



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY



ROZPRAWA DOKTORSKA

**BADANIA JAKOŚCI TECHNOLOGICZNEJ
POWIERZCHNI ELEMENTÓW ZE STALI X5CRN18-10
UKSZTAŁTOWANYCH W PROCESIE CIĘCIA
WYSOKOCIŚNIENIOWĄ STRUGĄ WODNĄ ORAZ
STRUMIENIEM FOTONÓW**

**RESEARCH ON THE TECHNOLOGICAL QUALITY OF THE
SURFACE OF X5CRN18-10 STEEL ELEMENTS SHAPED IN THE
CUTTING PROCESS WITH A HIGH-PRESSURE WATER JET AND
A STREAM OF PHOTONS**

mgr inż. Marcin Romanowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Sutowski
prof. Politechniki Koszalińskiej

Koszalin, kwiecień 2022

Spis treści

Streszczenie	5
Abstract	6
Wykaz ważniejszych symboli i akronimów	7
1. WPROWADZENIE	12
2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH W ZAKRESIE WYZNACZONYM TEMATEM PRACY.....	14
2.1. Charakterystyka metod cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii.....	15
2.1.1. Cięcie strugą wodną i wodno-ścierną	18
2.1.2. Cięcie strumieniem fotonów (cięcie laserowe).....	25
2.1.3. Cięcie strumieniem plazmy	32
2.1.4. Cięcie ultradźwiękami w próżni.....	37
2.1.5. Cięcie tlenowo-gazowe.....	39
2.1.6. Cięcie strumieniem elektronów.....	41
2.1.7. Analiza porównawcza metod cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii	42
2.2. Definicja jakości	45
2.3. Klasyfikacja jakości	48
2.4. Jakość technologiczna.....	50
2.5. Wnioski z analizy literatury.....	56
3. HIPOTEZA, CELE, PROBLEMY BADAWCZE I ZAKRES PRACY.....	58
3.1. Hipoteza pracy	58
3.2. Cele pracy.....	58
3.2.1. Cel poznawczy	58
3.2.2. Cel użyteczny.....	58
3.2.3. Cel metodyczny.....	58
3.3. Problemy badawcze	59
3.3.1. Główny problem badawczy.....	59
3.3.2. Szczegółowe problemy badawcze.....	59
3.4. Zakres pracy	59
4. CHARAKTERYSTYKA NACZEPY DO PRZEWOZU PŁYNNYCH ŚRODKÓW SPOŻYWCZYCH.....	60
4.1. Charakterystyka naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych	60
4.2. Problemy w procesie wytwarzania cysterny związane z operacjami cięcia	68
4.3. Wnioski	71
5. METODYKA BADAŃ.....	72
5.1. Metodyka badań rozpoznawczych.....	73

5.1.1.	Wielkości wejściowe stałe	74
5.1.2.	Wielkości wejściowe zmienne	75
5.1.3.	Wielkości wyjściowe	77
5.1.4.	Plan badań	77
5.2.	Metodyka badań właściwych.....	79
5.2.1.	Wielkości wejściowe stałe	81
5.2.2.	Wielkości wejściowe zmienne	82
5.2.3.	Wielkości wyjściowe	83
5.2.4.	Plan badań	83
5.3.	Stanowiska badawcze.....	84
5.3.1.	Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów stosowane w badaniach rozpoznawczych	84
5.3.2.	Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów stosowane w badaniach właściwych	86
5.3.3.	Stanowisko do cięcia strugą wodno-ścierną	89
5.4.	Stanowiska pomiarowe	92
5.4.1.	Stanowisko do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej powierzchni metodą triangulacji laserowej.....	92
5.4.2.	Stanowisko do rejestracji obrazów powierzchni ciętej metodą mikroskopii opto-cyfrowej	94
5.4.3.	Stanowisko do rejestracji wymiarów gabarytowych.....	97
5.4.4.	Stanowisko do pomiarów współrzędnościowych.....	98
5.4.5.	Stanowisko do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni obrobionej	100
5.5.	Charakterystyka stali X5CrNi18-10	101
6.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ROZPOZNAWCZYCH.....	104
6.1.	Analiza struktury geometrycznej wyciętych elementów	104
6.2.	Analiza dokładności wymiarowej wyciętych elementów	120
6.3.	Analiza obrazów mikroskopowych wyciętych elementów	129
6.4.	Ocena jakości technologicznej powierzchni cięcia.....	132
6.5.	Wnioski z badań rozpoznawczych.....	143
7.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WŁAŚCIWYCH.....	145
7.1.	Analiza dokładności wymiarowo-kształtowej wyciętych elementów	145
7.2.	Analiza obrazów mikroskopowych wyciętych elementów	160
7.3.	Analiza błędu prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy	165
7.4.	Analiza struktury geometrycznej powierzchni cięcia	168
7.5.	Ocena jakości technologicznej	173
7.6.	Wnioski z badań właściwych	182

