UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI
WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. **Anatol Kałasznikow**

SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI DOBORU PARAMETRÓW CIĘCIA PLAZMOWEGO DLA POTRZEB REDUKCJI KOSZTÓW WYTWARZANIA

promotor: *dr hab. inż.* **Sławomir Kłos, prof. UZ**
promotor pomocniczy: *dr inż.* **Marek St. Węglowski**

ZIELONA GÓRA, 2018

Podziękowania

Rozprawa doktorska, będąca zwieńczeniem ponad trzech lat bardzo ciężkiej pracy, nie powstałaby bez wsparcia szerokiej grupy osób, których obecność oraz pomoc pozwoliła mi ukończyć dysertację.

Pragnę wyrazić swoje głębokie podziękowanie promotorowi rozprawy dr hab. inż. Sławomir Kłos, prof. UZ za naukową opiekę, życzliwość, wyrozumiałość oraz poświęcony czas na dyskusje, a także cenne wskazówki udzielane mi podczas pisania mojej pracy.

Szczególne podziękowania kieruję do promotora pomocniczego dr inż. Marek St. Węglowski, z Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach za profesjonalne prowadzenie mojej rozprawy od początku do końca, za bardzo szybkie odpowiedzi, za wprowadzenie fachowej nomenklatury do pracy, którą należy posługiwać się w naszej dziedzinie, za motywacje, pomoc w interpretacji wyników oraz wszelkie informacje.

Pragnę podziękować również:
prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak (PK) za dyskusje oraz instrukcje w trakcie pisania rozprawy,
prof. dr hab. inż. Eugene Feldshtein (UZ) za cenne informacje na temat metody Rang oraz planów Placketta –Burmana,
dr inż. Patryk Krupa (UZ) za pomoc w pisaniu programu System Wspomagania Decyzji,
dr inż. Marek Kokot oraz mgr inż. Kamil Woźny (PWSZ Wałcz) za pomoc w wykonaniu badań chropowatości oraz skanowania 3D płyt próbnych,
dr inż. Paweł Schlafka (UZ) za pomoc w wykonaniu zgładów badanych płyt próbnych,
dr inż. Krzysztof Adamczuk (UZ) za pomoc w wykonaniu badań mikrotwardości,
dr inż. Mariusz Michalski (UZ) za pomoc w wykonaniu zdjęć mikroskopowych badanych płyt próbnych,
dr Magdalena Wojciech (UZ) za pomoc w przeprowadzeniu analizy matematycznej,
dr inż. Izabela Gabryelewicz (UZ) za nieocenione wsparcie w trakcie pisania rozprawy.

Pracę dedykuję swojemu ojcu Anatolowi Kałasznikow, który nauczył mnie, że „tylko poprzez ciężką pracę dojdziesz do celu" oraz zaszczepił w mojej osobie takie cechy jak wytrwałość, motywację i siłę walki w życiu codziennym. Mojej mamie Aleksandrze za wiarę we mnie

oraz

mojej kochanej żonie Marcie, która sprawiła, że podjąłem studia wyższe. Dziękuję za to, że w trakcie pisania rozprawy zawsze mnie wspierała, zachęcała oraz motywowała do pracy. Rozprawę dedykuję również swoim synom Szymonowi oraz Konradowi za to, że wyznaczyli cel w moim życiu, za natchnienie, inspirację oraz za „kibicowanie".

Anatol Kałasznikow

SPIS TREŚCI

STOSOWANE SKRÓTY 6

STRESZCZENIE 8

1. WPROWADZENIE - UZASADNIENIE TEMATU PRACY 11

2. PROCES CIĘCIA PLAZMOWEGO – GENEZA PRACY 14

2.1. CHARAKTERYSTYKA METODY CIĘCIA PLAZMOWEGO 14

2.1.1. Definicje cięcia plazmowego 16

2.1.2. Parametry cięcia plazmowego 17

2.1.3. Części eksploatacyjne palnika plazmowego 19

2.1.4. Palniki plazmowe 19

2.1.5. Elektroda 22

2.1.6. Dysze 23

2.1.7. Rozdzielacz 24

2.1.8. Osłona mufy zewnętrznej 25

2.1.9. Mufa zewnętrzna 26

2.1.10. Budowa palników do cięcia plazmowego 27

2.2. WSTĘPNA ANALIZA LITERATURY 30

2.2.1. Parametry cięcia plazmowego 30

2.2.2. Elektrody i dysze 32

2.2.3. Wpływ cięcia plazmowego na własności materiału i SWC – stale niestopowe 35

2.2.4. Wpływ cięcia plazmowego na własności materiału i SWC – stale stopowe i odporne na korozję .. 37

2.2.5. Inne zastosowanie plazmy 39

2.2.6. Cięcie plazmowe a przepisy BHP 40

2.3. PODSUMOWANIE GENEZY PRACY 42

3. CEL, TEZY I ZAKRES PRACY 43

3.1. CEL PRACY 43

3.2. TEZY BADAWCZE 44

3.3. ZAKRES PRACY 44

4. KOSZTOCHŁONNOŚĆ PROCESU CIĘCIA PLAZMOWEGO 45

5. SYSTEMY WSPOMAGANIA DECYZJI 52

5.1. GENEZA ORAZ ROZWÓJ SYSTEMÓW WSPOMAGANIA DECYZJI 52

5.2. DEFINICJE SYSTEMU WSPOMAGANIA DECYZJI 53

5.3. SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI I JEGO ELEMENTY 53

5.4. SYSTEMY WSPOMAGANIA DECYZJI W PROCESIE CIĘCIA PLAZMOWEGO 54

6. METODYKA I PROGRAM BADAŃ 59

6.1. WYMAGANIA DOTYCZĄCE JAKOŚCI POWIERZCHNI CIĘTYCH WG NORMY PN-EN ISO 1090-2:2012 59

6.1.1. Jakość powierzchni po cięciu termicznym ... 60
6.1.2. Maksymalne dopuszczalne twardości ... 60
6.1.3. Wymagania dotyczące jakości powierzchni ciętych wg normy PN-EN ISO 9013:2017 ... 61
6.1.4. Terminy i definicje wyjaśnione za pomocą rysunków ... 61
6.1.5. Tolerancja prostopadłości ... 62
6.1.6. Zakresy pomiarowe ... 64
6.1.7. Metoda oceny zgodności opinii ekspertów – metoda delficka ... 65
6.1.8. Metoda delficka ... 65
6.1.9. Eksperci w doborze parametrów cięcia plazmowego ... 66

7. STANOWISKA BADAWCZE ... 67

7.1. URZĄDZENIE DO CIĘCIA PLAZMOWEGO ... 67
7.2. STANOWISKO DO SKANOWANIA 3D ... 68
7.3. STANOWISKO DO POMIARU CHROPOWATOŚCI ... 70
7.4. STANOWISKO DO POMIARU MIKROTWARDOŚCI METODĄ VICERSA ... 70

8. BADANIA WŁASNE I ANALIZA WYNIKÓW ... 73

8.1. WYBÓR NAJISTOTNIEJSZYCH PARAMETRÓW PROCESU CIĘCIA PLAZMOWEGO ... 73
8.2. PRZYGOTOWANIE PŁYT PRÓBNYCH DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH ... 75
8.3. BADANIA GEOMETRII CIĘTYCH PŁYT PRÓBNYCH ... 82
8.3.1. Zestawienie wyników pomiarów ... 84
8.3.2. Pomiary. Tolerancja prostopadłości ... 92
8.3.3. Tolerancja wymiarowa ... 100
8.4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW GEOMETRII PŁYT PRÓBNYCH ... 108
8.4.1. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 4 mm przy natężeniu 80 A ... 108
8.4.2. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 4 mm przy natężeniu 130 A ... 109
8.4.3. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm przy natężeniu 80 A ... 109
8.4.4. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm przy natężeniu 130 A ... 110
8.4.5. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm przy natężeniu 80 A ... 110
8.4.6. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm przy natężeniu 130 A ... 111
8.4.7. Podsumowanie pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych ... 111
8.5. BADANIE CHROPOWATOŚCI ... 113
8.5.1. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości Rz5 ... 115
8.5.2. Analiza wyników pomiaru chropowatości Rz5 ... 119

8.6. BADANIE MIKROTWARDOŚCI HV0,1 121
8.6.1. Zestawienie wyników pomiaru mikrotwardości HV0,1 122
8.6.2. Analiza wyników pomiaru mikrotwardości HV0,1 135
8.7. MODELOWANIE ZUŻYCIA ENERGII ORAZ OKREŚLENIE KOSZTU WYKONANIA DETALU 139
8.7.1. Modelowanie zużycia energii 139
8.7.2. Określenie kosztu wykonania detalu 144
8.7.3. Koszt przebicia oraz cięcia dla brachy o grubości 4 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A 152
8.7.4. Koszt przebicia oraz cięcia dla blachy o grubości 8 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A 153
8.7.5. Koszt przebicia oraz cięcia dla blachy o grubości 12 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A 153
8.7.6. Koszt oraz jakość cięcia plazmowego wg danych tabelarycznych a cięciem wynikającym z przeprowadzonych badań 154
8.8. ŻYWOTNOŚĆ CZĘŚCI EKSPLOATACYJNYCH 157
8.9. SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI 159
8.9.1. Cel utworzenia aplikacji komputerowej 159
8.9.2. System wspomagania decyzji – aplikacja programowa 162
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE 168
10. KIERUNKI DALSZYCH PRAC 177
11. SPIS RYSUNKÓW 178
12. SPIS TABEL 182
13. LITERATURA 186
14. ZAŁĄCZNIKI 198
ZAŁĄCZNIK NR 1 – PROCESY CIĘCIA W BRANŻY METALOWEJ 198
ROLA I ZNACZENIE MIKRO I MAŁYCH PRZEDSIĘBIORSTW Z BRANŻY METALOWEJ DLA GOSPODARKI 198
TECHNOLOGIE CIĘCIA BLACH 200
Cięcie mechaniczne 202
Cięcie tlenowe 206
Cięcie laserowe 208
Cięcie strumieniem wody 210
ZAŁĄCZNIK NR 2 – CYKL PRODUKCYJNY NA PRZYKŁADZIE FIRMY AK ANATOL 212
Informacja o firmie 212
Cykl produkcyjny 212
ZŁĄCZNIK NR 3 - DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA PŁYT PRÓBNYCH PO CIĘCIU PLAZMOWYM – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8. 216
ZAŁĄCZNK NR 4 - DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA KRAWĘDZI CIĘTYCH PŁYT PRÓBNYCH – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8. 216
ZAŁĄCZNIK NR 5 – ZMIANY MIKROSTRUKTURALNE STALI S235 JR PO CIĘCIU PLAZMOWYM – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8. 216

ZAŁĄCZNIK NR 6 – SKANY 3D BADANYCH PŁYT PRÓBNYCH – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z RYSUNKIEM 8.5, TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8 216

ZAŁĄCZNIK NR 7 – POMIAR CHROPOWATOŚCI PŁYT PRÓBNYCH – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8 217

ZAŁĄCZNIK NR 8 – POMIAR MIKROTWARDOŚCI PŁYT PRÓBNYCH – DANE W WERSJI ELEKTRONICZNEJ. OZNACZENIE PŁYT PRÓBNYCH ZGODNIE Z TABELĄ 8.7 ORAZ 8.8 217

Stosowane skróty

AISI	*(ang. American Iron and Steel Institute) Amerykański Instytut Żelaza i Stali*
DSS/SWD	*(ang. Decision Supporting System) System Wspomagania Decyzji*
GPS	*(ang. Geometrical Produkt Specifications)) – Specyfikacja geometrii wyrobu*
Rt,(Pt, Wt)	*Całkowita wysokość profilu*
CEN	*(fr. Comite Europeen de Normalisation) Europejski Komitet Normalizacyjny*
CAD	*(ang. Computer Aided Desing)Projektowanie wspomagane komputerowo*
CAM	*(ang. Computer Aided Manufacturing)Komputerowe wspomagania wykonania*
CNC	*(ang. Computerized Numerical Control) Komputerowe sterowanie numeryczne*
CPD	*(ang. Construction Products) – Produkty Budowlane*
EWG	*Europejska Wspólnota Gospodarcza*
EXC	*(ang. Execution Class of the Construction) – Klasa wykonania konstrukcji*
Rv,(Pv, Wv)	*Głębokość najniższego wgłębienia profilu*
G.U.S.	*Główny Urząd Statystyczny*
Rz1max	*Maksymalna wysokośc chropowatości*
Rzi	*Maksymalna wysokość profilu*
MES/FEM	*Metoda Elementów Skończonych (ang.Finite Element Method)*
MiMP	*Mikro i małe przedsiębiorstwa*
Rz	*Najwyższa wysokość profile chropowatości*
Rz, (Pz, Wz)	*Największa wysokość profilu*
PLC/SPS	*(ang. Programmable Logic Controller),(niem.Speicherprogrammierbare Steuerung) System sterowania*
Offshor	*Stalowe konstrukcje pełnomorskie*
SWC	*Strefa Wpływu Ciepła*
SGP	*Struktura Geometryczna Powierzchni*
Ra	*Średnia arytmetyczna rzędnych profilu*

Rc, (Pc, Wc)	*Średnia arytmetyczna rządnych profilu*
Rq, (Pq, Wq)	*Średnia kwadratowa rzędnych profilu*
RSm	*Średnia szerokość elementów profilu*
Ra, (Pa, Wa)	*Średnia wysokość elementów profilu*
HV	*Twardość metodą Vickersa*
Rmr	*Udział materiałowy profilu*
Rsk, (Psk,Wsk)	*Współczynnik asymetrii profilu*
Rku, (Pku, Wku)	*Współczynnik spłaszczenia profilu*
Rp, (Pp, Wp)	*Wysokość najwyższego wzniesienia profilu*

Streszczenie

Według Komitetu Inżynierii Produkcji PAN, dziedzina inżynierii produkcji podzielona jest na dziesięć obszarów naukowo-badawczych. Przedstawiona dysertacja wpisuje się w dwa jej obszary (II i VII) [61]:

- II – Wybrane zagadnienia inżynierii procesów wytwarzania. Obszar ten obejmuje procesy zarządzania przetwarzaniem materiałów na wyroby użytkowe, poprzez wytwarzanie elementów maszyn, formowanie kształtu, zmianę wymiarów, modyfikację powierzchni oraz spajanie i inne. Zajmuje się również zagadnieniami związanymi z zasobami czasu pracy pracowników i środków produkcji, przepływem materiałów i informacji,
- VII – Systemy wspomagania decyzji. Zarządzanie wiedzą produkcyjną. Dział tego obszaru zajmuje się metodami analizy decyzyjnej, modelami matematycznymi oraz instrumentami sztucznej inteligencji.

W rozprawie przedstawiono wpływ parametrów cięcia plazmowego (prędkość cięcia, natężenie prądu), na jakość i koszt wykonania wyrobu oraz na żywotność części eksploatacyjnych palnika. Przez jakość produktu rozumie się wartość tolerancji prostopadłości, tolerancji wymiarowych, chropowatości ciętych krawędzi oraz wpływ oddziałowującego ciepła na zmiany mikrostrukturalne badanej stali. Przedstawiona rozprawa wskazuje jeden ze sposobów opracowania systemu wspomagania decyzji w celu obniżenia kosztów produkcji.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów wzajemnie ze sobą powiązanych.

1. W rozdziale pierwszym wprowadzono do zagadnienia będącego przedmiotem rozprawy oraz uzasadniono jej temat.
2. Drugi rozdział dotyczy problematyki cięcia plazmowego. Dokonano charakterystyki technologii cięcia plazmowego oraz stosowanych definicji. Opisano parametry cięcia i ich wpływ, na jakość ciętych krawędzi. Przedstawiono i opisano budowę dostępnych palników plazmowych, a także ich składowe części eksploatacyjne. Na końcu tego rozdziału przedstawiono analizę dostępnej literatury oraz jej podsumowanie.
3. W rozdziale trzecim sformułowano cel, tezy oraz zakres pracy.
4. W czwartym rozdziale przedstawiono sposoby obliczenia kosztochłonności procesu cięcia plazmowego.

5. Rozdział piąty poświęcony został systemom wspomagania decyzji (SWD). Opisano w nim ich genezę oraz rozwój, przedstawiono producentów aplikacji, które wspomagają decyzje dotyczące procesów cięcia plazmowego.
6. W rozdziale szóstym zaproponowano metodykę badań eksperymentalnych i metodę analizy kosztów cięcia plazmowego. Omówiono wymagania stawiane przez obowiązujące normy oraz metody wyłonienia najistotniejszych parametrów cięcia plazmowego.
7. W rozdziale siódmym przedstawiono stanowiska badawcze, na których przeprowadzono analizę jakościową ciętych płyt próbnych.
8. Rozdział ósmy – „badania własne i analiza wyników badań", jest rozdziałem podzielonym na osiem podrozdziałów:
   8.1. W pierwszym podrozdziale, za pomocą metody delfickiej, przeprowadzono wybór najistotniejszych parametrów w procesie cięcia plazmowego,
   8.2. W drugim przedstawiono wyniki badań cięcia płyt stalowych przy uwzględnieniu określonych zmiennych parametrów cięcia. Wycięte płyty stalowe zostały ponumerowane oraz przygotowane do badań geometrii wyrobu,
   8.3. Badania geometrii ciętych płyt próbnych wykonano w trzecim podrozdziale. Na podstawie skanowania 3D, przeprowadzono analizę geometrii ciętych krawędzi, uwzględniając: zakresy tolerancji ich prostopadłości, wymiarowej, szerokości ciętego rowka oraz wielkości powstałych wypływek badanych płyt,
   8.4. W czwartym podrozdziale wykonano analizę wyników geometrii skanowanych płyt próbnych,
   8.5. W kolejnym podrozdziale przedstawiono wyniki badania wpływu prędkości oraz natężenia prądu na chropowatości powierzchni (badanie przeprowadzono metodą stykową),
   8.6. W podrozdziale szóstym wykonano badania wpływu prędkości oraz natężenia prądu na zmiany strukturalne ciętych blach. Do pomiaru mikrotwardości HV0,1 posłużono się metodą Vickersa.
   8.7. Siódmy podrozdział został poświęcony określeniu kosztochłonności cięcia plazmowego. Analizy wykonano na dwa sposoby: korzystając z logarytmicznej funkcji nieliniowej (metodą najmniejszych kwadratów) oraz poprzez wykonanie określonej liczby przebić i długości cięcia płyt próbnych przy równoczesnym pomiarze zużycia energii elektrycznej. W obu przypadkach zużycie energii elektrycznej stanowiło podstawowy koszt cięcia plazmowego. Kończąc podrozdział siódmy, autor niniejszej rozprawy przeprowadził dodatkowe, badania

mające na celu weryfikację kosztochłonności procesu cięcia plazmowego. Dodatkowe badania wykazały, że przeprowadzone badania w niniejszej dysertacji będą miały utylitarne znaczenie dla przedsiębiorstwa,

8.8. W ósmym podrozdziale przeprowadzono analizę czasu żywotności części eksploatacyjnych palnika plazmowego,

8.9. W dziewiątym podrozdziale opisano system wspomagania decyzji w procesie cięcia plazmowego i przedstawiono sposób działania opracowanego oprogramowania.

9. Dziewiąty rozdział pracy został poświęcony podsumowaniu wszystkich wyników oraz sformułowaniu wniosków końcowych. W zakończeniu przedstawiono plany dalszych badań.
10. Rozdział dziesiąty poświęcono kierunkom dalszych badań.
11. W pierwszym załączniku do rozprawy przedstawiono znaczenie wybranych procesów cięcia, realizowanych w przedsiębiorstwach produkujących konstrukcje stalowe, w którym opisano ich wpływ na jakość wyrobów. Drugi załącznik został poświęcony wytwórcy wyrobów metalowych, w którym zaszła potrzeba zwiększenia konkurencyjność poprzez redukcję kosztów wytwarzania. Opisano cykl produkcyjny typowego podmiotu gospodarczego z sektora mikro i małych przedsiębiorstw, gdzie przedstawiona została waga technologii cięcia plazmowego w wytwarzaniu wyrobów z metalu.

Rozprawę kończy wykaz rysunków, tabel oraz spis literatury źródłowej. Ponieważ liczba załączników jest bardzo duża, postanowiono załączniki od 3 do 10 umieścić na elektronicznych nośnikach danych.

Słowa kluczowe: technologie cięcia blach, cięcie plazmowe, system wspomagania decyzji, parametry cięcia plazmowego, koszty cięcia plazmowego, palnik plazmowy, elementy eksploatacyjne palnika plazmowego, skanowanie 3D, badania chropowatości, badania mikrotwardości.

1. WPROWADZENIE - UZASADNIENIE TEMATU PRACY

Ograniczeniem w rozwoju współcześnie działających przedsiębiorstw są coraz większe wymagania rynkowe, do których należą: wzrost liczby konkurencyjnych produktów i technologii, szybkość ich zmian, duża dynamika procesów globalizacyjnych, nowe wymagania jakościowe i konieczność nadążania za postępem technologicznym. Aby utrzymać się na rynku oraz odnieść sukces, każde przedsiębiorstwo zmuszone jest efektywnie wykorzystywać posiadane zasoby produkcyjne, finansowe, potencjał zatrudnionych pracowników oraz przeprowadzać sukcesywne analizy rynku. Wszystkie te działania powodują, że przedsiębiorstwa poddane są ciągłej ewolucji, dostosowują swoje funkcje, cele i zadania oraz metody organizacji i zarządzania do zmieniających się warunków ich działalności [36].

Obecnie podstawą zarządzania wieloma przedsiębiorstwami stało się zarządzanie przez jakość. Wysoka jakość produktów wydaje się czymś zupełnie naturalnym, a działania i rozwój przedsiębiorstw idą w kierunku innowacyjności. Innowacyjność przedsiębiorstw przyczynia się nie tylko do obniżenia kosztów produkcji, ale również kreuje nowe wartości oferowane klientom, co skutkuje wzrostem konkurencyjności.

Modelowanie procesów produkcyjnych, które w efekcie prowadzą do wytwarzania coraz to doskonalszych produktów, wymaga stosowania nie tylko najnowszych technik czy technologii, ale również wsparcia odpowiednich metod i narzędzi z obszaru kształtowania i zarządzania jakością. Idea rozwoju firm, oparta na ciągłym wdrażaniu innowacji oraz utrzymywaniu jakości na określonym, wysokim poziomie, gwarantuje większą atrakcyjność produktów, a to wpływa na zwiększenie pozycji firmy na rynku [11].

Aby przedsiębiorstwo było konkurencyjne, powinno optymalizować procesy produkcyjne. Ograniczeniem w rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych (szczególnie MiMP z branży metalowej) są wysokie nakłady inwestycyjne [50]. W produkcji konstrukcji stalowych, pierwszym etapem wytwarzania wyrobów jest proces cięcia metali. Niski koszt zakupu oraz eksploatacji urządzeń do cięcia plazmą w porównaniu do cięcia laserem lub strumieniem wody spowodował, że technologia cięcia plazmowego stała się bardzo popularną metodą termicznej obróbki blach wśród mikro i małych przedsiębiorstw.

Motywacją do podjęcia badań w niniejszej dysertacji była potrzeba zwiększenia konkurencyjności przedsiębiorstwa AK ANATOL z siedzibą w Żarach produkującego wyroby z metali. Realizacja pracy wymagała przeprowadzenia wielu badań w celu stworzenia systemu wspomagającego decyzje, który umożliwi wzrost wydajność i redukuję kosztów w procesie cięcia plazmowego. Badania przeprowadzono na płytach próbnych z blach

o grubościach 4, 8 i 12 mm ze stali z gatunku S235 JR wytworzonych wg normy PN-EN 10025-2-04. Jest to najczęściej stosowany surowiec w produkcji wyrobów metalowych we wspomnianym przedsiębiorstwie (cykl produkcyjny oraz najważniejsze informacje o przedsiębiorstwie AK ANATOL przedstawiono załączniku nr 2 do niniejszej pracy). Również z analizy literatury wynika, iż wspomniane grubości blach są najczęściej stosowane w produkcji przez mikro i małe przedsiębiorstwa branży metalowej.

Technologia cięcia plazmowego na świecie ma swój początek w drugiej połowie lat 50-tych, natomiast w Polsce jej rozwój zapoczątkował Instytut Spawalnictwa w Gliwicach na początku lat 60-tych [48]. Największy rozwój technologii cięcia plazmowego datuje się na lata 1990 – 2000 i trwa on nieprzerwanie do dziś. Rosnące zapotrzebowanie przemysłu na maszyny do cięcia plazmowego, przełożyło się na rozwój systemów wspomagających decyzje [119]. Proces cięcia plazmowego jest określony przez normę określającą wartości dopuszczalne serii PN-EN ISO 1090:2012, która odwołuje się do normy PN-EN ISO 9013 :2017.

Zasada działania przecinarek plazmowych jest praktycznie taka sama, różnią się one jedynie źródłem zasilania lub prędkością przejść jałowych. Wraz z urządzeniami, producenci przecinarek plazmowych oferują oprogramowania (własne opracowania lub zaadoptowane od innych producentów). Oferowane systemy wspomagające decyzje posiadają pewne braki, które autor niniejszej rozprawy chciał uzupełnić. Analizowane systemy wspomagające decyzje (SWD) w procesie cięcia plazmowego posiadają następujące wady funkcjonalne:

- brak informacji o wpływie podanych w SWD parametrów cięcia plazmowego na geometrię ciętych blach oraz zmian zachodzących w strefie wpływu ciepła,
- brak zdefiniowanych klas tolerancji prostopadłości krawędzi i wymiarów, określonych przez normę PN-EN ISO 9013:2017,
- parametry przedstawione analizowanych SWD, nie spełniają wymagań jakościowych, lub wymagań dopuszczalnych określonych w normach,
- brak określenia czasu cięcia plazmowego, spowodowany nieodpowiednimi parametrami cięcia oraz brak możliwości dokładnego określenia kosztu wykonania detali,
- brak określenia zużycia oraz kosztu części eksploatacyjnych palnika plazmowego.

Powyższe wady funkcjonalne systemu mogą skutkować dodatkowymi kosztami, których przedsiębiorstwo nie uwzględniło w swojej kalkulacji. Tym samym mogą prowadzić do spadku jakości produkowanych wyrobów i rentowności sprzedaży, co w rezultacie przełoży się na zmniejszenie konkurencyjności przedsiębiorstwa.

Zamierzeniem autora niniejszej rozprawy było opracowanie metod umożliwiających stworzenie mobilnej aplikacji programowej, dedykowanej nie tylko doświadczonym operatorom wycinarek plazmowych, ale również, po krótkim wdrożeniu, pracownikom niewykwalifikowanym. Proponowany SWD obejmie zbiór parametrów cięcia plazmowego, pozwalający uzyskać żądaną geometrię ciętych blach, a tym samym określoną klasę jakości. Ponadto umożliwi on oszacowanie czasu i kosztu cięcia detali oraz terminu i kosztu zużycia wybranych części eksploatacyjnych urządzenia.

2. PROCES CIĘCIA PLAZMOWEGO – GENEZA PRACY

2.1. Charakterystyka metody cięcia plazmowego

Technologię cięcia plazmowego opracowano pod koniec lat 50-tych ubiegłego stulecia dla potrzeb cięcia stali odpornych na korozję oraz metali nieżelaznych. Obecnie metoda ta jest jedną z podstawowych technologii pokrewnych spawaniu. Połączenie jakości cięcia, produktywności, kosztów eksploatacji i wszechstronności sprawia, że cięcie plazmowe jest jednym z najpopularniejszych przemysłowych procesów cięcia. Cięcie plazmowe stosuje się w jednostkowej i seryjnej produkcji urządzeń i konstrukcji, a także w pracach remontowych i naprawczych [59, 94]. Może być stosowane w systemie ręcznym, półzmechanizowanym, zmechanizowanym, automatycznym lub zrobotyzowanym [146]. Metoda ta charakteryzuje się wysoką wydajnością, precyzją cięcia oraz, w porównaniu do technologii cięcia laserowego, niskim kosztem zakupu urządzenia oraz jego eksploatacji. Za pomocą przecinarki plazmowej istnieje możliwość cięcia detali o grubości do 150 mm z uwzględnieniem jakości powierzchni ciętych. Cięcie plazmowe powoli wypiera procesy cięcia gazowo-tlenowego w obróbce termicznej materiałów ze stali niestopowych o grubości do 30 mm. Urządzenia do cięcia plazmowego mogą mieć zastosowanie w takich pracach jak: cięcie proste, ukosowanie, żłobienie, cięcie otworów, cięcie i żłobienie w trudno dostępnych miejscach, cięcie dokładne oraz znakowanie.

Źródłem ciepła plazmowego jest skoncentrowany łuk elektryczny, którego elementami strukturalnymi są elektrony, jony i neutralne atomy wzajemnie oddziałujące na siebie. Liczba dodatnich i ujemnych ładunków jest taka sama. Zasada działania polega na zajarzeniu się łuku elektrycznego pomiędzy elektrodą nietopliwą (katodą) umieszczoną w uchwycie palnika, adyszą palnika (anodą). Wytwarza się łuk elektryczny generowany prądem o wysokim napięciu. Łuk ten inicjuje reakcję egzotermiczną gazu roboczego. Wytworzone ciepło powoduje przyrost temperatury strumienia plazmy w zależności od podanego napięcia do 25 000°C. Do niedawna cięcie plazmowe można było wykonać tylko na materiałach przewodzących prąd elektryczny. Jednak nowoczesne palniki plazmowe umożliwiają również cięcie materiałów przewodzących i nieprzewodzących prąd elektryczny. Ich moce dochodzą do 50 kW, a temperatura łuku plazmowego sięga 50 000°C [34].

Na właściwości plazmy ma wpływ rodzaj użytych gazów oraz ich ciśnienie i energia. Do cięcia plazmowego mogą być zastosowane takie gazy jak powietrze, tlen, azot oraz mieszaniny gazów jak argon-wodór, azot-wodór, azot-argon-wodór.

Cięcie plazmowe możemy podzielić na cztery główne odmiany:

- na sucho, palnikami konwencjonalnymi,
- w osłonie gazowej, gdzie wokół dyszy palnika wprowadzany jest gaz ochronny ułatwiający obróbkę i polepszający jej jakość,
- w osłonie wodnej, która polepsza trwałość części eksploatacyjnych palnika dzięki efektowi chłodzenia, z wtryskiem wody do dyszy z dużą prędkością (promieniowo lub stycznie do łuku), tworząc wokół niego zawirowania, co powoduje zawężenie łuku w dyszy i dodatkowo chłodzi jej ścianki, co umożliwia zwiększenie prędkości cięcia.

W przemyśle wytwórczym najczęściej wykorzystuje się urządzenia do cięcia plazmowego sterowane numerycznie CNC. Umożliwiają one cięcie detali o dużej różnorodności kształtów w produkcji jednostkowej i seryjnej. Coraz częściej w przemyśle stosowane są roboty wyposażone w palniki plazmowe o pięciu osiach sterowanych numerycznie [34, 106, 159].
W tabeli 2.1 zestawiono wady i zalety cięcia plazmowego [32, 95].

Do istotnych problemów, które występują przy cięciu plazmowym, należą trudność w utrzymaniu prostopadłości krawędzi, tolerancji wymiarowych, występowanie w dolnej części ciętych krawędzi wypływek oraz zmiany właściwości materiału w strefie wpływu cięcia. W przypadku zmian w strefie wpływu ciepła, problem ten można rozwiązać poprzez zmianę zalecanych parametrów cięcia lub zastosowanie procesu cięcia plazmowego o dużej dokładności, tzw. High Definition. Jednak koszt zakupu takiego urządzenia jest relatywnie wysoki i dla mikro i małych przedsiębiorstw taka inwestycja może być się poważnym obciążeniem, mającym wpływ na płynność finansową.

Tabela 2.1. Wady i zalety cięcia plazmowego [32, 95]

ZALETY CIĘCIA PLAZMĄ	WADY CIĘCIA PLAZMĄ
− wysoka prędkość cięcia, − cięcie bez podgrzewania – szybkie przebijanie, − wąska strefa wpływu ciepła – stosunkowo niewielki wpływ temperatury na cały materiał dzięki dużym prędkościom i wąskiemu działaniu temperatury, − niewielka szczelina cięcia, − możliwość cięcia bez nadpalania materiałów cienkich, − relatywnie niski koszt inwestycji, − bardzo duże tempo produkcji z blachy cienkiej po właściwym ustawieniu i zaprogramowaniu.	− promieniowanie powodowane przez łuk elektryczny obejmujące zakres od podczerwieni do nadfioletu − duży hałas >100dB (ograniczony w przypadku procesu cięcia pod wodą), − zapylenie - duża ilość gazów i dymów (problem rozwiązuje System Inteligentnego Sterowania Stołami Sekcyjnymi), − zmiany w strefie wpływu cięcia, − trudności w utrzymaniu prostopadłości krawędzi (problem rozwiązuje plazma High Definition). − zmiany w mikrostrukturze, − mała tolerancja wymiarowa, − prostopadłość ciętych krawędzi, − występowanie nawisów ciekłego metalu (wypływek).

2.1.1. Definicje cięcia plazmowego

Cięcie plazmowe jako pojęcie techniczne jest trudne do zdefiniowania, ponieważ obejmuje zespół czynników, których wspólne oddziaływanie decyduje o jakości oraz przydatności ciętych elementów.

- Wg Aleksandra Kordusa [63, 64] w procesie cięcia plazmowego „*duża intensywność strumienia plazmy przez swoją koncentrację powoduje w ciągu ułamka sekundy podgrzanie materiału do jego temperatury topliwości. Strumień plazmy na skutek swej dużej prędkości wymywa niejako materiał stopiony, ułatwiając w ten sposób cięcie”. „Do cięcia i spawania używany jest palnik z łukiem nierozdzielnym. Umożliwia on silną koncentrację energii cieplnej, konieczną przy cięciu lub spawaniu”. „Palnikiem można ciąć również metale nieżelazne*”.
- Wg Zbigniewa Celińskiego [19] w procesie cięcia plazmowego: „*łuk elektryczny pali się między wolframowym prętem (katodą) i dyszą miedzianą chłodzoną intensywnie wodą (anodą). Łuk stabilizowany jest ścianami anody oraz gazem roboczym. Gaz roboczy, doprowadzony zwykle stycznie do komory plazmotronu, po zawirowaniu wypływa na zewnątrz otworem w anodzie. Przechodzi przy tym przez kolumnę wyładowania nagrzewając się do wysokiej temperatury. Między ścianką kanału a kolumną wyładowania wytwarza się chłodna warstwa gazu chroniąca anodę przed zniszczeniem. Warstwa ta stabilizuje wyładowania utrzymując kolumnę wyładowania w osi kanału i dodatkowo ją ściskając”.*
- Wg Józefa Gawlik [34] „*obróbka plazmowa polega na oddziaływaniu na powierzchnię obrabianego przedmiotu skoncentrowanym strumieniem plazmy o temperaturze rzędu 25000°C, w wyniku czego następuje miejscowa stapianie i odparowanie. Plazma jest przewodzącą elektrycznie zjonizowaną mieszaniną gazów, w której elementami strukturalnymi są elektrony, jony, i neutralne atomy wzajemnie odziaływujące na siebie, przy czym liczba dodatnich i ujemnych wolnych elektronów jest taka sama”.*
- Wg PN-EN ISO 9013:2017 [102] „*cięcie plazmowe jest procesem cięcia termicznego, w którym stosowany jest łuk zawężony. Wieloatomowe gazy dysocjują w łuku i częściowo się jonizują; jednoatomowe gazy częściowo się jonizują. Dlatego powstająca wiązka plazmy ma wysoką temperaturę i energie kinetyczną. Topi ona bądź częściowo odparowuje materiał i wydmuchuje go. W ten sposób tworzy się szczelina cięcia”.*

Analizując przedstawione sformułowania odnoszące się do działania urządzeń do cięcia plazmowego, można stwierdzić, iż cięcie plazmowe polega na punktowym nagrzaniu materiału do temperatury powyżej linii likwidus, a następnie, za pomocą strumienia plazmowego o wysokiej koncentracji energii cieplnej i kinetycznej, wydmuchaniu go. W urządzeniach do cięcia plazmowego stosowany jest tylko prąd stały z biegunowością ujemną podłączony do katody, który zasilany jest za pomocą prostowników lub inwertorowych źródeł prądu.

2.1.2. 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.

Przy zakupie urządzenia do cięcia plazmowego, nabywca otrzymuje dokumentację techniczno-rozruchową. Oprócz informacji zawartych w otrzymanej dokumentacji, jak np:

- wiadomości podstawowe o urządzeniu,
- charakterystyka techniczna,
- podstawowe wskazania bezpieczeństwa,
- transport urządzenia oraz magazynowanie,
- ustawienie, montaż oraz uruchomienie,
- konserwacja i utrzymanie urządzenia w stanie sprawności,

nabywca otrzymuje bardzo istotne 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.

Parametry, które mogą być sterowane przez operatora w procesie cięcia plazmowego, to: natężenie prądu, prędkość cięcia plazmowego oraz odległość położenia palnika względem ciętego materiału [94].

Natężenie prądu – Wraz ze wzrostem natężenia prądu wzrasta prędkość cięcia a przy odpowiedniej prędkości cięcia, możliwe jest cięcie materiałów o większej grubości. Natężenie ma duży wpływ na wydajność oraz efektywność procesu. Regulacja natężenia prądu jest bardzo istotna w procesie cięcia plazmowego. Zbyt duże jego natężenie może spowodować znaczny spadek jakości cięcia, wzrost szerokości szczeliny oraz spadek trwałości elektrod przy zaokrągleniu górnych krawędzi oraz odchyleniu ich od prostopadłości. Zbyt małe natężenie prądu może spowodować duże nawisy zgorzeli na dolnej części ciętej krawędzi lub wygaszenie łuku plazmowego [59].

Prędkość cięcia - Prędkość cięcia dostosowuje się do rodzaju części zamiennych palnika (min. elektroda i dysza) oraz do grubości ciętego materiału. Zbyt mała prędkość cięcia może spowodować przerywanie łuku plazmowego, prowadząc do nadmiernego zużycia elektrody i dyszy, zwiększenia się szczeliny oraz powstawania zaokrągleń w górnej krawędzi, a w dolnej nawisów metalu. Zbyt duża prędkość powoduje spadek jakości, zwłaszcza przy cięciu ręcznym, maleje szerokość szczeliny cięcia, a w efekcie następuje brak przecięcia [59, 94].

Odległość położenia palnika względem ciętego materiału- Bardzo ważna w procesie cięcia plazmowego jest prostopadłość palnika względem ciętego materiału. Nawet najmniejsza odchyłka od prostopadłości może spowodować spadek jakości ciętych krawędzi poprzez odchyłkę od prostopadłości. Odległość dyszy palnika od ciętego materiału powinna być tak dobrana, aby długość łuku plazmowego oraz wprowadzane ciepło nie uszkadzało katody. 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 czynnościom, polegającym na zmianie wysokości palnika przy przebijaniu i cięciu, zyskuje się na jakości cięcia oraz wydłuża się trwałość elektrody i dyszy.

2.1.3. Części eksploatacyjne palnika plazmowego

Najnowsze techniki komputerowego projektowania, a w szczególności rozbudowane symulacje komputerowe, w ostatnich czasach pozwoliły na bardzo znaczący i szybki rozwój konstrukcji palników plazmowych, w tym jego elementów eksploatacyjnych. Zmniejszenie temperatury podczas cięcia przy takim samym przepływie chłodziwa znacząco poprawia żywotność elementów składowych [155].

Cięcie plazmowe jest możliwe dzięki procesowi jarzenia się łuku elektrycznego, który następuje pomiędzy elektrodą nietopliwą a ciętym materiałem. Specjalnie zaprojektowana budowa elektrod powoduje przepływ łuku elektrycznego oraz jego koncentrację na niewielkiej powierzchni. Przepływający gaz plazmotwórczy otrzymuje duży stopień jonizacji, dzięki któremu uzyskuje się strumień plazmowy o znacznej koncentracji energii. Ważną rolę w procesie cięcia plazmowego spełnia jonizator. Zadaniem jonizatora jest ułatwienie zajarzenia się łuku elektrycznego. Jonizator wysyła krótkie impulsy o wysokiej wartości napięcia w obszarze pomiędzy elektrodą a dyszą plazmową [129].

Parametry cięcia plazmowego mają wpływ na żywotność części eksploatacyjnych, która determinuje koszt produkcji. Głównym problemem eksploatacyjnym jest nierównomierność zużywania się części, przy czym o wymianie poszczególnych elementów decyduje w głównej mierze doświadczenie operatora [50].

2.1.4. Palniki plazmowe

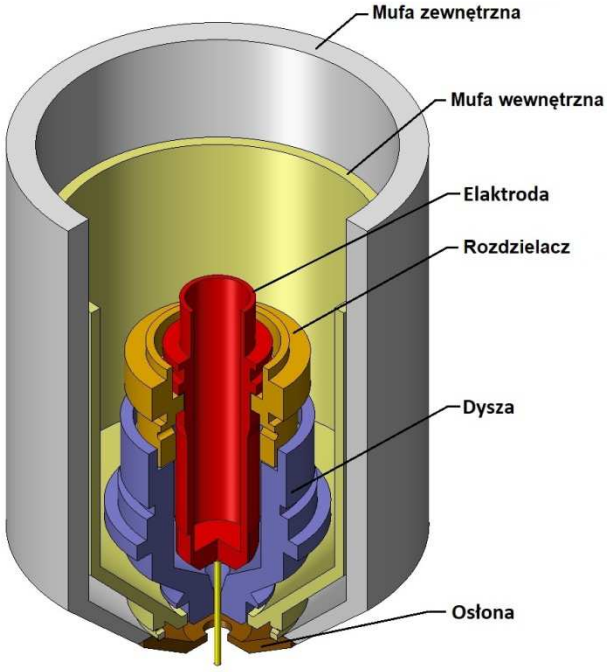
W pracy Anakhov'a [2] opisano modernizację dwóch rodzajów palników z zawężonym strumieniem plazmy. Przeprowadzone badania były związane ze względami bezpieczeństwa w aspekcie emisji sygnałów akustycznych. Przedstawiono wyniki analizy porównawczej charakterystyk hałasu rosyjskich i zagranicznych palników plazmowych w zakresie hałasu i ultradźwiękowych zakresów emisji. Badania przeprowadzono, uwzględniając kryteria obowiązujących przepisów BHP. W pracy omówiono zalety nowego wąskopasmowego palnika plazmowego w porównaniu zarówno z modelem podstawowym, jak i innymi badanymi palnikami plazmowymi. W pracy [13] autorzy zajęli się budową palnika dwufazowego o natężeniu 250 A wyposażonego w elektrody z wkładkami z różnych materiałów nietopliwych. Badano wpływ wkładek Ag-Hf i Cu-Zr na ich erozję podczas startów przy zastosowaniu natężenia prądu 120A. Celem badań była analiza porównawcza erozji wkładek elektrod ze stopów Ag-Hf i Cu-Zr do wkładek standardowych z Hf. Badaniu podlegały również dysze plazmowe jako stały element części palnika. Przedstawiono wyniki wpływu parametrów startu i zakończenia cięcia na zużycie elektrod i dysz. Brzhozovskii

w swojej pracy [15] zaproponował metodę wzmocnienia palnika plazmowego poprzez modyfikację wyładowań w niskotemperaturowej plazmie, natomiast w artykule Chen [21] przedstawiono palnik plazmowy chłodzony cieczą. Zaproponowano model numeryczny dla kanału chłodzącego i elektrody, opracowany za pomocą oprogramowania FLUENT. Przeanalizowano zależność pomiędzy polem przepływu chłodziwa, a strukturą geometryczną elektrody. Do badań pola przepływu zastosowano elektrody o czterech różnych strukturach. W pracy [37] zajęto się modyfikacją dysz plazmowych. Modyfikacja dyszy polegała na zastosowaniu podwójnej konstrukcji oraz jej wydłużeniu. Zmodyfikowaną dyszę o podwójnej konstrukcji porównano z dyszą o konstrukcji pojedynczej. Badania przeprowadzono pod kątem uniknięcia tzw. podwójnego łuku, którego powstawanie powoduje zmniejszenie wydajności oraz zwiększenie zużycia części eksploatacyjnych. Wyniki badań pokazały, że stosując dyszę o konstrukcji podwójnej, unikniemy zjawiska podwójnego łuku, a jej wydłużenie spowoduje zwiększenie siły przebicia materiału podczas startów. Zaobserwowano również zwiększenie żywotności części eksploatacyjnych palnika. W pracy stwierdzono również, że maksymalne wydłużenie dyszy nie może być dowolne. Rozkład temperatury w palniku plazmowym do cięcia plazmą powietrzną przedstawiono w pracy [43]. Badania przeprowadzono przy użyciu tomograficznego układu optycznego w zakresie długości fali 559-601 nm. Rozkład promieniowania rejestrowano w trakcie cięcia w płaszczyznach prostopadłych w rozdzielczości czasowej 1 μs. Pochodne widma częstotliwości i rozkład fluktuacji (zmiany) temperatury przez odchylenie standardowe wykazały znaczny spadek stabilności w czasie. Wyniki potwierdziły decydującą rolę modulacji zmian natężenia prądu w zmianach temperatury. Badania przepływu plazmy wychodzącej z palnika plazmowego przedstawiono również w pracy [54]. Badania były motywowane brakiem podstawowego zrozumienia dynamiki przepływu plazmy, wchodzącej w interakcje ze środowiskiem zimnego gazu. Praca [54], podobnie jak [43], skupia się na charakterystyce promieniowania łuku plazmowego oraz wahań temperatury, która wpływa niekorzystnie na jakość cięcia. Charakterystykę niestabilności przeprowadzono za pomocą technologii szybkiego odwzorowania Schlieren, aby zobrazować szerokość łuku i fluktuacje natężenia światła w łukowej warstwie granicznej. Pomiary łuku plazmowego przeprowadzono za pomocą transformacji Fouriera i falkowej fluktuacji natężenia światła. Stopień niestabilności poszczególnych pikseli przedstawiono za pomocą obrazowania Schlieren. Doprowadzanie gazu atmosferycznego do strumienia plazmy zmierzono za pomocą kamery CCD wyposażonej w filtr wąskopasmowy. Umieszczenie kamery wyśrodkowanej na atomowej linii azotu miało na celu wykrycie stężenia azotu w całym łuku, dzięki czemu pokazano przenikanie przez osłonę gazu z otoczenia do czystej plazmy tlenowej.

W badaniach wpływu cech konstrukcji palnika na właściwości przenikania azotu plazmy powietrznej wykorzystano dwa rodzaje palników. Wyniki pokazały, że opracowana diagnostyka jest przydatna przy ocenie nowych konstrukcji palników. Modyfikacje palników plazmowych za pomocą mikro dysz przeprowadzono w pracy [55]. Zmniejszono niestabilność łuku plazmowego, dzięki któremu ograniczono ilość gazu dostarczanego z otoczenia do gorącego strumienia plazmy. Modyfikacja palnika, w tym zmniejszenie niestabilności dynamicznej łuku plazmowego, znacząco polepszyła jakość krawędzi ciętych i wpłynęła na zmniejszenie chropowatości.

Prevosto w swoich pracach naukowych [104, 105] przedstawił pomiary prędkości plazmy w palniku tnącym o wysokiej gęstości energii przy natężeniu prądu 30 A. Diagnostyka prędkości opierała się na analizie fluktuacji światła emitowanego przez łuk plazmowy. W pracy wyznaczono maksymalne prędkości strumienia plazmy w pobliżu wylotu dyszy (5000 ms-1) i przy powierzchni ciętego materiału (około 2000 ms -1). Przedstawiono również wyniki pomiarów temperatury wewnątrz dyszy palnika. Wahania temperatury były na poziomie 7%. Średnia temperatura wynosiła 5400°C.

Dobór parametrów cięcia plazmowego ma znaczący wpływ na żywotność elementów eksploatacyjnych palnika, co z kolei przekłada się na koszt produkcji. Głównym problemem eksploatacyjnym części zamiennych jest ich nierównomierność zużywania się, przy czym o wymianie decyduje doświadczenie operatora. W skład części eksploatacyjnych palnika plazmowego wchodzą: elektroda, dysza, rozdzielacz, mufa wewnętrzna, osłona, mufa zewnętrzna [78]. Na rysunku 2.1 przedstawiono poszczególne części eksploatacyjne palnika.



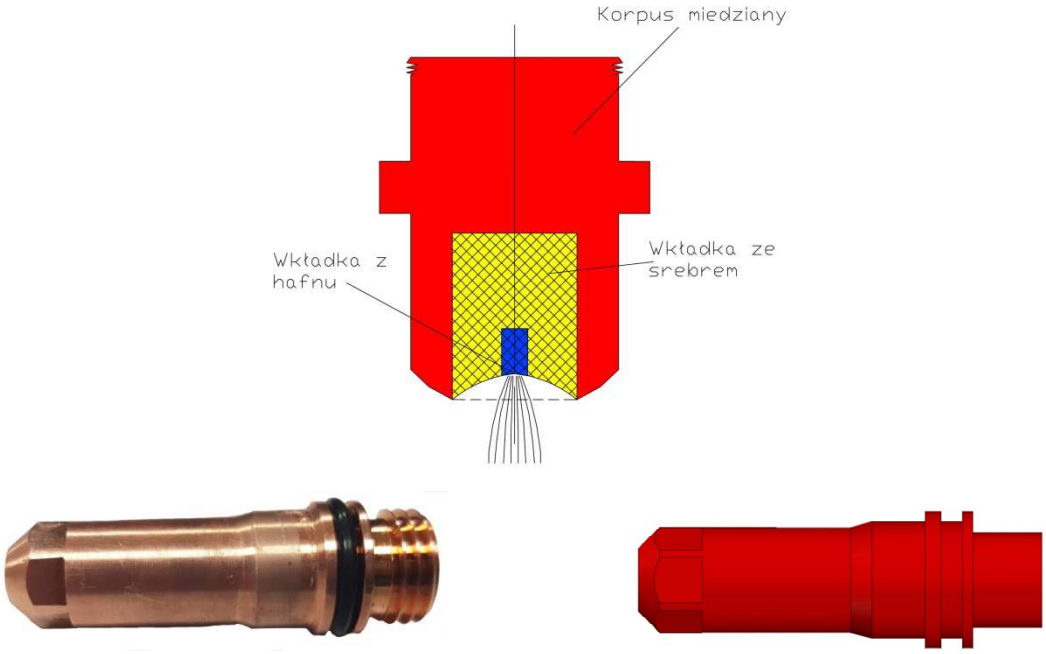
Rys. 2.1. Budowa palnika plazmowego [140

2.1.5. Elektroda

Zużycie elektrod stosowanych podczas procesu cięcia plazmowego jest nieodłącznym czynnikiem towarzyszącym każdemu procesowi. Największe zużycie elektrod następuje nie w trakcie procesu cięcia, lecz w momencie zajarzenia łuku plazmowego [117, 147]. Budowa elektrod do cięcia plazmowego jest uzależniona od rodzaju stosowanego gazu plazmowego. Jeżeli gaz plazmowy jest gazem utleniającym, to elektrody wykonuje się ze stopu wolframu z torem lub lantanem. Trwałość takich elektrod wynosi 15-20 godzin cięcia [59, 106]. W palnikach do cięcia tlenem lub powietrzem jako gazem plazmowym, zastosowanie mają elektrody wykonane z cyrkonu lub hafnu (rys. 2.2), osadzone mechanicznie lub zgrzewane dyfuzyjnie w korpusie miedzianym. Trwałość ich jest zależna od natężenia prądu oraz ilość zajarzeń i wynosi od 1 do 5 godzin pracy [59, 106, 129]. Wielu producentów elektrod zaleca, aby powstający krater nie przekraczał głębokości od 1,5 do 2 mm [78, 117, 129]. Z przeprowadzonych pomiarów głębokości kraterów [117] stwierdzono, że minimalne różnice w głębokości 0,5-0,8 do wartości 1,5 mm nie mają istotnego wpływu na uzyskanie podobnej jakości cięcia. O wymianie elektrod decyduje gorsza jakość cięcia lub niestabilny strumień plazmy przy zmianie koloru z czerwonego na niebiesko-biały odcień. Kontrolę zużycia elektrod można wykonać za pomocą lusterka, sprawdzając wgłębienie powstałego krateru [50].

Głównym powodem szybkiego zużywania się elektrod są przede wszystkim [156]:

- nieprawidłowe dopasowanie części eksploatacyjnych w palniku,
- nieprawidłowe ustawienie przepływu gazu,
- niewystarczający przepływ płynu chłodzącego (dotyczy palników chłodzonych cieczą),
- nieszczelność palnika i przewodów,
- gromadzenie się wilgoci i zanieczyszczeń,
- start na niewłaściwej wysokości, (np. start w zbyt dużej odległości od krawędzi).



Rys. 2.2. Elektroda (katoda)[140]

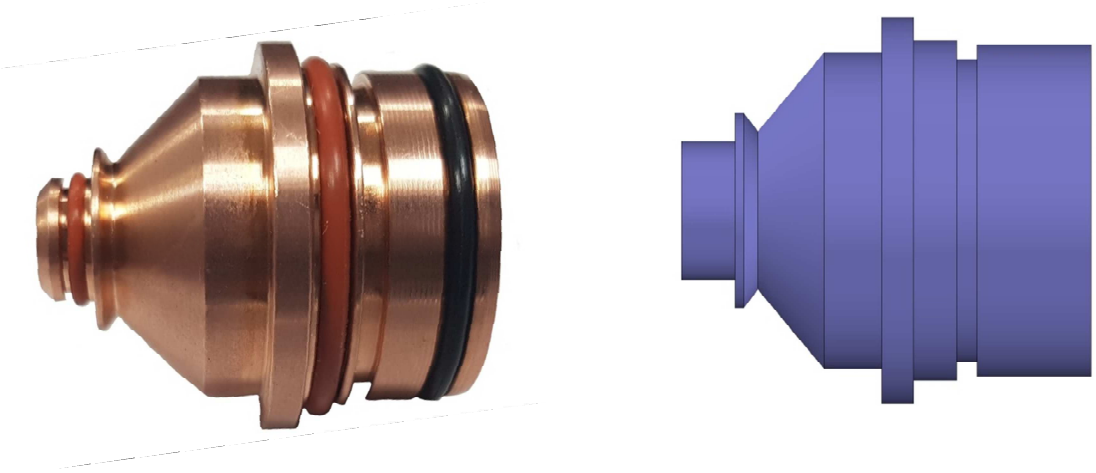
2.1.6. Dysze

Dysze plazmowe wykonane są z miedzi (rys. 2.3). W zależności od budowy palnika, dysze mogą być chłodzone za pomocą przepływu gazu lub cieczy. Średnica otworu dysz zależy od wartości zastosowanego natężenia prądu cięcia i jest ustalona przez producentów. Trwałość dysz, tak jak w przypadku elektrod, zależy od liczby zajarzeń oraz od wartości natężenia prądu i wynosi od 2 do 5 godzin pracy [59, 106, 129]. Dysza jest odpowiedzialna za jakość cięcia plazmowego i zaleca się, aby była wymieniana wraz z elektrodą [156]. Dysze plazmowe to element palnika, który jest najbardziej narażony na uszkodzenia. Uszkodzenie dyszy może nastąpić poprzez „uderzenie" strumienia łuku elektrycznego powierzchni wewnętrznej, znajdującej się przed otworem wylotowym, spowodowanym przez pracę zużytej elektrody. Zdarza się, że błąd lub brak doświadczenia operatora może spowodować jej uszkodzenie (np.: zastosowanie dyszy o nieodpowiedniej wielkości otworu do grubości ciętej blachy lub ustawienie niewłaściwej wartości natężenia prądu).

Najczęstsze przyczyny szybszego zużycia dyszy to [156]:

- nieprawidłowe dopasowanie części eksploatacyjnych w palniku,
- przebijanie i cięcie zbyt blisko materiału,
- przebicia materiałów grubszych niż zalecane,
- nieprawidłowe ustawienie przepływu gazu,
- za wysokie natężenie prądu,

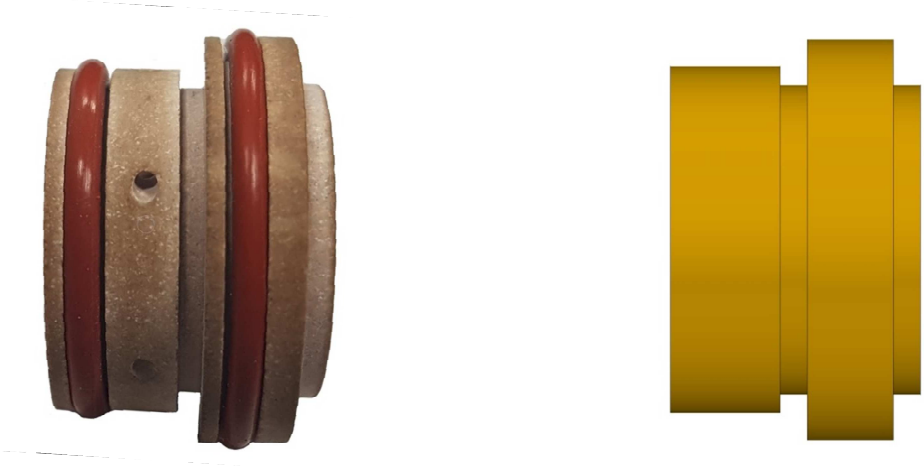
– cięcie materiału przy nadmiernie zużytej elektrodzie, tarczy, lub pierścienia zawirującego plazmą.



Rys. 2.3. Dysza [140]

2.1.7. Rozdzielacz

W konstrukcji palników stosuje się pierścienie rozdzielacza, które dzięki nawierconym otworom pod odpowiednim kątem wprowadzają gaz w ruch wirowy (rys. 2.4). Rozdzielacze najczęściej wykonane są ze spieków ceramicznych, z tworzywa sztucznego lub miedzi. Ich zużycie polega na popękaniu i stopniowym wykruszaniu się z tym, że jest to proces bardzo długi i zależny od warunków pracy. Rozdzielacze wymienia się w przypadku, gdy jest mniejszy przepływ gazu lub jego niekontrolowane krążenie [78]. Powodem może być niewłaściwe smarowanie lub niedrożne otwory [50]. Sporadycznie może nastąpić niekontrolowane spalenie lub nadtopienie [130].



Rys. 2.4. Rozdzielacz [140]

2.1.8. Osłona mufy zewnętrznej

Zadaniem osłony mufy zewnętrznej jest ochrona palnika przed odpryskami. Osłony mufy zewnętrznej w zależności od producentów mogą być wykonane z miedzi lub ze spieków ceramicznych (rys. 2.5). Ich zaletą jest odporność na wysoką temperaturę, natomiast wadą jest ich kruchość. Osłonę mufy wymienia się w przypadku, gdy widoczna jest deformacja otworu spowodowana odpryskami roztopionego metalu [78].

Do głównych powodów uszkodzenia osłony należą [156]:

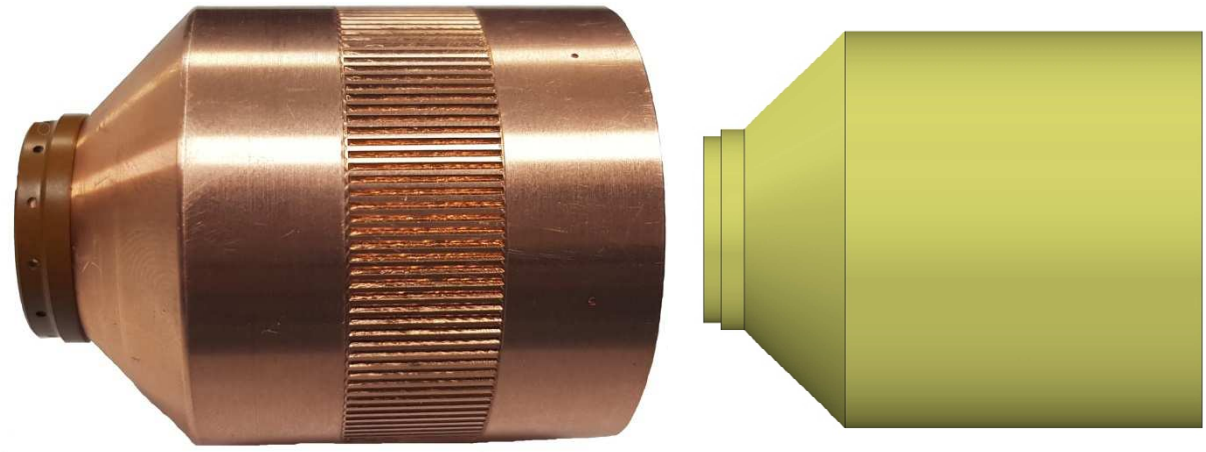
- za wolne lub za szybkie cięcie,
- cięcie za grubych materiałów,
- nieprawidłowe przebijanie materiałów.

Rys. 2.5. Osłona mufy zewnętrznej z otworem zawężającym [140]

2.1.9. Mufa zewnętrzna

Mufa zewnętrzna, inaczej zwana głowicą osłonową palników, najczęściej zbudowana jest ze stopów miedzi i może być pokryta różnymi materiałami (rys. 2.6) [130]. Niektórzy producenci pokrywają ją tworzywem odpornym na wysoką temperaturę, np. ebonitem lub włóknem szklanym. Wpływ na skrócenie żywotności tej części ma nieprawidłowe wykonanie startu cięcia, niewłaściwe warunki cięcia, takie jak np.: odpryski metalu na końcówce palnika podczas startu, zbyt mała lub zbyt duża odległość palnika od ciętego materiału, niewłaściwie ustawiona prędkość cięcia lub natężenie prądu [78]. Największą trwałością cieszą się mufy zewnętrzne wykonane w całości z miedzi i mosiądzu lub ze spieków ceramicznych.

Mufa wewnętrzna, podobnie jak mufa zewnętrzna, wykonana może być w całości ze stopów miedzi lub w połączeniu z innymi materiałami odpornymi na wysoką temperaturę, jak np. ebonit lub włókno szklane (rys 2.7). Zużycie jej jest zależne od sposobu eksploatacji palnika.

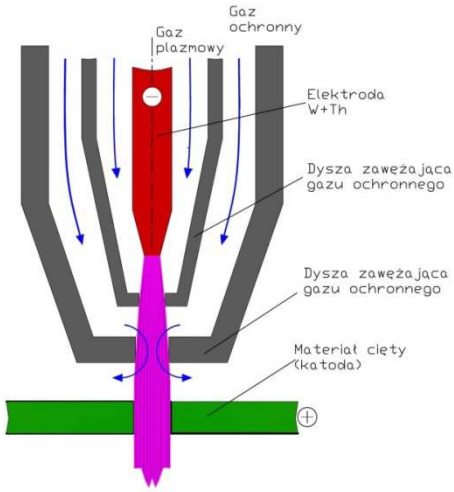


Rys. 2.6. Mufa zewnętrzna [140]

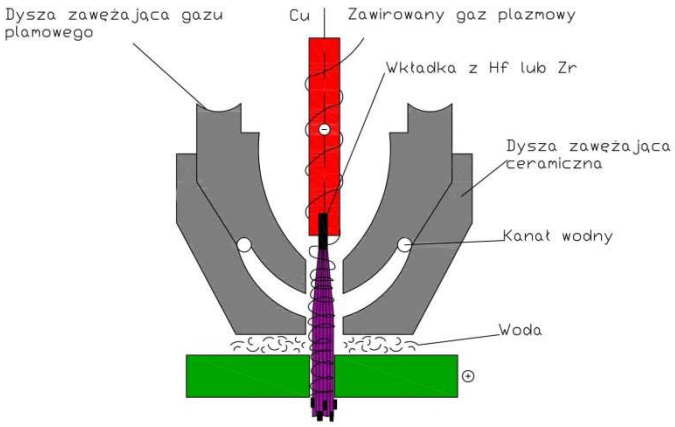
Rys. 2.7. Mufa wewnętrzna [140]

2.1.10. Budowa palników do cięcia plazmowego

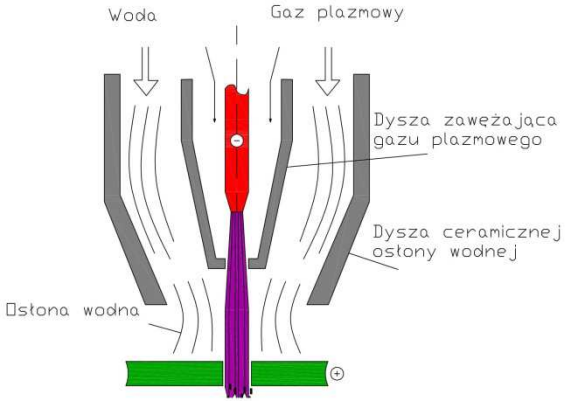
W urządzeniach do cięcia plazmowego stosuje się palniki o łuku zależnym (łuk zależny jest to łuk jarzący się pomiędzy katodą a ciętym materiałem). Zajarzenie łuku głównego (zależnego) w palnikach oraz rozpoczęcie procesu cięcia, umożliwia łuk pomocniczy. Łuk pomocniczy jest to łuk powstały dzięki krótkotrwałym impulsom o wysokim napięciu, który wytworzony jest w jonizatorze wysokiej częstotliwości. Jego działanie polega na jonizacji przestrzeni pomiędzy elektrodą (katodą) a dyszą (anodą) [59, 94]. Na rysunkach od 2.8 do 2.14 przedstawiono budowę palników według [59].



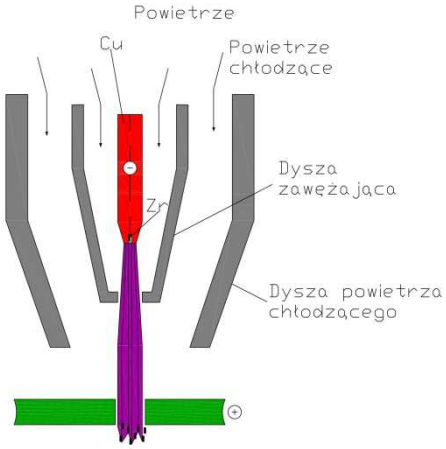
Rys. 2.8. Schemat budowy palnika plazmowego z dodatkowym zawężeniem łuku gazem ochronnym [59]



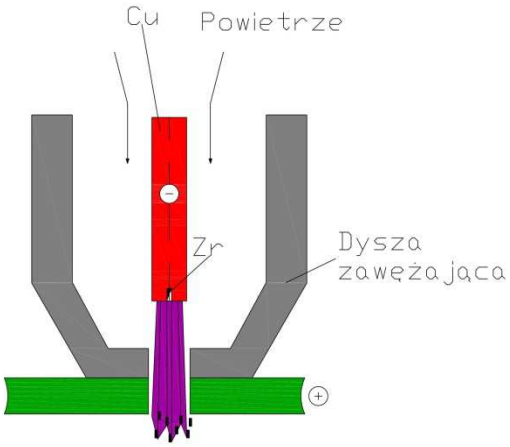
Rys. 2.9. Schemat budowy palnika plazmowego z zawirowaniem gazu plazmowego i dodatkowym zawężeniem łuku zawirowanym strumieniem wody [59]



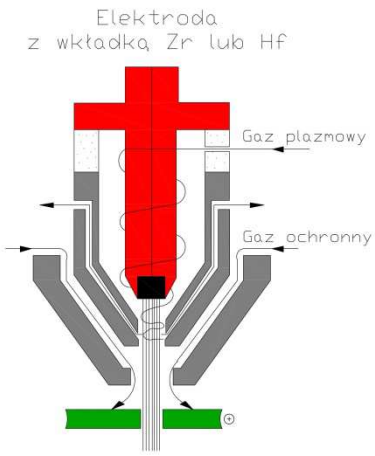
Rys. 2.10. Schemat budowy palnika plazmowego z dodatkową kurtyną wodną [59]



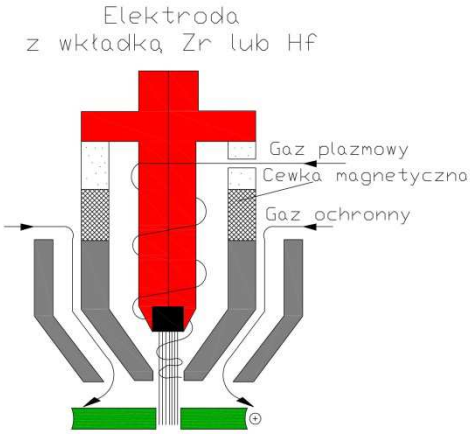
Rys.2.11. Schemat budowy palnika do cięcia powietrzem jako gazem plazmowym [59]



Rys. 2.12. Schemat budowy palnika do cięcia powietrzem jako gazem plazmowym z bezpośrednim stykiem dyszy zawężającej z powierzchnią ciętego materiału [59]



Rys.2.13. Schemat budwy palnika plazmowego do cięcia z dużą dokładnością. Konstrukcja palnika firmy HYPERTHERM - HyDefinition [59]



Rys. 2.14. Schemat budowy palnika plazmowego do cięcia z dużą dokładnością. Konstrukcja palnika firmy KOMATSU-CYBERMATION – Resor Cutting [59]

Najnowsza budowa palników sprawia, że cięcie plazmowe może być wykorzystane nie tylko do cięcia materiałów przewodzących prąd elektryczny, ale i niebędących przewodnikami. Nowoczesne urządzenia dają możliwość cięcia w miejscach trudno dostępnych oraz w pracy pod lustrem wody.

Na rynku europejskim i światowym jest bardzo dużo przedstawicieli produkujących urządzenia do cięcia plazmowego, jednak zasada ich działania jest zawsze taka sama. Mogą różnić się one jedynie dodatkowym wyposażeniem, mocą źródła plazmy, palnikami 3D czy dodatkowym magazynem surowca.

2.2. Wstępna analiza literatury

2.2.1. Parametry cięcia plazmowego

Badania wpływu parametrów cięcia plazmowego na stal niestopową (grubość blachy 15 mm) przy natężeniu prądu 200 A przeprowadził zespół badawczy Beniego [12]. Wskazał on, że prędkość cięcia oraz napięcie łuku ma duży wpływ na mechanizm powstawania szczeliny, a ich wzajemne oddziaływanie jest również ważne przy definiowaniu prostopadłości cięcia. Celik [17, 18] potwierdził, że cięcie plazmowe stali S235JR o grubości 4, 6, 8 mm za pomocą danych tabelarycznych przedstawionych przez producenta urządzeń, uniemożliwia osiągnięcie zadawalającej jakości. Wykonano próby cięcia przy różnych parametrach. Zbadano rozkład temperatury, chropowatość powierzchni oraz jej twardość. Na podstawie wartości uzyskanych z pomiarów, zaproponowano optymalne parametry cięcia dla blachy o grubości 8 mm. Wynoszą one: prędkość cięcia 1500 mm/min, napięcie łuku 115 V oraz natężenie prądu 80 A. Chamarthi [20] poszukiwał najlepszych parametrów cięcia plazmowego dla stali trudnościeralnej typu HARDOX-400. Regulując parametrami, takimi jak prędkość cięcia, wydatek gazu plazmowego oraz napięcie łuku, uzyskano dobrą jakość powierzchni dla płyty o grubości 12 mm. Klimpel [60] przeanalizował wpływ parametrów cięcia łuku plazmowego na jakość krawędzi różnych grubości i gatunków stali. Analiza ta potrzebna była do opisania zależności między parametrami technologii cięcia laserowego oraz plazmowego, a geometrycznymi i mechanicznymi współczynnikami jakości krawędzi ciętych różnych materiałów stalowych o średniej i wysokiej wytrzymałości. Lazarević w swojej pracy [67] przedstawił wyniki eksperymentalnych badań procesu cięcia plazmowego stali stopowej. Zbadał on na wejściu natężenie prądu, prędkość cięcia i grubość materiału, a na wyjściu takie parametry jak: szerokość szczeliny, chropowatość powierzchni i kąt ukosu. Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie wpływu parametrów wejściowych na parametry wyjściowe oraz przygotowanie danych do modelowania procesów cięcia plazmowego przy użyciu różnych metod, opartych o analizę statystyczną oraz sztuczne sieci neuronowe (ANN). W pracy Peko [92] przedstawiono eksperymentalne wyniki dotyczące zmian chropowatości powierzchni przy cięciu plazmowym stali konstrukcyjnej w gatunku S235JRG2 (o grubości 15 mm). Korzystając z danych eksperymentalnych, opracowano sztuczną sieć neuronową, dla potrzeb predykcji chropowatości powierzchni ze względu na dwa parametry wejściowe, tj. natężenie prądu i prędkość cięcia. Po sprawdzeniu poprawności predykcyjnej opracowanego modelu sieci, określono wpływ parametrów wejściowych na chropowatość powierzchni. Wpływ parametrów na jakość

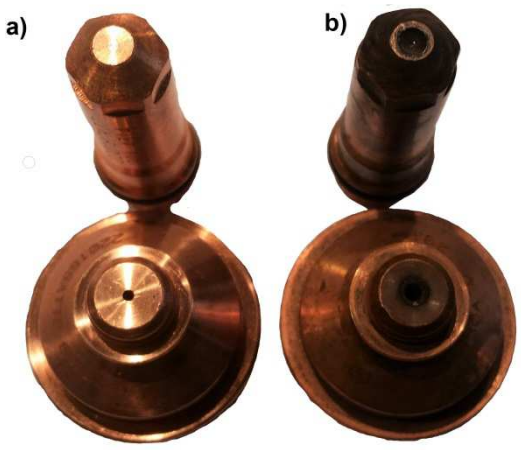
ciętych krawędzi przeprowadzili w swoich badaniach Salonista [111] oraz Santhanakumar [112]. Badania skupiły się na ocenie jakości cięcia plazmowego, uzyskanego w różnych warunkach poprzez zmianę parametrów procesu, takich jak: prędkość cięcia, odległość palnika od ciętego materiału, natężenie prądu oraz ciśnienie gazu. W pracy [111] przeprowadzono statystyczną analizę wyników, w której określono wpływ każdego z badanych parametrów na jakość ciętych krawędzi, natomiast w pracy [112] wykonano badania oceny jakości cięcia w różnych warunkach poprzez zmiany parametrów, takich jak prędkość cięcia i natężenie prądu. Jakość cięcia kontrolowano poprzez badania chropowatości oraz szerokości ciętego rowka. Opracowano nowe podejście do badań, dzięki któremu możliwe jest przewidywanie optymalnych warunków cięcia. Xiaojie Tian w pracy [113], za pomocą danych eksperymentalnych i metody elementów skończonych, potwierdził, że parametry procesu cięcia, takie jak grubość ciętego materiału, prędkość cięcia oraz średnica dyszy, mają bardzo duży wpływ na jakość ciętych krawędzi.

