

# Charakterystyka cięcia termicznego

## Characteristics of thermic cutting

### Streszczenie

Przedstawiono ogólne charakterystyki poszczególnych metod cięcia termicznego materiałów inżynierskich stosowanych do wytwarzania konstrukcji i części maszyn. Charakterystyki oparto na aktualnych osiągnięciach techniki i obejmują powszechnie stosowane procesy cięcia tlenowego, laserowego i plazmowego.

**Słowa kluczowe:** cięcie termiczne, cięcie tlenowe, cięcie laserowe, cięcie plazmowe

### Abstract

Presents general characteristics of individual thermic cutting methods of engineering materials used for the production of constructions and machine parts. The characteristics are based on current technology achievements and include commonly used processes as oxygen, laser and plasma cutting.

**Keywords:** thermic cutting, oxygen cutting, laser cutting, plasma cutting,

## Wstęp

Wśród podstawowych procesów technologicznych, które są związane z przygotowaniem elementów metalowych do spawania jest proces cięcia termicznego. Proces ten zależy od sposobu jakim wytwarza się skoncentrowany strumień ciepła dla danego materiału ciętego dzieli się między innymi na cięcie tlenowe, laserowe oraz plazmowe.

Zespoły służące do wytwarzania dużej gęstości strumienia ciepła przy jego małym przekroju to najważniejsze elementy w urządzeniach służących do cięcia termicznego. W zależności od metody cięcia termicznego są to: palnik tlenowy, głowica laserowa oraz palnik plazmowy. Do poprawnego funkcjonowania tych zespołów potrzebne są odpowiednie urządzenia zapewniające ciągłość ich zasilania. Dla palnika tlenowego źródłem zasilania jest indywidualna lub centralna instalacja gazowa. Głowica laserowa, która przenosi oraz koncentruje promień wiązki laserowej jest zasilana przez generator wiązki laserowej, natomiast źródłem zasilania dla palników plazmowych są zasilacze plazmowe.

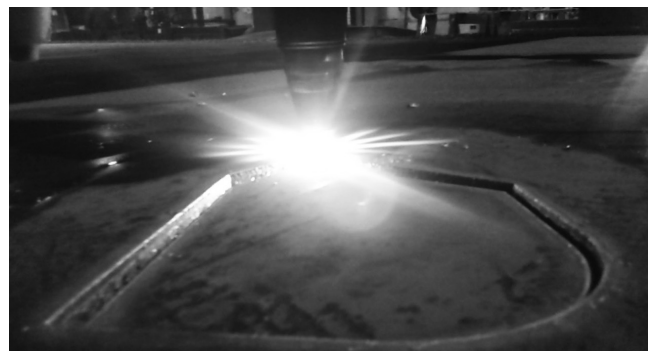
Proces cięcia termicznego może być prowadzony zarówno ręcznie jak również w sposób w pełni zautomatyzowany, w tym także z wykorzystaniem robotów. Stopień automatyzacji stanowisk służących do cięcia termicznego materiałów inżynierskich jest wysoce zróżnicowany, a więc mogą to być stanowiska wyposażone w proste układy sterujące lub bardziej zaawansowane technicznie na bazie systemów cyfrowych, dzięki którym sterowanie całym procesem cięcia realizowane jest kompleksowo.

## Charakterystyka procesu cięcia termicznego stali

### Cięcie tlenowe

Cięcie tlenowe jest najbardziej rozpowszechnioną metodą cięcia termicznego stali w przemyśle. Proces ten polega na doprowadzeniu metalu w miejscu cięcia do temperatury zapłonu, po przekroczeniu której następuje zjawisko

reakcji egzotermicznej żelaza z tlenem. Nagrzanie materiału do temperatury jego zapłonu zapewnia mieszanka gazu palnego i tlenu. Najczęściej gazem palnym w mieszance podgrzewającej jest acetylen, propan techniczny, gaz ziemny oraz wodór. W procesie cięcia tlenowego (po podgrzaniu materiału do temperatury zapłonu) strumień tlenu podawanego z dyszy pod ciśnieniem utlenia powierzchnię blachy z dużą prędkością. Następnie przecinany metal zostaje nadtopiony na całej swojej grubości, po czym ciekły metal oraz produkty reakcji utleniania zostają wyrzucone ze szczeliny cięcia przez energię kinetyczną gazu (rys. 1).



