

Andrzej MAZURKIEWICZ¹

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ PO PRZECINANIU RÓŻNYMI METODAMI

Przecinanie materiałów to pierwszy etap wytwarzania wyrobów. Od jakości wykonania tej operacji zależą właściwości powierzchni cięcia wpływające na dalszy proces obróbki wyrobu. W pracy uwzględniono najważniejsze numeryczne metody cięcia: gazową, plazmową, laserową, cięcie strumieniem wodno-ściernym, wycinanie elektroerozyjne. Określono podstawowe parametry wpływające na jakość powierzchni cięcia, związane z technologią obróbki oraz z rodzajem materiału przecinanego.

THE CHOSEN PROPRIETIES OF THE TOP LAYER AFTER CUTTING WITH VARIOUS METHODS

Cutting materials is the first stage of the production the articles. Proprieties of cutting surface influencing on the farther process, depends of the quality of the operation. The most important numeric methods of cut were considered in the article: gas, plasma, laser, water-abrasive stream, electro erosion cutting. It was qualified basic parameters influencing on the quality of the surface cuts connected with the technology of the processing and from the side of the material cut.

1. WSTĘP

Cięcie to proces technologiczny stosowany najczęściej w obróbce materiałów metalowych polegający na wytworzeniu takiego stanu naprężenia w żądanym miejscu, aby nastąpiło w nim pęknięcie obrabianego materiału, poprzedzone zazwyczaj odkształceniem plastycznym. Istotą cięcia jest pokonanie spójności materiału. Proces ten wymaga wkładu odpowiedniej energii.

W zależności od rodzaju energii i sposobu oddziaływania na obrabiany materiał można wyróżnić:

- cięcie mechaniczne,
- cięcie gazowe (tlenem, plazmą),
- cięcie wiązką promieni lasera,

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54.
tel: + 48 48 361-76-07, e-mail: amazurkiewicz@pr.radom.pl

- cięcie strumieniem wody i wody ze ścierniwem,
- wycinanie elektroerozyjne.

We wszystkich procesach cięcia termicznego oraz podczas cięcia strumieniem wody nie ma bezpośredniego kontaktu narzędzia z obrabianym przedmiotem, nie ma więc nacisku na ten przedmiot. Ma miejsce punktowe (lokalne) oddziaływanie medium tnącego.

Stosowane metody cięcia różnią się ilością zużytej energii, szybkością cięcia, wielkością ubytku materiału, wpływem cieplnym na cięty materiał, jakością ciętych krawędzi. Dążenie do zmniejszenia naddatków i zwiększenia szybkości cięcia oraz dodatkowo zmniejszenie ilości wpływu ciepła na cięty materiał i kosztów całej operacji wpłynęło na rozwój technologii cięcia materiałów. Jednocześnie dąży się do tego, aby wycinane detale o kształtach coraz bardziej skomplikowanych były już gotowym produktem bez dodatkowej obróbki mechanicznej, a przy tym posiadającym dokładny kształt i minimalny wpływ na warstwę wierzchnią materiału.

Bardzo ważnym zagadnieniem określającym jakość cięcia jest stan warstwy wierzchniej gdyż ma ona wpływ na właściwości materiału (twardość, kruchość, odporność na korozję) oraz może mieć wpływ na dalszą obróbkę.

2. WAŻNIEJSZE NUMERYCZNE METODY CIĘCIA

Do najchętniej stosowanych metod cięcia należą numeryczne metody do których należy zaliczyć cięcie: gazowe, plazmowe, laserowe, wodno-ściernie, elektroerozyjne. Są to więc przede wszystkim metody termiczne. Według normy EN ISO 9013:2002+A1:2003 procesy cięcia termicznego mogą być klasyfikowane zgodnie z fizyką procesu cięcia i zgodnie ze źródłem energii, zewnętrznie działającym na przedmiot obrabiany. Są one klasyfikowane ze względu na przeważający proces spalania, topienie lub sublimacji. Wspólną cechą metod termicznych jest punktowe doprowadzenie wysokoenergetycznego strumienia tnącego.

Cięcie gazowe tlenem umożliwia wypalanie z dużą wydajnością bez dużych kosztów inwestycyjnych (maszyny są wielokrotnie tańsze od lasera). Dokładność cięcia wynosi 1 mm, przy czym przy dużych szybkościach cięcia oraz przy cienkich blachach jakość powierzchni rozdzielania ulega pogorszeniu. Przy dużych grubościach cięcia trudno jest uzyskać prostopadłość płaszczyzny cięcia do powierzchni blachy. Zastosowanie specjalnych palników umożliwia cięcie pod lustrem wody, co eliminuje zapylenie powstające podczas procesu [1]. Metal przeznaczony do cięcia w podwyższonej temperaturze powinien łatwo tworzyć tlenki, a powstające produkty reakcji powinny bez trudu wypływać ze szczeliny, materiał na dużej powierzchni łatwo nagrzewa się, a wynikiem jest mała dokładność kształtu.