Z badań eksperymentalnych [84] wynika, że prędkość cięcia ma duży wpływ na prostopadłość ciętych krawędzi. Stwierdzono, że im większa jest prędkość cięcia, tym jest większa odchyłka od prostopadłości ciętych krawędzi. Spadek prostopadłości spowodowany jest przenikaniem ciepła plazmy w strukturę materiału. Im grubość materiału ciętego wzrasta, tym potrzebna jest większa energia cieplna. Zmniejszenie efektywności wymiany ciepła może być kompensowane ograniczeniem prędkości cięcia. Nemchinski [83] opracował model opisujący rozkład temperatury, ciśnienia oraz prędkości w dyszy podczas cięcia plazmowego. Uwzględnił zależności właściwości plazmy od temperatury. Jego obliczenia wykazały, że znaczna część mocy jest rozproszona wewnątrz dyszy i tylko jej niewielka część ogrzewa strumień plazmy. Udział strat energii rozproszonej w palniku plazmowym wzrasta wraz ze wzrostem prądu łuku, długością dyszy oraz natężeniem przepływu gazu. W artykule [85] Nemchinsky potwierdził, że prędkość cięcia ma wpływ na prostopadłość ciętych krawędzi. Szczególną uwagę zwraca na wpływ roztopionej warstwy metalu, oddzielonego plazmą od jeszcze niestopionego metalu. W pracy pokazano, że warstwa ta utrudnia przenikanie ciepła. Brak uwzględnienia tej warstwy może skutkować niepożądaną jakością cięcia oraz nadmierną eksploatacją elementów palnika. Zwiększenie grubości ciętego materiału lub zwiększenie prędkość cięcia powinno być poprzedzone poprzez zwiększenie mocy, a tym samym temperatury cięcia. Wyniki pokazują, że w trakcie procesu cięcia plazmowego około połowa całkowitej mocy urządzenia pobierana jest na usuwanie warstwy nieoddzielonego i jeszcze niestopionego metalu. Zaproponowana metoda pozwala na uwzględnienie ciepła reakcji utleniania ciętego materiału w początkowej fazie cięcia. Można ją zastosować również dla innych technologii cięcia za pomocą skoncentrowanego źródła ciepła.

2.2.2. Elektrody i dysze

Parametry cięcia plazmowego istotnie wpływają na żywotność części eksploatacyjnych palnika. Natomiast żywotność części wpływa na koszt produkcji. Głównym problemem eksploatacyjnym jest nierównomierność zużywania się części, przy czym często decyduje o tym doświadczenie operatora [78]. Najszybciej zużywającą się częścią palnika jest elektroda (katoda) oraz dysza. Badanie wpływu parametrów cięcia plazmowego na żywotność elektrody i dysz było przedmiotem wielu artykułów i prac naukowych [22, 23, 24, 25, 45, 44, 46, 72, 86, 108, 126, 132, 133, 134, 66, 120, 81, 82].

Hussary i Renault [45, 46] omówili różne mechanizmy zużywania się elektrod, które mają znaczący wpływ na trwałość materiałów eksploatacyjnych w palniku do cięcia plazmowego. Typowa elektroda stosowana do cięcia plazmowego jest wykonana z ogniotrwałego wkładu, zwykle wolframu lub hafnu, osadzonego w chłodzonym wodą lub powietrzem miedzianym uchwycie. Główną przyczyną zużycia katody jest nadmierna emisja źródła ciepła wychodząca z katody. Mechanizmy zużywania się elektrod wykorzystujących wolfram lub hafn są różne ze względu na ich właściwości termiczne, chemiczne i elektryczne. Dla wolframu powstaje krater, który rozszerza i pogłębia się ze stałą prędkością. Erozja wolframu jest spowodowana łukiem powstającym pomiędzy ciętym materiałem a katodą. Powstający łuk miejscowo topi, a następnie wyrzuca kropelki wolframu. Wyrzucane kropelki wolframu odkładają się na ścianach komory łukowej i na dyszy. Wyrzucana masa wolframu jest niewielka, co daje lepszą żywotność elektrody w stosunku do elektrody z hafnu. Żywotność elektrody przy natężeniu prądu 200A szacuje się na 1500 startów plazmy przy użyciu powietrza jako gazu plazmowego. Na rysunku 2.15 przedstawiono przykład elektrody oraz dyszy nowej oraz zużytych.



Rys 2.15. Elektroda z wkładką Hf i dysza, a) elektroda i dysza nowa, b) elektroda i dysza zużyta [140]

Colombo, Concetti i Ghedini [22, 23, 24, 25] przeprowadzili eksperymentalne badania polegające na obserwacji elektrod z wkładką z hafnu pod wpływem obciążenia dużym natężeniem prądu. Obserwacje przeprowadzono przy użyciu kamery szybkiego filmowania. Badania eksperymentalne miały na celu lepsze zrozumienie zjawiska erozji katody z wkładką z hafnu oraz erozji dyszy podczas faz przebijania ciętego materiału wykonanego ze stali niestopowej. Przebijanie oraz cięcie materiału wykonano na urządzeniu o natężeniu prądu od 25 do 160 A. Do badań zastosowano prototypowy palnik plazmowy z monogazem. Wyniki, uzyskane dzięki diagnostyce opartej na szybkim obrazowaniu i fotografii Schlieren, dały podstawy do optymalizacji budowy palników plazmowych w urządzeniach do cięcia plazmowego.

W pracy [93] Long zbadał wpływ kształtu budowy elektrody na łuk cięcia plazmowego za pomocą dwuwymiarowego modelu termo-fluidalnego. Dwuwymiarowy model został opracowany dla plazmy łukowej z uwzględnieniem parowania wkładki hafnu elektrody. Do eksperymentów zastosowano elektrodę z uwypuklona wkładką hafnu. Wyniki pokazały, że wir przepływu gazu w pobliżu elektrody powstał dzięki wypukłej budowie katody. Temperatura powierzchni katody znacznie się obniżyła wraz ze wzrostem jej wypukłości. Obecność wirowego przepływu gazu w pobliżu katody powoduje zmniejszenie parowania wkładki hafnu. Wynikiem badań jest stwierdzenie, że wypukła budowa wkładki hafnu powoduje zmniejszenie jej parowania, a tym samym zwiększenie żywotności.

Nemchinski w pracach [81, 82, 86] stwierdził, że żywotność elektrod zależna jest od natężenia prądu, podwójnego łuku oraz zastosowania wkładek z materiałów trudnotopliwych. Wielkość otworu w dyszy oraz powstawanie podwójnego łuku ma duży wpływ na powstawanie wypływek, czyli przyklejonego żużlu oraz kształt szczeliny. Udowodniono, że w przypadku elektrod z wkładką z hafnu, około 0,001 części odparowanych cząstek uczestniczy w jej erozji, a pozostałe cząstki odrywają się i, będąc w pobliżu katody, powracają do niej. Nemchinski zaproponował równanie pozwalające obliczyć wpływ temperatury pomiędzy katodą a plazmą na jej erozję.

Rotundo [95] zbadał standardowe elektrody z wkładką hafnu. Badania przeprowadził na urządzeniu do cięcia plazmowego przy użyciu powietrza jako gazu plazmowego oraz natężenia prądu 250 A. Celem pracy była analiza procesów eksploatacji standardowych elektrod. Badanie poszczególnych elektrod polegało na planowanym przebijaniu oraz cięciu stali niestopowej. Analizę mikrostrukturalną przeprowadzono dla każdej elektrody na różnych etapach jej erozji za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wyposażonej w spektroskopię dyspersji energii (EDS) i spektroskopię Ramana. Przekroje poprzeczne elektrod obserwowano również za pomocą mikroskopii świetlnej (zarówno w jasnym polu,

jak i w odbitym świetle spolaryzowanym) po wytrawieniu chemicznym. We wkładce znaleziono trzy typowe strefy po cięciu:

- warstwę HfO_2; termicznie modyfikowana strefa przejściowa,
- O_2-Hf; warstwa niezmodyfikowana Hf,
- wzrost ziaren Cu w przetopionym Hf na granicy Hf /Cu.

W pracy [126] Wang zaproponował nowatorski sposób poprawy żywotności elektrody poprzez zastosowanie pulsacyjnego łuku o częstotliwościach ultradźwiękowych. Przeprowadzone eksperymenty wykazały skuteczność tej metody poprzez zmniejszenie erozji wkładki hafnu. W rezultacie zwiększono żywotność elektrody o 47,8% przy częstotliwości pulsu 40 kHz. Yamaguchi i Yoshida [132, 133, 134] przeprowadzili eksperymenty na elektrodach z wkładką hafnu. Hafn opisali jako ogniotrwały materiał katodowy do emisji termoelektrycznej o podwyższonej temperaturze. Zużycie elektrody Hf badano, mierząc jej głębokość wklęsłości po przeprowadzonym cięciu termicznym. Własności zużycia podzielono na dwa poziomy:

- zużycie Hf podczas okresu przejściowego, kiedy natężenie prądu wzrasta lub maleje, np. przebijanie oraz zakończenie cięcia,
- zużycie Hf podczas stabilnej fazy łukowej, gdy prąd łuku jest utrzymywany w stanie roboczym.

Na podstawie analizy danych określono następujące 4 fazy zużycia elektrod:

- pierwsza rozpoczyna się wraz z pierwszym jej użyciem,
- druga, gdy proces cięcia przebiega stabilnie,
- trzecia, gdy widoczny jest rozszerzanie się łuku plazmowego,
- czwarta, gdy elektroda przechodzi w stan bezużyteczny.

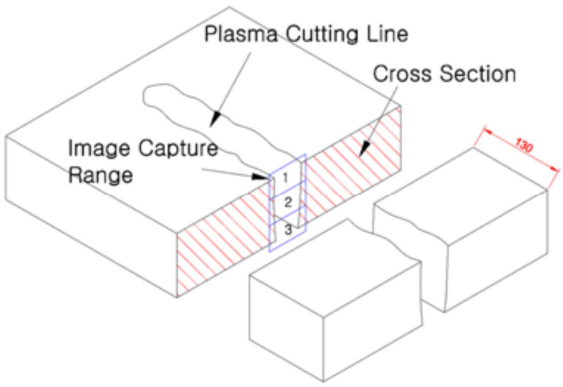
Zużycie dzieli się na przejściowe i stałe. Przejściowe zależy od liczby przebić w fazie startu, a stałe od czasu cięcia. W fazie przejściowej zużycie Hf jest bardzo znaczące i jest tym większe, im jest dłuższy czas przebijania. Przebijanie powoduje utratę kropli Hf z powierzchni elektrody. Zużycie elektrody wzrasta wraz ze wzrostem natężenia prądu.

Kumar [66] w swoich badaniach stwierdził, że, aby wydłużyć żywotność elektrod, należy stosować chłodzenie. Uzyskane wyniki symulacji numerycznych oraz przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdzają, że optymalne natężenie przepływu czynnika chłodzącego jest wymagane w celu zwiększenia żywotności katod. Do badań zastosowano następujące czynniki chłodzące: glikol propylenowy, glikol etylenowy oraz woda dejonizowana. Analizę przeprowadzono za pomocą systemów informatycznych CFD, FLUENT.

Sonsky i Gruber w pracy [120] wykazali również zwiększoną stratę materiału katody podczas fazy rozruchu, czyli startów. W fazie rozruchu duża liczba małych cząstek jest wyrzucana z katody. Po wyłączeniu prądu elektrycznego zwykle wykrywa się duże kropelki stopionego materiału. Badania przeprowadzili za pomocą kamery szybkiego filmowania, która pozwoliła na wykrycie fluktuacji wysokiej częstotliwości. Fluktuację badano metodą szybkiej transformacji Fouriera (FFT).

2.2.3. Wpływ cięcia plazmowego na własności materiału i SWC – stale niestopowe

Berenyi [7] przedstawił wyniki badań wpływu cięcia plazmowego i laserowego na martenzytyczne ultra-wytrzymałe stale w gatunku Amarox 440, 500 i 600. Przeprowadzone badania wykazały, że przedstawione technologie mają znaczący wpływ na zmiany mikrostrukturalne badanych stali. Cięcie stali typu Amarox 440, 500 i 600 technologią plazmową powoduje powstanie na zewnątrz ciętych krawędzi białej warstwy tlenków nasyconej gazami (N_2 i O_2). Głębokość strefy wpływu ciepła w technologii plazmowej jest dużo większa jak przy cięciu za pomocą wiązki lasera. Stale typu Amarox są stosowane
do produkcji samochodów cywilnych oraz wojskowych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wpływ termicznej obróbki blach jest znaczący i może negatywnie wpłynąć na całą konstrukcję pojazdów. W związku z tym cięcie stali typu Amarox powinno być przeprowadzone za pomocą technologii strumienia wody, przy której nie występuje strefa wpływu ciepła. Badania wykorzystania procesu cięcia plazmowego w przemyśle stoczniowym dotyczyły wpływu parametrów cięcia na jakość konstrukcji spawanych, stosowanych w budowie jednostek pływających [74]. Opisano poszczególne etapy produkcji, w tym szczególnie przeanalizowano ważny jej etap, którym jest cięcie plazmowe. W pracy [42] potwierdzono, że takie parametry wejściowe, jak prędkość cięcia, ciśnienie gazu plazmowego, średnica dyszy oraz odległość palnika od ciętego materiału mają znaczący wpływ na profil ciętych krawędzi. W artykule [56] przedstawiono wyniki badań dotyczące charakterystyki cięcia plazmowego dla grubej stalowej płyty okrętowej (rys. 2.16) o grubości 50 mm. Stwierdzono, że prędkość cięcia plazmą jest większa niż prędkość cięcia tlenowego. Jednak jakość cięcia plazmowego jest gorsza dla materiału o grubości powyżej 30 mm i więcej. Celem badań było znalezienie przyczyny pogarszającej się jakości cięcia przy 30 mm lub większej grubości blach. W badaniach zmierzono prostopadłość ciętych krawędzi, tolerancje wymiarowe oraz szerokość SWC.



Rys 2.16. Widok ciętej płyty stalowej [56]

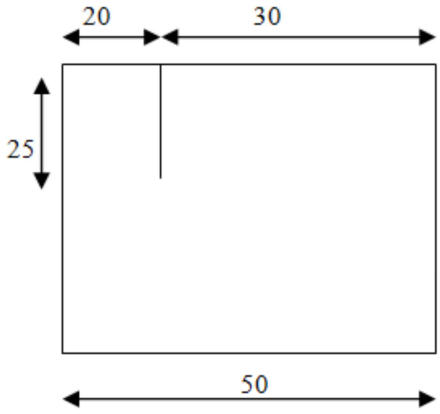
Wpływ parametrów cięcia plazmowego na jakość ciętych krawędzi przedstawiono również w pracy [122]. Zbadano stal z gatunku S355 według PN-EN 10025: 2004, która ma zastosowanie w konstrukcjach stalowych, takich jak mosty i wiadukty. Badania wykazały, że proces cięcia plazmowego powoduje niekorzystne zmiany mikrostruktury zachodzące w SWC. Ich następstwem jest powstawanie wewnętrznych pęknięć. W badaniach przeprowadzono cięcie za pomocą plazmy tlenowej oraz powietrznej przy różnych prędkościach cięcia. Porównanie właściwości topograficznych oraz mikrostruktury ciętych krawędzi potwierdziły wpływ stosowanego gazu plazmowego na jakość ciętych krawędzi. Poprzez charakterystykę ciętych krawędzi, określono optymalne parametry procesu, które ograniczają zmiany mikrostrukturalne i powierzchniowe uszkodzenia. W pracy [9] w badaniach eksperymentalnych przedstawiono wpływ parametrów cięcia plazmowego na jakość cięcia blachy ze stali niestopowej o grubości 5 mm. Podczas cięcia regulowanymi parametrami były: prędkość cięcia oraz ciśnienie gazu plazmowego. Wyniki pokazały, że dobrą jakość ciętych krawędzi można uzyskać w zakresie prędkości 400-700 mm/min przy ciśnieniu gazu w zakresie 4÷5 bar. Zhou [136, 137, 138] badał wpływ długości dysz oraz dwóch parametrów (natężenia prądu i natężenie przepływu gazu), na jakość łuku plazmowego. Wyniki modelowania pokazały, że parametry te mają zasadniczy wpływ na charakterystykę łuku plazmowego. Długość dyszy zapewnia strumień plazmy o dużej prędkości. Wraz z jej długością wzrasta również długość łuku oraz ciśnienie w niej powstałe. Wysokie natężenie prądu zwiększa prędkość powstałej plazmy oraz jej temperaturę, poprawia strumień cieplny i zwiększa ciśnienie w komorze, a tym samym zwiększa moc potrzebną w trakcie startu do przebicia materiału. Silny przepływ przez rozdzielacz powstałego ciśnienia gazu plazmowego ma wpływ na łuk plazmowy wewnątrz palnika, zwiększa napięcie, a tym samym prędkość i temperaturę plazmy. W artykule [137] dokonano porównania dwóch różnych palników w kontekście ich budowy, natomiast w artykule [138] sprawdzono wpływ liczby zawirowań gazu wylotowego na jakość ciętych krawędzi.

2.2.4. Wpływ cięcia plazmowego na własności materiału i SWC – stale stopowe i odporne na korozję

W pracach Das oraz Barman [28, 29], za pomocą algorytmów Taguchi oraz algorytmu kolonii sztucznych pszczół (ABC), badano optymalne parametry cięcia dla stali z gatunku EN31 wg DIN EN 10084:2008-06. W dalszej części badań przeprowadzono analizę wpływu parametrów cięcia plazmowego na chropowatość ciętych krawędzi. W trakcie badań regulowano przepływ ciśnienia gazu, odległość palnika od ciętego materiału w trakcie cięcia oraz natężenie prądu w celu uzyskania najlepszych wyników chropowatości. Do badań opracowano sztuczną sieć neuronową (ANN), gdzie na wejściu wykorzystano trzy parametry, a na wyjściu tylko jeden- chropowatość.

Anakhov w pracy [3, 4] zajął się badaniem stali gatunku 09G2S. Przedstawił wyniki badań właściwości mechanicznych połączeń spawanych powstałych stali o podwyższonej wytrzymałości, metodami mechanicznymi i palnikami plazmowymi o różnej konstrukcji. Pokazano, że wytrzymałość na uderzenie i statyczna wytrzymałość na zginanie połączeń spawanych, po cięciu plazmowym bez usuwania strefy wpływy ciepła (SWC) powstałej po procesie cięcia, nie jest gorsza od parametrów uzyskanych po cięciu mechanicznym. W pracach [1 i 80] przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów cięcia plazmowego na stal odporną na korozję w gatunku 1.4301. Jest to stal często stosowana przez przedsiębiorstwa do produkcji konstrukcji stalowych odpornych na korozję. W pracach do badań eksperymentalnych zastosowano ortogonalne tablice Tagichi'ego L9. Udowodniono, że parametry cięcia, takie jak napięcie łuku, prędkość cięcia, odległość palnika od ciętego materiału oraz rodzaj i przepływ gazu plazmowego mają bardzo duże znaczenie dla jakości ciętych krawędzi. W obydwóch przypadkach badano chropowatość ciętych powierzchni. Wyniki badań uzyskane w pracy [1] zostały zastosowane w przemyśle włókienniczym, chemicznym oraz farmaceutycznym, natomiast w pracy [80] wynikiem badań było otrzymanie optymalnych parametrów cięcia dla blachy o grubości 5 mm. Wyniki badań cięcia plazmowego stali odpornej na korozję w gatunku 1.4404 przedstawiono w pracach [73, 90]. W pierwszym artykule opracowano koncepcję optymalizacji różnych parametrów cięcia stali odpornej na korozję, prowadzących poprzez hybrydową metodę optymalizacji. Zaproponowana metodologia badania ciętych powierzchni oraz analiza poszczególnych relacji, dały odpowiedzi na wpływ parametrów cięcia na oszacowanie jakości ciętych krawędzi. Zbadano wpływ parametrów wejściowych, takich jak prędkość cięcia, napięcie łuku, natężenie prądu oraz odległość palnika od ciętego materiału, na jakość cięcia plazmowego, grawerowania, powstawania wypływek oraz na chropowatość ciętych

powierzchni. Przeprowadzono trzydzieści eksperymentów na materiałach obrabianych ze stali odpornej na korozję. Wyniki pokazały, że, na jakość ma wpływ wiele czynników, nie tylko te bezpośrednie, ale i pośrednie. W artykule [80] potwierdzono wyniki poprzedniej pracy z tym, że autorzy badali szerokość powstającej szczeliny cięcia, prostopadłości krawędzi oraz powstawania wypływek, a badania były przeprowadzone na arkuszu blachy o grubości 2 mm. Na rysunku 2.17 przedstawiono schemat badanego elementu.



Rys. 2.17. Badanie szerokości szczeliny cięcia blach z gatunku 1.4404 [80]

Wpływ ręcznego cięcia plazmowego płyt próbnych o grubości 3 i 6 mm na jakość ciętych powierzchni przedstawiono w pracy [10]. Wyznaczono wpływ prędkości cięcia na zmiany chropowatości powierzchni. Wykazano, że wraz ze wzrostem prędkości cięcia, chropowatość powierzchni jest mniejsza. Natomiast w pracy [87], Özek wyznaczył wpływ parametrów cięcia na chropowatość, wykorzystując metody prognozowania oparte na regułach rozmytych. Modele te można skutecznie wykorzystywać do oceny chropowatości ciętych krawędzi. Przeprowadzono i przedstawiono analizę wpływu poszczególnych parametrów cięcia na chropowatość. Statystycznie prędkość cięcia była najważniejszym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni, podczas gdy natężenie prądu łuku plazmowego było najmniej istotnym parametrem. Zbadano również charakterystykę powierzchni obrabianych i zmian mikrostruktury. W pracy [68] zbadano wpływ procesu cięcia plazmowego na zmiany mikrostrukturalne stali odpornej na korozję w gatunku 1.4571. Badania eksperymentalne dotyczyły oddziaływania strumienia plazmy na warstwy powierzchniowe stali. Zbadano strefę wpływu ciepła poprzez pomiar jej przybliżonej szerokości. Wpływ prędkości chłodzenia materiału na zmiany mikrostruktury zbadano za pomocą pomiaru mikrotwardości metodą mikro Vickersa HV0,2. Badania te dostarczyły odpowiednich informacji na temat szerokości strefy wpływu ciepła oraz jej wpływu na właściwości materiału ciętego.

W pracy [107] przedstawiono charakterystykę jakości cięcia stali odpornej na korozję w gatunku 1.4541 stosowanej do produkcji kolektorów wydechowych w samochodach oraz samolotach. Ponieważ konstrukcja ciętych elementów składowych kolektorów jest skomplikowana, a gatunek stali jest trudnoobrabialny, cięcie elementów składowych wykonano technologią plazmową. W badaniach eksperymentalnych zastosowano tablice ortogonalne Taguchi'ego L9. Jako parametry wejściowe zastosowano prędkość cięcia, natężenie prądu, odległość palnika od ciętego materiału i ciśnienie gazu plazmowego, na wyjściu zaś chropowatość ciętych krawędzi, szerokość szczeliny oraz szerokość SWC. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że najmniejszą chropowatość oraz najwęższą SWC można uzyskać przy mniejszych prędkościach cięcia oraz mniejszej odległości palnika od ciętego materiału.

2.2.5. Inne zastosowanie plazmy

Norma PN-EN ISO 12944-3 [34] - oraz inne specyfikacje nie pozwalają na wykonywanie otworów (np. do połączeń śrubowych) w elementach podstawowych za pomocą cięcia plazmowego. Jednak nowoczesne technologie cięcia umożliwiają wykonywanie otworów spełniających wymagania jakościowe i użytkowe, równocześnie pozwalają na obniżenie kosztów produkcji. Ograniczenia w stosowaniu technologii cięcia plazmowego do wykonywania otworów wynikają przede wszystkim z braku wystarczającej wiedzy (wyników badań). Nie wiadomo np. jak otwory wykonywane termicznie wpływają na wytrzymałość zmęczeniową elementu konstrukcyjnego. Becketta oraz Ocela [8] przeprowadzili 170 testów zmęczeniowych i 34 prób zginania, z których wynika, że w pewnych warunkach otwory pod śruby, wykonane za pomocą plazmy, wpływają na wytrzymałość zmęczeniową w sposób porównywalny do otworów wierconych lub wykrawanych. Autorzy wykazali jednak, że cechy geometryczne w 29 testach z 34 nie były zgodne ze specyfikacją.

Oprócz przemysłu metalowego, plazma znalazła swoje zastosowanie równie w medycynie. W pracy [71] wykorzystano plazmę jako skalpel w trakcie operacji raka pęcherza moczowego, natomiast w pracy [118] plazmę wykorzystano do cięcia tkanki ludzkiej pod ciśnieniem atmosferycznym.

2.2.6. Cięcie plazmowe a przepisy BHP

W trakcie cięcia plazmowego występują problemy związane z zapewnieniem warunków bezpieczeństwa na stanowisku pracy. Cięcie plazmowe powoduje powstawanie szkodliwych dla zdrowia pyłów (głównie tlenków metali, które zależą od składu chemicznego ciętego materiału), gazów (tlenków azotu, CO), promieniowania oraz hałasu [94].

Pyły powstają podczas cięcia przecinanego materiału, gdzie materiał ulega stopieniu i odparowaniu. Struktura powstałych pyłów jest kulista, charakterystyczna dla pyłów typu kondensacyjnego. Cięcie stali odpornych na korozję powoduje emisję pyłów bogatych w związki żelaza, manganu, chromu, niklu itp., natomiast cięcie stopów aluminium czy miedzi, emituje pyły bogate w tlenki aluminium lub miedzi.

W trakcie procesu cięcia plazmowego, wpływ wysokiej temperatury oraz promieniowania na materiał w kontakcie z powietrzem powoduje powstawanie gazów spalinowych. W powietrzu jest duża zawartość azotu oraz tlenu, co w kontakcie z wysoką temperatura powoduje powstawanie toksycznych dla organizmu tlenków azotu. Kontakt człowieka z tym związkiem może powodować zatrucie, które, w zależności od stężenia i czasu narażenia, może powodować przewlekłe choroby płuc, a nawet prowadzić do śmierci.

Promieniowanie, występujące podczas procesu cięcia plazmowego, obejmuje zakres od podczerwieni do nadfioletu. Procentowy skład poszczególnych rodzajów promieniowania łuku jest zależny od parametrów technologicznych związanych z rodzajem oraz grubością ciętego materiału i rośnie wraz z natężeniem prądu.

Najpoważniejszym zagrożeniem występującym podczas cięcia plazmowego jest hałas. Średni jego poziom z reguły przekracza 100 dB, gdzie dopuszczalna norma wynosi 85 dB. Hałas powstaje wskutek wypływu plazmy z wąskiej szczeliny dyszy, a jego poziom zależny jest od rodzaju urządzenia, gazu i wartości natężenia prądu. Permanentne narażenia na hałas powoduje upośledzenie narządu słuchu, a także negatywnie wpływa na układ nerwowy oraz krążenia.

Oprócz wymienionych zagrożeń występują również inne, podobne do prac spawalniczych, takie jak niebezpieczeństwo poparzenia odpryskami czy porażenia prądem.
Aby zapobiec powstającym zagrożeniom, należy zapewnić odpowiednie warunki bezpieczeństwa, które polegają na:

- wyposażeniu urządzeń do cięcia plazmowego w urządzenia filtrowentylacyjne, a także zapewnieniu wentylacji całego pomieszczenia,

- zastosowaniu specjalnych ekranów ograniczających promieniowanie oraz hałas, oddzielających urządzenie do cięcia plazmowego od reszty pomieszczenia lub hali produkcyjnej,
- zapewnieniu środków ochrony osobistej, w tym odzieży ochronnej, środków ochrony słuchu, rękawic, obuwia i innych,
- stosowaniu okularów ochronnych z filtrem chroniącym przed niepożądanym promieniowaniem łuku plazmowego,
- o ile to możliwe, zastosowaniu stołu wodnego plazmowego i prowadzeniu procesu cięcia pod lustrem wody lub na wodzie [94].

Obawy pracodawcy, produkującego konstrukcje stalowe, związane z zagrożeniem promieniowaniem optycznym w procesie cięcia plazmowego, były inspiracją powstania pracy [136]. W badaniach intensywności promieniowania ultrafioletowego, widzialnego promieniowania światła oraz promieniowania podczerwonego generowanego przez łuk plazmowy, mierzono różne odległości od źródła przy różnych natężeniach prądu. Wykazano, że w trakcie procesu cięcia plazmowego występują promieniowanie ultrafioletowe C i B oraz promieniowanie widzialne. Poziomy promieniowania podczerwonego i ultrafioletowego były widoczne na poziomie tła. Najwyższe promieniowanie występowało w przypadku niestosowania kurtyn spawalniczych. Zastosowanie kurtyn spawalniczych eliminuje zagrożenia promieniowania dla operatorów przecinarek plazmowych oraz osób pracujących w ich sąsiedztwie. Wynikiem badań jest zalecenie stosowania kurtyn oraz umieszczenie znaków ostrzegawczych promieniowania optycznego w obszarze łuku plazmowego.

W artykule [109] przedstawiono wyniki pomiarów emisji elektromagnetycznej na stanowisku do cięcia plazmowego. W pracy stwierdzono, że urządzenia do cięcia plazmowego mogą wpływać na kompatybilność elektromagnetyczną sąsiadujących urządzeń oraz doprowadzić do zakłóceń w ich pracy. Z punktu widzenia przepisów BHP, emisja promieniowania elektromagnetycznego jest czynnikiem środowiskowym powodującym narażenie personelu obsługującego urządzenie. Po analizie uzyskanych danych oraz na podstawie rozporządzeń dotyczących maksymalnych, dopuszczających poziomów pól zakresów częstotliwości, nie stwierdzono przekroczeń. Oznacza to, że praca na stanowisku z badaną przecinarką plazmową jest bezpieczna i nie wprowadza zagrożeń dla zdrowia obsługujących ją pracowników w kontekście obowiązujących przepisów prawnych. Nie należy zapominać, że przecinarki plazmowe mogą być tylko jednym z urządzeń emitujących pole elektromagnetyczne. W takim przypadku należy brać pod uwagę sumę wszystkich pól otaczających pracownika.

2.3. Podsumowanie genezy pracy

Z analizy literatury można wywnioskować, że proces cięcia plazmowego jest powszechnie stosowany w obszarze produkcji wyrobów metalowych. Cięcie plazmowe jest procesem często wykorzystywanym w mikro i małych przedsiębiorstwach ze względu na jego wysoką wydajność, zarówno w przypadku różnych gatunków stali, jak i metali nieżelaznych. W ciągu ostatnich 20 lat wzrosła wydajność urządzeń - od jakości i prędkości cięcia, do różnorodności ciętych materiałów [75]. Przeprowadzona analiza dostępnej literatury odnoszącej się do parametrów cięcia plazmowego, nie dała jednak odpowiedzi na nurtujące pytania dotyczące:

- doboru właściwych parametrów cięcia plazmowego dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm wykonanych ze stali w gatunku S235JR w stosunku do żądanych klas jakości,
- wpływu parametrów cięcia plazmowego na zmiany mikrostrukturalne ciętych detali,
- kosztów oraz czasu wykonania detali przy określonym zużyciu części eksploatacyjnych.

Dostępna literatura dotycząca systemów wspomagania decyzji w procesie cięcia plazmowego jest stosunkowo uboga. Kosztochłonność procesu cięcia plazmowego jest bardzo ważnym aspektem, który jest inicjowany w fazie projektowania inwestycji zakupu urządzenia, jednak wśród wielu artykułów dotyczących cięcia plazmowego znaleziono tylko dwa [47, 147], z których wynika, że duży wpływ na kosztochłonność procesu ma moc urządzenia oraz prędkość cięcia. Im szybciej jest wykonany proces cięcia, tym mniejszym jest koszt wykonania ciętych detali. W artykułach pominięto takie aspekty jak koszt cięcia w odniesieniu do klas jakości z uwzględnieniem zużycia części eksploatacyjnych.

W przytoczonych pracach prezentowane są często wyniki badań chropowatości oraz mikrotwardości, natomiast zauważono ograniczoną ilość wyników badań samej geometrii wyrobu. Zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017 pierwsze badania, które pozwalają na określenie jakości ciętych krawędzi są badanie tolerancji prostopadłości oraz tolerancji wymiarowej. Badanie chropowatości powierzchni czy mikrotwardości jest bezpodstawne, gdy tolerancja prostopadłości lub wymiarowa jest poza dopuszczalną normą.

Problematyka poruszana w niniejszej pracy ma duży wpływ na rozwój oraz optymalizację procesu cięcia plazmowego w aspektach doboru parametrów dla żądanych klas jakości. Jest to istotne, ponieważ w procesie produkcji konstrukcji stalowych nie zawsze żądana jest pierwsza klasa jakości wykonania detali. W takim przypadku najważniejszym parametrem jest prędkość cięcia, a co za tym idzie, niski koszt procesu. Nie mając wiedzy na temat parametrów, jakie należy zastosować, nie jesteśmy w stanie oszacować kosztu wytworzenia wyrobu.

3. CEL, TEZY I ZAKRES PRACY

3.1. Cel pracy

Z potrzeby przedsiębiorstwa AK ANATOL oraz z przeprowadzonej wstępnej analizy literatury a także rynku wynika, że istnieje potrzeba opracowania informatycznego systemu wspomagającego decyzje (SWD) w doborze parametrów cięcia plazmowego. Założono, że opracowany SWD będzie obejmował zbiór parametrów technologicznych cięcia plazmowego dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm ze stali w gatunku S235 JR, pozwalający uzyskać jakość krawędzi ciętych zgodnie z wymaganiami norm PN-EN ISO 1090-1 oraz PN EN ISO 9013:2017. Po określeniu danej klasy jakości cięcia, systemu oszacuje czas oraz koszt cięcia. Założono, że stworzona aplikacja będzie intuicyjna i łatwa w obsłudze i możliwa do wykorzystania zarówno w wersji stacjonarnej jak i w wersji mobilnej (z poziomu tabletu lub telefonu komórkowego).

Celem pracy jest opracowanie systemu wspomagania decyzji (SWD) doboru parametrów technologicznych cięcia plazmowego, umożliwiającego szacowanie kosztów procesu cięcia blach o grubości 4, 8 i 12 mm przy natężeniu prądu 80 i 130 A, wykonanych ze stali w gatunku S235 JR dla określonych wymagań jakościowych. Dobór właściwych parametrów cięcia plazmowego dla określonych wymagań jakościowych, będzie skutkował redukcją kosztów związanych z koniecznością wykonania dodatkowej obróbki.

Cele szczegółowe:

- określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu cięcia plazmowego na geometrię oraz zmiany twardości w SWC krawędzi ciętej,
- określenie klasy tolerancji prostopadłości, tolerancji wymiarowej, zgodnie z wymaganiami normy PN EN ISO 9013:2017,
- określenie czasu oraz kosztu wykonania detali,
- określnie czasu zużycia oraz kosztu wybranych części eksploatacyjnych palnika.

3.2. Tezy badawcze

W celu właściwego doboru parametrów cięcia plazmowego dla potrzeb obniżenia kosztów wytwarzania, postawiono następujące tezy badawcze:

1. Istnieje zbiór parametrów technologicznych cięcia plazmowego, który umożliwia poprawę prostopadłości oraz tolerancji wymiarowych krawędzi ciętych w porównaniu z parametrami rekomendowanymi przez producenta urządzenia.
2. Dla określonego zbioru parametrów technologicznych cięcia plazmowego możliwe jest oszacowanie czasu i kosztów obróbki detalu oraz eksploatacji urządzenia do cięcia plazmowego.
3. Możliwe jest stworzenie systemu wspomagania decyzji doboru parametrów technologicznych cięcia plazmowego, w oparciu o eksperymenty przeprowadzone na podstawie doświadczenia operatorów, który umożliwi redukcję kosztów obróbki dla określonych wymagań jakościowych.

3.3. Zakres pracy

W celu określenia jakości krawędzi po cięciu plazmowym oraz kosztochłonności procesu cięcia plazmowego, a także na podstawie hipotez badawczych, ustalono ramowy plan badań składający się z pięciu etapów.

I. Wybór najistotniejszych parametrów procesu cięcia plazmowego.
II. Badania eksperymentalne dotyczące pomiarów:
   - tolerancji prostopadłości,
   - tolerancji wymiarowej,
   - chropowatości ciętych powierzchni,
   - mikrotwardości.
III. Określenie kosztu wykonania detalu.
IV. Testy zużycia zespołu oraz poszczególnych części eksploatacyjnych palnika.
V. Utworzenie aplikacji komputerowego systemu wspomagania decyzji.

4. KOSZTOCHŁONNOŚĆ PROCESU CIĘCIA PLAZMOWEGO

W produkcji konstrukcji stalowych kluczowe znaczenie ma umiejętność kalkulacji i szacowania kosztów. Aby przedsiębiorstwo uzyskało pozytywny wynik finansowy z realizowanych zleceń, powinno dokładnie oszacować koszt produkcji. Znajomość kosztów inwestycyjnych i operacyjnych (koszty własny producenta) stanowi podstawę do zakupu maszyn, np. do cięcia plazmowego. W przypadku różnych urządzeń do cięcia plazmowego, typowe koszty inwestycji i koszty operacyjne zależą od mocy urządzenia oraz innych ważnych czynników stanowiących całość systemu. Znajomość kosztów inwestycyjnych i technologii plazmowej powinna stanowić podstawę do oceny rentowności całego przedsięwzięcia.

Plany produkcyjne opracowywane przez kierownictwo przedsiębiorstwa opierają się na obliczeniach kosztów operacyjnych oraz szacunkowych kosztach inwestycyjnych. Oprócz kosztów inwestycyjnych ważne są koszty uzyskania żądanej klasy jakości produktu. Wszystkie te analizy służą zwiększeniu rentowności produkcji. Tylko szczegółowa analiza rozwiązania technologicznego wraz z dokładnym oszacowaniem kosztów podczas produkcji zapewni podstawę do podjęcia decyzji inwestycyjnych. Jeżeli w przedsiębiorstwie stosowane są inne technologie, np. technologia cięcia laserem lub cięcia strumieniem wody (szczegółowo o innych technologiach – załącznik nr 2), i na ciętych detalach nie ma operacji wtórnych, to mało jest prawdopodobne, że technologia cięcia plazmowego będzie ekonomicznym rozwiązaniem. Wciąż w wielu przypadkach technologia cięcia plazmowego jest technologią korzystniejszą pod względem ekonomicznym w stosunku do wspomnianych technologii. Pomimo, że technologia cięcia laserem oferuje większą dokładność, to technologia cięcia plazmowego ma znaczącą przewagę nad urządzeniami laserowymi w kosztach zakupu, eksploatacji oraz produktywności. Uzasadnieniem wyboru technologii cięcia laserowego lub strumieniem wody powinno być obciążenie pracą urządzenia min. 20 godzin na dobę [47]. Tylko całodobowe obciążenie ma uzasadnienie w kosztach inwestycyjnych.

Relatywnie niskie koszty zakupu urządzeń plazmowych, w stosunku do innych technologii, przyczyniają się do tego, że mikro i małe przedsiębiorstwa z branży metalowej często decydują się na tego rodzaju inwestycje [47]. Niskie koszty inwestycyjne i zalety w eksploatacji, często jednak przesłaniają wady urządzeń do cięcia metodą plazmową. Dopiero w trakcie eksploatacji ujawniają się problemy, jakie wiążą się z wykorzystaniem tej technologii.

W tabeli 4.1 zestawiono wybrane metody cięcia blach wraz z ich głównymi wadami i zaletami, podano także orientacyjny przedział cenowy takich urządzeń.

Tabela 4.1. Wybrane metody cięcia blach – zestawienie głównych wad i zalet [140]

	Cięcie tlenowe	**Cięcie laserowe**	**Cięcie strumieniem wody**	**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	- 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
Zakres cenowy	Od 3 000 do 20 000 zł lub jako dodatkowy palnik w przecinarce plazmowej	Od 1 800 000 zł	Od 2 000 000 zł	Od 45 000 do 300 000 zł

Dla przedsiębiorstw kluczowy jest koszt produkcji. Jego ustalenie jest ważne w praktyce przemysłowej, ponieważ możliwość szybkiej i dokładnej kalkulacji kosztów prowadzi do poprawy konkurencyjności przedsiębiorstwa [57]. Parametry cięcia plazmowego są zmiennymi, które wpływają na koszty produkcji [47]. Koszty cięcia plazmowego są wypadkową wielu czynników i można je określić z pomocą wzoru [52]:

Koszt własny producenta K_0 oblicza się ze wzoru:

$$\boldsymbol{K_0 = K_{wytw} + K_{obciążeń} + K_j} \tag{4.1}$$

przy czym **koszt wytwarzania** $\mathbf{K_{wytw}}$ jest równy:

$$\boldsymbol{K_{wytw} = K_b + K_p} \tag{4.2}$$

gdzie: $\mathbf{K_b}$ – koszty bezpośrednie, $\mathbf{K_p}$ – koszty pośrednie.

Koszt bezpośredni $\mathbf{K_b}$ określa wzór:

$$\boldsymbol{K_b = K_{rb} + K_{mb} + K_{bi}} \tag{4.3}$$

w którym poszczególne składowe oznaczają:

- **koszt robocizny bezpośredniej** $\mathbf{K_{rb}}$ – dokumentowane kartami pracy wydawanymi na wykonanie danego wyrobu,

- **koszt materiałów bezpośrednich K_{mb}** – potwierdzone dokumentami pobrania z magazynu materiałów, które przeznaczone są do wykonania elementów maszynowych wchodzących w skład danego wyrobu, lub zostały zakupione w celu wmontowania w dany wyrób,
- **koszty bezpośrednie inne K_{bi}** - to płace i materiały związane w sposób bezpośredni z wykonaniem danego wyrobu, ale niewchodzące w jego skład [52].

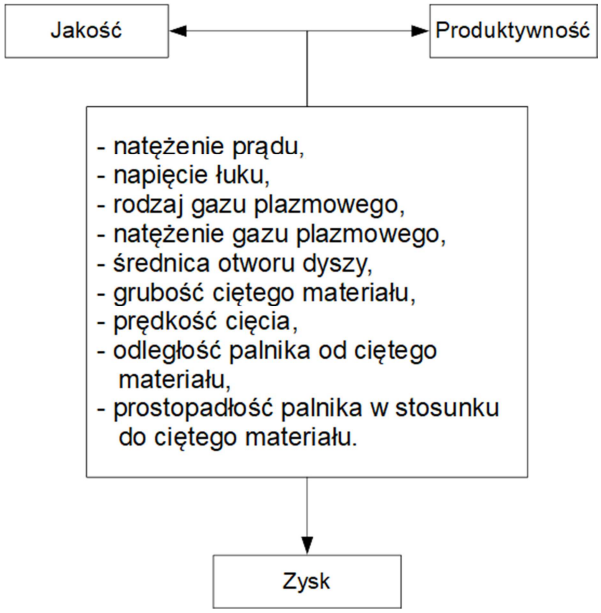
Koszty pośrednie K_p - to koszty niezwiązane bezpośrednio z danym wyrobem, lecz jedynie z faktem jego wytwarzania. Ustalenia odbywają się w księgowości na podstawie dokumentów wpływających z jednostek organizacyjnych

Koszt jakości K_j - koszt wykonania wyrobu o określonej klasie dokładności. Głównymi czynnikami wpływającymi na poszczególne koszty produkcji są parametry procesu, które wpływają na jakość produktu oraz na żywotność części eksploatacyjnych.

Ilii i Coteata [47] podzielili koszty cięcia plazmowego na trzy kategorie: koszt inwestycji początkowej, koszty operacyjne oraz koszty pracy. Koszt amortyzacji jest ściśle związany z kosztem zakupu urządzenia, czyli kosztem inwestycyjnym. Urządzenie amortyzuje się przez pewien okres. Wysokość kosztu amortyzacji oraz czas jest zależny od mocy zastosowanego źródła plazmy, wyposażenia, obszaru roboczego, dokładności i innych czynników. Koszty operacyjne związane są z obsługą procesu cięcia, w tym zużyciem energii elektrycznej, gazów, części eksploatacyjnych, konserwacji oraz napraw. Koszty robocizny są to koszty związane z obsługą oprogramowania, wprowadzeniem danych parametrów cięcia, uruchomieniem urządzenia, całym procesem cięcia plazmowego oraz jałowymi ruchami urządzenia. W pracy przedstawiono szereg wzorów związanych z kosztami. Stwierdzono, że technologia cięcia plazmowego zapewnia optymalne połączenie jakości ciętych detali, wydajności urządzeń w stosunku do kosztów operacyjnych dla stali konstrukcyjnych odpornych na korozję oraz stopów aluminium w szerokim zakresie grubości. Potwierdzono również, że żywotność części eksploatacyjnych, dobra wydajność oraz doskonała jakość cięcia obniża koszt ciętych detali w stosunku do innych technologii cięcia.

W analizowanym referacie pokazano wagę istotności parametrów ciecia plazmowego i ich wpływ na koszt wykonania detali. Decydującym czynnikiem w kosztochłonności procesu jest moc generatora źródła plazmy oraz prędkość cięcia. Im wyższa prędkość cięcia, tym koszt cięcia jest niższy. Prędkość cięcia jest kluczowym parametrem w jakości ciętych krawędzi, dlatego bardzo istotnym aspektem jest znajomość parametrów cięcia plazmowego w stosunku do żądanej jakości, w tym tolerancji.

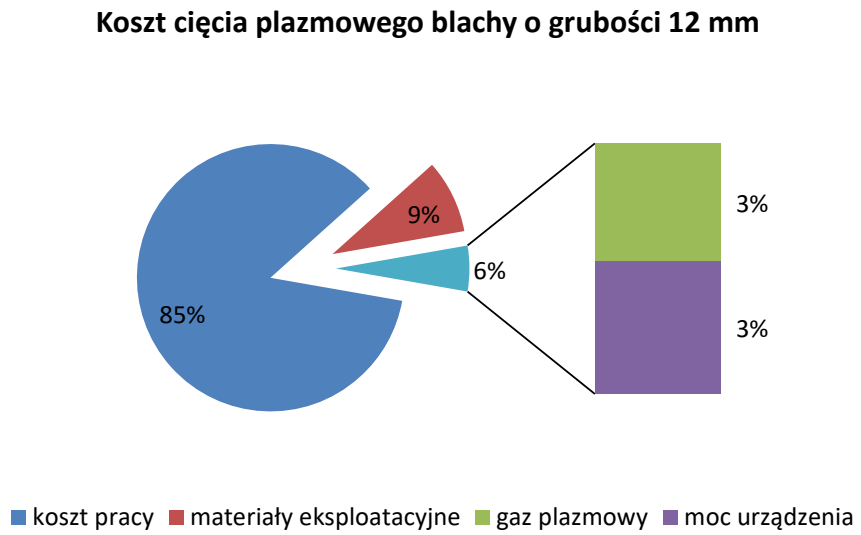
Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat wpływu parametrów na jakość, produktywność oraz zysk.



Rys. 4.1. Schemat wpływu parametrów cięcia plazmowego na proces oraz koszt [47]

W publikacji [47] zwrócono uwagę, że na koszt wpływają nie tylko parametry cięcia plazmowego, lecz także koszt zużycia części eksploatacyjnych, w tym w głównej mierze koszt elektrody. Im mniejsza liczba zużywających się części eksploatacyjnych palnika, tym mniejszy koszt cięcia. W kosztorysach należy zwrócić uwagę również na koszt konserwacji urządzenia. Urządzenie do cięcia plazmowego składa się z części, które podlegają zużyciu. Elementem zużywającym się są np. użebrowanie stołu do cięcia plazmowego (wykonane z blachy stalowej), na którym przeprowadza się proces cięcia i które musi być systematycznie wymieniane, czy serwonapędy.

Jak pokazano na rys. 4.2, koszt pracy i koszt ogólny to zdecydowanie największy składnik kosztów cięcia plazmowego. Koszty części eksploatacyjnych to około 10%.



Rys. 4.2. Koszty cięcia plazmowego dla blachy o grubości 12mm [47]

Typowe operacje cięcia plazmowego poza kosztem początkowej inwestycji można podzielić na cztery główne koszty [147]:

- energii elektrycznej,
- gazów plazmowych,
- materiałów eksploatacyjnych,
- robocizny.

Koszt zasilania urządzenia - Głównym odbiornikiem energii elektrycznej jest zasilacz prądu stałego przecinarki plazmowej. Urządzenie większość energii zużywa bezpośrednio na obróbkę ciętego materiału zjonizowanym gazem plazmowym o dużej gęstości. Aby obliczyć zużycie energii elektrycznej potrzebnej do wykonania cięcia, należy pomnożyć natężenie prądu przez średnie napięcie robocze.

$$\boldsymbol{K_z = Z_e \times T_{jł} \times \frac{Pln}{kWh}} \tag{4.4}$$

K_z – koszt zasilania,

Z_e – zużycie energii,

$T_{jł}$ – czas jarzenia łuku.

Aby obliczyć zużywaną ilość kilowatów, należy pomnożyć moc urządzenia przez współczynnik efektywności zasilania równy około 85%.

Rozważając 200-amperowy system plazmowy o napięciu roboczym 140V możemy obliczyć:

$$\boldsymbol{200\ A \times 0,14\ kV = 28\ kVA}$$

czyli obliczone zużycie wynosi:

$$\boldsymbol{28\ kVA \times 0,85 = 23,8\ kW}$$

Aby obliczyć dzienne lub roczne zużycie zapotrzebowania na energię, należy pomnożyć liczbę kilowatów przez dzienny średni czas pracy systemu oraz czas włączenia łuku. Czas włączenia łuku to faktyczny czas poświęcony cięciu. Można go mierzyć za pomocą liczników czasu włączenia i przebijania lub obliczyć na podstawie zaprogramowanych odległości i szybkości oraz dziennej wydajności. Czas włączenia łuku zależy od:

- typu i grubości materiału,
- rozmiaru ciętej blachy,
- metody obróbki materiału,
- szybkości cięcia,
- oraz wielu innych czynników w zależności od rodzaju i budowy urządzenia.

Koszt gazu plazmowego – Technologie plazmowe wykorzystują tlen, powietrze, azot oraz mieszaniny gazów.

$$\boldsymbol{K_g = Z_g \times T_{jł} \times \frac{Pln}{100\ m^3}} \tag{4.5}$$

K_g – koszt gazu,

Z_g – zużycie gazu,

$T_{jł}$ – czas jarzenia łuku.

Zużycie gazu jest zależne od wielkości systemu plazmowego oraz od innych czynników roboczych, które oblicza się w m^3/godz. Odpowiada ono konkretnemu rozmiarowi dysz oraz ciśnieniu roboczemu. W przypadku 200-amperowego systemu plazmy tlenowej, zużycie gazu podczas cięcia wynosi 21,33 m^3/godz.. Aby określić koszt eksploatacji, należy pomnożyć wskaźnik zużycia gazu plazmowego przez czas włączenia łuku i dodać koszt samego gazu.

Sam system może zużywać 91 m^3/godz. powietrza osłonowego. Koszt energii elektrycznej potrzebnej do wyprodukowania sprężonego powietrza technologicznego oraz gazy, takie jak azot, CO_2, mieszaniny gazów obojętnych, mogą być kosztowne i należy je uwzględnić w kosztorysach.

Koszty materiałów eksploatacyjnych – Należy je monitorować co tydzień, miesiąc i rok. Koszt te są bardzo zróżnicowane i nie zależą tylko od ceny ich zakupu, ale również od ich wydajności i trwałości. Trwałość palnika plazmowego jest zależna od zastosowanych parametrów cięcia, czasu cięcia, liczby przebić, a także, co jest bardzo ważne, od umiejętności operatora. Najlepszym sposobem oszacowania kosztów elementów

eksploatacyjnych jest prowadzenie dzienników trwałości części. Wpisywane informacje o liczbie przebić, liczbie ciętych metrów oraz czasie trwania łuku, mogą dać pełne informacje o ich trwałości.

$$\boldsymbol{K_{me} = W_z \times C_{wł} \times K_c} \tag{4.6}$$

K_{me} – koszt materiałów eksploatacyjnych,

W_z – wskaźnik zużycia,

$C_{wł}$ – czas włączenia łuku,

K_c – koszt części.

W trakcie normalnego cyklu produkcyjnego, można coraz dokładniej śledzić liczbę przebić oraz ilość godzin pracy zajarzonego łuku dla konkretnego zestawu części eksploatacyjnych. Jeżeli palnik plazmowy jest odpowiednio obsługiwany przez operatora, to roczny koszt palników i jego elementów składowych będzie niski w porównaniu do kosztów związanych z dyszami i elektrodami. W rzeczywistości w wielu warsztatach ogólny koszt materiałów eksploatacyjnych przewyższa dwukrotnie koszt dysz i elektrod.

Koszt robocizny – Koszt robocizny można obliczyć za pomocą wzoru:

$$\boldsymbol{K_r = \frac{\Sigma_{Rg}}{R} \times R_g \times L_p} \tag{4.7}$$

K_r – koszt robocizny,

Σ_{Rg} – łączna liczba godzin,

R – rok,

R_g – stawka roboczogodziny,

L_p – liczba pracowników.

W większości przedsiębiorstw na stanowisku do cięcia plazmowego na jednej zmianie pracuje jeden operator oraz jeden pomocnik. W zależności od jakości operacji cięcia, kolejne prace związane z dodatkową obróbką mogą być wykonywane przez jednego lub wielu pracowników, co generuje dodatkowe koszty. Robocizna jest podstawowym kosztem eksploatacji systemu cięcia plazmowego i aby maksymalnie wykorzystać możliwości urządzenia do cięcia plazmowego, wytwórca powinien starannie dobierać kadrę.

5. SYSTEMY WSPOMAGANIA DECYZJI

Systemy wspomagania decyzji (SWD) mają zastosowanie w każdej dziedzinie. Główne składowe SWD to bazy danych, bazy modeli lub bazy wiedzy użytkowników. Systemy te najczęściej wspomagają podejmowanie decyzji w złożonych sytuacjach i są wykorzystywane w edukacji, medycynie, biznesie czy rolnictwie [5]. Współczesne wytwarzanie produktów, maszyn, urządzeń lub aparatury bez z zastosowania SWD przy zachowaniu konkurencyjności przedsiębiorstwa jest bardzo utrudnione lub wręcz niemożliwe [52]. Rozwój technologii informacyjnych oraz metod modelowania umożliwiły efektywne wspieranie oraz częściową automatyzację procesów podejmowania decyzji. Metody oraz techniki sztucznej inteligencji, systemy eksperckie, hurtownie danych czy bazy wiedzy są przykładami rozwiązań, które mogą być wykorzystywane w tym obszarze [62].

5.1. Geneza oraz rozwój systemów wspomagania decyzji

Powstanie systemów wspomagania decyzji (SWD) jest pochodną rozwoju koncepcji i narzędzi IT, metod modelowania oraz rosnącą potrzebą kadry menadżerskiej w zakresie wspomagania decyzji w czasie dynamicznie rosnącej konkurencji. Historia rozwoju SWD sięga początków lat 60-tych XX w. W latach 70-tych na rynku pojawiły się pierwsze komercyjne wdrożenia SWD oraz systemy zarządzania bazami danych. Następnie zaobserwowano wzrost zróżnicowania SWD ze względu na przeznaczenie, zakres wspomagania decyzji zarządczych oraz rozwój systemów informowania kierownictwa (SIK), a także systemów eksperckich (ES). W latach 90 nastąpił wzrost internetowych SWD, technologii hurtowni danych oraz ich analitycznego przetwarzania [62]. Obecnie mamy do czynienia z dynamicznym rozwojem technologii inteligentnych oraz zastosowań nauk behawioralnych. Według Power [143], SWD jest dziedziną zarządzania informacją opartą na usprawnieniu procesu decyzyjnego na poziomie przedsiębiorstw oraz kadry zarządzającej, natomiast według Cui [27] SWD to „*wspólny system oparty na bazie danych i modelach, wykorzystujący dane i informacje do rozwiązywania problemów bezpostaciowych*”. Podstawowym celem rozwoju SWD jest poprawa jakości decyzji za pomocą najnowszych narzędzi oraz dostępnych technologii. SWD w swym założeniu ma pomóc organizacjom lub kadrze zarządzającą w podejmowaniu decyzji w niejasnych i dwuznacznych sytuacjach, wykorzystując technologie komunikacyjne, dane, wiedzę oraz dostępne dokumenty [6, 91].

5.2. Definicje systemu wspomagania decyzji

Definicja systemów wspomagania decyzji podaje, że jest to system wspomagający lub wspierający biznesowe oraz organizacyjne czynności decyzyjne. Poprzez SWD (ang. Decision Support System, DSS) rozumiemy rozwiązania informatyczne, które sprawdzają się w sytuacjach decyzyjnych, dla których nie istnieją jednoznaczne procedury prowadzące do optymalnych rozwiązań [62].

Systemy wspomagania decyzji wg [31] są interaktywnymi komputerowymi systemami, których zadaniem jest pomoc użytkownikom w ocenie i wyborze działań. Zapewniają przechowywanie oraz odzyskiwanie zgromadzonych danych z możliwością ich wzbogacania o informacje z funkcją dostępu, obsługi oraz możliwością ich rozbudowy. Zadaniem SWD jest pomoc kadrze zarządzającej w modelowaniu oraz rozwiązywaniu problemów we wszystkich obszarach jakie mogą napotkać.

Podstawowym zadaniem SWD jest dostarczenie dokładnych, przetworzonych danych dla kadry zarządzającej, handlowców i analityków. Otrzymane informacje są przez nich wykorzystywane przy podejmowaniu decyzji operacyjnych, taktycznych i strategicznych w organizacjach. Systemy te powinny również realizować zadanie przygotowania różnych wariantów decyzji oraz wspomagania wyboru optymalnego rozwiązania, w szczególności rozwiązań taktycznych i strategicznych, które niosą ze sobą ryzyko popełniania błędu i poniesienia kosztów znacznie wyższych niż w przypadku decyzji operacyjnych [62].

5.3. System wspomagania decyzji i jego elementy

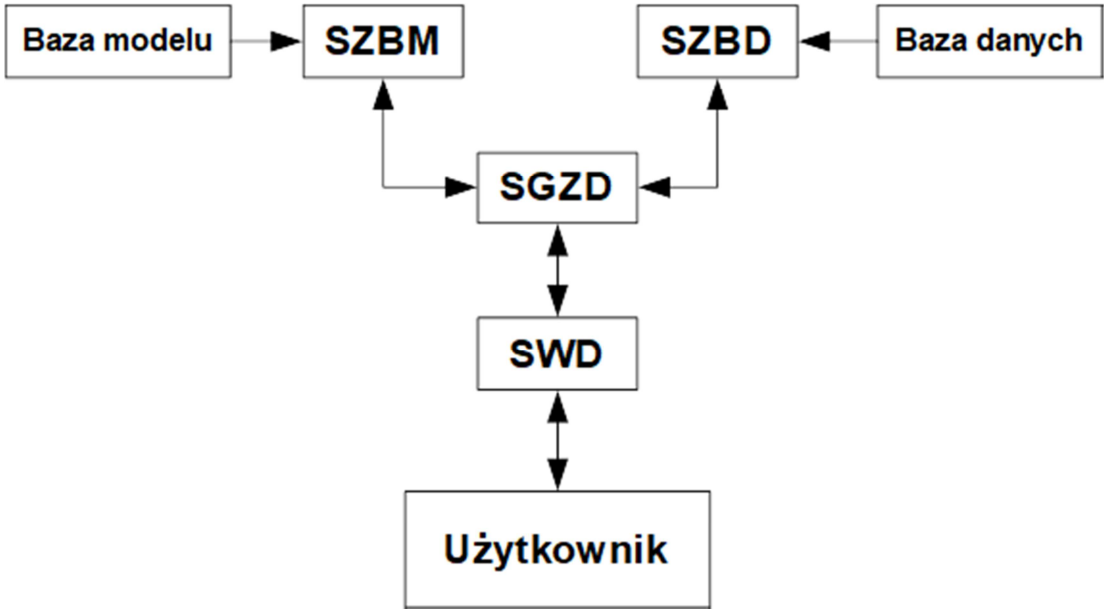
Istnieją trzy podstawowe składowe systemów wspomagania decyzji [110]:

- System Zarządzania Bazami Danych (ang. Database Managment System). Jest to system zarządzania bazami danych (SZBD) służący jako bank danych dla SWD. Przechowuje duże ilości danych, istotnych dla rozwiązywania problemów, dla których został stworzony SWD. SZBD informuje użytkownika o typach wprowadzonych danych, które powinny być dla niego dostępne lub dawać możliwość do ich dostępu.
- System Zarządzania Bazą Modelu (ang. Model-base Management Systems). Rola systemu zarządzania bazą modelu (SZBM) jest analogiczna do SZBD. Jego podstawową funkcją jest zapewnienie niezależności pomiędzy konkretnymi modelami, które są używane w aplikacjach SWD. Celem SZBM jest modyfikacja lub przetworzenie danych z SZBM na informacje przydatne w momencie

podejmowania decyzji. W trakcie użytkowania SWD może powstać wiele problemów związanych z obsługą programu wspomagającego decyzje, a zadaniem SZBM jest pomoc użytkownikowi w modyfikacji systemu.

- System Generowania i Zarządzania Dialogiem (ang. Dialog Generation and Management System). Głównym celem tego systemu (SGZD) jest generowanie i zarządzanie dialogiem z użytkownikiem SWD. Ponieważ użytkownicy obsługujący SWD nie zawsze są specjalistami IT, SWD są wyposażone w intuicyjną i łatwą w użyciu funkcję obsługi oprogramowania umożliwiającą efektywne wykorzystanie SWD.

Na rysunku 5.1 przedstawiono wzajemne powiązania pomiędzy elementami SWD. Obsługa SWD przez użytkownika następuje za pośrednictwem SGZG. SGZG komunikuje się z systemami SZBD oraz SZBM. Na podstawie uzyskanych informacji, użytkownik otrzymuje możliwość obsługi podstawowego modelu oraz rozbudowy bazy danych [110].



Rys. 5.1 Struktura SWD [110]

5.4. Systemy wspomagania decyzji w procesie cięcia plazmowego

Systemy wspomagania decyzji są narzędziami integrującymi naukowe metody wspierania złożonych decyzji przy wykorzystaniu technik komputerowych i zyskują coraz większą popularność w wielu dziedzinach. Są one szczególnie cenne w sytuacjach, w których ilość dostępnych informacji jest zbyt duża do przeanalizowania przez osobę podejmującą decyzję.

Celem systemów wspomagających decyzje jest umożliwienie użytkownikom korzystanie z odpowiedniej, fachowej wiedzy w celu podejmowania decyzji, dokonywania wyborów lub optymalizacji decyzji [31].

Jak już wcześniej wspomniano, proces cięcia plazmowego może zostać przeprowadzony w sposób ręczny zmechanizowany, zautomatyzowany lub zrobotyzowany. Wykonując cięcie plazmowe manualnie, operator urządzenia realizuje ten proces w sposób intuicyjny, dobierając prędkość cięcia i odległość palnika od ciętego materiału w zależności do grubości ciętego materiału zgodnie ze swoim doświadczeniem oraz umiejętnościami. Zastosowanie takiej praktyki jest niemożliwe w procesie cięcia w urządzeniach sterowanych numerycznie. Dlatego w zautomatyzowanych procesach cięcia, operatorzy posługują się programami typu CAD/CAM wspomagającymi proces przygotowania cięcia elementów. Oprócz bardzo ważnej funkcji programów wspomagania decyzji w doborze parametrów cięcia plazmowego, programy te są rozbudowane o dodatkowe funkcje, np.: minimalizację odpadów, możliwość kosztorysowania, zarządzanie odpadami, etc. Nie mniej jednak wprowadzone w bazach danych parametry cięcia plazmowego, które mają bardzo istotny wpływ na jakość cięcia, nie zawsze spełniają oczekiwane wymagania.

Kumar [65] stwierdził, że w obszarze technologii cięcia plazmowego, automatyczny i zoptymalizowany wybór parametrów cięcia jest trudny. Celem pracy było wyeliminowanie ręcznego podawania parametrów wejściowych cięcia plazmowego przez operatorów. Stwierdzono, że parametry znajdujące się w pamięci systemów operacyjnych urządzeń do cięcia plazmowego podawane przez producentów są nieprawidłowe. Wybór parametrów wejściowych, znajdujących się w systemach operacyjnych urządzeń, ma bezpośredni, negatywny wpływ na jakość ciętych detali oraz na zużycie części eksploatacyjnych palnika plazmowego. W pracy zaproponowano opracowanie modelu matematycznego, aktualizującego bazę danych wejściowych parametrów procesu cięcia. Opracowanie modelu matematycznego polegało na analizie trzech różnych podejść: regresji wielokrotnej, wielokrotnej regresji wielomianowej oraz metody sztucznych sieci neuronowych z matematycznymi zależnościami pomiędzy różnymi parametrami procesu cięcia. Ostatecznie wybrana technika została poddana testowaniu pod kątem dokładności oraz wiarygodności istniejących danych parametrów. Lazarevic w pracy [69] stwierdził, że zastosowanie cięcia plazmowego w nowoczesnym przemyśle wymaga dodatkowych usprawnień i optymalizacji procesów, aby zaoszczędzić czas i koszty dostosowania parametrów procesu do każdej konkretnej sytuacji. W artykule przedstawiono prototypowy system ekspercki do wspomagania procesów cięcia plazmowego, opracowany zgodnie z otrzymanymi wynikami badań teoretycznych i eksperymentalnych. Usystematyzowano czynniki, które

mają wpływ na jakość cięcia plazmowego. Uwzględniono rodzaj urządzenia do cięcia plazmowego, moc urządzenia oraz rodzaj ciętego przedmiotu. Stwierdzono, że aby uzyskać najlepszą wydajność, wszystkie te czynniki muszą być uwzględnione w planowaniu procesu. W artykule przedstawiono uproszczone podejście poprawiające wydajność procesu cięcia plazmowego. Li i inni w pracy [70] zaproponowali system komputerowego wspomagania produkcji w procesie cięcia plazmowego, poprzez sterowanie przecinarki plazmowej za pomocą silnika krokowego. Silniki korkowe, wywołując wstrząsy, powodują gwałtowną zmianę prędkości cięcia, która zaś prowadzi do niestabilności ruchu roboczego. W pracy zastosowano algorytm minimalizujący powstające wstrząsy poprzez usunięcie wrażliwych punktów mający negatywny wpływ na płynny ruch. Wyniki eksperymentalne wykazały, że proponowany sposób rozwiązał problem płynnego ruchu i poprawił wydajność obróbki oraz jakość ciętych detali. W pracy Cantoro [16], za pomocą przeprowadzonych symulacji i eksperymentów, stwierdzono, że aby uzyskać wysoką produktywność urządzeń, tym samym wysoką jakość ciętych krawędzi, strumień plazmy musi być skolimowany (równoległy) oraz charakteryzować się wyższą osiągalną gęstością mocy. Potwierdzono, że wykonywanie symulacji numerycznych może być bardzo przydatnym narzędziem do projektowania i optymalizacji pracy urządzeń. Stwierdzono również, że nadal trwają badania nad znalezieniem związku pomiędzy symulacją łuku plazmowego, a przewidywaniem jakości cięcia. Diagnostyka oparta na szybkim obrazowaniu i fotografii Schlieren może odgrywać istotną rolę w badaniu przebicia, generowania żużlu, prowadzeniu łuku plazmowego oraz lokalizacji mocowania anody.

Z praktyki oraz analizy literatury wynika, że parametry wprowadzone w bazach systemów wspomagających decyzje w procesie cięcia plazmowego, nie zawsze spełniają określone wymagania jakościowe. Dobór parametrów procesu cięcia ma bezpośredni wpływ na jakość ciętych blach oraz na żywotność części eksploatacyjnych.

Obsługa przecinarek plazmowych oraz zasada ich działania jest praktycznie taka sama, niezależnie od typu przecinarki czy producenta. Urządzenia różnią się ewentualnie źródłem zasilania oraz prędkością przejść jałowych. Wraz z urządzeniem do cięcia plazmowego, firmy sprzedają oprogramowania własne lub innych dostawców [50].

Zestawienie wybranych, dostępnych na rynku europejskim systemów informatycznych wspomagających podejmowanie decyzji w procesie cięcia, przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Oprogramowania wspomagające decyzję w procesie cięcia blach [76]

Nazwa	Producent	Opis
SigmaNest	Stigo	CAD/CAM 3D. Bardzo zaawansowane oprogramowanie. Wysoka optymalizacja. Cięcie oraz wykrawanie blach.
ProNest 2017	Hypertherm	CAD/CAM Przeznaczony do zaawansowanego mechanicznego cięcia (laserowe, wodne, plazmowe, gazowe)
Wrykrys	Stigal	CAD/CAM Przygotowanie procesu cięcia plazmowego, optymalizacja oraz zarządzanie odpadami.
TonCut	Codeton Software	Optymalizacja rozkroju materiałów płaskich jak: blachy, szyba, drewno, kamień, tworzywo sztuczne, aluminium, karton i inne.
CutMaster 2D	Esab	Oprogramowanie stosowane w celu zoptymalizowania procesu cięcia konstrukcji metalowej, meblowej, szklanej i podobnych.
SmartCam	Falina Systemy Cad Cam	Oprogramowanie pomaga zmniejszyć odpady oraz usprawnia proces produkcyjny w procesie cięcia laserowego, plazmowego, wodą oraz wykrawaniu młoteczkowym.
Igems	Igems Software	Przystosowane dla początkujących użytkowników. Pomagający w kosztorysowaniu, tworzeniu detali, rozkrojów generując kody G dla maszyn CNC.
MagicSaf	Air Liquide Welding Polska	Oprogramowanie dające możliwości projektowania trajektorii cięcia. Zaprojektowane z myślą dla urządzeń do cięcia gazowego, plazmowego, laserem, wodą oraz do wykrawania.
StrikerSystems Nest	Stricker Systems	Narzędzie wspomagające proces cięcia na numerycznie sterowanych wycinarkach: plazmowych, laserowych, wodnych i innych maszynach.
Lantek Expert Cut	Lantek Sheet Metal Solutions	Program stworzony do automatyzacji procesu cięcia na przecinarkach różnymi metodami.
Cnc Kad	Metalix	2D/3D Program o zintegrowanej możliwości cięcia oraz wykrawania. Generuje kod NC oraz graficzną symulację.
Radan	Radan Polska	Program przystosowany do obróbki blach.
JetCam	JETCAM International s.a.r.l.	Narzędzie do zarządzania gospodarką materiałową blach.