Rys. 1. Proces cięcia tlenowego  
Fig. 1. Oxygen cutting process

Mimo, że cięcie tlenem jest z założenia procesem prostym technicznie i powszechnie stosowanym od wielu lat, to jego przeprowadzenie w sposób dobry jakościowo oraz ekonomicznie wymaga od wykonawcy odpowiedniej wiedzy oraz sporego doświadczenia. Między innymi utrudnienia w procesie cięcia wynikają ze składu chemicznego stali, w której nie tylko węgiel, ale także inne pierwiastki stopowe znajdujące się w niej komplikują proces cięcia. Utрудnienia te spowodowane są wysoką temperaturą topnienia tych składników. Takimi metalami są między innymi: tytan, chrom, molibden i wolfram oraz tlenki metali takich jak krzem, mangan i aluminium. W rezultacie przy zwiększonej zawartości pierwiastków stal wymaga podgrzania,

np. w przypadku, gdy zawartość chromu przekroczy 2%, natomiast powyżej 5% Cr proces cięcia jest znacznie utrudniony. Powyżej zawartości 6% manganu cięcie również sprawia dużo problemu z powodu utwardzania stali, zaś gdy jego wartość jest wyższa niż 14% proces ten staje się niemożliwy. Ponadto aby cięcie nie sprawiało wiele trudności, ilość molibdenu nie powinna przekroczyć granicznej wartości 1%.

W celu uniknięcia podhartowania na powierzchniach cięcia, bądź pęknięcia blachy w strefie wpływu ciepła należy ją wstępnie podgrzać. Podgrzana powinna być cała grubość blachy oraz szerokość równa przynajmniej dwu grubościom blachy.

W miejscu przeprowadzanego cięcia powstaje szczelina, a jej szerokość musi być kontrolowana i sterowana podczas cięcia. Parametry szczeliny cięcia decydują o dokładności wymiarowej wycinanego elementu oraz o jakości cięcia tlenowego. Podstawowe parametry warunkujące szerokość szczeliny cięcia to: natężenie przepływu gazu palnego oraz tlenu, kształt i rodzaj końcówki palnika, średnica dyszy tlenowej oraz prędkość cięcia. Poziom przepływu przez dyszę tlenu tnącego musi być zwiększony wraz ze wzrostem przekroju ciętego materiału, natomiast sama dysza w tym wypadku musi zostać zastąpiona inną o większej średnicy. W wyniku tej optymalizacji szerokość szczeliny cięcia również się zwiększa. Parametr ten jest szczególnie ważny w przypadku cięcia profilowego sterowanego komputerowo i zawsze określa się pewną dokładność zachowania wymiarów po odliczeniu szczeliny. Zazwyczaj podczas cięcia materiałów o przekroju do 50 mm przyjmuje się dokładność cięcia w obrębie  $\pm 0,5$  mm [1].

Cięcie tlenowe jest stosowane do rozdzielania przedmiotów stalowych o przekrojach od około 3 mm do około 2000 mm. Proces ten można przeprowadzać we wszystkich pozycjach i może być on realizowany ręcznie lub w sposób zautomatyzowany. W warunkach montażowych i warsztatowych cięcie tlenem wykonuje się powszechnie palnikami ręcznymi z uwagi na prostotę i łatwość obsługi takich palników [2]. Przedmioty o grubości do około 100 mm można ciąć ręcznie, a prędkość cięcia przy grubości od 5 do 100 mm powinna wynosić odpowiednio od około 500 do 150 mm/min [3].

Cięcie zmechanizowane i zautomatyzowane (maszynowe) jest realizowane za pomocą palników o specjalnej budowie, które są zamocowane na wózkach, portalach, lub wysięgnikach. W procesach cięcia zmechanizowanego i zautomatyzowanego bardzo istotne znaczenie odgrywają stosowane systemy sterowania, począwszy od prostych układów po bardziej zaawansowane technicznie na bazie systemów cyfrowych. Po wprowadzeniu numerycznych systemów sterowania NC (Numerical Control), a następnie komputerowych systemów sterowania CNC (Computer Numerical Control) nastąpił duży postęp w automatyzacji procesów cięcia termicznego stali. Tak więc układy NC, które umożliwiały sterowanie takimi parametrami jak: prędkość cięcia, droga palnika, prowadzenie interpolacji oraz inne funkcje pomocnicze - zostały zastąpione przez systemy CNC. Takie systemy umożliwiają realizację wszystkich funkcji wykonywanych przez układy typu NC, ponadto dają możliwość:

- znacznego uproszczenia procesu programowania wykrojów,
- jednoczesnego sterowania kilkoma różnymi urządzeniami za pośrednictwem jednego układu sterującego, np. plotera lub drukarki,
- magazynowania w pamięci programów wykonywania typowych elementów,
- wykonywania raportów produkcyjnych,
- sterowania kształtowego według zadanej linii,
- sterowania punktowego tzn. od punktu do punktu,
- zastosowania monitora graficznego do komunikacji z użytkownikiem,
- wprowadzenia automatycznej, programowanej kompensacji szczeliny cięcia,
- zastosowania pamięci operacyjnej, pozwalającej na re-

jestrowanie programu cięcia powtarzanego wielokrotnie, np. w ciągu jednej zmiany,

- planowanie optymalnego rozkroju przecinanych blach w celu maksymalnego wykorzystania materiału,
- wprowadzenia innych nośników informacji, np. pendrive.

Zautomatyzowane cięcie termiczne stali umożliwia prowadzenie tego procesu jednocześnie dla kilku palników oraz daje możliwość ukosowania brzegów wycinanych blach, które będą przeznaczone do spawania. Podczas takiego cięcia można osiągnąć prędkość od 200 do nawet 800 mm/min odpowiednio dla przekrojów od 100 do 5 mm, natomiast szczelina cięcia ma wymiar wynoszący od 2 do 4 mm w zależności od grubości ciętego materiału. Dla gotowych wyrobów wyciętych przy pomocy sterowania numerycznego oscyluje w granicach około 0,5 mm [3]. Szczególnie ważnym elementem przy cięciu zautomatyzowanym jest kształt dyszy tnącej.

W porównaniu do cięcia laserowego oraz cięcia plazmowego, ciecie tlenem posiada podstawowe wady, a są nimi:

- szeroka strefa wpływu ciepła,
- duże odkształcenia w okolicy ciętych krawędzi,
- duża koncentracja naprężeń,
- niższa jakość oraz wydajność procesu,
- ograniczony zakres cięcia stali do niestopowych oraz niskostopowych.

Mimo wyraźnej przewagi jakościowej oraz wyższej wydajności procesów cięcia laserowego i plazmowego, proces cięcia tlenowego nadal jest jedyną metodą cięcia termicznego stali, umożliwiającą cięcie elementów stalowych o dużych grubościach sięgających do 2000 mm. Ponadto wytwórcy urządzeń do cięcia laserowego i plazmowego mają również w swej ofercie urządzenia do cięcia tlenowego [4,5]. Należy również pamiętać, że proces cięcia tlenowego jest najbardziej ekonomiczny względem pozostałych procesów cięcia w takich przypadkach kiedy konieczne jest cięcie zgrubne przed wykonaniem obróbki mechanicznej czy wymagane jest cięcie złomowe a także kiedy wykonanie cięcia jest utrudnione [3].

### Cięcie laserowe

Cięciem laserowym nazywa się proces cięcia termicznego, którego głównym źródłem energii jest energia pochodząca z wiązki laserowej. Wiązka ta o działaniu ciągłym lub impulsowym w miejscu cięcia prowadzi do stopienia bądź stopienia i sublimacji materiału rysunek 2. Dodatkowo zastosowany przepływający współosiowo z wiązką laserową gaz reaktywny lub obojętny, ma za zadanie wydmuchnąć ze szczeliny roztopiony materiał oraz jego pary [1].



Rys. 2. Proces cięcia laserowego  
Fig. 2. Laser cutting process

Metoda ta może być stosowana do cięcia następujących materiałów inżynierskich: tworzyw sztucznych, materiałów ceramicznych, metali, cermetali oraz drewna, od przekroju równego folii do 35 mm. Metodę cięcia laserowego stosuje się również do wiercenia oraz przebijania otworów. Operacja ta wymaga impulsowego lub ciągłego dostarczenia do materiału obrabianego energii wiązki laserowej, o dużo większej gęstości mocy aniżeli w przypadku ciągłego cięcia laserowego. Wartość tej energii sięga rzędu  $10^6$ - $10^{11}$  W/mm<sup>2</sup> [5].