Proces cięcia plazmowego polega na stapianiu i wyrzucaniu metalu ze szczeliny cięcia silnie skoncentrowanym plazmowym łukiem elektrycznym, jarzącym się między elektrodą nietopliwą a ciętym przedmiotem. Plazmowy łuk elektryczny jest silnie zjonizowanym gazem o dużej energii kinetycznej, przemieszczającym się z dyszy plazmowej, zawężającej się w kierunku szczeliny cięcia, z prędkością bliską prędkości dźwięku.

Do cięcia materiałów konstrukcyjnych przewodzących prąd elektryczny są stosowane wyłącznie palniki plazmowe o łuku zależnym. Materiały niemetaliczne mogą być cięte jedynie palnikami plazmowymi o łuku niezależnym. Natężenie prądu decyduje o temperaturze i energii łuku plazmowego i jest głównym parametrem wpływającym na grubość cięcia oraz wydajność i efektywność procesu. Wraz ze zwiększeniem natężenia

prądu zwiększa się prędkość cięcia i grubość cięcia, wiąże się to jednak ze zwiększonym zużyciem elektrod, należy wówczas zwiększyć średnicę dyszy plazmowej, co wpływa na szerokość szczeliny cięcia. Zbyt małe natężenie prądu powoduje natomiast początkowo pojawienie się wad procesu w postaci nawisów metalu przy dolnej krawędzi, a następnie brak przecięcia. Zbyt duże natężenie prądu pogarsza się jakość cięcia, zwiększa szerokość szczeliny, pojawiają się zaokrąglenia górnych krawędzi i odchylenie od prostopadłości, jednakże zwiększają się również naprężenia i odkształcenia cieplne. Zmniejszenie średnicy dyszy powoduje wzrost temperatury i prędkości wpływu strumienia plazmy, a tym samym wzrasta niebezpieczeństwo uszkodzenia dyszy na skutek przeskoku łuku. Zmniejszenie szybkości cięcia powoduje wzrost szerokości szczeliny i powstanie sopli i nacieków na dolnej krawędzi cięcia, natomiast zwiększenie szybkości cięcia prowadzi do powstania progu i pogarsza jakość cięcia, trudności w utrzymaniu prostopadłości krawędzi [1, 2]

Cięcie laserowe polega na wypalaniu (wytapianiu) szczeliny w przedmiocie skoncentrowana wiązką laserową, wytworzoną w rezonatorze optycznym, w atmosferze gazu laserowego, który najczęściej jest mieszaniną dwutlenku węgla, azotu i helu. Gęstość energii wiązki w ognisku o średnicy 0,1-0,5mm wynosi $5 \cdot 10^4 \text{ MW/m}^2$. Na proces cięcia laserem wpływa położenie ogniska wiązki, które powinno być utrzymane w granicach kilku dziesiątych milimetra. Przebieg cięcia laserowego uzależniony jest od rodzaju ciętego materiału. Materiały niemetalowe (guma, azbest, ceramika, drewno) dobrze absorbują promienie wiązki laserowej. Natomiast metale znacznie gorzej absorbują te promienie i duża część energii wiązki jest rozproszona. Metale w znacznym stopniu odbijają promienie lasera i cięcie ich jest utrudnione. Na cięcie materiałów takich jak: stal, tytan i jego stopy, drewno, tkanina, skóra, ceramika, stosuje się przeważnie lasery CO_2 [3, 4].