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	185
8.1. Wnioski poznawcze	185
8.2. Wnioski uytitarne.....	187
8.3. Wnioski metodyczne.....	187
8.4. Wnioski do dalszych badań.....	188
8.5. Upowszechnienie rezultatów rozprawy	188
Bibliografia.....	190
Spis rysunków.....	197
Spis tabel	203

Streszczenie

Niniejsza praca powstała we współpracy z producentem zbiorników i cystern ze stali nierdzewnej, przedsiębiorstwem PRO-WAM Sp. z o.o. z siedzibą w Koszalinie przy ul. Zwycięstwa 278. Motywacją do podjęcia prac badawczych przedstawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej były problemy dotyczące jakości technologicznej podzespołów wchodzących w skład jednego z kluczowych produktów firmy: naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych.

Rozdział I to wprowadzenie do problematyki podjętej w niniejszej rozprawie doktorskiej. Rozdział II przedstawia analizę materiałów źródłowych związanych z tematyką niniejszej rozprawy. Kończy się on wnioskami, które umożliwiły sprecyzowanie hipotezy, celu, problemów badawczych oraz wyznaczenie zakresu pracy, które przedstawiono następnie w rozdziale III. Rozdział IV zawiera krótką charakterystykę naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych ze wskazaniem najważniejszych problemów w procesie jej wytwarzania związanych z operacjami cięcia. W rozdziale V opisano metodykę badań doświadczalnych oraz podano charakterystykę urządzeń technologicznych i systemów pomiarowych zastosowanych w badaniach. W rozdziale VI zamieszczono analizę wyników badań rozpoznawczych zakończoną wnioskami umożliwiającymi zaplanowanie i przeprowadzenie badań właściwych, opisanych w rozdziale VII. Ostatnia część pracy (rozdział VIII) zawiera podsumowanie i wnioski z rozprawy doktorskiej z podziałem na wnioski poznawcze, użytkowe, metodyczne oraz wnioski do dalszych prac. Treść pracy uzupełnia wykaz symboli i akronimów stosowanych w jej tekście, wykaz użytych źródeł bibliograficznych, spis rysunków oraz spis tabel.

Przeprowadzone w szerokim zakresie badania doświadczalne wykazały, że zaproponowana autorska zależność na syntetyczny wskaźnik *JTC* może być z powodzeniem stosowana w przemyśle metalowym do porównywania jakości technologicznej procesu cięcia. Względna (procentowa) postać wskaźnika *JTC* powoduje, że może on być stosowany do porównywania wyników procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach a także składowe liczniki zaproponowanej zależności mogą być rozszerzane o kolejne wskaźniki oceny jakości technologicznej.

Abstract

This dissertation was elaborated in cooperation with the manufacturer of stainless-steel tanks and tankers, PRO-WAM Sp. z o.o. with its registered seat in Koszalin, 278 Zwycięstwa St. The motivation to undertake research work presented in this dissertation were problems concerning the technological quality of components included in one of the key products of the company: semitrailers-tankers for liquid foodstuffs transport.