Pierwsze przemysłowe zastosowanie wiązki laserowej zostało zademonstrowane w roku 1967 do cięcia blach stalowych. Użyto wówczas lasera gazowego z CO<sub>2</sub>. Szybki rozwój w budowie urządzeń laserowych i systemów zautomatyzowanych oraz układach sterowania typu CNC i badaniach nad technologiami cięcia laserowego, spowodował ogromne rozpowszechnienie się tej metody cięcia termicznego. Metoda ta zapewnia wysoką dokładność cięcia oraz jakość ciętych krawędzi, gdzie SWC jest tak wąska, że staje się często niewykrywalna klasycznymi metodami badań metalograficznych [8,10]. Takie warunki jakie zapewnia ten proces cięcia są niezbędne dla zapewnienia realizacji zautomatyzowanych procesów spawalniczych, w tym szczególnie z wykorzystaniem robotów.

W tym zakresie proces cięcia laserowego wyparł inne metody cięcia mechanicznego i termicznego dzięki kilku podstawowym zaletom, w tym między innymi:

- możliwość łatwej automatyzacji oraz robotyzacji procesu cięcia,
- duże prędkości cięcia,
- duża dokładność wymiarowa cięcia oraz gładkość powierzchni ciętych, co umożliwia cięcie wyrobów, które nie wymagają dalszej obróbki mechanicznej w przeciwieństwie do wykonanych metodami cięcia tlenowego czy plazmowego,
- niższe naprężenia własne, a przy tym mniejsze odkształcenia ciętego materiału,
- wąska strefa wpływu ciepła,
- możliwość prowadzenia kilku operacji podczas jednego cyklu, np. przebijania, wycinania otworów itd.,
- minimalne zaokrąglenie górnej krawędzi cięcia oraz brak nawisu żużla przy dolnej krawędzi cięcia,
- o wiele mniejsza emisja szkodliwych pyłów oraz dymów w porównaniu do cięcia tlenowego i cięcia plazmowego.

Niestety jak każdy proces cięcia termicznego, także ten proces posiada wady, które niekorzystnie wpływają na zdrowie ludzkie czy na ekonomiczność procesu oraz takie, które ograniczają zastosowanie tej metody. Można do nich zaliczyć między innymi takie jak:

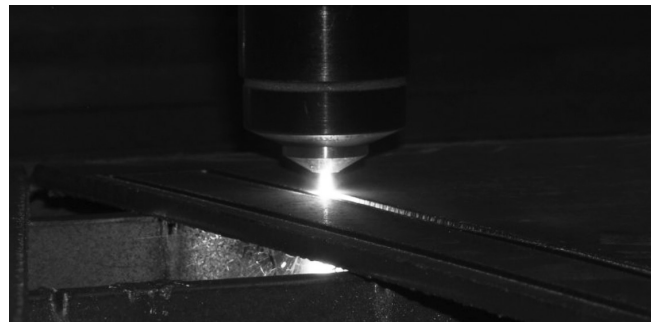
- promieniowanie elektromagnetyczne niewidzialne dla ludzkiego oka, które jest zagrożeniem dla zdrowia,
- bardzo wysoki koszt urządzeń laserowych, które emitują wysokiej jakości wiązkę, wymaganą w procesie cięcia,
- niska sprawność urządzeń laserowych,
- maksymalne przekroje ciętych blach ograniczone do grubości 35 mm, wyjątkiem jest proces LASOX (Laser Assist Oxygen), który daje możliwość cięcia blach stalowych o przekrojach sięgających nawet 100 mm [5],
- specjalne wymagania określające skład chemiczny, własności fizyczne oraz stan powierzchni ciętych materiałów [8].