Szybkość cięcia, grubość ciętego materiału, szerokość szczeliny i strefy działania termicznego zależą od mocy wiązki laserowej, stopnia zogniskowania wiązki, parametrów ciętego materiału. Istnieje minimalna wartość energii promieniowania umożliwiająca rozdzielenie materiału o danej grubości, określona przez straty spowodowane przewodnością cieplną materiału. Jest jednak uzależniona od emisyjności obrabianego materiału. Dla danej grubości materiału i mocy wiązki promieniowania istnieje względnie ograniczony zakres prędkości, który zapewnia optymalną jakość cięcia. Zarówno zbyt małe jak i zbyt duże prędkości cięcia prowadzą do zwiększenia chropowatości powierzchni. Niewłaściwy dobór prędkości cięcia do grubości i gatunku materiału może spowodować przegrzanie materiału, pojawienie się gradu lub w skrajnych przypadkach nie rozdzielenie materiału. Również wymiar i położenie ogniska są ważnymi parametrami wpływającymi zarówno na prędkość, jak i jakość cięcia. Przeciętna szybkość cięcia metali wynosi 1-8 m/min (maksymalnie ok. 15m/min) przy grubości materiału 0,5-3mm (maksymalnie 10-20mm) i szerokości szczeliny 0,2-0,5mm (maksymalnie 1-1,5mm). Przeciętna szybkość cięcia dielektryków 1-10 m/min, a maksymalna ok. 100 m/min przy grubości materiału 0,5-10mm i szerokości szczeliny 0,3-0,8mm.

Cięcie laserowe mimo wielu zalet posiada pewne ograniczenia dotyczące grubości materiału obrabianego (stal do 25 mm, aluminium do 10 mm), czystości powierzchni (bez rdzy, nalotu czy farb), utraty energii na powierzchniach błyszczących czy niekiedy również zmian właściwości na powierzchni mimo niewielkiej strefy wpływu ciepła [4, 5, 6].

Cięcie wodą lub wodno - ściernie jest procesem ubytkowym podczas którego strumień ten poprzez szafirową dyszę o średnicy 0,1-0,35mm kierowany jest na powierzchnie obrabianego materiału i tam odrywa jego cząstki. Energia kinetyczna strumienia jest

przekształcana w pracę dekohezji materiału. Cięcie wodą zdecydowanie różni się od pozostałych metod tym, że odbywa się na zimno – temperatura procesu nie przekracza 40°C. Prędkość cięcia zależy przede wszystkim od rodzaju i grubości materiału [7].

Wzrost głębokości wnikania strugi w materiał powoduje pogarszanie się jakości przecięcia. Kształt, który przyjmuje struga w trakcie przecinania materiałów, odwzorowuje się na bocznych powierzchniach przedmiotów w postaci zwykle równoległych, zakrzywionych rowków. Intensywność występowania śladów poobróbkowych zależy w istotnej mierze od ciśnienia strugi wody i prędkości cięcia, równoznacznej z prędkością posuwu. Ugięcie strugi wodno-ściernej podczas krzywoliniowego przecinania materiałów jest przyczyną błędów wykonania przedmiotów.

Odległość dyszy od przedmiotu decyduje o stożkowatości powierzchni. Im większa odległość końcówki dyszy od materiału tym większa stożkowatość cięcia, zbyt mała odległość dyszy będzie miała tendencje do zatykania się przy pierwszym uruchomieniu, ponieważ pierwszy strumień wody nie będzie miał wystarczająco dużo miejsca by opuścić tubę miksującą. Typowa odległość od materiału to około 1 mm. Jeśli górna powierzchnia materiału jest pomarszczona, pofalowana lub nieregularny odstęp będzie ulegał zmianie, w miarę posuwu strumienia to oczywiście spowoduje zmiany odległości dyszy od powierzchni, a co za tym idzie może mieć wpływ na dokładność wykonania detalu. Odległość dyszy od przedmiotu wpływa również na szerokość przecięcia.

Technologia cięcia wodą stosowana jest do obróbki prawie wszystkich materiałów technicznych. Dodanie do wody środka ściernego umożliwia cięcie materiałów twardych, trudnych do obróbki, takich jak stal, metale i stopy z metali nieżelaznych (miedź, brąz, mosiądz, stopy aluminium, tytanu i inne), kamienie naturalne, szkło, ceramika, materiały kompozytowe. Proces cięcia strumieniem wodnym stosuje się w odniesieniu do części maszyn, których wykonanie innymi technologiami jest trudne, kosztowne lub wręcz niemożliwe.

Głównymi odbiorcami tej metody precyzyjnego cięcia materiałów jest przemysł materiałowy oraz kamieniarski (stanowią one odpowiednio 40% i 30% użytkowników) [1, 7].

Wycinanie elektroerozyjne to usuwanie warstw wierzchniej wykorzystujące erozję, która powstaje pod wpływem przepływu prądu lub wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy przedmiotem obrabianym, a elektrodą roboczą. Wyrzucanie cząstek metalu jest wynikiem działania bardzo wysokiej temperatury (gradientu temperatury) powstającej w miejscu wyładowania i szybkiej zmiany objętości metalu na skutek rozszerzalności cieplnej spowodowanej bardzo krótkim czasem działania ciepła nie zdążącego przeniknąć w głąb materiału.