Chapter I is an introduction to the issues discussed in this dissertation. Chapter II presents the analysis of literature sources related to the subject of this dissertation. It ends with conclusions, which made it possible to specify the hypothesis, objective, research problems and to determine the scope of the work, which are then presented in Chapter III. Chapter IV contains a brief description of the semitrailer-tanker for liquid foodstuffs with the indication of the most important problems in the process of its manufacture related to cutting operations. Chapter V describes the experimental research methodology and gives the characteristics of the technological equipment and measurement systems used in the research. Chapter VI contains an analysis of the results of exploratory research concluded with conclusions making it possible to plan and carry out specific research, described in Chapter VII. The last part of the dissertation (Chapter VIII) contains a summary and conclusions from the dissertation divided into cognitive, utilitarian, methodical and conclusions for further work. The content of the dissertation is supplemented by a list of symbols and acronyms used in the text, a list of bibliographical sources used, a list of figures and a list of tables.

Extensive experimental research has shown that the proposed author's relationship for the synthetic *JTC* index can be successfully applied in the metal industry to compare the technological quality of the cutting process. The relative (percentage) form of the *JTC* index makes it possible to use it for comparing the results of the cutting process carried out by different methods and under different conditions.

Wykaz ważniejszych symboli i akronimów

Symbole

Litery łacińskie

- b_A – szerokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi, mm
- b_{AR} – szerokość zaokrąglenia w strefie wejścia strugi, mm
- b_E – szerokość szczeliny przecięcia, mm
- b_{EJ} – lokalna szerokość szczeliny przecięcia, mm
- b_G – szerokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi, mm
- b_{SE} – szerokość strefy uszkodzeń wtórnych, mm
- c – ciepło właściwe, J/kg·K
- d – gęstość, g/cm³
- E – moduł sprężystości, GPa
- g_b – grubość blachy, mm
- HB_{max} – twardość Brinella, N/mm²
- h_A – wysokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi, mm
- h_G – wysokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi, mm
- h_r – wysokość obszaru obniżonej jakości cięcia z makroskopowymi śladami obróbkowymi na powierzchni obrobionej, mm
- h_s – wysokość obszaru podwyższonej jakości cięcia pozbawionego rowków na powierzchni obrobionej, mm
- JTC – syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej cięcia, %
- JTC_{AWJ} – syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej cięcia JTC dla powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną, %
- JTC_{LASER} – syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej cięcia JTC dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów, %
- k – przewodność cieplna właściwa, W/m·K
- l – długość mierzonego elementu, mm
- \dot{m} – wydatek ścierniwa, kg/s
- N_c – liczba powtórzeń
- n – zakrzywienie toru wybiegu strugi
- OW_{CG} – średnia odchyłka wymiarowa cechy geometrycznej, mm
- OW_{CGn} – średnia odchyłka wymiarowa cechy geometrycznej po normalizacji, mm

OW_L	– średnia odchyłka wymiarowa długości, mm
OW_{Ln}	– średnia odchyłka wymiarowa długości po normalizacji, mm
OW_K	– średnia odchyłka wymiarowa kąta, °
OW_{Kn}	– średnia odchyłka wymiarowa kąta po normalizacji, °
OP	– średnia odchyłka wymiarowa prostopadłości, °
OP_n	– średnia odchyłka wymiarowa prostopadłości po normalizacji, °
OW_W	– średnia odchyłka wymiarowa szerokości, mm
OW_{Wn}	– średnia odchyłka wymiarowa szerokości po normalizacji, mm
P	– moc, W
P_{max}	– moc maksymalna urządzenia, W
p_w	– ciśnienie wody w głowicy tnącej, MPa
Q_{max}	– maksymalny (przeciążeniowy) strumień objętości, dm ³ /min
R	– współczynnik korelacji wielowymiarowej
r	– liczba powtórzeń pomiarów
Ra	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości, μm
Re	– granica plastyczności, kg/mm ²
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie, MPa
Rk	– obciążalność powierzchni, kg/mm ²
Rpk	– zużycie ściernie
Rz	– średnia głębokość chropowatości, mm
Sa	– średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, μm
Sds	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni, 1/mm ²
Sku	– współczynnik skupienia
$Smmr$	– średnia objętość materiału, mm ³ /mm ²
$Smvr$	– średnia objętość pustek – miejsc wolnych od materiału, mm ³ /mm ²
Sp	– maksymalna wysokość wzniesień, mm
Sq	– średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni, μm
Ssk	– współczynnik skośności
St	– całkowita wysokość nierówności powierzchni, μm
Str	– wskaźnik tekstury powierzchni
Sv	– maksymalna głębokość wgłębień, mm
Swm	– średni odstęp falistości
Sz	– wysokość nierówności, mm
t_t	– temperatura topnienia, °C

