BADANIE WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESU CIĘCIA PLAZMOWEGO NA JAKOŚĆ WYROBU

Anatol KAŁASZNIKOW, Sławomir KŁOS

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań, jakości krawędzi próbek wycinanych przy użyciu technologii cięcia plazmą. Do badań zastosowano stal konstrukcyjną niestopową z gatunku S235JR o grubości 4mm stosowaną w mikro i małych przedsiębiorstwach. W ramach badań wykonano po 3 próbki dla siedmiu prędkości przy natężeniu prądu 80A. Do pomiaru prostopadłości ciętych krawędzi, wielkości wypływek oraz szerokości ciętego rowka posłużono się skanerem 3D firmy GOM Optikal Measuring Technoloques ATOS. Na podstawie analizy otrzymanych wyników potwierdzono, że w procesie cięcia plazmowego bardzo istotne jest doświadczenie operatora. Największe skosy ciętych krawędzi zmierzono na próbce ciętej z prędkością podaną przez producenta urządzenia. Największe wypływki zmierzono na próbce ciętej z najniższą prędkością natomiast najmniejsze, cięte z najwyższą prędkością. Największą szerokość szczeliny cięcia uzyskano na próbce ciętej z prędkością podaną przez producenta natomiast najmniejszą uzyskano przy prędkości cięcia rekomendowaną przez doświadczonego operatora.

Słowa kluczowe: cięcie plazmowe, parametry cięcia plazmowego, skanowanie 3D, pomiar prostopadłości krawędzi, pomiar wysokości wypływek, pomiar szerokości ciętego rowka.

1. Wstęp

Dla małych i średnich przedsiębiorstw (MSP), ograniczeniami w rozwoju są koszty inwestycyjne. Kryterium, którym kierują się firmy przy zakupie nowych urządzeń to przede wszystkim jego koszt zakupu, rodzaj oraz cena części zamiennych, poziom skomplikowania obsługi urządzenia oraz czas wdrożenia kadry pracowniczej, która będzie je obsługiwała. MSP często rezygnują z zakupu drogich technologii, które mogą powodować problemy z ich obsługą na rzecz prostych urządzeń. Jednym z podstawowych procesów produkcyjnego w produkcji konstrukcji stalowych, jest proces cięcia metali. Cięcie metali może odbywać się w sposób: ręczny, zmechanizowany, zautomatyzowany lub zrobotyzowany. Relatywnie niski koszt zakupu urządzeń do cięcia plazmowego w stosunku do urządzeń cięcia laserowego czy wodnego przyczyniły się do tego, że cięcie plazmowe stało się bardzo popularną obróbką termiczną blach wśród mikro i małych firm. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie metod obróbki blach, ich wady i zalety oraz szacunkowy koszt zakupu. Dla celów badawczych, spośród metod cięcia stali przedstawionych w tabeli 1 wybrano technologię cięcia plazmowego ze względu na szeroki zakres zastosowań, stosunkowo niskie koszty jak i powszechność użycia. Cięcie plazmowe umożliwia termiczną obróbkę metali odpornych na korozję oraz metali nieżelaznych. Technologię cięcia plazmowego opracowano w drugiej połowie lat 50-tych ubiegłego stulecia. Cięcie plazmowe może być stosowane w jednostkowej lub seryjnej produkcji konstrukcji stalowych, a także w różnego rodzaju pracach remontowych i naprawczych [4], [6].