Do realizacji procesu elektroerozji stosuje się drążarki. Obrabiarki elektroerozyjne (drążarki) znalazły zastosowanie do wykrawania otworów i wgłębień kształtowych w materiałach twardych jak np. w węglkach spiekanych, stali hartowanej i w trudno obrabialnych stopach. Do wycinania kształtowego stosuje się wycinarki posiadające elektrodę w postaci zwykle drutu mosiężnego o średnicy 0,05-0,3mm.

Kłopotliwa dotąd nafta stosowana jako dielektryk, stwarzająca niebezpieczeństwo pożaru i zagrożenie dla człowieka (opary), została zastąpiona wodą zdejonizowaną.

Oprócz właściwości materiału obrabianego i elektrody roboczej na przebieg drążenia elektroiskrowego mają wpływ przede wszystkim temperatura topnienia, przewodnictwo cieplne i elektryczne, ciepło właściwe oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej. Wpływ tych czynników jest różny w zależności od czasu trwania i energii wyładowania. W

przypadki wyładowań o długim czasie trwania rzędu 10^{-3} s zasadniczym czynnikiem, od którego zależy odporność materiału na erozję, jest temperatura topliwości materiału. Natomiast w przypadku wyładowań o czasie trwania 10^{-5} - 10^{-4} s duży wpływ ma przewodnictwo cieplne i właściwości mechaniczne materiału elektrody [8].

3. CHARAKTERYSTYKA WARSTWY WIERZCHNIEJ PO CIĘCIU

Cechy warstwy wierzchniej, tzn. struktura i właściwości nadawane jej w wyniku obróbki przedmiotu zależą od rodzaju tej obróbki – od technologii kształtującej przedmiot. Granica wewnętrzna warstwy wierzchniej jest to teoretyczna powierzchnia wyznaczona przez punkty, w których występują wartości graniczne tej spośród cech warstwy wierzchniej, dla której grubość warstwy wierzchniej określona w ten sposób jest największa. Za granicę wewnętrzną warstwy wierzchniej przyjmuje się określoną umownie głębokość zalegania zmian, jednej lub kilku cech warstwy wierzchniej, nazywaną wartością graniczną [9].

Właściwości warstwy wierzchniej zależą głównie od szerokości strefy wpływu ciepła (SWC) natomiast szerokość strefy wpływu ciepła uzależniona jest od parametrów obróbki, a w tym szczególnie spójności wiązki.

Spójność wiązki decyduje o szybkości przebicia i szybkości nagrzania się materiału obrabianego. Im spójność jest mniejsza tym szerokość strefy wpływu ciepła jest większa. Przykładowe spójności wiązki różnych źródeł energii pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe spójności wiązek [10]

Rodzaj źródła energii	Spójność [W/m^2]
Płomień gazowy	10^7
Ciepło Joulea	10^8
Łuk elektryczny	$10^8 \div 10^{10}$
Plazma	10^{11}
Wiązka elektronów	10^{13}
Laser - fotony	10^{15}

Jakość cięcia plazmowego charakteryzują geometryczne cechy powierzchni cięcia, takie jak ukos powierzchni cięcia oraz jej chropowatość. Ukos wynika z charakterystyki nagrzewania i topienia materiału łukiem plazmowym. W procesie cięcia plazmowego energia cieplna łuku jest przekazywana powierzchniowym warstwom materiału. Intensywność nagrzewania, jest większa przy powierzchni materiału. To właśnie decyduje o tym, że szczelina cięcia nie jest jednakowa na całej grubości przecinanego materiału, powstaje, zatem ukos powierzchni. Jego wielkość zależy od wielu czynników, w tym od: parametrów konstrukcyjnych uchwytu plazmowego, rodzaju i ilości gazów zastosowanych do cięcia a przede wszystkim parametrów technologicznych procesu cięcia.

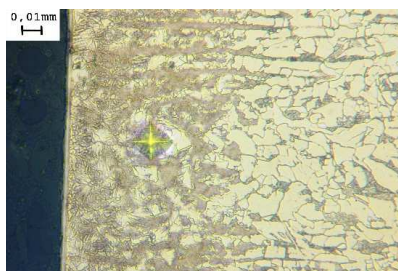
Kryteriami, według których dokonuje się oceny jakości cięcia i klasyfikacji powierzchni są: odchyłka prostopadłości i pochylenia i uśredniona wysokość chropowatości. Odchyłka prostopadłości i pochylenia jest zdefiniowana jako odległość między dwiema równoległymi prostymi (stycznymi), między które jest wpisany profil powierzchni cięcia.