Wszystkie przedstawione systemy wspomagające decyzje przy cięciu termicznym (tabela 4.1) nie posiadają następujących funkcji:

- kosztorysowania przy zachowaniu żądanych klas jakości cięcia plazmowego,
- klasyfikacji części eksploatacyjnych oraz oceny ich żywotność,
- wspomagania doboru odpowiednich elementów części zamiennych palnika plazmowego dla żądanej jakości cięcia,
- szybkiego ofertowania.

Z przeprowadzonej analizy literatury oraz praktyki można stwierdzić, że wykonując cięcie zgodnie z danymi znajdującymi się w bazie systemów doradczych, można narazić

przedsiębiorstwo na dodatkowe koszty, które nie zostały uwzględnione w kosztorysie cięcia półfabrykatów lub gotowych elementów. Do takich dodatkowych kosztów można zaliczyć [51]:

- usuwanie wypływek,
- prace związane ze szlifowaniem ciętych krawędzi,
- nienaprawialne błędne wymiary całej konstrukcji, spowodowane brakiem tolerancji wymiarowych,
- nienaprawialne naprężenia poprzeczne i wzdłużne ciętych blach, wywołane niską prędkością cięcia oraz dużym natężeniem prądu,
- odpady i ich braki produkcyjne.

6. METODYKA I PROGRAM BADAŃ

Celem pracy jest opracowanie SWD doboru takich parametrów, które umożliwi redukcję kosztów cięcia plazmowego blach o grubości 4, 8 i 12 mm przy zastosowanym natężeniu prądu 80 i 130 A dla określonych wymagań jakościowych. Przeprowadzone badania eksperymentalne umożliwią ocenę wpływu prędkości cięcia zarówno na koszt, jak również na jakość, w tym geometrię cięcia blach.

Aby osiągnąć zaplanowany cel, w ramach pracy przeprowadzono:

- badania określające wpływ parametrów cięcia plazmowego na geometrię wyrobu oraz zmiany zachodzące na ciętych krawędziach oraz w SWC,
- określenie klasy tolerancji prostopadłości i wymiarowej zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 9013:2017,
- określenie czasu oraz kosztochłonności wykonywanych detali,
- określenie czasu zużycia oraz kosztu wybranych części eksploatacyjnych palnika plazmowego.

6.1. Wymagania dotyczące jakości powierzchni ciętych wg normy PN-EN ISO 1090-2:2012

Norma PN-EN ISO 1090-2:2012 [103] odnosi się do procedur oraz procesu wytwarzania konstrukcji stalowych lub jej 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 z normą nie powinny być stosowane do czasu, gdy zostaną naprawione. 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 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.

6.1.1. Jakość powierzchni po cięciu termicznym

Zgodnie z normą PN-EN ISO 1090-2 jakość powierzchni po cięciu termicznym powinna spełniać następujące wymagania:

- dla klasy EXC1, brzegi po cięciu termicznym powinny być oczyszczone z zanieczyszczeń żużlem oraz wolne od znacznych nieregularności,
- w przypadku oczyszczenia brzegów, można zastosować tolerancję *u*, ale tylko w zakresie 5 prostopadłości lub nachylenia.

Tabela 6.1 zawiera wymagania stawiane innym klasom wykonania.

Tabela 6.1. Jakość powierzchni po cięciu dla poszczególnych klas konstrukcji [103]

	Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, u	**Średnia wysokość profilu Rz5**
EXC2	Zakres 4	Zakres 4
EXC3	Zakres 4	Zakres 4
EXC4	Zakres 3	Zakres 3

Ponadto w normie przywołane są wymagania w zakresie tolerancji prostopadłości lub nachylenia **u** zgodnie z wymaganiami normy PN EN ISO 9013:2017 [102] oraz dotyczące średniej wysokości profilu **Rz5** (PN EN ISO 9013:2017, PN-EN ISO 4288:2011E [99]).

6.1.2. Maksymalne dopuszczalne twardości

Proces cięcia termicznego może spowodować lokalne zwiększenie twardości powierzchni po cięciu. W takim przypadku należy, oprócz badań jakościowych powierzchni ciętych określonych w PN-EN ISO 9013: 2017, przeprowadzić badania pomiaru twardości zgodnie z PN-EN ISO 1090-2 [103]. W tabeli 6.2 przedstawiono maksymalną twardość stali niestopowych, które po cięciu termicznym nie powinny być przekroczone. Pomiary twardości wykonywane są metodą Vickersa, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 6507-1:2018 [98].

Tabela 6.2. Dopuszczalna twardość maksymalna [103]

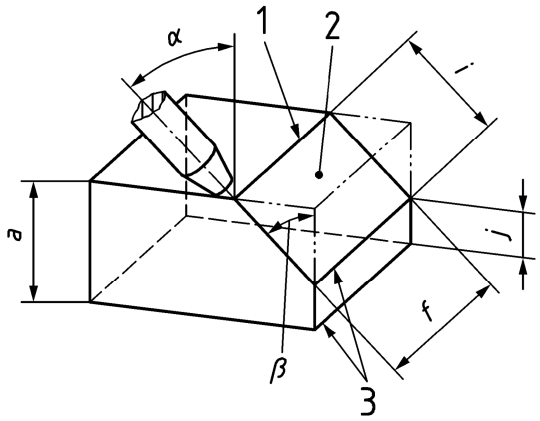
Normy wyrobów	**Gatunek stali**	**Twardość maksymalna**
PN-EN 10025-2 do 5	S235 do S460	380
PN-EN 10210-1, EN 10219-1		
PN-EN 10149-2 i EN 10149-3	S260 do S700	450
PN-EN 10025-6	S460 do S690	
Uwaga Te wartości, zgodne z EN 15614-1 [100], stosuje się do gatunków stali wymienionych w ISO/TR 20172 [49]		

6.1.3. Wymagania dotyczące jakości powierzchni ciętych wg normy PN-EN ISO 9013:2017

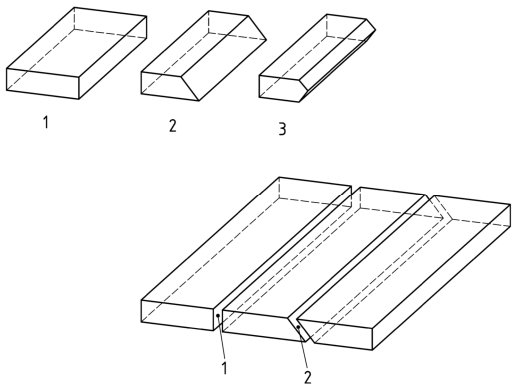
Norma PN-EN 1090-2: 2009 w zakresie kontroli jakości powierzchni ciętych przywołuje normę PN-EN ISO 9013: 2017, która szczegółowo opisuje stawiane wymagania jakościowe ciętych blach oraz klasyfikuje je do danych zakresów.

6.1.4. Terminy i definicje wyjaśnione za pomocą rysunków

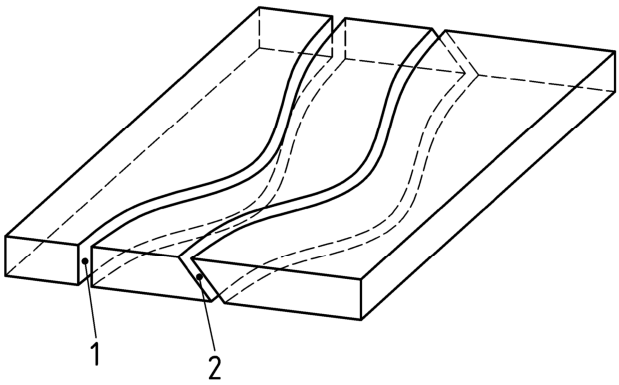
Norma PN-EN ISO 9013:2017 określa terminy oraz definicje, które wyjaśnione są na podstawie rysunków. Na rysunku 6.1 przedstawiono terminy odnoszące się do gotowego przedmiotu. Na rysunku 6.2 typy cięcia, 6.3 cięcie według konturu, rysunek 6.4 przedstawia linię odchyłek cięcia, rysunek 6.5 cięcie pionowe, rysunek 6.6 cięcie skośne, rysunek 6.7 wysokość profilu Rz5.



Rys.6.1. Terminy gotowego przedmiotu. 1. Górna krawędź, 2. Powierzchnia cięcia, 3. Dolna krawędź cięcia, a) Grubość przedmiotu obrabianego, b) Grubość cięcia(pierwsza możliwość), c) Wysokość progu/grubośc cięcia (pierwsza możliwość), d) Grubośc cięcia (druga możliwość), e) Długośc cięcia



Rys. 6.2. Typy cięcia. Cięcie prostoliniowe. 1. Cięcie prostopadłe, 2. Cięcie skośne, 3. Cięcie skośne (podwójne)

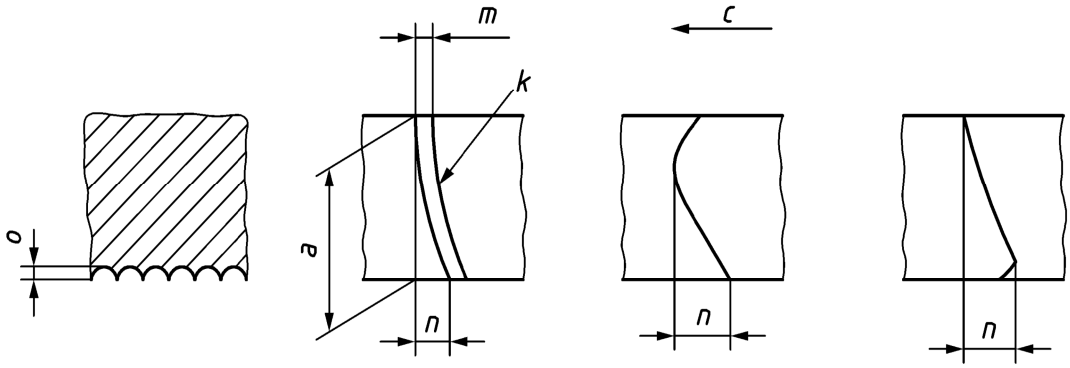


Rys. 6.3. Typy cięcia. Cięcie według konturu. 1. Cięcie prostopadłe, 2. Cięcie skośne

Prędkość cięcia - jest to prędkość pomiędzy narzędziem, np. palnikiem, a przedmiotem obrabianym.

Szerokość szczeliny cięcia - jest to powierzchnia cięcia przy górnej krawędzi cięcia lub bezpośrednio poniżej, w przypadku istniejącego nadtopienia górnej krawędzi, spowodowanego strumieniem tnącym.

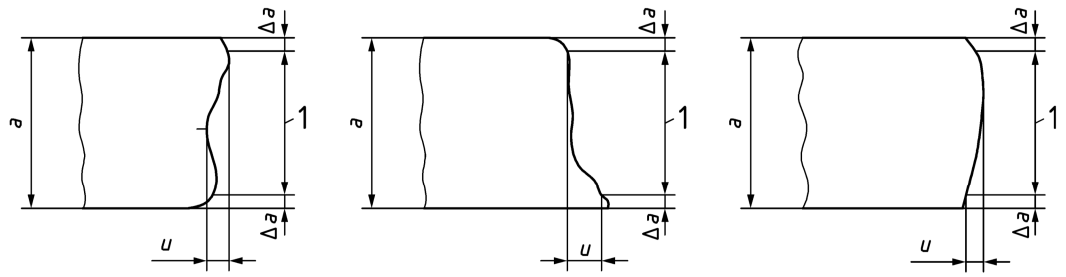
Odchyłka cięcia *n* - jest to rzutowana odległość między dwoma punktami linii odchyłki cięcia w kierunku cięcia.



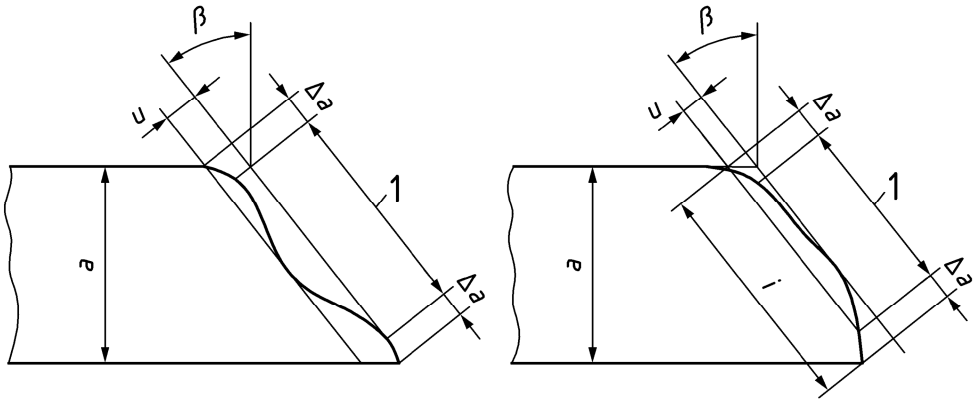
Rys. 6.4. Linia odchyłek cięcia. a) linia odniesienia, b) linia odchylenia, c) kierunek posuwu

6.1.5. Tolerancja prostopadłości

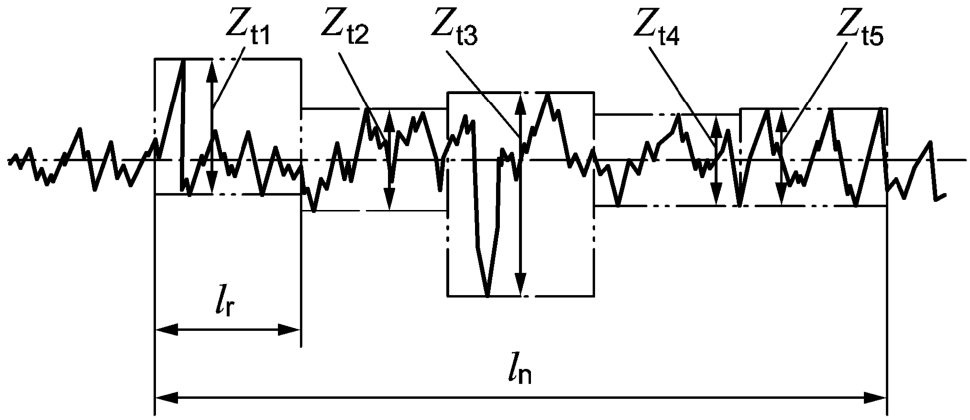
Tolerancja prostopadłości lub nachylenia ***u*** jest to odległość pomiędzy dwoma liniami prostymi równoległymi (stycznymi), między które wpisany jest profil powierzchni cięcia i które poprowadzono pod kątem (90° w przypadku cięcia pionowego). Tolerancja prostopadłości lub nachylenia obejmuje nie tylko prostopadłości, ale również odchylenia płaskości. Na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono maksymalne rzeczywiste odchylenia w zakresie klasy tolerancji. Rysunek 6.7 przedstawia oznaczenia wysokości profilu Rz5



Rys. 6.5. Cięcie pionowe



Rys. 6.6. Cięcie skośne



Rys. 6.7. Wysokość profilu Rz5. Od Zt_1 do Zt_5 – reprezentują pojedyncze elementy profilu, ln – jest długością ocenianą, lr – jest pojedynczą długością próbki (1/5 ln)

Z_t - jest to suma wysokości wierzchołków i głębokości wgłębień elementu profilu.

Rz5 - jest to średnia arytmetyczna pojedynczych elementów profilu pięciu sąsiadujących odcinków pomiarowych. Wskaźnik 5 został dodany, aby rozróżnić średnią arytmetyczną i maksymalną wysokość profilu pięciu pojedynczych elementów profili. Pomiary chropowatości powinny być wykonywane zgodnie z normą PN-EN ISO 4288:2011E [99].

6.1.6. Zakresy pomiarowe

Zgodnie z postanowieniami normy PN EN ISO 9013: 2017, jakość materiałów po cięciu termicznym jest opisana za pomocą następujących, charakterystycznych parametrów:

- tolerancja prostopadłości i nachylenia - ***u***,
- średnia wysokość profilu - **Rz5**.

Mogą też być stosowane inne określenia, jak:

- odchylenie linii cięcia- *n*,
- nadtopienie górnej krawędzi- *r*,
- możliwość przywierającego ciekłego metalu w postaci żużla (wypływki) u dolnej krawędzi cięcia.

W przypadku powierzchni ciętych pod kątem w X lub Y lub innych mających wiele powierzchni cięcia, każda z płaszczyzn powinna być oceniana oddzielnie.

W tabeli 6.3 przedstawiono zakresy tolerancji prostopadłości i nachylenia ***u***, natomiast zakresy dla średniej wysokości profilu **Rz5** przedstawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.3. Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, *u*

Zakres	Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, u mm
1	0,05 + 0,003a
2	0,15 + 0,007a
3	0,4 + 0,01a
4	0,8 + 0,02a
5	1,2 + 0,035a

Tabela 6.4. Średnia wysokość profilu, *Rz5*

Zakres	Średnia wysokość profilu, Rz5
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,8a mm)

6.1.7. Metoda oceny zgodności opinii ekspertów – metoda delficka

W procesie cięcia plazmowego jest wiele parametrów technologicznych, które mają wpływ na jakość ciętych krawędzi. Do celów badawczych, spośród parametrów technologicznych cięcia plazmowego, należy wybrać te, które będą miały najistotniejszy wpływ na jakość krawędzi po cięciu. Jedną z metod wyodrębnienia najistotniejszych parametrów jest metoda oceny zgodności opinii ekspertów. Istnieje wiele różnych metod opartych na wykorzystaniu wiedzy eksperckiej, np. główne panele eksperckie, burze mózgów czy metoda delficka. Podstawowym narzędziem tych metod są metody bazujące na wiedzy merytorycznej ekspertów, których kompetencje są wysoko oceniane [131].

6.1.8. Metoda delficka

Aby wyłonić najistotniejsze parametry cięcia plazmowego, postanowiono posłużyć się metodą delficką. Metoda delficka należy do grupy metod heurystycznych, w których do podejmowania decyzji wykorzystuje się wiedzę, doświadczenie oraz opinie ekspertów z danej dziedziny. Metoda delficka polega na przeprowadzaniu kilkakrotnego ankietowania wybranej grupy anonimowych ekspertów, którzy nie mogą się za sobą w tej sprawie komunikować i naradzać. Aby wyniki badania można uznać za wiarygodne, ankietowana grupa powinna być liczna, reprezentatywna, a eksperci powinni posiadać dużą wiedzę merytoryczną i doświadczenie w tematyce będącej przedmiotem badań. Zebranie dużej grupy ekspertów wystarczająco kompetentnych w danej dziedzinie bywa problematyczne. Zdarza się, że w niektórych panelach tematycznych uczestniczy kilku ekspertów, np. gdy przedmiotem badań są nowoczesne, zaawansowane technologie.

Do badań heurystycznych wybrano metodę delficką, ponieważ [153]:

- jej wynikiem jest niezależna opinia ekspertów,
- opiera się na anonimowości wypowiedzianych sądów,
- bazuje na wieloetapowości ankiet,
- brak w niej możliwości narzucania swojego zdania przez dominantów innym osobom grupy,
- brak w niej występowania niechęci do wyrażania własnego zdania,
- wyniki uzyskane są na podstawie opinii specjalistów.

6.1.9. Eksperci w doborze parametrów cięcia plazmowego

W celu określenia istotności poszczególnych parametrów, konieczne jest uzyskanie jednoznacznych sądów i odpowiedzi ekspertów. Ocena zgodności polega na nadaniu rangi poszczególnym parametrom za pomocą punktacji, gdzie największa ranga parametru otrzyma najmniejszą ilość punktów i na odwrót.

Za eksperta w dziedzinie procesu cięcia plazmowego, uważa się osobę/pracownika, który pracuje nieprzerwanie przez min. 5 lat na stanowisku operatora przecinarki plazmowej. Jest to osoba mająca praktyczną wiedzę opartą na doświadczeniu. Metoda delficka jest metodą oceny zdolności ekspertów opierającą się na heurystyce, czyli zespole udowodnionych praktyk opartych na doświadczeniu.

7. STANOWISKA BADAWCZE

7.1. Urządzenie do cięcia plazmowego

Proces cięcia plazmowego przeprowadzono w firmie AK ANATOL z siedzibą w Żarach zajmującą się produkcją wyrobów metalowych. Badanie jakości ciętych elementów, zgodnie z doświadczeniem operatora w stosunku do danych tabelarycznych, wykonano na przecinarce plazmowej WPA 6000 Compakt ze źródłem plazmy CUT 133WDM polskiego producenta (rys 7.1 i 7.2). Parametry przecinarki plazmowej przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Parametry przecinarki plazmowej [140]

Nazwa	Stół CNC
Typ	WPA-6000 COMPAKT
Nr fabryczny	WPA 104/2015
Zasilanie	230V - AC
Moc	2000 W
Medium	Powietrze
Ciśnienie	6 -7 bar
Waga	3500 Kg

Urządzenie do cięcia plazmowego było wyposażone w (rys 7.1 i 7.2):

a) stół roboczy o wymiarach 2,0 x 6,0 m z suportem wyposażonym w dwa palniki: plazmowy i gazowy,
b) źródło plazmy o mocy 130A,
c) osuszacz powietrza,
d) komputer z oprogramowaniem do sterowania urządzeniem,
e) sprężarkę śrubową o mocy 15 KW,
f) filtr cząstek stałych,
g) instalację doprowadzającą pyły powstałe w procesie cięcia do filtra,
h) cyfrowe mierniki poboru energii firmy SIMLIC typu LCD-3F/4M.

Rys. 7.1.Przecinarka plazmowa [140]

Rys. 7.2. Support z dwoma palnikami plazmowym i gazowym [140]

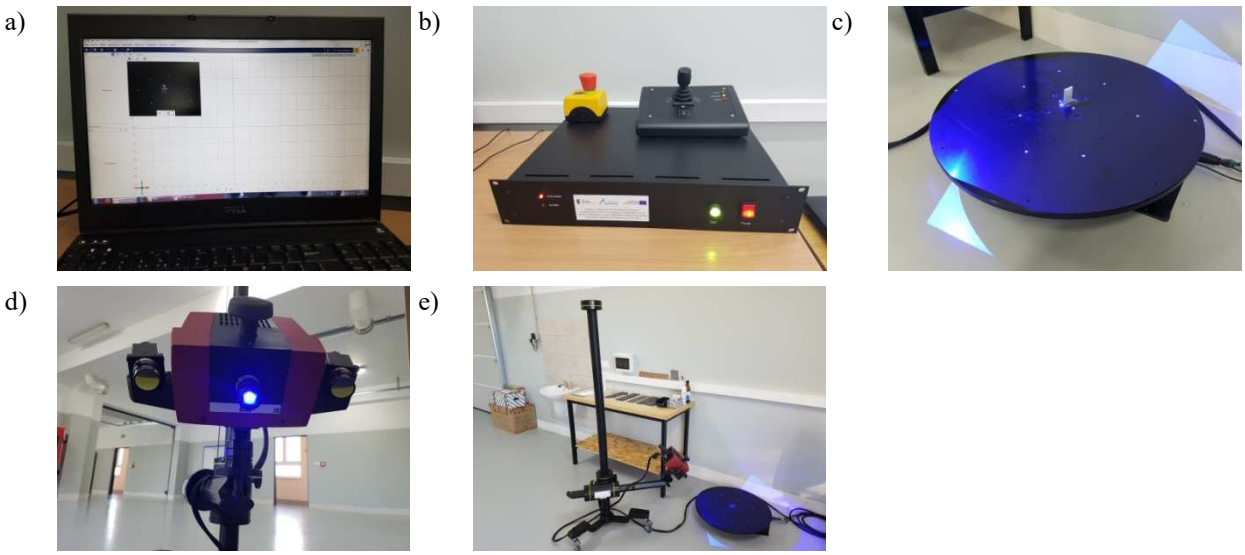
7.2. Stanowisko do skanowania 3D

Zgodnie z normą PN EN ISO 9013: 2017, w celu określenia jakości, wykonano badania prostopadłości ciętych krawędzi, tolerancji wymiarowej, szerokości szczeliny oraz wielkości wypływek ciekłego metalu w dolnej krawędzi próbek. Badania płyt próbnych wykonano w Regionalnym Centrum Badań i Rozwoju Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Wałczu na stanowisku pomiarowym w skład, którego wchodziło (rys. 7.3):

a) komputer z oprogramowaniem firmy ATOS Profesional seria V8 SR1 dedykowany do obsługi skanera,
b) modem sterujący stołem obrotowym skanera z automatycznym i manualnym sterowaniem, będący integralną częścią stołu obrotowego,
c) stół obrotowy o wymiarach fi 600mm z udźwigiem max 100kg,

d) skaner firmy GOM Optical Measuring Technoloques ATOS ZM z dwoma obiektywami i jednym sensorem,

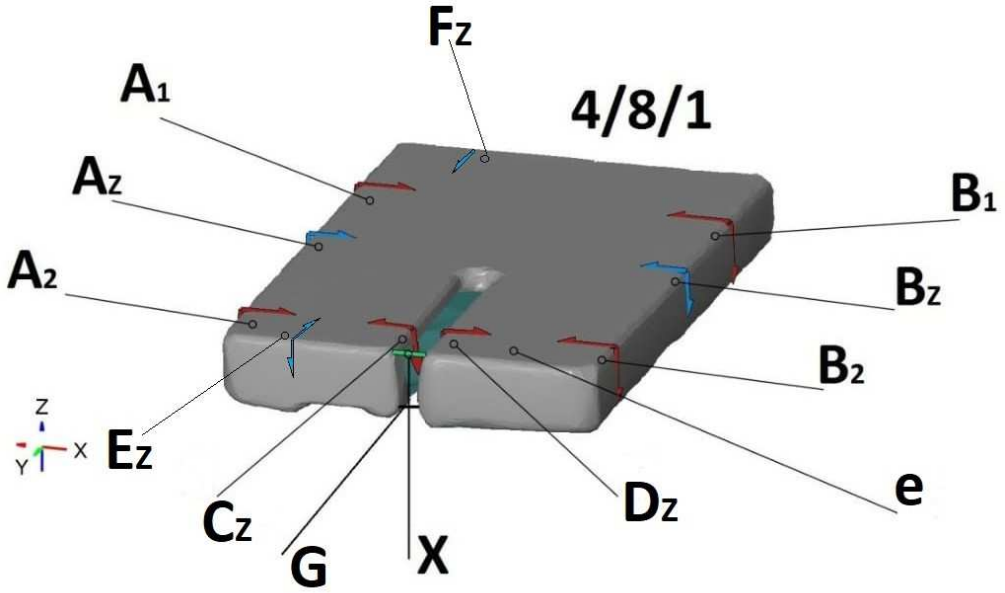
e) regulowane ramię skanera wraz z uchwytem.



Rys. 7.3. Stanowisko do skanowania 3D, a) komputer z oprogramowaniem, b) modem sterujący, c)stół obrotowy, d)skaner 3D, e) ruchomy uchwyt skanera [140]

Przeprowadzenie badań prostopadłości krawędzi oraz szerokości rowka i wysokości wypływek wykonano w celu określenia jakości cięcia plazmowego.

Na rysunku 7.4 przedstawiono płytę próbną w układzie przestrzennym z zaznaczonymi miejscami wykonywania pomiarów.



Rys. 7.4. Zwymiarowany detal pod kątem prostopadłości krawędzi, tolerancji wymiarowej, szerokości ciętego rowka oraz wielkości wypływek (140). A_1-A_2, B_1-B_2 – punkty poboru pomiaru prostopadłości, A_Z, B_Z, E_Z, F_Z – średnia wszystkich wymiarów kąta zewnętrznego, Cz i Dz – Pomiar kąta wewnętrznego szczeliny, e – największa wysokość przyklejonego żużla, X- górna szerokość szczeliny, G- dolna szerokość szczeliny [140]

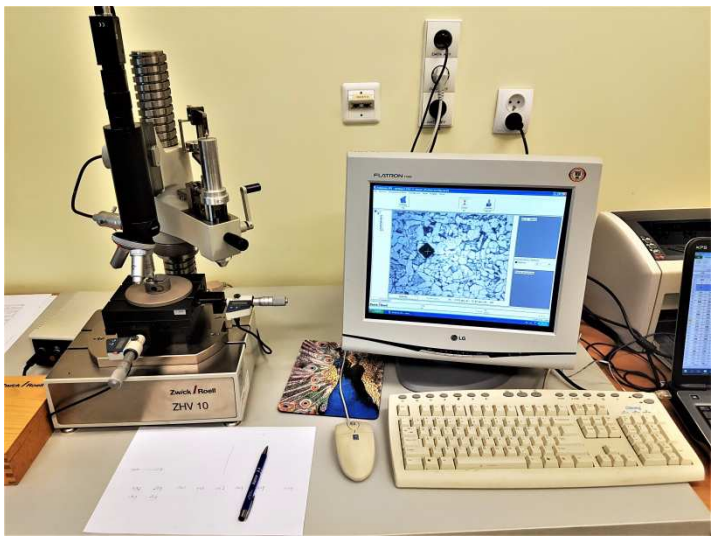
7.3. Stanowisko do pomiaru chropowatości

Badanie chropowatości przeprowadzono w Laboratorium Metrologicznym w Regionalnym Instytucie Technologicznym w Pilznie. Badania wykonano na stacjonarnym przyrządzie do pomiaru chropowatości oraz falistości powierzchni firmy HOMMEL ETAMIC T8000. Jest to urządzenie wyposażone w stolik CNC umożliwiający sterowanie przemieszczeniem mierzonego elementu w osi Y, co umożliwia uzyskanie topografii powierzchni (rys. 7.5).

Rys. 7.5. Profilometr HOMMEL ETAMIC T8000 [148]

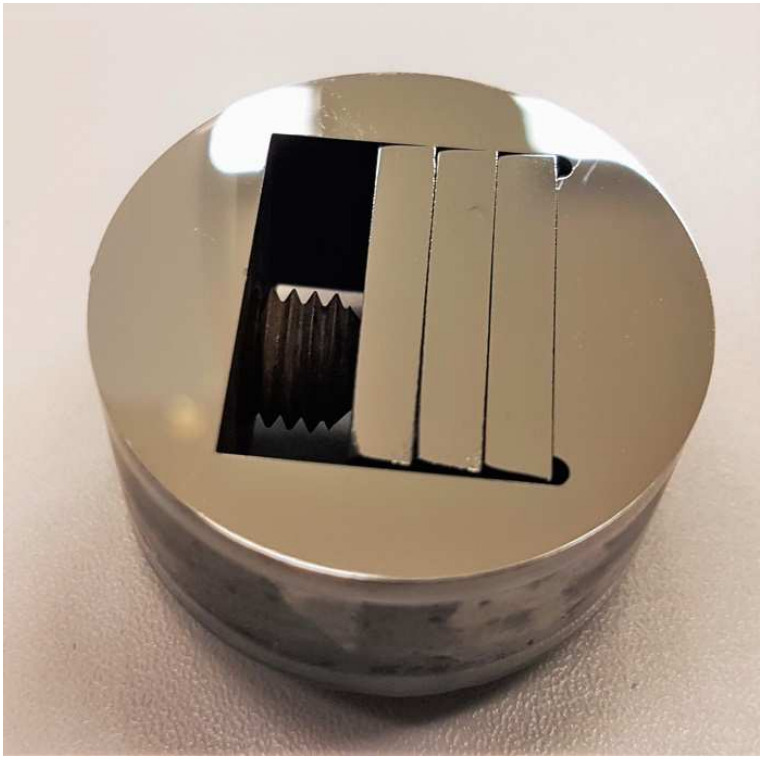
7.4. Stanowisko do pomiaru mikrotwardości metodą Vicersa

W celu ustalenia wpływu prędkości cięcia plazmowego na zmiany twardości w SWC krawędzi po cięciu plazmowym, przeprowadzono pomiary twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 0,1kg (HV0,1) [98]. Pomiar twardość wykonano na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Zielonogórskiego. Użyto do niego twardościomierza Zwick ZHV10. Urządzenie to pozwala na realizację pomiaru twardości metodami Brinella, Vickersa oraz Knoopa w zakresie obciążeń 0,05 do 30 kg (rys 7.6).



Rys. 7.6. Stanowisko do pomiaru mikrotwardości. Twardościomierz Zwick ZHV10

Pomiary twardości wykonano na zgładach metalograficznych pobranych z płyt próbnych prostopadle do krawędzi ciętej. W pracy wykonano dwa rodzaje mocowania zgładów, poprzez zamocowanie w formach metalowych (płyty o grubości 4 mm) oraz inkludowanie w żywicy epoksydowej (płyty o grubości 8 i 12 mm). Zgłady wykonano następująco: W pierwszym etapie wykonano szlifowanie ręczne, stosując ścierne papiery wodne o granulacji: 180, 400, 600, 800, 1000, 1200. Kolejnym etapem było ich polerowanie na automatycznej polerce firmy „STRUERS" przy użyciu odpowiednich tarcz i zawiesin o granulacji: 6 µm, 3 µm. Przygotowane w powyższy sposób powierzchnie próbek poddano trawieniu odczynnikiem 3% Nital (o składzie 97 gram - C_2H_5OH oraz 3 gramy HNO_3) przez 25 sek. Na rysunku 7.7 przedstawiono płyty próbne w formie metalowej, natomiast na rysunku 7.8 płyty próbne zainkludowane w żywicy epoksydowej.



Rys. 7.7. Przygotowany i wytrawiony zgład w formie metalowej[140]

Rys. 7.8 Przygotowany i wytrawiony zgład zainkludowany w żywicy epoksydowe [140]

8. BADANIA WŁASNE I ANALIZA WYNIKÓW

8.1. Wybór najistotniejszych parametrów procesu cięcia plazmowego

Ilość parametrów wpływających na jakość cięcia plazmowego jest bardzo duża. Zbadanie korelacji ich wszystkich jest niezmiernie trudne. W związku z tak dużą ilością zmiennych wchodzącą w proces cięcia plazmowego, postanowiono posłużyć się praktyczną wiedzą ekspertów na wyłonienie najistotniejszych parametrów, które mają wpływ na jakość ciętych krawędzi. W celu ich wyłonienia, posłużono się metodą delficką oceny zgodności opinii ekspertów za pomocą ankiety. Ankieta została przeprowadzona w 15-tu przedsiębiorstwach województwa lubuskiego, produkujących konstrukcje stalowe, wykorzystujące urządzenie do cięcia plazmowego. Do wypełnienia ankiety, w każdej firmie został przydzielony jeden pracownik ze stażem minimum 5 lat na stanowisku operatora przecinarki plazmowej. Osoba pracująca na tym stanowisku przez ten okres uważana jest za eksperta.

W tabeli 8.1 przedstawiono wyniki 15 ankiet, gdzie według ankietowanych spośród takich parametrów jak:

- ciśnienie gazu podczas przebijania,
- ciśnienie gazu podczas cięcia,
- wysokość palnika podczas cięcia,
- napięcie łuku,
- natężenie prądu,
- prędkość cięcia,
- wysokość startu cięcia,
- czas przebijania,
- odsunięcie palnika podczas przebijania

najistotniejszymi parametrami okazały się natężenie prądu oraz prędkość cięcia. Te wyniki posłużyły jako zmienne w dalszych badaniach.

Tabela 8.1 Wyniki najistotniejszych parametrów cięcia plazmowego

		Parametry mające wpływ na cięcie plazmowe								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Ciśnienie gazu podczas przebijania	Ciśnienie gazu podczas cięcia	Wysokość palnika podczas cięcia	Napięcie łuku	Natężenie prądu	Prędkość cięcia	Wysokość startu	Czas przebijania	Odsunięcie palnika podczas przebijania
	Ekspert	**[bar]**	**[bar]**	**[mm]**	**[V]**	**[A]**	**[mm/min]**	**[mm]**	**[s]**	**[mm]**
EKSPERCI	1	7	3	4	8	1	2	5	6	9
	2	8	2	9	4	1	3	5	6	7
	3	7	3	4	1	2	5	6	8	9
	4	6	4	5	2	1	3	7	9	8
	5	6	3	2	1	5	4	7	8	9
	6	7	5	3	9	2	1	4	6	8
	7	6	5	4	7	2	1	3	9	8
	8	3	7	1	6	2	4	5	8	9
	9	10	9	8	3	1	2	6	5	7
	10	7	4	3	9	1	2	6	5	8
	11	8	3	7	6	1	2	4	5	9
	12	6	2	4	5	1	3	8	9	7
	13	7	4	5	6	2	1	3	8	9
	14	6	5	7	2	3	1	4	8	9
	15	6	4	5	3	1	2	8	9	7
Σ		**100**	**63**	**71**	**72**	**26**	**36**	**81**	**109**	**123**
Wynik		**7**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**6**	**8**	**9**

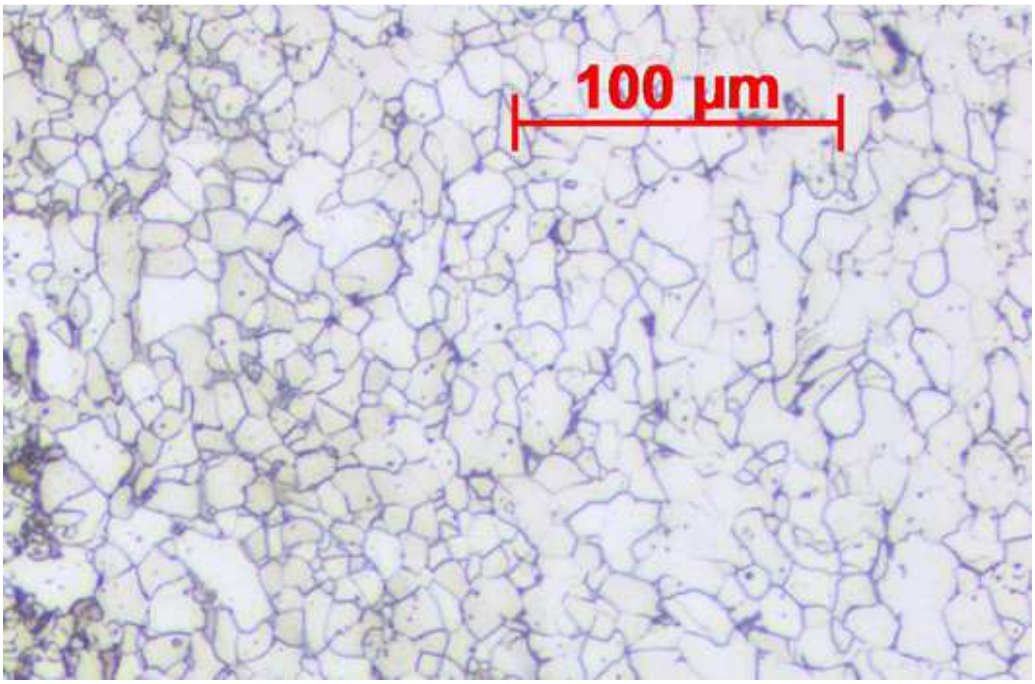
8.2. Przygotowanie płyt próbnych do badań eksperymentalnych

Głównym celem pracy było opracowanie gotowego do użycia systemu wspomagania decyzji (SWD) dotyczących doboru parametrów technologicznych cięcia plazmowego umożliwiającego redukcję kosztów procesu cięcia plazmowego dla zadanych wymagań jakościowych. Do badań eksperymentalnych zastosowano arkusze blachy o grubości 4, 8 i 12 mm ze stal konstrukcyjnej w gatunku S235 JR, wykonanych zgodnie z obowiązującą normą EN 10025-2-04. Skład chemiczny stali przedstawiono w tabeli 8.2.

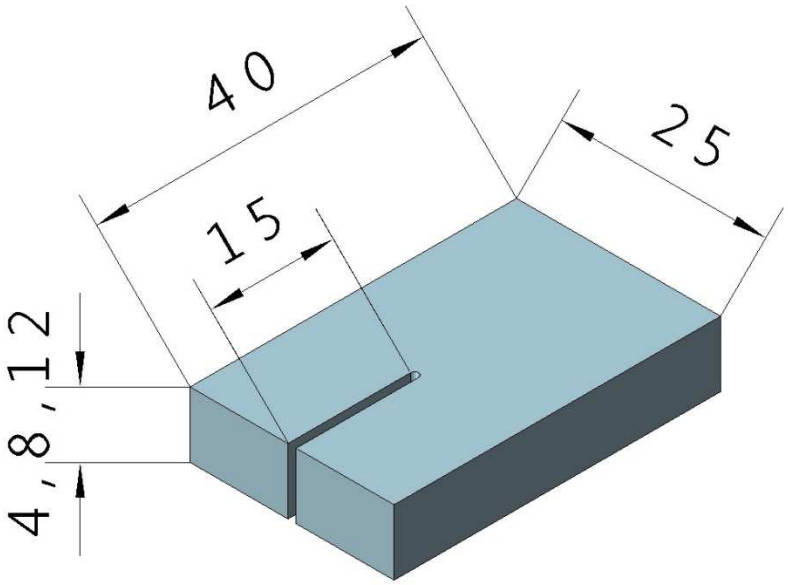
Na rysunku 8.1 przedstawiono mikrostrukturę badanej stali S235 JR a na rysunku 8.2 zwymiarowaną płytę próbną.

Tabela 8.2. Skład chemiczny stali S235JR [114]

Stal	**C %**	**Si, Ni %**	**Mn %**	**S,P %**	**Cr, Al %**	**Cu %**	**Mo, Ti, Nb, V %**	**N %**	**CEV %**
S235 JR N wg PN- EN 10025-2-04	0,12	0,02	0,53	0,014	0,03	0,04	0,002	0,006	0,22
Uwagi: CEV= C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15									



Rys. 8.1. Mikorstruktura ferrytyczno-perlityczna stali S235 JR [140]



Rys. 8.2. Zwymiarowana płyta próbna [140]

Na podstawie badania metody zgodności opinii ekspertów, najważniejszą rolę w procesie cięcia plazmowego pełni natężenie prądu oraz prędkość cięcia. W pracy została przeprowadzona analiza porównawcza płyt próbnych wykonanych przy parametrach cięcia zalecanych przez producenta urządzenia do cięcie plazmowego oraz przy parametrach rekomendowanych przez operatora urządzenia. Parametry rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego przedstawiono w tabelach 8.3 i 8.4, natomiast parametry, które proponuje operator/ekspert przedstawiono w tabeli 8.5. Zestawienie parametrów producenta oraz operatora przedstawiono w tabeli 8.6. W tabeli 8.7 przedstawiono parametry cięcia plazmowego, które zastosowano w pracy.

Tabela 8.3. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego dla natężenia prądu 80A [89]

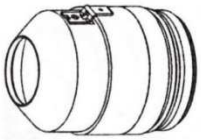
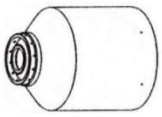
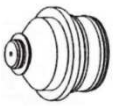
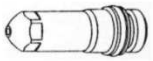
Prąd 80 A				**Plazma O_2 / Wtórne powietrze**				**STAL**		
Ciśnienie gazów przedmuch bar		Ciśnienie gazów-cięcie bar		Grubość ciętego materiału	Napięcie łuku	Wysokość palnika	Prędkość cięcia	Wysokość startu		Czas dziurkowania
Plazma	Wtórne	Plazma	Wtórne							
N2,powietrze	powietrze	O_2	powietrze	mm	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					
										

Tabela 8.4. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego dla natężenia prądu 130 A [89]

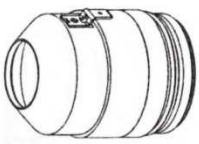
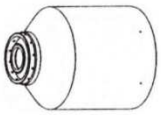
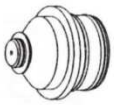
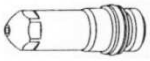
Prąd 130 A				**Plazma O_2 / Wtórne powietrze**				**STAL**		
Ciśnienie gazów przedmuch bar		Ciśnienie gazów-cięcie bar		Grubość ciętego materiału	Napięcie łuku	Wysokość palnika	Prędkość cięcia	Wysokość startu		Czas dziurkowania
Plazma	Wtórne	Plazma	Wtórne							
N2,powietrze	powietrze	O_2	powietrze	mm	V	mm	mm/min	mm	%	S
2,5	3,2	6,4	2,8	**3**	124	2,5	6525	5	200	0,1
				4	126	2,75	5525	5,5		0,2
				6	127	2,75	4025	5,5		0,3
			2,2	**10**	130	3,00	2675	5		0,0
				12	132	3,25	2200	6,5		0,5
	5,2			**15**	135	3,75	1650	7,5		0,7
				20	138	3,75	1045	7,5		1,0
				25	141	4	550	7,5	180	1,8
				32	160	4,5	380	N/A		
				38	167	4,5	250			
Kolejność zużywających się części										
Mufa zewnętrzna	Osłona	Mufa wewnętrzna	Dysza	Rozdzielacz	Elektroda					
220173	220183	220176	220182	220179	220181					
										

Tabela 8.5. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez operatora

Grubość materiału	**4**		**8**		**12**	
Natężenie prądu [A]	80	130	80	130	80	130
Prędkość cięcia [mm/min]	3600	5000	2300	3300	1250	2200

Tabela 8.6. Porównanie parametrów cięcia plazmowego producenta urządzenia i operatora.

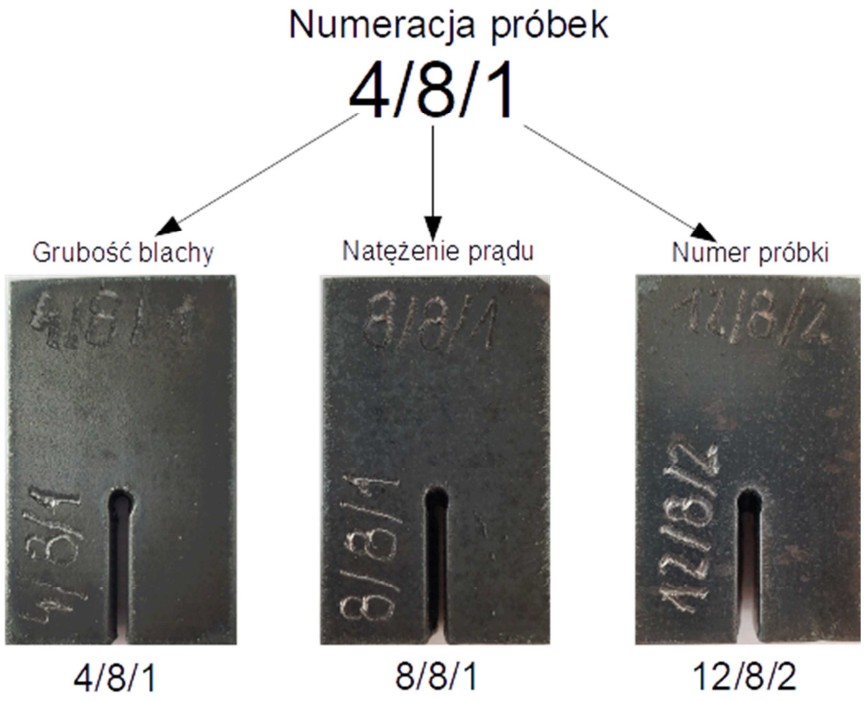
	Grubość materiału	**4**		**8**		**12**	
	Natężenie prądu [A]	80	130	80	130	80	130
Operator	Prędkość cięcia [mm/min]	3600	5000	2300	3300	1250	2200
Producent urządzenia		4300	5525	2825	3860	1350	2200

Tabela 8.7. Pozostałe parametry cięcia plazmowego zastosowane do wycinania płyt próbnych

Parametry cięcia								
Grubość materiału	Natężenie prądu	Ciśnienie gazu - przebijanie	Ciśnienie gazu - cięcie	Napięcie	Wysokość palnika podczas cięcia	Wysokość palnika podczas startu	Czas przebijania	Odsunięcie palnika podczas przebijania
[mm]	**[A]**	**[bar]**	**[bar]**	**[V]**	**[mm]**	**[mm]**	**[s]**	**[mm]**
4	80	2,4	5,8	142	3	4	0,1	0
4	130	2,5	6,4	142	3	5	0,1	1
8	80	2,4	5,8	146	3	5	0,4	3
8	130	2,5	6,4	146	3	6	0,3	3
12	80	2,4	5,8	146	3,5	7	0,5	4
12	130	2,5	6,4	152	3,5	7	0,4	4

W celu znalezienia zakresu najlepszych parametrów cięcia plazmowego (prędkość cięcia oraz natężenie prądu) dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm przy natężeniu prądu 80 i 130 A przeprowadzono technologiczne próby cięcia płyt próbnych przy prędkości cięcia podanych w tabeli 8.8. Zakres prędkości uwzględnia prędkość cięcia płyt próbnych zgodnie z wiedzą i doświadczeniem operatora oraz zgodnie z danymi tabelarycznymi dostarczanymi wraz z zakupem urządzenia. Pozostałe parametry cięcia płyt próbnych przedstawiono w tabeli 8.7. Zakres prędkości dla poszczególnych grubości płyt, ilość powtórzeń cięcia, użyte natężenie prądu podczas cięcia przedstawiono w tabeli 8.8. Dla każdej grubości przeprowadzono technologiczne próby cięcia dla trzech płyt próbnych. W sumie wykonano 126 płyt próbnych, które zostały poddane dalszej analizie jakościowej. Aby nie doszło do zamiany ciętych płyt próbnych, postanowiono wykonać ich oznaczenie. Dla każdej prędkości cięcia wykonano trzy płyty próbne.

Na rysunku 8.3 przedstawiono sposób oznaczenia ciętych płyt próbnych. Na każdej płycie oznaczono grubość materiału, wielkość zastosowanego natężenia prądu w trakcie procesu cięcia oraz numer płyty próbnej. Tak oznaczone płyty próbne zostały zaimplementowane do tabeli nr 8.8.



Rys 8.3. Przykład oznaczenie badanych płyt próbnych [140]

Tabela 8.8. Zestawienie prędkości cięcia oraz oznaczenie badanych płyt próbnych dla poszczególnych grubości materiału oraz natężenia prądu [140]

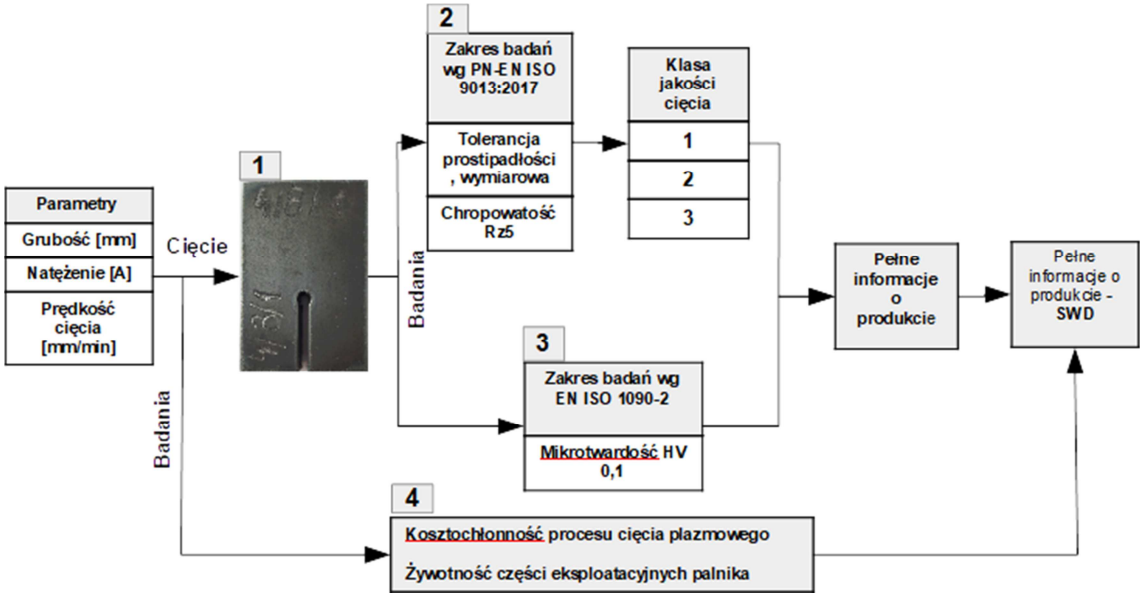
Grubość blachy		**4**				**8**				**12**				
Natężenie prądu		**80A**		**130A**		**80A**		**130A**		**80A**		**130A**		Wartość %
	Ilość prędkości cięcia	Prędkość cięcia	Nr. płyty	Prędkość cięcia	Nr. płyty	Prędkość cięcia	Nr. Płyty	Prędkość cięcia	Nr. płyty	Prędkość cięcia	Nr. płyty	Prędkość cięcia	Nr. płyty	
		[mm/min]		[mm/min]		[mm/min]		[mm/min]		[mm/min]		[mm/min]		
Prędkość cięcia oraz numer ciętych próbek	**2**	2520	(4/8/2-1)	3500)	(4/13/2-1	1610	(8/8/2-1)	2310	(8/13/2-1)	875	(12/8/2-1)	1540	(12/13/2-1)	
		2520	(4/8/2-2)	3500	(4/13/2-2)	1610	(8/8/2-2)	2310	(8/13/2-2)	875	(12/8/2-2)	1540	(12/13/2-2)	70,00%
		2520	(4/8/2-3)	3500	(4/13/2-3)	1610	(8/8/2-3)	2310)	(8/13/2-3	875	(12/8/2-3)	1540	(12/13/2-3)	
	3	2880	(4/8/3-1)	4000	(4/13/3-1)	1840	(8/8/3-1)	2640	(8/13/3-1)	1000	(12/8/3-1)	1760 (	12/13/3-1)	
		2880	(4/8/3-2)	4000	(4/13/3-2)	1840	(8/8/3-2)	2640	(8/13/3-2)	1000	(12/8/3-2)	1760	(12/13/3-2)	80,00%
		2880	(4/8/3-3)	4000	(4/13/3-3)	1840	(8/8/3-3)	2640	(8/13/3-3)	1000	(12/8/3-3)	1760	(12/13/3-3)	
	4	3240	(4/8/4-1)	4500	(4/13/4-1)	2070	(8/8/4-1)	2970	(8/13/4-1)	1125	(12/8/4-1)	1980	(12/13/4-1)	
		3240	(4/8/4-2)	4500	(4/13/4-2)	2070	(8/8/4-2)	2970	(8/13/4-2)	1125	(12/8/4-2)	1980	(12/13/4-2)	90,00%
		3240	(4/8/4-3)	4500	(4/13/4-3)	2070	(8/8/4-3)	2970	(8/13/4-3)	1125	(12/8/4-3)	1980	(12/13/4-3	
	1	**3600**	**(4/8/1-1)**	**5000**	**(4/13/1-1)**	**2300**	**(8/8/1-1)**	**3300**	**8/13/1-1)**	**1250**	**(12/8/1-1)**	**2200**	**(12/13/1-1)**	
		3600	**(4/8/1-2)**	**5000**	**(4/13/1-2)**	**2300**	**(8/8/1-2)**	**3300**	**8/13/1-2)**	**1250**	**(12/8/1-2)**	**2200**	**(12/13/1-2)**	**100,00%**
		3600	**(4/8/1-3)**	**5000**	**(4/13/1-3)**	**2300**	**(8/8/1-3)**	**3300**	**8/13/1-3)**	**1250**	**(12/8/1-3)**	**2200**	**(12/13/1-3)**	
	5	3960	(4/8/5-1)	**5500**	**(4/13/5-1)**	2530	(8/8/5-1)	3630	(8/13/5-1)	**1375**	**(12/8/5-1)**	2420	(12/13/5-1)	
		3960	(4/8/5-2)	**5500**	**(4/13/5-2)**	2530	(8/8/5-2)	3630	(8/13/5-2)	**1375**	**(12/8/5-2)**	2420	(12/13/5-2)	110,00%
		3960	(4/8/5-3)	**5500**	**(4/13/5-3)**	2530	(8/8/5-3)	3630	(8/13/5-3)	**1375**	**(12/8/5-3)**	2420	(12/13/5-3)	
	6	**4320**	**(4/8/6-1)**	6000	(4/13/6-1)	**2760**	**(8/8/6-1)**	**3960**	**(8/13/6-1)**	1500	(12/8/6-1)	2640	(12/13/6-1)	
		4320	**(4/8/6-2)**	6000	(4/13/6-2)	**2760**	**(8/8/6-2)**	**3960**	**(8/13/6-2)**	1500	(12/8/6-2)	2640	(12/13/6-2)	120,00%
		4320	**(4/8/6-3)**	6000	(4/13/6-3)	**2760**	**(8/8/6-3)**	**3960**	**(8/13/6-3)**	1500	(12/8/6-3)	2640	(12/13/6-3)	
	7	4680	(4/8/7-1)	6500	(4/13/7-1)	2990	(8/8/7-1)	4290	(8/13/7-1)	1625	(12/8/7-1)	2860	(12/13/7-1)	
		4680	(4/8/7-2)	6500	(4/13/7-2)	2990	(8/8/7-2)	4290	(8/13/7-2)	1625	(12/8/7-2)	2860	(12/13/7-2)	130,00%
		4680	(4/8/7-3)	6500	(4/13/7-3)	2990	(8/8/7-3)	4290	(8/13/7-3)	1625	(12/8/7-3)	2860	(12/13/7-3)	

W tabeli 8.8 kolorem niebieskim oznaczono parametry cięcia rekomendowane przez operatora, natomiast ciemnym szarym, parametry rekomendowane przez producenta przecinarki plazmowej.

Badania zostały wykonane zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rysunku 8.4. W pierwszym etapie zostało przeprowadzone cięcie blach o grubości 4, 8 i 12 mm według parametrów określonych w tabelach 8.7 i 8.8. W drugim etapie przeprowadzono badania geometrii płyt próbnych (skanowanie 3D) zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017:

- tolerancji prostopadłości,
- tolerancji wymiarowej,
- wielkości powstałych wypływek,
- szerokości szczeliny cięcia,
- chropowatości (Rz5) powierzchni.

W kolejnym, trzecim etapie wykonano pomiary mikrotwardości metodą Vickersa HV0,1 w celu określenia głębokości strefy wpływu ciepła (SWC). W ostatnim etapie pracy wykonano obliczenia kosztochłonności procesu cięcia plazmowego z uwzględnieniem żywotności części zamiennych palnika, w tym elektrody i dyszy.

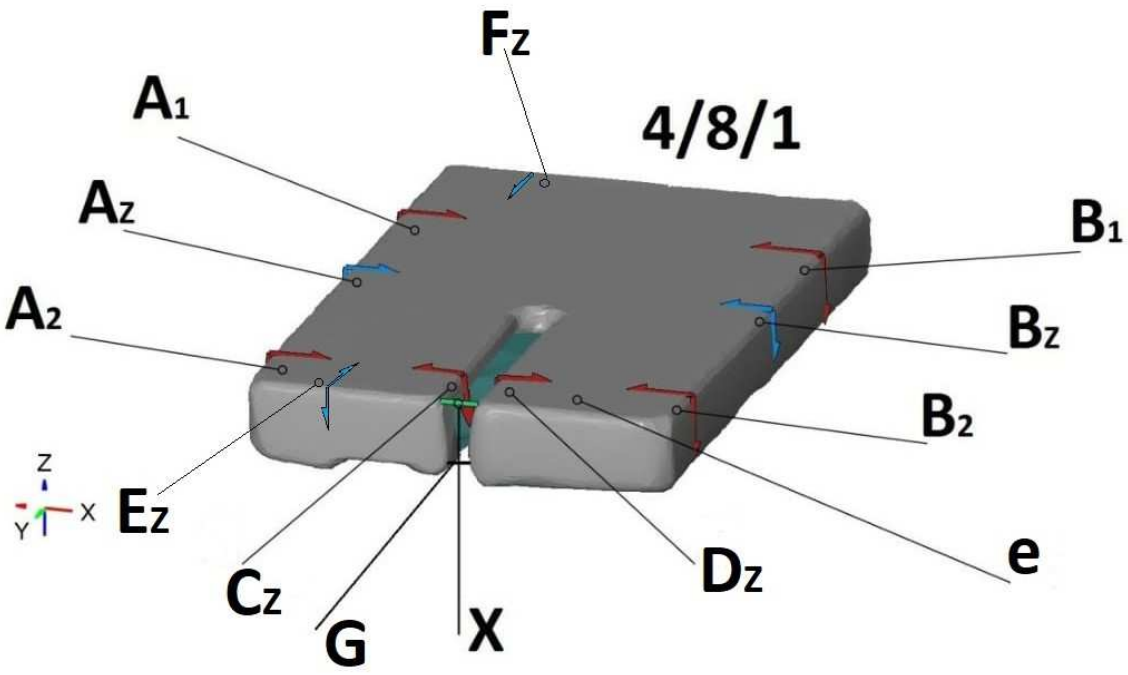


Rys. 8.4. Schemat blokowy cyklu badań [140]

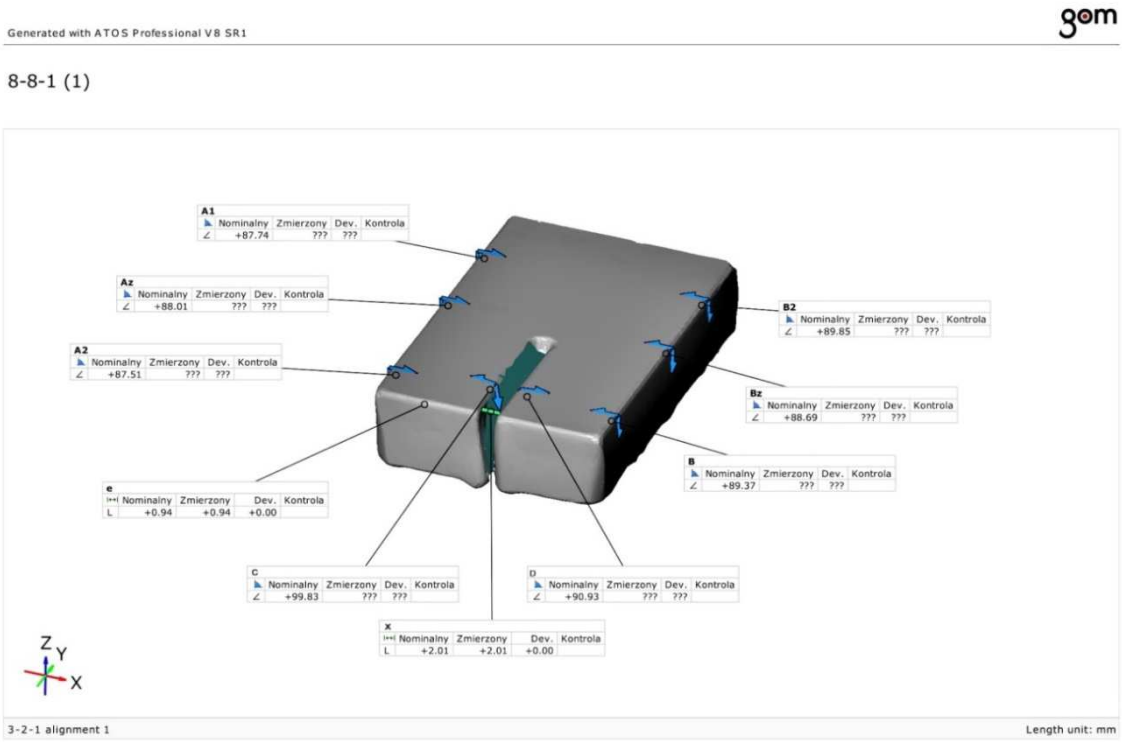
8.3. Badania geometrii ciętych płyt próbnych

Pomiary geometrii ciętych płyt próbnych, w tym tolerancji prostopadłości, wymiarowej, wielkości wypływek oraz szerokości szczeliny przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 9013: 2017. Badania zostały wykonane na stanowisku badawczym opisanym w punkcie 7.2.

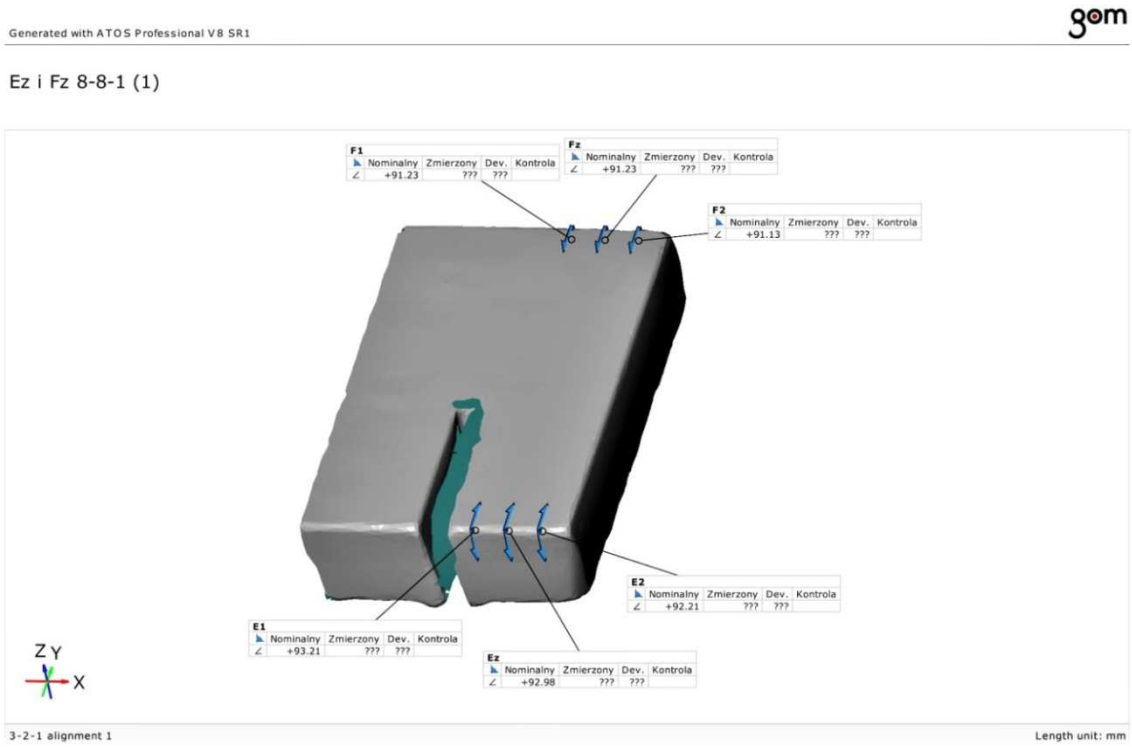
Na rysunkach 8,5, 8,6 i 8,7 przedstawiono przykładowy skan 3D zeskanowanej płyty próbnej wraz z wynikami pomiarów.



Rys.8.5. Zwymiarowany detal pod kątem prostopadłości krawędzi, tolerancji wymiarowej, szerokości ciętego rowka oraz wielkości wypływek (140). A_1-A_2, B_1-B_2 – punkty poboru pomiaru prostopadłości, A_Z, B_Z, E_Z, F_Z – średnia wszystkich wymiarów kąta zewnętrznego, Cz i Dz – pomiar kąta wewnętrznego szczeliny, e – największa wysokość przyklejonego żużla, X- górna szerokość szczeliny, G- dolna szerokość szczeliny



Rys. 8.6. Przykład skanowanych próbek. Krawędzie zewnętrzne A, B, krawędzie wewnętrzne C i D, szerokość górnej części rowka X, e –największa wypływka.



Rys. 8.7. Przykład skanowanych próbek. Krawędzie zewnętrzne E i F

8.3.1. Zestawienie wyników pomiarów

W tabelach od 8.9 do 8.14 zestawiono wyniki pomiarów geometrii ciętych próbek. W tabelach od 8.11 do 8.14 są wiersze, które zaznaczono kolorem szarym. Oznacza to, że zadane prędkości uniemożliwiły wykonanie procesu cięcia płyt próbnych. Prędkości te były zbyt duże lub zbyt małe. Również najwyższe i najniższe zmierzone wartości, aby były czytelne, zostały pogrubione.