Cięcie laserowe stosuje się obecnie do cięcia wielu rodzajów materiałów przemysłowych: stali, aluminium, tytanu, miedzi a także materiałów tekstylnych, ceramik oraz drewna. Wysoki stopień automatyzacji tego procesu zapewnia uzyskanie dużej dokładności ciętych elementów oraz wysokiej jakości powierzchni ciętych. Szerokość szczeliny cięcia wynosi od 0,1 do 1 mm, natomiast dokładność cięcia laserowego sięga nawet 250 μm. Dużą dokładność tego procesu zapewnia mała ilość ciepła wprowadzonego do ciętego materiału, co przekłada się na brak zniekształceń cieplnych. Zastosowanie tej metody znajduje szczególne uzasadnienie w przypadku wykrawania konturowego elementów o zróżnicowanych kształtach i rozmiarach, ponieważ nie zachodzi potrzeba wymiany „narzędzi” tnących [8].

### Cięcie plazmowe

Metoda cięcia termicznego z zastosowaniem jako źródła ciepła strumienia plazmy nazywana jest też metodą cięcia plazmowego. Istotą procesu cięcia plazmowego jest stopienie

i wyrzucenie metalu ze szczeliny cięcia przez silnie skoncentrowany strumień plazmowy, który stanowi wąski strumień silnie zjonizowanych gazów w łuku elektrycznym jarzącym się między ciętym przedmiotem a elektrodą nietopliwą. Strumień plazmowy, który posiada dużą energię kinetyczną wydobywa się z prędkością naddźwiękową ze zwężającej dyszy plazmowej w kierunku szczeliny cięcia (rys. 3).



Rys. 3. Proces cięcia plazmowego  
Fig. 3. Plasma cutting process

Ta metoda cięcia powstała w wyniku modyfikacji procesu spawania plazmowego PTAW (ang. Plasma Transferred Arc Welding) i została wprowadzona do przemysłu w połowie lat 50-tych dwudziestego wieku. Wprowadzono ją w celu umożliwienia cięcia metali nieżelaznych oraz stali odpornych na korozję, których nie można było ciąć tlenem. Obecnie metoda cięcia plazmowego jako pokrewna spawaniu jest stosowana powszechnie w produkcji konstrukcji i urządzeń, a także podczas prac warsztatowych i remontowych. To obecnie najbardziej rozpowszechniona metoda cięcia termicznego stali wysokostopowych, której charakterystycznymi cechami są dobra jakość ciętych powierzchni oraz duża wydajność procesu. Ponadto zaletą różniącą tą metodę od metody cięcia laserem jest możliwość cięcia materiałów o przekrojach sięgających nawet do 150 mm grubości zarówno przy mniejszych nakładach inwestycyjnych jak i kosztach eksploatacyjnych. Coraz powszechniejszym zastosowaniem tej metody jest cięcie stali niestopowych, wypierające cięcie tlenowo. Powodem tej zmiany są koszty eksploatacyjne, które są o wiele niższe szczególnie w przypadku cięcia materiałów o grubościach nieprzekraczających 30 mm [4].

W zależności od składu i rodzaju gazu plazmowego, i stopnia przewężenia oraz napięcia i natężenia prądu jonizującego, strumień plazmy w procesie cięcia osiąga temperaturę od 10000 do 30000°C. Osiągana temperatura jest nawet dziesięciokrotnie wyższa od temperatury płomienia acetylenowo-tlenowego. Czynnikiem decydującym o sprawności przenoszenia ciepła do ciętego metalu, czyli jakości i prędkości cięcia plazmowego jest grubość warstwy ciekłego metalu pokrywającego krawędź cięcia. Grubość ta jest zależna głównie od natężenia przepływu gazu plazmowego, czyli prędkości strumienia plazmy, a przy cięciu blach o przekrojach powyżej 50 mm także w dużym stopniu od siły grawitacji. Dobrą przewodność ciepła do ciętego metalu zapewnia cienka warstwa ciekłego metalu, natomiast w przypadku jej dużej grubości prędkość cięcia maleje, powodując pojawienie się znacznych nierówności na ciętej powierzchni. Chcąc uniknąć pojawiających się nierówności należy bardzo dokładnie dobrać natężenie przepływu gazu plazmowego [1].