t_w	– temperatura wrzenia, °C
u	– pochylenie płaszczyzny przecięcia, °
V_{cmax}	– bilans mocy cieplnej, cm/s
v_{fAWJ}	– prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej strugą wodno-ścierną, mm/s
v_{fLASER}	– prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej lasera, mm/s
y_{max}	– liczba o najwyższej wartości z populacji
w	– szerokość mierzonego elementu, mm
Wa	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu falistości, mm
Wc	– średnia wysokość falistości, mm
Wm	– maksymalna wysokość profilu falistości, mm
Wp	– maksymalna wysokość wzniesienia profilu falistości, mm
Wq	– średnie kwadratowe odchylenie profilu falistości, mm
Wv	– maksymalna głębokość wgłębienia profilu falistości, mm
x_n	– wartość po normalizacji, mm
y	– liczba normalizowana

Litery greckie

Θ_o	– kąt odchylenia wiązki lasera, °
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła, W/m·K
ρ	– opór właściwy, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
φ	– kąt zukosowania powierzchni przecięcia, °

Akronimy

ABS	– system zapobiegający blokowaniu kół podczas hamowania (ang. <i>Anti-Lock Braking System</i>)
ASR	– układ zapobiegający poślizgowi kół podczas ruszania (ang. <i>Acceleration Slip Regulation</i>)
ATP	– umowa o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów (ang. <i>Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be used for such Carriage</i>)
AWJ	– cięcie strugą wodno-ścierną (ang. <i>Abrasive Water Jet</i>)
AWT	– wskaźniki jakości topografii (niem. <i>Arbeitskreis Wasserstrahl-Technologie</i>)

- BPP – współczynnik jakości wiązki laserowej (ang. *Beam Parameter Product*)
- CAD – komputerowe wspomaganie projektowania (ang. *Computer Aided Design*)
- CAM – komputerowe wspomaganie wytwarzania (ang. *Computer Aided Manufacturing*)
- CIP – centralny układ mycia naczepy (ang. *Cleaning-In-Place*)
- CMR – konwencja o umowie międzynarodowego przewozu drogowego towarów (ang. *Contract of International Carriage of Goods by Road*)
- CNC – komputerowe sterowanie numeryczne (ang. *Computerized Numerical Control*)
- CPS – cyfrowe przetwarzanie sygnałów
- EBS – elektropneumatyczny układ sterowania hamulców (ang. *Electronic Braking System*)
- EDOF – rejestracja obrazów mikroskopowych w trybie rozszerzonej głębi ostrości (ang. *Extended Depth of Field*)
- EDR – funkcja rejestracji obrazów w rozszerzonym zakresie dynamicznym (ang. *Extended Dynamic Range*)
- FLC – układ elastycznej kontroli diody elektroluminescencyjnej (ang. *Flexible LED Control*)
- GFK – laminat poliestrowy wzmacniany włóknem szklanym (niem. *Glasfaserverstrkter Kunststoff*)
- GPS – system lokalizacji satelitarnej (ang. *Global Positioning System*)
- ID – intensywność deformacji
- ID_n – intensywność deformacji po normalizacji
- ISC – identyfikacja stref cięcia
- ISC_n – identyfikacja stref cięcia po normalizacji
- LASER – wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania (ang. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)
- LED – dioda elektroluminescencyjna (ang. *Light-Emitting Diode*)
- MMOB – model matematyczny obiektu badań
- OUPN – obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie
- PAC – cięcie strumieniem plazmy (ang. *Plasma Arc Cutting*)
- PUR – poliuretan
- RAL – znormalizowana paleta kolorów (niem. *Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen*)
- SGP – struktura geometryczna powierzchni
- SWC – strefa wpływu ciepła