Tabela 8.9. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	4/8/1	94,35	93,54	91,51	92,63	96,04	96,70	93,76	94,41	93,53	93,99	94,86	94,47	0,97	1,00	2,26	2,22	1,57	1,45	0,78	93,66	95,56	94,29
	4/8/1	92,72		93,39		98,06		96,47		94,64		93,73		1,30		2,20		1,18					
	4/8/1	93,56		92,98		96,00		93,01		93,79		94,81		0,72		2,21		1,58					
2	4/8/2	92,35	91,91	90,67	91,13	99,12	97,42	94,02	92,98	91,80	91,20	92,32	92,42	0,95	0,93	2,13	2,14	1,21	1,41	0,73	**91,67**	**95,20**	**92,84**
	4/8/2	91,44		91,36		96,43		94,27		90,74		92,58		1,04		2,08		1,33					
	4/8/2	91,95		91,36		96,72		90,64		91,06		92,35		0,79		2,21		1,69					
3	4/8/3	92,20	92,54	91,14	91,78	96,75	97,41	92,38	94,97	93,42	93,65	93,13	93,03	1,20	**1,12**	2,07	2,04	1,43	1,17	0,87	92,75	96,19	93,90
	4/8/3	92,60		91,86		96,32		94,74		93,49		92,65		1,05		2,05		1,28					
	4/8/3	92,81		92,33		99,16		97,78		94,05		93,32		1,11		2,00		0,81					
4	4/8/4	93,32	93,08	93,21	92,94	93,34	96,01	91,38	92,76	92,13	92,33	91,29	92,04	0,71	0,81	2,01	2,04	1,68	1,43	**0,61**	92,60	94,38	93,19
	4/8/4	92,95		92,89		97,21		93,16		92,09		93,26		1,02		2,04		1,31					
	4/8/4	92,98		92,73		97,47		93,74		92,76		91,58		0,71		2,08		1,30					
5	4/8/5	92,96	92,81	94,74	94,57	99,90	99,98	92,17	94,08	91,92	93,11	93,92	92,74	1,08	0,92	2,05	2,05	1,21	1,06	0,98	93,31	97,03	94,55
	4/8/5	92,26		94,78		101,10		98,85		93,86		90,23		0,88		2,01		0,61					
	4/8/5	93,20		94,19		98,94		91,21		93,56		94,06		0,81		2,08		1,37					
6	4/8/6	94,10	93,51	94,65	94,08	100,34	101,58	95,29	96,79	94,96	94,81	92,28	93,29	0,72	0,82	2,07	2,07	0,98	0,79	**1,29**	**93,92**	**99,19**	**95,68**
	4/8/6	93,17		93,48		100,11		96,95		94,05		94,03		0,90		1,99		0,80					
	4/8/6	93,26		94,11		104,30		98,13		95,43		93,56		0,84		2,16		0,59					
7	4/8/7	93,84	94,11	95,07	95,47	95,41	98,84	92,18	93,63	95,46	95,75	95,90	95,13	0,75	**0,59**	1,97	2,01	1,44	1,14	0,87	95,12	96,24	95,49
	4/8/7	94,24		95,62		102,03		96,64		96,15		94,46		0,68		2,05		0,74					
	4/8/7	94,24		95,73		99,08		92,08		95,65		95,02		0,34		2,01		1,23					

Tabela 8.10. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	4/13/1	93,87	94,01	94,32	94,30	98,22	98,36	93,57	93,59	92,93	92,99	94,20	94,31	0,72	**0,73**	1,98	2,05	1,15	1,22	0,84	93,90	95,98	94,59
	4/13/1	94,23		94,08		98,32		94,78		93,29		94,72		0,70		2,12		1,20					
	4/13/1	93,93		94,50		98,54		92,43		92,74		94,00		0,76		2,06		1,29					
2	4/13/2	91,97	91,37	90,93	91,37	97,82	95,19	90,73	90,52	90,81	91,09	90,39	91,53	1,13	**1,18**	2,21	2,21	1,61	1,81	**0,40**	**91,34**	**92,86**	**91,85**
	4/13/2	90,42		91,57		94,46		88,65		93,17		92,28		1,08		2,19		1,97					
	4/13/2	91,73		91,62		93,29		92,19		89,29		91,93		1,34		2,23		1,85					
3	4/13/3	92,38	91,13	93,17	92,82	97,56	97,96	93,27	92,84	92,17	91,60	91,26	91,47	0,70	**1,18**	2,22	2,27	1,46	1,51	0,76	91,76	95,40	92,97
	4/13/3	90,93		92,62		98,25		90,91		92,76		92,05		1,46		2,13		1,49					
	4/13/3	90,09		92,68		98,07		94,35		89,87		91,10		1,39		2,46		1,59					
4	4/13/4	92,46	92,54	93,47	93,63	98,75	98,03	91,72	92,62	91,85	92,13	93,53	92,45	1,05	0,82	2,02	2,04	1,29	1,29	0,75	92,69	95,33	93,57
	4/13/4	92,88		93,66		97,54		92,34		92,53		92,39		0,75		2,01		1,32					
	4/13/4	92,27		93,75		97,81		93,80		92,02		91,42		0,65		2,09		1,28					
5	4/13/5	93,53	94,01	95,58	95,80	98,92	99,03	92,76	94,00	92,31	92,45	94,06	94,17	0,87	0,79	1,97	2,08	1,15	1,17	0,91	94,11	96,51	94,91
	4/13/5	93,90		95,75		98,90		92,27		91,89		94,64		0,83		2,07		1,29					
	4/13/5	94,61		96,08		99,26		96,96		93,16		93,81		0,67		2,20		1,06					
6	4/13/6	93,99	93,49	96,32	96,36	98,81	99,32	95,83	94,50	94,83	93,74	94,60	94,52	0,78	0,86	2,08	2,09	1,06	1,13	0,97	94,53	96,91	95,32
	4/13/6	92,99		96,31		99,64		96,29		92,06		94,33		0,85		2,09		0,97					
	4/13/6	93,50		96,44		99,52		91,37		94,34		94,63		0,94		2,11		1,35					
7	4/13/7	94,37	94,43	96,44	96,75	101,24	101,44	95,85	96,01	93,15	94,37	95,91	95,67	0,90	0,89	2,20	2,12	1,00	0,89	**1,22**	**95,30**	**98,73**	**96,44**
	4/13/7	94,09		96,75		99,78		95,43		95,47		94,44		0,77		2,04		0,98					
	4/13/7	94,82		97,05		103,31		96,75		94,49		96,66		1,00		2,11		0,71					

Tabela 8.11. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	8/8/1	88,01	87,87	88,69	88,65	99,83	99,71	90,93	90,64	92,98	92,77	91,23	91,45	0,94	**0,93**	2,01	1,97	0,50	0,52	1,45	90,18	95,17	91,85
	8,8/1	88,24		88,67		98,79		90,83		92,77		91,86		0,75		1,93		0,58					
	8/8/1	87,37		88,59		100,50		90,16		92,55		91,25		1,11		1,97		0,48					
2	8/8/2	87,96	87,63	90,73	90,97	97,59	97,60	89,72	90,25	90,29	90,33	90,17	90,64	2,06	**2,39**	2,04	2,04	1,02	0,94	1,10	89,89	93,92	91,24
	8/8/2	86,31		90,31		98,10		89,85		90,26		91,03		2,54		2,03		0,92					
	8/8/2	88,61		91,86		97,10		91,17		90,44		90,73		2,57		2,05		0,89					
3	8/8/3	87,13	87,30	89,98	89,99	98,00	97,42	92,40	89,95	91,54	91,16	91,15	91,22	1,80	1,67	2,31	2,08	0,85	1,05	**1,03**	89,92	93,69	91,17
	8/8/3	87,28		90,26		97,92		89,62		90,96		92,06		1,68		2,03		0,97					
	8/8/3	87,49		89,73		96,34		87,83		90,97		90,44		1,53		1,90		1,32					
4	8/8/4	86,59	86,72	88,38	88,74	99,12	99,01	88,02	88,62	91,83	91,81	92,06	91,51	1,19	1,69	2,07	1,98	1,07	0,92	1,07	**89,70**	**93,82**	**91,07**
	8/8/4	86,55		88,08		99,55		89,26		91,53		90,69		2,44		1,96		0,73					
	8/8/4	87,03		89,75		98,36		88,58		92,08		91,79		1,44		1,92		0,95					
5	8/8/5	86,75	86,61	88,62	89,09	98,98	100,31	88,61	88,09	92,27	92,24	94,19	93,85	1,56	1,28	2,21	2,03	1,15	0,85	1,18	90,45	94,20	91,70
	8/8/5	86,49		89,76		100,54		89,23		92,94		93,55		1,09		1,99		0,62					
	8/8/5	86,58		88,88		101,42		86,42		91,50		93,81		1,20		1,88		0,78					
6	8/8/6	87,81	87,24	89,62	89,25	100,53	101,14	91,03	89,91	93,09	92,99	94,28	94,30	1,45	1,13	1,97	1,97	0,35	0,43	**1,55**	**90,95**	**95,53**	**92,47**
	8/8/6	87,46		88,74		101,91		92,01		93,16		94,60		0,98		2,08		0,13					
	8/8/6	86,44		89,40		100,99		86,70		92,72		94,03		0,97		1,87		0,79					
7	8/8/7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8/8/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					
	8/8/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					

Tabela 8.12. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	8/13/1	89,97	90,01	93,61	93,98	99,15	98,74	92,02	90,83	89,98	89,60	91,31	91,54	1,23	1,42	2,38	2,21	0,82	0,87	1,34	91,28	94,79	92,45
	8/13/1	90,37		93,75		97,85		90,51		89,70		91,89		1,90		2,20		1,03					
	8/13/1	89,70		94,57		99,22		89,97		89,12		91,42		1,13		2,04		0,75					
2	8/13/2	87,82	87,79	91,99	91,81	96,70	97,10	89,08	88,68	88,33	88,37	89,16	89,06	1,96	**1,96**	2,39	2,33	1,58	1,52	**0,81**	**89,26**	**92,89**	**90,47**
	8/13/2	87,71		91,60		96,83		88,40		88,81		88,75		1,65		2,39		1,66					
	8/13/2	87,85		91,83		97,77		88,55		87,98		89,27		2,26		2,21		1,33					
3	8/13/3	89,10	89,00	92,92	92,43	96,79	97,39	89,53	89,14	88,99	88,55	90,50	90,40	1,86	1,87	2,26	2,19	1,38	1,28	0,91	90,10	93,26	91,15
	8/13/3	89,69		92,55		98,18		89,20		88,42		91,11		1,47		2,06		1,03					
	8/13/3	88,21		91,82		97,19		88,68		88,25		89,59		2,27		2,26		1,44					
4	8/13/4	88,66	88,99	91,85	92,11	96,81	97,05	90,14	94,63	88,57	88,69	90,27	91,75	1,74	1,67	2,20	2,22	1,23	0,59	1,63	90,38	95,84	92,20
	8/13/4	88,37		92,18		97,41		90,85		88,62		92,65		1,47		2,37		1,21					
	8/13/4	89,93		92,31		96,92		102,89		88,87		92,32		1,81		2,09		-0,68					
5	8/13/5	90,09	90,72	93,82	93,75	100,90	100,34	89,73	91,42	90,23	89,96	92,40	92,90	0,76	**0,85**	2,34	2,24	0,85	0,60	**1,65**	91,83	95,88	93,18
	8/13/5	91,00		93,28		98,90		92,00		90,18		92,56		0,90		2,30		0,77					
	8/13/5	91,08		94,15		101,23		92,54		89,46		93,73		0,88		2,09		0,16					
6	8/13/6	90,81	90,97	95,03	95,37	97,49	98,53	93,32	91,25	90,13	89,73	93,92	93,22	1,25	1,03	2,10	2,11	0,59	0,74	1,37	**92,32**	**94,89**	**93,18**
	8/13/6	90,43		94,85		99,19		90,35		89,90		92,26		0,96		2,26		0,92					
	8/13/6	91,68		96,23		98,92		90,07		89,17		93,47		0,89		1,98		0,72					
7	8/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8/13/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		2,28		0,00					
	8/13/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					

Tabela 8.13. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

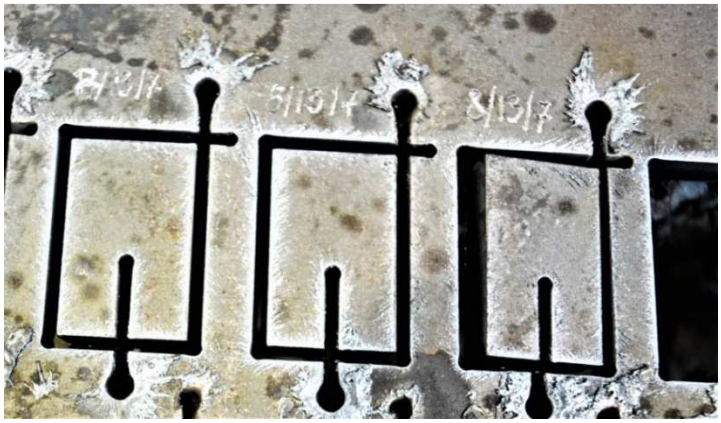
		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	12/8/1	86,93	86,80	90,04	89,81	96,90	97,10	89,04	90,20	89,08	89,07	90,10	90,83	1,52	**1,99**	1,96	1,95	0,71	0,42	**1,53**	89,13	93,65	90,64
	12/8/1	86,54		89,79		97,11		89,47		88,54		91,48		1,80		1,93		0,55					
	12/8/1	86,94		89,59		97,29		92,10		89,60		90,92		2,66		1,96		-0,01					
2	12/8/2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12/8/2	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					
	12/8/2	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					
3	12/8/3	86,18	86,89	90,76	90,63	96,50	96,14	89,82	89,79	89,87	89,41	89,50	89,37	2,17	2,26	2,40	2,17	1,07	0,93	**1,24**	**89,07**	**92,96**	**90,37**
	12/8/3	87,24		90,38		96,19		89,57		88,85		89,90		2,17		2,03		0,82					
	12/8/3	87,24		90,75		95,72		89,98		89,50		88,70		2,44		2,08		0,88					
4	12/8/4	86,99	87,08	90,11	90,47	95,84	96,40	90,64	89,68	89,44	88,84	90,70	90,28	2,95	2,29	2,23	2,12	0,87	0,85	1,28	89,17	93,04	90,46
	12/8/4	87,73		90,76		96,48		89,00		88,99		89,74		2,12		2,03		0,88					
	12/8/4	86,53		90,54		96,89		89,39		88,10		90,40		1,81		2,11		0,79					
5	12/8/5	85,52	86,21	89,85	89,50	97,47	97,63	88,63	88,89	90,12	90,00	91,48	91,21	2,17	2,02	2,01	1,99	0,73	0,62	1,37	89,23	93,26	90,57
	12/8/5	86,76		88,88		97,85		88,64		89,88		91,05		2,29		2,07		0,71					
	12/8/5	86,36		89,77		97,57		89,41		89,99		91,11		1,61		1,88		0,41					
6	12/8/6	87,13	87,01	90,19	89,85	97,34	97,73	89,62	89,48	88,83	88,90	91,54	92,04	1,77	2,10	2,12	2,10	0,66	0,58	1,51	**89,45**	**93,60**	**90,83**
	12/8/6	86,80		89,62		97,63		89,84		88,20		92,08		2,43		2,24		0,67					
	12/8/6	87,10		89,73		98,22		88,97		89,66		92,51		2,11		1,93		0,42					
7	12/8/7	87,33	87,42	90,62	90,43	96,95	97,03	90,18	89,81	89,41	89,41	92,05	92,05	2,12	**2,48**	1,97	1,94	0,47	0,51	1,44	89,83	93,42	91,02
	12/8/7	87,53		90,82		96,64		89,50		89,07		92,15		3,04		2,05		0,76					
	12/8/7	87,39		89,86		97,50		89,74		89,75		91,95		2,27		1,81		0,29					

Tabela 8.14. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenie poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Średnia kąta **Az**	Średnia z pomiarów **Az**	Średnia kąta **Bz**	Średnia z pomiarów **Bz**	Średnia kąta **Cz**	Średnia z pomiarów **Cz**	Średnia kąta **Dz**	Średnia z pomiarów **Dz**	Średnia kąta **Ez**	Średnia z pomiarów **Ez**	Średnia kąta **Fz**	Średnia z pomiarów **Fz**	Najwyższy pkt wypływki **e**	Średnia z pomiarów wypływki **e**	Szerokość od strony lica **X**	Średnia szerokość lica **X**	Szerokość od strony grani **G**	Średnia szerokość rowka grani **G**	Różnica lico - grań **X-G**	Średnia kątów zewnętrznych **A,B,E,F**	Średnia kątów wewnętrznych **C i D**	Średnia wszystkich skosów **A,B,C,D,E,F**
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lp	**Numer płyty**	**XA**	**XA**	**XB**	**XB**	**XC**	**XC**	**XD**	**XD**	**XE**	**XE**	**XF**	**XF**	**e**		**x1**		**x2**					
1	12/13/1	87,70	88,49	93,31	93,21	97,63	96,41	91,17	92,23	89,76	89,58	92,00	92,24	1,22	**1,45**	2,35	2,36	0,50	0,55	1,81	90,88	94,32	92,03
	12/13/1	89,19		93,00		97,32		91,84		89,75		92,91		1,95		2,37		0,45					
	12/13/1	88,57		93,33		94,29		93,67		89,23		91,80		1,18		2,36		0,69					
2	12/13/2	87,28	86,94	92,62	92,62	96,08	96,03	90,45	91,10	88,23	91,44	91,11	90,53	1,62	1,44	2,60	2,53	1,23	1,04	**1,50**	90,38	93,57	91,44
	12/13/2	86,76		92,74		96,62		90,79		88,11		90,31		1,52		2,56		1,00					
	12/13/2	86,79		92,49		95,39		92,06		97,97		90,17		1,17		2,44		0,88					
3	12/13/3	86,21	87,12	92,07	92,17	94,16	94,88	95,50	93,16	89,15	88,76	91,15	91,49	1,40	1,42	2,82	2,59	0,79	0,90	1,69	**89,89**	**94,02**	**91,26**
	12/13/3	86,64		92,48		94,22		93,53		88,09		91,58		1,86		2,52		0,89					
	12/13/3	88,51		91,96		96,27		90,44		89,03		91,75		1,00		2,42		1,01					
4	12/13/4	88,86	88,88	91,85	91,88	98,60	97,99	90,43	91,99	89,48	89,65	91,80	92,08	1,00	1,24	2,32	2,41	0,42	0,31	2,10	90,62	94,99	92,08
	12/13/4	88,60		91,97		99,14		92,27		89,72		91,80		1,70		2,47		0,07					
	12/13/4	89,19		91,82		96,23		93,27		89,74		92,63		1,03		2,43		0,44					
5	12/13/5	91,75	91,00	88,46	89,14	95,84	95,32	92,85	93,84	92,24	91,41	92,35	92,58	0,85	0,90	2,41	2,34	0,59	0,42	1,92	91,03	94,58	92,22
	12/13/5	91,21		89,21		93,21		96,35		90,45		93,25		0,87		2,41		0,40					
	12/13/5	90,05		89,74		96,90		92,33		91,55		92,13		0,99		2,20		0,26					
6	12/13/6	89,37	89,53	90,53	90,88	98,34	97,64	91,14	92,91	92,81	92,26	91,12	91,85	0,53	**0,76**	2,23	2,28	0,24	0,06	**2,22**	**91,13**	**95,28**	**92,51**
	12/13/6	90,39		90,05		96,60		95,55		92,67		91,54		0,87		2,42		-0,13					
	12/13/6	88,83		92,05		97,99		92,04		91,30		92,89		0,87		2,18		0,07					
7	12/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12/13/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					
	12/13/7	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00					

Na rysunkach od 8.8, do 8.11 przedstawiono płyty próbne, wykonane przy prędkości cięcia, dla których proces nie był możliwy lub był niestabilny.

Rys. 8.8. Brak przecięcia płyt próbnych 8/8/7 o gr. 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A i prędkości cięcia 2990 mm/min



Rys. 8.9. Brak przecięcia płyt próbnych 8/13/7 o gr 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A i prędkości cięcia 4290 mm/min

Rys. 8.10. Brak przecięcia płyt próbnych 12/8/2 o gr. 12 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A i prędkości cięcia 875 mm/min

Rys. 8.11. Brak szczeliny w płytach próbnych 12/13/7 o gr. 12 mm ciętych przy natężeniu 130 A i prędkości 2860 mm/min

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych cięcia plazmowego można wywnioskować, że niektóre prędkości przy zastosowaniu danego natężenia prądu dla poszczególnych grubości płyt próbnych należy odrzucić.

Prędkości, które nie będą uwzględnione w dalszych badaniach zestawiono w tabeli 8.15

Tabela 8.15. Odrzucone płyty próbne

Lp.	Grubość materiału [mm]	Natężenie prądu cięcia [A]	Prędkość cięcia [mm/min]	Przyczyny	Uwagi
1	8	80	2990	Za duża prędkość cięcia	Brak przecięcia
2	8	130	4290	Za duża prędkość cięcia	Brak przecięcia
3	12	80	875	Za mała prędkość cięcia	Cięcie niewłaściwe
4	12	130	2860	Za dużą prędkość cięcia	Brak szczeliny

8.3.2. Pomiary. Tolerancja prostopadłości

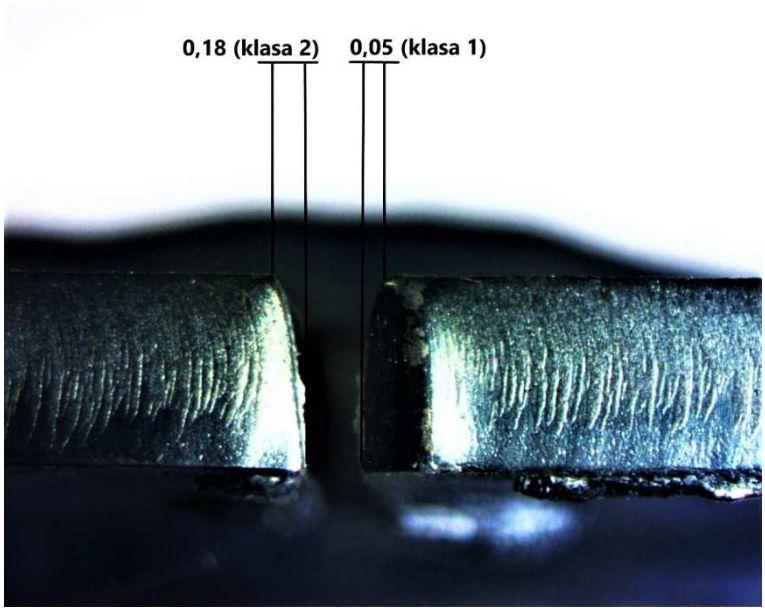
Pomiary tolerancji prostopadłości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9013: 2017 na stanowisku opisanym w punkcie 7.2. W tabeli 8.16, zestawiono zakresy oraz maksymalne tolerancje wymiarowe lub nachylenia ***u***, przypisane dla płyt próbnych o grubości 4, 8 i 12 mm opisane zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017.

Tabela 8.16. Zakresy odchyłek tolerancji prostopadłości lub nachylenia u, dla poszczególnych grubości blach, zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017.

Zakres	Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, *u*	Zakres odchyłki dla 4 mm	Zakres odchyłki dla 8 mm	Zakres odchyłki dla 12 mm
1	0,05 + 0,003a	0,062	0,074	0,086
2	0,15 + 0,007a	0,178	0,206	0,234
3	0,4 + 0,01a	0,44	0,48	0,52
4	0,8 + 0,02a	0,88	0,96	1,04
5	1,2 + 0,035a	1,34	1,48	1,62

Na podstawie tabeli 6.1 (jakość powierzchni po cięciu dla poszczególnych klas konstrukcji) oraz 8.16 w tabelach od 8.17 do 8.21, wykonano zestawienie wszystkich pomiarów odnoszących się do zakresów tolerancji prostopadłości. Ocenę zakresów wykonano w następujący sposób: Jeżeli dla badanej płyty próbnej zakres prostopadłości jednej krawędzi ciętej został określony dla klasy 1, a innej dla klasy 2, to cięte krawędzie zakwalifikowano dla klasy 2. Jeżeli z grupy prędkości jedna płyta próbna otrzymała tolerancję prostopadłości klasy 1, inna 2, a trzecia 3, to całą grupę zakwalifikowano do klasy 3. Wyniki, które wychodzą poza klasę tolerancji prostopadłości w tabelach, zaznaczono znakiem „X”. Jeżeli w danej grupie jest znak „X”, to cała grupa próbek jest odrzucona.

Na rysunku 8.12 przedstawiono przykład określenia klasy prostopadłości. Najwyższe i najniższe wyniki zaznaczono pogrubionym kolorem szarym.



Rys. 8.12. Przykład określenia klasy prostopadłości

Tabela 8.17. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 4 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz,Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**							
Lp	Numer płyty																							
1	4/8/1	0,30	**3**	**3**	0,11	**2**	**3**	0,42	**3**	**4**	0,26	**3**	**4**	0,25	**3**	**3**	0,34	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**
	4/8/1	0,19	**3**		0,24	**3**		0,56	**4**		0,45	**4**		0,32	**3**		0,26	**3**		**3**		**4**		
	4/8/1	0,25	**3**		0,21	**3**		0,42	**3**		0,21	**3**		0,27	**3**		0,34	**3**		**3**		**3**		
2	4/8/2	**0,16**	**3**	**3**	**0,05**	**1**	**2**	0,64	**4**	**4**	0,28	**3**	**3**	0,13	**2**	**2**	0,16	**2**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/8/2	**0,10**	**3**		**0,10**	**2**		0,45	**4**		0,30	**3**		0,05	**1**		0,18	**3**		**3**		**4**		
	4/8/2	**0,14**	**3**		**0,10**	**2**		0,47	**4**		0,04	**1**		0,07	**2**		0,16	**2**		**3**		**4**		
3	4/8/3	0,15	**3**	**3**	0,08	**2**	**2**	0,47	**4**	**4**	0,17	**2**	**4**	0,24	**3**	**3**	0,22	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/8/3	0,18	**3**		0,13	**2**		0,44	**3**		0,33	**3**		0,24	**3**		0,19	**3**		**3**		**3**		
	4/8/3	0,20	**3**		0,16	**2**		0,64	**4**		0,54	**4**		0,28	**3**		0,23	**3**		**3**		**4**		
4	4/8/4	0,23	**3**	**3**	0,22	**3**	**3**	0,23	**3**	**4**	0,10	**2**	**3**	0,15	**2**	**3**	0,09	**2**	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**
	4/8/4	0,21	**3**		0,20	**3**		0,50	**4**		0,22	**3**		0,15	**2**		0,23	**3**		**3**		**4**		
	4/8/4	0,21	**3**		0,19	**3**		0,52	**4**		0,26	**3**		0,19	**3**		0,11	**2**		**3**		**4**		
5	4/8/5	0,21	**3**	**3**	0,33	**3**	**3**	0,69	**4**	**4**	0,15	**2**	**3**	0,13	**2**	**3**	0,27	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/8/5	0,16	**3**		0,33	**3**		0,78	**4**		0,62	**3**		0,27	**3**		0,02	**1**		**3**		**4**		
	4/8/5	0,22	**3**		0,29	**3**		0,63	**4**		0,08	**2**		0,25	**3**		0,28	**3**		**3**		**4**		
6	4/8/6	0,29	**3**	**3**	0,33	**3**	**3**	**0,72**	**4**	**5**	0,37	**3**	**3**	0,35	**3**	**3**	0,16	**2**	**3**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**
	4/8/6	0,22	**3**		0,24	**3**		**0,71**	**4**		0,49	**3**		0,28	**3**		0,28	**3**		**3**		**4**		
	4/8/6	0,23	**3**		0,29	**3**		**1,00**	**5**		0,57	**3**		0,38	**3**		0,25	**3**		**3**		**5**		
7	4/8/7	0,27	**3**	**3**	0,35	**3**	**3**	0,38	**3**	**4**	0,15	**2**	**3**	0,38	**3**	**3**	0,41	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**
	4/8/7	0,30	**3**		0,39	**3**		0,84	**4**		0,46	**3**		0,43	**3**		0,31	**3**		**3**		**4**		
	4/8/7	0,30	**3**		0,40	**3**		0,64	**4**		0,15	**2**		0,40	**3**		0,35	**3**		**3**		**4**		

Tabela 8.18. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 4 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5.

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz,Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**								
Lp	Numer płyty																							
1	4/13/1	0,27	**3**	**3**	0,30	**3**	**3**	0,58	**4**	**4**	0,25	**3**	**3**	0,21	**3**	**3**	0,29	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/13/1	0,30	**3**		0,29	**3**		0,58	**4**		0,33	**3**		0,23	**3**		0,33	**3**		**3**		**4**		
	4/13/1	0,28	**3**		0,32	**3**		0,60	**4**		0,17	**2**		0,19	**3**		0,28	**3**		**3**		**4**		
2	4/13/2	**0,14**	**2**	**2**	0,07	**2**	**2**	0,55	**4**	**4**	**0,05**	**1**	**2**	**0,06**	**1**	**3**	0,03	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/13/2	**0,03**	**1**		0,11	**2**		0,31	**3**		**-0,09**	**2**		**0,22**	**3**		0,16	**2**		**3**		**4**		
	4/13/2	**0,12**	**2**		0,11	**2**		0,23	**3**		**0,15**	**1**		**-0,05**	**1**		0,14	**2**		**2**		**4**		
3	4/13/3	0,17	**2**	**2**	0,22	**3**	**3**	0,53	**4**	**4**	0,23	**3**	**3**	0,15	**2**	**3**	0,09	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/13/3	0,07	**2**		0,18	**3**		0,58	**4**		0,06	**2**		0,19	**3**		0,14	**2**		**3**		**4**		
	4/13/3	0,01	**1**		0,19	**3**		0,56	**4**		0,30	**3**		-0,01	**1**		0,08	**2**		**3**		**4**		
4	4/13/4	0,17	**2**	**3**	0,24	**3**	**3**	0,61	**4**	**4**	0,12	**2**	**3**	0,13	**2**	**3**	0,25	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/13/4	0,20	**3**		0,26	**3**		0,53	**4**		0,16	**2**		0,18	**3**		0,17	**2**		**3**		**4**		
	4/13/4	0,16	**2**		0,26	**3**		0,55	**4**		0,27	**3**		0,14	**2**		0,10	**2**		**3**		**4**		
5	4/13/5	0,25	**3**	**3**	0,39	**3**	**3**	0,62	**4**	**4**	0,19	**3**	**4**	0,16	**2**	**3**	0,28	**3**	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**
	4/13/5	0,27	**3**		0,40	**3**		0,62	**4**		0,16	**2**		0,13	**2**		0,32	**3**		**3**		**4**		
	4/13/5	0,32	**3**		0,43	**3**		0,65	**4**		0,49	**4**		0,22	**3**		0,27	**3**		**3**		**4**		
6	4/13/6	0,28	**3**	**3**	0,44	**3**	**4**	0,62	**4**	**4**	0,41	**3**	**3**	0,34	**3**	**3**	0,32	**3**	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**	**4**
	4/13/6	0,21	**3**		0,44	**3**		0,67	**4**		0,44	**3**		0,14	**2**		0,30	**3**		**3**		**4**		
	4/13/6	0,25	**3**		0,45	**4**		0,67	**4**		0,10	**2**		0,30	**3**		0,32	**3**		**4**		**4**		
7	4/13/7	0,31	**3**	**3**	0,45	**4**	**4**	**0,79**	**4**	**5**	0,41	**3**	**4**	0,22	**3**	**3**	0,41	**3**	**3**	**4**	**4**	**4**	**5**	**5**
	4/13/7	0,29	**3**		0,47	**4**		**0,68**	**4**		0,38	**3**		0,38	**3**		0,31	**3**		**4**		**4**		
	4/13/7	0,34	**3**		0,49	**4**		**0,93**	**5**		0,47	**4**		0,31	**3**		0,47	**3**		**4**		**5**		

Tabela 8.19. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 8 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz, Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**							
Lp	Numer płyty																							
1	8/8/1	-0,28	**3**	**2**	-0,18	**2**	**2**	1,38	**5**	**5**	0,13	**2**	**2**	0,42	**3**	**3**	0,17	**2**	**3**	**3**	**3**	**5**	**5**	**5**
	8,8/1	-0,25	**3**		-0,19	**2**		1,23	**5**		0,12	**2**		0,39	**3**		0,26	**3**		**3**		**5**		
	8/8/1	-0,37	**3**		-0,20	**2**		1,47	**5**		0,02	**1**		0,36	**3**		0,18	**2**		**3**		**5**		
2	8/8/2	-0,29	**3**	**4**	0,10	**1**	**3**	1,06	**5**	**5**	-0,04	**1**	**2**	0,04	**1**	**1**	0,02	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**5**	**5**
	8/8/2	-0,52	**4**		0,04	**1**		1,13	**5**		-0,02	**1**		0,04	**1**		0,14	**2**		**4**		**5**		
	8/8/2	-0,19	**2**		0,26	**3**		0,99	**5**		0,16	**2**		0,06	**1**		0,10	**2**		**3**		**5**		
3	8/8/3	-0,40	**3**	**3**	0,00	**1**	**1**	1,12	**5**	**5**	0,34	**3**	**3**	0,22	**3**	**3**	0,16	**2**	**3**	**3**	**3**	**5**	**4**	**4**
	8/8/3	-0,38	**3**		0,04	**1**		1,11	**4**		-0,05	**1**		0,13	**2**		0,29	**3**		**3**		**4**		
	8/8/3	-0,35	**3**		-0,04	**1**		0,89	**4**		-0,30	**3**		0,14	**2**		0,06	**1**		**3**		**4**		
4	8/8/4	-0,48	**4**	**4**	-0,23	**3**	**3**	1,28	**5**	**5**	-0,28	**3**	**3**	0,26	**3**	**3**	0,29	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	8/8/4	-0,48	**4**		-0,27	**3**		1,34	**5**		-0,10	**2**		0,21	**3**		0,10	**2**		**4**		**5**		
	8/8/4	-0,42	**3**		-0,04	**1**		1,17	**5**		-0,20	**2**		0,29	**3**		0,25	**3**		**3**		**5**		
5	8/8/5	-0,46	**4**	**4**	-0,19	**2**	**2**	1,26	**5**	**X**	-0,19	**2**	**4**	0,32	**3**	**3**	0,59	**4**	**4**	**4**	**4**	**5**	**X**	**X**
	8/8/5	-0,49	**4**		-0,03	**1**		1,48	**5**		-0,11	**2**		0,41	**3**		0,50	**4**		**4**		**5**		
	8/8/5	-0,48	**4**		-0,16	**2**		1,60	**X**		-0,50	**4**		0,21	**3**		0,53	**4**		**4**		**X**		
6	8/8/6	-0,31	**3**	**4**	-0,05	**1**	**2**	1,47	**5**	**X**	0,14	**2**	**4**	0,43	**3**	**3**	0,60	**4**	**4**	**4**	**4**	**5**	**X**	**X**
	8/8/6	-0,36	**3**		-0,18	**2**		1,67	**X**		0,28	**3**		0,44	**3**		0,64	**4**		**4**		**X**		
	8/8/6	-0,50	**4**		-0,08	**2**		1,54	**5**		-0,46	**4**		0,38	**3**		0,56	**4**		**4**		**5**		
7	8/8/7	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	8/8/7	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**0**		
	8/8/7	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**0**		

Tabela 8.20. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 8 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz,Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**			**[mm]**								
Lp	Numer płyty																							
1	8/13/1	0,00	**1**	**1**	0,51	**4**	**5**	1,28	**5**	**5**	0,28	**3**	**3**	0,00	**1**	**2**	0,18	**2**	**3**	**2**	**5**	**5**	**5**	**5**
	8/13/1	0,05	**1**		0,53	**5**		1,10	**5**		0,07	**1**		-0,04	**1**		0,26	**3**		**5**		**5**		
	8/13/1	-0,04	**1**		0,64	**4**		1,29	**5**		0,00	**1**		-0,12	**2**		0,20	**2**		**4**		**5**		
2	8/13/2	-0,31	**3**	**3**	0,28	**3**	**3**	0,94	**4**	**5**	-0,13	**2**	**3**	-0,23	**3**	**3**	-0,12	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**
	8/13/2	-0,32	**3**		0,22	**3**		0,96	**4**		-0,22	**3**		-0,17	**2**		-0,18	**2**		**3**		**4**		
	8/13/2	-0,30	**3**		0,26	**3**		1,09	**5**		-0,20	**2**		-0,28	**3**		-0,10	**2**		**3**		**5**		
3	8/13/3	-0,13	**2**	**3**	0,41	**3**	**3**	0,95	**4**	**5**	-0,07	**1**	**2**	-0,14	**2**	**3**	0,07	**1**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**
	8/13/3	-0,04	**1**		0,36	**3**		1,15	**5**		-0,11	**2**		-0,22	**3**		0,16	**2**		**3**		**5**		
	8/13/3	-0,25	**3**		0,25	**3**		1,01	**5**		-0,18	**2**		-0,25	**3**		-0,06	**1**		**3**		**5**		
4	8/13/4	-0,19	**2**	**3**	0,26	**3**	**3**	0,95	**4**	**5**	0,02	**1**	**X**	-0,20	**2**	**2**	0,04	**1**	**3**	**3**	**3**	**4**	**X**	**X**
	8/13/4	-0,23	**3**		0,31	**3**		1,04	**5**		0,12	**2**		-0,19	**2**		0,37	**3**		**3**		**5**		
	8/13/4	-0,01	**1**		0,32	**3**		0,97	**5**		1,80	**X**		-0,16	**2**		0,32	**3**		**3**		**X**		
5	8/13/5	0,01	**1**	**2**	0,53	**4**	**4**	1,53	**5**	**5**	-0,04	**1**	**3**	0,03	**1**	**2**	0,34	**3**	**4**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	8/13/5	0,14	**2**		0,46	**3**		1,25	**5**		0,28	**3**		0,03	**1**		0,36	**3**		**3**		**5**		
	8/13/5	0,15	**2**		0,58	**4**		1,57	**5**		0,36	**3**		-0,08	**2**		0,52	**4**		**4**		**5**		
6	8/13/6	0,11	**2**	**3**	0,70	**4**	**4**	1,05	**5**	**5**	0,46	**3**	**3**	0,02	**1**	**2**	0,55	**4**	**4**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	8/13/6	0,06	**1**		0,68	**4**		1,29	**5**		0,05	**1**		-0,01	**1**		0,32	**3**		**4**		**5**		
	8/13/6	0,24	**3**		0,87	**4**		1,25	**5**		0,01	**1**		-0,12	**2**		0,49	**4**		**4**		**5**		
7	8/13/7	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	-12,60	**5**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	**0**	**3**	**0**	**0**	**0**
	8/13/7	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**5**		
	8/13/7	0,00	**0**		0,00	**0**		-12,60	**5**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**3**		**0**		

Tabela 8.21. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 12 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz,Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			[mm]			[mm]			[mm]			[mm]			[mm]							
Lp	Numer płyty																							
1	12/8/1	-0,64	**4**		0,01	**1**		1,45	**5**		-0,20	**2**		-0,19	**2**		0,02	**1**		**4**		**5**		
	12/8/1	-0,73	**4**	**4**	-0,04	**1**	**1**	1,49	**5**	**5**	-0,11	**2**	**3**	-0,31	**3**	**3**	0,31	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/8/1	-0,64	**4**		-0,09	**1**		1,53	**5**		0,44	**3**		-0,08	**1**		0,19	**2**		**4**		**5**		
2	12/8/2	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**0**		
	12/8/2	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	12/8/2	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**0**		
3	12/8/3	-0,80	**4**		0,16	**2**		1,37	**5**		-0,04	**1**		-0,03	**1**		-0,11	**2**		**4**		**5**		
	12/8/3	-0,58	**4**	**4**	0,08	**1**	**2**	1,30	**5**	**5**	-0,09	**2**	**2**	-0,24	**3**	**3**	-0,02	**1**	**2**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/8/3	-0,58	**4**		0,16	**2**		1,20	**5**		0,00	**1**		-0,11	**2**		-0,27	**2**		**4**		**5**		
4	12/8/4	-0,63	**4**		0,02	**1**		1,23	**5**		0,13	**2**		-0,12	**2**		0,15	**2**		**4**		**5**		
	12/8/4	-0,48	**3**	**4**	0,16	**2**	**2**	1,36	**5**	**5**	-0,21	**2**	**2**	-0,21	**2**	**3**	-0,05	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/8/4	-0,73	**4**		0,11	**2**		1,45	**5**		-0,13	**2**		-0,40	**3**		0,08	**1**		**4**		**5**		
5	12/8/5	-0,94	**4**		-0,03	**1**		1,57	**5**		-0,29	**3**		0,03	**1**		0,31	**3**		**4**		**5**		
	12/8/5	-0,68	**4**	**4**	-0,24	**3**	**3**	1,65	**X**	**X**	-0,29	**3**	**3**	-0,03	**1**	**1**	0,22	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**X**	**X**
	12/8/5	-0,76	**4**		-0,05	**1**		1,59	**5**		-0,12	**2**		0,00	**1**		0,23	**2**		**4**		**X**		
6	12/8/6	-0,60	**4**		0,04	**1**		1,54	**5**		-0,08	**1**		-0,25	**3**		0,32	**3**		**4**		**5**		
	12/8/6	-0,67	**4**	**4**	-0,08	**1**	**1**	1,60	**5**	**X**	-0,03	**1**	**2**	-0,38	**3**	**3**	0,44	**3**	**4**	**4**	**4**	**5**	**X**	**X**
	12/8/6	-0,61	**4**		-0,06	**1**		1,73	**X**		-0,22	**2**		-0,07	**1**		0,53	**4**		**4**		**X**		
7	12/8/7	-0,56	**4**		0,13	**2**		1,46	**5**		0,04	**1**		-0,12	**2**		0,43	**3**		**4**		**5**		
	12/8/7	-0,52	**3**	**4**	0,17	**2**	**2**	1,39	**5**	**5**	-0,11	**2**	**2**	-0,20	**2**	**2**	0,45	**3**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/8/7	-0,55	**4**		-0,03	**1**		1,58	**5**		-0,05	**1**		-0,05	**1**		0,41	**3**		**4**		**5**		

Tabela 8.22. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 12 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. Oznaczenia poszczególnych krawędzi przedstawiono na rysunku 8.5

		Odchyłka kąta **Az**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Az**	Odchyłka kąta **Bz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Bz**	Odchyłka kąta **Cz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Cz**	Odchyłka kąta **Dz**	Zakres wg. normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Dz**	Odchyłka kąta **Ez**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu dla **Ez**	Odchyłka kąta **Fz**	Zakres wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia zakresu dla **Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az, Bz, Ez, Fz**	Zakresy dla szczeliny/krawędzi wewnętrznych **Cz,Dz**	Zakresy dla każdej z próbki **Cz-Dz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]			[mm]			[mm]			[mm]			[mm]			[mm]							
Lp	Numer płyty																							
1	12/13/1	-0,48	**3**	**3**	0,70	**4**	**4**	1,60	**5**	**5**	0,25	**3**	**4**	-0,05	**1**	**2**	0,42	**3**	**4**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/13/1	-0,17	**2**		0,63	**4**		1,54	**5**		0,39	**3**		-0,05	**1**		0,61	**4**				**5**		
	12/13/1	-0,30	**3**		0,70	**4**		0,90	**4**		0,77	**4**		-0,16	**2**		0,38	**3**				**4**		
2	12/13/2	-0,57	**4**	**4**	0,55	**4**	**4**	1,28	**5**	**5**	0,09	**2**	**3**	-0,37	**3**	**X**	0,23	**2**	**2**	**4**	**X**	**5**	**5**	**X**
	12/13/2	-0,68	**4**		0,58	**4**		1,39	**5**		0,17	**2**		-0,40	**3**		0,07	**1**		**4**		**5**		
	12/13/2	-0,67	**4**		0,52	**4**		1,13	**5**		0,43	**3**		1,67	**X**		0,04	**1**		**X**		**5**		
3	12/13/3	-0,80	**4**	**4**	0,43	**3**	**3**	0,87	**4**	**5**	1,16	**5**	**5**	-0,18	**2**	**2**	0,24	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/13/3	-0,71	**4**		0,52	**3**		0,89	**4**		0,74	**4**		-0,40	**3**		0,33	**3**		**4**		**4**		
	12/13/3	-0,31	**3**		0,41	**3**		1,32	**5**		0,09	**2**		-0,20	**2**		0,37	**3**		**3**		**5**		
4	12/13/4	-0,24	**3**	**3**	0,39	**3**	**3**	1,81	**X**	**X**	0,09	**2**	**4**	-0,11	**2**	**2**	0,38	**3**	**4**	**3**	**4**	**X**	**X**	**X**
	12/13/4	-0,29	**3**		0,41	**3**		1,92	**X**		0,48	**3**		-0,06	**1**		0,38	**3**		**3**		**X**		
	12/13/4	-0,17	**2**		0,38	**3**		1,31	**5**		0,69	**4**		-0,05	**1**		0,55	**4**		**4**		**5**		
5	12/13/5	0,37	**3**	**3**	-0,32	**3**	**3**	1,23	**5**	**5**	0,60	**4**	**5**	0,47	**3**	**3**	0,49	**3**	**4**	**3**	**4**	**5**	**5**	**5**
	12/13/5	0,25	**3**		-0,17	**2**		0,67	**4**		1,33	**5**		0,09	**2**		0,68	**4**		**4**		**5**		
	12/13/5	0,01	**1**		-0,05	**1**		1,45	**5**		0,49	**3**		0,33	**3**		0,45	**3**		**3**		**5**		
6	12/13/6	-0,13	**2**	**3**	0,11	**2**	**3**	1,75	**X**	**X**	0,24	**3**	**5**	0,59	**4**	**4**	0,24	**3**	**4**	**4**	**4**	**X**	**X**	**X**
	12/13/6	0,08	**2**		0,01	**1**		1,39	**5**		1,17	**5**		0,56	**4**		0,32	**3**		**4**		**5**		
	12/13/6	-0,25	**3**		0,43	**3**		1,68	**X**		0,43	**4**		0,27	**3**		0,61	**4**		**4**		**X**		
7	12/13/7	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	0,00	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
	12/13/7	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		**0**		**0**		
	12/13/7	0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**0**		0,00	**3**		0,00	**0**		**0**		**0**		

8.3.3. Tolerancja wymiarowa

W tabeli 6 i 7 normy PN-EN ISO 9013: 2017 jest mowa o dwóch klasach tolerancji wymiarowej. Dla celów pracy, klasy tolerancji wymiarowe oznaczono symbolem KT. Pierwsza jest to klasa tolerancji wymiarowej bez obróbki dodatkowej, czyli produkt jest cięty „na wymiar" (KT1). Druga klasa, z obróbką dodatkową, czyli w procesie cięcia jest uwzględniony naddatek materiału na obróbkę (KT2).

W praktyce, dla producentów konstrukcji stalowych, wymiar zewnętrzny ciętych płyt stalowych nie zawsze jest istotny. Ważne jest wykonanie produktu w jak najkrótszym czasie. Przy produkcji hal stalowych, wytwarza się płyty metalowe, które służą jako wzór mocowania słupów stalowych z zamontowanymi prętami gwintowanymi za pomocą połączeń śrubowych. Płyty metalowe wraz z prętem gwintowanym są docelowo zalewane betonem. Do zabetonowanych płyt stalowych z wystającymi kotwami, montowane są słupy stalowe hal. Marki słupów stalowych również są zalewane betonem (rys. 8.13). Z tego powodu wymiar zewnętrzny marek słupów stalowych z perspektywy montażu jest nieistotny. W związku z powyższym, dla potrzeb niniejszej rozprawy, postanowiono utworzyć trzecią klasę tolerancji wymiarowej. Będzie ona dotyczyć elementów, dla których proces cięcia powinien być przeprowadzony w jak najkrótszym czasie, przy parametrach, które pozwolą na jego realizację, bez względu na jakość ciętych krawędzi. Klasa zwana KT3 została skategoryzowana poza drugą klasą tolerancji.

Rys. 8.13. Montaż marek słupów nośnych hali produkcyjnej. 1, 2– Płyty wzorcowe przygotowane przed zalanie betonem. 3 - płyty wzorcowe zabetonowane z wystającymi kotwami [140]

Zgodnie z wartościami tolerancji wymiarowej podanymi w normie PN-EN ISO 9013:2017, w tabeli 8.23 przedstawiono zakresy tolerancji dla badanych płyt próbnych o gr. 4, 8 i 12 mm.

Tabela 8.23. Wartości odchyłek dla poszczególnych klas tolerancji (KT) wymiarowych

Grubość materiału	Tolerancja wymiarów (rys. 9.14)	Klasa tolerancji wymiarowej bez obróbki dodatkowej **KT1** [mm]	Klasa tolerancji wymiarowej z obróbką dodatkową **KT2** [mm]	Klasa tolerancji wymiarowej poza klasą 2 **KT3** [mm]
4	Wymiar A-B	±0,25	± 0,90	> 0,90
	Wymiar E-F	±0,25	± 0,90	> 0,90
8	Wymiar A-B	±0,30	± 1,10	> 1,10
	Wymiar E-F	±0,30	± 1,30	> 1,30
12	Wymiar A-B	±0,35	± 1,80	> 1,80
	Wymiar E-F	±0,40	± 1,80	> 1,80

Na rysunku 8.14 przedstawiono sposób wymiarowania próbek dla KT. W tabelach od 8.24 do 8.29 przedstawiono wartości odchyłek wymiarów nominalnych dla tolerancji wymiarowej poszczególnych klas.

Rys. 8.14. Sposób wymiarowania płyt próbnych dla klas tolerancji (KT) [140]

Tabela 8.24. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az - Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	4/8/1	0,30	0,11	**0,41**	**KT2**	**KT2**	**0,25**	**0,34**	**0,59**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/1	0,19	0,24	**0,43**	**KT2**		**0,32**	**0,26**	**0,59**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/1	0,25	0,21	**0,46**	**KT2**		**0,27**	**0,34**	**0,60**	**KT2**		**KT2**		
2	4/8/2	0,16	0,05	**0,21**	**KT1**	**KT1**	**0,13**	**0,16**	**0,29**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/2	0,10	0,10	**0,20**	**KT1**		**0,05**	**0,18**	**0,23**	**KT1**		**KT1**		
	4/8/2	0,14	0,10	**0,23**	**KT1**		**0,07**	**0,16**	**0,24**	**KT1**		**KT1**		
3	4/8/3	0,15	0,08	**0,23**	**KT1**	**KT2**	**0,24**	**0,22**	**0,46**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/3	0,18	0,13	**0,31**	**KT2**		**0,24**	**0,19**	**0,43**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/3	0,20	0,16	**0,36**	**KT2**		**0,28**	**0,23**	**0,52**	**KT2**		**KT2**		
4	4/8/4	0,23	0,22	**0,46**	**KT2**	**KT2**	**0,15**	**0,09**	**0,24**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/4	0,21	0,20	**0,41**	**KT2**		**0,15**	**0,23**	**0,37**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/4	0,21	0,19	**0,40**	**KT2**		**0,19**	**0,11**	**0,30**	**KT2**		**KT2**		
5	4/8/5	0,21	0,33	**0,54**	**KT2**	**KT2**	**0,13**	**0,27**	**0,41**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/5	0,16	0,33	**0,49**	**KT2**		**0,27**	**0,02**	**0,29**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/5	0,22	0,29	**0,52**	**KT2**		**0,25**	**0,28**	**0,53**	**KT2**		**KT2**		
6	4/8/6	0,29	0,33	**0,61**	**KT2**	**KT2**	**0,35**	**0,16**	**0,51**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/6	0,22	0,24	**0,47**	**KT2**		**0,28**	**0,28**	**0,57**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/6	0,23	0,29	**0,52**	**KT2**		**0,38**	**0,25**	**0,63**	**KT2**		**KT2**		
7	4/8/7	0,27	0,35	**0,62**	**KT2**	**KT2**	**0,38**	**0,41**	**0,80**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/8/7	0,30	0,39	**0,69**	**KT2**		**0,43**	**0,31**	**0,74**	**KT2**		**KT2**		
	4/8/7	0,30	0,40	**0,70**	**KT2**		**0,40**	**0,35**	**0,75**	**KT2**		**KT2**		

Tabela 8.25. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az - Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	4/13/1	0,27	0,30	**0,57**	**KT2**	**KT2**	0,21	0,29	**0,50**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/1	0,30	0,29	**0,58**	**KT2**		0,23	0,33	**0,56**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/1	0,28	0,32	**0,59**	**KT2**		0,19	0,28	**0,47**	**KT2**		**KT2**		
2	4/13/2	0,14	0,07	**0,20**	**KT1**	**KT1**	0,06	0,03	**0,08**	**KT1**	**KT2**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	4/13/2	0,03	0,11	**0,14**	**KT1**		0,22	0,16	**0,38**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/2	0,12	0,11	**0,23**	**KT1**		-0,05	0,14	**0,09**	**KT1**		**KT1**		
3	4/13/3	0,17	0,22	**0,39**	**KT2**	**KT2**	0,15	0,09	**0,24**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/3	0,07	0,18	**0,25**	**KT1**		0,19	0,14	**0,34**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/3	0,01	0,19	**0,19**	**KT1**		-0,01	0,08	**0,07**	**KT1**		**KT1**		
4	4/13/4	0,17	0,24	**0,42**	**KT2**	**KT2**	0,13	0,25	**0,38**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/4	0,20	0,26	**0,46**	**KT2**		0,18	0,17	**0,34**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/4	0,16	0,26	**0,42**	**KT2**		0,14	0,10	**0,24**	**KT1**		**KT2**		
5	4/13/5	0,25	0,39	**0,64**	**KT2**	**KT2**	0,16	0,28	**0,45**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/5	0,27	0,40	**0,68**	**KT2**		0,13	0,32	**0,46**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/5	0,32	0,43	**0,75**	**KT2**		0,22	0,27	**0,49**	**KT2**		**KT2**		
6	4/13/6	0,28	0,44	**0,72**	**KT2**	**KT2**	0,34	0,32	**0,66**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/6	0,21	0,44	**0,65**	**KT2**		0,14	0,30	**0,45**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/6	0,25	0,45	**0,70**	**KT2**		0,30	0,32	**0,63**	**KT2**		**KT2**		
7	4/13/7	0,31	0,45	**0,76**	**KT2**	**KT2**	0,22	0,41	**0,63**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	4/13/7	0,29	0,47	**0,76**	**KT2**		0,38	0,31	**0,69**	**KT2**		**KT2**		
	4/13/7	0,34	0,49	**0,83**	**KT2**		0,31	0,47	**0,78**	**KT2**		**KT2**		

Tabela 8.26. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az - Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	8/8/1	-0,28	-0,18	**-0,46**	**KT2**	**KT2**	0,42	0,17	**0,59**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8,8/1	-0,25	-0,19	**-0,43**	**KT2**		0,39	0,26	**0,65**	**KT2**		**KT2**		
	8/8/1	-0,37	-0,20	**-0,57**	**KT2**		0,36	0,18	**0,53**	**KT1**		**KT2**		
2	8/8/2	-0,29	0,10	**-0,18**	**KT1**	**KT2**	0,04	0,02	**0,06**	**KT1**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	8/8/2	-0,52	0,04	**-0,47**	**KT2**		0,04	0,14	**0,18**	**KT1**		**KT2**		
	8/8/2	-0,19	0,26	**0,07**	**KT1**		0,06	0,10	**0,16**	**KT1**		**KT1**		
3	8/8/3	-0,40	0,00	**-0,40**	**KT2**	**KT2**	0,22	0,16	**0,38**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/8/3	-0,38	0,04	**-0,34**	**KT2**		0,13	0,29	**0,42**	**KT1**		**KT2**		
	8/8/3	-0,35	-0,04	**-0,39**	**KT2**		0,14	0,06	**0,20**	**KT1**		**KT2**		
4	8/8/4	-0,48	-0,23	**-0,70**	**KT2**	**KT2**	0,26	0,29	**0,54**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/8/4	-0,48	-0,27	**-0,75**	**KT2**		0,21	0,10	**0,31**	**KT1**		**KT2**		
	8/8/4	-0,42	-0,04	**-0,45**	**KT2**		0,29	0,25	**0,54**	**KT1**		**KT2**		
5	8/8/5	-0,46	-0,19	**-0,65**	**KT2**	**KT2**	0,32	0,59	**0,90**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/8/5	-0,49	-0,03	**-0,53**	**KT2**		0,41	0,50	**0,91**	**KT2**		**KT2**		
	8/8/5	-0,48	-0,16	**-0,64**	**KT2**		0,21	0,53	**0,74**	**KT2**		**KT2**		
6	8/8/6	-0,31	-0,05	**-0,36**	**KT2**	**KT2**	0,43	0,60	**1,03**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/8/6	-0,36	-0,18	**-0,53**	**KT2**		0,44	0,64	**1,09**	**KT2**		**KT2**		
	8/8/6	-0,50	-0,08	**-0,58**	**KT2**		0,38	0,56	**0,95**	**KT2**		**KT2**		
7	8/8/7	0,00	0,00	**0,00**	**0,00**	**0,00**	0,00	0,00	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0**
	8/8/7	0,00	0,00	**0,00**	**0,00**		**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**		**0,00**		
	8/8/7	0,00	0,00	**0,00**	**0,00**		**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**		**0,00**		

Tabela 8.27. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az - Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	8/13/1	-0,004	0,51	**0,50**	**KT2**	**KT2**	0,00	0,18	**0,18**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/13/1	0,05	0,53	**0,58**	**KT2**		-0,04	0,26	**0,22**	**KT2**		**KT2**		
	8/13/1	-0,04	0,64	**0,60**	**KT2**		-0,12	0,20	**0,08**	**KT2**		**KT2**		
2	8/13/2	-0,31	0,28	**-0,03**	**KT1**	**KT1**	-0,23	-0,12	**-0,35**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/13/2	-0,32	0,22	**-0,10**	**KT1**		-0,17	-0,18	**-0,34**	**KT2**		**KT2**		
	8/13/2	-0,30	0,26	**-0,04**	**KT1**		-0,28	-0,10	**-0,39**	**KT2**		**KT2**		
3	8/13/3	-0,13	0,41	**0,28**	**KT1**	**KT2**	-0,14	0,07	**-0,07**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/13/3	-0,04	0,36	**0,31**	**KT2**		-0,22	0,16	**-0,07**	**KT2**		**KT2**		
	8/13/3	-0,25	0,25	**0,00**	**KT1**		-0,25	-0,06	**-0,30**	**KT2**		**KT2**		
4	8/13/4	-0,19	0,26	**0,07**	**KT1**	**KT2**	-0,20	0,04	**-0,16**	**KT1**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	8/13/4	-0,23	0,31	**0,08**	**KT1**		-0,19	0,37	**0,18**	**KT1**		**KT1**		
	8/13/4	-0,01	0,32	**0,31**	**KT2**		-0,16	0,32	**0,17**	**KT1**		**KT2**		
5	8/13/5	0,01	0,53	**0,55**	**KT2**	**KT2**	0,03	0,34	**0,37**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	8/13/5	0,14	0,46	**0,60**	**KT2**		0,03	0,36	**0,38**	**KT2**		**KT2**		
	8/13/5	0,15	0,58	**0,73**	**KT2**		-0,08	0,52	**0,45**	**KT2**		**KT2**		
6	8/13/6	0,11	0,70	**0,82**	**KT2**	**KT3**	0,02	0,55	**0,57**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT3**	**KT3**
	8/13/6	0,06	0,68	**0,74**	**KT2**		-0,01	0,32	**0,30**	**KT2**		**KT2**		
	8/13/6	0,24	0,87	**1,11**	**KT3**		-0,12	0,49	**0,37**	**KT2**		**KT3**		
7	8/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		
	8/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		

Tabela 8.28. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az - Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	12/8/1	-0,64	0,01	**-0,64**	**KT2**	**KT2**	**-0,19**	**0,02**	**-0,17**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/1	-0,73	-0,04	**-0,77**	**KT2**		**-0,31**	**0,31**	**0,00**	**KT1**		**KT2**		
	12/8/1	-0,64	-0,09	**-0,73**	**KT2**		**-0,08**	**0,19**	**0,11**	**KT1**		**KT2**		
2	12/8/2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
	12/8/2	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		
	12/8/2	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		
3	12/8/3	-0,80	0,16	**-0,64**	**KT2**	**KT2**	**-0,03**	**-0,11**	**-0,13**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/3	-0,58	0,08	**-0,50**	**KT2**		**-0,24**	**-0,02**	**-0,26**	**KT1**		**KT2**		
	12/8/3	-0,58	0,16	**-0,42**	**KT2**		**-0,11**	**-0,27**	**-0,38**	**KT2**		**KT2**		
4	12/8/4	-0,63	0,02	**-0,61**	**KT2**	**KT2**	**-0,12**	**0,15**	**0,03**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/4	-0,48	0,16	**-0,32**	**KT1**		**-0,21**	**-0,05**	**-0,27**	**KT1**		**KT1**		
	12/8/4	-0,73	0,11	**-0,62**	**KT2**		**-0,40**	**0,08**	**-0,32**	**KT1**		**KT2**		
5	12/8/5	-0,94	-0,03	**-0,97**	**KT2**	**KT2**	**0,03**	**0,31**	**0,34**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/5	-0,68	-0,24	**-0,92**	**KT2**		**-0,03**	**0,22**	**0,20**	**KT1**		**KT2**		
	12/8/5	-0,76	-0,05	**-0,81**	**KT2**		**0,00**	**0,23**	**0,23**	**KT1**		**KT2**		
6	12/8/6	-0,60	0,04	**-0,56**	**KT2**	**KT2**	**-0,25**	**0,32**	**0,08**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/6	-0,67	-0,08	**-0,75**	**KT2**		**-0,38**	**0,44**	**0,06**	**KT1**		**KT2**		
	12/8/6	-0,61	-0,06	**-0,67**	**KT2**		**-0,07**	**0,53**	**0,46**	**KT2**		**KT2**		
7	12/8/7	-0,56	0,13	**-0,43**	**KT2**	**KT2**	**-0,12**	**0,43**	**0,31**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/8/7	-0,52	0,17	**-0,35**	**KT1**		**-0,20**	**0,45**	**0,26**	**KT1**		**KT1**		
	12/8/7	-0,55	-0,03	**-0,58**	**KT2**		**-0,05**	**0,41**	**0,36**	**KT2**		**KT2**		

Tabela 8.29. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A [140]

		Odchyłka kąta **Az** w mm	Odchyłka kąta **Bz** w mm	Suma odchyłek **Az** i **Bz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Az -Bz**	Odchyłka kąta **Ez** w mm	Odchyłka kąta **Fz** w mm	Suma odchyłek **Ez i Fz** w mm	Zakres tolerancji wymiarowej wg normy DIN EN ISO 9013:2017	Średnia z zakresu tolerancji wymiarowej dla **Ez -Fz**	Zakresy dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Średnia dla krawędzi zewnętrznych **Az-Bz,Ez-Fz**	Zakresy dla średniej z każdej prędkości **Az-Fz**
		[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]					
Lp	Numer płyty													
1	12/13/1	-0,48	0,70	**0,21**	**KT1**	**KT2**	**-0,05**	**0,42**	**0,37**	**KT1**	**KT2**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	12/13/1	-0,17	0,63	**0,46**	**KT2**		**-0,05**	**0,61**	**0,56**	**KT2**		**KT2**		
	12/13/1	-0,30	0,70	**0,40**	**KT1**		**-0,16**	**0,38**	**0,22**	**KT1**		**KT1**		
2	12/13/2	-0,57	0,55	**-0,02**	**KT1**	**KT1**	**-0,37**	**0,23**	**-0,14**	**KT1**	**KT2**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	12/13/2	-0,68	0,58	**-0,11**	**KT1**		**-0,40**	**0,07**	**-0,33**	**KT1**		**KT1**		
	12/13/2	-0,67	0,52	**-0,15**	**KT1**		**1,67**	**0,04**	**1,71**	**KT2**		**KT2**		
3	12/13/3	-0,80	0,43	**-0,36**	**KT2**	**KT2**	**-0,18**	**0,24**	**0,06**	**KT1**	**KT1**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/13/3	-0,71	0,52	**-0,18**	**KT1**		**-0,40**	**0,33**	**-0,07**	**KT1**		**KT1**		
	12/13/3	-0,31	0,41	**0,10**	**KT1**		**-0,20**	**0,37**	**0,16**	**KT1**		**KT1**		
4	12/13/4	-0,24	0,39	**0,15**	**KT1**	**KT1**	**-0,11**	**0,38**	**0,27**	**KT1**	**KT2**	**KT1**	**KT2**	**KT2**
	12/13/4	-0,29	0,41	**0,12**	**KT1**		**-0,06**	**0,38**	**0,32**	**KT1**		**KT1**		
	12/13/4	-0,17	0,38	**0,21**	**KT1**		**-0,05**	**0,55**	**0,50**	**KT2**		**KT2**		
5	12/13/5	0,37	-0,32	**0,04**	**KT1**	**KT1**	**0,47**	**0,49**	**0,96**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/13/5	0,25	-0,17	**0,09**	**KT1**		**0,09**	**0,68**	**0,78**	**KT2**		**KT2**		
	12/13/5	0,01	-0,05	**-0,04**	**KT1**		**0,33**	**0,45**	**0,77**	**KT2**		**KT2**		
6	12/13/6	-0,13	0,11	**-0,02**	**KT1**	**KT1**	**0,59**	**0,24**	**0,83**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**	**KT2**
	12/13/6	0,08	0,01	**0,09**	**KT1**		**0,56**	**0,32**	**0,88**	**KT2**		**KT2**		
	12/13/6	-0,25	0,43	**0,18**	**KT1**		**0,27**	**0,61**	**0,88**	**KT2**		**KT2**		
7	12/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		
	12/13/7	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,00		

8.4. Analiza wyników pomiarów geometrii płyt próbnych

8.4.1. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 4 mm przy natężeniu 80 A

Z analizy otrzymanych wyników można wywnioskować, iż największe skosy ciętych krawędzi zmierzono na płycie próbnej oznaczonej numerem 4/8/6, gdzie średnia odchyłka wszystkich krawędzi wyniosła 95,68° - w tym krawędzi zewnętrznych 93,92°, a wewnętrznych 99,19°. Płyta próbna z numerem 4/8/6 została wycięta z prędkością 4320 mm/min, czyli rekomendowaną przez producenta urządzenia. Najmniejszą odchyłkę od prostopadłości zmierzono na płycie próbnej 4/8/2, gdzie średnia z wszystkich pomiarów równa się 92,84°. Jest to płyta cięta z najniższą prędkością wynosząca 2520 mm/min.

Największe wypływki ciekłego metalu zmierzono na płycie o numerze 4/8/3 (2880 mm/min), które sięgały 1,12 mm, natomiast najmniejszą wypływkę zmierzono na płycie o numerze 4/8/7 (4680 mm/min), która była cięta z najwyższą prędkością. Wysokość wypływki dla tej płyty próbnej wyniosła 0,59 mm.

Z analizy szerokości szczeliny cięcia wynika, że różnica pomiędzy górną a dolną szerokością szczeliny jest największa w płycie próbnej oznaczonej numerem 4/8/6 (parametry rekomendowane przez producenta) i wynosiła 1,29 mm, natomiast najmniejsza uzyskano na płycie próbnej z numerem 4/8/4 (3240 mm/min), która równa się 0,61 mm.

Płyta próbna o numerze 4/8/2 otrzymała najwyższą ocenę tolerancji prostopadłości, która mieści się w czwartym zakresie normy PN-EN ISO 9013: 2017. W piątym zakresie klasy tolerancji prostopadłości mieści się płyta 4/8/6 (parametry rekomendowane przez producenta). Najwyższą klasę tolerancji wymiarowej otrzymała płyta 4/8/2, gdzie zabrakło 0,04 mm, aby można ją było zakwalifikować do zakresu pierwszego tolerancji (cięcie bez obróbki wykańczającej). Najmniejszą tolerancję wymiarową otrzymała płyta próbna 4/8/7 cięta z najwyższą prędkością (4680 mm/min).

8.4.2. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 4 mm przy natężeniu 130 A

Z analizy wyników badań wynika, że płyta próbna 4/13/2 cięta z najniższą prędkością 3500 mm/min uzyskała najlepszą prostopadłość wszystkich ciętych krawędzi, która wynosi średnio 91,85°. Płyta próbna o numerze 4/13/7 cięte z największą prędkością (6500 mm/min) uzyskała najgorszą prostopadłość krawędzi, która wynosi średnio 96,44°, gdzie średnia prostopadłość krawędzi wewnętrznych wyniosła 98,73°.

Największą wypływkę zmierzono na płytach ciętych z najniższą prędkością, czyli 4/13/2 i 4/13/3 (3500 mm/min do 4000 mm/min), które wynosiły 1,18 mm, natomiast najmniejszą dla płyty 4/13/1 (5000 mm/min) ciętej zgodnie z doświadczeniem operatora.

Największą różnicę w szerokości szczeliny uzyskano na płycie ciętej z największą prędkością, a najmniejszą ciętej najniższą prędkością. Płyta próbna cięta z najniższą prędkością otrzymała najlepszy zakres tolerancji prostopadłości (czwarty) i tylko jeden wymiar dzieli ją od trzeciego oraz drugiej klasy tolerancji wymiarowej. Piąty zakres tolerancji prostopadłości oraz drugi zakres tolerancji wymiarowej zostały osiągnięte na płytach z numerem 4/13/7 (ciętej z najwyższą prędkością).

8.4.3. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm przy natężeniu 80 A

Z analizy wyników cięcia plazmowego płyt próbnych o gr. 8 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A wynika, że prędkość cięcia 2990 mm/min dla płyt próbnych o nr. 8/8/7 jest za wysoka dla tej grubości materiału. Największe skosy krawędzi zewnętrznych i wewnętrznych (92,47°) oraz największą różnicę szerokości ciętej szczeliny (1,55 mm) uzyskano dla płyt próbnych 8/8/6 ciętych z prędkością 2760 mm/min (parametry rekomendowane przez producenta), natomiast najlepsze wyniki uzyskały płyty cięte z prędkością od 1610 mm/min do 2070 mm/min (8/8/2, 8/8/3, 8/8/4), które wynosiły od 91,17° do 91,24° (nieznaczne różnice). Największe wypływki wystąpiły na płycie próbnej ciętej z najniższą prędkością (1610 mm/min) i wynosiła średnio 2,39 mm, a najmniejsze dla płyty ciętej zgodnie z doświadczeniem operatora (2300 mm/min), które wyniosły średnio 0,93 mm. Najlepszą prostopadłość oraz zakres tolerancji wymiarowej uzyskano dla płyty 8/8/2 ciętej z najniższą prędkością. Najgorszą prostopadłość oraz tolerancję wymiarową uzyskano dla płyty 8/8/6

8.4.4. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm przy natężeniu 130 A

Wyniki cięcia płyt próbnych o gr 8 mm przy natężeniu 130 A są podobne jak w przypadku cięcia z natężeniem 80 A. Najmniejsze skosy odnotowano dla płyty 8/13/2 ciętej z najmniejszą prędkością (2310 mm/min), które wynoszą średnio 90,47°. Największe skosy zostały uzyskane dla płyt 8/13/5 i 8/13/6 ciętych z prędkością od 3630 mm/min do 3960 mm/min (parametry rekomendowane przez producenta) i wyniosły średnio 93,18°. Różnica pomiędzy górną, a dolną szerokością szczeliny dla płyt próbnych 8/13/4 i 8/13/5 wyniosły średnio 1,64 mm. Największą średnią wypływkę zmierzono dla płyty próbnej ciętej z najniższą prędkością, a najmniejszą dla 8/13/5 ciętej z prędkością 3630 mm/min. Prędkość 4290 mm/min przy natężeniu 130 A uniemożliwia przecięcie materiału. Najwyższą prostopadłość ciętych krawędzi uzyskała płyta 8/13/1 (cięta według parametrów zgodnych z doświadczeniem operatora), natomiast najlepszą tolerancję wymiarową uzyskała płyta 8/13/2. Próbka 8/13/4, jest poza klasą prostopadłości i należy ją odrzucić, zaś próbka 8/13/6 jest poza klasą tolerancji wymiarowej.

8.4.5. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm przy natężeniu 80 A

Z przeprowadzonej analizy wyników pomiarów wynika, że wyższa prędkość cięcia wpłynęła korzystnie na prostopadłości ciętych krawędzi. Średnia wszystkich ciętych krawędzi zewnętrznych jest w granicy prostopadłości. Najlepsze wyniki uzyskano dla płyty próbnej ciętej z prędkością najwyższą (1625 mm/min) i wyniosła- 89,83°. Zwiększenie prędkości cięcia miało negatywny wpływ na szerokość szczeliny. Największą różnicę szerokości ciętej szczeliny odnotowano dla płyty próbnej 12/8/6, ciętej z prędkością 1500 mm/min, która wyniosła 1,51 mm. Największą wypływkę zmierzono dla płyty ciętej z największą prędkością (1625 mm/min), która mierzyła średnio 2,48 mm, a najmniejszą ciętą według doświadczenia operatora, która wyniosła 1,99 mm. Prostopadłość krawędzi dla płyt próbnych 12/8/5 i 12/8/6 (prędkość od 1375 mm/min do 1500 mm/min) jest poza tolerancją, pozostałe płyty zawierają się w zakresie piątym. Odnosząc się do klasy tolerancji, najlepsze wyniki uzyskano dla płyty 12/8/5, którą należy odrzucić ze względu na brak prostopadłości krawędzi, dlatego przyjęto, że najlepszą klasę tolerancji uzyskano dla płyty ciętej z największa prędkością 12/8/7.

8.4.6. Analiza wyników pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm przy natężeniu 130 A

Analizując wyniki pomiarów płyt próbnych o gr 12 mm ciętych przy natężeniu 130 A można stwierdzić, że najmniejsze skosy ciętych krawędzi wystąpiły przy płycie próbnej ciętej z najniższą prędkością, tj. 1540 mm/min. Tnąc płytę z prędkością 1760 mm/min, jesteśmy narażeni na największe wypływki ciekłego metalu, które średnio wynoszą 2,53 mm. Największą różnice pomiędzy górną a dolną częścią szczeliny wyniosła 2,10 mm i wystąpiła w płycie próbnej 12/13/5 ciętej z prędkością 2420 mm/min. Spośród siedmiu próbek, cztery są poza tolerancją prostopadłości. Najlepszą prostopadłość ciętych krawędzi oraz tolerancję prostopadłości uzyskano dla próbki ciętej z najniższą prędkości 12/13/1 (1540 mm/min).

8.4.7. Podsumowanie pomiarów geometrii dla procesu cięcia płyt próbnych

Z przeprowadzonych badań można wywnioskować, że prędkość cięcia jest bardzo istotnym parametrem, który wpływa na jakość ciętych krawędzi. Prędkość cięcia ma wpływ nie tylko na prostopadłość i wymiar ciętych próbek, ale również na szerokość szczeliny oraz wielkość wypływek. Analizując wyniki badań tolerancji wymiarowej, można stwierdzić, że dla zadanych prędkości cięcia nie uzyskano jakości ciętych krawędzi w tolerancji wymiarowej, która nie wymagałaby dodatkowej obróbki wykańczającej. Poszczególne krawędzie były wycięte w kategorii KT1, lecz cała płyta próbna była na granicy KT1 i KT2. W związku z powyższym kategoria KT1 nie zostanie uwzględniona w projektowanym SWD. Wyniki jednoznacznie pokazują, że w procesie cięcia plazmowego należy znaleźć kompromis pomiędzy prędkością cięcia, a jakością ciętych krawędzi, wielkością powstających wypływek i wymiarem szczeliny.

Zauważono, że zwiększenie prędkości cięcia ma negatywny wpływ na jakość ciętych krawędzi. Wykonując proces cięcia w oparciu o parametry rekomendowane przez producenta, dla praktycznie wszystkich podanych prędkości, uzyskano zaskakująco niską jakość krawędzi. Na podstawie przeprowadzonych badań geometrii cięcia poszczególnych grubości materiałów, ich prędkości oraz pozostałych parametrów, sporządzono tabelaryczne zestawienie wyników. Przedstawiono je w tabeli 8.30. Uzupełnione o wyniki badań chropowatości i mikrotwardości HV0,1, będą podstawą do stworzenia bazy danych planowanego systemu wspomagania decyzji.

