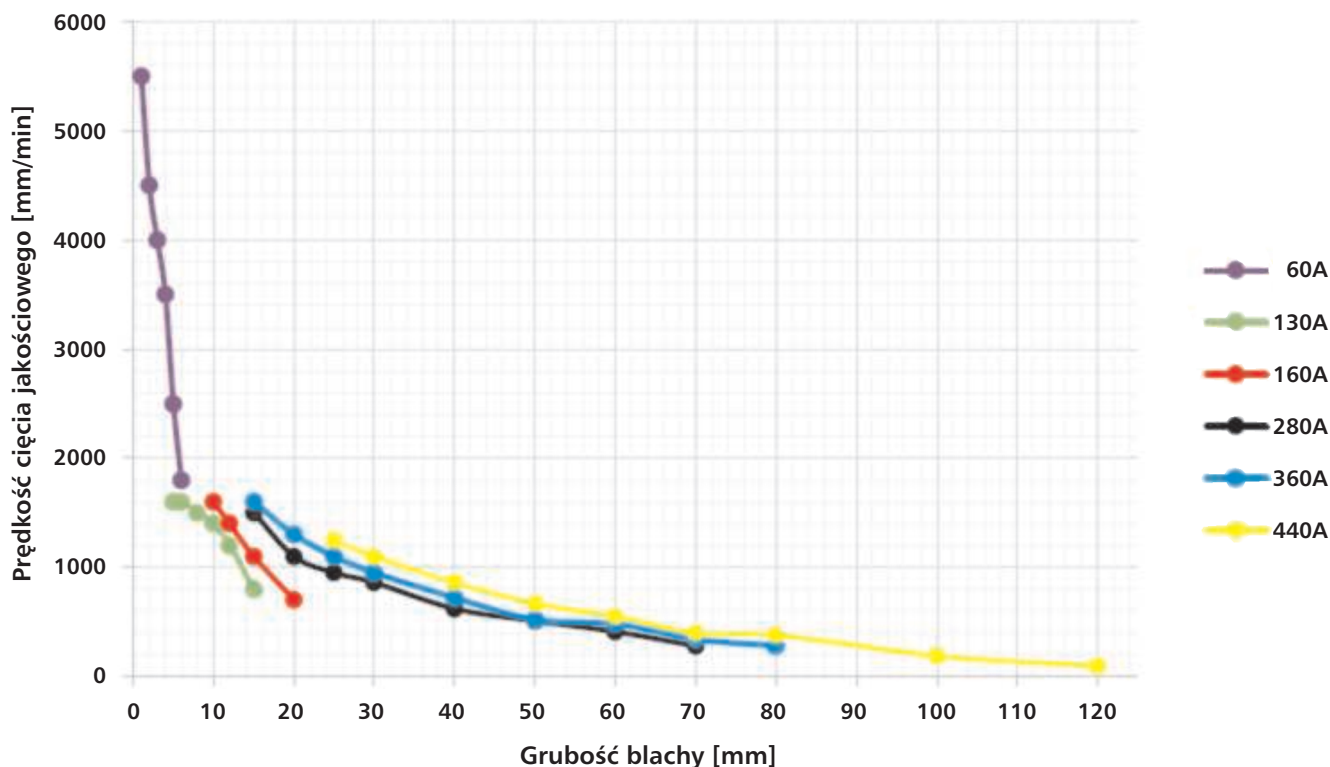
Rys. 4. Przykład linii cięcia łukiem plazmowym z wydłużonym wyjściem



Rys. 5. Przykładowy narożnik wyciętego elementu z widoczną wadą zaokrąglenia narożnika







Rys. 6. Przykładowe zależności prędkości cięcia od grubości ciętych blach dla różnych wartości natężenia prądu

początku wycinania kształtu docelowego to bardzo ważny element, ponieważ koniec drogi cięcia materiału najczęściej znajduje się w tym samym miejscu, co jej początek. Aby więc zachować stan zajarzenia na końcu obróbki, należy nadać głowicy inny kierunek, tak, aby utrzymać łuk i ciągły przepływ plazmy między katodą (elektroda) i anodą (materiał obrabiany). W przeciwnym przypadku może nastąpić utrata łuku i zatrzymanie całego procesu cięcia z powodu braku przepływu prądu. Samo przebicie generuje znaczną ilość stopionego metalu, który w przypadku pogłębienia krateru, wydostaje się z niego na powierzchnię w formie rozprysków – rys. 3. Należy nadmienić, że są one większe niż w przypadku cięcia laserowego [2, 4].