Tab. 1. Wady i zalety wybranych metody cięcia blach

	Ciecie gazowe	Cięcie laserem	Cięcie wodą	Ciecie plazmowe
Zalety	- duży zakres grubości ciętego materiału, - metoda ekonomiczna	- wysoka precyzja - wąska szczelina - duża prędkość - gładka powierzchnia - powtarzalność wymiarowa - mała strefa wpływu ciepła	- wysoka precyzja, - cięcie dużych grubości, - bezpyłowe, - brak strefy wpływu ciepła, - brak problemów z rozszerzalnością materiałów.	- niski koszt zakupu i eksploatacji - znaczne prędkości cięcia - szybkie przebijanie - wąska strefa wpływu ciepłą - niewielka szczelina cięcia
Wady	- długi czas przebijania, - szeroka strefa wpływu ciepła, - tylko dla stali niestopowych niskowęglowych	- wysoki koszt zakupu urządzenia - ograniczona grubość cięcia	- niska prędkość cięcia - wysoki koszt zakupu urządzenia, - wysoki koszt eksploatacji	- hałas oraz zapylenie - promieniowanie - zmiany w strefie wpływu ciepła - trudność w utrzymaniu prostopadłości - mała dokładność wymiarowa
Cena zakupu	3 000 - 20 000 zł	pow. 1 800 000zł	pow. 2 000 000zł	45 000 - 300 000zł

Źródło: opracowanie własne

Technologia ta może być stosowana dla wszystkich materiałów przewodzących prąd elektryczny. W zależności od budowy palnika i mocy źródła zasilającego, możliwe jest cięcie materiałów o grubości do150 mm. W odróżnieniu do cięcia wiązką laserową, metoda ta charakteryzuje się mniejszymi kosztami zakupu i eksploatacji urządzeń. Rozwój najnowszych technologii budowy palników plazmowych pozwalają na cięcie materiałów nie tylko przewodzących, ale również niebędących przewodnikami prądu.

Celem niniejszej pracy jest określenie, jakości cięcia plazmowego w zależności od wybranych parametrów. Pod uwagę wzięto jakości ciętych krawędzi w tym ich prostopadłość, tolerancję wymiarową oraz wielkości wypływek. W badaniach oparto się o wymagania norm: PN-EN 1090-2:2009 [7], DIN EN ISO 9013:2017 [1] oraz EN ISO 17639:2013-12 [2].

2. Parametry cięcia plazmowego

W technologii cięcia plazmowego, na jakość procesu mają wpływ takie parametry jak:

- natężenie prądu,
- napięcie łuku plazmowego,
- prędkość cięcia,
- rodzaj, ciśnienie oraz natężenie przepływu gazu plazmowego,
- rodzaj oraz konstrukcja katody (elektrody),
- średnica dyszy zawężającej,
- położenie palnika względem ciętego materiału,

– odległość położenia palnika względem ciętego materiału.

Przy zakupie urządzenia do cięcia plazmowego, nabywca otrzymuje dokumentację techniczną, obejmującą informacje związane z parametrami oraz elementami palnika wynikającymi z jego konstrukcji. Informacje te odnoszą się do rodzaju gazów plazmowych, ciśnienia oraz natężenia przepływu gazu, typu, rodzaju oraz konstrukcji katod a także średnicy otworu dyszy plazmowej.