Tabela 8.30. Parametry cięcia dla poszczególnych klas zakresu tolerancji prostopadłości oraz wymiarowej

Numer płyty	Grubość materiału	Natężenie prądu cięcia	Prędkość cięcia	Napięcie	Ciśnienie gazu		Wysokość		Czas dziurkowania	Odsunięcie palnika podczas przebijania	Różnica szerokości rowka	Wielkości wypływek	Zakres tolerancji prostopadłości		KT wymiarowej dla SWD
					Przebijanie	Cięcie	Palnika	Startu					Krawędzie zewnętrzne	Krawędzie wewnętrzne	
	[mm]	[A]	[mm/min]	[V]	[bar]	[bar]	[mm]	[mm]	[s]	[mm]	[mm]	[mm]			
4/8/2	4	80	2520	142	2,4	5,8	3	4	0,1	0	0,73	0,93	3	3-4	KT2
4/8/7	4	80	4680	142	2,4	5,8	3	4	0,1	0	0,87	0,59	3	3-4	KT3
8/8/2	8	80	1610	146	2,4	5,8	3	5	0,4	3	1,10	2,39	3-4	5-3	KT2
8/8/6	8	80	2760	146	2,4	5,8	3	5	0,4	3	1,55	1,13	2-4	X	KT3
12/8/4	12	80	1125	146	2,4	5,8	3	7	0,5	4	1,28	2,29	2-4	2-5	KT2
12/8/7	12	80	1625	146	2,4	5,8	3	7	0,5	4	1,44	2,48	2-4	2-5	KT3
4/13/2	4	130	3500	142	2,5	6,4	3	5	0,1	1	0,40	1,18	3	3-4	KT2
4/13/7	4	130	6500	142	2,5	6,4	3	5	0,1	1	1,22	0,89	3-4	4-5	KT3
8/13/2	8	130	2310	146	2,5	6,4	3	6	0,3	3	0,81	1,96	2-3	3-5	KT2
8/13/6	8	130	3960	146	2,5	6,4	3	6	0,3	3	1,37	1,03	2-4	3-5	KT3
12/13/2	12	130	1540	152	2,5	6,4	3,5	7	0,4	4	1,50	1,44	2-4	4-5	KT2
12/13/6	12	130	2640	152	2,5	6,4	3,5	7	0,4	4	2,22	0,76	3-4	X	KT3

8.5. Badanie chropowatości

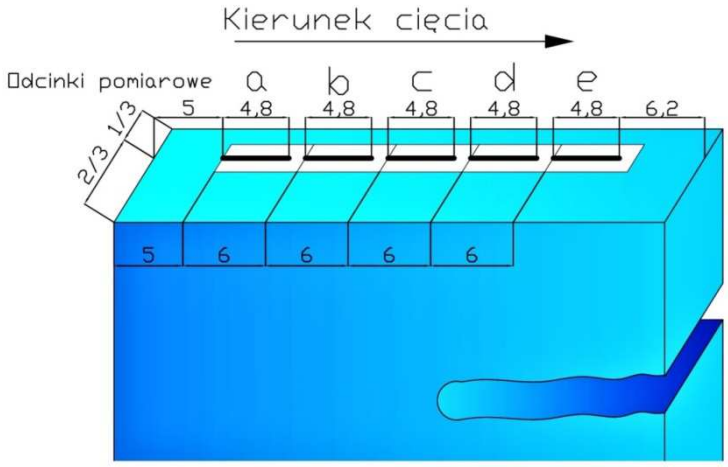
Badaniem chropowatości ciętych krawędzi za pomocą technologii plazmowej blachy z gatunku S235 JR o grubości 2, 5 i 10 mm, zajmowali się autorzy pracy [77]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że prędkość cięcia ma istotny wpływ na chropowatość ciętych krawędzi. Z analizy wyników pomiarów chropowatości wynika, że chropowatość powierzchni wzrasta wraz ze wzrostem grubości ciętego materiału. Stwierdzili również, że prędkość cięcia powoduje powstawanie małych, twardych gradów oraz brak kątów prostych. Porównując technologię cięcia plazmowego oraz laserowego, wykazano, że chropowatość powierzchni po cięciu plazmowym jest wielokrotnie niższa jak po cięciu laserowym. Podobne zależności wykazano w pracy [135], gdzie autorzy doszli do wniosku, że cięcie plazmowe niemal zawsze generuje nawisy stopionego metalu i żużlu. Powierzchnie po cięciu plazmowym i laserowym zawsze przejawiają ukierunkowanie równoległe, a czasami w dwóch kierunkach. Badanie chropowatości Rz5 przeprowadzono w pracy [35], pod kątem zgodnym z kierunkiem cięcia na odcinku pomiarowym 12,5 mm przy 2,5 mm długości odcinka elementarnego. Autorzy potwierdzili wcześniejsze założenia, że chropowatość ciętych powierzchni jest zależna od rodzaju ciętego materiału oraz technologii cięcia. Porównując technologię cięcie gazowego, plazmowego, laserem oraz wodą, stwierdzili, że najniższą chropowatość (10 μm) uzyskano podczas cięcia plazmą powietrzną, gdzie pozostałe wartości wynosiły od 15 do 20 μm. Wpływ prędkości cięcia na parametr Ra analizowano w pracy [116], gdzie potwierdzono wcześniejsze wnioski, że zwiększenie prędkości cięcia plazmowego powoduje pogorszenie jakości ciętych krawędzi oraz zwiększenie jej chropowatości.

Istotnym parametrem z punktu widzenia poprawności prowadzenia procesu cięcia plazmowego jest wysokość profilu Rz5, który świadczy o chropowatości powierzchni ciętej. Badanie chropowatości wykonano za pomocą stykowego przyrządu do pomiaru chropowatości opisanego w rozdziale 8.3. Pomiary średniej wysokości profilu ciętych krawędzi wykonano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 9013: 2017. Norma PN-EN ISO 9013: 2017 podaje ogólne wskazówki w tym zakresie [179]:

- punkty pomiarowe powinny być tam, gdzie przewidywane są maksymalne zmierzone wartości poszczególnych parametrów charakterystycznych,
- zmierzone wartości maksymalne po cięciu są sklasyfikowane w polach tolerancji,

- charakterystyczna wartość średniej wysokości profilu *Rz5* będzie wyznaczana tylko w ograniczonym obszarze powierzchni cięcia. Pomiar przeprowadza się w punkcie o maksymalnej chropowatości na grubości cięcia zgodnie z PN-EN ISO 4288:2011,
- dla cięcia tlenowego lub plazmowego pomiar wykonuje się w odległości 2/3 grubości cięcia od górnej krawędzi cięcia,
- dla grubości poniżej 2 mm pomiar wykonuje się w odległości równej 1/2 grubości cięcia od górnej krawędzi cięcia.

Uwzględniając wymagania norm PN-EN ISO 9013: 2017 oraz PN-EN ISO 4288: 2011, wykonano pomiary chropowatości Rz na pięciu odcinkach o długości 4,8 mm każdy. Pomiary zostały wykonane zgodnie z kierunkiem cięcia w odległości 2/3 grubości ciętej krawędzi od górnej krawędzi cięcia.
Miejsca wykonywania pomiarów przedstawiono na rysunku 8.15.



Rys. 8.15. Miejsca wykonywania pomiarów

Do badań chropowatości wytypowano losowo po jednej blasze próbnej zgodnie z tabelą 8.31. W sumie przeprowadzono 38 badań chropowatości, wyznaczając parametr Rz5.

Tabela 8.31. Badane blachy próbne

Grubość blachy	**4**		**8**		**12**	
Natężenie prądu	**80A**	**130A**	**80A**	**130A**	**80A**	**130A**
Prędkość cięcia [mm/min] oraz numer ciętych próbek	2520 (4/8/2)	3500 (4/13/2)	1610 (8/8/2)	2310 (8/13/2)	**Brak przecięcia**	1540 (12/13/2)
	2880 (4/8/3)	4000 (4/13/3)	1840 (8/8/3)	2640 (8/13/3)	1000 (12/8/3)	1760 (12/13/3)
	3240 (4/8/4)	4500 (4/13/4)	2070 (8/8/4)	2970 (8/13/4)	1125 (12/8/4)	1980 (12/13/4)
	3600 (4/8/1)	5000 (4/13/1)	2300 (8/8/1)	3300 8/13/1)	1250 (12/8/1)	2200 (12/13/1)
	3960 (4/8/5)	5500 (4/13/5)	2530 (8/8/5)	3630 (8/13/5)	1375 (12/8/5)	2420 (12/13/5)
	4320 (4/8/6)	6000 (4/13/6)	2760 (8/8/6)	3960 (8/13/6)	1500 (12/8/6)	2640 (12/13/6)
	4680 (4/8/7)	6500 (4/13/7)	**Brak przecięcia**	**Brak przecięcia**	1625 (12/8/7)	**Brak przecięcia**

Norma PN-EN ISO 9013: 2017 mówi o 4 zakresach średniego profilu Rz5 dla poszczególnych grubości blach. W tabeli 8.32 przedstawiono zakresy średniej wysokości profilu dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm.

Tabela 8.32. Średnia wysokość profilu Rz5 dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm

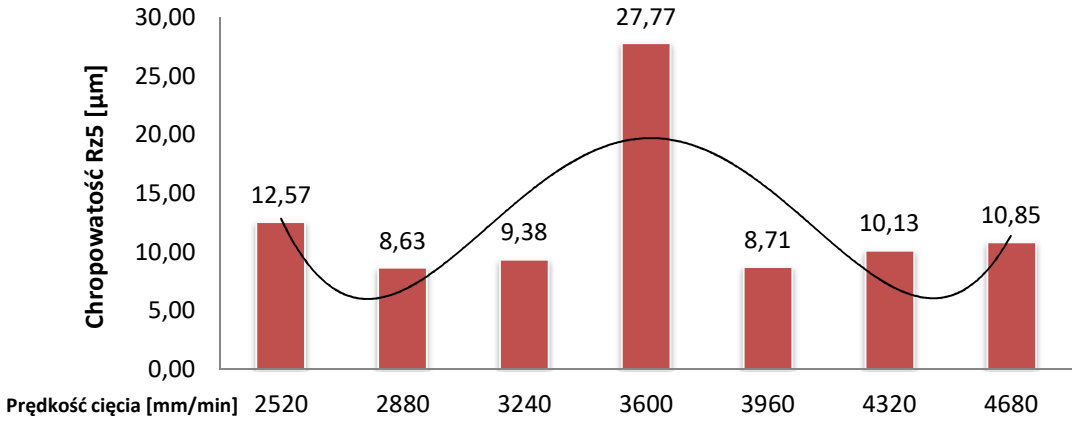
Zakres	Średnia wysokość profilu, *Rz5* µm	Dla blachy o grubości 4 mm	Dla blachy o grubości 8 mm	Dla blachy o grubości 12 mm
		µm		
1	10 + (0,6a mm)	12,4	14,8	17,2
2	40 + (0,8a mm)	43,2	46,4	49,6
3	70 + (1,2a mm)	74,8	79,6	83,2
4	110 + (1,8a mm)	117,2	124,4	131,6

8.5.1. Zestawienie wyników pomiarów chropowatości Rz5

W tabelach od 8.33 do 8.38 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości na ciętych krawędziach badanych blach. Zestawienie najwyższych chropowatości oraz linie trendu dla danych grubości blach ciętych przy natężeniu prądu 80 A i 130 A i dla różnych prędkości cięcia przedstawiono na rysunkach od 8.16 do 8.21.

Tabela 8.33. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 8.15

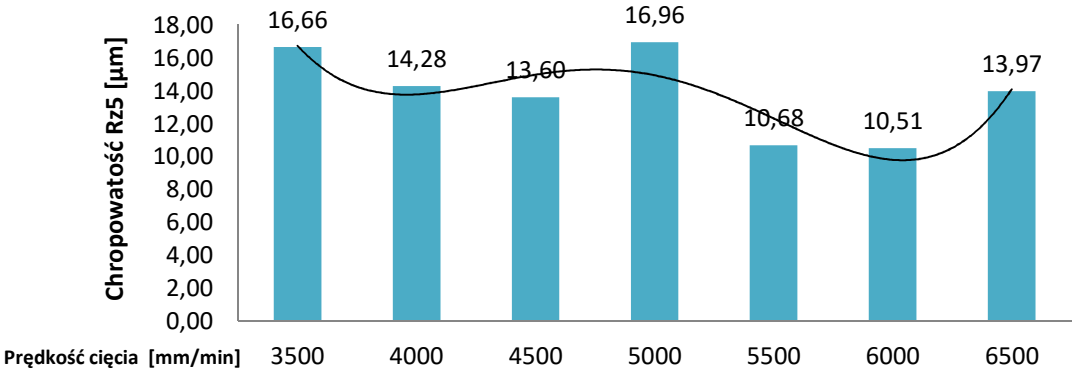
		Miejsce pomiaru					Średnia wartość
Nr płyty próbnej	Prędkość cięcia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
4/8/2	2520	12,09	8,71	15,57	13,56	12,94	12,57
4/8/3	2880	8,82	9,29	7,48	8,72	8,84	8,63
4/8/4	3240	7,10	9,75	9,67	10,72	9,64	9,38
4/8/1	3600	30,68	33,54	22,43	30,06	22,14	27,77
4/8/5	3960	10,27	7,99	8,59	8,15	8,57	8,71
4/8/6	4320	9,02	8,49	9,97	12,38	10,81	10,13
4/8/7	4680	9,29	9,77	12,43	12,43	10,33	10,85



Rys 8.16. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 4mm, natężenie prądu 80 A.

Tabela 8.34. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 8.15

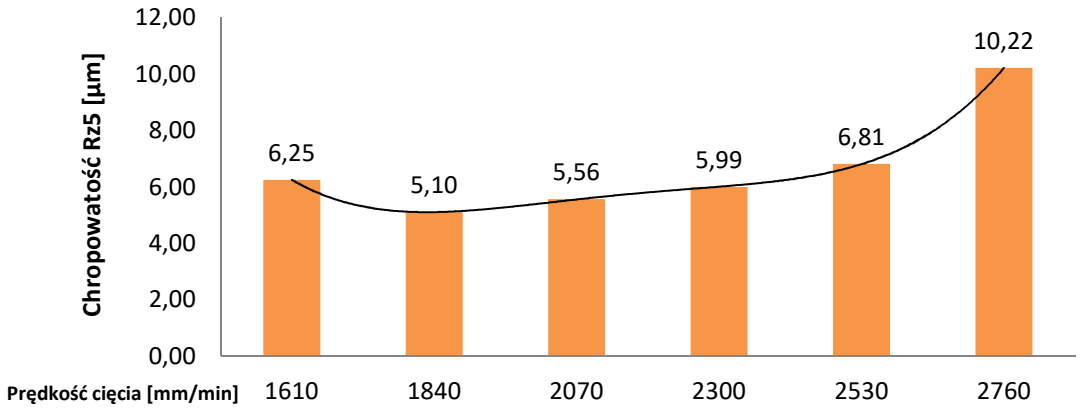
		Miejsce pomiaru					Średnia wartość
Nr płyty próbnej	Prędkość ciecia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
4/13/1	3500	12,97	12,75	20,63	22,14	14,83	16,66
4/13/2	4000	12,29	15,90	13,04	15,48	14,69	14,28
4/13/3	4500	12,46	13,05	12,59	15,52	14,38	13,60
4/13/4	5000	14,69	15,05	27,71	13,79	13,56	16,96
4/13/5	5500	9,64	11,46	10,46	10,76	11,07	10,68
4/13/6	6000	8,84	10,81	10,14	11,57	11,21	10,51
4/13/7	6500	10,00	23,14	11,86	13,38	11,48	13,97



Rys 8.17. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 4mm, natężenie prądu 130 A.

Tabela 8.35. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 8.15

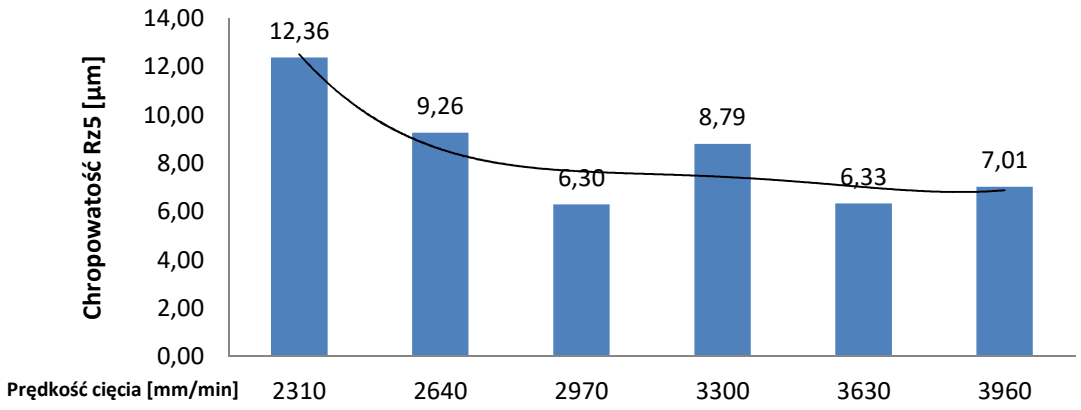
		Miejsce pomiaru					Średnia pomiaru
Nr płyty próbnej	Prędkość cięcia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
8/8/2	1610	6,68	6,95	6,52	5,07	6,02	6,25
8/8/3	1840	4,63	5,46	5,09	5,38	4,92	5,10
8/8/4	2070	5,40	5,00	6,57	5,83	5,01	5,56
8/8/1	2300	6,17	5,47	6,07	5,87	6,38	5,99
8/8/5	2530	6,70	6,62	7,06	6,92	6,74	6,81
8/8/6	2760	7,92	10,33	11,21	10,90	10,72	10,22



Rys 8.18. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 8 mm, natężenie prądu 80 A.

Tabela 8.36. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 9.15

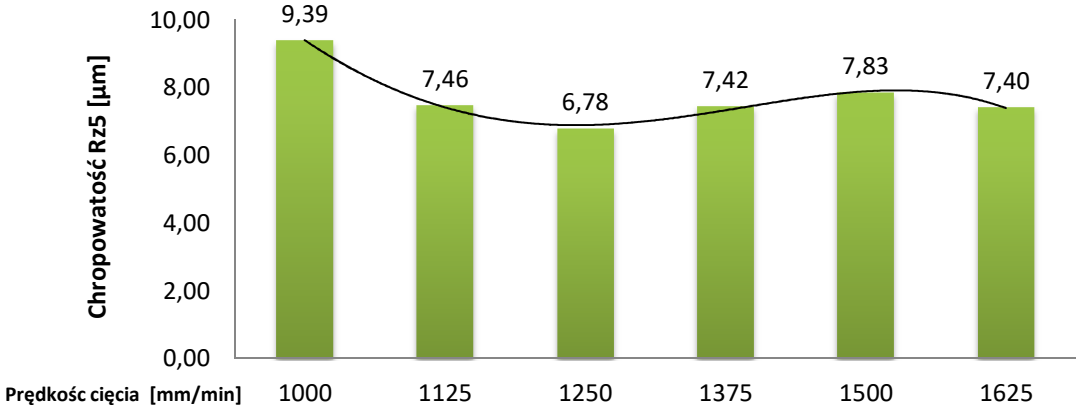
		Miejsce pomiaru					Średnia pomiaru
Nr płyty próbnej	Prędkość cięcia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
8/13/2	2310	11,48	11,57	13,51	12,50	12,75	12,36
8/13/3	2640	7,19	8,87	8,90	11,07	10,27	9,26
8/13/4	2970	6,26	6,62	6,19	6,21	6,20	6,30
8/13/1	3300	19,16	6,52	5,55	6,36	6,37	8,79
8/13/5	3630	6,94	5,41	6,46	6,77	6,07	6,33
8/13/6	3960	7,57	7,12	7,41	5,86	7,11	7,01



Rys 8.19. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 8 mm, natężenie prądu 130 A.

Tabela 8.37. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 8.15

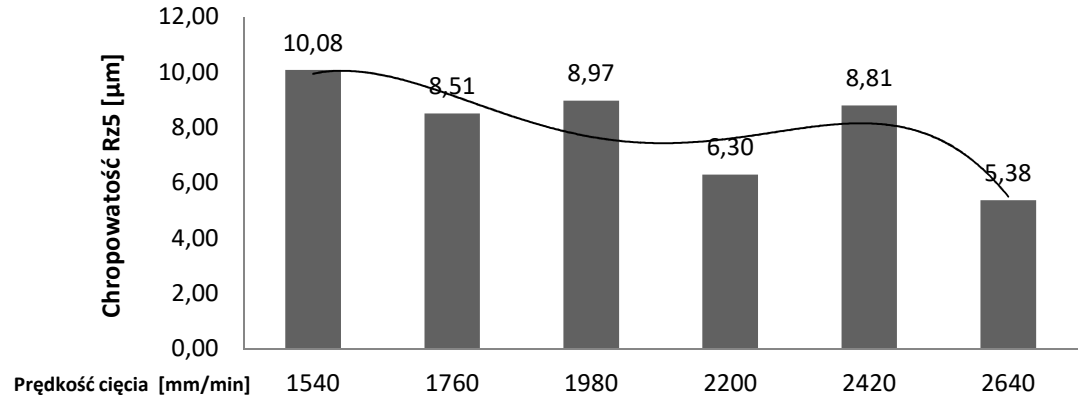
		Miejsce pomiaru					Średnia pomiaru
Nr płyty próbnej	Prędkość cięcia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
12/8/3	1000	7,80	6,02	8,76	14,68	9,67	9,39
12/8/4	1125	7,14	8,14	6,73	7,81	7,48	7,46
12/8/1	1250	7,43	6,69	6,90	6,38	6,52	6,78
12/8/5	1375	8,57	6,74	7,83	7,06	6,92	7,42
12/8/6	1500	6,95	7,94	8,61	7,07	8,59	7,83
12/8/7	1625	7,11	7,07	7,97	7,77	7,06	7,40



Rys 8.20. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 12 mm, natężenie prądu 80 A.

Tabela 8.38. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A. Miejsce pomiaru przedstawiono na rysunku 8.15

		Miejsce pomiaru					
Nr płyty próbnej	Prędkość cięcia [mm/min]	a	b	c	d	e	Rz5
		µm	µm	µm	µm	µm	µm
12/13/2	1540	6,21	7,78	8,37	17,92	10,14	10,08
12/13/3	1760	5,76	9,18	6,89	11,07	9,67	8,51
12/13/4	1980	13,15	6,30	6,23	10,48	8,71	8,97
12/13/1	2200	6,49	6,37	5,93	6,20	6,52	6,30
12/13/5	2420	8,15	9,17	6,15	12,41	8,15	8,81
12/13/6	2640	6,07	4,92	5,80	5,01	5,09	5,38



Rys. 8.21. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość (parametr Rz5), grubość płyty 12 mm, natężenie prądu 130 A.

8.5.2. Analiza wyników pomiaru chropowatości Rz5

Analizując wyniki prac [77, 116, 135], można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości cięcia wzrasta chropowatość ciętych krawędzi. Taką tendencję zauważono przy cięciu plazmowym płyt próbnych o gr 8 mm przy natężeniu prądu 80 A. Pozostałe uzyskane wyniki nie potwierdzają danych przedstawianych w powyższych pracach. Związane jest to z prędkościami, z którymi wykonano cięcie plazmowe.

Z analizy literatury oraz przeprowadzonych pomiarów można wywnioskować, że:

- chropowatość powierzchni ciętej wzrasta wraz ze zwiększeniem natężenia prądu cięcia dla danej grubości materiału oraz wraz ze wzrostem jego grubości,
- zmniejszenie natężenia prądu cięcia plazmowego znacząco wpływa na zakresy średniej wysokości profilu zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017,
- prędkość cięcia ma wpływ na prostopadłość ciętych krawędzi oraz na ich geometrię, lecz nie ma znaczącego wpływu na jej chropowatość.

Analizując wyniki cięcia blachy o grubości 4 mm przy natężeniu 80 A oraz 130 A, można stwierdzić, że:

- najmniejszą średnią chropowatość powierzchni 8,63 µm uzyskano na płycie próbnej ciętej z prędkością 2880 mm/min przy natężeniu prądu 80A,
- największą chropowatość powierzchni 27,77 µm uzyskano przy prędkości 3600 mm/min z natężeniem 80A,
- wszystkie mierzone powierzchnie płyt próbnych znajdują się w zakresie drugim, tym samym spełniają warunek konieczny dla wykonania konstrukcji stalowych w klasie EXC2, EXC3 oraz EXC4.

Analizując chropowatość krawędzi ciętych płyt próbnych o grubości 8 mm przy natężeniu prądu 80 A oraz 130 A, można stwierdzić, że:

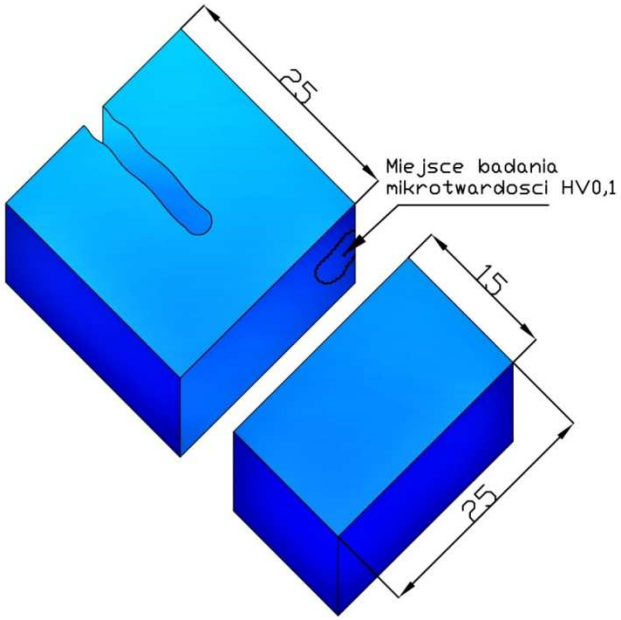
- wzrost natężenia prądu spowodował wzrost chropowatości ciętych krawędzi,
- najniższą chropowatość 5,10 µm zmierzono na płycie ciętej z prędkością 1840 mm/min przy natężeniu prądu 80 A,
- najwyższą chropowatość 12,36 µm zmierzono na płycie ciętej z najniższą prędkością 2310 mm/min przy natężeniu prądu 130 A,
- wszystkie średnie chropowatości badanych płyt mieszczą się w pierwszym zakresie średniej wysokości profilu.

Analizując wyniki chropowatości ciętych krawędzi płyt próbnych o grubości 12 mm z natężeniem 80 A i 130 A, można stwierdzić, że:

- zakresy wielkości chropowatości ciętych płyt z natężeniem 80 A nieznacznie się różnią,
- najmniejszą chropowatość 5,38 µm zmierzono na próbce ciętej z prędkością najwyższą, czyli 2640 mm/min przy natężeniu prądu 130 A,
- największą chropowatość 10,08 µm zmierzono na krawędzi płytki ciętej z najniższą prędkością 1540 mm/min przy natężeniu prądu 130A,
- wszystkie zmierzone powierzchnie cięte kwalifikują się do zakresu 1 średniej wysokości profilu zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017.

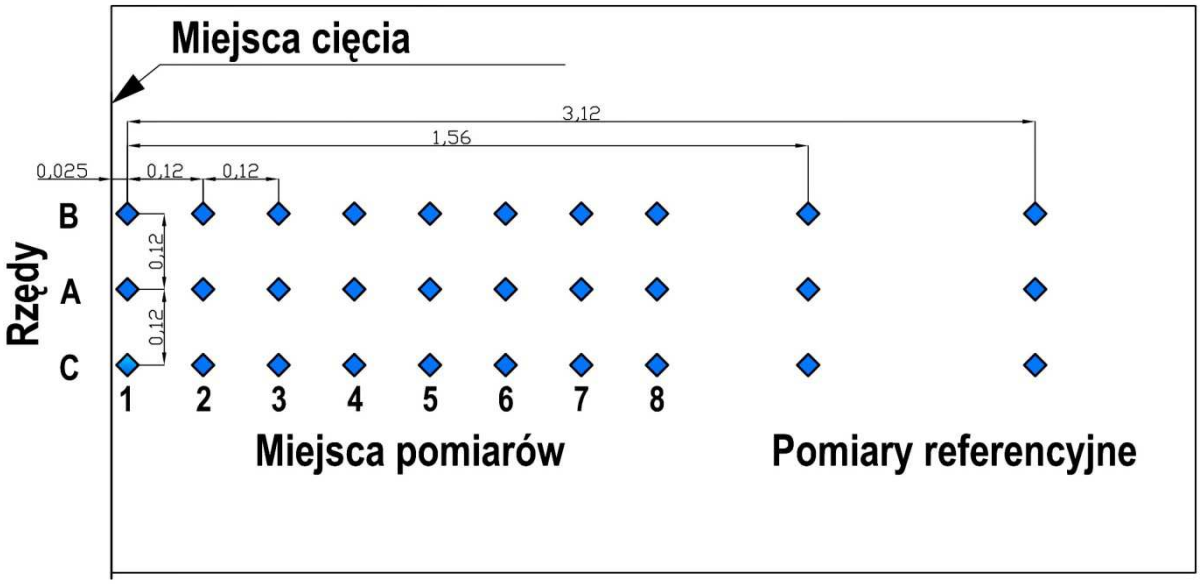
8.6. Badanie mikrotwardości HV0,1

Badanie mikrotwardości przeprowadzono zgodne z normą PN-EN ISO 6507-1:2007 na urządzeniu Zwick ZHV10. Badania zostały wykonane przy obciążeniu wgłębnika 0,1kg w czasie obciążenia 20 sekund. Do badań mikrotwardości HV0,1 wyznaczono po jednej płycie próbnej ciętej przy każdej z prędkości. W sumie przebadano 38 płyt próbnych. Badania wykonano na zgładzie poprzecznym ciętych płyt próbnych zgodnie z rysunkiem 8.22.

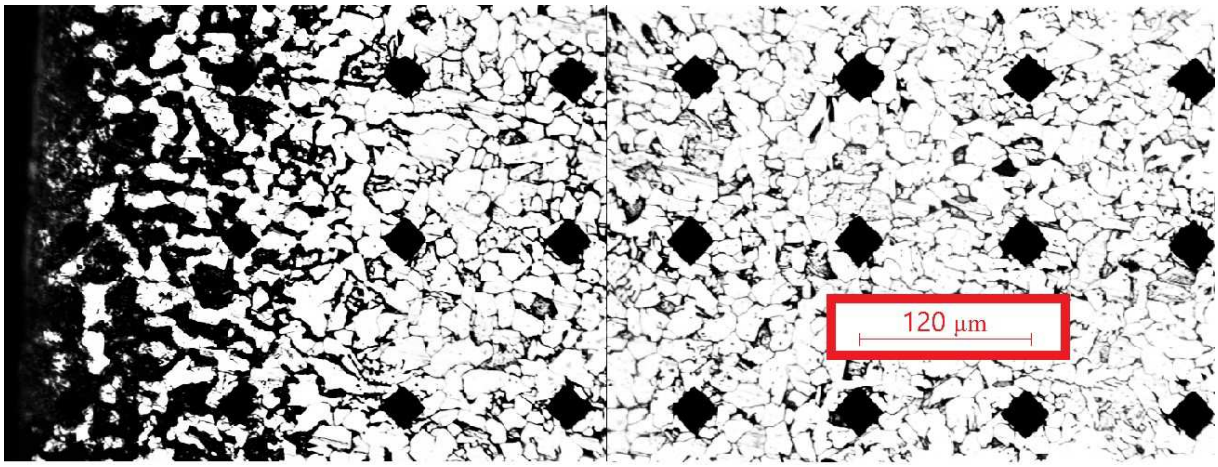


Rys. 8.22. Miejsce cięcia oraz badania mikrotwardości HV0,1

Na rysunku 8.23 przedstawiono schemat wykonania pomiarów mikrotwardości, a na rysunku 8.24 zdjęcie z pomiarów przykładowej płyty próbnej.



Rys. 8.23. Miejsce pomiarów mikrotwardości



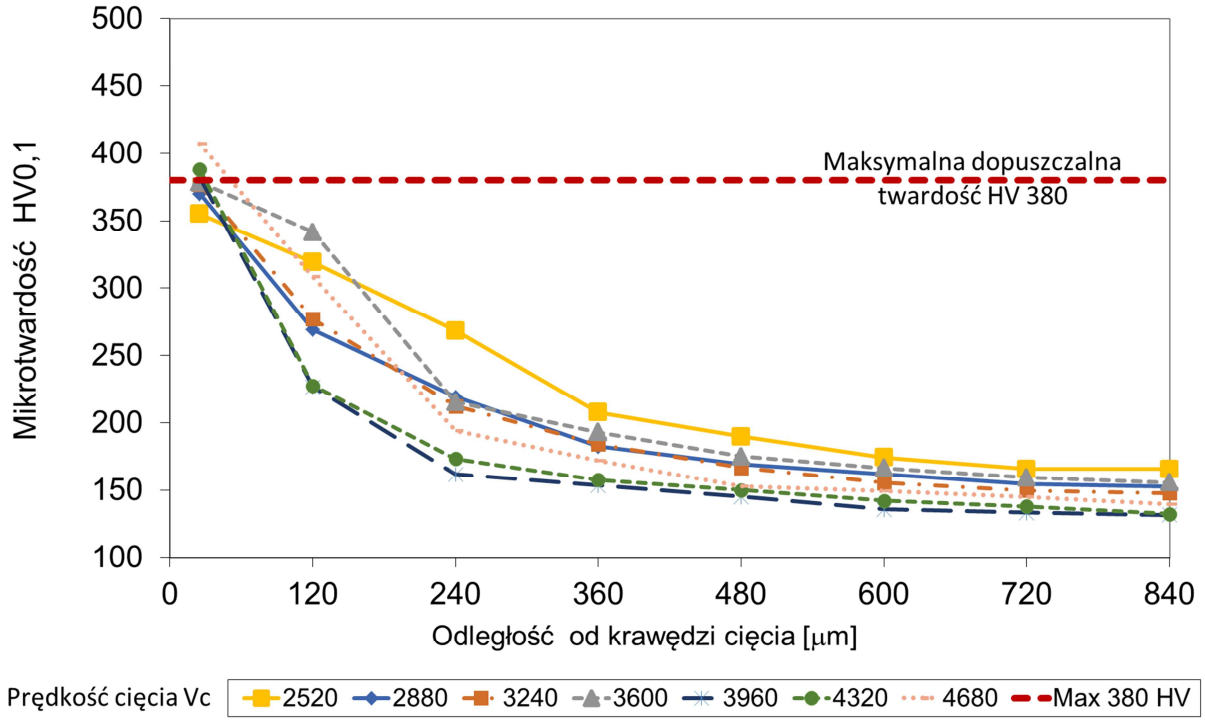
Rys. 8.24. Zdjęcie z pomiarów mikrotwardości

8.6.1. Zestawienie wyników pomiaru mikrotwardości HV0,1

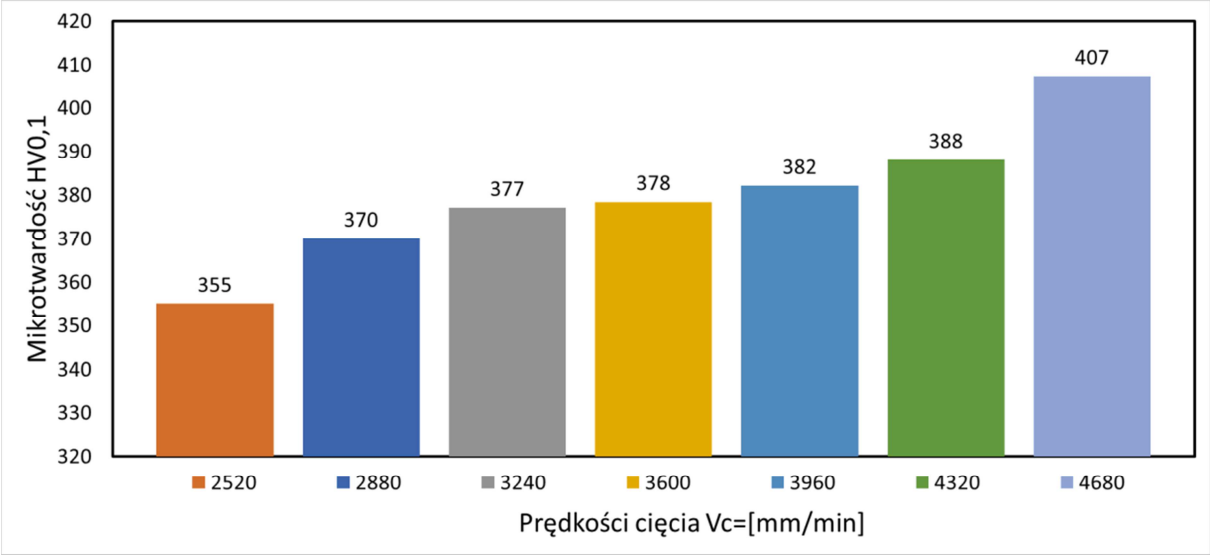
Celem pomiaru mikrotwardości było ustalenie wpływu natężenia prądu oraz prędkości cięcia na zmiany twardości w strefie wpływu ciepła (SWC) blach o różnych grubościach. Wartości zmian twardości wszystkich próbek zestawiono w tabelach od 8.39 do 8.44. Na wykresach od 8.25, 8.27, 8.29, 8.31, 8.33, 8.35 przedstawiono przebieg strefy utwardzenia w głąb materiału rodzimego, a na rysunkach 8.26, 8.28, 8.30, 8.32, 8.34, 8.36 przedstawiono graficznie maksymalną mikrotwardość HV0,1 dla danej badanej płyty próbnej.

Tabela 8.39. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
4/8/1 3600	A	369	348	215	181	168	161	157	154
	B	386	324	213	197	185	168	158	158
	C	380	353	218	201	172	170	163	155
	Średnia	**378**	**342**	**215**	**193**	**175**	**166**	**159**	**156**
4/8/2 2520	A	370	369	298	218	191	191	179	179
	B	315	324	252	199	199	166	166	166
	C	380	265	255	206	179	166	152	152
	Średnia	**355**	**319**	**268**	**208**	**190**	**174**	**166**	**166**
4/8/3 2880	A	369	279	228	187	177	166	151	149
	B	370	279	243	187	173	165	161	157
	C	371	249	187	173	158	155	151	152
	Średnia	**370**	**269**	**219**	**182**	**169**	**162**	**154**	**153**
4/8/4 3240	A	398	272	213	201	172	160	154	151
	B	363	319	204	168	163	157	148	148
	C	370	240	220	183	165	149	147	144
	Średnia	**377**	**277**	**212**	**184**	**167**	**155**	**150**	**148**
4/8/5 3960		385	226	163	158	145	135	135	135
		381	275	165	160	154	148	137	135
		380	179	157	142	136	124	128	125
	Średnia	**382**	**227**	**162**	**153**	**145**	**136**	**133**	**132**
4/8/6 4320		388	231	175	161	154	137	134	132
		390	237	170	157	149	145	139	129
		386	215	175	155	147	144	141	136
	Średnia	**388**	**228**	**173**	**158**	**150**	**142**	**138**	**132**
4/8/7 4680		417	315	199	183	152	155	148	144
		425	338	215	175	160	154	148	135
		380	333	201	185	163	148	140	134
	Średnia	**407**	**329**	**205**	**181**	**158**	**152**	**145**	**138**



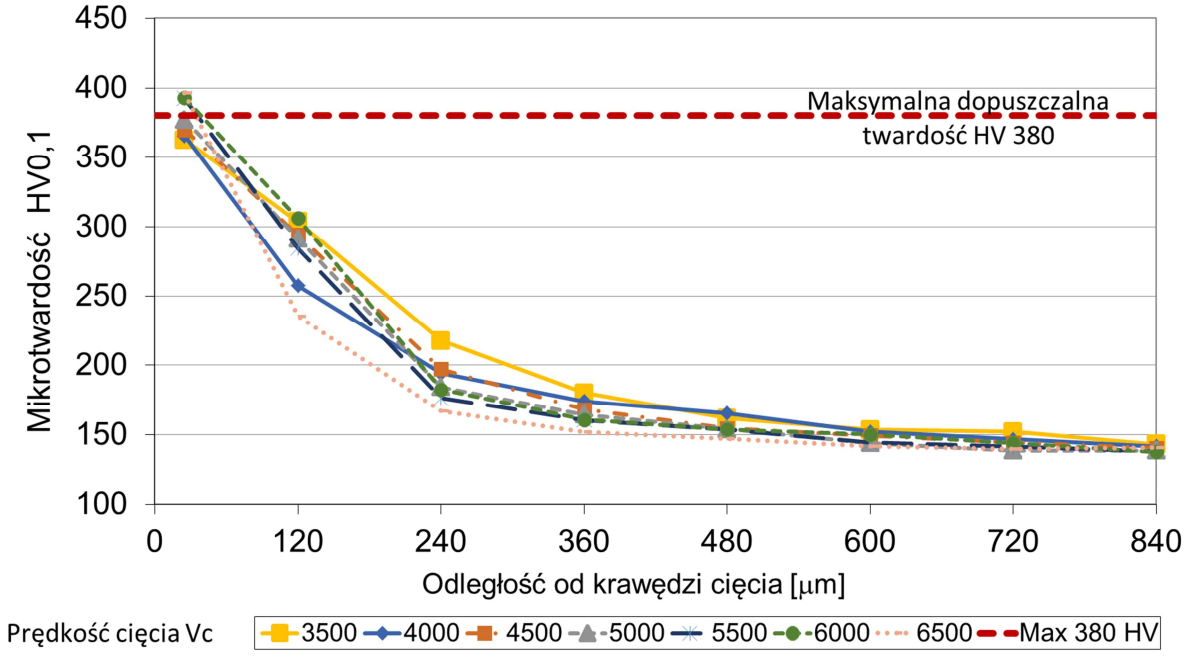
Rys. 8.25. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 4mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A



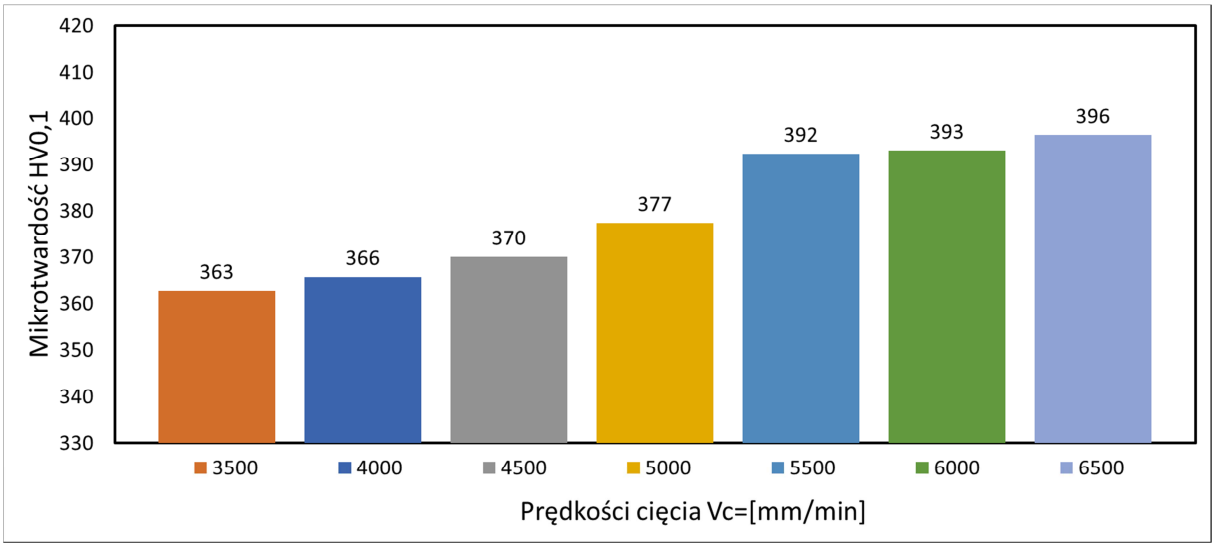
Rys. 8.26. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 9.40. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
4/13/1 5000	A	370	294	193	168	160	148	139	139
	B	380	282	187	170	154	145	139	139
	C	382	298	172	155	148	139	139	139
	Średnia	**377**	**291**	**184**	**164**	**154**	**144**	**139**	**139**
4/13/2 3500	A	360	319	231	177	165	152	155	147
	B	358	290	191	172	154	148	148	140
	C	370	302	231	191	166	160	153	142
	Średnia	**363**	**304**	**218**	**180**	**162**	**153**	**152**	**143**
4/13/3 4000	A	386	265	185	172	166	149	136	135
	B	358	246	206	165	155	149	152	142
	C	353	261	191	185	175	158	152	148
	Średnia	**366**	**257**	**194**	**174**	**165**	**152**	**147**	**142**
4/13/4 4500	A	404	328	193	168	158	155	145	142
	B	358	286	199	175	157	152	151	142
		348	268	199	161	148	141	137	137
	Średnia	**370**	**294**	**197**	**168**	**154**	**149**	**144**	**140**
4/13/5 5500		411	265	181	149	152	142	140	136
		386	306	168	157	154	140	139	139
		380	282	179	175	154	151	145	140
	Średnia	**392**	**284**	**176**	**160**	**153**	**144**	**141**	**138**
4/13/6 6000		386	294	189	160	152	148	141	137
		378	261	201	165	157	145	139	135
		415	363	157	157	152	157	152	141
	Średnia	**393**	**306**	**182**	**161**	**154**	**150**	**144**	**138**
4/13/7 6500		392	226	163	141	137	137	132	134
		392	208	170	157	157	149	149	139
		405	272	168	158	147	139	139	139
	Średnia	**396**	**235**	**167**	**152**	**147**	**142**	**140**	**137**



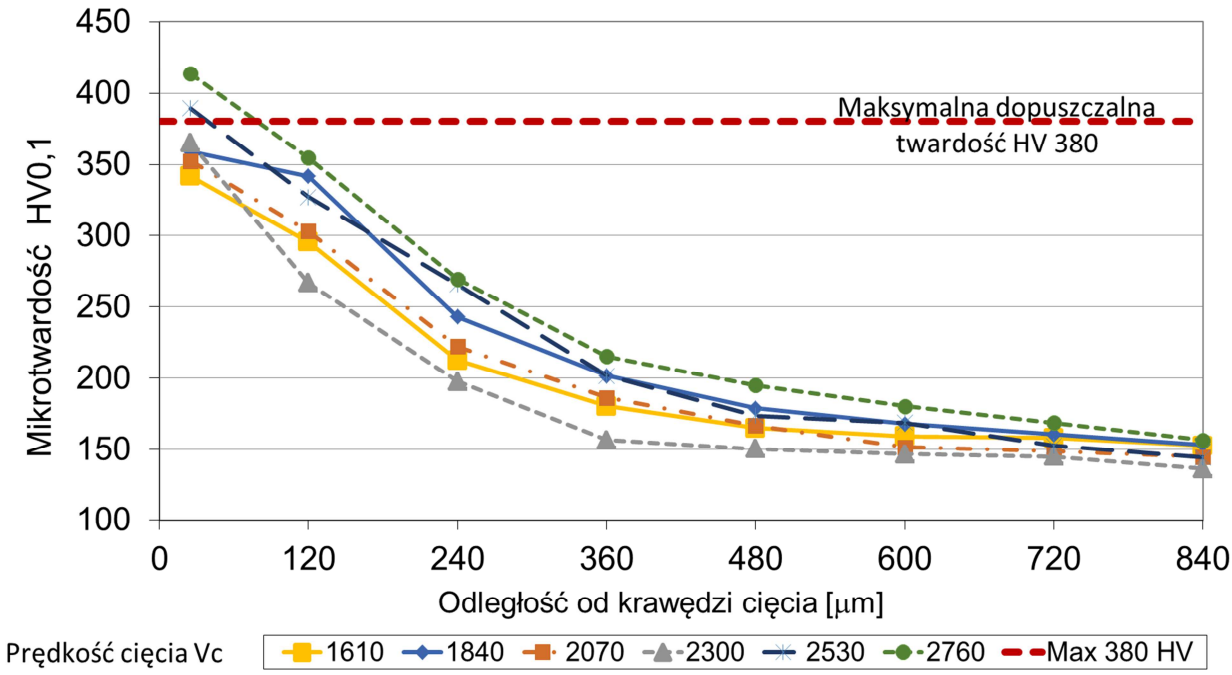
Rys. 8.27. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 4mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A



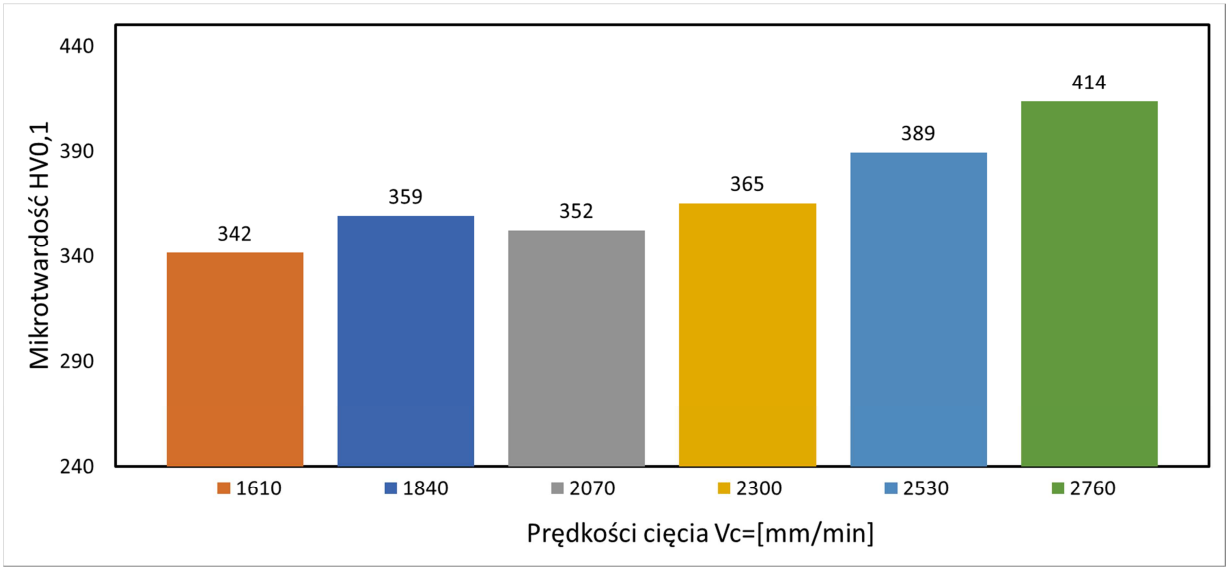
Rys. 8.28. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A

Tabela 8.41. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
8/8/1 2300	A	358	261	201	151	149	145	145	135
	B	378	268	197	161	147	147	146	139
	C	359	272	195	158	155	148	144	135
	Średnia	**365**	**267**	**198**	**157**	**150**	**147**	**145**	**136**
8/8/2 1610	A	324	268	206	167	163	157	154	154
	B	354	310	204	175	166	166	160	152
	C	347	309	228	199	166	155	160	152
	Średnia	**342**	**296**	**213**	**180**	**165**	**159**	**158**	**153**
8/8/3 1840	A	355	353	243	206	181	172	165	155
	B	360	353	228	201	175	165	155	151
	C	362	319	258	198	181	167	162	154
	Średnia	**359**	**342**	**243**	**202**	**179**	**168**	**161**	**153**
8/8/4 2070	A	358	315	223	183	155	147	145	140
	B	348	295	228	187	173	153	149	144
		351	299	216	189	172	155	152	150
	Średnia	**352**	**303**	**222**	**186**	**167**	**152**	**149**	**145**
8/8/5 2530		389	350	275	204	177	170	165	143
		399	320	265	204	166	170	149	145
		380	311	258	197	178	166	144	145
	Średnia	**389**	**327**	**266**	**202**	**174**	**169**	**153**	**144**
8/8/6 2760		424	386	268	218	197	185	168	152
		396	340	255	213	191	175	168	158
		421	338	286	215	197	181	170	160
	Średnia	**414**	**355**	**270**	**215**	**195**	**180**	**169**	**157**



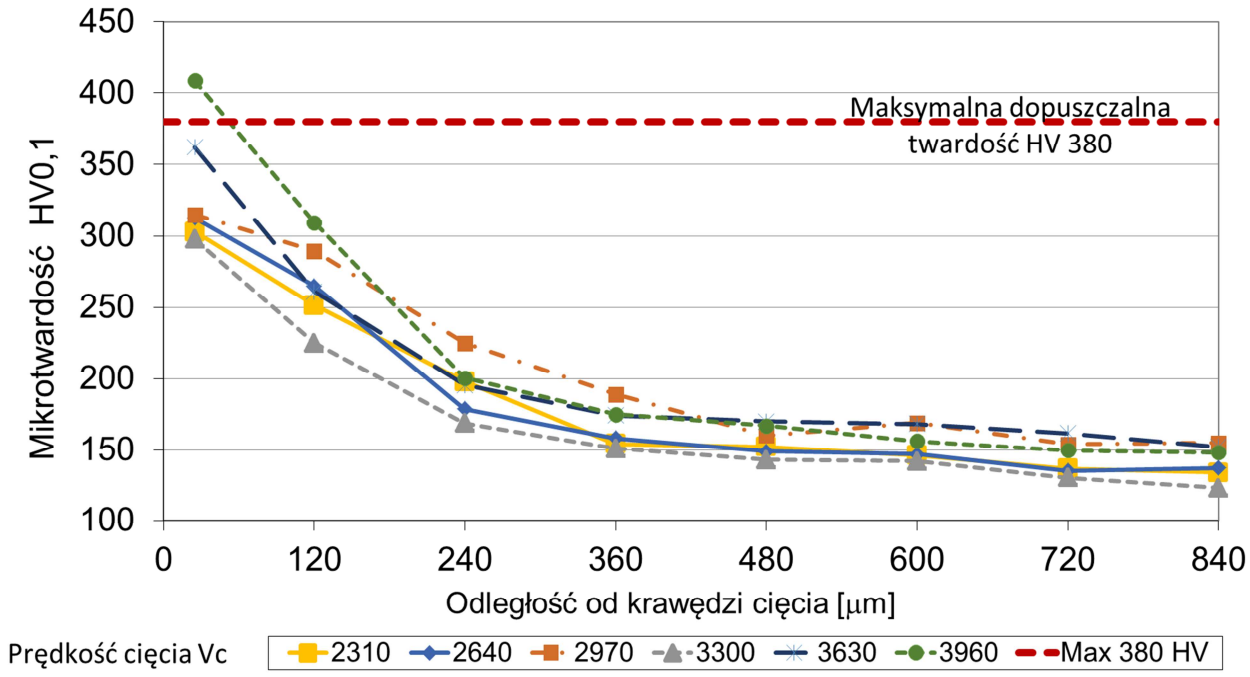
Rys. 8.29. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A



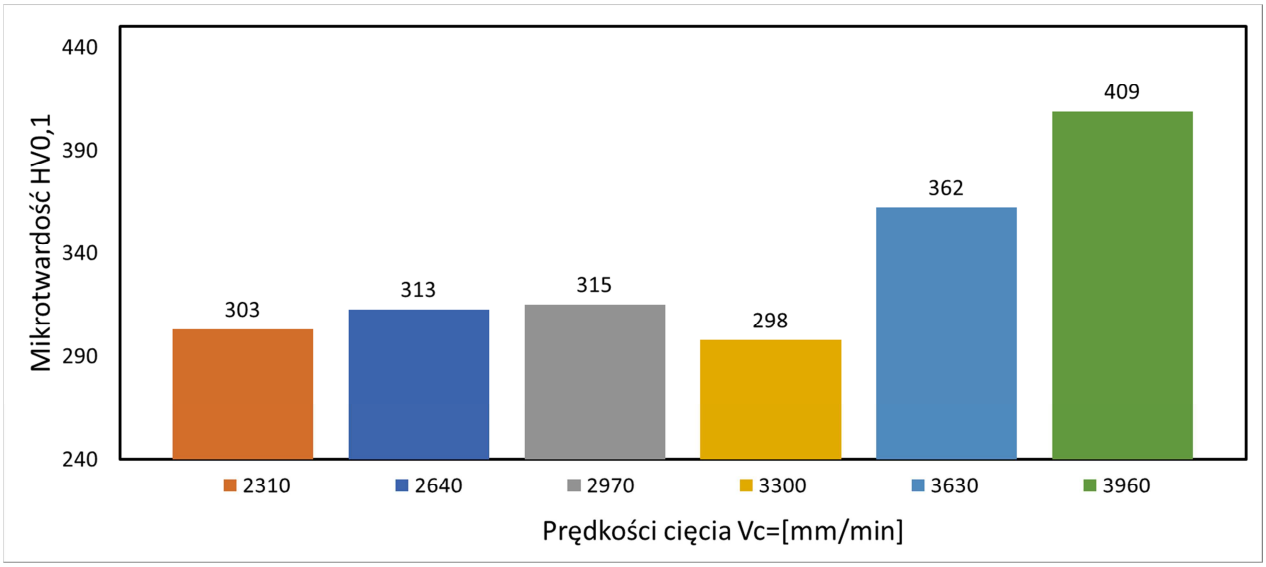
Rys. 8.30. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 8.42. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
8/13/1 3300	A	320	230	166	149	137	140	127	123
	B	295	234	168	149	142	137	130	121
	C	278	211	172	155	150	149	134	125
	Średnia	**298**	**225**	**169**	**151**	**143**	**142**	**130**	**123**
8/13/2 2310	A	296	243	193	149	142	139	130	122
	B	318	278	211	149	155	150	140	140
	C	295	233	190	165	160	150	140	140
	Średnia	**303**	**251**	**198**	**154**	**152**	**146**	**137**	**134**
8/13/3 2640	A	298	255	170	152	148	140	132	132
	B	338	272	185	158	148	149	135	138
	C	302	268	181	165	151	152	139	142
	Średnia	**313**	**265**	**179**	**158**	**149**	**147**	**135**	**137**
8/13/4 2970	A	315	288	223	177	118	185	165	170
	B	318	290	234	191	183	161	139	144
	C	312	290	218	199	180	161	158	151
	Średnia	**315**	**289**	**225**	**189**	**160**	**169**	**154**	**155**
8/13/5 3630	A	374	270	185	167	170	170	165	152
	B	362	236	204	176	175	170	165	155
	C	350	277	197	180	165	165	155	150
	Średnia	**362**	**261**	**195**	**174**	**170**	**168**	**162**	**152**
8/13/6 3960	A	404	302	195	165	163	158	149	147
	B	411	306	211	185	170	157	148	149
	C	411	320	195	175	168	154	152	149
	Średnia	**409**	**309**	**200**	**175**	**167**	**156**	**150**	**148**



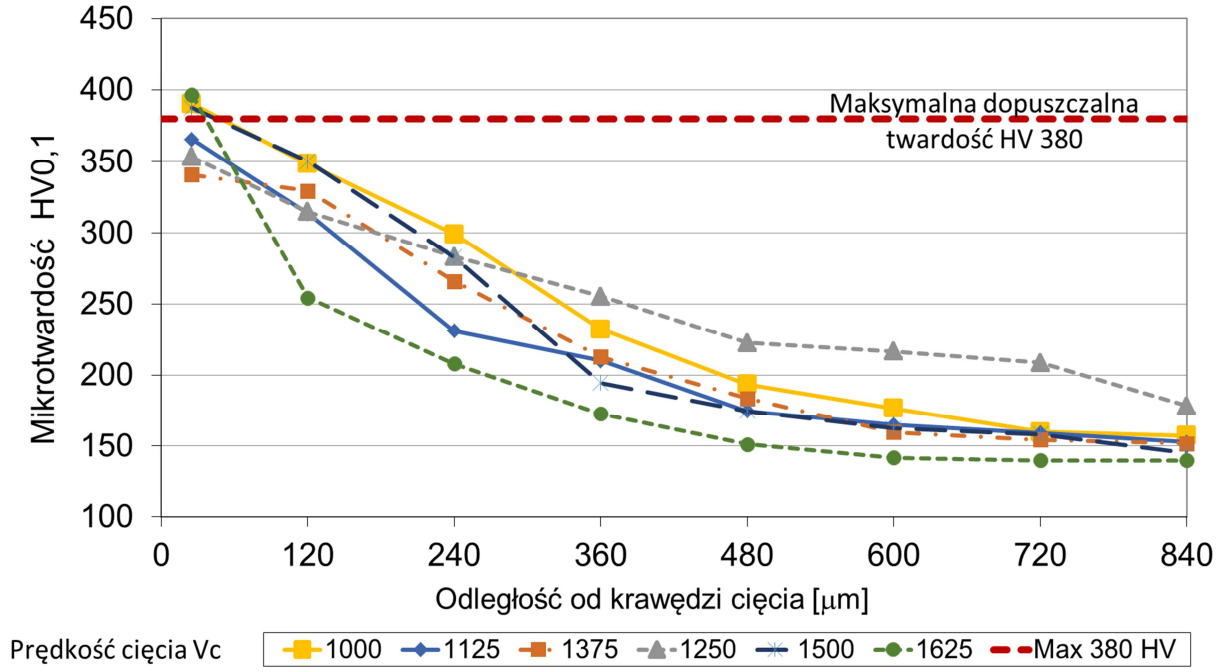
Rys. 8.31. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A



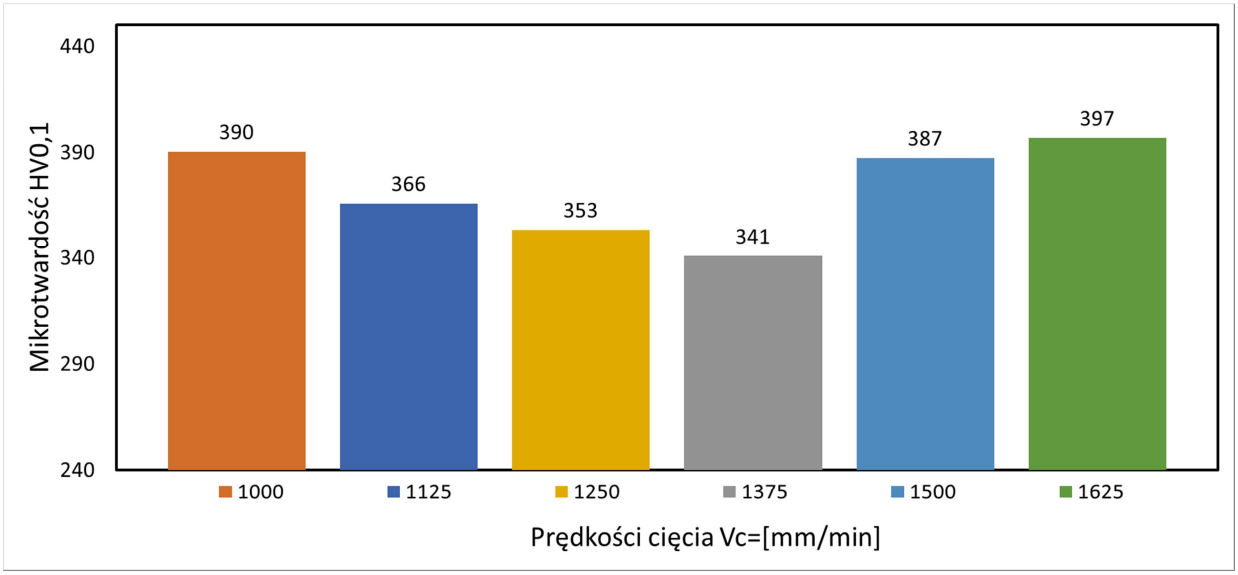
Rys. 8.32. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A

Tabela 8.43. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
12/8/1 1250	A	374	353	343	240	234	213	197	197
	B	348	306	261	258	223	226	228	168
	C	338	286	246	268	211	211	201	170
	Średnia	**353**	**315**	**283**	**255**	**223**	**217**	**209**	**178**
12/8/3 1000	A	374	319	255	211	201	183	163	155
	B	380	353	324	231	168	168	157	157
	C	417	374	319	255	211	179	160	160
	Średnia	**390**	**349**	**299**	**232**	**193**	**177**	**160**	**157**
12/8/4 1125	A	363	328	195	211	183	168	163	160
	B	386	319	246	213	166	161	155	149
	C	348	294	252	206	175	166	160	149
	Średnia	**366**	**314**	**231**	**210**	**175**	**165**	**159**	**153**
12/8/5 1375		347	331	250	201	180	161	157	151
		343	333	272	216	181	154	148	147
		333	325	276	221	190	164	158	157
	Średnia	**341**	**330**	**266**	**213**	**184**	**160**	**154**	**152**
12/8/6 1500		386	354	290	189	170	165	158	142
		388	354	284	199	175	161	159	146
		388	343	275	195	179	161	158	147
	Średnia	**387**	**350**	**283**	**194**	**175**	**162**	**158**	**145**
12/8/7 1625		403	258	215	173	152	142	140	140
		398	249	205	170	151	142	140	140
		389	256	204	175	151	142	140	140
	Średnia	**397**	**254**	**208**	**173**	**151**	**142**	**140**	**140**



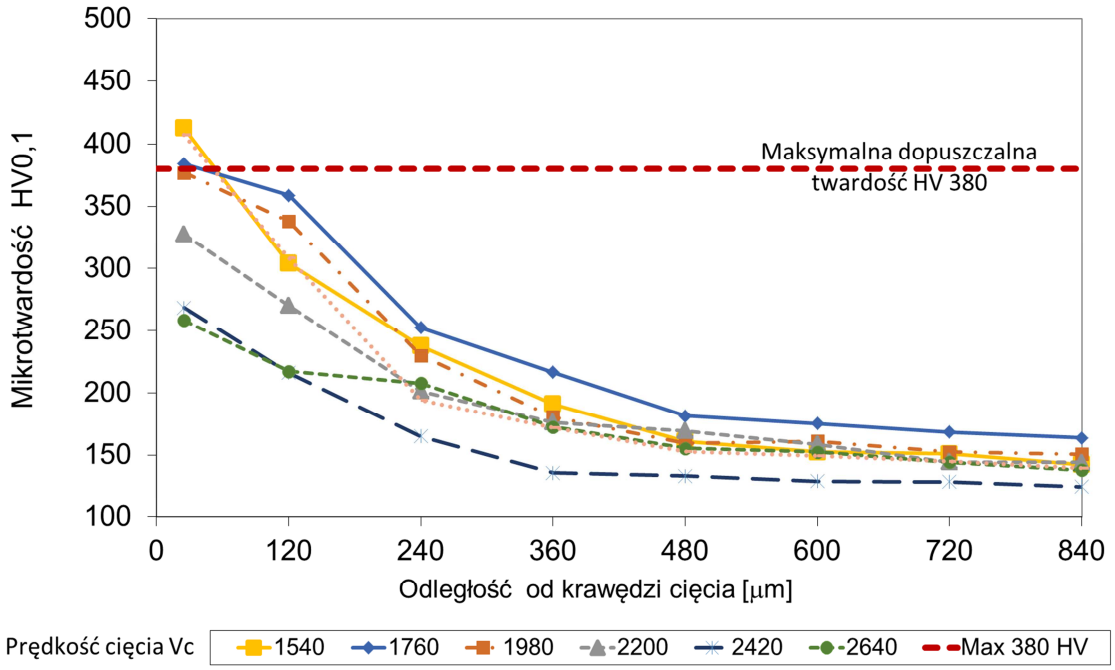
Rys. 8.33. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A



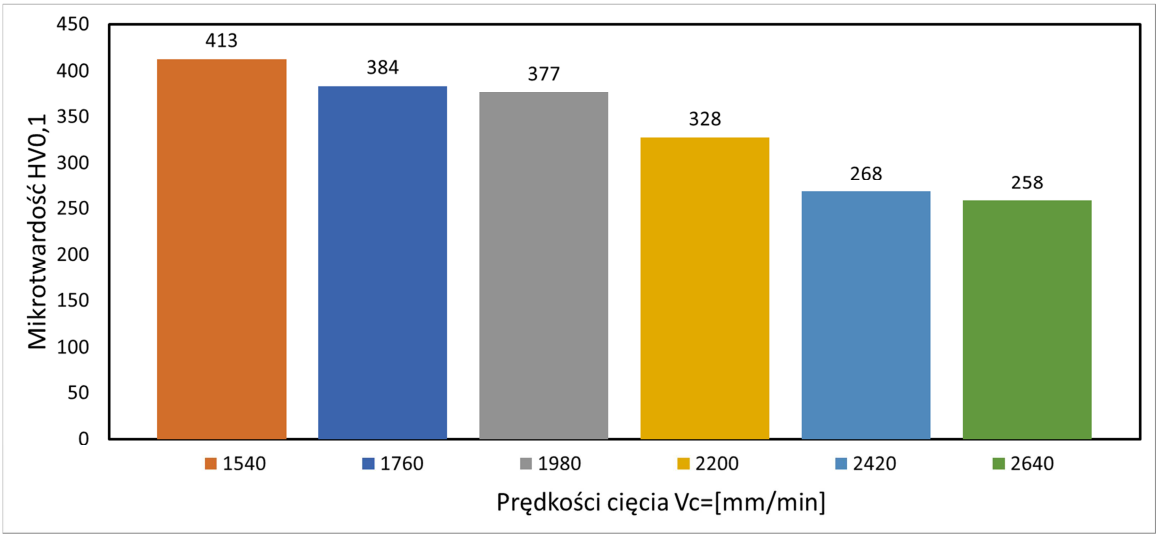
Rys. 8.34. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 8.44. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Odległości od krawędzi cięcia [µm]		25	120	240	360	480	600	720	840
Miejsce pomiaru		1	2	3	4	5	6	7	8
Numer płyty	Rzędy pomiarów								
12/13/1 2200	A	353	294	189	179	169	160	142	145
	B	315	261	187	175	173	154	147	145
	C	315	255	228	175	166	162	144	142
	Średnia	**328**	**270**	**201**	**176**	**169**	**159**	**144**	**144**
12/13/2 1540	A	420	302	221	168	148	152	147	142
	B	404	328	231	197	165	158	166	140
	C	414	282	261	208	170	147	140	145
	Średnia	**413**	**304**	**238**	**191**	**161**	**152**	**151**	**142**
12/13/3 1760	A	386	369	243	223	181	179	170	170
	B	386	369	246	199	191	179	175	166
	C	380	338	268	228	172	168	160	155
	Średnia	**384**	**359**	**252**	**217**	**181**	**175**	**168**	**164**
12/13/4 1980	A	374	353	228	185	161	166	157	152
	B	404	333	231	168	151	152	145	148
	C	353	328	231	189	167	165	155	152
	Średnia	**377**	**338**	**230**	**181**	**160**	**161**	**152**	**151**
12/13/5 2420	A	275	206	157	137	135	128	128	127
	B	265	231	166	135	130	128	128	125
	C	265	211	172	135	135	131	130	122
	Średnia	**268**	**216**	**165**	**136**	**133**	**129**	**129**	**125**
12/13/6 2640	A	266	218	204	172	151	147	149	144
	B	244	212	228	183	160	158	137	136
	C	265	222	191	163	155	152	147	134
	Średnia	**258**	**217**	**208**	**173**	**155**	**152**	**144**	**138**



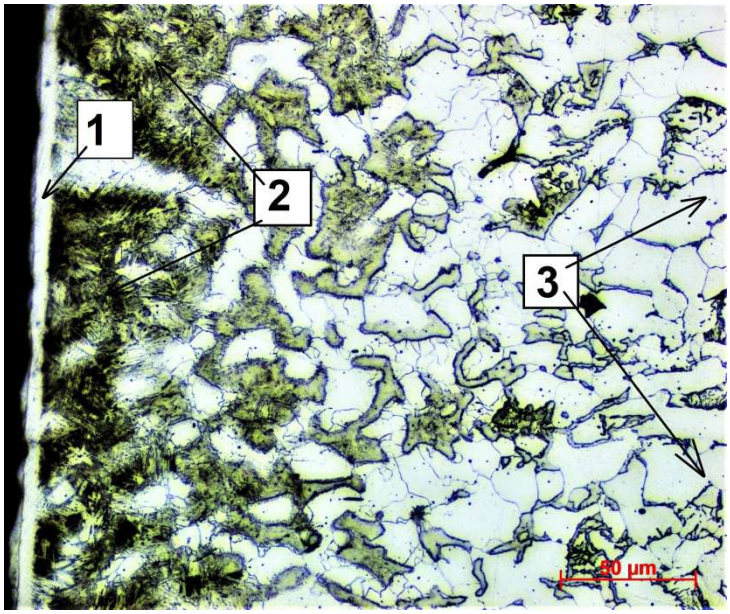
Rys. 8.35. Rozkład mikrotwardości na poszczególnych odległościach od krawędzi cięcia płyt próbnych o gr. 12 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A



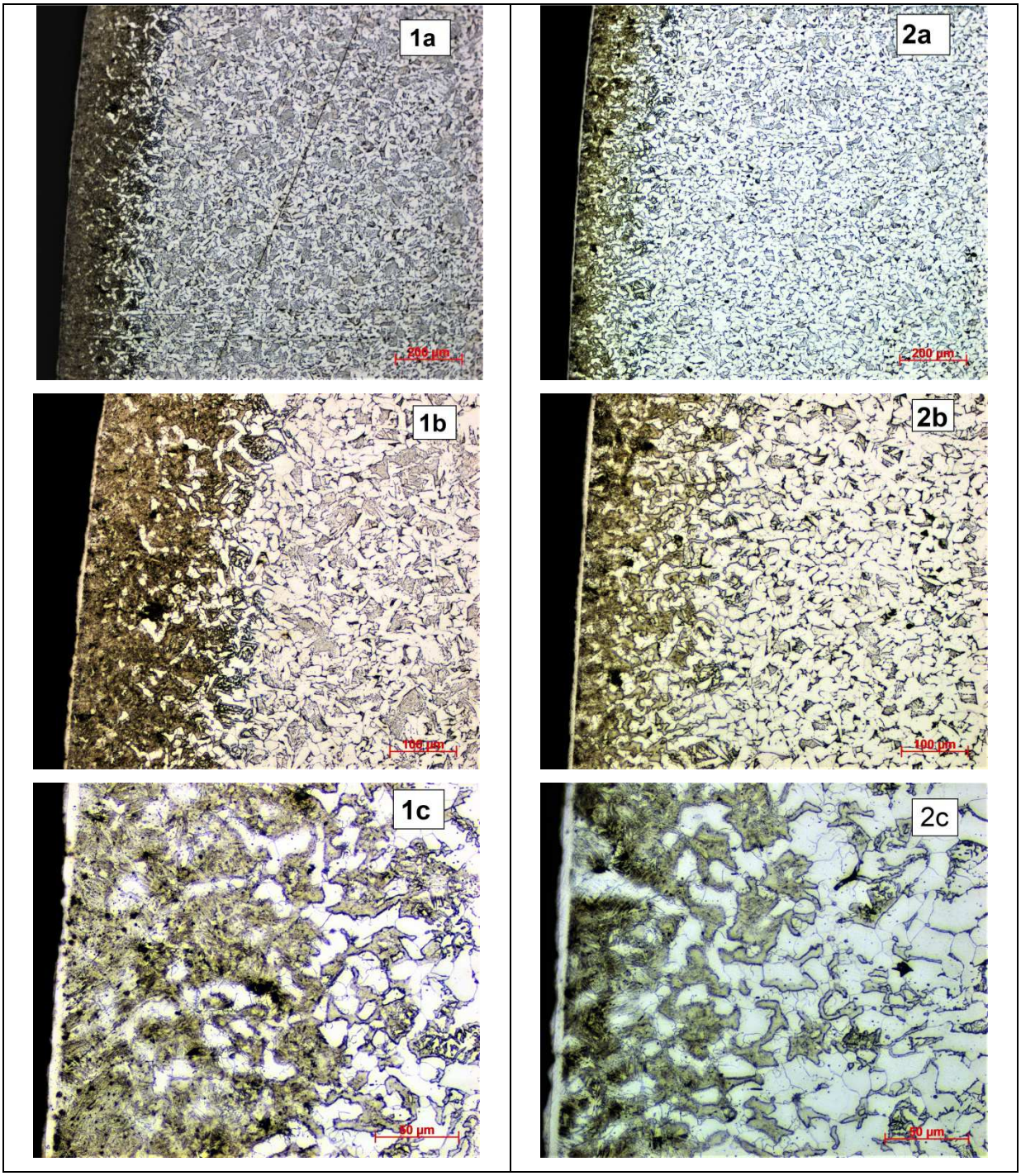
Rys. 8.36. Maksymalna średnia mikrotwardość dla poszczególnych prędkości cięcia płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych przy natężeniu prądu 130 A

8.6.2. Analiza wyników pomiaru mikrotwardości HV0,1

Na podstawie analizy wyników pomiarów mikrotwardości, można stwierdzić, że dla poszczególnych grubości blach największe wartości uzyskano przy cięciu blach z największą prędkością. Prędkość cięcia oraz natężenie prądu powoduje silne przegrzanie materiału powyżej linii A3, czyli temperatury austenityzacji. Jest to związane z mniejszą ilością energii cieplnej wprowadzonej do elementu ciętego materiału oraz skróceniem czasu stygnięcia $t_{8/5}$. Zmiany strukturalne obejmują obszar około 1 mm [135]. W odległości ~ 0,01 mm od krawędzi cięcia występuje biała, porowata i bardzo krucha warstwa. Przy szybkim chłodzeniu (krótkie czasy $t_{8/5}$) stali gatunku S235JR, powstaje mikrostruktura bainityczna, charakteryzująca się podwyższoną twardością zgodnie z wykresem CTPc-S [14]. Taką mikrostrukturę zauważono na długości ~0,035 mm. W większej odległości od krawędzi cięcia w mikrostrukturze rośnie udział fazy ferrytycznej (dłuższe czasy stygnięcia $t_{8/5}$), a w odległości powyżej 0,7 mm strukturę stanowi ferryt z niewielką ilością perlitu odpowiadającą strukturze materiału rodzimego (rys 8.37) [140]. Na rysunku 8.38 przedstawiono przykład wpływu temperatury cięcia plazmowego na zmiany mikrostrukturalne blachy o grubości 4 mm ciętej z prędkością 3600 mm/min z natężeniem prądu 80 A oraz blachy o grubości 4 mm ciętej z prędkością 5000 mm/min z natężeniem prądu 130 A. Podane prędkości są rekomendowane przez doświadczonego operatora.