W celu uniknięcia kolizji z rozpryskami i roztopionym metalem głowica po zajarzeniu łuku stopniowo odsuwa się od ciętego materiału, a dopiero po jego przebicciu wraca do zadanej wysokości. Zabieg ten wykonuje się w celu przedłużenia żywotności głowicy.

Jak już zasygnalizowano ważnym warunkiem poprawności procesu cięcia jest utrzymywanie stabilnego łuku. Z tego powodu stosowane są określone techniki cięcia pozwalające utrzymać łuk przez

większość obróbki. Przykład linii cięcia z wydłużonym wyjściem w celu utrzymania łuku przedstawiono na rysunku 4.

W celu przedłużenia pracy łuku plazmowego wykorzystuje się materiał odpadowy. Pod koniec następuje długie odcięcie, możliwe dzięki pozostawionym fragmentom ażuru. Dodatkowo, dzięki mniejszej liczbie zajarzeń łuku, katoda ma dłuższą żywotność.

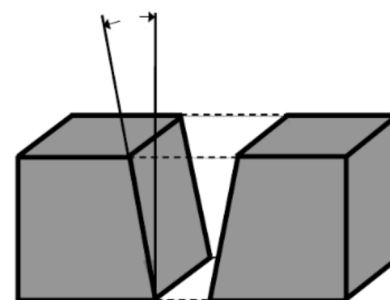
Istotną wadą technologii jest brak możliwości pełnej kontroli płomienia. Strumień plazmy ma skłonności do usuwania większej ilości materiału niż wymaga to obróbka. Szczególnie jest to zauważalne w narożnikach elementów ciętych – rys. 5. Miejscowe zmniejszenie prędkości cięcia powoduje jeszcze bardziej zauważalne wytopienie materiału.

Podczas cięcia łukiem plazmowym bardzo ważny jest dobór natężenia prądu, grubości blachy i parametru wynikowego – prędkości cięcia. Mniej istotne są natomiast gatunek stali oraz rodzaj gazu towarzyszącego.

Prędkości cięcia ze względu na jakość powierzchni po cięciu są zwykle podawane przez producenta. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe prędkości

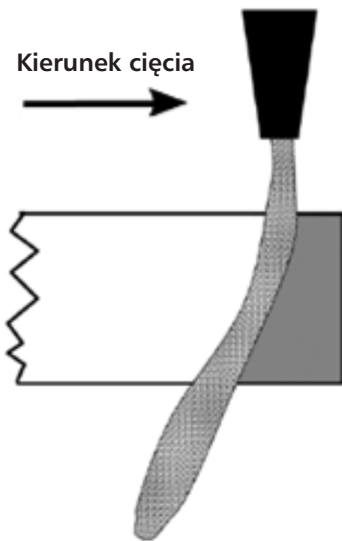
cięcia zalecane przez producenta w zależności od natężenia prądu i grubości ciętych blach.

Parametry technologiczne czasami wymagają kontroli technologa lub operatora, a spowodowane to może być zróżnicowaną mieszanką gazową czy też błędami na poziomie programowania. Ze względu na brak kontroli nad kształtem płomienia plazmowego, szczelina oraz detal cięty powinny zostać wykonane z odpowiednim naddatkiem. Zazwyczaj wypalana w zbyt dużym stopniu jest górna krawędź, co może spowodować utratę wymaganych wymiarów. Sytuacja taka została przedstawiona na rysunku 7.



Rys. 7. Ukosowanie ścian podczas cięcia plazmą [6]





Rys. 8. Odchylenie płomienia plazmowego przy zbyt dużej prędkości cięcia [6]

Powierzchnie cięcia nigdy nie są pionowe. Tworzona szczelina jest szersza w górnej części i zwęża się w dole blachy. Wartość kąta ukosowania zależy od prędkości cięcia. Jest ona mała przy małych prędkościach i wzrasta wraz z jej wzrostem [6].