Wraz ze wzrostem natężenia prądu wzrasta prędkość cięcia lub przy odpowiedniej prędkości cięcia możliwe jest cięcie materiałów o większej grubości. Natężenie ma duży wpływ na wydajność oraz efektywność procesu. Regulacja natężeniem prądu jest bardzo istotna w procesie cięcia plazmowego. Zbyt duże zwiększenie natężenia prądu, może spowodować znaczny spadek jakości cięcia, wzrost szerokości szczeliny oraz spadek trwałości elektrod, przy zaokrągleniu górnych krawędzi oraz odchyleniem ich od prostopadłości. Zbyt małe natężenie prądu może spowodować duże nawisy zgorzeli na dolnej części ciętej krawędzi lub utratę łuku plazmowego [4]. Prędkość cięcia dostosowuje się do rodzaju części zamiennych palnika (m.in. elektroda i dysza) oraz do grubości ciętego materiału. Jeżeli zastosujemy zbyt małą prędkość cięcia, może ona spowodować przerywanie łuku plazmowego prowadząc do nadmiernego zużycia elektrody i dyszy, zwiększenia się szczeliny oraz powstawania zaokrągleń w górnej krawędzi a na dolnej powstają nawisy roztopionego metalu. Zbyt duża prędkość powoduje spadek jakości, zwłaszcza przy cięciu ręcznym, maleje szerokość szczeliny cięcia a w efekcie następuje brak przecięcia [4], [6]. Bardzo ważne w procesie cięcia plazmowego jest prostopadłość palnika względem ciętego materiału. Nawet najmniejsza odchyłka od prostopadłości może spowodować spadek jakości poprzez cięcie skośnych krawędzi. Odległość dyszy palnika od ciętego materiału powinna być tak dobrana, aby długość łuku plazmowego oraz wprowadzane ciepło nie uszkadzało katody (elektrody). Zbyt mała odległość palnika od ciętego materiału, może powodować odpryski przepalanego metalu tym samym zapychając otwór wylotowy łuku plazmowego powodując jego bocznikowanie. Zbyt duża odległość od ciętego materiału może spowodować wprowadzenie zbyt małej ilości ciepła łuku w dolnej części ciętej krawędzi powodując nadmierne nawisy metalu, ukosowania krawędzi, zwiększenia szczeliny cięcia, utratę łuku a w rezultacie brak przecięcia. W praktyce, aby uzyskać wysoką jakość cięcia, przebicie wykonuje się na znacznej odległości od ciętego materiału, następnie obniża się palnik do żądanej odległości. Dzięki tym manewrom wysokości palnika przy przebijaniu i cięciu, zyskuje się na jakości cięcia oraz wydłuża się trwałości elektrody i dyszy.

W procesie cięcia plazmowego obrabiany materiał poddawany jest działaniom termicznym (łuk plazmowe) oraz mechanicznym (ciśnienie gazu). W wyniku takich oddziaływań przy znacznych szybkościach chłodzenia, dochodzi do zmian struktury oraz właściwości warstwy powierzchniowych obrabianego materiału [4]. Cięcie stali niestopowych lub niskostopowych powoduje powstanie odchyłek prostopadłości ciętych krawędzi, ich krzywizny, u dolnej części przyklejenia ciekłego metalu, zmiany profilu, falistość oraz w mikrostrukturze trzech stref charakteryzujących się różnymi właściwościami. Pierwsza zewnętrzna strefa to strefa przetopionego metalu (SP), druga to strefa wpływu ciepła (SWC) a trzecia to strefa o strukturze materiału rodzimego [3].

3. Wymagania jakościowe dotyczące wykonania konstrukcji stalowych

Norma PN-EN ISO 1090-2:2009 dotyczy procesu wytwarzania konstrukcji stalowych lub jego poszczególnych elementów. Zgodnie z zapisami, cięcie wykonuje się w sposób

zgodny z obowiązującymi normami i przepisami w zakresie tolerancji geometrycznych, maksymalnej twardości, oraz jakości powierzchni ciętych. Wyroby niezgodne nie powinny być stosowane dopóki nie zostaną poprawione. Zgodnie z normą należy zwrócić szczególną uwagę na elementy cięte, które w dalszej obróbce będą przeznaczone do nakładania powłok np.: warstwy pasywne, galwaniczne, warstwy malarskie. Należy usunąć wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia powstałe w procesie cięcia: zadziory, grad, przyklejenia ciekłego metalu. Zgodnie z normą PN-EN ISO 1090-2:2009 oraz z wprowadzoną Zakładową Kontrolą Produkcji, przydatność procesów cięcia termicznego powinna być cyklicznie sprawdzana. Audyty te są określone w zależności od wielkości produkcji, częstości zmian technologii oraz rodzaju ciętych detali. Ze względu na wpływ ciepła na strukturę materiału, oprócz badań jakościowych powierzchni ciętych określonych w DIN EN ISO 9013:2017 należy przeprowadzić badania metalograficzne, które określa norma EN ISO 17639:2013-12. Celem badań mikroskopowych jest określenie wpływu procesu cięcia termicznego na własności strukturalne obrabianego materiału. Na podstawie analizy wyników badań, użytkownik może określić odpowiednią metodę cięcia oraz dobrać materiał, który będzie spełniał założone wymagania. W tabeli 2 przedstawiono dopuszczalne twardości maksymalne (HV10).