Rys 8.37. Przekrój poprzeczny powierzchni stali S235 JR wg po cięciu plazmowym. Mikrostruktury: 1-banityczna, 2-bainityczna z niewielką ilością ferrytu, 3-ferrytyczno-perlityczna, materiał rodzimy [140]



Rys. 8.38. Przekrój poprzeczny płyt próbnych o grubości 4 mm. 1 płyta próbna cięta z prędkością 3600 mm/min przy natężeniu prądu 80A. 1a - powiększenie x 100, 1b – powiększenie x200, 1c - powiększenie x 300. 2 płyta próbna cięta z prędkością 5000 mm/min przy natężeniu prądu 130 A. 2a - powiększenie x100, 2b – powiększenie x 200, 2c – powiększenie x 500 [140]

Porównując wyniki pomiaru mikrotwardości blach próbnych o grubości 4 mm ciętych przy natężeniem prądu 80 i 130 A, stwierdzono, że najmniejsze zmiany w SWC uwidoczniono na płytach próbnych ciętych z najniższymi prędkościami. Najniższe wartości dla płyty próbnej o gr 4 mm ciętej z prędkością 2520 mm/min przy natężeniu prądu 80 A wyniosły średnio 355 HV0,1, a dla płyty próbnej o gr 4 mm ciętej z prędkością 3500 mm/min

przy natężeniu prądu 130 A wyniosły średnio 363 HV0,1. Można stwierdzić, że są to mikrotwardości porównywalne i znajdują się w dopuszczalnym zakresie zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 1090-2. Największą średnią wartość dla blach próbnych o gr 4 mm ciętych z natężeniem 80 A i 130 A zmierzono na płytach ciętych z najwyższymi prędkościami. Dla płyty próbnej o gr. 4 mm ciętej z prędkością 4680 mm/min przy natężeniu prądu 80 A wynosi średnio 407 HV0,1, natomiast dla płyty ciętej przy natężeniu 130 A z prędkością 6500 mm/min wynosi 396 HV0,1. Płyty próbne, cięte z prędkością najwyższą, przekraczają wartości dopuszczalne (380 HV) zgodnie z obowiązującą normą. Zakres prędkości dopuszczalnych dla płyty o gr. 4 mm ciętej przy natężeniu 80 A wynosi od 2520 mm/min do 3600 mm/min. Przy takich prędkościach średnia mikrotwardość nie przekracza dopuszczalnej twardości 380 HV. Krytyczną wartość dopuszczalną 377 i 378 HV0,1 otrzymano podczas cięcia z prędkością od 3240 mm/min do 3600 mm/min. Krawędzie płyt o gr. 4 mm, ciętych przy natężeniu prądu 80 A z prędkościami od 3960 mm/min do 4680 mm/min, po cięciu plazmowym, aby były dopuszczone do dalszej produkcji, powinny być poddane dalszej obróbce w celu usunięcia utwardzonej warstwy na głębokość od min. 0,7 mm. Zakres prędkości dopuszczalnych dla płyt o gr. 4 mm, ciętych przy natężeniu prądu 130 A, wynosi od 3500 mm/min do 5000 mm/min. Prędkość 5000 mm/min jest prędkością graniczną, przy której twardość krawędzi po cięciu plazmowym wynosi 377 HV0,1. Krawędzie płyt o gr. 4 mm, ciętych przy natężeniu prądu 130 A z prędkością cięcia w zakresie od 5500 mm/min do 6500 mm/min, powinny być poddane obróbce usunięcia warstwy wierzchniej na min 0,7 mm.

Analizując wyniki mikrotwardości ciętych płyt próbnych o grubości 8 mm przy natężeniem prądu 80 A i 130 A, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkością cięcia zwiększa się mikrotwardość materiału. Najniższa średnia wartość dla płyty o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A z prędkością 1610 mm/min, wynosi 342 HV0,1. Dla płyty o gr. 8mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A z prędkością 2310 mm/min, wynosi 303 HV0,1. Największą średnią twardość 414 HV0,1 zmierzono na płycie o grubości 8 mm, ciętej przy natężeniu 80 A ciętej z prędkością 2760 mm/min. Jest to prędkość bliska krytycznej, umożliwiająca wykonanie procesu cięcia. Prędkość cięcia 3960 mm/min płyty o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A, powoduje wzrost twardości do średniej wartości 409 HV0,1. W dwóch przypadkach największe twardości przekroczyły dopuszczalna wartość 380 HV zgodnie z normą PN-EN ISO 1090-2. Zakres prędkości dla dopuszczalnej twardości płyt o gr 8 mm, ciętych przy natężeniu prądu 80 A, wynosi od 1610 do 2300 mm/min i jest to zakres „bezpieczny”. Bezpieczny, ponieważ żaden pomiar nie przekroczył 380 HV. Zakres

prędkości dla płyt o gr 8 mm, ciętych przy natężeniu prądu 130 A, wynosi od 2310 mm/min do 3630 mm/min i również w tym zakresie prędkości żaden z pomiarów nie przekroczył maksymalnej dopuszczalnej twardość 380 HV.

Zmiana natężenia prądu ma znaczący wpływ na cięcie plazmowe płyt próbnych o grubość 12 mm. Zwiększenie prędkości cięcia plazmowego płyt przy natężeniu prądu 80 A i 130 A przyniosło pozytywny skutek. Podczas cięcia plazmowego z zastosowaniem natężenia prądu 80 A najniższą wartość zmierzono na płycie ciętej z prędkością 1375 mm/min. Jest to prędkość pośrednia pomiędzy najniższą prędkością cięcia, która wynosiła 875 mm/min, a najwyższą 1625 mm/min. Zakres prędkości dopuszczalnych dla płyt o grubości 12 mm wynosi od 1125 mm/min do 1375 mm/min, gdzie mikrotwardość badanych płyt próbnych znajduje się w przedziale od 341 HV0,1 do 366 HV0,1. Analizując wynik badań eksperymentalnych cięcia plazmowego płyt próbnych o gr 12 mm, ciętych przy natężeniu prądu 130 A, stwierdzono, że cięcie z najwyższą możliwą prędkością wykazało najmniejszy wpływ temperatury na zmiany w mikrostrukturze stali. Najniższe HV0,1 zmierzono na płycie ciętej z prędkością 2640 mm/min, które wynosi średnio 258 HV0,1. Największą i niedopuszczalną mikrotwardość HV0,1 zmierzono na płycie próbnej, ciętej z prędkością najniższa wynoszącą 1540 mm/min. Przy tej prędkości mikrotwardość wynosi średnio 413 w skali Vickers'a. Należy zwrócić uwagę, że prędkość cięcia powyżej 2640 mm/min uniemożliwiła proces cięcia. Dopuszczalne wartości prędkości cięci dla płyty o gr 12 mm, ciętych przy natężeniu prądu 130 A, wynoszą od 1980 mm/min do 2640 mm/min. W tabeli 8.45 zestawiono wszystkie dopuszczalne prędkości oraz parametry cięcia plazmowego dla badanych płyt próbnych. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że prędkość cięcia plazmowego ma znaczący wpływ nie tylko na występowanie wypływek, na prostopadłość ciętych krawędzi, szerokość rowka, ale również na zmiany mikrostrukturalne ciętych blach, które wpływają na twardości krawędzi po cięciu.

Tabela 8.45 Dopuszczalne prędkości oraz parametry cięcia dla poszczególnych płyt próbnych

Grubość materiału	Natężenie prądu cięcia	Prędkość cięcia	Napięcie	Ciśnienie gazu		Wysokość		Czas przebijania	Odsunięcie palnika podczas przebijania
				Przebijanie	Cięcie	Palnika	Startu		
[mm]	[A]	[mm/min]	[V]	[bar]	[bar]	[mm]	[mm]	[s]	[mm]
4	80	2520 - 3600	142	2,4	5,8	3	4	0,1	0
4	130	3500 - 5000	142	2,5	6,4	3	5	0,1	1
8	80	1610 - 2300	146	2,4	5,8	3	5	0,4	3
8	130	2310 - 3630	146	2,5	6,4	3	6	0,3	3
12	80	1125 - 1250	146	2,4	5,8	3	7	0,5	4
12	130	1980 - 2640	152	2,5	6,4	3,5	7	0,4	4

8.7. Modelowanie zużycia energii oraz określenie kosztu wykonania detalu

Głównym składnikiem kosztów w procesie cięcia plazmowego jest koszt energii elektrycznej. Dopiero w dalszej kolejności należy uwzględnić koszt gazów technicznych i części eksploatacyjnych. Określając kosztochłonność wykonania detalu, przeprowadzono badania zużycia energii elektrycznej. Ich rejestrację przeprowadzono za pomocą mierników poboru energii elektrycznej marki SIMLIC typ LCD-SF/4M, z dokładnością do 0,01 kWh, podłączonych do przecinarki plazmowej oraz sprężarki. Pobór energii elektrycznej przeprowadzono w trakcie normalnego cyklu produkcyjnego, w którym zebrano informacje o energochłonności procesu.

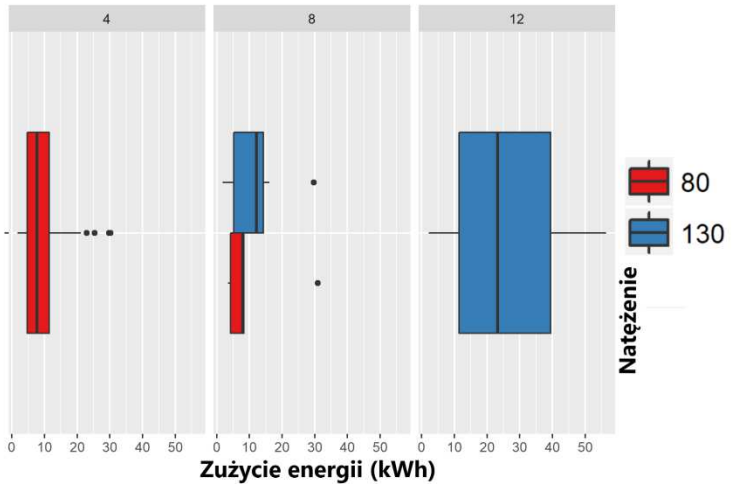
8.7.1. Modelowanie zużycia energii

8.7.1.1. Charakterystyka pomiarów blach

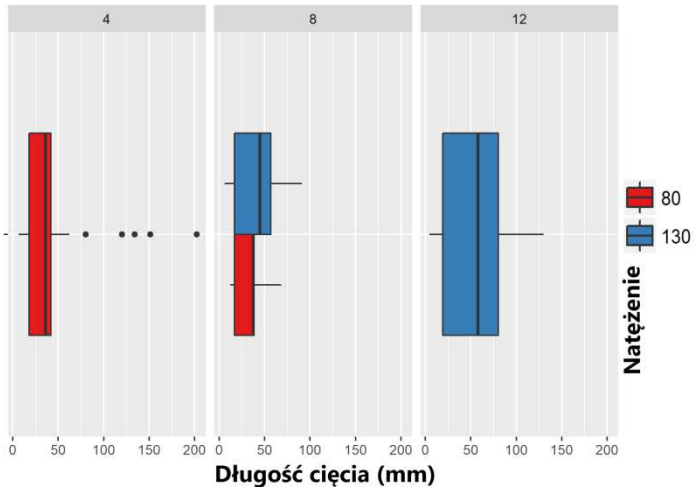
W celu określenia kosztu cięcia detali, wykonano modelowanie zużycia energii w zależności od parametrów, takich jak:

- grubość ciętego materiału,
- długość cięcia,
- liczba wykonanych przebić.

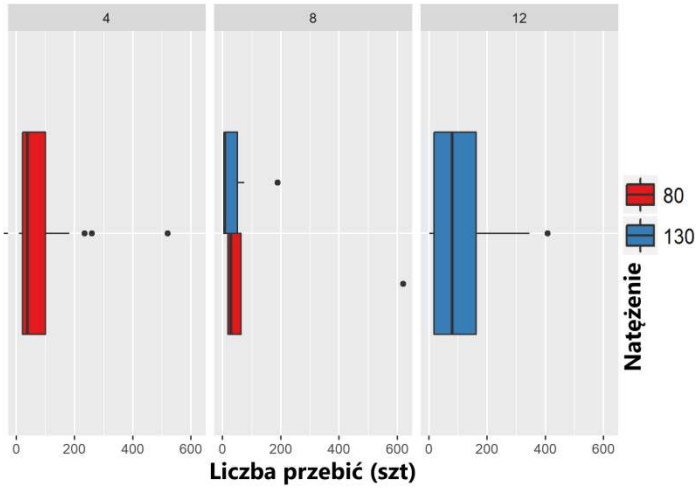
Analizy statystyczne wykonano na podstawie pomiarów uzyskanych z cięcia 122 blach. Na poniższych rysunkach przedstawiono wykresy pudełkowe rozkładów mierzonych parametrów ciętych blach. Na rysunkach 8.39 do 8.41 przedstawiono rozkład zużycia energii elektrycznej dla całości badanego zbioru oraz z podziałem na ilość ciętych metrów oraz ilość wykonanych przebić. Na rysunku 8.42 przedstawiono ilość badanych blach, z podziałem na natężenie prądu oraz ich grubość. Należy zaznaczyć, że badania były wykonane na blachach o grubości 4, 8 i 12 mm. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu programu statystycznego R.



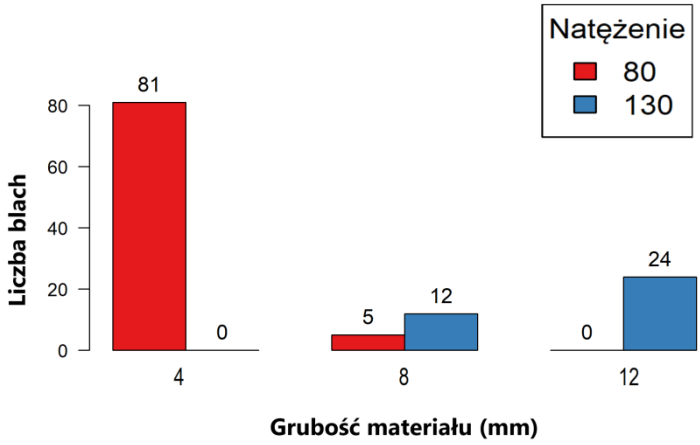
Rys. 8.39. Zużycie energii elektrycznej w trakcie cięcia plazmowego dla blach o gr 4, 8 i 12 mm przy natężeniu prądu 80 i 130 A



Rys. 8.40. Zużycie energii elektrycznej w rozbiciu na długości cięcia poszczególnych grubości blach przy natężeniu prądu 80 i 130 A



Rys. 8.41. Zużycie energii elektrycznej w rozbiciu na ilość przebić blach o gr 4, 8 i 12 mm przy zastosowaniu natężenia prądu 80 i 130 A



Rys. 8.42. Rozkład liczby ciętych blach z podziałem na grubość oraz zastosowanie natężenia prądu przy cięciu plazmowym

W celach formalnych przyjęto następujące oznaczenia dla mierzonych parametrów blachy:

Zmienna zależna:

Y – zużycie energii w (kWh)

Zmienne niezależne:

X_1 – długość cięcia (metry)

X_2 – liczba przebić (sztuki)

Grubość materiału w (mm):

X_{31} – grubość 4mm

X_{32} – grubość 8mm

X_{33} – grubość 12mm

We wnioskowaniu statystycznym, grubość blachy 4 mm, została przyjęta jako poziom referencyjny. Do modelowania zużycia energii elektrycznej przyjęto nieliniową funkcję logarytmiczną postaci:

$$\log(Yi) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(x_{1i}) + \beta_2 \cdot x_{2i} + \beta_3 \cdot x_{32i} + \beta_4 \cdot x_{33i} + \varepsilon_i \quad (8.1)$$

gdzie:

β_0 , β_1, β_2, β_3, β_4 – są to nieznane parametry modelu,

ε_i – błąd losowy odpowiadający i-temu pomiarowi. Zakładamy, że błąd ten jest zmienną losową o rozkładzie $N(0, \sigma^2)$,

i – indeks pomiaru, $i = 1,2, \ldots n$,

n – liczba blach w badanej próbie.

Cała próba liczyła 122 blachy, przy czym została ona podzielona na dwie części:

1. Uczącą - wynosząca 80% ciętych blach,
2. Testową – pozostałe 20% ciętych blach.

Szacowanie modelu nieliniowego (8.1) wykonano na podstawie informacji zawartej w próbie uczącej. Estymację parametrów modelu przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów (MNK). Do oszacowania błędu standardowego, estymatorów tych parametrów, użyto metodę estymacji Neweg'a Westa macierzy kowariancji. Wydzielenie próby testowej posłużyło do oceny jakości szacowanego modelu. Uzyskano model w postaci równania:

$$\mathbf{log}(\boldsymbol{Y}) = -\mathbf{0,991} + \mathbf{0,814} \cdot \mathbf{log}(\boldsymbol{x_1}) + \mathbf{0,002} \cdot \boldsymbol{x_2} + \mathbf{0,237} \cdot \boldsymbol{x_{32}} + \mathbf{0,816} \cdot \boldsymbol{x_{33}} \qquad (8.2)$$

Wszystkie zmienne tzn. długość cięcia, liczba przebić oraz grubość materiału są statystycznie istotne na poziomie istotności α =0,05. Wszystkie p-wartości były mniejsze od 0,001, co oznacza, że parametry te statystycznie istotnie wpłynęły na ilość zużytej energii.
W tabeli 8.46 przedstawiono wyniki estymacji założonego modelu.

Tabela 8.46. Wynik estymacji przyjętego modelu

Parametr	Estymator	Błąd standardowy estymatora	Wartość statystyki testowej, t	p - value
β_0	-0,991	0,105	-9,48	<0,001
β_1	0,814	0,031	26,52	<0,001
β_2	0,002	0,0002	8,25	<0,001
β_3	0,237	0,041	5,85	<0,001
β_4	0,816	0,068	11,98	<0,001
R^2=0,953, R^2_{adi}=0,95				

Na podstawie oszacowania modelu (8.2), wyznaczono równania opisujące energię dla poszczególnych grubości blach.

Dla blachy o grubości 4 mm:

$$\mathbf{log}(\boldsymbol{Y}) = -\mathbf{0,991} + \mathbf{0,814}\,\mathbf{log}(\boldsymbol{x_1}) + \mathbf{0,002}\boldsymbol{x_2}$$

Stąd średnie zużycie energii dla tej grubości wyznaczamy z równania:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{e}^{-\mathbf{0,991}} \cdot \boldsymbol{x_1}^{\mathbf{0,814}} \cdot \boldsymbol{e}^{\mathbf{0,002}\boldsymbol{x_2}}$$

czyli

$$\boldsymbol{Y} = \mathbf{0,371} \cdot \boldsymbol{x_1}^{\mathbf{0,814}} \cdot \mathbf{1,002}^{\boldsymbol{x_2}} \qquad (8.3)$$

Dla blachy o grubości 8 mm

$$\mathbf{log}(\boldsymbol{Y}) = -\mathbf{0,754} + \mathbf{0,814}\,\mathbf{log}(\boldsymbol{x_1}) + \mathbf{0,002}\boldsymbol{x_2}$$

Stąd średnie zużycie energii dla tej grubości wyznaczamy z równania:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{e}^{-\mathbf{0,754}} * \boldsymbol{x_1}^{\mathbf{0,814}} * \boldsymbol{e}^{\mathbf{0,002}\boldsymbol{x_2}}$$

czyli

$$\boldsymbol{Y = 0,47 * x_1^{0,814} * 1,002^{x_2}} \quad (8.4)$$

Dla 12 mm

$$\boldsymbol{log(Y) = -0,175 + 0,814\, log(x_1) + 0,002x_2}$$

Stąd średnie zużycie energii dla tej grubości wyznaczamy z równania:

$$\boldsymbol{Y = e^{-0,175} * x_1^{0,814} * e^{0,002x_2}}$$

czyli

$$\boldsymbol{Y = 0,839 * x_1^{0,814} * 1,002^{x_2}} \quad (8.5)$$

Na podstawie otrzymanych równań (8.3 – 8.5), opisujących zużycie energii elektrycznej, sformułowano poniższe wnioski:

Skupiając się na długości cięcia, możemy oczekiwać, że wzrost długości cięcia blachy o 1% powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej średnio o 0,814% przy założeniu, że pozostałe parametry blachy, tj. jej grubość i liczba przebić, pozostaną stałe (ceteris paribus).

Biorąc pod uwagę liczbę przebić, możemy oczekiwać, że wzrost liczby przebić o 1 sztukę wiąże się ze wzrostem zużycia energii średnio o 0,2% przy ustalonych pozostałych zmiennych, tzn. długość cięcia i grubość blachy.

Rozważając grubość blachy, przy ustalonej jej długości cięcia i liczby przebić, można oczekiwać, że dla blachy o gr. 8 mm, w porównaniu do blachy o gr 4 mm, zużycie energii będzie średnio o 26,7% wyższe.

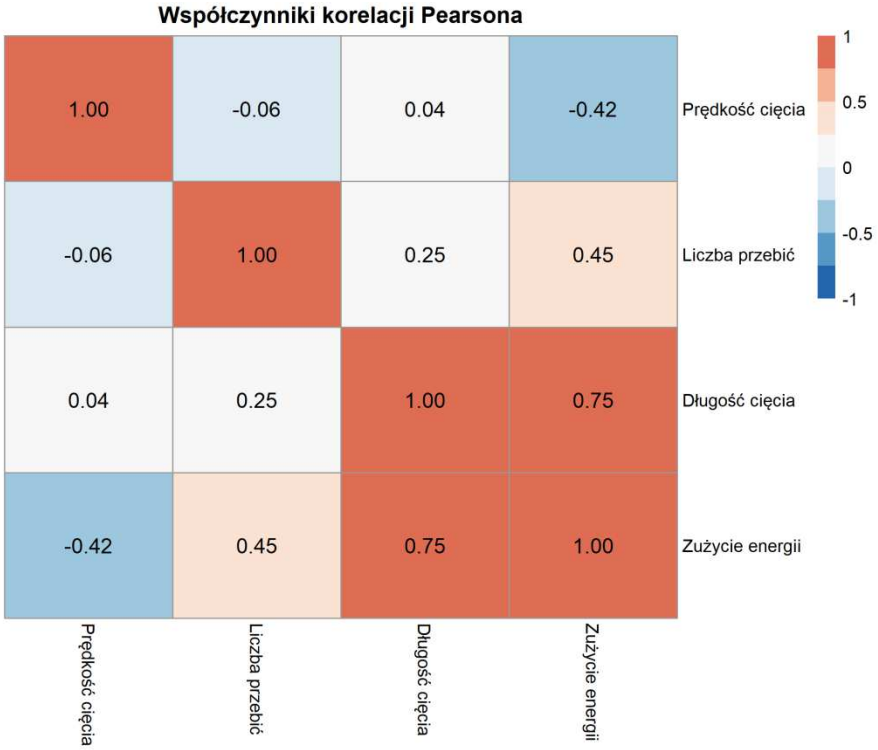
Dla materiału o gr. 12 mm, w porównaniu do 4 mm, przewidywane zużycie energii elektrycznej będzie wyższe o 126%, natomiast dla materiału o gr. 12 mm, w porównaniu do 8 mm, zużycie energii będzie wyższe o 78,4%.

8.7.1.2.Ocena jakości modelu

Na podstawie oszacowanego modelu (8.2) wykonano prognozy zużycia energii elektrycznej dla pomiarów z 24 blach ze zbioru testowego. Następnie zostały wykluczone miary dokładności tych prognoz, które pozwoliły na ocenę jakości tego modelu. Wyznaczono współczynnik korelacji Pearsona dla rzeczywistych pomiarów energii i tych pomiarów energii uzyskanych na podstawie modelu. Współczynnik ten wyniósł:

$$\boldsymbol{r = 0,929}$$

co świadczy o wysokiej korelacji liniowej między tymi zmiennymi oraz prawidłowej tendencji. Zależność ta została przedstawiona na rys 8.43



Rys 8.43. Korelacja liniowa między zmiennymi

Dodatkowo wyznaczono poziomy błędów prognoz:

– średni błąd bezwzględny (MAE) wyniósł 3,256 (kWh),

co oznacza, że prognoza zużycia energii elektrycznej, wyznaczona na podstawie tego modelu, jest obarczona błędem 3,26 kWh, czyli ta prognoza odbiega od rzeczywistego zużycia energii średnio o 3256 W.

– średni bezwzględny błąd procentowy (MAPE) wyniósł 24,9%,

co oznacza, że średnia wielkość błędów prognoz zużycia energii elektrycznej wyrażona w procentach rzeczywistych pomiarów wynosi 24,9%. Należy dodać, że dla zbioru uczącego ten błąd wynosił 14%

8.7.2. Określenie kosztu wykonania detalu

W celu weryfikacji wyników szacowania poboru energii elektrycznej w procesie cięcia plazmowego blach próbnych o gr. 4, 8 i 12 mm, wykonano dodatkowe badania. Badania polegały na cięciu plazmowym zaplanowanej poniżej ilości metrów oraz ustalonej ilości przebić z pomiarem poboru energii elektrycznej. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla każdej grubości blach (4, 8 i 12 mm) przy natężeniu 80 i 130 A w następującej kolejności:

Blacha o gr. 4 mm, natężenie 80 A

a) wykonanie 10 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,

b) wykonanie 90 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,
c) cięcie jednego metra blachy- pomiar poboru energii elektrycznej,
d) cięcie 10 metrów blachy – pomiar poboru energii elektrycznej.

W celu weryfikacji lub sprawdzenia wyników, przeprowadzono dodatkowe, sprawdzające badania:

e) wykonanie 200 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,
f) cięcie 20 metrów blachy – pomiar poboru energii elektrycznej.

Przedstawiony schemat planu badań został wykonany analogicznie dla:

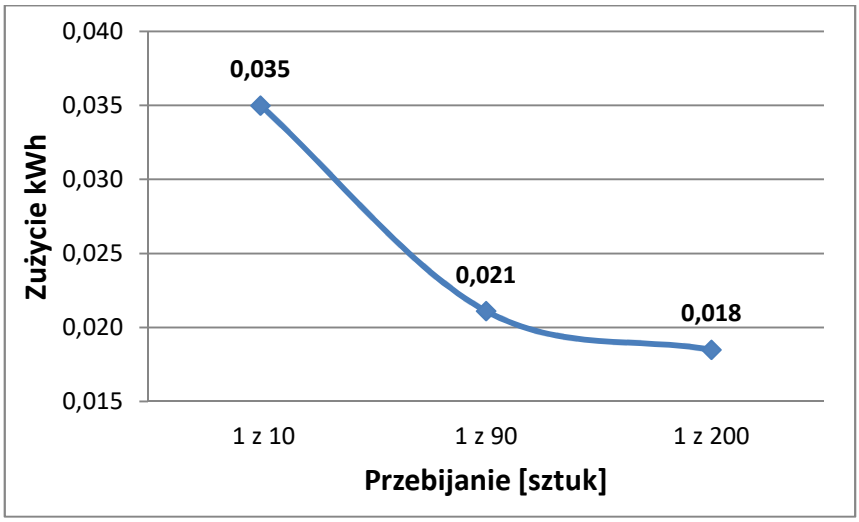
- blachy o gr 4 mm przy natężeniu prądu 130 A,
- blachy o gr 8 mm przy natężeniu 80 A,
- blachy o gr 8 mm przy natężeniu 130 A,
- blachy o gr 12 mm przy natężeniu 80 A,
- blachy o gr . 12 mm przy natężeniu 130 A.

Na rysunku 8.44 przedstawiono przykładową dokumentację fotograficzną z przeprowadzonych badań. W tabelach od 8.47 do 8.52 przedstawiono wyniki pomiarów, natomiast na rysunkach od 8.45 do 8.56 przedstawiono graficznie zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie w seriach 10, 90, 200 oraz cięcie plazmowe jednego metra w seriach 1, 10 i 20 metrów.

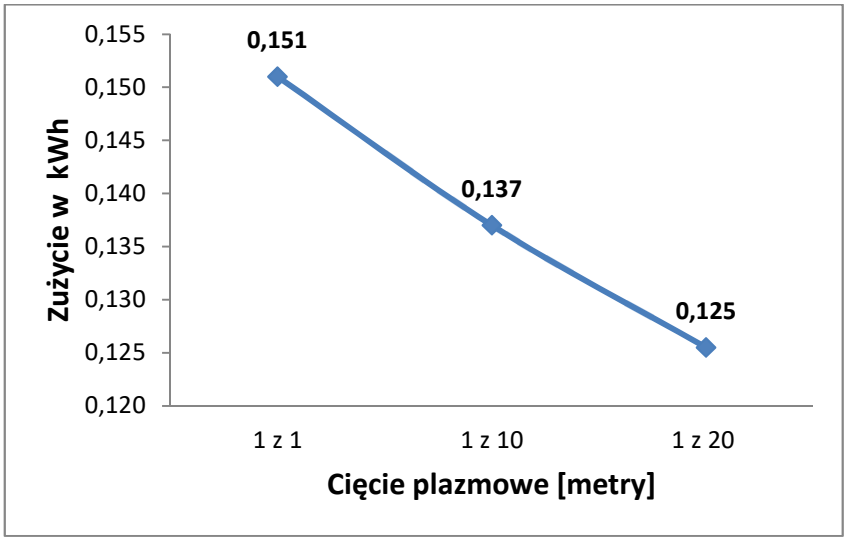
Rys.8.44. Zdjęcie z badań energochłonności procesu cięcia plazmowego

Tabela 8.47. Zestawienie wyników pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 4 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Blacha 4 mm, natężenie prądu 80 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,35	0,035
	przebijanie	[sztuk]	90	1,90	0,021
Badanie sprawdzające	przebijanie	[sztuk]	200	3,70	0,018
	cięcie	[metry]	1	0,15	0,151
	cięcie	[metry]	10	1,37	0,137
Badanie sprawdzające	cięcie	[metry]	20	2,51	0,125



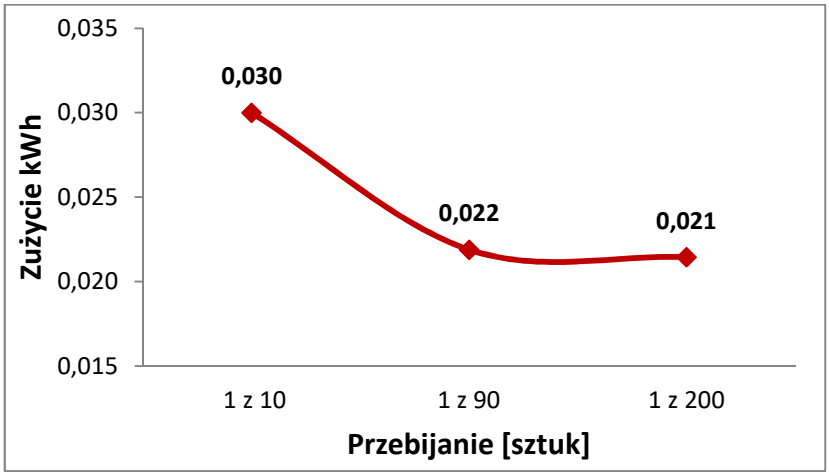
Rys. 8.45. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 4 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A



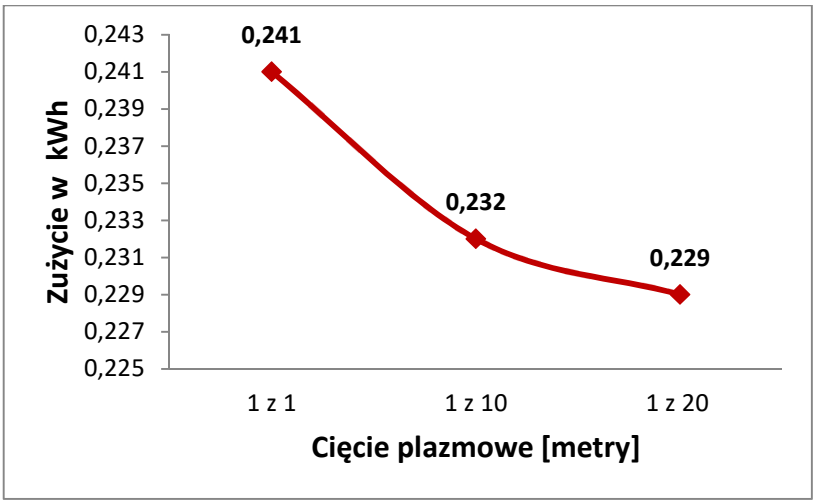
Rys. 8.46. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 4 mm przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 8.48. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Blacha 8 mm, natężenie prądu 80 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,30	0,030
	przebijanie	[sztuk]	90	1,97	0,022
sprawdzenie w jednej serii	przebijanie	[sztuk]	200	4,29	0,021
	cięcie	[metry]	1	0,24	0,241
	cięcie	[metry]	10	2,32	0,232
sprawdzenie w jednej serii	cięcie	[metry]	20	4,58	0,229



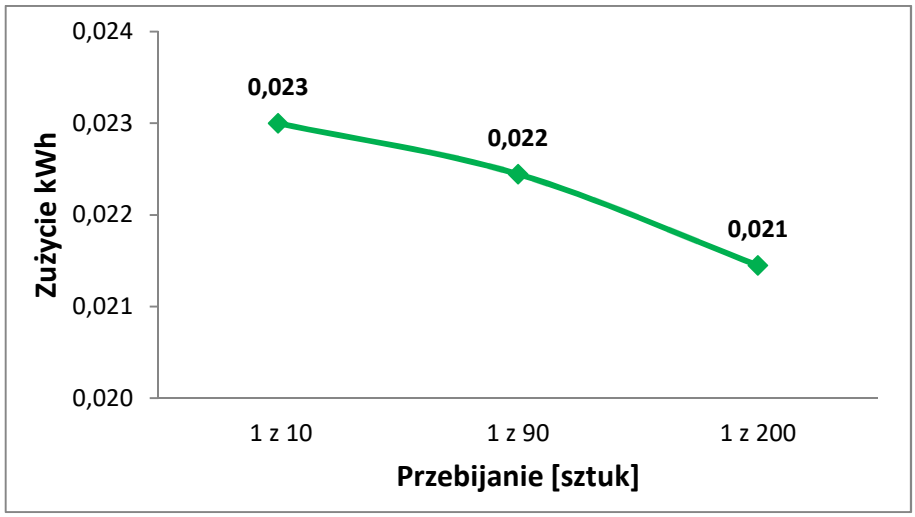
Rys. 8.47. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 8 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A



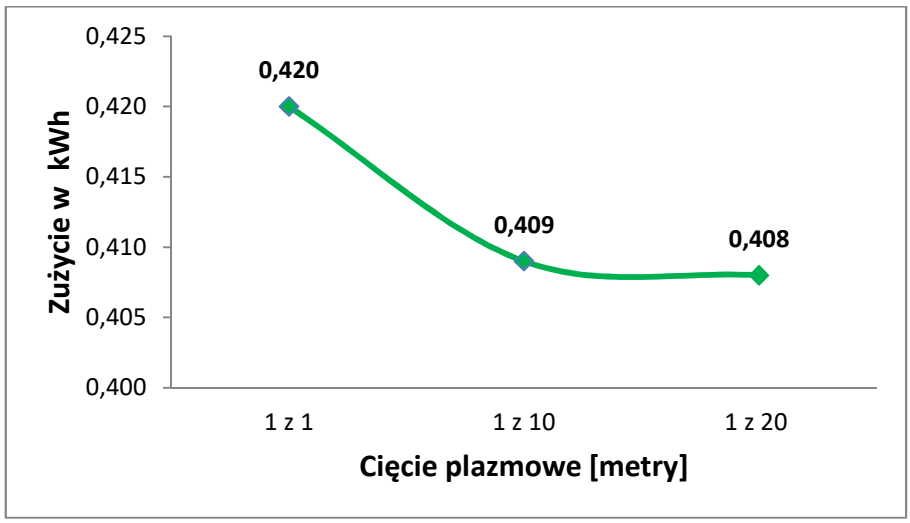
Rys. 848. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 8.49. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 12 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A

Blacha 12 mm, natężenie prądu 80 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,2300	0,023
	przebijanie	[sztuk]	90	2,02	0,022
sprawdzenie w jednej serii	przebijanie	[sztuk]	200	4,29	0,021
	cięcie	[metry]	1	0,42	0,420
	cięcie	[metry]	10	4,09	0,409
sprawdzenie w jednej serii	cięcie	[metry]	20	8,16	0,408



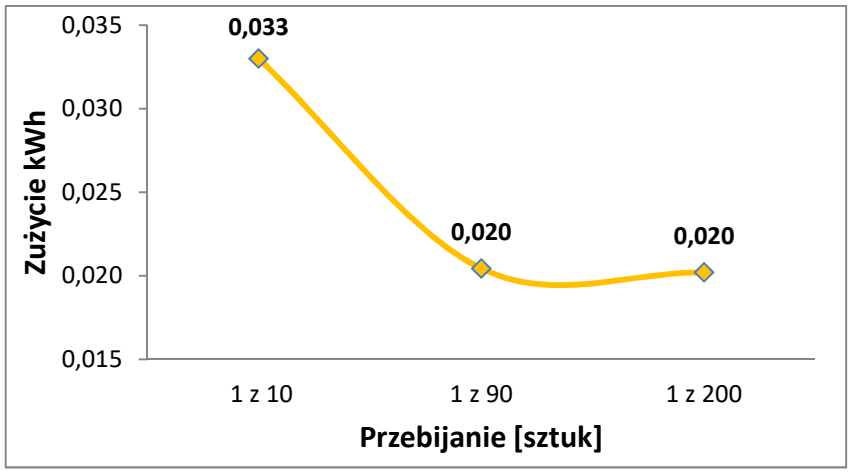
Rys. 8.49. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 12 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A



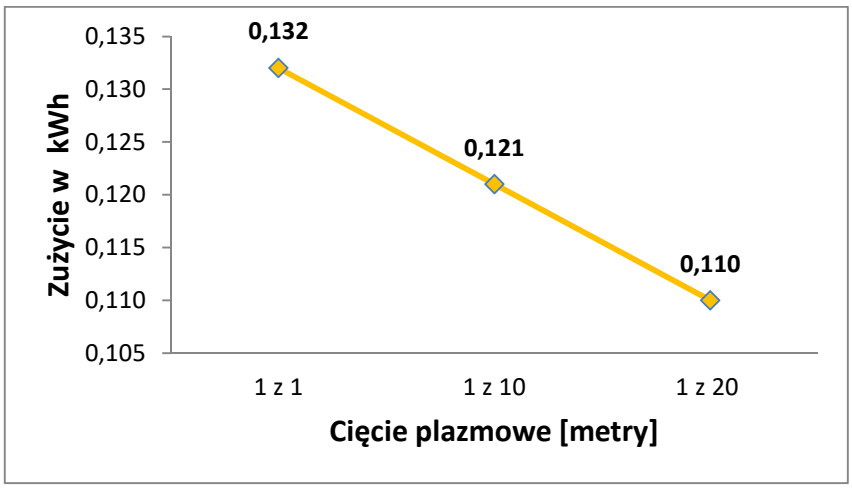
Rys. 8.50. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 12 mm przy natężeniu prądu 80 A

Tabela 8.50. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 4 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Blacha 4 mm, natężenie prądu 130 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,33	0,033
	przebijanie	[sztuk]	90	1,80	0,020
sprawdzenie w jednej serii	przebijanie	[sztuk]	200	4,04	0,020
	cięcie	[metry]	1	0,13	0,132
	cięcie	[metry]	10	1,21	0,121
sprawdzenie w jednej serii	cięcie	[metry]	20	2,20	0,110



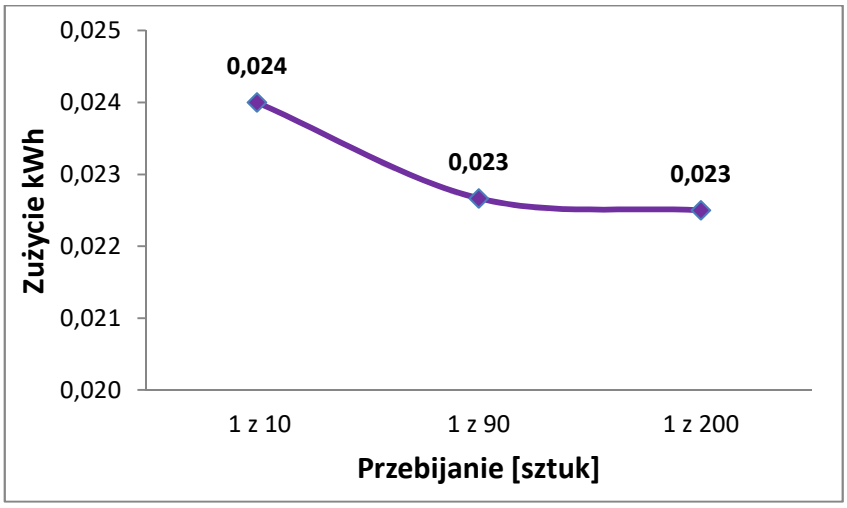
Rys. 8.51. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 4 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A



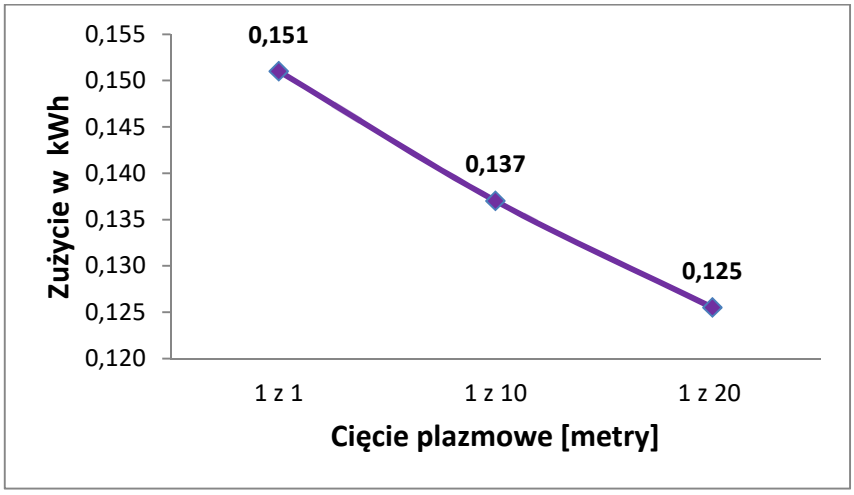
Rys. 8.52. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 4 mm przy natężeniu prądu 130 A

Tabela 8.51. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Blacha 8 mm, natężenie prądu 130 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,24	0,024
	przebijanie	[sztuk]	90	2,04	0,023
sprawdzenie w jednej serii	przebijanie	[sztuk]	200	4,50	0,023
	cięcie	[metry]	1	0,22	0,216
	cięcie	[metry]	10	2,10	0,210
sprawdzenie w jednej serii	cięcie	[metry]	20	4,13	0,206



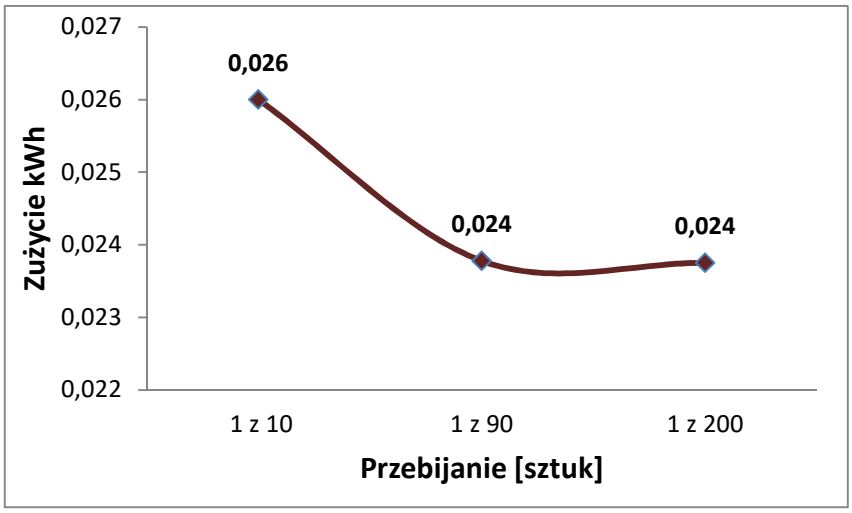
Rys. 8.53. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 8 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A



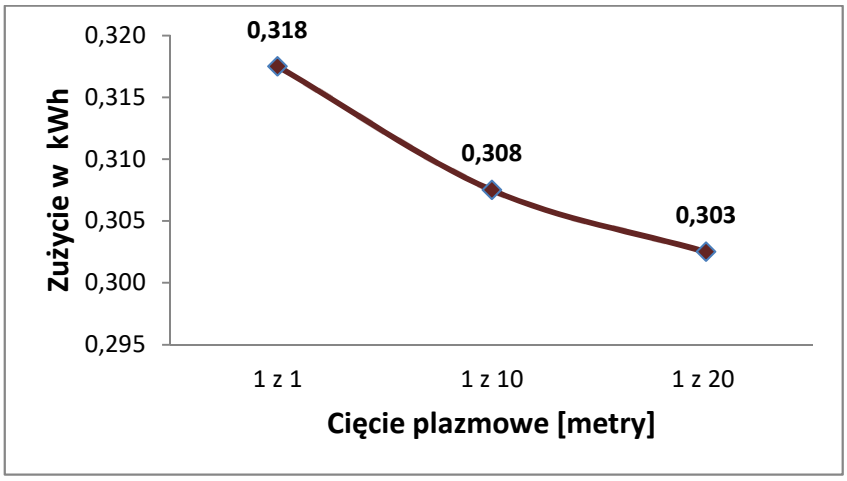
Rys. 8.54. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 130 A

Tabela 8.52. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 12 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A

Blacha 12 mm, natężenie prądu 130 A					
	Operacje	Jednostki	Ilość	Zużycie całkowite [kWh]	Zużycie na jednostkę [kWh]
	przebijanie	[sztuk]	10	0,26	0,026
	przebijanie	[sztuk]	90	2,12	0,024
sprawdzenie w jednej serii	przebijanie	[sztuk]	200	4,75	0,024
	cięcie	[metry]	1	0,32	0,318
	cięcie	[metry]	10	3,08	0,308
sprawdzenie w jednej serii	cięcie	[metry]	20	6,05	0,303



Rys. 8.55. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 12 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A



Rys. 8.56. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 12 mm przy natężeniu prądu 130 A

Przeprowadzone badania zużycia energii elektrycznej dały praktyczny pogląd na ilość zużywanej energii w trakcie przebijania oraz cięcia plazmowego. Z przeprowadzonej analizy można wywnioskować, że największe zużycie energii elektrycznej występuje przy uruchamianiu urządzenia do cięcia plazmowego. Aby można było określić dokładny koszt jednego przebicia oraz cięcia jednego metra badanej blachy, przyjęto, że koszt jednej kilowatogodziny (kWh) wynosi 0,50 złotych. Określono koszt jednego przebicia przy serii do 10 sztuk i przy serii powyżej 10 sztuk, a także koszt cięcia 1 metra przy serii do 1 m oraz powyżej 1 metra z uwzględnieniem natężenia prądu 80 A i 130 A. W obliczeniach przyjęto, że wartości do 0,005 zł zostaną zaokrąglone w dół do kwoty całkowitej, natomiast powyżej 0,005 zostaną zaokrąglone w górę do pełnej wartości.
W podrozdziałach od 8.7.3. do 8.7.5. przedstawiono rzeczywiste wartości kosztowe, a w tabeli 8.53 zestawienie kosztów w stosunku do liczby przebić i metrów cięcia.

8.7.3. Koszt przebicia oraz cięcia dla brachy o grubości 4 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A.

- koszt jednego przebicia przy natężeniu 80 A w serii do 10 sztuk wynosi:
  0,035 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,02 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu 130 A w serii do 10 sztuk wynosi:
  0,033 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,02 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi:
  od 0,018 kWh do 0,021 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- kosz jednego przebicia przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi:
  0,020 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii do 1 metra wynosi:
  0,151 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,08 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu 130 A w serii do 1 metra wynosi:
  0,132 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,07 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 1 metra wynosi:
  od 0,125 kWh do 0,137 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,06 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 1 metra wynosi: od 0,110 kWh do 0,121 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,06 zł.

8.7.4. Koszt przebicia oraz cięcia dla blachy o grubości 8 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A

- koszt jednego przebicia przy natężeniu 80 A w serii do 10 sztuk wynosi: 0,03 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu 130 A w serii do 10 sztuk wynosi: 0,024 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi: od 0,021 kWh do 0,022 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi: 0,023 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii do 1 metra wynosi: 0,241 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,12 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu 130 A w serii do 1 metra wynosi: 0,151 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,08 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 1 metra wynosi: od 0,229 do 0,232 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,12 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 1 metra wynosi: od 0,125 kWh do 0,137 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,07 zł.

8.7.5. Koszt przebicia oraz cięcia dla blachy o grubości 12 mm przy natężeniu prądu 80 A i 130 A

- koszt jednego przebicia przy natężeniu 80 A w serii do 10 sztuk wynosi: 0,023 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu 130 A w serii do 10 sztuk wynosi: 0,026 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi: od 0,021 kWh do 0,022 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt jednego przebicia przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 10 sztuk wynosi: 0,024 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,01 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii do 1 metra wynosi: 0,420 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,21 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu 130 A w serii do 1 metra wynosi: 0,318 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,16 zł,

- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 80 A w serii powyżej 1 metra wynosi: od 0,408 do 0,409 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,20 zł,
- koszt cięcia jednego metra przy natężeniu prądu 130 A w serii powyżej 1 metra wynosi: od 0,303 kWh do 0,308 kWh · 0,50 zł/kWh = 0,15 zł.

Tabela 8.53. Zestawienie kosztów w stosunku do przebić oraz cięcia plazmowego dla poszczególnych parametrów.

	Blacha stalowa					
Grubość blachy	4 mm		8 mm		12 mm	
Natężenie prądu	80 A	130 A	80 A	130 A	80 A	130 A
Koszt	[zł]	[zł]	[zł]	[zł]	[zł]	[zł]
Koszt jednego przebicia w serii do 10 sztuk	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Koszt jednego przebicia w serii powyżej 10 sztuk	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Koszt cięcia plazmowego w serii do 1 metra	0,08	0,07	0,12	0,08	0,21	0,16
Koszt cięcia plazmowego w serii powyżej 1 metra	0,06	0,06	0,12	0,07	0,20	0,15

Przedstawiona kosztochłonność procesu, w tym koszt cięcia jednego metra oraz koszt przebicia badanej blachy przy uwzględnieniu określonych parametrów, zostało zaimportowane do tworzonego systemu wspomagania decyzji.

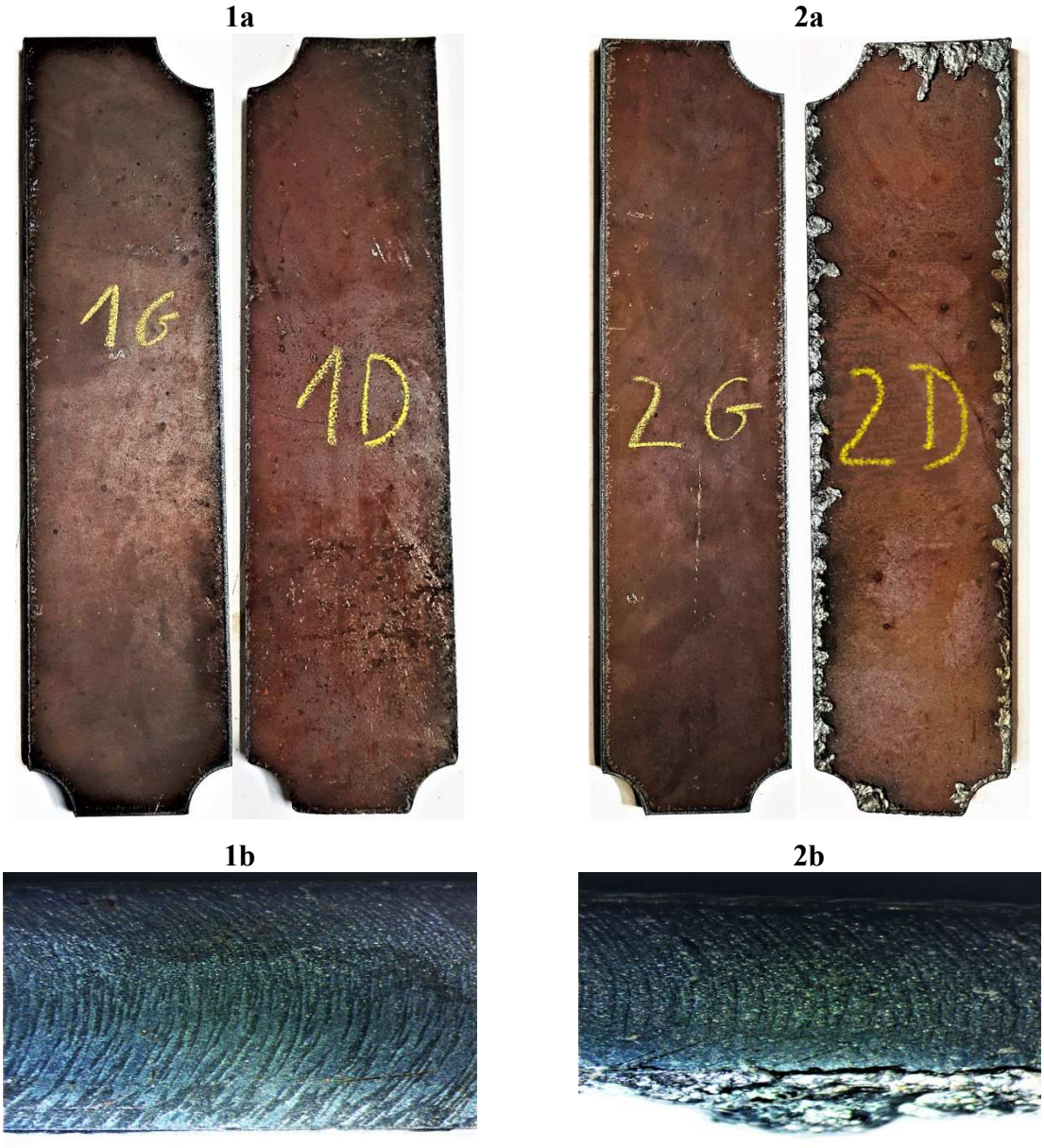
8.7.6. Koszt oraz jakość cięcia plazmowego wg danych tabelarycznych a cięciem wynikającym z przeprowadzonych badań

W celu weryfikacji kosztochłonności procesu cięcia plazmowego, postanowiono przeprowadzić dodatkowe badania. Badania zostały wykonane w firmie AK ANATOL na przecinarce plazmowej przedstawionej w rozdziale 7. Weryfikacja kosztochłonności procesu polegała na wykonaniu cięcia plazmowego 240 płyt w gatunku S235 JR o grubości 8 mm i wymiarach zewnętrznych 280 x 70 mm, w zakresie dwóch prędkości cięcia. Pierwsza połowa partii, czyli 120 płyt stalowych została cięta z prędkością rekomendowaną przez producenta urządzenia, natomiast druga połowa partii była cięta przy prędkości otrzymanej w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych, gwarantującą najwyższą jakość ciętych krawędzi.

W tabeli 8.54 przedstawiono zastosowane natężenie prądu oraz prędkości cięcia. Pozostałe parametry zastosowano jak w tabeli 8.7. Na rysunku 8.57 przedstawiono cięte płyty stalowe w widoku górnej płaszczyzny (G1-G2), dolnej płaszczyzny (D1-D2) oraz jakość powstałych krawędzi ciętych.

Tabela 8.54. Prędkość cięcia plazmowego stalowych płyt o gr. 8 mm, ciętych z natężeniem prądu 130 A

I	Wynik badań eksperymentalnych	1G/1D	Prędkość cięcia	[mm/min]	2310
II	Producent urządzenia	2G/2D		[mm/min]	3350



Rys. 8.57. Płyty stalowe: 1a i 1b – widok płaszczyzn (G i D) oraz krawędzi ciętej przy użyciu prędkości wynikającej z badań eksperymantalnych dającej najwyższą możliwą jakość. 2a i 2b – widok płaszczyzn (G i D) oraz krawędzi ciętej wykonanej zgodnie z danymi producenta urządzenia,

Czas cięcia plazmowego oraz czas usuwania powstałych nawisów ciekłego metalu/wypływek obliczono bez uwzględnienia przejść jałowych.

W tabeli 8.55 zestawiono dane potrzebne do wykonania obliczeń.

Tabela 8.55. Zestawienie danych

			Cięcie plazmowe - wg badań	Cięcie plazmowe - wg producenta
			I	II
Liczba sztuk	Ls	[szt]	120	120
Prędkość cięcia	v	[mm/min]	2310	3350
Obwód cięcia	O	[mm]	700	700
Czas potrzebny do usunięcia wypływek	t	[s]	5	24
Roboczogodzina	Rg	[zł]	80	80

Wzory:

Czas cięcia - tc

$$tc = \frac{O \cdot ls}{v} \tag{8.6}$$

Czas dodatkowej obróbki – szlifowanie krawędzi – td

$$td = \frac{t \cdot ls}{60} \tag{8.7}$$

Koszt wykonania gotowego wyrobu – kw

$$kw = tc + td \cdot Rg \tag{8.8}$$

Obliczenia:

dla I

$$\frac{700\ mm \cdot 120\ szt}{2310\ mm/min} + \frac{5\ s \cdot 120\ szt}{60\ s} = \frac{46 \frac{min}{szt}}{60\ min} \cdot 80zł = 61{,}33\ \frac{zł}{szt}$$

dla II

$$\frac{700\ mm \cdot 120\ szt}{3350\ mm/min} + \frac{24\ s \cdot 120\ szt}{60\ s} = \frac{73{,}05 \frac{min}{szt}}{60\ min} \cdot 80zł = 97{,}40\ \frac{zł}{szt}$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przeprowadzone badania eksperymentalne mają bardzo istotne praktyczne znaczenie dla przedsiębiorstwa. Pomimo zastosowania mniejszych prędkości cięcia plazmowego, jakość ciętych krawędzi jest dużo wyższa (prostopadłość i tolerancja wymiarowa) i przede wszystkim wolna od wypływek ciekłego metalu. Stosując prędkości cięcia zgodnie z danymi producenta urządzenia, przedsiębiorstwo jest narażone na nieprzewidziane koszty związane dodatkową obróbką, polegającą na usuwaniu wypływek ciekłego metalu. Pomimo zwiększonej prędkości cięcia koszt wykonania badanej partii jest o ponad 30 % wyższy niż cięcie wg. prędkości wynikających z badań eksperymentalnych. Dowodzi to, że badania eksperymentalne przeprowadzone

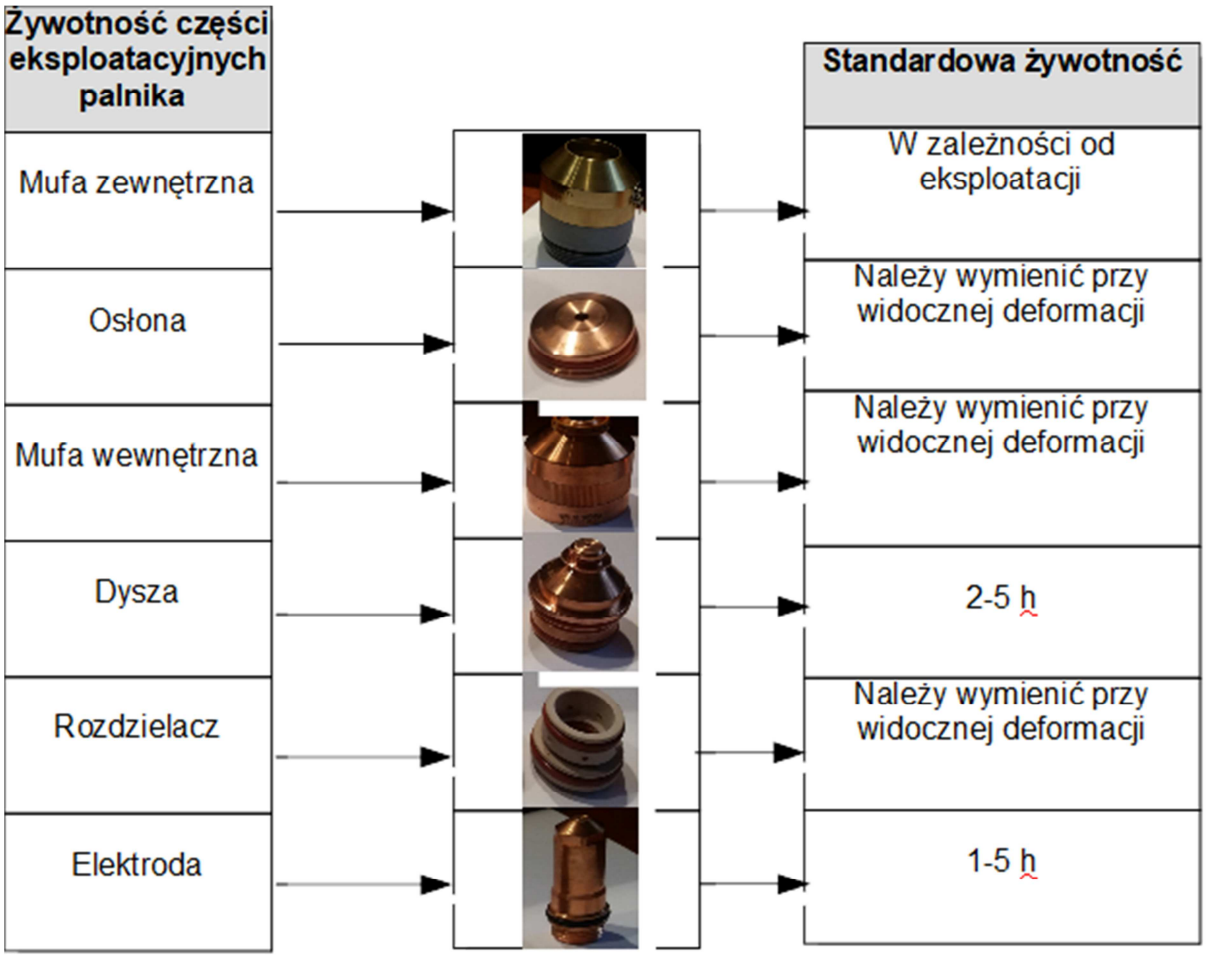
w niniejszej dysertacji mają istotny wpływ nie tylko z punktu widzenia rentowności przedsiębiorstwa ale i terminowości wykonywania zleceń. Dodatkowa obróbka skutkuje koniecznością zatrudnienia dodatkowego personelu, co prowadzi do zwiększenia kosztów stałych przedsiębiorstwa, a w sytuacji braku wykwalifikowanych pracowników na rynku stanowi dla mikro i małych przedsiębiorstw dodatkowy, poważny problem.

8.8. Żywotność części eksploatacyjnych

Parametry cięcia plazmowego mają znaczący wpływ na żywotność części eksploatacyjnych. Części eksploatacyjne wraz i ich orientacyjną żywotnością przedstawiono na rysunku 8.58. Żywotność części eksploatacyjnych determinuje koszt produkcji. Głównym problemem eksploatacyjnym jest nierównomierność zużywania się części, przy czym o wymianie poszczególnych części decyduje doświadczenie operatora [50, 78]:

- o wymianie elektrody i dyszy decyduje gorsza jakość cięcia lub niestabilny strumień plazmy przy zmianie koloru z czerwonego na niebiesko-biały odcień. Kontrolę zużycia tych elementów można wykonać za pomocą lusterka sprawdzając ewentualną deformację dyszy lub odpryski metalu a także wgłębienie elektrody, które nie powinno być większe jak 1,5 mm,
- osłonę mufy wymienia się, gdy jest widoczna deformacja otworu od roztopionego metalu,
- pierścień rozdzielacza wymienia się w przypadku, gdy jest mniejszy przepływ gazu lub jego nieregularne krążenie. Powodem może być niewłaściwe smarowanie lub zapchane otwory,
- pozostałe części zużywają się w zależności od eksploatacji urządzenia. Wpływ na skrócenie żywotności części ma nieprawidłowe startowanie, nie dotrzymywanie optymalnych warunków cięcia np. odpryski metalu na końcówce palnika podczas startu, niesterowany start, zbyt duży dystans palnika nad materiałem, nie właściwie nastawiona prędkość cięcia lub wielkość natężenia prądu cięcia.

Można zatem przyjąć, że żywotność poszczególnych części eksploatacyjnych palnika zależy od zastosowanych parametrów cięcia plazmowego, co jest kluczowym aspektem wpływającym na kosztochłonność procesu.



Rys. 8.58. Żywotność części eksploatacyjnych palnika plazmowego [140]

Z analizy rynku wynika, że ceny zestawów części eksploatacyjnych o tej samej charakterystyce znacznie się od siebie różnią. Na rynku europejskim jest wielu producentów części eksploatacyjnych palnika, z czego kilku z nich jest czołowym producentem części oryginalnych oraz kilkudziesięciu, produkujących ich zamienniki. W celu weryfikacji kosztu zakupu poszczególnych elementów eksploatacyjnych palnika wykonano zapytania ofertowe dla części oryginalnych oraz ich zamienniki. W tabeli 8.56 zestawiono poszczególne elementy palnika plazmowego oraz ich średni koszt zakupu. Przyjęto kurs 1,00 euro w cenie 4,20 zł.

Tabela 8.56. Koszt zakupu poszczególnych elementów palnika plazmowego [140]

	Oryginalne		**Zamiennik**	
	Euro [€]	Złoty [zł]	Euro [€]	Złoty [zł]
Osłona	8,20	34,44	4,00	16,80
Elektroda	9,50	39,90	5,00	21,00
Dysza	12,00	50,40	7,00	29,40
Rozdzielacz	20,20	84,84	12,00	50,40
Mufa wew.	47,00	197,40	38,00	159,60
Mufa zewn.	99,80	419,16	49,00	205,80

W niniejszej dysertacji, do badań eksperymentalnych wykorzystano zamienne części eksploatacyjne palnika plazmowego. W związku z powyższym, koszt zamiennych części eksploatacyjnych palnika plazmowego zostały zaimplementowane do stworzonego systemu wspomagania decyzji i stanowią jego integralną część.