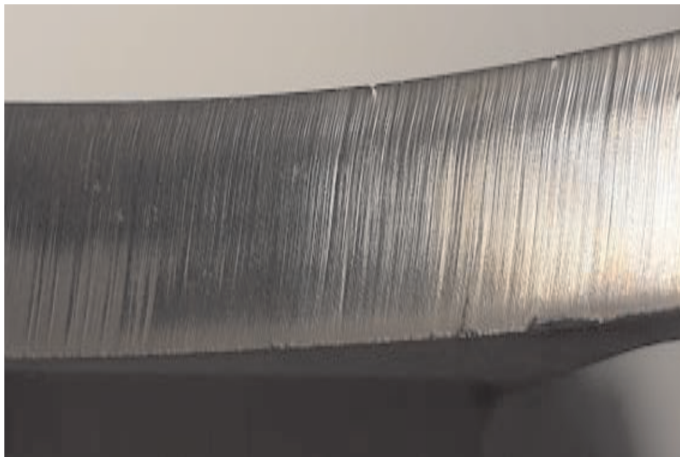
Nieodpowiednio dobrane prędkości cięcia mają również wpływ na sam płomień. Przy małych wartościach jest on pionowy lub nawet wyprzedza oś pracy głowicy, topiąc materiał przed nią. Zwiększenie prędkości powoduje powrót płomienia do pozycji pionowej. Wraz ze stopniowym jej wzrostem, pozostaje on z tyłu osi głowicy cięcia – rys. 8.

Bardzo ważna jest również prędkość strumienia plazmy podczas przebijania materiału. Przy zbyt dużych prędkościach płomień przebijający arkusz może być

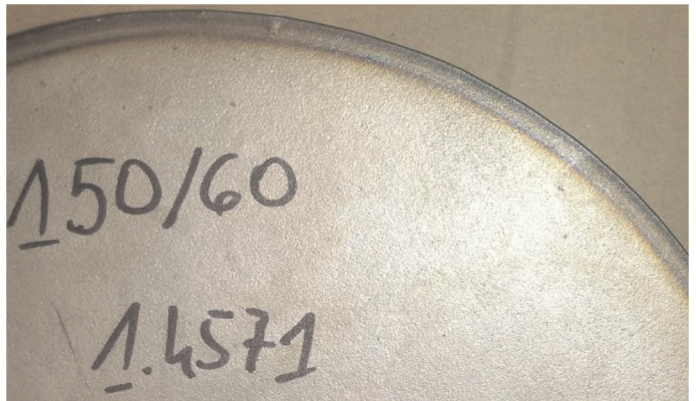
prawie poziomy. Prowadzić to może do nieprzebicia arkusza blachy, wyrzucenia iskier stopionego materiału w górę, co może z kolei spowodować uszkodzenie maszyny do cięcia.

Podczas cięcia łukiem plazmowym duża energia cieplna błyskawicznie nagrzewa i topi materiał, a gazy towarzyszące usuwają materiał ze strefy obróbki. Z uwagi na bardzo dużą temperaturę powierzchnia po cięciu jest dość gładka (w wielu sytuacjach chropowatość jest wystarczająca) z drobnymi rysami, pochylonymi w tym samym kierunku, co płomień podczas obróbki – rys. 9.

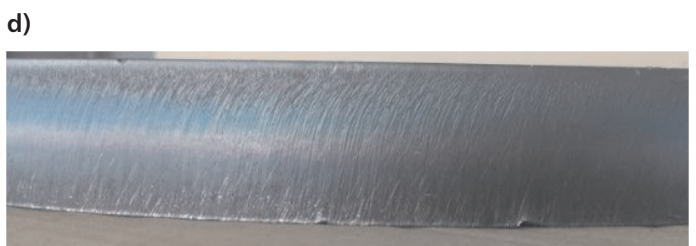
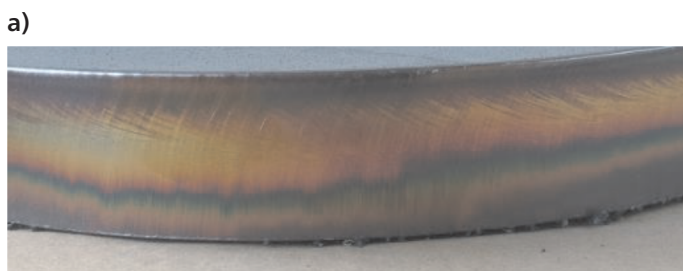
O ile płaskość powierzchni po cięciu jest często wystarczająca, to problemem jakościowym jest geometria elementu. Podczas cięcia w linii prostej powierzchni jest delikatnie pochylona. Przyczyny tej