Tab. 2. Dopuszczalna twardość maksymalna (HV10)

Normy wyrobów	Gatunek stali	Twardość maksymalna
EN 10025-2 do 5	S235 do S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2 i EN 10149-3	S260 do S700	450
EN 10025-6	S460 do S690	
Uwaga. Wartości przedstawione w tabeli, zgodne z EN 15614-1, stosuje się do gatunków stali wymienionych w ISO/TR 20172		

Źródło: [9]

4. Wyniki badań eksperymentalnych

Do badań zastosowano stal niestopową konstrukcyjną z gatunku S235JR, wykonaną zgodnie z obowiązującą normą EN 10025-2-04 ciętą w postaci standardowego arkusza blachy o grubości 4 mm. Skład chemiczny oraz oznaczenie stali przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Skład chemiczny stali S235JR

Stal	C %	Si, Ni %	Mn %	S,P %	Cr, Al %	Cu %	Mo, Ti, Nb, V %	N %	CEV %
S235 JR	0,12	0,02	0,53	0,014	0,03	0,04	0,002	0,006	0,22

Źródło: [8]

Badania procesu cięcia plazmowego przeprowadzono w przedsiębiorstwie AK ANATOL przy użyciu urządzenia przeznaczonego do wypalania blach typu WPA-6000 Compakt. Stanowisko badawcze obejmowało stół CNC, palnik plazmowy i gazowy, źródło plazmowe ForCUT 133 WDM, osuszacz powietrza, filtry powietrza oraz program sterujący SMART CNC. Do analizy zależności, pomiędzy jakością powierzchni ciętych elementów a kosztami wytwarzania elementu, wykonano cięcie plazmowe próbek o wymiarach 40,0 x 25,0 mm przy natężeniu prądu 80 A w różnym zakresie prędkości. Każde badanie powtórzono dla 3 próbek. Przykładową próbkę przedstawiono na rysunku 1.

Rys. 1. Przykładowa próbka 40 x 25 mm
Źródło: opracowanie własne

W tabeli 4 przedstawiono oznaczenie próbek oraz ich prędkości cięcia. Próbka o numerze 4/8/1 została wykonana przy prędkości ciecia zgodnej z doświadczeniem operatora (3600mm/min). Próbka 4/8/6 jest próbką zgodną z danymi tabelarycznymi podanymi przez producenta. Ponieważ zgodnie z doświadczeniem operatora efektywna prędkość cięcia blachy stalowej o grubości 4 mm przy natężeniu 80 A wynosi 3600mm/min postanowiono wykonać po 3 próbki dla każdej z prędkości zwiększając oraz zmniejszając ją o 10%. W ramach badań wykonano 21 prób cięcia przy siedmiu prędkościach.

Tab. 4. Parametry cięcia dla wybranych próbek (opracowanie własne)

Natężenie [A]	80A						
Grubość [mm]	4						
Wysokość palnika [mm]	3						
Ciśnienie gazu [bar]	5,8						
Czas dziurkowania [s]	0,1						
Oznaczenie próbek	4/8/2	4/8/3	4/8/4	**4/8/1**	4/8/5	**4/8/6**	4/8/7
Procentowa zmiana prędkości [%]	130	120	110	**100**	90	**80**	70
Prędkość cięcia [mm/min]	2520	2880	3240	**3600**	3960	**4320**	4680

Źródło: opracowanie własne

W tabeli nr 5 przedstawiono parametry cięcia plazmowego określone przez producenta dostarczone wraz z instrukcją zakupionej wycinarki.