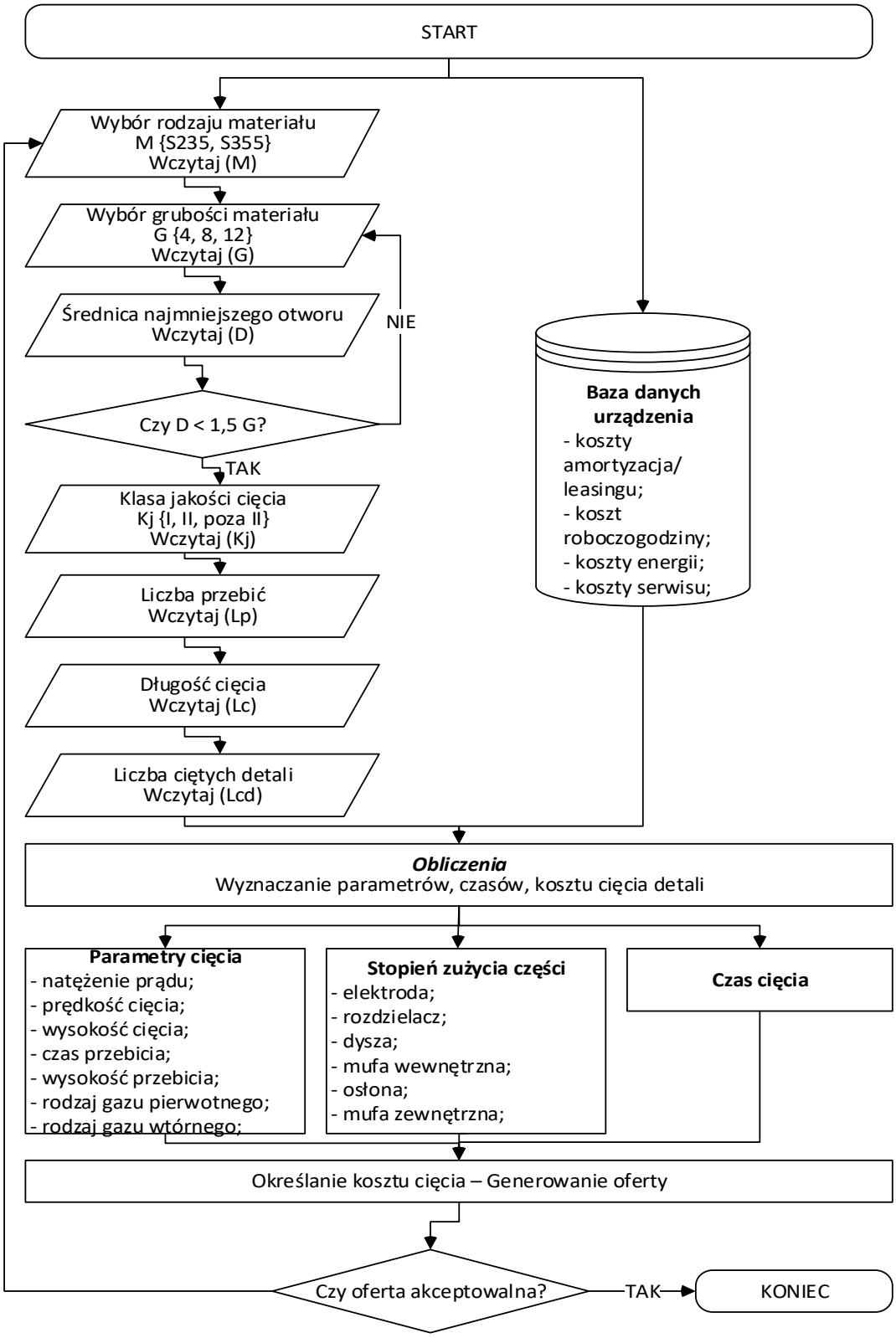
8.9. System wspomagania decyzji

Na jakość oraz koszty wytwarzania metodą cięcia plazmowego ma wpływ wiele czynników, a w praktyce - przy braku procedur - często ostateczny koszt uzależniony jest od umiejętności operatora urządzenia [47]. W celu zminimalizowania kosztów procesu cięcia plazmowego, a przede wszystkim, by móc precyzyjnie określić ich wartość, potrzebne są dane, które można było uzyskać w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych.
W praktyce przemysłowej cięcia plazmowego, w celu uzyskania konkretnego detalu, urządzenie programuje się, korzystając z pomocniczych tabel, które dla wybranego zestawu części eksploatacyjnych i grubości materiału, pozwalają dokonać doboru poszczególnych parametrów. Przykład takiego opracowania przedstawiono w rozdziale 9.2 w tabelach 9.3 i 9.4 [78]. Niestety, wspomniane dane określają jedynie przybliżone wartości parametrów, zaś autorzy tych opracowań zwracają uwagę na fakt, że np. prędkość cięcia musi być korygowana w przypadku, gdy istotna jest jakość powierzchni cięcia.

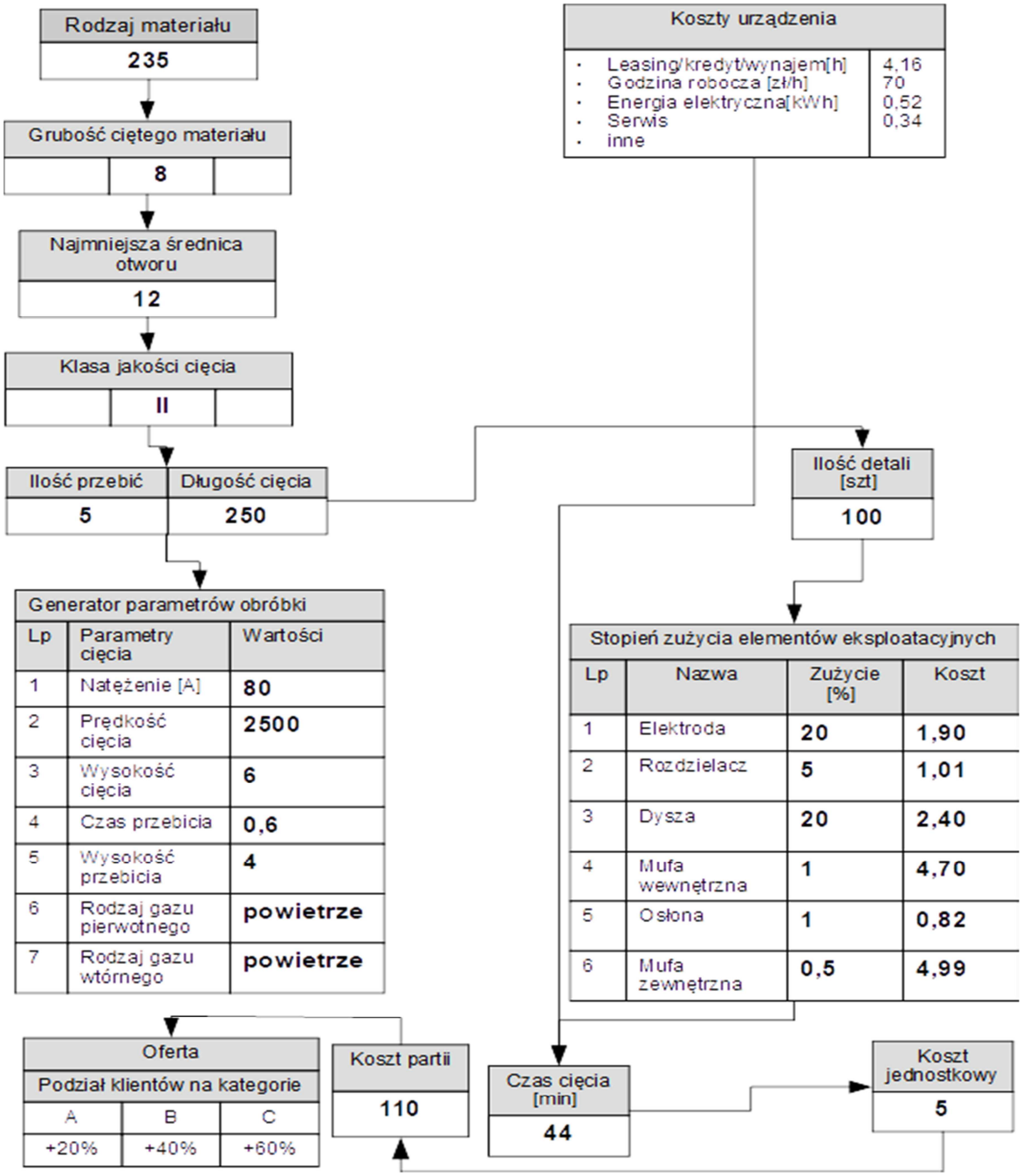
8.9.1. Cel utworzenia aplikacji komputerowej

Celem pracy było opracowanie systemu wspomagania decyzji (SWD) umożliwiającego wybór najkorzystniejszych, pod względem technologicznym i ekonomicznym, parametrów obróbki w procesie cięcia plazmowego blach o grubościach 4, 8 i 12 mm wykonanych ze stali S235 JR wg. EN 10025-2-4. Wykonane badania eksperymentalne, składające się z czterech etapów przedstawionych w rozdziałach od 9.1 do 9.7, pozwoliły na utworzenie SWD. Głównym celem utworzenia wspomnianej aplikacji była możliwość jej obsługi w kilku prostych krokach, bez wymogu posiadania specjalistycznej wiedzy z zakresu obsługi komputera. Aplikacja ta, uwzględniając dane uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych dla zadanej grubości blach oraz wymaganej klasy jakości cięcia, proponować będzie wartości poszczególnych parametrów obróbki, stopień zużycia się części eksploatacyjnych palnika oraz umożliwi oszacowanie kosztu i czasu realizacji zlecenia. W rezultacie aplikacja będzie generować dane służące do wykonania ofert cenowych. Celem stworzenia SWD jest wsparcie przedsiębiorstw, które do produkcji konstrukcji

stalowych używają technologii cięcia plazmowego. Na rysunku 8.59 przedstawiono schemat działania stworzonej aplikacji komputerowej SWD, na rysunku 8.60 powiązania pomiędzy różnymi danymi a w podrozdziale 8.9.2 opisano krok po kroku zasadę jej obsługi oraz możliwości uzyskanych wyników.



Rys. 8.59. Schemat blokowy działania aplikacji systemu wspomagania decyzji



Rys. 8.60. Schemat blokowy powiązań pomiędzy różnymi danymi aplikacji systemu wspomagania decyzji

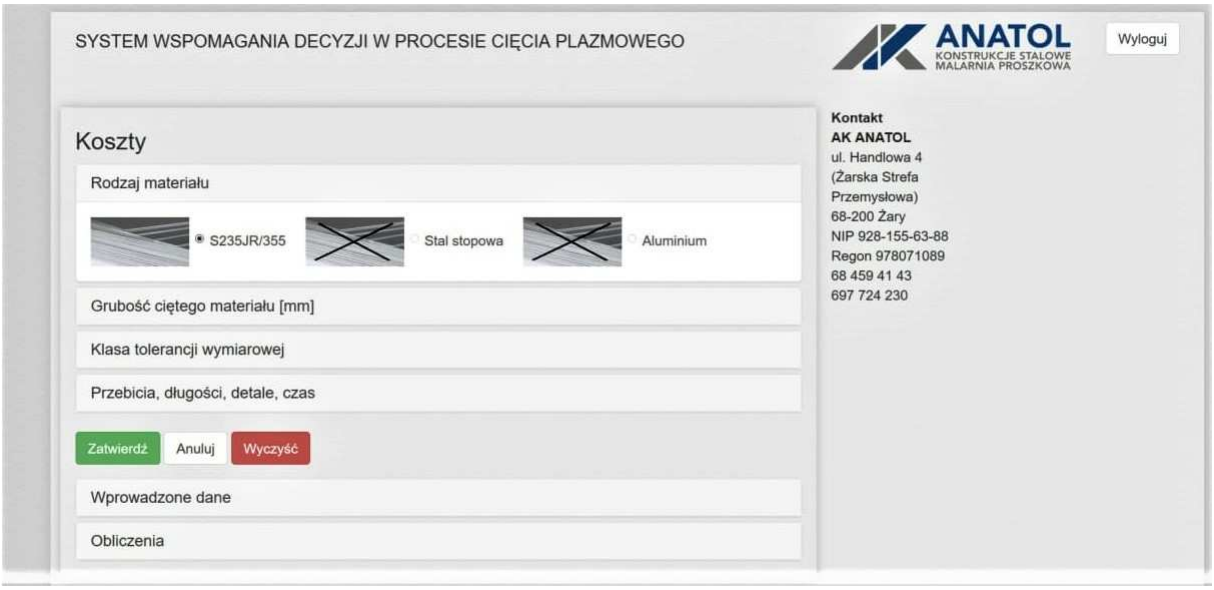
8.9.2. System wspomagania decyzji – aplikacja programowa

W przedsiębiorstwach branży metalowej, w których wykorzystuje się technologię cięcia plazmowego, istnieje duże zapotrzebowanie na operatorów tych maszyn. Obsługa przecinarek plazmowych wymaga zatrudnienia doświadczonych operatorów lub właściwego przeszkolenia. Szkolenie nowego pracownika na operatora przecinarki plazmowej jest kosztowne i czasochłonne, a w dobie dużej rotacji pracowników, bardzo ryzykowne ze względu na dużą konkurencję na rynku pracy. W związku z tym zaproponowana aplikacja do wspomagania doboru parametrów cięcia plazmowego powinna być intuicyjna i bardzo prosta w obsłudze, aby mogła ją obsługiwać osoba nawet po krótkim szkoleniu.
Przebieg poszczególnych kroków działania aplikacji przedstawiono poniżej:

Krok pierwszy: Logowanie do systemu
Każdy użytkownik mający dostęp do bazy danych ma możliwość zalogowania się do SWD za pomocą adresu mailowego oraz wygenerowanego hasła (rys 8.61).

Rys. 8.61. Logowanie do systemu

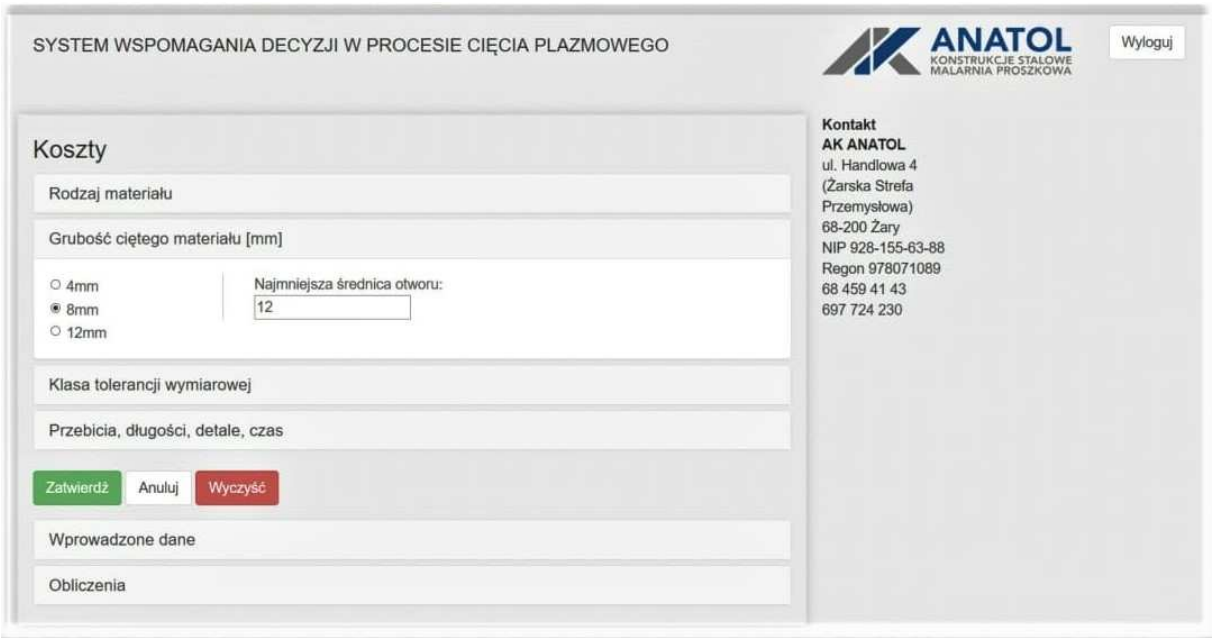
Krok drugi: Wybór materiału.
W tym kroku jest możliwość wyboru ciętego materiału. SWD jest przystosowany do stali z gatunku S235 JR i w związku z powyższym jest tylko jedna możliwość wyboru materiału (rys. 8.62).



Rys 8.62. Wybór rodzaju ciętego materiału

Krok trzeci: Wybór grubości ciętego materiału oraz określenie średnicy otworów.

W tym kroku użytkownik ma możliwość wyboru jednej spośród trzech grubości ciętego materiału. Użytkownik ma również możliwość określenia średnicy wycinanych otworów z tym, że jeżeli podana średnica będzie poniżej 1½ grubości ciętego materiału, pokaże się informacja, aby ją zwiększyć (rys. 8.63).



Rys. 8.63. Wybór grubości ciętego materiału oraz określenie średnicy ciętych otworów

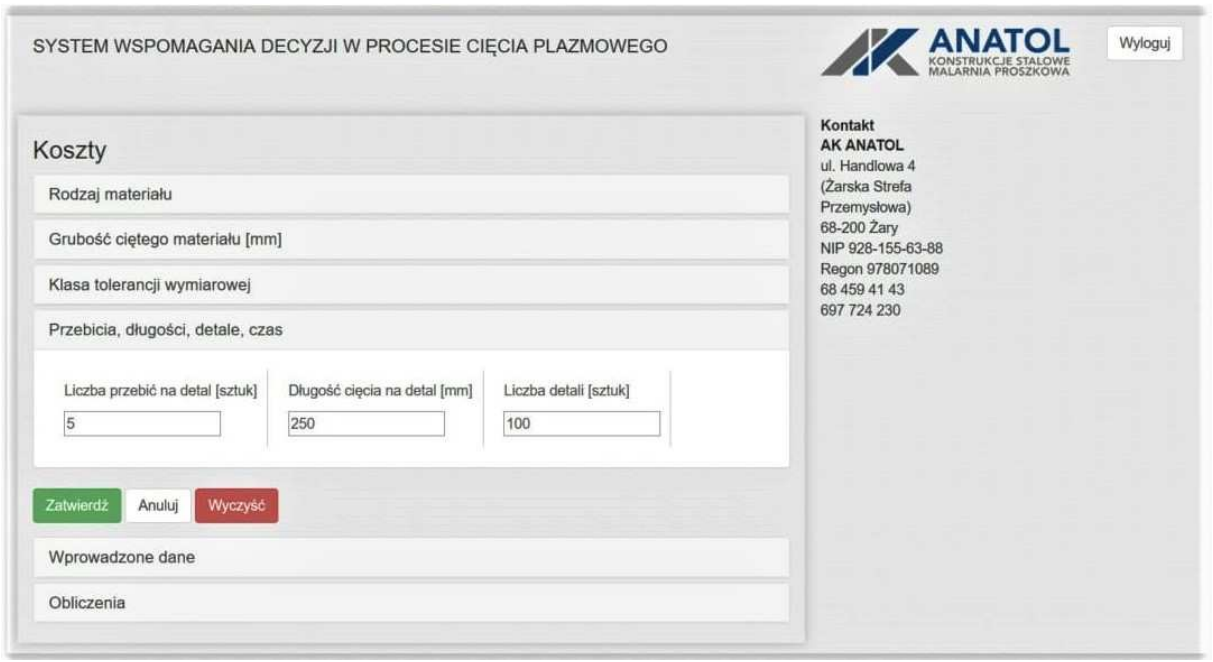
Krok czwarty: Wybór klasy tolerancji wymiarowej

W tym kroku użytkownik ma możliwość wyboru klasy tolerancji wymiarowej. Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że im wyższa klasa tolerancji wymiarowej, tym niższa prędkość cięcia (rys. 8.64.)

Rys. 8.64. Wybór klasy tolerancji wymiarowej

Krok piąty: Określenie takich parametrów jak: liczba przebić i długość cięcia na cięty detal oraz liczba sztuk na partię.

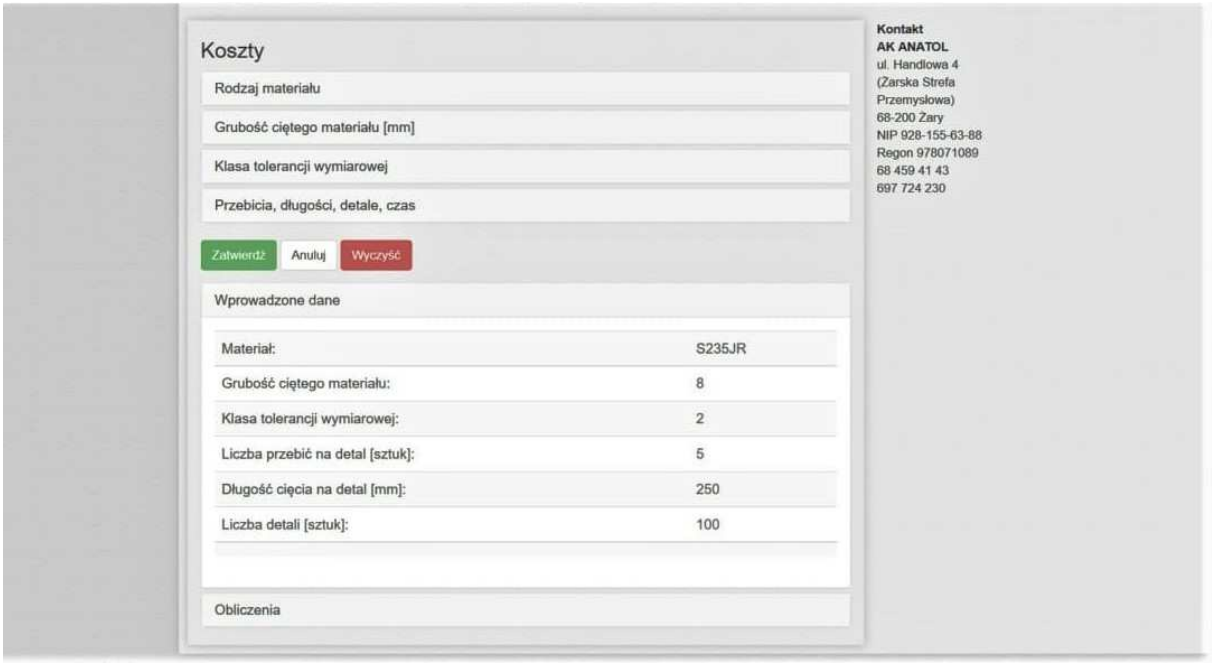
W kroku piątym użytkownik ma możliwość określenia (na podstawie rysunku technicznego np. w pliku pdf lub za pomocą programu CAD) liczby przebić na jeden detal, długości cięcia i liczby detali (rys. 8.65).



Rys. 8.65. Określenie liczby przebić, długości cięcia na detal oraz liczby detali na ciętą partię

Krok szósty: Sprawdzenie poprawności wprowadzonych danych.

W tym kroku użytkownik ma możliwość sprawdzenia wprowadzonych danych. Jeżeli wprowadzone danę są poprawne, przechodzi do następnego kroku, jeżeli nie, to ma możliwość cofnięcia się do kroku piątego (rys. 8.66).



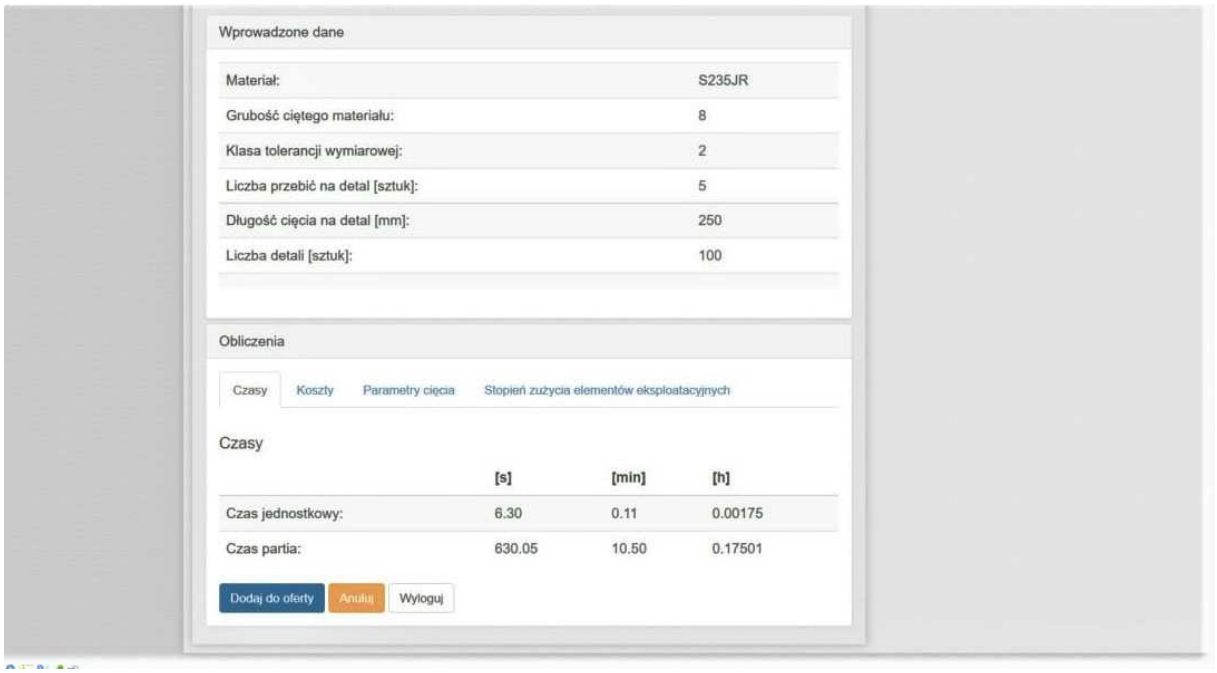
Rys. 8.66. Sprawdzenie poprawności wprowadzonych danych

Krok siódmy: Obliczenia.

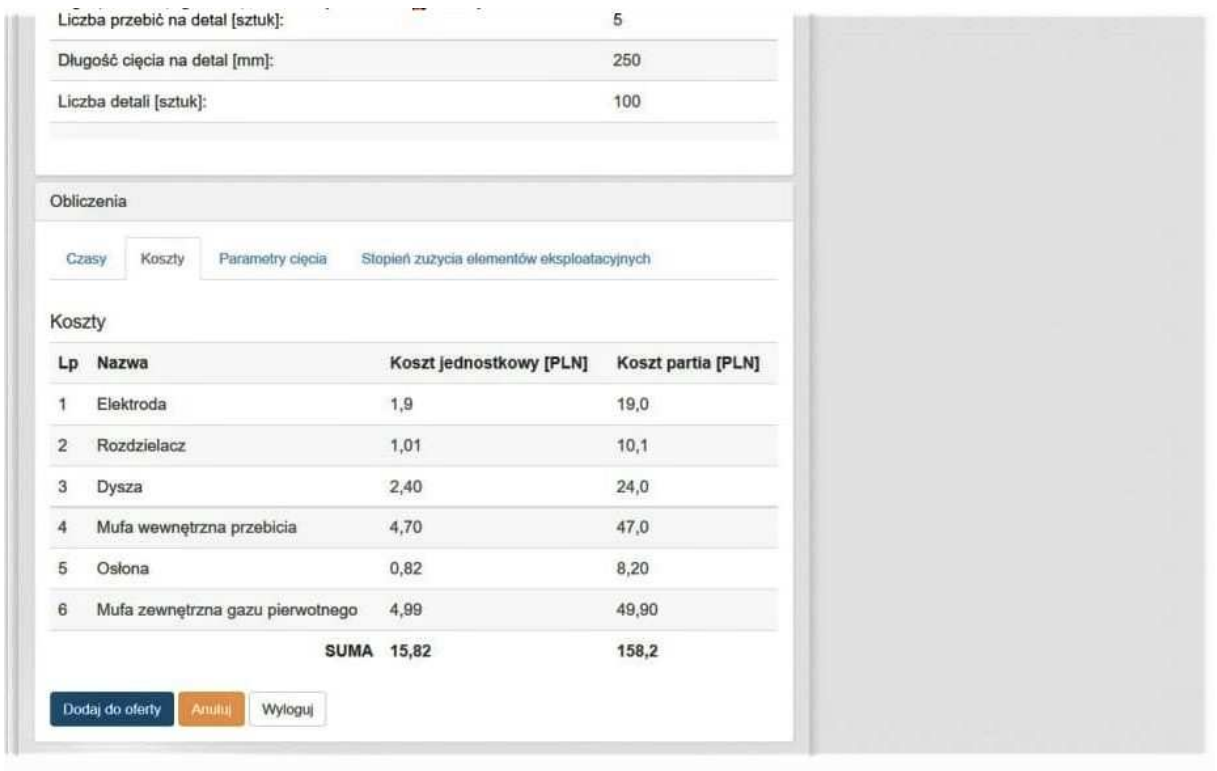
W tym kroku użytkownik, na podstawie wprowadzonych danych, uzyskuje wygenerowane przez aplikację informacje, takie jak:

- czas cięcia na jedną sztukę lub całą partię (rys. 8.67),
- kosztochłonność procesu na jedną sztukę lub całą partię, z uwzględnieniem kosztów elementów eksploatacyjnych palnika (rys. 8.68),
- parametry cięcia na podstawie, których operator wykona cięcie plazmowe detali (rys. 8.69), procentowe zużycie części eksploatacyjnych palnika (rys. 8.70).

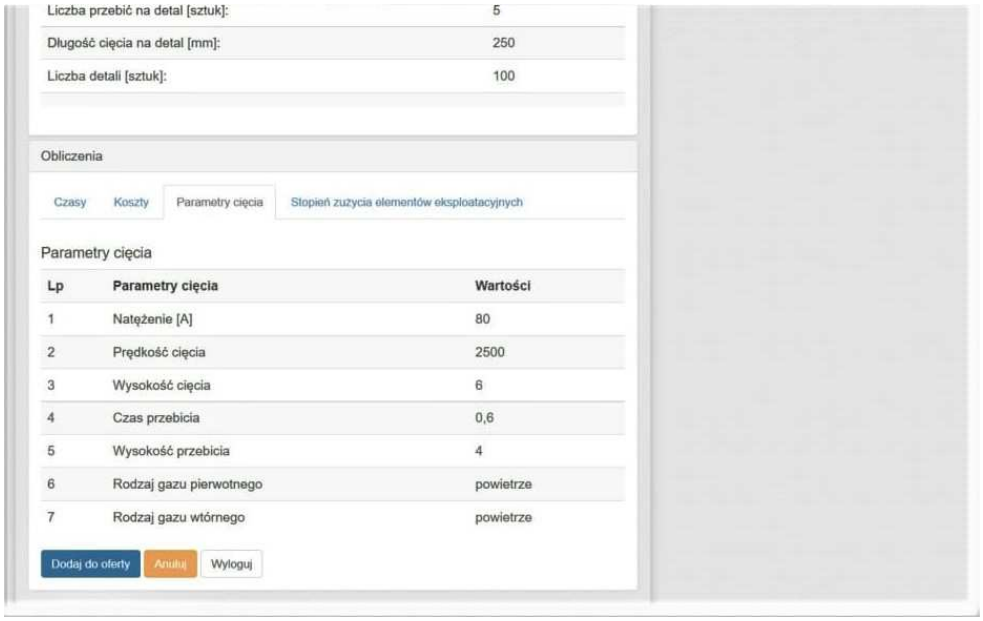
Na podstawie procentowego zużycia części eksploatacyjnych palnika, operator może pobrać z magazynu odpowiednią ich ilość potrzebną do wykonania cięcia. W przypadku, gdy program wygeneruje zużycie poszczególnych części np.: 200%, oznacza to, że aby wykonać cięcie plazmowe poszczególnej partii blach należy przygotować 2 sztuki części eksploatacyjnej np.: elektrody czy dyszy.



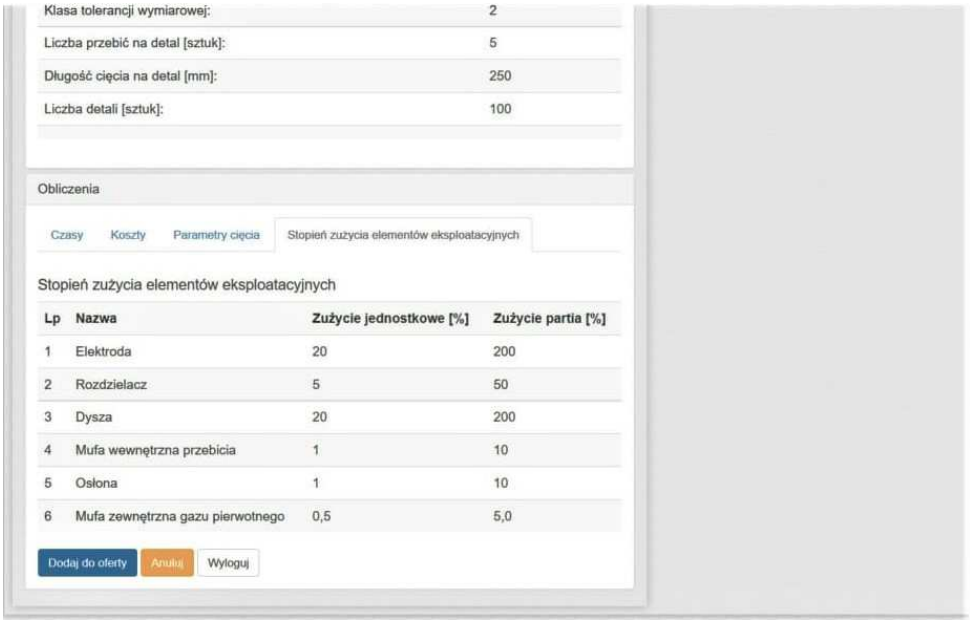
Rys. 8.67. Określenie czasu cięcia



Rys. 8.68 Określenie kosztu cięcia



Rys. 8.69. Określenie parametrów cięcia dla żądanej klasy wymiarowej



Rys. 8.70. Określenie stopnia zużycia części eksploatacyjnych palnika

Krok ósmy: Wygenerowanie oferty.

Celem kroku ósmego jest wygenerowanie wszystkich parametrów przedstawionych w kroku siódmym. Parametry te mogą posłużyć do wykonania oferty cenowej, określenia czasu potrzebnego na wykonanie detali lub do określenia zapotrzebowania na elementy eksploatacyjne palnika. Krok ósmy jest ostatnim krokiem. Dla użytkownika, który zaznajomił się z aplikacją, jej obsługa w celu wyłonienia poszczególnych parametrów nie powinna przekraczać jednej minuty.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy opisano i przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które zostały zaimplementowane w nowy utworzony system wspomagający decyzje w procesie cięcia plazmowego. Celem rozprawy było opracowanie systemu wspomagania decyzji (SWD) oraz dobranie takich parametrów technologicznych, które przyczynią się do redukcji kosztów wytwarzania w procesie cięcia plazmowego blach o grubości 4, 8 i 12 mm, przy natężeniu prądu cięcia 80 i 130 A, wykonanych ze stali S235 JR wg EN 10025-2-04. Na podstawie badań, określono wpływ poszczególnych parametrów cięcia plazmowego na geometrię ciętych blach. Opisano również klasy tolerancji prostopadłości, wymiarowych zgodnie z obowiązującymi normami dla poszczególnych parametrów cięcia, a także oszacowano czas i koszt wykonania detali przy uwzględnieniu zużycia części eksploatacyjnych palnika.

Tezy pracy zostały sformułowane w następujący sposób:

- istnieje zbiór parametrów cięcia plazmowego, który umożliwi poprawę prostopadłości oraz tolerancji wymiarowych ciętych krawędzi w porównaniu z parametrami rekomendowanymi przez producenta urządzenia,
- dla określonego zbioru parametrów technologicznych cięcia plazmowego, możliwe jest oszacowanie czasu i kosztów cięcia blach oraz eksploatacji palnika urządzenia do cięcia plazmowego,
- w oparciu o przeprowadzone eksperymenty oraz na podstawie doświadczenia operatorów, możliwe jest stworzenie aplikacji SWD, która umożliwi szacowanie kosztów cięcia blach dla określonych wymagań jakościowych.

Opracowany SWD może znaleźć zastosowanie nie tylko na przecinarce plazmowej, którą wykorzystano w badaniach eksperymentalnych, lecz także w przypadku wszystkich przecinarek plazmowych z palnikiem z dodatkowym zawężeniem łuku gazu ochronnego (rys. 5.10) oraz zastosowaniem źródła plazmy min. 130 A.

Sformułowany w rozdziale 2 cel został osiągnięty przez zrealizowanie następujących zadań:

1. Określenie istotności parametrów technologicznych cięcia plazmowego.
2. Cięcie płyt próbnych.
3. Badania geometrii ciętych płyt próbnych.
4. Badania chropowatości ciętych krawędzi.
5. Badania mikrotwardości.
6. Określenie kosztu wykonania detalu.

7. Żywotność części eksploatacyjnych.
8. Opracowanie systemu wspomagania decyzji

1. Określenie istotności parametrów technologicznych cięcia plazmowego – metoda Delficka

Ilość parametrów cięcia plazmowego mających wpływ na geometrię wyrobu jest bardzo duża. W celu wyłonienia tych najważniejszych posłużono się metoda delficką polegającą na ocenie zgodności opinii ekspertów. W celu wyłonienia parametrów mających największy wpływ, na jakość cięcia plazmowego przesłano 15 ankiet do firm produkujących wyroby z metalu, które w swojej produkcji wykorzystują przecinarki plazmowe. W każdej z firm do wypełnienia ankiety został przydzielony jeden ekspert. Ekspertem biorącym udział w ankiecie byli operatorzy, którzy w pracują przy obsłudze przecinarek plazmowych nieprzerwanie przez min. 5 lat. Z pośród 15 ankiet wyłoniono najistotniejsze parametry, które posłużyły, jako zmienne w dalszych badaniach. Tymi parametrami są: natężenie prądu oraz prędkość cięcia. Analizowana literatura [36] potwierdza wyniki badań metody delfickiej. Pozostałe parametry wyłonione w kolejności od ich istotności to:

- ciśnienie gazu podczas cięcia,
- odległość palnika podczas cięcia od ciętego materiału,
- napięcie łuku,
- wysokość startu,
- ciśnienie gazu podczas przebijania,
- czas przebijania,
- odsunięcie palnika podczas przebijania.

2. Cięcie płyt próbnych

Badania eksperymentalne cięcia plazmowego wykonano na arkuszach blach o grubości 4, 8 i 12 mm ze stali w gatunku S235JR. Cięcie plazmowe wyżej wymienionych blach, wykonano przy natężeniu prądu 80 i 130 A. Badana grubość ciętych blach oraz zastosowane natężenie prądu jest najczęściej stosowane w mikro i małych przedsiębiorstwach produkujących konstrukcje stalowe. Cięcie plazmowe wykonano z uwzględnieniem parametrów rekomendowanych przez producenta urządzeń do cięcia plazmowego oraz rekomendowane przez operatora/eksperta. Płyty próbne zostały wycięte w zakresie siedmiu prędkości dla poszczególnych grubości blach oraz zastosowanego natężenia prądu. Dla każdej grubości ciętej płyty próbnej, prędkości cięcia oraz zastosowanego natężenia

prądu, wykonano po trzy płyty próbne. W sumie wykonano 126 płyt próbnych, które zostały poddane dalszym badaniom eksperymentalnym.

3. Badania geometrii ciętych płyt próbnych

Do badań geometrii ciętych płyt próbnych w tym tolerancji prostopadłości, tolerancji wymiarowej, występowania wielkości powstałych wypływek, szerokości szczeliny, posłużono się skanerem 3D firmy GOM Optical Measuring Technologues ATOS ZM z dwoma obiektywami oraz sensorem. W pierwszym etapie badań, odrzucono płyty próbne, dla których proces cięcia plazmowego był niestabilny lub był niemożliwy. Płyty próbne, które odrzucono to:

- 8 mm cięte przy natężeniu prądu 80 A oraz z prędkością cięcia 2990 mm/min,
- 8 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A oraz z prędkością cięcia 4290 mm/min,
- 12 mm cięte przy natężeniu prądu 80 A oraz z prędkością cięcia 875 mm/min,
- 12 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A oraz z prędkością cięcia 2860 mm/min.

Powyższe prędkości zostały odrzucone i nie były uwzględnione w dalszych badaniach. Najkorzystniejszy wynik geometrii wyrobu uwzględniając klasę tolerancji prostopadłości, klasę tolerancji wymiarowej oraz wielkość występowania wypływek i szerokość powstałej szczeliny otrzymały następujące płyty próbne:

- 4 mm cięte przy natężeniu prądu 80 A oraz z prędkością cięcia 2520 mm/min,
- 4 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A oraz z prędkością cięcia 3500 mm/min,
- 8 mm cięte przy natężeniu prądu 80 A oraz z prędkością cięcia 1610 mm/min,
- 8 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A oraz z prędkością cięcia 2310 mm/min,
- 12 mm cięte przy natężeniu prądu 80 A oraz z prędkością cięcia 1625 mm/min,
- 12 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A oraz z prędkością cięcia 1540 mm/min.

Z pośród przeprowadzonych badań, można jednoznacznie wywnioskować, że prędkość cięcia plazmowego istotnie wpływa na geometrię ciętych płyt próbnych. Proces cięcia plazmowego płyt próbnych o grubości 4 i 8 mm ciętych przy natężeniu prądu 80 i 130 A także płyty próbne o grubości 12 mm cięte przy natężeniu prądu 130 A były wykonane przy użyciu najniższej badanej prędkości cięcia. Wyjątkiem jest płyta próbna o gr 12 mm cięta przy natężeniu prądu 80 A gdzie zwiększenie prędkości do maksymalnej wartości dało pozytywny wynik. Można również stwierdzić, że zwiększenie prędkości cięcia ma wpływ na powstawanie wypływek. Im większa prędkość cięcia tym większa wypływka. Już na podstawie geometrii wyrobu przepuszcza się, że parametry rekomendowane przez producentów przecinarek plazmowych są dużo zawyżone. Można również stwierdzić,

że bardzo ważne jest doświadczenie operatora, które zostało wykorzystane w stworzonym systemie wspomagania decyzji (SWD).

4. Badania chropowatości ciętych krawędzi

Z punktu widzenia poprawności prowadzenia procesu cięcia plazmowego jest wysokość profilu Rz5, świadczący o chropowatości ciętych powierzchni. Badania chropowatości zostały przeprowadzone za pomocą stykowego przyrządu pomiarowego firmy HOMMEL ETAMIC T8000 na 38 płytach próbnych zgodnie z tabelą 8.30. Pomiary średniej wysokości profilu Rz5, ciętych krawędzi wykonano zgodnie z zaleceniami obowiązującej normy PN-EN ISO 9013: 2017, która podaje ogólne warunki w tym zakresie. Badania chropowatości przeprowadzono na pięciu odcinkach o długości 4,8 mm każdy. Pomiary zostały wykonane zgodnie z kierunkiem cięcia plazmowego w odległości 5 mm od krawędzi cięcia płyty próbnej i w odległości 2/3 grubości od górnej krawędzi. Na podstawie literatury można wnioskować, że chropowatość wzrasta wraz z grubością ciętego materiału. Niestety ta teoria nie potwierdziła się w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych. Przeprowadzone badania potwierdziły analizowaną literaturę w zakresie w którym zwiększenie prędkości cięcia powoduje powstawanie małych, twardych gradów na krawędzi ciętej, powstawanie wypływek ciekłego metalu oraz brak prostopadłości ciętych krawędzi pogarszając ich jakość.

5. Badania mikrotwardości

Badania mikrotwardości przeprowadzono zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 6507-1: 2007 na urządzeniu Zwik ZHV10 przy użyciu wgłębnika o wadze 0,1 kg w czasie obciążenia 20 sekund. Badania mikrotwardości HV0,1 wykonano na 38 płytach próbnych, na ich zgładzie poprzecznym zgodnie z rysunkiem 9.22. Celem pomiaru mikrotwardości HV0,1 było ustalenie wypływu natężenia prądu oraz prędkości cięcia na zmiany twardości w strefie wpływu ciepła (SWC), blach o grubości 4, 8 i 12 mm. Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych można wywnioskować, że wzrost prędkości cięcia powoduje wzrost mikrotwardości tym samym potwierdzając analizowaną literaturę. Prędkości cięcia plazmowego dla poszczególnych grubości blach przy zastosowaniu natężenia prądu 80 i 130 A przedstawione w punkcie 2 „badania geometrii ciętych płyt próbnych" okazały się również najkorzystniejsze pod względem występujących zmian mikrostruktury ciętych blach. Z przeprowadzonych badań mikrostruktury, przekroju poprzecznego stali S235 JR wyłoniono trzy obszary obejmujące około 1 mm od krawędzi cięcia:

- w odległości 0,01 mm od krawędzi cięcia występuje biała, porowata i bardzo krucha warstwa,
- w odległości ok 0,35 mm od krawędzi cięcia występuje mikrostruktura bainityczna o podwyższonej twardości. Jest ona wynikiem szybkiego chłodzenia,
- na odległości do ok 0,7 mm rośnie udział fazy ferrytycznej, jest on spowodowany dłuższym czasem stygnięcia,
- w odległości powyżej 0,7 mm od krawędzi cięcia strukturę stanowi ferryt z niewielką ilością perlitu, odpowiadający strukturze materiału rodzimego.

Zastosowanie prędkości cięcia plazmowego, które przekraczają maksymalną dopuszczalną twardość HV 380 jest dopuszczalne pod warunkiem, że cięte krawędzie będą poddane dodatkowej obróbce na głębokość minimum 0,7 mm od krawędzi cięcia w głąb materiału rodzimego. W przypadku gdy twardość nie przekracza wartości 380HV obróbka mechaniczna krawędzi po cięciu termicznym nie jest wymagana.

6. Określenie kosztu wykonania detalu

Głównym składnikiem kosztów w procesie cięcia plazmowego jest koszt energii elektrycznej. Dopiero w dalszej kolejności można uwzględnić koszty zastosowanych gazów technicznych, części eksploatacyjnych i inne. W celu określenia kosztochłonności procesu cięcia plazmowego płyt próbnych posłużono się dwoma metodami:

Pierwsza opierała się za zastosowaniu narzędzi statystyki matematycznej, korzystając z logarytmicznej funkcji nieliniowej w postaci wzoru 8.1. Analizę statystyczną wykonano na podstawie pomiarów uzyskanych z cięcia 122 blach, podzielonych na dwie części:

- uczącą – wynoszącą 80% ciętych blach,
- testową - pozostałe 20% ciętych blach.

Szacowanie modelu nieliniowego (8.1) wykonano na podstawie informacji zawartych w próbie uczącej. Estymację parametrów modelu przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów (MNK). Do oszacowania błędu standardowego, estymatorów tych parametrów, użyto metody estymacji Neweg'a Westa macierzy kowariancji.

Na podstawie otrzymanych równań, opisujących zużycie energii elektrycznej sformułowano następujące wnioski:

- skupiając się na długości cięcia, możemy oczekiwać, że wzrost długości cięcia blachy o 1% powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej średnio o 0,81% przy założeniu, że pozostałe parametry blach, tj. jej grubość i liczba przebić, pozostaną stałe (ceteris paribus),

– biorąc pod uwagę ilość przebić, możemy oczekiwać, że wzrost liczby przebić o 1 sztukę wiąże się ze wzrostem zużycia energii elektrycznej o 0,2% przy ustalonych pozostałych zmiennych, tzn. długość cięcia i grubość blachy,

rozważając grubość blachy, przy ustalonej jej długości cięcia i liczby przebić, można oczekiwać, że dla blachy o gr. 8 mm, w porównaniu do blachy o gr 4 mm, zużycie energii będzie średnio o 26,7% wyższe. Dla materiału o gr. 12 mm, w porównaniu do 4, przewidywane zużycie energii elektrycznej będzie wyższe o 126%, natomiast dla materiału o gr. 12 mm, w porównaniu do 8 mm, zużycie energii będzie wyższe o 78,4%.

W ocenie jakości przedstawionego modelu wyznaczono współczynnik korelacji Pearsona dla rzeczywistych pomiarów energii oraz tych pomiarów energii uzyskanych na podstawie modelu. Współczynnik korelacji wyniósł **r = 0,929,** co świadczy o wysokiej korelacji liniowej między tymi zmiennymi oraz prawidłowej tendencji.

Druga metoda polegała na wykonaniu zaplanowanej ilości przebić oraz metrów cięcia badanej blachy przy równoczesnym pomiarze zużycia energii elektrycznej. Badania przeprowadzono dla każdej grubości blach (4, 8 i 12 mm) przy natężeniu prądu 80 A i 130 A. Badania kosztochłonności cięcia plazmowego przeprowadzono w następującej kolejności:

Blacha o gr. 4 mm, natężenie 80 A

a) wykonanie 10 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,
b) wykonanie 90 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,
c) cięcie jednego metra blachy- pomiar poboru energii elektrycznej,
d) cięcie 10 metrów blachy – pomiar poboru energii elektrycznej.

W celu weryfikacji lub sprawdzenia wyników, przeprowadzono dodatkowe, sprawdzające badania:

e) wykonanie 200 przebić – pomiar poboru energii elektrycznej,
f) cięcie 20 metrów blachy – pomiar poboru energii elektrycznej.

Przedstawiony schemat planu badań został wykonany analogicznie dla:

– blachy o gr 4mm przy natężeniu prądu 130 A,
– blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 80 A,
– blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 130 A,
– blachy o gr 12 mm przy natężeniu prądu 80 A,
– blachy o gr . 12 mm przy natężeniu prądu 130 A.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że największe zużycie energii występuje przy uruchamianiu urządzenia do cięcia plazmowego. Aby można było określić

dokładny koszt jednego przebicia oraz cięcia jednego metra badanej blachy, przyjęto, że koszt jednej kilowatogodziny (kWh) wynosi 0,50 złotych. W tabeli 8.53 przedstawiono zestawienie kosztów poszczególnych operacji.

7. Żywotność części eksploatacyjnych

Parametry cięcia plazmowego mają znaczący wpływ na żywotność części eksploatacyjnych. Na podstawie analizy literatury oraz przeprowadzonych badań eksperymentalnych określono czas zużycia poszczególnych części palnika plazmowego:

- mufa zewnętrzna - czas zużycia jest zależny od eksploatacji,
- osłona mufy zewnętrznej – należy wymienić przy widocznej deformacji,
- mufa wewnętrzna – należy wymienić przy widocznej deformacji,
- dysza - żywotność od 2 do 5 godzin pracy,
- rozdzielacz – należy wymienić przy widocznej deformacji,
- elektroda – żywotność od 1 do 5 godzin.

8. System wspomagania decyzji

Celem niniejszej dysertacji było opracowanie systemu wspomagania decyzji (SWD) umożliwiający wybór najkorzystniejszych, pod względem technologicznym i ekonomicznym, parametrów obróbki cięcia plazmowego blach o grubości 4, 8 i 12 mm wykonanych ze stali w gatunku S235 JR. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych dały pełnowartościowe dane pozwalające na stworzenie aplikacji komputerowej SWD. Głównym celem utworzenia SWD była możliwość jej obsługi w kilku krokach bez posiadanie specjalistycznej wiedzy z zakresu obsługi komputera. Dzięki szybkiej obsłudze w czasie do jednej minuty użytkownik ma możliwość:

- uzyskania kosztu wykonania ciętego detalu i całej jego partii,
- określenia czasu wykonania detalu i całej partii,
- wykonanie cięcia plazmowego uwzględniając określoną klasą jakości
- wyłonienia odpowiednich parametrów cięcia plazmowego dla żądanej klasy jakości,
- określenia żywotności oraz kosztu poszczególnych elementów palnika plazmowego.

Podsumowując wyniki badań, można stwierdzić, że doświadczenie operatora w procesie cięcia plazmowego jest kluczowe dla zapewnienia określonej jakości ciętych blach. Przeprowadzone badania jednoznacznie pokazują, że nie można opierać się wyłącznie na danych tabelarycznych podawanych przez producentów urządzeń. Z analizy wyników

można stwierdzić, że wszystkie podane prędkości cięcia są zawyżone. Domniema się, że jest to spowodowane zwiększeniem wydajności urządzeń do cięcia plazmowego. Wykonując cięcie plazmowe według danych tabelarycznych, przedsiębiorstwo jest narażone na dodatkowe koszty, które opisano w poprzednich rozdziałach.

Udostępnienie stworzonej aplikacji SWD będzie miało duże znaczenie nie tylko w aspekcie jakości ciętych detali. Pozwoli również mikro i małym przedsiębiorstwom na szybkie, rzetelne i bezproblemowe wykonywanie ofert cenowych, przy uwzględnieniu zużycia części eksploatacyjnych. Dzięki tym zabiegom przedsiębiorstwa będą mogły uniknąć dodatkowych, nieprzewidzianych kosztów, a tym samym zwiększyć swoją rentowność oraz konkurencyjność na rynku.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych można sformułować następujące wnioski:

- najważniejsze parametry w procesie cięcia plazmowego, na podstawie analizy eksperckiej, to: natężenie prądu oraz prędkość cięcia,
- wzrost prędkości cięcia przy stałej grubości blachy i stałym natężeniu prądu powoduje spadek jakości cięcia, poprzez zwiększenie odchyłki od prostopadłości ciętych krawędzi,
- zwiększenie grubości ciętego materiału powinno być poprzedzone zwiększeniem natężenia prądu,
- prędkość cięcia ma znaczący wpływ na powstawanie wypływek roztopionego metalu. Im jest większa, tym powstające wypływki są mniejsze,
- stosowanie wyższych prędkości cięcia powoduje konieczność zwiększenia natężenia prądu,
- zmniejszenie wpływu wyprowadzonej temperatury ciepła, w procesie cięcia plazmowego w cięty materiał, może być kompensowane ograniczeniem prędkości cięcia,
- zwiększenie prędkości cięcia, powoduje powstawanie małych, twardych gradów na krawędzi ciętej, które przy dalszej obróbce powinny być usunięte,
- zastosowanie wyższych prędkości cięcia powoduje zmniejszenie wysokości profilu Rz5 ciętych krawędzi,
- zwiększenie prędkości cięcia niekorzystnie wpływa na zmiany mikrostruktury zachodzące w SWC,

- cięte krawędzie, w których mikrotwardość przekracza HV380, powinny być poddane dodatkowej obróbce, polegającej na usunięciu warstwy wierzchniej ciętej krawędzi na odległość min 0,7 mm w głąb materiału rodzimego,
- największe zużycie energii w procesie cięcia plazmowego występuje przy uruchamianiu urządzenia. Koszt cięcia plazmowego rośnie wraz ze zwiększeniem grubości ciętego materiału,
- parametry cięcia plazmowego oraz doświadczenie operatora ma znaczący wpływ na żywotność części eksploatacyjnych palnika plazmowego,
- parametry cięcia plazmowego (prędkość cięcia) rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego mają negatywny wpływ na zużycie części eksploatacyjnych,
- stworzona aplikacja SWD znacząco wpłynie na jakość ciętych krawędzi, zużycie części eksploatacyjnych oraz zmniejszenie czasu wykonania oferty cenowej cięcia plazmowego.

10. KIERUNKI DALSZYCH PRAC

Cięcie plazmowe jest nowoczesną technologią, cechującą się dynamicznym rozwojem. Jakość ciętych krawędzi, wykonanych najnowszym urządzeniem do cięcia plazmowego, można porównać do jakości w technologii cięcia laserowego. Wraz z rozwojem technologii plazmowej, ewoluować powinny również systemy wspomagania decyzji.

Niniejsza rozprawa stanowi podstawę do dalszych prac dotyczących technologii cięcia plazmowego stali konstrukcyjnej w gatunku S235 wg PN-EN 10025-2-04. Kolejne badania dotyczyć będą cięcia blach o grubości 14, 16, 18, 20, 22, i 25 mm, przy natężeniu prądu 130A.

Następnym etapem będą eksperymenty przeprowadzone na stali odpornej na korozję w gatunku 1.4301 zgodnie z normą PN-EN 10088 oraz aluminium w gatunku AW-6060 zgodnie z normą EN 537-1.

Wyniki przeprowadzonych badan zostaną zaimplementowane do aplikacji SWD.

11. SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1. Budowa palnika plazmowego 21
Rys. 2.2. Elektroda (katoda) 23
Rys. 2.3. Dysza 24
Rys. 2.4. Rozdzielacz 24
Rys. 2.5. Osłona mufy zewnętrznej z otworem zawężającym 25
Rys. 2.6. Mufa zewnętrzna 26
Rys. 2.7. Mufa wewnętrzna 26
Rys. 2.8. Schemat budowy palnika plazmowego z dodatkowym zawężeniem łuku gazem ochronnym 27
Rys. 2.9. Schemat budowy palnika plazmowego z zawirowaniem gazu plazmowego i dodatkowym zawężeniem łuku zawirowanym strumieniem wody 27
Rys. 2.10. Schemat budowy palnika plazmowego z dodatkową kurtyną wodną 28
Rys.2.11. Schemat budowy palnika do cięcia powietrzem jako gazem plazmowym 28
Rys. 2.12. Schemat budowy palnika do cięcia powietrzem jako gazem plazmowym z bezpośrednim stykiem dyszy zawężającej z powierzchnią ciętego materiału..... 28
Rys.2.13. Schemat budwy palnika plazmowego do cięcia z dużą dokładnością. Konstrukcja palnika firmy HYPERTHERM - HyDefinition 29
Rys. 2.14. Schemat budowy palnika plazmowego do cięcia z dużą dokładnością. Konstrukcja palnika firmy KOMATSU-CYBERMATION – Resor Cutting 29
Rys 2.15. Elektroda z wkładką Hf 32
Rys 2.16. Widok ciętej płyty stalowej 36
Rys. 2.17. Badanie szerokości szczeliny cięcia blach z gatunku 1.4404 38
Rys. 4.1. Schemat wpływu parametrów cięcia plazmowego na proces oraz koszt 48
Rys. 4.2. Koszty cięcia plazmowego dla blachy o grubości 12mm 49
Rys. 5.1 Struktura SWD 54
Rys.6.1. Terminy gotowego przedmiotu 61
Rys. 6.2. Typy cięcia. Cięcie prostoliniowe 61
Rys. 6.3. Typy cięcia. Cięcie według konturu. 62
Rys. 6.4. Linia odchyłek cięcia..... 62
Rys. 6.5. Cięcie pionowe 63
Rys. 6.6. Cięcie skośne 63
Rys. 6.7. Wysokość profilu Rz5. 63
Rys. 7.1.Przecinarka plazmowa..... 68

Rys. 7.2. Support z dwoma palnikami plazmowym i gazowym 68
Rys. 7.3. Stanowisko do skanowania 3D..... 69
Rys. 7.4. Zwymiarowany detal..... 69
Rys. 7.5. Profilometr HOMMEL ETAMIC T8000 70
Rys. 7.6. Stanowisko do pomiaru mikrotwardości. Twardościomierz Zwick ZHV10 71
Rys. 7.7. Przygotowany i wytrawiony zgład w formie metalowej..... 72
Rys. 7.8 Przygotowany i wytrawiony zgład zainkludowany w żywicy epoksydowej 72
Rys. 8.1. Mikorstruktura ferrytyczno-perlityczna stali S235 JR 75
Rys. 8.2. Zwymiarowana płyta próbna 76
Rys 8.3. Przykład oznaczenie badanych płyt próbnych 79
Rys. 8.4. Schemat blokowy cyklu badań..... 81
Rys.8.5. Zwymiarowany detal..... 82
Rys. 8.6. Przykład skanowanych próbek.Krawędzie A, B, C, D, e..... 83
Rys. 8.7. Przykład skanowanych próbek. Krawędzie zewnętrzne E i F..... 83
Rys. 8.8. Brak przecięcia płyt próbnych 8/8/7 91
Rys. 8.9. Brak przecięcia płyt próbnych 8/13/7 91
Rys. 8.10. Brak przecięcia płyt próbnych 12/8/2 91
Rys. 8.11. Brak szczeliny w płytach próbnych 12/13/7 92
Rys. 8.12. Przykład określenia klasy prostopadłości..... 93
Rys. 8.13. Montaż marek słupów nośnych hali produkcyjnej..... 100
Rys. 8.14. Sposób wymiarowania płyt próbnych dla klas tolerancji..... 101
Rys. 8.15. Miejsca wykonywania pomiarów..... 114
Rys 8.16. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 4 mm natężenie prędu 80 A..... 116
Rys 8.17. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 4 mm natężenie prędu 130 A..... 116
Rys 8.18. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 8 mm natężenie prędu 80 A..... 117
Rys 8.19. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 8 mm natężenie prędu 130 A..... 118
Rys 8.20. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 12 mm natężenie prędu 80 A..... 118
Rys. 8.21. Wpływ prędkości cięcia na chropowatość, gr 12 mm natężenie prędu 130 A..... 119
Rys. 8.22. Miejsce cięcia oraz badania mikrotwardości HV0,1..... 121
Rys. 8.23. Miejsce pomiarów mikrotwardości..... 121
Rys. 8.24. Zdjęcie z pomiarów mikrotwardości..... 122
Rys. 8.25. Rozkład mikrotwardości gr. 4 mm, natężeniu prądu 80 A..... 124
Rys. 8.26. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 4 mm, natężeniu prądu 80 A..... 124
Rys. 8.27. Rozkład mikrotwardości gr. 4 mm, natężeniu prądu 130 A..... 126

Rys. 8.28. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 4mm, natężeniu prądu 130 A 126
Rys. 8.29. Rozkład mikrotwardości gr. 8 mm, natężeniu prądu 80 A 128
Rys. 8.30. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 8 mm, natężeniu prądu 80 A 128
Rys. 8.31. Rozkład mikrotwardości gr. 8 mm, natężeniu prądu 130 A 130
Rys. 8.32. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 8 mm, natężeniu prądu 130 A 130
Rys. 8.33. Rozkład mikrotwardości gr. 12 mm, natężeniu prądu 80 A 132
Rys. 8.34. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 12 mm, natężeniu prądu 80 A 132
Rys. 8.35. Rozkład mikrotwardości gr. 12 mm, natężeniu prądu 130 A 134
Rys. 8.36. Maksymalna średnia mikrotwardość gr. 12 mm, natężeniu prądu 130 A 134
Rys 8.37. Przekrój poprzeczny powierzchni stali S235 JR] 135
Rys. 8.38. Przekrój poprzeczny płyt próbnych o grubości 4 mm 136
Rys. 8.39. Zużycie energii elektrycznej w trakcie cięcia plazmowego dla blach o gr 4, 8 i 12 mm przy natężeniu prądu 80 i 130 A 140
Rys. 8.40. Zużycie energii elektrycznej w rozbiciu na długości cięcia poszczególnych grubości blach przy natężeniu prądu 80 i 130 A 140
Rys. 8.41. Zużycie energii elektrycznej w rozbiciu na ilość przebić blach o gr 4, 8 i 12 mm przy zastosowaniu natężenia prądu 80 i 130 A 140
Rys. 8.42. Rozkład liczby ciętych blach z podziałem na grubość oraz zastosowanie natężenia prądu przy cięciu plazmowym 141
Rys 8.43. Korelacja liniowa między zmiennymi 144
Rys.8.44. Zdjęcie z badań energochłonności procesu cięcia plazmowego 145
Rys. 8.45. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 4 mm ciętej z natężeniem prądu 146
Rys. 8.46. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 4 mm przy natężeniu prądu 80 A 146
Rys. 8.47. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 8 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A 147
Rys. 848. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 80 A 147
Rys. 8.49. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 12 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A 148
Rys. 8.50. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 12 mm przy natężeniu prądu 80 A 148

Rys. 8.51. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 4 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A 149
Rys. 8.52. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 4 mm przy natężeniu prądu 130 A 149
Rys. 8.53. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 8 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A 150
Rys. 8.54. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 8 mm przy natężeniu prądu 130 A 150
Rys. 8.55. Zużycie energii elektrycznej na jedno przebicie blachy o gr. 12 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A 151
Rys. 8.56. Zużycie energii elektrycznej na jeden metr cięcia plazmowego blachy o gr 12 mm przy natężeniu prądu 130 A 151
Rys. 8.57. Płyty stalowe 155
Rys. 8.58. Żywotność części eksploatacyjnych palnika plazmowego 158
Rys. 8.59. Schemat blokowy działania aplikacji systemu wspomagania decyzji 160
Rys. 8.60. Schemat blokowy powiązań pomiędzy różnymi danymi aplikacji systemu wspomagania decyzji 161
Rys. 8.61. Logowanie do systemu 162
Rys. 8.63. Wybór grubości ciętego materiału oraz określenie średnicy ciętych otworów 163
Rys. 8.64. Wybór klasy tolerancji wymiarowej 164
Rys. 8.65. Określenie liczby przebić, długości cięcia na detal 164
Rys. 8.66. Sprawdzenie poprawności wprowadzonych danych 165
Rys. 8.67. Określenie czasu cięcia 166
Rys. 8.68 Określenie kosztu cięcia 166
Rys. 8.69. Określenie parametrów cięcia dla żądanej klasy wymiarowej 167
Rys. 8.70. Określenie stopnia zużycia części eksploatacyjnych palnika 167
Rys. Z.1. Liczba podmiotów gospodarczych z branży produkcji wyrobów z metali 199
Rys.Z.2. Procentowy udział podmiotów gospodarczych zajmujący się produkcją wyrobów z metali według liczby zatrudnienia w roku 2015 200
Rys. Z.3. Przykład automatycznej przecinarki taśmowej 203
Rys. Z.4. Nożyce gilotynowe - przykład 204
Rys. Z.5. Elementy kształtowane na wykrawarkach sterowanych numerycznie 205
Rys. Z.6. Schemat palnika acetylenowo- tlenowego 207
Rys. Z.7. Urządzenie CNC do cięcia tlenowego 207

Rys. Z.8. Przecinarka Diament laser Fiber 209
Rys. Z.9. Urządzenie Opal Water Jet 211
Rys. Z.10. Blokowy schemat cyklu produkcyjnego w firmie AK ANATOL 215

12. SPIS TABEL

Tabela 2.1. Wady i zalety cięcia plazmowego 15
Tabela 4.1. Wybrane metody cięcia blach – zestawienie głównych wad i zalet 46
Tabela 5.1. Oprogramowania wspomagające decyzję w procesie cięcia blach 57
Tabela 6.1. Jakość powierzchni po cięciu dla poszczególnych klas konstrukcji 60
Tabela 6.2. Dopuszczalna twardość maksymalna 60
Tabela 6.3. Tolerancja prostopadłości lub nachylenia, *u* 64
Tabela 6.4. Średnia wysokość profilu, *Rz5* 64
Tabela 7.1. Parametry przecinarki plazmowej 67
Tabela 8.1 Wyniki najistotniejszych parametrów cięcia plazmowego 74
Tabela 8.2. Skład chemiczny stali S235JR 75
Tabela 8.3. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego dla natężenia prądu 80A 77
Tabela 8.4. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez producenta urządzenia do cięcia plazmowego dla natężenia prądu 130 A 77
Tabela 8.5. Parametry cięcia plazmowego rekomendowane przez operatora 77
Tabela 8.6. Porównanie parametrów cięcia plazmowego producenta urządzenia i operatora. 78
Tabela 8.7. Pozostałe parametry cięcia plazmowego zastosowane do wycinania płyt próbnych 78
Tabela 8.8. Zestawienie prędkości cięcia oraz oznaczenie badanych płyt próbnych dla poszczególnych grubości materiału oraz natężenia prądu 80
Tabela 8.9. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A 85
Tabela 8.10. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 4 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A 86
Tabela 8.11. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. 87
Tabela 8.12. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 8 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. 88

Tabela 8.13. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. 89
Tabela 8.14. Zestawienie pomiarów płyt próbnych o grubości 12 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. 90
Tabela 8.15. Odrzucone płyty próbne 92
Tabela 8.16. Zakresy odchyłek tolerancji prostopadłości lub nachylenia u, dla poszczególnych grubości blach, zgodnie z normą PN-EN ISO 9013:2017. 93
Tabela 8.17. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 4 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. 94
Tabela 8.18. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 4 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. 95
Tabela 8.19. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 8 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. 96
Tabela 8.20. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 8 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. 97
Tabela 8.21. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 12 mm ciętych z natężeniem prądu 80 A. 98
Tabela 8.22. Zakresy tolerancji prostopadłości próbek o gr. 12 mm ciętych z natężeniem prądu 130 A. 99
Tabela 8.23. Wartości odchyłek dla poszczególnych klas tolerancji (KT) wymiarowych 101
Tabela 8.24. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 102
Tabela 8.25. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 103
Tabela 8.26. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 104
Tabela 8.27. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 105
Tabela 8.28. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 106
Tabela 8.29. Klasa tolerancji wymiarowych z podziałem na klasy, dla blachy o gr 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 107
Tabela 8.30. Parametry cięcia dla poszczególnych klas zakresu tolerancji prostopadłości oraz wymiarowej 112

Tabela 8.31. Badane blachy próbne 114
Tabela 8.32. Średnia wysokość profilu Rz5 dla blach o grubości 4, 8 i 12 mm 115
Tabela 8.33. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. 115
Tabela 8.34. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A. 116
Tabela 8.35. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. 117
Tabela 8.36. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130A. 117
Tabela 8.37. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80A. 118
Tabela 8.38. Zestawienie pomiarów chropowatości *Rz5* dla płyty o grubości 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A. 119
Tabela 8.39. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 123
Tabela 9.40. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 4 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 125
Tabela 8.41. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 127
Tabela 8.42. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 8 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 129
Tabela 8.43. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 80 A 131
Tabela 8.44. Zestawienie wyników dla płyty próbnej o gr. 12 mm ciętej przy natężeniu prądu 130 A 133
Tabela 8.45 Dopuszczalne prędkości oraz parametry cięcia dla poszczególnych płyt próbnych 138
Tabela 8.46. Wynik estymacji przyjętego modelu 142
Tabela 8.47. Zestawienie wyników pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 4 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A 146
Tabela 8.48. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A 147

Tabela 8.49. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 12 mm, ciętej przy natężeniu prądu 80 A 148
Tabela 8.50. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 4 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A 149
Tabela 8.51. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 8 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A 150
Tabela 8.52. Zestawienie pomiaru poboru energii elektrycznej dla blachy o gr 12 mm, ciętej przy natężeniu prądu 130 A 151
Tabela 8.53. Zestawienie kosztów w stosunku do przebić oraz cięcia plazmowego dla poszczególnych parametrów..... 154
Tabela 8.54. Prędkość cięcia plazmowego stalowych płyt o gr. 8 mm, ciętych z natężeniem prądu 130 A 155
Tabela 8.55. Zestawienie danych 156
Tabela 8.56. Koszt zakupu poszczególnych elementów palnika plazmowego 158
Tabela Z.1. Podmioty gospodarcze z branży produkcji wyrobów z metali według sektora własności (opracowanie własne na podstawie..... 199
Tabela Z.2. Firmy zajmujące się produkcją wyrobów z metali wg liczby pracowników w roku 2015 199
Tabela Z.3. Możliwość cięcia tlenem wybranych metali 206

13. LITERATURA

1. Adalarasan R., Santhanakumar M., Rajmohan M.*: Application of Grey Taguchi-based response surface methodology (GT-RSM) for optimizing the plasma arc cutting parameters of 304L stainless steel.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2015,78 (5–8), s. 1161-1170.
2. Anakhov S.V., Pykin Y.A., Matushkin A.V.: *Analysis of the acoustic safety of narrow-jet metal-cutting plasma torches.* Welding International, 31 (1), s. 48-51.
3. Anakhov S.V., Gladkovskiy S.V., Lepikhin S.V.,Dvoynikov D.A., Pykin Y.A, Matushkin A.V.: *Mechanical and technological properties of welded joints produced after plasma cutting*. Welding International, 2017, 31 (6), s. 445-451.
4. Anakhov S.V., Pugacheva N.B., Pykin Y.A., Matushkin A.V., Bykova T.M.: *Qualitative study of steel cutting with the use of the narrow jet plasma technology*. Inorganic Materials: Applied Research, May 2017, 8 (3), s. 400-405.
5. Anwar N., Ashraf I.: *Significance of decision suport systems.* International Jurnal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, No 4, 2014.
6. Arnott, D., Pervan G.: *A critical analysis of decision support systems research*. Journal of information technology, Vol. 20, No 2, 2005, s. 67-87.
7. Barényi I.: *Microstructure changes in cut face obtained by plasma and laser cutting of selected high strength steels*. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 2016, 78 (1), s. 233-240.
8. Beckett C., Ocel J.: *Evaluation of bolt holes fabricated by using plasma arc cutting.* Transportation Research Record 2573, 2016, s.134-142.
9. Begic D., Kulenovic M., Cekic A., Dedic E.: *Some experimental studies on plasma cutting quality of low alloy steel*. 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation 2012, 1, s. 183-186.
10. Bhuvenesh R., Abdul Manan M.S., Norizaman M.H.: *The study of surface roughness and MRR of mild steel using manual plasma arc cutting machining.* Advanced Materials Research 576, 2012, s. 3-6.
11. Biały W., Midor K.: *Systemy wspomagania decyzji w inżynierii produkcji. Innowacyjność, Jakość, Zarządzanie*. Gliwice 2013.
12. Bini R., Colosimo B.M., Kutlu A.E., Monno M.: *Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plasma arc cutting system.* Journal of Materials Processing Technology, 2008, 196 (1-3), s. 345-355.