Rys. 9. Przykładowa powierzchnia po cięciu plazmą



Rys. 10. Widoczna strefa wpływu ciepła dla elementu ze stali nierdzewnej AISI 1.4571



Rys. 11. Przykładowe barwy powierzchni po cięciu plazmowym wybranych gatunków stali nierdzewnej: a) AISI 1.4301, b) AISI 1.4404, c) AISI 1.4541, d) AISI 1.4571

pochyłości przedstawiono na rysunku 5. Dodatkowo, jeśli linia cięcia posiada fragmenty krzywoliniowe, takie jak np. otwór, to ta niedokładność jeszcze bardziej się pogłębia. Miejscami newralgicznymi są nawroty oraz narożniki, przy których następuje zmniejszenie prędkości cięcia. Powoduje to nie tylko ukosowanie powierzchni, ale również mocne zaokrąglenie krawędzi bocznych. Krawędź górna jest dobrze wykonana, natomiast krawędź dolna jest ostra, a nawet lekko skierowana ku dołowi. Miejscami powstają nawet zgorzeline zastygniętego metalu [2÷4].

Jeżeli parametry cięcia plazmą są tak dobrane, aby nastąpiło całkowite roztopienie metalu, to wówczas z uwagi na bardzo dużą temperaturę występuje dość duża strefa wpływu ciepła. Głównie zależy ona od grubości ciętego materiału oraz prędkości cięcia. Jest ona bardzo dobrze widoczna przy większych grubościach (rys. 10).

Dodatkowo, dla różnych gatunków stali, przy takiej samej parametrach i grubości materiału, otrzymuje się różne kolory powierzchni po cięciu (rys. 11).

Doświadczony operator, na podstawie barwy powierzchni po cięciu może określić z pewnym przybliżeniem rodzaj ciętego metalu.

### Podsumowanie

Podstawową zaletą cięcia strumieniem plazmy w stosunku do innych niekonwencjonalnych technologii to jakość powierzchni po cięciu. Uzyskiwane parametry chropowatości są często wystarczające i taka powierzchnia z tego powodu nie wymaga już dalszej obróbki. Technologię tę w łatwy sposób można zautomatyzować, co powoduje, że tą metodą można ciąć grube elementy. Efektem tego jest większa wydajność w porównaniu do innych niekonwencjonalnych technologii cięcia. Istotną wadą tej technologii jest konieczność zapewnienia przewodzenia prądu w celu zajarzenia łuku, co komplikuje proces cięcia dla materiałów niemetalicznych. Problemem jest też powstająca strefa wpływu ciepła prowadząca do miejscowego utwardzenia materiału, co z kolei może skutkować utrudnioną dalszą obróbką elementu.

### Literatura

- [1] Adamski Cz., Czermiński J. [red.]: *Encyklopedia techniki: Metalurgia*. Wydawnictwo „Śląsk”, Kaatowice 1978.
- [2] Bhowmick S., Basu J., Majumdar G., Bandyopadhyay A.: Experimental study of plasma arc cutting of AISI 304 stainless steel. *Materials Today*; 5/2018, 4541÷4550.
- [3] Gullu A., Atici U.: *Investigation of the effects of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels*. *Materials and Design*. 27/2006, 1157÷1162.
- [4] Ilii S.M., Margareta Coteata M., Adriana Munteanu A.: *Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (Ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece*. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. II, No. 1/2010, 31÷36.
- [5] Klimpel A.: *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*. WNT, Warszawa 2009.
- [6] Nemchinsky V.A., Severance W.S.: *Plasma arc cutting: speed and cut quality*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(19)/2009, 204÷210. ■