Zgodnie z normą DIN EN ISO 9013:2017 w celu określenia jakości, wykonano badania prostopadłości ciętych krawędzi, szerokości szczeliny oraz wielkości wypływek ciekłego metalu u dolnej krawędzi próbek. Badania próbek wykonano w Regionalnym Centrum Badań i Rozwoju Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Wałczu. Do wykonania analizy prostopadłości powierzchni posłużono się urządzeniami stanowiska do skanowania 3D (rysunek 2). Stanowisko badawcze do skanowania 3D, obejmowało:

- komputer z oprogramowaniem firmy ATOS Profesional seria V8 SR1 dedykowany do obsługi scanera,
- modem sterujący stołem obrotowym scanera z automatycznym i manualnym sterowaniem. Jest integralną częścią stołu obrotowego,
- stół obrotowy o wymiarach fi 600mm z udźwigiem max 100kg,

- skaner firmy GOM Optical Measuring Technoloques ATOS ZM z dwoma obiektywami i jednym sensorem,
- regulowane ramie skanera wraz z uchwytem.

Tab. 5. Nominalne wartości parametrów cięcia plazmowego podane przez producenta [5]

Prąd 80 A				**Plazma O_2 / Wtórne powietrze**						**STAL**
Ciśnienie gazów przedmuch bar		Ciśnienie gazów-cięcie bar		Grubość ciętego materiału	Napięcie łuku	Wysokość palnika	Prędkość cięcia	Wysokość startu		Czas dziurkowania
Plazma	Wtórne	Plazma	Wtórne							
N2,powietrze	powietrze	O_2	powietrze	mm	V	mm	mm/min	mm	%	S
2,4	2,4	5,8	2,4	**2**	112	2,5	10200	3,8	150	0,1
				2,5	115	2,5	1400	3,8		0,1
				3	117	2,5	4650	3,8		0,2
				4	120	2,0	4300	3	200	0,2
				6	123	2,0	2540	3		0,3
				10	127	2,0	1900	3,8		0,5
			1,2	**12**	130	2,0	1350	5,0	250	0,7
				15	133	2,0	1000	5,0		0,8
				20	135	2,5	653	5,0		0,9

Kolejność zużywających się części					
Mufa zewnętrzna	Osłona	Mufa wewnętrzna	Dysza	Rozdzielacz	Elektroda
220173	220189	220176	220188	220179	220187

Rys. 2. Stanowisko do skanowania 3D
Źródło: opracowanie własne

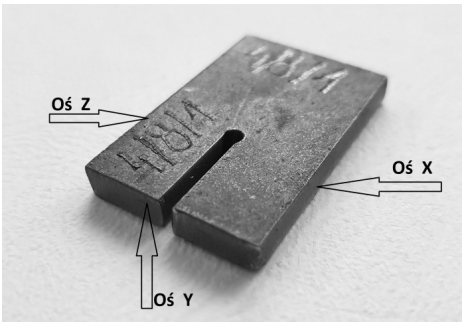
Poprawne przeprowadzenie skanowania 3D wymaga postępowania wg odpowiedniej kolejności wykonywania czynności. Pierwszą z nich jest uruchomienie urządzenia i odczekania 30 minut celem nagrzania sensorów do odpowiedniej temperatury. Ich zbyt niska temperatura powoduje występowanie błędów pomiarowych. Po upływie 30 minut, należy sprawdzić czy nie nastąpiła dekalibracja skanera. O tym fakcie informuje oprogramowanie skanera po nakierowaniu głowicy skanującej na obrotowy stół, na którym umieszcza się skanowane obiekty. W przypadku konieczności ponownej kalibracji, wykonuje się ją przy pomocy płyty kalibracyjnej wykonując czynności wskazywane przez program kalibracyjny skanera. Gdy urządzenie jest już gotowe do wykonania pomiaru, należy przygotować odpowiednio skanowany element. Głównym czynnikiem utrudniającym poprawne przeprowadzenie skanowania są refleksy świetlne, czyli obrazy odbitego światła od skanowanego obiektu, dlatego jego powierzchnię pokrywa się bardzo cienką warstwą pyłu z kredy wymieszanej z alkoholem, która jest nanoszona ręcznie za pomocą spray'u specjalnie do tego celu wyprodukowanego (rysunek.3). Następnie obiekt skanowany umieszczamy na obrotowym stole. Do unieruchomienia badanych próbek użyto

plasteliny. Kolejnym krokiem jest ustawienie kamery za pomocą dwóch wskaźników laserowych. Ostatnim krokiem jest ustawienie w programie skanowania takich parametrów jak czas naświetlania dla pomiaru oraz czas naświetlania dla punktów referencyjnych.