Oprócz wymienionych kryteriów są określone jeszcze kryteria dodatkowe, według których można dokonać oceny jakości powierzchni cięcia. Są nimi: próg, tworzący się na

początku i na końcu procesu cięcia, nadtopienie górnej krawędzi cięcia i obecność wżerów (wyżłobień) na powierzchni cięcia, szerokość szczeliny cięcia i obecność żużla na dolnej krawędzi powierzchni cięcia. Wizualna ocena tych wielkości umożliwia szybkie określenie jakości powierzchni cięcia w odniesieniu do aktualnych parametrów procesu i ewentualną korektę tych parametrów. Oceny takiej możemy dokonać też przez porównanie z wzorcami powierzchni o określonej jakości.

Natężenie prądu jako parametr ustawiany podczas cięcia plazmą wpływa na szerokość strefy wpływu ciepła. Im większe natężenie prądu przy nie zmienionym posuwie tym większa szerokość strefy wpływu ciepła.

Jakość cięcia laserowego daje bardzo dobre rezultaty co do jakości i prędkości wykonania poszczególnych elementów. W związku z tym, że w procesie cięcia laserowego również mamy do czynienia z wydzielaniem ciepła należy spodziewać się, że może ono mieć wpływ na element obrabiany. Szczególnie może to dotyczyć wypalania elementów z cienkich blach lub przy małej prędkości wycinania z czym możemy mieć do czynienia przy obróbce grubych elementów. Przykład zmiany mikrostruktury stali po cięciu laserowym przedstawia rysunek 1.



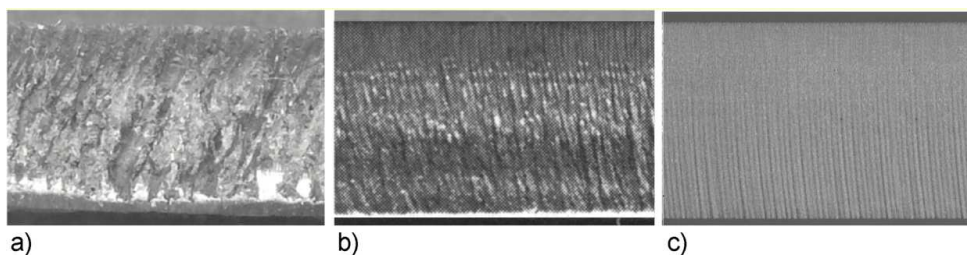
Rys. 1. Widok struktury warstwy wierzchniej wraz z materiałem rdzenia próbki o grubości 4mm ze stali S355J2G3 po cięciu laserowym [11]

Położenie ogniska wiązki również wpływa na szerokość SWC. Najmniejsza szerokość strefy wpływu ciepła określono, gdy ognisko wiązki położone było w odległości $-0,2 \div -0,1$ mm od powierzchni górnej przedmiotu (rys. 4.6). W praktyce ognisko należy ustalać na wysokości około 1/3 grubości materiału od jego górnej powierzchni. Przesunięcie położenia ogniska na powierzchnię przedmiotu prowadzi do rozszerzenia przekroju wiązki i silnego zwiększenia chropowatości powierzchni przecięcia, szczególnie w jej dolnym obszarze [6]. Usytuowanie ogniska wiązki względem powierzchni cięcia powoduje nadmierny ukos powierzchni cięcia. Jeśli ognisko wiązki jest położone zbyt głęboko pod powierzchnią elementu przecinanego, szczelina cięcia przybiera kształt litery V – zwęża się ku dołowi. Jeśli jest położone zbyt wysoko ponad przecinaną powierzchnią, szczelina cięcia zwęża się ku górze. Między tymi położeniami znajduje się położenie optymalne ogniska, które umożliwia uzyskanie równoległych powierzchni cięcia. Powstawanie ukosu powierzchni cięcia może być też wynikiem niewłaściwego doboru prędkości cięcia, błędów układu transmisji wiązki, spowodowanych rozregulowaniem lub uszkodzeniem elementów optycznych albo niewłaściwą polaryzacją wiązki. Do wzrostu szerokości strefy wpływu ciepła w warstwie przykrawędziowej prowadzi zwiększenie mocy lasera przy nie zmienionej prędkości cięcia [12].