O energii strumienia plazmowego oraz jego temperaturze decyduje natężenie prądu, a więc wraz ze wzrostem natężenia prądu, zwiększa się również prędkość cięcia. Możliwe zatem przy danej prędkości cięcia materiałów o większych przekrojach wymagające jedynie zwiększenia natężenia prądu [4]. Niestety jak każde nieproporcjonalne zwiększenie parametru podczas danego procesu, zbyt wysokie natężenie prądu wiąże się z powstaniem wad oraz różnego rodzaju niedogodności, a są nimi między innymi:

- zwiększenie zużycia elektrod,
- pogorszenie się jakości cięcia,
- powiększenie się szerokości szczeliny cięcia,
- pojawienie się zaokrągleń na górnych krawędziach,
- zwiększenie pochylenia brzegów ciętych przedmiotów.

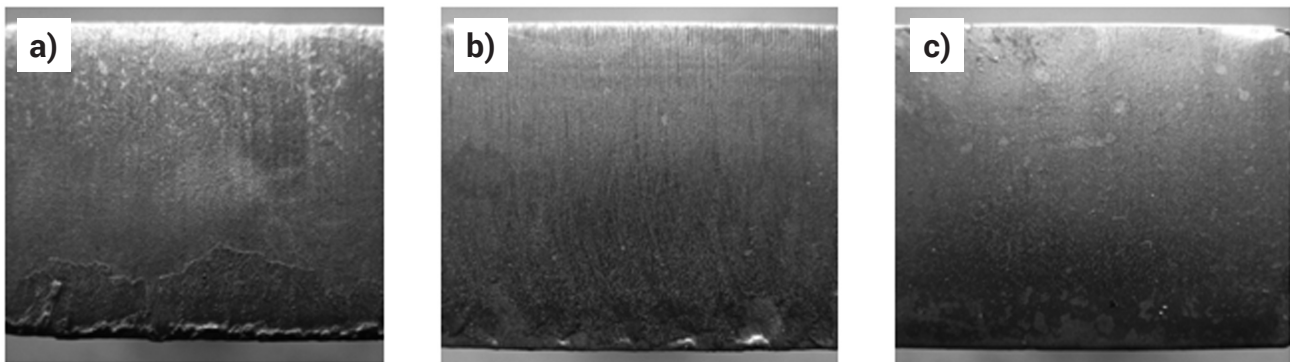
Nadmierne zmniejszenie natężenia prądu także nie jest korzystne w procesie cięcia plazmowego, ponieważ mogą się pojawić nierówności na powierzchni cięcia i nawisy przy dolnej krawędzi jak również może wystąpić brak przecięcia materiału [9].

Parametrem decydującym o sprawności przebiegu cięcia plazmowego jest napięcie łuku, tak więc jest to parametr wymagający dokładnego sterowania. Zależnie od natężenia prądu wartość napięcia łuku wynosi od 50 do 200 V. Napięcie biegu jałowego w źródłach prądu musi więc wynosić od ok. 150 do ok. 400 V. Dla palników o klasycznej konstrukcji parametr ten musi być utrzymywany z dokładnością do  $\pm 5$  V, natomiast dla palników wysokiej dokładności cięcia, czyli wielokrotnie zawężających strumień plazmowy, zwanych palnikami HTPAC (ang. High Tolerance Plasma Arc Cutting), dokładność sterowania napięciem łuku wynosi  $\pm 1$  V.

Stosunkowo szeroki zakres prędkości cięcia plazmowego wynika z dużej energii cieplnej strumienia plazmowego. Prędkość cięcia jest parametrem wysoce odpowiedzialnym za jakość, szczególnie kiedy cięcie plazmowe wykonywane jest ręcznie. Zbyt duże zwiększenie prędkości cięcia powoduje pogorszenie się jakości cięcia, zwężenie się szczeliny cięcia, pojawienie się

trudnego do usunięcia nawisu metalu na dolnej krawędzi oraz ostatecznie brak przecięcia. Natomiast w przypadku zbyt dużego obniżenia prędkości cięcia mogą pojawić się takie wady, jak np. zwiększenie się szerokości szczeliny cięcia, zaokrąglenie górnej krawędzi, zdeformowanie szczeliny, która może stać się szersza u góry szczeliny cięcia niż u jej dołu oraz pojawienie się żużla i nawisu metalu przy dolnej krawędzi cięcia [2].