Rys. 3. Nanoszenie warstwy kredy na detal
Źródło: opracowanie własne

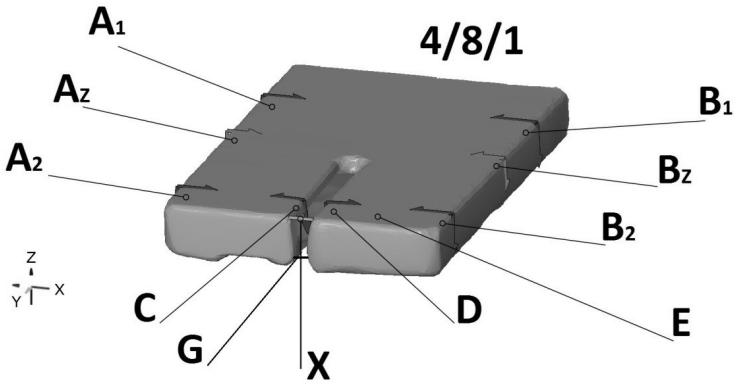
Po dokonaniu opisanych czynności można przystąpić do skanowania próbek. Na wstępie przeprowadza się skanowanie próbne, które polega na zrobieniu jednego zdjęcia obiektu. Na podstawie otrzymanego obrazu można ocenić jakość skanowania i dokonać korekty parametrów skanowania.

Po ewentualnej korekcie ustawień, w zależności od stopnia złożoności skanowanego elementu podaje się ilość kroków i wielkość kąta, który zostanie podzielony zgodnie ze wskazaniem ilości kroków. Po wykonaniu wszystkich kroków skanowania ocenia się jakość otrzymanego komputerowego modelu skanu i w przypadku niezadawalającego rezultatu wykonuje się ponowne skany według wyżej opisanej procedury. Jeżeli jednak jakość jest zadawalająca można przystąpić do obróbki komputerowej zeskanowanego modelu. Pierwszym krokiem jest usadowienie wymiarowanej próbki względem osi X,Y,Z. polega to na przytwierdzeniu zadanej płaszczyzny badanego obiektu do osi X,Y,Z. W przypadku próbek po cięciu plazmowym przyjęto, że osią Z jest grań (dolna część badanej próbki), osią Y grubość próbki od strony nacięcia a osią X grubość próbki z prawej strony grani (rysunek 4). Po ustaleniu i usytuowaniu próbki względem osi, można przejść do wymiarowania płaszczyzn, kątów, prostopadłości, wypływek i innych.



Rys. 4. Wyznaczenie osi badanych detali
Źródło: opracowanie własne

Jak już wcześniej wspomniano przeprowadzenie badań prostopadłości krawędzi oraz szerokości rowka i wysokości wypływek wykonano w celu określenia jakości cięcia plazmowego. Na rysunku 5 przedstawiono zwymiarowany za pomocą skanera 3D detal.



Rys. 5. Zwymiarowany detal pod kątem prostopadłości krawędzi, szerokości ciętego rowka oraz wielkości wypływek - A1-A2, B1-B2 – punkty poboru pomiaru prostopadłości, Az, Bz – średnia wszystkich wymiarów kąta, C i D – pomiar kąta szczeliny, D - największa wysokość przyklejonego żużla, X- górna szerokość szczeliny, G - dolna szerokość szczeliny
Źródło: opracowanie własne

Z analizy otrzymanych wyników można wywnioskować, iż największe skosy ciętych krawędzi zmierzono na próbce oznaczonej numerem 4/8/6, gdzie średnia odchyłka zewnętrznych krawędzi wyniosła 96,49°. Próbka szósta jest to próbka ciętą z prędkością 4320mm/min podaną przez producenta urządzenia. Najmniejszą odchyłkę od prostopadłości zmierzono na próbce 4/8/2 gdzie średnia z wszystkich pomiarów wyniosła 93,36°. Jest to próbka cięta z najniższą prędkością i która wynosiła 2520mm/min.