Ponadto na SWC wpływają takie parametry jak prędkość cięcia i gatunek materiału. Im prędkość cięcia jest większa przy niezmiennych parametrach (na przykład mocy lasera), tym strefa wpływu ciepła jest węższa natomiast, jeśli chodzi o gatunek materiału stale z większą zawartością węgla mają zwykle większą strefę wpływu ciepła jak i metale o dobrej przewodności cieplnej na przykład miedź. Na przecinarkach sterowanych numerycznie wpływ wielkości szczeliny cięcia na tolerancję wymiarowe elementów może być precyzyjnie skorygowana przez wprowadzenie tzw. korekcji konturu cięcia [7, 13].

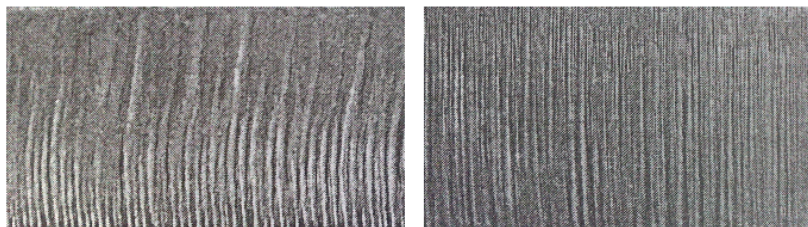
Znaczny wpływ na chropowatość powierzchni przecięcia wywiera prędkość cięcia i grubość materiału. Przy cięciu stali laserem o pracy ciągłej, jak i impulsowej powstają na powierzchniach przecięcia charakterystyczne prążki. W obszarze tym, w miarę wzrostu prędkości cięcia i grubości materiału, rośnie chropowatość powierzchni [13].

Na rysunku 2 przedstawiono przybliżone porównanie chropowatości po różnych metodach cięcia.



Rys. 2. Wpływu metody cięcia na chropowatość powierzchni stali nierdzewnej 18/8 o grubości 6mm: a) ciecie plazmą, b) cięcie laserem, c) cięcie strumieniem wodno-ściernym

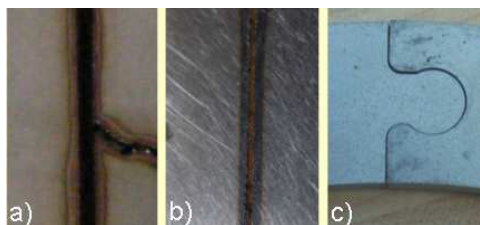
O chropowatości powierzchni decyduje również prędkość cięcia (rys. 3).



Rys.3. Przykłady różnej chropowatości próbki stalowej St3S po cięciu laserem z różnymi prędkościami cięcia (cięcie optymalne – rysunek po prawej stronie) [10]

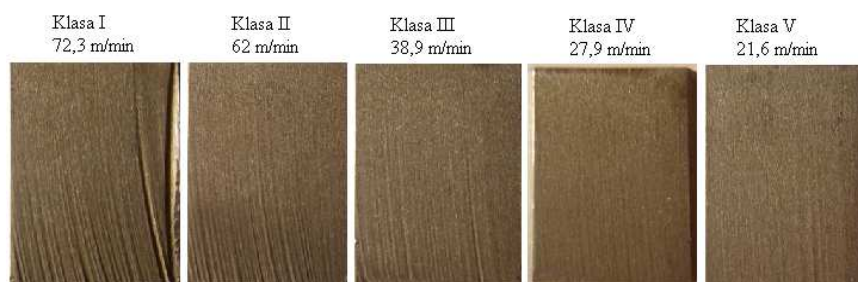
W przypadku cięcia techniką z wypalaniem materiału powierzchnia cięcia może pokrywać się cienką warstwą tlenków. Jest to wada procesu cięcia laserowego. Aby uniknąć tworzenia się warstwy tlenków na powierzchni cięcia materiału ze stali węglowych, jako gazu roboczego należy użyć argonu bądź azotu.

Jakość cięcia strumieniem wodno-ściernym wyróżnia się brakiem obszaru wpływu cieplnego (rys. 4).



Rys. 4. Wielkość wpływu ciepła cięcia stali nierdzewnej 18/8 o grubości 6mm: a) po cięciu plazmą, szczelina cięcia 1,6mm, szerokość wpływu ciepła 4,5mm; b) w po cięciu laserem, szczelina cięcia 0,5mm, szerokość wpływu ciepła 1,6mm; c) po cięciu strumieniem wodno-ściernym, szczelina cięcia 0,7mm, brak wpływu ciepła

Jakość powierzchni cięcia w dużym stopniu zależy od prędkości cięcia (rys. 5).