Parametrami określającymi siłę z jaką strumień plazmowy dynamicznie oddziałuje na przecinany materiał są rodzaj oraz natężenie przepływu gazu plazmowego. Wybór medium plazmowego (gaz plazmowy, mieszanka gazów w tym powietrze) jest czynnikiem decydującym o sile dynamicznego oddziaływania plazmowego źródła ciepła. Na kształt brzegów oraz jakość powierzchni przecinanych blach znaczny wpływ mają właściwości chemiczne medium (obojętne, utleniające lub redukujące). Natomiast za efektywność procesu cięcia plazmowego odpowiedzialne są właściwości fizyczne, jak np. masa cząsteczkowa, masa atomowa, ciężar właściwy, energia jonizacji, energia dysocjacji oraz przewodność cieplna. W procesach cięcia plazmowego jako gaz plazmowy stosowane są: powietrze, tlen, azot oraz mieszanki gazowe: azot-wodór, argon-wodór i argon-azot-wodór [4]. Zastosowanie cięcia plazmowego z wykorzystaniem powietrza do wytworzenia strumienia plazmy spowodowało jej dynamiczny rozwój i bardzo duże upowszechnienie tej technologii cięcia w różnych gałęziach wytwarzania i usług.



Rys. 4. Widok powierzchni blach o grubości 18mm ze stali S355 po cięciu termicznym: a) tlenowym, b) laserowym i c) plazmowym  
Fig. 4. View of 18mm thick plates surface of steel S355 after thermic cutting: a) oxygen, b) laser c) plasma

## Podsumowanie

Przedstawione ogólne charakterystyki cięcia termicznego w odmianie procesów cięcia tlenowego, laserowego i plazmowego oparto na aktualnych osiągnięciach w tej dziedzinie techniki. Omawiane metody cięcia termicznego są powszechnie stosowane głównie w procesach wytwarzania konstrukcji stalowych. Stosowanie tych metod w warunkach produkcyjnych jest uwarunkowane różnymi względami w tym głównie technologicznymi i ekonomicznymi. Wynika to głównie ze znacznego różnicowania możliwości poszczególnych metod cięcia termicznego, ich jakości i dokładności cięcia, a także kosztów budowy stanowiska oraz eksploatacyjnych. Dynamiczny rozwój tych technologii, a w szczególności cięcia plazmowego i laserowego, w ostatnich latach w znacznym stopniu umożliwił wprowadzanie na szeroką skalę zautomatyzowanych procesów spawalniczych, w tym także procesów zrobotyzowanych. Kluczowym elementem w tym zadaniu było uzyskanie w procesie przygotowania elementów do spawania (cięcia i ukosowania) dużej dokładności i powtarzalności wycinanych detali. Z punktu widzenia wymaganej jakości wykonywanych połączeń spawanych w warunkach zmechanizowanych i zautomatyzowanych jest wymagana właściwa jakość powierzchni uzyskiwanej po cięciu termicznym. To zagadnienie obejmuje szereg istotnych elementów związanych zarówno bezpośrednio z powierzchnią po cięciu jak i obszarem przypowierzchniowym i będzie przedstawione w kolejnym artykule na przykładzie cięcia blach o grubości 18 mm ze stali S355 metodą tlenową, laserową i plazmową. Fragmenty powierzchni uzyskanej po cięciu tlenowym, laserowym i plazmowym przedstawiono na rysunku 4 jako zapowiedź kontynuacji tej tematyki.

## Literatura

- [1] Klimpel A.: Spawanie zgrzewanie i cięcie metali. Technologie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [2] Klimpel A.: Podręcznik spawalnictwa. Tom 1: Technologie spawania i cięcia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [3] Ferenc K.: Spawalnictwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- [4] Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera. Tom 2: Spawalnictwo, praca zbiorowa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [5] Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [6] Dobrowolski Z.: Podręcznik spawalnictwa. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [7] Klimpel A.: Technologie laserowe. Spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [8] Ferenc K., Ferenc J.: Spawalnicze gazy osłonowe i palne. Wydawnictwa naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [9] Słania J., Wilk P.: Analiza i porównanie trwałości elektrod stosowanych podczas zmechanizowanego cięcia plazmowego. Przegląd Spawalnictwa 2014, nr 7, str. 40-53.
- [10] Słania J., Milewski P.: Porównanie cięcia laserowego z cięciem strumieniem wodno-ściernym. Przegląd Spawalnictwa 2014, nr 7, str. 30-40.