Największe wypływki ciekłego metalu zmierzono na próbce o numerze 4/8/3 ciętej z prędkością najniższą i wynosiły 1,12mm natomiast najmniejszą wypływkę zmierzono na próbce o numerze 4/8/7 ciętej z najwyższą prędkością. Wysokość wypływki tej próbki wynosi 0,59mm.

Analizując szerokość szczeliny cięcia można wywnioskować, iż różnica pomiędzy górną szerokością szczeliny a dolną jest największa w próbce oznaczonej numerem 4/8/6 (dane producenta) i wynosi 0,95mm natomiast najmniejsza jest w próbce 4/8/4 i wynosi 0,56mm.

Wykonane badania prostopadłości krawędzi, szerokości szczeliny oraz wysokości wypływek są jednym z pierwszych badań, które należy wykonać dla określenia jakości cięcia. Zamawiający usługę ciecia plazmowego może poprosić wykonawcę o inny rodzaj badań ciętych krawędzi np.: charakterystyki górnej lub dolnej krawędzi ciętej i w tym przypadku należy skierować swoją koncentrację na zadany rodzaj badań.

W produkcji konstrukcji stalowych, bardzo dużą uwagę zwraca się na jakości powierzchni ciętych w tym tolerancji wymiarowej. Norma PN-EN ISO 1090-2: 2009 w tablicy 9 rozdziału 6.4.3 dla danych klas konstrukcji stalowych (EXC) przywołuje normę DIN EN ISO 9013: 2017 o pięciu zakresach tolerancji prostopadłości lub nachylenia, u.

Zakres pierwszy jest zakresem o najwyższej jakości ciętych krawędzi natomiast piąty o najniższej tolerowanej. W tabeli 6 przedstawiono poszczególne zakresy oraz maksymalne tolerancji wymiarowej lub nachylenia, u przypisane dla blachy o grubości 4mm.

Tab. 6. Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, u, odchyłki dla blach o grubości 4mm

Zakres	Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, u mm	Odchyłka [mm]
1	0,05 + 0,003 a	0,062
2	0,15 + 0,007 a	0,178
3	0,4 + 0,01 a	0,44
4	0,8 + 0,02 a	0,88
5	1,2 + 0,035 a	1,34

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Na podstawie normy PN-EN ISO 1090-2 oraz DIN EN ISO 9013: 2017 można stwierdzić, że jakość powierzchni ciętych za pomocą źródła plazmy w tym prostopadłości i nachylenia spełniają wymagania dla konstrukcji klasy EXC2 oraz EXC3. Zewnętrzne krawędzie wszystkich próbek zakwalifikowano do zakresu trzeciego. W przypadku cięcia zewnętrznych wymiarów próbek, elementy można zakwalifikować dla konstrukcji z zakresu klasy EXC3 zgodnie z normą PN-EN ISO 1090-2. W przypadku wewnętrznych szczelin próbki należy zakwalifikować dla konstrukcji EXC2. Warto przypomnieć, iż próbki o numerze 4/8/1 (prędkość 3600 mm/min, zgodna z doświadczeniem operatora) oraz 4/8/7 są najbliżej zakresu 3 być może przy niewielkiej korekcie prędkości cięcia można osiągnąć zakres EXC3. Zakres EXC3 oznacza konstrukcje o wyższej jakości wykonania niż EXC2 zgodnie z normą PN EN ISO 1090-2