Rys. 5. Powierzchnie po cięciu strumieniem wodno-ściernym próbki stalowej o grubości 30 mm; klasy dokładności 1÷5 z różnymi prędkościami cięcia [10]

Ta metoda cięcia może wywoływać powstawanie błędów kształtu typu „stożek”. Występowanie takich zniekształceń spowodowane jest zmniejszeniem prędkości posuwu koniecznym do wykonania zaokrąglenia oraz przy zmianach kierunków cięcia. Wady takie możliwe są do wyeliminowania dzięki zastosowaniu doskonalszych urządzeń sterujących.

Jakość powierzchni po obróbce elektroerozyjnej. Również i w tej metodzie obróbki jakość powierzchni cięcia jest zależna od parametrów obróbki. Ważnym parametrem jest energia pojedynczego wyładowania E_i . Z jej wzrostem wzrasta parametr chropowatości R_z powierzchni [14]. Możliwe uzyskanie chropowatości R_z poniżej 0,1 mikrometra, ale przy bardzo małej wydajności, co związane jest z koniecznością zastosowania bardzo małych energii w pojedynczych wyładowaniach.

Mikrostruktura powierzchni obrabianej elektroerozyjnie ma zwykle trzy typowe warstwy. Warstwę białą, powstałą z przetopionego metalu, który nie został wyrzucony w otaczający ośrodek i ponownie zakrzepł. Charakteryzuje się ona bardzo drobnoziarnistą, dendrytyczną strukturą. Twardość jej jest na ogół niższa niż twardość rodzimego materiału, a grubość od kilku mikrometrów do kilkusetnych części milimetra. Drugą warstwą jest warstwa wpływów cieplnych mająca strukturę martenzytyczną. Charakteryzuje się większą twardością niż metal rodzimy i stąd często nazywana jest warstwą o podwyższonej twardości. Wzrost twardości spowodowany jest m.in. dyfuzją węgla powstałego z rozkładu dielektryka oraz bardzo dużą szybkością chłodzenia. Warstwa trzecia jest również wynikiem wpływów cieplnych. Przejęte ciepło przez materiał obrabiany powoduje odpuszczenie tej warstwy, a szybkość chłodzenia jest za mała, aby spowodować ponowne zahartowanie. Warstwa ta charakteryzuje się mniejszą twardością w stosunku do materiału rodzimego i nazywana jest warstwą odpuszczoną (pośrednią) [15].

4. WNIOSKI

1. Porównanie czynników wpływających na właściwości materiałów przecinanych różnymi metodami przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Porównanie czynników wpływających na jakość cięcia różnymi metodami

Rodzaj obróbki	Cięcie gazowe	Plazma	Laser	Strumień wodny lub wodno-ścierny	Elektrodrażenie
Narzędzie tnące	plomień	plazma	promień lasera	strumień wodno-ścierny	Wyładowanie elektryczne
Metoda cięcia	cięcie termiczne	cięcie termiczne	cięcie termiczne	cięcie na zimno	wycinanie termiczne
Wpływ metody cięcia na materiał	duża SWC	duża SWC	wąska SWC	brak wpływu ciepła	wąska SWC, w twardych materiałach 0,02mm
Wpływ na warstwę wierzchnią	bardzo duży	duży	mały	brak	mały
Nagrzewanie materiału	bardzo duże	duże	umiarkowane	brak	umiarkowane
Gładkość powierzchni	bardzo mała	mała szczególnie przy dużych prędkościach	zróżnicowana na wysokości szczególnie przy grubszych materiałach	zróżnicowana na wysokości szczególnie przy grubszych materiałach	wysoka Ra = 2,5 - 0,5 mikrometra
Odczylenie od prostopadłości cięcia	bardzo duże	bardzo duże		małe i średnie	bardzo małe
Grubość materiału	do 300mm,	stali niskowęglowych 3 ÷ 70 mm w specjalnych warunkach 0,5 mm ÷ 150 mm	stal do 30 mm, aluminium do 10 mm	do 300 mm, zależnie od rodzaju materiału	duże zależne od urządzenia
Dokładność cięcia	mała ok. 1,0 mm	mała 0,5 mm	dobra 0,1 mm	bardzo dobra 0,1 mm	bardzo dobra 0,01do0,1mm
Szybkość cięcia w mm/min	mała (600÷100)	duża (od 5000÷100)	duża (6000÷400)	średnia, do 300 dla 10 mm Ti	mała
Szczelina po cięciu	2-6mm dość równoległa	3-8mm zależnie od grubości, mała równoległość	0,2-1,5mm zależnie od grubości, duża równoległość	0,2-3mm zależnie od grubości, duża równoległość	zależnie od grubości drutu od 0,05-0,3 mm
Wycinane kształty	proste	proste	skomplikowane	skomplikowane	skomplikowane
Dalsza obróbka po cięciu	tak	tak	często tak	rzadko	nie
Materiały cięte	metale żelazne	materiały żelazne i nieżelazne (bez tytanu) przewodzące prąd elektryczny	metale (Al, Ti, stal nierdzewna, konstrukcyjna, mosiądz), drewno, PCV, pleksi, bez materiałów o wysokim współczynniku odbicia światła	wszystkie materiały	materiały przewodzące
Zdolność cięcia materiałów pokrytych rdzą lub zgorzeliną	dobra	dobra	dostateczna	bardzo dobra	dostateczna
Koszt optymalnego procesu cięcia	mały od 15zł/rbh	mały, przy małych grubościach niższy niż tlenem	mały i umiarkowanie duży przy większych grubościach, od 40-120zł/rbh	niewiele większy niż laser dla podobnych grubości, drogi dla np. ceramiki korundowej	dość wysoki