13. Boselli M., Colombo V., Ghedini E., (...), Rotundo F., Sanibondi P.: *High-speed imaging investigation of transient phenomena impacting plasma arc cutting process optimization.* Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46 (22).
14. Bruzda J., Pilarczyk J., Zeman M.: *Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S.* Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1983
15. Brzhozovskii B.M., Martynov V.V., Zinina E.P., Samodel'nykh V.O.: *Tool strengthening by surface modification in low-temperature plasma.* Journal of Machinery Manufacture and Reliability, September 2012, 41 (5), s. 413–416.
16. Cantoro G., Colombo V. , Concetti, A. , (...), Dallavalle, S. , Vancini, M.: *Plasma arc cutting technology: Simulation and experiments*. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 275 (1).
17. Çelik Y.H.: *Investigating the effects of cutting parameters on materials cut in CNC plasma*. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (10), s. 1053-1060.
18. Çelik Y.H., Özek M.B., Özek C.: *Investigation of plasma arc cutting parameters with type-2 fuzzy set and system*. Materialpruefung/Materials Testing, 2013, 55 (10), s. 789-795.
19. Celiński Z., *Podstawy fizyki plazmy w zastosowaniach technicznych.* WNT, Warszawa 1970, s. 147.
20. Chamarthi S., Reddy N.S., Elipey M.K.,Reddy D.V.R.: *Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material.* Procedia Engineering, 2013, 64, s. 854-861.
21. Chen L., Wei J.: *Analysis on cooling flow field of electrode in plasma arc cutting torch*. Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33 (8), s. 101-104.
22. Colombo V., Concetti A., Ghedini E., (...), Nemchinsky V., Vancini M.: *Advances in plasma arc cutting technology: The experimental part of an integrated approach.* Plasma Chemistry and Plasma Processing, 32 (3), 2012, s. 411-426.
23. Colombo V., Concetti A., Ghedini E., Dallavalle S.: *Design oriented simulation for plasma arc cutting consumables and experimental validation of results*. Plasma Sources Science and Technology, 2011, 20 (3).
24. Colombo V., Concetti A., Ghedini E., Dallavalle S., Vancini M.: *High-speed imaging in plasma arc cutting: A review and new developments*. Plasma Sources Science and Technology, 2009, 18 (2).

25. Colombo V., Concetti A., Ghedini E., Nemchinsky V.: *High-speed imaging investigation of transition phenomena in the pilot arc phase in Hf cathodes for plasma arc cutting*. Plasma Sources Science and Technology, 2010, 19 (6).
26. Crookes W., *Experiments on the Dark Space in Vacuum tubes*, Proc. Roy. Soc. London 79 (528) s. 98-117 (1907).
27. Cui, S. Wang Y., Risch E., Bourgeois D.: *Educational project on decision support system for precision agriculture.* Proceedings of the 2014 ASEE Gulf-Southwest Conference.
28. Das, MK , Barman, TK , Sahoo, P. , Kumar, K.: *Process optimization in non-conventional processes: Experimentation with plasma arc cutting.* Handbook of Research on Manufacturing Process Modeling and Optimization Strategies. IGI Global 2017, s. 82-119.
29. Das M.K., Kumar K., Barman T.K., Sahoo P.: *Prediction of surface roughness in plasma arc cutting of EN31 steel using artificial neural network*. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10 (11), s. 10085-10089.
30. DIN 2310-1:1978-11. Termal Cutting – Terminology and Nomenclature from SAI Global.
31. Druzdel M., J., Roger F., R.: *Decision suport system.* Encyklopedia of Liberary and Information Scince, Second edition, New York 2002.
32. Durga T. V.: *Optimizing the automated plasma cutting process by desingn of experiment.* Master of scince 05.2009.
33. Feldshtein E., Patalas-Maliszewska J., Kłos S., Kałasznikow A., Andrzejewski K.: *The use Plackett-Burman plans and the analysis of expert opinions, in order to assess the significance of controllable parameters of the plasma cutting proces.* Eksploatacja i Niezawodność – Maintence and Reability 2018, 30 (3), s. 443-449
34. Gawlik J., Plichta J., Świć A.: *Procesy produkcyjne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2013.
35. Górka J., Skiba R.: *Wpływ procesów cięcia termicznego i strumieniem wody na właściwości i jakość powierzchni ciętych stali niskostopowych o wysokiej granicy plastyczności*. Przegląd spawalnictwa 2/2013, s. 11 – 18.
36. Grzybek M., Kryński Z.: *Konkurencja i konkurencyjność przedsiębiorstw. Ujęcie teoretyczne.* Katedra Ekonomiki i Zarządzania, Uniwersytet Rzeszowski, s. 108-117. (data?)

37. Guo S., Zhou Q., Guo W., Xu P.: *Computational Analysis of a Double Nozzle Structure Plasma Cutting Torch*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, February 2010, 30 (1), s. 121-140.
38. G.U.S., Główny Urząd Statystyczny. Dane z roku 2013.
39. G.U.S., Główny Urząd Statystyczny. Dane z roku 2014.
40. G.U.S., Główny Urząd Statystyczny. Dane z roku 2015.
41. G.U.S., Główny Urząd Statystyczny. Dane z roku 2017.
42. Hatala M., Zajac J., Čep R., Orlovský I.: *Research of the technological parameters importance for plasma arc thermal cutting*. Applied Mechanics and Materials, 2012, s. 110-116, s. 3742-3749.
43. Hlína J., Šonský J., Gruber J.: *Tomographic Measurements of Temperature Fluctuations in an Air Plasma Cutting Torch*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, May 2017, 37 (3), s. 689–699.
44. Honczarenko J.: *Rozwój i automatyzacja obrabiarek skrawających*. Cz. II. Mechanik, 22/3, 2010, s. 90-94.
45. Hussary N., Renault T.: *Electrode life: A measure of system performance in plasma cutting*. Welding Journal (Miami, Fla), 2008, 87 (4), s. 30-32.
46. Hussary N., Renault T.: *Service life of electrodes: An indication of the performances of the plasma cutting systems*. Rivista Italiana della Saldatura, 2010, 62 (1) , s. 31-34.
47. Ilii S., M., Coteata M.: *Plasma Cutting Coast*, Technical University of Iasi Romania, 2009.
48. Instytut Spawalnictwa: *70 lat instytutu spawalnictwa 1945-2015*. Polskie Spawalnicze Centrum Doskonałości 2015.
49. ISO/TR 20172 ISO /TR 20172:2009 Welding – Grouping systems for materials – European materials.
50. Kałasznikow A.: *System wspomagania decyzji doboru parametrów cięcia plazmowego dla potrzeb redukcji kosztów wytwarzania.* Wybrane problemy zarządzania i finansów w sektorze publicznym i prywatnym. Przedsiębiorczość i zarządzanie 2017. Tom XVIII, Zeszyt 11, Część III, s. 169-185.
51. Kałasznikow A., Kłos S.: *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji.* Tom I, PTZP 2018, s. 554-563.
52. Karpiński T.: *Inżynieria produkcji.* WTN, Warszawa 2013, s. 135.

53. Keitel S., Muller U., Strofer M., Muglitz J.: *Przestrzenne cięcie termiczne – Techniczne rozwiązania i przykłady zastosowania.* Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2001, tom 45, nr 5, s. 87-91.
54. Kim S., Heberlein J., Lindsay J., Peters J.: *Methods to evaluate arc stability in plasma arc cutting torches*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43 (50).
55. Kim S., Heberlein J., Lindsay J., Peters J.: *Torch Design Modification Using Micro-jets to Suppress Fluid Dynamic Instabilities in Plasma Arc Cutting*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, February 2012, 32 (1), s. 45-63.
56. Kim S., Kim M.: *Evaluation of Cutting Characterization in Plasma Cutting of Thick Steel Ship Plates.* International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14 (9), s. 1571-1575.
57. Klimpel A.: *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali.* Technologie. WNT, Warszawa 1999.
58. Klimpel A.: *Technologie spawania, zgrzewania i cięcia metali.* WNT, Warszawa 2000.
59. Klimpel A.: *Technologia spawania i cięcia metali*. WPŚ, Gliwice 1997, s. 465- 470, s. 501-515.
60. Klimpel A., Cholewa W., Bannister A., Luksa K., Przystałka P.: *Experimental investigations of the influence of laser beam and plasma arc cutting parameters on edge quality of high-strength low-alloy (HSLA) strips and plates*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (1-4), s. 699-713.
61. Komitet Inżynierii Produkcji PAN: *Istota inżynierii produkcji*. Warszawa, czerwiec 2012.
62. Knosala R.: *Inżynieria produkcji, Kompendium wiedzy*, P.W.E, 2017, s. 637-732.
63. Kordus A.: *Plazma w technice*. WUPP, Poznań 1973, s. 134.
64. Kordus A.: *Plazma. Właściwości i zastosowanie w technice.* WNT, Warszawa 1985, s. 132.
65. Kumar Senthil M., Dhanasekar B., Ranga Janardhana G., Paramasivam, S., Jaya Kumar K.S.: *Comparison of modeling techniques for selecting optimized and automated plasma cutting process parameters*. International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing, 2012, 3 (3).
66. Kumar M.S., Dhanasekar B., Janardhana G.R., Paramasivam S., Kumar K.S.J.: *Numerical simulation and experimental verification of electrode life for different coolants and its flow in plasma cutting torch*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 6-9 December 2011, s. 1431-1435.

67. Lazarević, A.: *Experimental research of the plasma ARC cutting proces.* Journal of Applied Engineering Science, 2014, 12 (4), s. 291-296. (c/ ć ?)
68. Lazarevic A., Lazarevic D.: *Investigations of material hardness and structural changes in the heat-affected zone during plasma cutting*. Welding in the World, November 2017, 61(6), s. 1069-1075.
69. Lazarevic A., Lazarevic D., Damnjanovic Z., Mladenovic-Ranisavljevic I.: *Prototype expert system for prediction of plasma cutting process parameters*. Technics Technologies Education Management, 2012, 7 (3), s. 1331-1334.
70. Li M., Zhang L.C., Mo J.H., Zhao Z.Y..: *Smoothing technique for 2D contour in numerical control plasma cutting*. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, 2011, 17 (12), s. 2623-2628.
71. Li X., Zhao X.X., Xu F.*: Transurethral plasma cutting operation in treatment (data?)*
72. Long N.P., Tanaka Y., Uesugi Y., Yamaguchi Y.: *Numerical investigation of the effect of cathode holder shape on hafnium cathode evaporation for an oxygen plasma cutting arc*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46 (22).
73. Maity K.P., Bagal D.K.: *Effect of process parameters on cut quality of stainless steel of plasma arc cutting using hybrid approach*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, April 2015, 78 (1–4), s. 161-175.
74. Mandal N.R.: *Plate Cutting*, Ship Construction and Welding. Springer, Singapore, 2016, s. 117-133.
75. Maslani A., Sember V.,Stehrer T., Pauser H.: *Measurement of Temperature in the Steam Arcjet During Plasma Arc Cutting.* Plasma Chemistry and Plasma Processing, June 2013, 33 (3), s. 593–604.
76. Materiały firmowe i reklamowe firm: STIGO, HYPERTHERM, STIGAL, CODETON SOFTWARE, ESAB, FALINA SYSYTEMY CAD CAM, IGEMS SOFTWARE, AIR LIQUIDE WELDING POLSKA, STRICKER SYSTEMS, LANTEK SHEET METAL SOLUTION, METALIX, RADAN POLSKA, JETCAM INTERNATIONAL S.A.R.L.
77. Mazurkiewicz A., Deja G.: *Jakość cięcia plazmowego i laserowego wybranych materiałów. Logistyka – nauka.* Logistyka 3/2014, s. 4240 – 4249.
78. *Metal Technika. Palnik plazmowy chłodzony wodą*, model MTH13W, 260W. Instrukcja obsługi. Wersja z dnia 05.05.2009.
79. Mistur L.: *Spawanie łukowe w osłonach gazowych według wytycznych krajowych i międzynarodowych.* Wydawnictwo KaBe, Krosno 2010

80. Muhamedagic K., Begic-Hajdarevic D., Ahmet C., Mehmedovic M.: *Multi-Response optimization of plasma cutting parameters using grey relational analysis*. Annals of DAAAM and Proceedings, 2017, 28, s. 1074-1082.
81. Nemchisnky V.: *Cathode Erosion due to Evaporation in Plasma Arc Cutting Systems*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, April 2013, 33 (2), s. 517-526.
82. Nemchinsky V.: *Erosion of thermionic cathodes in welding plasma arc cutting systems.* IEEE Transactions on plasma science, January 2014, 42 (1), s. 199-215
83. Nemchinsky V.: *Plasma flow in a nozzle during plasma arc cutting.* Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(21), s. 3102-3107
84. Nemchinsky V., Severance W.S.: *Plasma arc cutting: Speed and cut quality*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42 (19).
85. Nemchinsky, V.: *Temperature created by a moving heat source that heats and melts the metal plate (Plasma Arc Cutting)*. Heat Transfer, 16 August 2016, 138 (12).
86. Nemchinsky V.: *What we know and what we do not know about plasma arc cutting*. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39, s. 423-438.
87. Özek C., Caydaş U. Ünal E.: *A fuzzy model for predicting surface roughness in plasma arc cutting of AISI 4140 steel*. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27 (1), s. 95-102.
88. Pakos R.: *Wpływ metody cięcia na właściwości stalowe krawędzi ciętej*, s. 54-57, 8/2012. (miejsce wydania?)
89. *Palnik plazmowy chłodzony wodą.* Model MTH130W, 260W, Instrukcja obsługi.
90. Parthiban A., Prasath J.P., Vivek P., Pugazhenthi R.: *Experimental investigation of plasma arc cutting for stainless steel sheet*. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, February 2018, 8 (1), s. 907-914.
91. Pearson J. M., Shim, J.: *An empirical investigation into decision support systems capabilities: a proposed taxonomy.* Information & Management, 1994, Vol. 27, No 1, s. 45-57.
92. Peko I., Nedić B., Đorđević A., (...), Janković M., Veža I.: *Modeling of surface roughness in plasma jet cutting process of thick structural steel*. Tribology in Industry, 2016, 38 (4), s. 522-529.
93. Pilarczyk J.: *Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo*. WNT, Warszawa 2014.
94. Pilarczyk J.: *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo.* Tom II, WNT, Warszawa 2005, s. 665-681.
95. Pilarczyk J.: *Poradnik Inżyniera.* Tom II, WNT, Warszawa 2012.

96. Pinheiro M., J.: *Plasma: the genesis of the word. Department of Physics and Center for Plasma Physics, & Instituto Superior T´ecnico*, Av. Rovisco Pais, & 1049-001 Lisboa, Portugal 2008.
97. Plucker J., Hittorf J., W.: *On the Spectra of Ignited Gases and Vapors, with especial regard to the different Spectra of the same elementary gaseous substance,* Phil. Trans. Roy. Soc. of London 155, s. 1-30 (1865).
98. PN-EN ISO 6507-1:2007. Metal – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań.
99. PN-EN ISO 4288:2011E. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS)Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni do badań.
100. PN-EN ISO 15614-1:2017-08. Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania – Część 1: Spawanie łukowe i gazowe oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.
101. PN-EN 10079:2009. Terminologia wyrobów stalowych.
102. PN-EN ISO 9013:2017. Thermisches schneiden – Einteilung thermischer Schnitte – Geometrische Produktspezifikation und Qualitat.
103. PN-EN ISO 1090-2:2012. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych - Część 1: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
104. Prevosto L., Kelly H., Mancinelli B.: *Determination of plasma velocity from light fluctuations in a cutting torch*. Journal of Applied Physics, 2009, 106 (5).
105. Prevosto L., Mancinelli B., Kelly H.: *On the dynamics of cutting arc plasmas: The role of the power supply ripple*. Advanced Electromagnetics, 2012, 1 (2), s.12-15.
106. Poradnik inżyniera 2, *Spawalnictwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2005, 14 Cięcie plazmowe, dr inż. Tomasz Pfeifer.
107. Ramakrishnan H.,Balasundaram R.,Ganesh N., Karthikeyan N.:*Experimental investigation of cut quality characteristics on SS321 using plasma arc cutting.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, February 2018, 40 (2).
108. Rotundo F., Martini C.,Chiavari C., Ceschini L., Concetti A., Ghedini E., Colombo V., Dallavalle S.: *Plasma arc cutting: Microstructural modifications of hafnium cathodes during first cycles.* Materials Chemistry and Physics, June 2012, 134 (2–3), 15, s. 858-866.
109. Sadowski M.: *Pomiary emisji elektromagnetycznej na stanowisku cięcia plazmowego.* Pomiary Automatyka Robotyka, 2015, 19 (4), s. 75-78.

110. Sage A. P.: *Decision Support Systems Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1991.
111. Salonitisa K.,Vatousianosb S.: *Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process*. Procedia CIRP, 2012, 3, s. 287-292.
112. Santhanakumar M., Adalarasan R., Rajmohan M.: *Parameter design in plasma arc cutting of galvanised iron sheet using desirability function-based response surface methodology*. International Journal of Manufacturing Research, 2015, 10 (3), s. 199-214.
113. Schitsin Y.D., Kuchaev P.S., Schitsin V.Y.: *Plasma cutting of metals with reversed polarity and mixed supply of gases*. Welding International, 2013, 27 (11), s. 890-892.
114. Severstal, *Certyfikat składu chemicznego*, Numer certyfikatu 428/00186217-60138, specyfikacja 5215. 19.05.2017.
115. Skoczylas A.: *Analiza porównawcza procesu cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym.* Postępy Nauki i Techniki, 8, s. 121-128.
116. Skoczylas A., Zaleski K.: *Effect of plasma cutting parameters upon shapes of bearing curve of C45 steel surface. Advances in Scince and Technology Research Jurnal,* Vol. 9, No 27, September 2015, s. 78-82.
117. Słania J., Wilk P.: *Analiza i porównanie trwałości elektrod stosowanych podczas zmechanizowanego cięcia plazmowego.* Przegląd spawalnictwa 7/2014, s. 40-45.
118. Stephan A., Heuermann H., Prantner M.: *Cutting human tissue with novel atmospheric-pressure microwave plasma jet*. Microwave Conference (EuMC), London, 4-6 October 2016, s. 902-905.
119. Stigal: *Kolejna nowość firmy sStigal – wielkogabarytowy PRO Master3D – maszyna do zadań specjalnych*. Biuletyn Instytutu spawalnictwa, 3/2016, rocznik 60, s. 76-77.
120. Šonský J., Gruber J.: *Observation of HF cathode and arc root inside cutting plasma torch*. 20th Symposium on Physics of Switching Arc, Brno (Czech Republic), 2-6 September 2013, s. 297-300.
121. *Technologie cięcia – która najlepsza?* Technologie cięcia. Stale Metale & Najnowsze Technologie. Wrzesień-Październik 2012, s. 60-61.
122. Thomas D.J.: *Optimising Plasma Cut-edge Properties for Improving the Durability of Bridge Structures*. International Journal of Steel Structures, 2011, 11 (4), s. 481-491.
123. Tomaschek R.: *Grimsehls Lehrbuch der physik*, Vol. II, Teubner, Leipzig, 1932, s. 302-333.
124. Tonks L., Langmuir I., Oscillations in Ionized Gases, Phys. Rev. 33, 195 1929.

125. Trzepieciński T.: *Trendy rozwojowe maszyn i technik stosowanych w technologii cięcia blach*. Inżynieria Maszyn, R 17, z. 3, 2012.
126. Wang J.Y., He C.H., Huang J.Z., Chen J., Fang C.F.: *An ultrasonic-frequency pulsed arc approach to improve the life of plasma cutting electrode*. Key Engineering Materials, 2011, 450, s. 288-291.
127. Węglowski M. St., Pfeifer T.: *Cięcie termiczne – kontrola jakościw świetle wymagań norm.* Stal, Metale &Nowe Technologie, Technologie cięcia, Maj-Czerwiec 2015
128. Węglowski M., St., Pfeifer T.: *Influence of cutting technology on properties of the cut edges*. Advances in manufacturing scince and technology, Vol. 38, Nr. 2, 2014
129. Wilk P.: *Zużycie części eksploatacyjnych i zniszczenie palnika przy wypalaniu plazmowym,* cz. 1. Projektowanie i Konstrukcje inżynierskie. Marzec 2013, s. 44-49.
130. Wilk P.: *Zużycie części eksploatacyjnych i zniszczenie palnika przy wypalaniu plazmowym*, cz. 2. Projektowanie i Konstrukcje inżynierskie. Kwiecień 2013, s. 60-65.
131. Wójcik M.: *Metody oceny zgodności opinii ekspertów na potrzeby badania ferosight.* U.E. Katowice 2015, Zeszyty naukowe nr 220.
132. YamaguchiY., Yoshida K., Uesugi Y., Tanaka Y., Morimoto S., Minonishi M., Saio K.: *Experimental Study of Consumption of Hafnium Electrode in Oxygen Plasma Arc Cutting*. Welding in the World, July 2012, 56 (7-8), s. 72–81.
133. Yamaguchi Y., Yoshida K., Uesugi Y., (...), Minonishi M., Saio K.: *Experimental study of erosion of hafnium electrodes for oxygen plasma arc cutting.* Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2010, 28 (3), s. 311-318.
134. Yamaguchi Y., Yoshida K., Katada Y., Uesugi Y., Tanaka Y.: *Experimental study of phenomena on electrode for oxygen plasma arc cutting torch.* Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2011, 29 (1), s. 10-17.
135. Zaborski S., Strechnij T.: *Laserowe i plazmowe cięcie blach ze stali niestopowych i kwasoodpornych*. Inżynieria Maszyn, R. 16, z. 4, 2011.
136. Zhou Q., Li H. Liu F.,Guo S., Guo W., Xu P.: *Effects of Nozzle Length and Process Parameters on Highly Constricted Oxygen Plasma Cutting Arc.* Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2008, 28 (6), s. 729-747.
137. Zhou Q., Guo W., Li H.: *Numerical simulation on the effect of shielding gas on the plasma cutting arc*. Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica, 2011, 60 (2).
138. Zhou, Q., Yin, H., Li, H., (...), Guo, W., Xu, P.: *The effect of plasma-gas swirl flow on a highly constricted plasma cutting arc*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42 (9).

139. Żabicki D.: *Przecinarki taśmowe. Technologia ciecia*. Stal Metale & Nowe Technologie. Wrzesień – Październik 2012, s. 42-44.
140. Opracowanie własne.

STRONY WWW

141. http://ciecieplazma.pl/obrobka-metali/ [dostęp 20.03.2018]
142. https://www.cormak.pl/automatyczna-przecinarka-tasmowa-cormak-s-200-rha/produkt-1080 [dostęp 20.03.2018]
143. Power, D. J.: A brief history of decision support systems. 2007, http://dssresources.com/history/dsshistory.html [dostęp 11.05.2018].
144. https://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/2947/ciecie-termiczne-metali-cz-ii.html [dostęp 22.03.2018]
145. https://www.eckert.com.pl/pl/offer/machines/28,opal-waterjet.html [dostęp 26.04.2018]
146. https://www.hypertherm.com/pl/learn/cutting-education/plasma-technology/ [dostęp 12.07.2017]
147. Koszty eksploatacji zautomatyzowanych systemów cięcia plazmowego https://www.hypertherm.com/pl/learn/articles/operational-costs-of-automated-plasma-cutting/ [dostęp 12.05.2018]
148. https://www.ita-polska.com.pl/produkt/274/stacjonarny_przyrzad_do_pomiaru_chropowatosci_hommel_etamic_t8000r/1/systemy_pomiarowe/9/chropowatosc_i_kontur/46/stacjonarne_przyrzady_do_pomiaru_chropowatosci_i_konturu.html [dostęp 12.05.2018]
149. Politowicz K.: Technologie cięcia termicznego i hydroabrazywnego, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, październik 2010, www.konstrukcjeinzynierskie.pl.
150. http://www.maszyny-chmielinski.pl/produkt/nozyce-gilotynowe-elektryczno-mechaniczne-mss-classic [dostęp 26.04.2018]
151. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html [dostęp 17.07.2017]
152. https://metale.pl/wiedza/metale/ciecie-metali [dostęp 12.05.2018]
153. https://mfiles.pl/pl/index.php/Technika_delficka [dostęp 12.05.2018]
154. http://pdfpiw.uspto.gov/.piw?Docid=01121218&homeurl=http%3A%2F%2Fpatft.uspto.gov%2Fnetacgi%2Fnph-Parser%3FSect2%3DPTO1%2526Sect2%3DHITOFF%2526p%3D1%2526u%3D%2Fnetahtml%2FPTO%2Fsearch-b-ol.html%2526r%3D1%2526f%3DG%2526l%3D50%2526d%3DPALL%2526S1%3D1121218.PN.%2526OS%3DPN

%2F1121218%2526RS%3DPN%2F1121218&PageNum=&Rtype=&SectionNum=&idkey=NONE&Input=View+first+page [dostęp 22.03.2018]

155. http://www.pmax.pl/czesci-eksploatacyjne-centricut/ [dostęp 28.05.2018].
156. Części eksploatacyjne Hypertherm – eksploatacja i optymalizacja. http://www.pmax.pl/czesci-eksploatacyjne-hypertherm/ [dostęp 20.05.2018].
157. http://stal.elamed.pl/material%5B20920%5D [dostęp 26.04.2018].
158. https://synergia-it.pl/branza-metalowa-maszynowa/ [dostęp 20.03.2018].
159. Kiszka K., Historia cięcia plazmą. Budownictwo 26.02.2014 .http://toppresellpages.pl/historia-ciecia-plazma/ [dostęp 12.07.2017].

14. ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK NR 1 – Procesy cięcia w branży metalowej

Rola i znaczenie mikro i małych przedsiębiorstw z branży metalowej dla gospodarki

Bez względu na wielkość przedsiębiorstwa, jednym z etapów procesów produkcyjnych wyrobów metalowych jest proces cięcia. Cięcie, jako proces technologiczny, jest pojęciem o bardzo szerokim znaczeniu. Definicja podaje, że są to procesy, które zmieniają właściwości fizyczne lub chemiczne metali [141]. Cięcie jest czynnością polegającą na rozdzieleniu materiału. Może być wykonane poprzez usuwanie części materiału metodą obróbki ubytkowej lub za pomocą obróbki plastycznej. Coraz częściej wymogi stawiane procesom cięcia muszą uwzględniać estetykę wyrobu finalnego. Większość procesów cięcia odbywa się za pomocą obróbki skrawaniem, czyli usunięcia nadmiaru materiału.

Jednym z dynamiczniej rozwijających się sektorów przemysłu jest branża metalowa. Jest ona powiązana jest z branżą maszynową, stalową, sektorem narzędziowym oraz z obróbką metali. Kluczowymi odbiorcami produktów branży metalowej są budownictwo, sektor samochodowy i AGD. Gdy w podanych branżach następuje zmniejszenie zamówień, automatycznie branża metalowa odnotowuje straty [158].

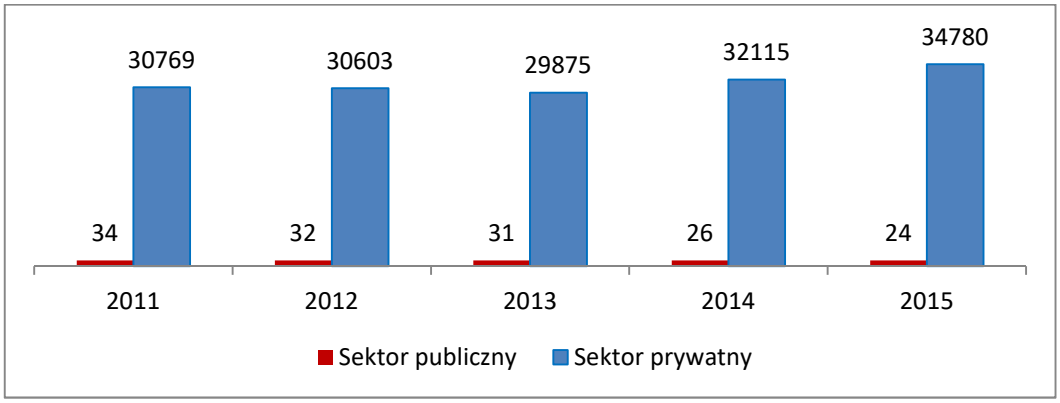
Ścisłe powiązania oraz uzależnienie mikro i małych przedsiębiorstw z innymi sektorami spowodowało, iż wiele firm zakończyło swoją działalność gospodarczą. W roku 2013 upadłość ogłosiło 886 przedsiębiorstw, o 1% więcej w porównaniu z rokiem poprzednim. Znaczącym problemem mikro i małych przedsiębiorstw jest również nadwyżka mocy produkcyjnych, która sięga 30%-40%. Jednak istnieją takie przedsiębiorstwa, które pozytywnie oceniają swoją sytuację na rynku. Większość tych przedsiębiorstw cechuje wysoki poziom eksportu wytwarzanych wyrobów [158].

Dla mikro i małych przedsiębiorstw, niezależnie od branży, ograniczeniami w rozwoju są duże koszty inwestycyjne. Przedsiębiorstwa, decydując się na zakup nowego urządzenia, w większości przypadków kierują się przede wszystkim kosztami zakupu. Na dalszy plan schodzą koszty związane z eksploatacją i serwisem urządzenia oraz problemy z jakością wytwarzanych wyrobów. Podobnie jest w przypadku mikro i małych przedsiębiorstw, które zajmują się produkcją konstrukcji ze stali. Sytuacja taka wynika ze struktury przedsiębiorstw. Jak pokazuje tabela Z.1 i rysunek Z.1, istnieje duża dysproporcja między liczbą przedsiębiorstw z sektora publicznego i prywatnego. Różnice te pogłębiają się na przestrzeni

lat. Rośnie liczba przedsiębiorstw w sektorze prywatnym, a maleje liczba przedsiębiorstw w sektorze publicznym.

Tabela Z.1. Podmioty gospodarcze z branży produkcji wyrobów z metali według sektora własności (opracowanie własne na podstawie [38, 39, 40, 140]

	2011	2012	2013	2014	2015
Ogółem	30803	30635	27254	32141	34804
Sektor publiczny	34	32	31	26	24
Sektor prywatny	30769	30603	29875	32115	34780

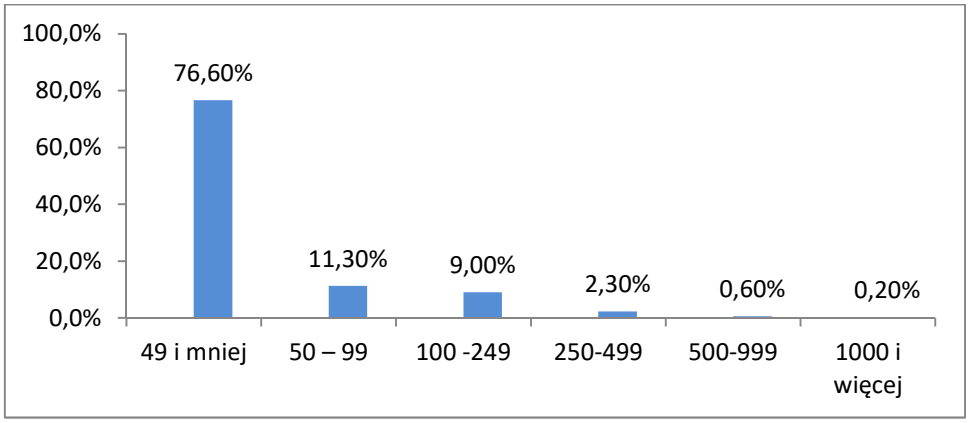


Rys. Z.1. Liczba podmiotów gospodarczych z branży produkcji wyrobów z metali według sektora własności [38, 39, 40, 140]

Waga czynnika ekonomicznego wynika także z wielkości przedsiębiorstwa. Jak podają dane G.U.S. z roku 2015 (tabela Z.2 i rysunek Z.2), większość przedsiębiorstw zajmujących się produkcją wyrobów z metali to firmy zatrudniające poniżej 49 pracowników (przedsiębiorstwa te stanowią ponad 76% wszystkich przedsiębiorstw).

Tabela Z.2. Firmy zajmujące się produkcją wyrobów z metali wg liczby pracowników w roku 2015

	Liczba osób zatrudnionych						
	Ogółem	49 i mniej	50 – 99	100 -249	250-499	500-999	1000 i więcej
Liczba podmiotów prowadzących działalność	4829	3700	545	433	111	29	11
Ujęcie procentowe	100%	76,6%	11,3%	9,0%	2,3%	0,6%	0,2%



Rys.Z.2. Procentowy udział podmiotów gospodarczych zajmujący się produkcją wyrobów z metali według liczby zatrudnienia w roku 2015 [41, 140]

Technologie cięcia blach

Zastosowanie odpowiedniej technologii cięcia w procesie produkcji zależy od wielu czynników. Każda z dostępnych na rynku metod ma swoją specyfikę oraz zakres wykorzystania. Za pomocą nowoczesnych technologii cięcia materiałów, obecnie można wykonywać szeroki zakres kształtów oraz perforacji [121].

Technologie cięcia mają zastosowanie do wytwarzania elementów np. z arkuszy blach. Elementy te mogą być cięte na wymiar, jako półprodukty poddawane dalszej obróbce, a także mogą być wykorzystane do cięcia kształtowników, wykonywania otworów czy żłobienia. Geometria wycinanych elementów jest często złożona. Zastosowanie technologii cięcia można wykorzystać również w spawalnictwie do przygotowania brzegów elementów (ukosowanie), w celu wykonania odpowiedniej wielkości rowka spawalniczego. Każda technologia cięcia powinna być zweryfikowana pod kątem jej przydatności oraz spełnienia określonych wymagań [127, 128].

Proces cięcia może mieć różny poziom automatyzacji (od cięcia ręcznego po w pełni zrobotyzowane procesy). Cięcie lub ukosowanie może odbywać się na płaszczyźnie lub w przestrzeni [53]. Proces cięcia w przestrzeni jest wykorzystywany przy spawaniu profili zamkniętych, w tym rur lub belek. W przestrzeni wykonuje się również otwory wewnętrzne w profilach zamkniętych, które są wykorzystywane przy produkcji płaszczów wodnych lub króćców, a także w węzłach konstrukcji stalowych. Prędkość, a tym samym wydajność cięcia, jest parametrem wynikowym zależnym od rodzaju ciętego materiału, jego grubości oraz od danych charakterystycznych dla danego procesu.

Przy doborze technologii cięcia, należy zwrócić szczególną uwagę na [58]:

- gatunek i grubość ciętego materiału,
- długość i kształt linii cięcia,

- wymaganą jakość ciętych krawędzi zgodnie z normą PN-EN ISO1090-2 [103], PN-EN ISO 9013:2017 [102] oraz wpływ procesu cięcia na mikrostrukturę materiału,
- szybkość cięcia,
- możliwości oraz wpływ na wydajność,
- koszty procesu cięcia, w tym: cenę urządzenia, cenę części zamiennych, koszt obsługi, koszt eksploatacji oprzyrządowania, zużycie energii i materiałów eksploatacyjnych.

Aby wybrać najlepszą technologię cięcia, należy wykonać badania jakości ciętych powierzchni, m.in. pod kątem prostopadłości lub tolerancji wymiarowych. Materiały, które są wrażliwe na działanie ciepła, powinny być przebadane w celu określenia wpływu procesu cięcia na zmiany zachodzące w budowie mikrostrukturalnej. Uzyskane w ten sposób wyniki pozwalają użytkownikowi dobrać odpowiednią metodę oraz warunki prowadzenia procesu technologicznego spełniające określone wymagania.

Spośród szeregu znanych technologii cięcia blach, należy wybrać taką, która będzie miała zastosowanie w zależności od oczekiwanej dokładności i wymaganej szybkości cięcia oraz grubości i rodzaju ciętego materiału. Zastosowanie różnych technologii cięcia skutkuje również różnymi jego kosztami. Koszty te dotyczą zarówno amortyzacji urządzeń, jak również ich eksploatacji. Cięcie mechaniczne i wytłaczanie stosuje się najczęściej w przypadku obróbki blach cienkich. Szczególnie dużym wyzwaniem wydaje się cięcie grubych blach (powyżej 3 mm według normy PN-EN 10079:2009 [101]), gdzie najczęściej zastosowanie mają technologie cięcia termicznego (tlenowe, cięcie plazmowe, cięcie laserowe) lub strumieniem wody (hydroabrazywne) [47, 149]. Dokonując wyboru technologii cięcia blach, należy uwzględnić zarówno cenę urządzenia z oprzyrządowaniem, jak i koszty jego eksploatacji. Jednak szczególną uwagę należy zwrócić na rodzaj ciętych materiałów, np.: gatunki stali, ich grubości oraz zakładaną dokładność cięcia. Dopiero znając te parametry, można dobrać właściwą dla danego zastosowania technologię cięcia blach.
Proces cięcia jest pierwszym etapem w procesie wytwarzania konstrukcji stalowych lub aluminiowych i zgodnie z obowiązującymi normami musi być na każdym etapie kontrolowany. W kolejnych podrozdziałach dokonano charakterystyki cięcia mechanicznego, tlenowego, laserowego oraz opisano technologię cięcia strumieniem wody.

Cięcie mechaniczne

Cięcie to operacja polegająca na rozdzielaniu materiału. Idealny proces cięcia to rozdzielenie wiązań atomowych w płaszczyźnie cięcia wzdłuż określonej linii bez wpływu na stan fizyczny materiału. Metody cięcia różnią się ilością zużytej energii, szybkością cięcia, wielkością ubytku materiału, wpływem cieplnym na materiał, jakością ciętych krawędzi [152].

W procesie cięcia mechanicznego rozróżniamy trzy podstawowe metody [121]:

- skrawającą (piły),
- plastyczną (przeprowadzoną za pomocą krawędzi tnących narzędzi na pracach lub nożycach),
- kuźniczą (przecinarki, przebijaki).

Metoda skrawająca – inaczej przecinanie, wykonywane piłami uzębionymi (tarczowe, taśmowe) lub nieuzębionymi. Stosowana jest najczęściej przez producentów wyrobów lub półwyrobów hutniczych do cięcia bloków stalowych, wlewków, rur, prętów i kształtowników [152]. W zależności od modelu maszyny, element cięty może być podawany w sposób ręczny, półautomatyczny lub automatyczny.

Przecinarki ręczne są to najprostsze urządzenia lekkie, które mają zastosowanie w serwisach mobilnych. Obrotowa głowica pozwala na cięcie pod kątem 45°. Ramie tnące jest podnoszone i opuszczane ręcznie. Oferowane urządzenia do cięcia ręcznego posiadają w swoim wyposażeniu zespół smarująco chłodzący, zbiornik na chłodziwo, szczotkę odpowiadająca za utrzymanie czystości oraz imadło do unieruchomienia ciętego materiału [139].

Przecinarki półautomatyczne wykonane są ze stabilnych i masywnych konstrukcji, dzięki którym dają możliwość ich użytkowania w przemyśle. Są to urządzenia posiadające obrotowy stół roboczy, ułatwiający precyzyjne cięcie pod kątem, płynną regulację prędkości i posuw cięcia oraz automatyczne podnoszenie ramienia tnącego po zakończeniu cięcia.

Automatyczne przecinarki taśmowe w pierwszej kolejności posiadają automatyczny przesuw ciętego materiału w kierunku taśmy tnącej. Posiadają panel sterowniczy, za pomocą którego operator ma możliwość zaprogramowania liczby ciętych detali, ich wymiar oraz prędkość pracy taśmy. Urządzenie informuje o zaistniałych błędach w trakcie procesu cięcia, a także wyłącza się samoczynnie w przypadku zakończenia cięcia serii, braku ciętego materiału, pęknięcia taśmy lub innej awarii [139]. Przykład automatycznej przecinarki taśmowej przedstawiono na rysunku Z.3.

Rys. Z.3. Przykład automatycznej przecinarki taśmowej [142]

Metoda plastyczna - dokonuje się podziału materiału z naruszeniem jego spójności bez powstającego ubytku (wiórów, produktów spalania lub stopienia). Metodę plastyczną dzielimy na:

- wycinanie,
- odcinanie,
- rozcinanie,
- dziurowanie,
- okrawanie,
- nacinanie.

Wykonuje się je za pomocą krawędzi tnących narzędzia na prasach lub nożycach (gilotynowych, krążkowych lub dźwigowych) [152]. Najczęściej spotykanym urządzeniem w przedsiębiorstwach produkujących wyroby metalowe do obróbki plastycznej są nożyce gilotynowe oraz wykrawarki CNC.

Nożyce gilotynowe są stosowane do cięcia materiałów o grubości do 10 mm. W mikro i małych przedsiębiorstwach stosuje się nożyce gilotynowe do cięcia blach o grubości do 4 mm. Na rysunku Z.4 przedstawiono przykład nożyc gilotynowych.

Rys. Z.4. Nożyce gilotynowe - przykład [150]

Nożyce gilotynowe najczęściej stosowane są do cięcia prostych elementów. Precyzyjne układy sterowania pozwalają uzyskać krawędzie cięte bez zadziorów.

Wykrawarki sterowane numerycznie są szybkobieżnymi prasami o krótkim skoku stosowanymi stosowane do obróbki plastycznej półfabrykatów z blach. Do głównych operacji realizowanych na wykrawarkach możemy zaliczyć:

- cięcie,
- wykrawanie.

Możliwości najnowszych wykrawarek wykraczają poza czynności technologiczne dzielenia materiałów. Najnowsze technologie, w połączeniu ze starowaniem numerycznym, czynią z nich centra obróbcze do kształtowania wyrobów z blach. Najnowsze wykrawarki CNC wykorzystuje się do takich procesów jak [96]:

- wykrawanie,
- niblowanie,
- cięcie,
- przetłaczanie,
- znakowanie,
- gięcie,
- gwintowanie,
- przetłaczanie.

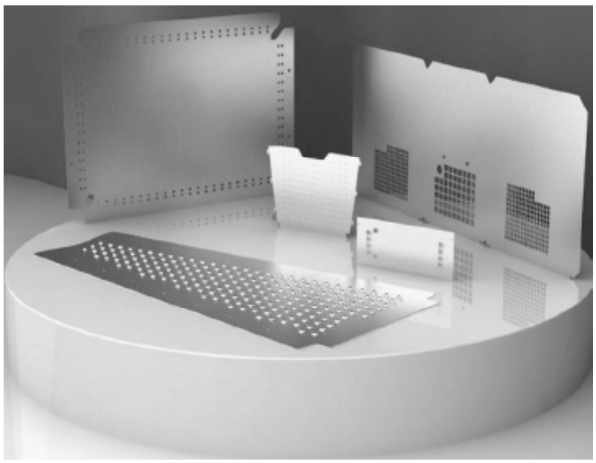
Możliwości najnowszych wykrawarek sterowanych numerycznie są bardzo szerokie. Urządzenia te są wyposażone w wielonarzędziowe magazyny, w których może znajdować się

jednorazowo kilkadziesiąt różnych narzędzi. Dzięki rozbudowanym magazynom, takie centrum obróbcze ma możliwość wykonywania lub kształtowania wyrobu o skomplikowanych kształtach. W trakcie jednego cyklu produkcyjnego, urządzenie ma możliwość wykorzystania kilkudziesięciu różnych stempli, co umożliwia wykonanie gotowego detalu.

Zastosowane sterowanie numeryczne w urządzeniach daje możliwość produkcji jednostkowej lub wielkoseryjnej. Większość obecnie produkowanych wykrawarek posiada możliwość wycinania bezpośrednio z półfabrykatów w postaci arkusza blach, a następnie ich kształtowania. Takie zabiegi zwiększają możliwości technologiczne urządzenia i pozwalają na minimalizowanie odpadów z arkusza blachy oraz oszczędności związane z pracą urządzeń. We wszystkich typach urządzeń do wykrawania, arkusze blach są mocowane w specjalnych chwytakach, które przemieszczają się i pozycjonowane są na stole szczotkowym lub kulkowym. Narzędzia w postaci stempli mocowane są w głowicach, które wykonają ruch posuwisto – zwrotny w wyniku oddziaływania układów napędowych. Na rysunku Z.5 przedstawiono urządzenie do wykrawania oraz wykrawane elementy.

a)

b)



Rys. Z.5. Elementy kształtowane na wykrawarkach sterowanych numerycznie: a) urządzenie do wykrawania, b) wykrawane elementy [124, 151]

Metoda kuźnicza – jest to operacja kucia mająca na celu rozdzielenie kutego materiału na części, wykonywana przecinakami lub przebijakami kowalskimi [152]. Przecinaki oraz przebijaki są to narzędzia kowalskie do prac na zimno lub na gorąco, posiadające ostrza lub zaokrąglenia końcówek o wymiarach w zależności od ich zastosowania i mogą wynosić od kilku milimetrów do kilkudziesięciu centymetrów.

Cięcie tlenowe

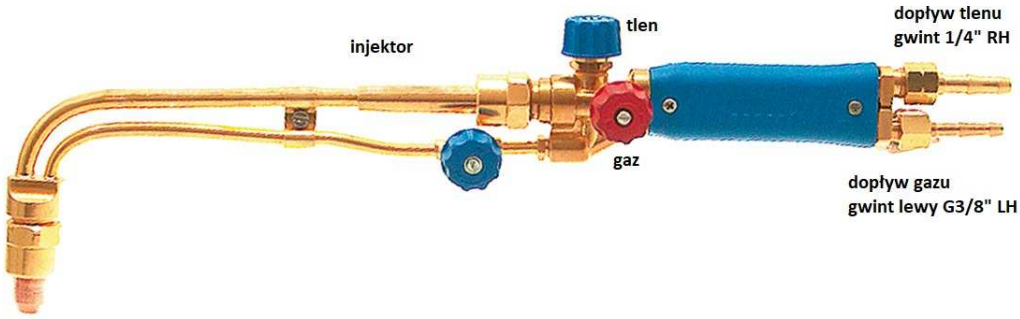
Cięcie tlenowe, zwane inaczej *cięciem gazowym lub paleniem,* jest najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą cięcia blach. Prekursorem tej metody jest E. Wiess, który w 1914 roku opatentował pierwszy ręczny palnik acetylenowo-tlenowy [154]. W obecnych czasach blisko 90% urządzeń do cięcia sprzedawanych na rynku światowym to właśnie urządzenia do cięcia tlenem i do cięcia plazmowego. Z ekonomicznego punktu widzenia jest to zrozumiałe, ponieważ cięcie tlenem umożliwia cięcie materiałów nawet do 400-500 mm, w każdych warunkach produkcyjnych [59]. Jest to proces stosunkowo prosty, który polega na wstępnym nagrzaniu blachy do temperatury zapłonu za pomocą tlenu pod wysokim ciśnieniem. Temperatura zapłonu dla czystego żelaza wynosi 1050°C i rośnie wraz z zawartością węgla (dla stali z zawartością węgla 1,5% temperatura zapłonu wynosi 1370°C).W tabeli Z.3 przedstawiono przybliżoną temperaturę wybranych metali i ich tlenków oraz możliwości cięcia tych metali tlenem [79].

Tabela Z.3. Możliwość cięcia tlenem wybranych metali [79]

Metal	Temperatura topnienia metalu w ºC	Temperatura topnienia tlenków w ºC	Możliwość cięcia
Stal niestopowa	1480	1370	Cięcie łatwe
Żeliwo	1200	1370	Cięcie trudne zwykłym palnikiem
Miedź	1083	1336	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem
Aluminium	660	2050	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem
Chrom	1600	1990	Cięcie niemożliwe zwykłym palnikiem

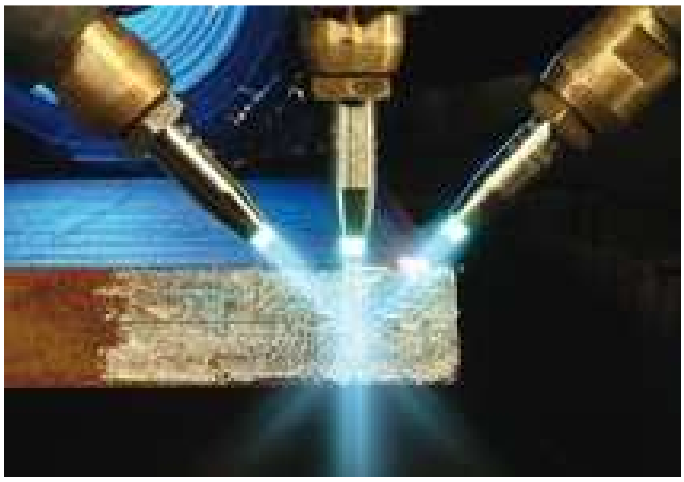
Z tabeli Z.3 wynika, iż cięcie tlenowe może być zastosowane do stali konstrukcyjnych niestopowych. W zależności od rodzaju palnika i jego dyszy, grubość ciętego materiału waha

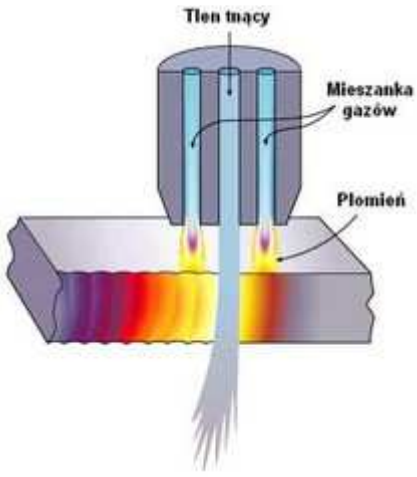
się w granicach od 3-300 mm [79] w optymalnych warunkach nawet do 500 mm [59]. Na rys Z.6 przedstawiono schemat ręcznego palnika acetylenowo-tlenowego, smoczkowego przeznaczonego do cięcia konstrukcyjnych stali niestopowych i niskowęglowych wraz. Na rysunku Z.7 a i b przedstawiono widok palników oraz schemat zasady działania.



Rys. Z.6. Schemat palnika acetylenowo- tlenowego [144]

a) *b)*





Rys. Z.7. Urządzenie CNC do cięcia tlenowego: a) widok palników [48], b) schemat zasady działania [36]

Cięcie tlenowe może być stosowane do cięcia gatunków stali, w których zawartość poszczególnych pierwiastków nie przekracza poniższych wartości [93]:

- aluminium do 10%,
- chrom do 4%,
- krzem do 4 %,
- mangan do 14%
- molibden do 5%,
- nikiel do 35%,
- węgiel do 1,6%,
- wolfram do 15%.

Do nagrzania materiału mogą być zastosowane gazy jak: propan, acetylen, propylen lub gaz ziemny [59]. Kluczowy wpływ na szybkość i jakość cięcia gazowego mają następujące parametry:

- skład chemiczny ciętego materiału,
- czystość tlenu,
- stan powierzchni,
- sposób prowadzenia palnika,
- rodzaj gazu palnego.
- temperatura ciętego materiału.

Do głównych zalet cięcia tlenowego należy niski koszt i duży zakres grubości ciętych materiałów oraz prostopadłe krawędzie cięcia. Górna krawędź jest lekko zaokrąglona od płomienia nagrzewającego, a na dolnej krawędzi uwidocznione jest występowanie żużla [88]. Następną zaletą jest łatwość cięcia wieloma palnikami jednocześnie, co znacznie skraca czas cięcia. Cięcie tlenowe doskonale sprawdza się przy większych grubościach ciętych materiałów - powyżej 20mm. Do zasadniczych wad cięcia tlenowego należą: długi czas przebijania, szeroka strefa wpływu ciepła, deformacja ciętego materiału oraz ograniczona możliwość cięcia stali stopowych.

Cięcie laserowe

Cięcie metali za pomocą wiązki promieniowania laserowego pozwala osiągnąć bardzo dużą dokładność oraz wysoką prędkość cięcia. Źródła laserów stosowanych w urządzeniach możemy podzielić na trzy zasadnicze grupy laserów:

- gazowe (np. na CO_2),
- na ciele stałym,
- półprzewodnikowe.

Na rysunku Z.8 przedstawiono przykładową przecinarkę laserową Diament Laser Fiber [157].

Rys. Z.8. Przecinarka Diament laser Fiber [157]

Cięcie laserem polega na termicznym pokonaniu spójności materiału, która następuje w wyniku (według normy DIN 2310-1 [30]) sublimacji, topienia lub wypalania.

Cięcie laserowe dzieli się na proces cięcia ze spalaniem materiału, ze stapianiem i wydmuchaniem materiału oraz z odparowaniem materiału [106].

Proces cięcia laserowego ze spalaniem materiału polega na zamianie energii kinetycznej fotonów na energię cieplną. Promień lasera zogniskowany na powierzchni ciętego materiału w obszarze szczeliny doprowadza do temperatury zapłonu spalania/utleniania ciętego materiału, która dla stali konstrukcyjnych wynosi od 1150 do 1200°C.

Najczęstszym zastosowaniem cięcia laserowego za pomocą spalania jest cięcie stali niestopowych i stopowych. W tlenie tnącym materiał spala się w szczelinie cięcia, tworząc rzadkopłynny żużel, który zostaje wydmuchany ze szczeliny przez energię kinetyczną strumienia tnącego tlenu. Egzotermiczna reakcja tlenu tnącego z ciętym materiałem wytwarza część potrzebnej energii i umożliwia w ten sposób uzyskanie dużych prędkości cięcia przy względnie małej mocy promienia lasera.

Podczas cięcia laserowego za pomocą stapiania, materiał cięty zostaje stopiony na całej grubości promieniem laserowym (o dużej intensywności), a następnie wydmuchany ze szczeliny cięcia za pomocą gazu tnącego, który wypływa z dyszy z dużą energią kinetyczną. Cięcie laserowe za pomocą stapiania stosuje się głównie do cięcia stali stopowych i metali nieżelaznych. Jako gaz tnący, który służy również do ochrony urządzeń optycznych, stosuje się azot lub argon. W przeciwieństwie do cięcia laserowego za pomocą spalania, przy cięciu laserowym za pomocą stapiania, cała energia potrzebna do nagrzania materiału w szczelinie cięcia do temperatury topnienia musi być dostarczona za pomocą promienia laserowego lub przez wprowadzenie energii elektrycznej. Ponieważ podczas cięcia

laserowego za pomocą stapiania gaz tnący nie reaguje z ciętym materiałem egzotermicznie, a tym samym nie wspomaga procesu cięcia, przy tej samej mocy lasera prędkość cięcia jest znacznie mniejsza niż przy cięciu ze spalaniem. Szczególną zaletą cięcia laserowego za pomocą stapiania są powierzchnie cięcia wolne od tlenków, co jest szczególnie ważne podczas cięcia stali stopowych odpornych na korozję.

Proces cięcia laserowego z odparowaniem materiału jest to proces, w którym oddziaływanie skoncentrowanej wiązki promieniowania laserowego zogniskowanej na powierzchni ciętego materiału powoduje jego odparowanie. Szczelina cięcia powstaje w wyniku oddziaływania wiązki promienia laserowego oraz strumienia gazu tnącego. Najczęściej stosowane gazy w procesie cięcia laserowego z odparowaniem to argon, azot i hel. Energia wymagana w tym procesie jest dostarczana przez promieniowanie laserowe. Cięcie z odparowaniem stosuje się do materiałów, które, pomimo oddziaływania wysokich temperatur, nie przechodzą w stan ciekły, jak np. drewno, papier, tekstylia i inne. Zadaniem zastosowanych gazów (obojętnych) jest ochrona materiałów przed zapłonem [106].

Cięcie laserowe umożliwia uzyskanie tolerancji wymiarowych, zbliżonych do tolerancji, jakie można uzyskać przy użyciu metod obróbki mechanicznej. Obok klasycznych sterowanych numerycznie maszyn do cięcia w kierunkach x-y, coraz częściej stosuje się układy manipulacyjne do trójwymiarowego cięcia laserowego. Warunkiem uzyskania dobrej jakości cięcia, np. na ostrych narożach lub kątach ciętych detali, jest odpowiednie ustawienie parametrów procesu cięcia (każdorazowo moc lasera powinna być dopasowana do prędkości cięcia). Jakość ciętych krawędzi jest bardzo dobra przy niewielkim ząbkowaniu. Krawędzie są prostopadłe, może wystąpić niewielka ilość żużla [88]. Kolejną zaletą cięcia laserowego są niskie koszty jednostkowe przy dużych partiach produkcji oraz minimalna strefa wpływu ciepła. Do wad cięcia laserowego można zaliczyć wysoki koszt zakupu i eksploatacji urządzenia oraz zakres ciętych materiałów, który jest zależny od źródła lasera.

Cięcie strumieniem wody

Ze względu na różnorodność zastosowań, technologia cięcia strumieniem wody umożliwia cięcie materiałów do grubości 200 mm. Proces cięcia polega na erozji materiału pod wpływem strumienia wody o bardzo wysokim ciśnieniu. Do materiałów miękkich, takich jak guma, tektura stosowana jest czysta woda, natomiast do cięcia twardszych materiałów, w celu zwiększenia prędkości, używa się ścierniwo. Przy cięciu strumieniem wody nie występuje strefa wpływu ciepła. Jest to wyraźna przewaga tego procesu w stosunku

do wcześniej opisanych technologii. Nowoczesne urządzenia zapewniają uzyskanie ciśnienia strumienia wody do 4000 atmosfer przy prędkości wylotowej ok 1000 m/s. Za pomocą cięcia strumieniem wody można uzyskać rożną jakość krawędzi cięcia – w zależności od potrzeb – regulując ilość i rodzaj ścierniwa oraz prędkość cięcia. Cięcie rozdzielające jest najszybsze, lecz krawędź cięcia będzie stosunkowo nierówna. Przy cięciu jakościowym, cięta krawędź będzie doskonałej jakości, lecz kosztem niższej prędkości cięcia, co bezpośrednio przekłada się na koszty ciętego elementu.

Na rysunku Z.9 przedstawiono przykładowy model przecinarki typu Opal Water Jet [145].

Rys. Z.9. Urządzenie Opal Water Jet [145]

Pod względem ekonomicznym, bardziej konkurencyjne w stosunku do cięcia strumieniem wody jest cięcie laserem [115]. Jednak w trakcie procesu cięcia strumieniem wody nie powstają pyły i spaliny charakterystyczne dla procesów wcześniej opisanych.

Niedogodnością w eksploatacji urządzeń do cięcia strumieniem wody w odniesieniu do cięcia plazmowego czy laserowego jest powstawanie mgły wodnej zawierającej ścierniwo. Negatywny wpływ tego czynnika wymusza stosowanie rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych izolujących elementy prowadnic, pozycjonerów oraz napędów do przestrzeni roboczej. Pozytywnym wpływem na środowisko naturalne jest system odbioru zużytego ścierniwa z wanien, jego odzysku przez układy oczyszczające. Urządzenia do cięcia strumieniem wody mają konstrukcję bramową, w której systemy kompensacji naprężenia eliminują wpływ temperatury otoczenia, na jakość obróbki [125]. Wadą technologii cięcia strumieniem wody jest stosunkowo niska prędkość cięcia i wysokie koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne urządzeń.

ZAŁĄCZNIK NR 2 – Cykl produkcyjny na przykładzie firmy AK ANATOL

Informacja o firmie

Firma AK ANATOL z siedzibą w Żarach jest zakładem produkcyjnym z sektora mikro i małych przedsiębiorstw, zatrudniającym 38 pracowników. Jest przedsiębiorstwem z branży produkującej wyroby metalowe. Jest to firma bez udziału kapitału zagranicznego, która powstała ze środków własnych, a dzięki dotacji unijnej została rozbudowana w 2015 roku.

Cykl produkcyjny

Do każdego zlecenia zostaje przydzielona grupa pracowników, która odpowiada za jego realizację. Realizacja zlecenia obejmuje: przygotowanie oferty cenowej, zakup materiału, przetworzenie surowca, obróbki wykańczające, nałożenie powłok i dystrybucję gotowych wyrobów do klienta.

Początek produkcji zaczyna się zawsze na stanowiskach wyposażonych w urządzenia do cięcia materiałów. Udział czasu cięcia materiałów potrzebnych do produkcji konstrukcji stalowych, w zależności od ich złożoności, stanowić może nawet 30% całkowitego czasu wytwarzania. W firmie są dwa stanowiska do cięcia: jedno składa się z trzech ramowych pił taśmowych, drugie zaś z przecinarki plazmowej CNC. Na stanowiskach z piłami taśmowymi wykonuje się cięcie materiałów płaskich, rur, profili i innych, których gabaryty są znormalizowane, oraz gdzie dalsza obróbka pociętego materiału nadaje się do dalszego przetwarzania. Drugim stanowiskiem pierwszego etapu cyklu produkcyjnego jest urządzenie do cięcia plazmowego CNC. Jest to stanowisko, na którym przygotowuje się surowiec do dalszego przetwarzania. Na urządzeniu do cięcia plazmowego wykonuje się wszystkie inne procesy cięcia, które na piłach taśmowych nie są możliwe do wykonania. Na przecinarce plazmowej wykonuje się:

- cięcie skomplikowanych kształtów składowych elementów konstrukcji,
- wypalanie otworów (okrągłych, podłużnych),
- trasowanie (punktowe wpalania) z miejscem na wiercenie, wykonywane w przypadku braku możliwości wypalenia otworów.

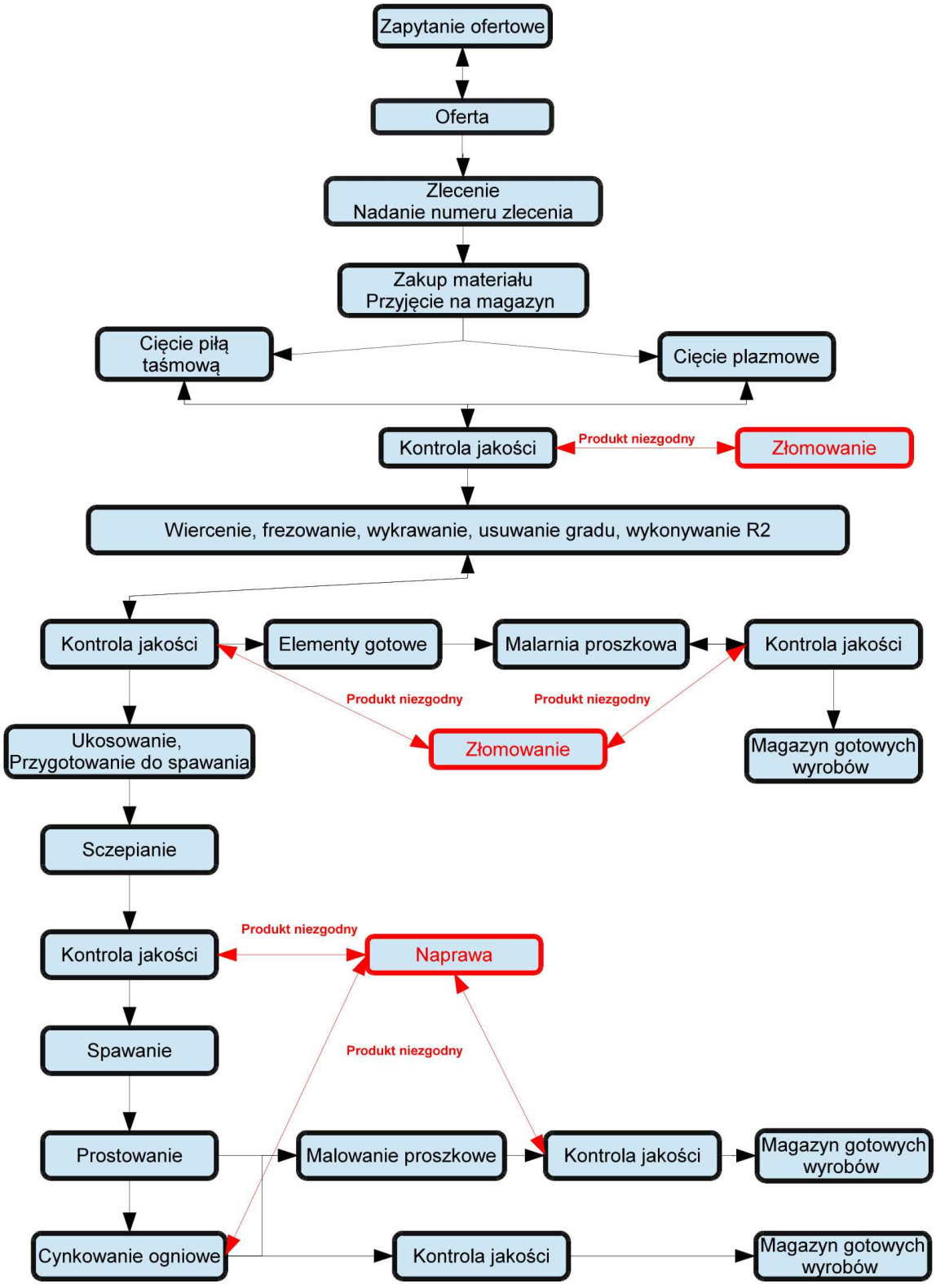
Możliwość trasowania jest ważna w przypadku składania poszczególnych elementów w całość konstrukcji. Osoby zajmujące się sczepianiem konstrukcji, dzięki natrasowanym

liniom na detalach, mają ułatwioną pracę. Elementy skomplikowane, które w dalszej obróbce są poddawane procesowi gięcia na prasie krawędziowej, również są trasowane od wewnętrznej strony po to, aby pracownik miał możliwość weryfikacji oraz poprawnego przeprowadzenia procesu gięcia. Za pomocą przecinarki plazmowej wycina się również otwory w elementach lub kształtownikach. Takie kształtowniki stosowane są przeważnie do produkcji hal lub konstrukcji elektrowni wiatrowych.
Kolejnym, bardzo ważnym aspektem w procesie cięcia na przecinarce plazmowej, jest możliwość przeprowadzenia cięcia tlenowego. Cięcie plazmowe na przecinarce znajdującej się w firmie (opis urządzenia w kolejnych rozdziałach) wykonuje się na blachach o grubości do 25 mm. Dzięki zastosowaniu dodatkowego palnika gazowego, przedsiębiorstwo ma możliwość cięcia blach do grubości 150 mm. Zamiana palników procesu cięcia z gazowego na plazmowy to czas około 15-20 min. Cięcie plazmowe stanowi około 30-40 % całej produkcji.

Problemy związane z obsługą urządzenia do cięcia plazmowego sprowadzają się do doboru parametrów technologicznych cięcia. Wynika to z faktu, że dane tabelaryczne dostarczone przez producenta urządzenia (parametry cięcia) nie sprawdzają się w rzeczywistości. W tej sytuacji firma w 100% polega na heurystyce, czyli zespole udowodnionych praktyk opartych na wiedzy operatora. Doświadczonym operatorem jest osoba pracującą nieprzerwanie na stanowisku (minimum 5 lat). W przedsiębiorstwie AK ANATOL operator przecinarki plazmowej posiada 6-letnią wiedzę praktyczną. Dzięki temu jest w stanie dobrać parametry cięcia plazmowego, uwzględniając grubość ciętego materiału oraz żądane klasy jakości określone w normie PN-EN ISO 9013: 2017 [102]. Jest to wiedza, która nie jest zawarta w dostępnej literaturze. Ze względu na brak na rynku pracy wykwalifikowanych pracowników posiadających wieloletnie doświadczenie w zakresie cięcia plazmą, istotnym dla dalszego działania firm stało się stworzenie aplikacji wspomagania decyzji (SWD) opartej na heurystyce. Dzięki takiej aplikacji, w przypadku braku dyspozycyjności operatora (urlop wypoczynkowy, zdrowotny i inne), firma będzie miała możliwość zastąpienia go przeszkolonym pracownikiem, który będzie wspomagany przez SWD.

Kolejnym etapem produkcji są prace związane z przygotowaniem elementów składowych konstrukcji do spawania. Przygotowanie polega na wierceniu otworów, frezowaniu, wykonywaniu promieni na ciętych krawędziach oraz ukosowaniu zgodnie z PN-EN ISO 12944-3 [34]. Przygotowane elementy składowe, po sprawdzeniu przez pracownika kontroli jakości, są dopuszczone lub nie do dalszego etapu produkcyjnego.

W zależności od rodzaju zlecenia, przygotowane części lub elementy składowe konstrukcji trafiają na stanowiska spawalnicze lub montażowe. Na stanowiskach montażowych elementy, które nie podlegają dalszej obróbce są montowane i przekazywane na magazyn gotowych wyrobów. Elementy podlegające procesowi spawania są dostarczane na stanowiska spawalnicze. Na stanowisku tym w pierwszej kolejności przeprowadzany jest proces sczepiania. Po sczepieniu spawanych konstrukcji, kontroler jakości przeprowadza kontrolę pod kątem tolerancji wymiarowej. Elementy zgodne mogą być poddane procesowi spawania. Sczepianie oraz spawanie stanowi około 30% całości produkcji. Ponieważ w procesie spawania występują naprężenia wzdłużne lub poprzeczne, wszystkie konstrukcje spawane po wykonaniu tego procesu trafiają na stanowisko do prostowania. Prostowanie wykonuje się za pomocą dwóch metod – z użyciem specjalistycznego urządzenia do prostowania lub za pomocą techniki płomieniowej. Konstrukcja bez niepożądanych odkształceń jest transportowana na halę, gdzie jest szlifowana oraz przygotowywana do dalszych procesów. W firmie proces szlifowania jest uzależniony od rodzaju oraz klasy konstrukcji, które są określone w normie PN-EN ISO 1090-2 [103]. W zależności od przeznaczenia oraz klasy środowiska, na którą konstrukcja będzie narażona i o której mówi norma PN-EN ISO 12944-2 [97], zostaje ona poddana dalszej obróbce. Z reguły wszystkie wytwarzane konstrukcje są poddawane procesowi cynkowania ogniowego. Mogą być również konstrukcje, które są poddane procesowi malowania proszkowego. W tym przypadku stosuje się obróbkę strumieniowo-ścierną, określoną w normie PN-EN ISO 8504-2:2002 [123] lub obróbkę narzędziem ręcznym, określoną w PN-EN ISO 8504-3:2004 [26]. Po nałożeniu warstw antykorozyjnych, konstrukcje transportowane są do magazynu gotowych wyrobów.
Schemat cyklu produkcyjnego przedstawiono graficznie na rys Z.10.



Rys. Z.10. Blokowy schemat cyklu produkcyjnego w firmie AK ANATOL [140]

ZŁĄCZNIK NR 3 - Dokumentacja fotograficzna płyt próbnych po cięciu plazmowym – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z tabelą 8.7 oraz 8.8.

Z.3. Dokumentacja fotograficzna płyt próbnych zawiera następujące foldery:

Z.3.1. Płyty 4/8,

Z.3.2. Płyty 4/13,

Z.3.3. Płyty 8/8,

Z.3.4. Płyty 8/13,

Z.3.5. Płyty 12/8,

Z.3.6. Płyty 12/13.

ZAŁĄCZNK NR 4 - Dokumentacja fotograficzna krawędzi ciętych płyt próbnych – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z tabelą 8.7 oraz 8.8.

Z.4. Dokumentacja fotograficzna krawędzi ciętych płyt próbnych.

Z.4.1. Krawędzie 4/8,

Z.4.2. Krawędzie 4/13,

Z.4.3. Krawędzie 8/8,

Z.4.4. Krawędzie 8/13,

Z.4.5. Krawędzie 12/8.

Z.4.6. Krawędzie 12/13

ZAŁĄCZNIK NR 5 – Zmiany mikrostrukturalne stali S235 JR po cięciu plazmowym – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z tabelą 8.7 oraz 8.8.

Z.5. Zmiany mikrostrukturalne stali S235 JR po cięciu plazmowym.

Z.5.1. Mikrostruktura stali o gr 4 mm ciętej z natężeniem prądu 80 A (4/8/1),

Z.5.2. Mikrostruktura stali o gr 4 mm ciętej z natężeniem prądu 130 A (4/13/1).

ZAŁĄCZNIK NR 6 – Skany 3D badanych płyt próbnych – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z rysunkiem 8.5, tabelą 8.7 oraz 8.8

Z.6. Skany krawędzi płyt próbnych.

Z.6.1. Skany krawędzi płyt próbnych A, B, C, D, e,

Z.6.2. Skany krawędzi płyt próbnych E, F,

Z.6.3. Stanowisko badawcze do skanowania 3D. Dokumentacja fotograficzna

ZAŁĄCZNIK NR 7 – Pomiar chropowatości płyt próbnych – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z tabelą 8.7 oraz 8.8

Z.7. Pomiar chropowatości badanych płyt próbnych.

Z.7.1. Raport z pomiarów chropowatości badanych płyt próbnych,

Z.7.2. Wykresy chropowatości badanych płyt próbnych,

ZAŁĄCZNIK NR 8 – Pomiar mikrotwardości płyt próbnych – dane w wersji elektronicznej. Oznaczenie płyt próbnych zgodnie z tabelą 8.7 oraz 8.8

Z.8. Pomiar mikrotwardości badanych płyt próbnych.

Z.8.1. Dokumentacja fotograficzna badanych płyt próbnych,

Z.8.2. Dokumentacja fotograficzna stanowiska badawczego.