5. Wnioski i kierunki dalszych badań

Analizując wyniki badań, można stwierdzić, że doświadczenie operatora w procesie cięcia plazmą jest kluczowe dla zapewnienia określonej jakości ciętych elementów. Przeprowadzone badania pokazują jednoznacznie, że nie można opierać się wyłącznie na danych tabelarycznych podawanych przez producentów urządzeń. Wykonując cięcie zgodnie z danymi tabelarycznymi można narazić przedsiębiorstwo na dodatkowe koszty, które nie zostały uwzględnione w kosztorysie cięcia półfabrykatów lub gotowych elementów. Do dodatkowych kosztów można zaliczyć m.in:

- usuwanie wypływek,
- prace związane ze szlifowaniem ciętych krawędzi,
- brak tolerancji wymiarowych może spowodować nienaprawialne błędy wymiaru całej konstrukcji,
- niska prędkość cięcia oraz duże natężenie prądu może spowodować wprowadzenie zbyt dużej ilości ciepła a tym samym nienaprawialne naprężenia poprzeczne lub wzdłużne ciętych detali,
- odpady i braki produkcyjne.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, prędkość cięcia ma bardzo duży wpływ, na jakość oraz koszt wykonywanych detali. Przedsiębiorstwo opierające się tylko na danych tabelarycznych dostarczonych przez producenta wraz z urządzeniem zmuszone jest do wykonywania przed cięciem głównym, szeregu prób. Próby wykonuje się każdorazowo dla

danej grubości materiału. Poszukiwanie optymalnych parametrów znacząco wydłuża czas wykonania usługi i powoduje dodatkowe zużycie materiału, a tym samym zwiększenie kosztów (jest to szczególnie ważne dla produkcji jednostkowej). W celu dokładnej analizy, jakości ciętych detali, zostaną przeprowadzone dalsze badania. W pierwszym etapie zostanie przeprowadzone badanie chropowatości profilu RZ5. Dzięki temu badaniu będzie można określić falistość ciętych krawędzi. Drugim etapem badań, będzie badanie mikrotwardości HV10, za pomocą, którego będzie można określić wpływ prędkości cięcia na rozkład twardości materiału rodzimego. Trzecim etapem będzie badanie mikrostruktury, zmian zachodzących w strefie wpływu ciepła oraz wpływu prędkości cięcia na materiał cięty. Wszystkie badania zostaną przeprowadzone ponownie przy zadanych prędkościach cięcia, lecz zostanie zwiększone natężenie prądu z 80A do 130A.

Literatura

1. DIN EN ISO 9013:2017, Thermisches schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualitat . 2017
2. EN ISO 17639:2013-12, Zerstorende Prufung von Schweissverbindung an metallischen Werkstofen – Makroskopische und mikroskopische Untersuchunge von Schweissnahten
3. Kałasznikow A., Michalski M., Surface phenomena accompanying plasma gouging of S355 steel.
4. Klimpel A., Technologia spawania i cięcia metali. WPŚ, Gliwice 1997. Rozdział 14, s 501-515
5. Palnik plazmowy chłodzony wodą. Model MTH13W, 260W. Instrukcja obsługi. Materiały firmy Metal Technika. Wersja z dnia 05.05.2009
6. Pilarczyk J., Poradnik inżyniera. Spawalnictwo Tom 2. WNT, Warszawa 2005. Rozdział 14, s 665-681
7. PN-EN 1090-2:2009, Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2:Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych. 2009
8. Severstal, Certyfikat składu chemicznego, numer certyfikatu 428/00186217-60138, specyfikacja 5215. 19.05.2017
9. Węglowski M., Cięcie termiczne. Kontrola jakości w świetle wymagań norm. Stal, Metale & Nowe Technologie. Maj-Czerwiec 2015

Mgr inż. Anatol KAŁASZNIKOW
Dr hab. inż. Sławomir KŁOS, prof. UZ
Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski
65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 4
tel./fax: 0048 697 724 230, 0048 68 328 2514
e – mail: a.kalasznikow@zsanatol.com.pl
s.klos@iizp.uz.zgora.pl