2. Zastosowanie metod termicznych może wywołać zmiany właściwości i struktury warstwy wierzchniej materiału.
3. Strefa wpływu ciepła jest mniejsza w przypadku cięcia laserem niż cięcia plazmą i gazem, ponieważ spójność wiązki laserowej jest znacznie większa. Wraz z zwiększeniem parametrów cięcia plazmą, przy niezmienionej prędkości cięcia zwiększa się strefa wpływu ciepła.
4. Ważnym parametrem określającym jakość powierzchni po cięciu jest chropowatość powierzchni. Cięcia gazowe, plazmowe stosowane do grubszych materiałów, z reguły powyżej 20 mm dają złą jakość powierzchni wymagającą obróbki wykańczającej. Tylko dobór optymalnych parametrów przycięciu laserowym i wodno-ściernym daje bardzo dobre wyniki. Bardzo wysoką dokładność pozwala uzyskiwać elektrodrażenie, jednak z wpływem na strukturę powierzchni.
5. Wadą nowoczesnych metod przecinania (laser, plazma, woda) jest występowanie ukosowania w dolnej krawędzi cięcia (najczęściej przy złym doborze parametrów a zwłaszcza wysokiej prędkości cięcia) a tym samym zwiększenia chropowatości i falistości, co powoduje konieczność poddanie materiału dalszej obróbce.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Muzykiewicz W., Łach A.: *Analiza możliwości wykonania gęstych perforacji blach niekonwencjonalnymi technikami wysokoenergetycznymi*, Obróbka Plastyczna Metali t. XVIII nr 1, 2007.
- [2] Kjellberg Finsterwalde. *Plasma und Maschinen*. Materiały informacyjne, 2009.
- [3] Domański R.: *Promieniowanie laserowe-oddziaływanie na ciała stałe*, Warszawa, WNT 1990.
- [4] Faerber M.: *Cięcie laserowe – aktualny stan rozwoju technologii*. Przegląd spawalnictwa, nr 6, 2007.
- [5] Cięcie laserem. *Przyszłość w obróbce blach*. Mechanik nr 4, Warszawa 2007.
- [6] Oczóś K.: Ubytkowa obróbka laserowa. Mechanik, nr 5, 7, Warszawa 1989.
- [7] Flow Polska.: *Technologia cięcia strumieniem wody*. Mechanik nr 4, 2003.
- [8] Siwczyk M.: *Obróbka Elektroerozyjna, Podstawy Technologiczne*, Tom II, Wydanie I, MS 1, Kraków, 2001.
- [9] Burakowski T.: *Inżynieria powierzchni metali: podstawy, urządzenia, technologie*. WNT, Warszawa, 1995.
- [10] Mazurkiewicz A.: *Technologie specjalne kształtowania materiałów*. Politechnika Radomska. Radom 2009.
- [11] Brzozowski A.: *Jakość warstwy wierzchniej blach ciętych laserowo*, Stal Metale & Nowe Technologie nr 3-4, 2008.
- [12] Przetakiewicz W., Kaczmarek S.: *Analiza efektów cięcia blach ze stali niskowęglowych laserem technologicznym*. www.skaczmarek.zut.edu.pl/042-Analiza-IM-93.pdf.
- [13] Pilarczyk J, red.: *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*. Tom 2, WNT, Warszawa, 2005.
- [14] <http://zowie.meil.pw.edu.pl/edm/edm.html>.
- [15] *Obróbka elektroiskrowa stali narzędziowych*. Narzędziowiec, nr 3, 2007.