TIG – metoda spawania polegająca na wytwarzaniu łuku elektrycznego za pomocą nietopliwej elektrody wolframowej w osłonie gazu obojętnego (ang. *Tungsten Inert Gas*)

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich lat obserwuje się dynamiczny rozwój technologii lotniczych i motoryzacyjnych. Taki stan rzeczy determinuje konieczność opracowywania nowych oraz udoskonalanie istniejących technik cięcia blach i obróbki skrawaniem. Branża ta charakteryzuje się bardzo wysokimi wymaganiami jakościowymi, szczególnie w odniesieniu do jakości technologicznej (uzyskiwanej po zakończonym procesie wytwarzania). Najczęściej jakość technologiczną opisują parametry dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowej, struktury geometrycznej powierzchni oraz właściwości warstwy wierzchniej.

W pracy przeprowadzona została analiza porównawcza metod cięcia materiałów ze stali X5CrNi18-10 o różnych grubościach. Zapoznając się z badaniami przeprowadzonymi na potrzeby tej pracy, można dokonać wyboru pomiędzy metodami cięcia, z uwzględnieniem wymaganej jakości technologicznej kształtowanego wyrobu. Zarówno metoda cięcia skoncentrowanym strumieniem fotonów czy strugą wodną lub wodno-ścierną to obecnie najczęściej wykorzystywane techniki cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i stoczniowym.

Spośród najczęściej stosowanych obecnie nowoczesnych metod cięcia na szczególną uwagę zasługuje cięcie strumieniem fotonów (cięcie laserowe), charakteryzujące się dużą szybkością i dokładnością obróbki. Późniejsza obróbka jest natomiast kłopotliwa z uwagi na utwardzenie krawędzi po cięciu strumieniem lasera. Mając na uwadze również inne metody cięcia, warto zastanowić się jaka metoda będzie miała najkorzystniejszy wpływ na przebieg dalszej obróbki. Dodatkowo skoncentrowano się na badaniach cięcia strugą wodno-ścierną, jako alternatywy dla cięcia strumieniem fotonów. Przeprowadzono próby cięcia badanego materiału ze stali kwasoodpornej X5CrNi18-10, na którym to materiale skupiono się w całej pracy z uwagi na częste wykorzystanie w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Drugim parametrem wyznaczającym wybór stali stała się cena, jej relatywnie niski koszt skłania przedsiębiorców do używania jej do produkcji swoich wyrobów.

Niniejsza praca powstała we współpracy z producentem zbiorników i cystern ze stali nierdzewnej, przedsiębiorstwem PRO-WAM Sp. z o.o. z siedzibą w Koszalinie przy ul. Zwycięstwa 278. Motywacją do podjęcia prac badawczych przedstawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej były problemy dotyczące jakości technologicznej podzespołów wchodzących w skład jednego z kluczowych produktów firmy: naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych.

Rozdział I to wprowadzenie do problematyki podjętej w niniejszej rozprawie doktorskiej. Rozdział II przedstawia analizę materiałów źródłowych związanych z tematyką niniejszej rozprawy. Kończy się on wnioskami, które umożliwiły sprecyzowanie hipotezy, celu, problemów badawczych oraz wyznaczenie zakresu pracy, które przedstawiono następnie w rozdziale III. Rozdział IV zawiera krótką charakterystykę naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych ze wskazaniem najważniejszych problemów w procesie jej wytwarzania związanych z operacjami cięcia. W rozdziale V opisano metodykę badań doświadczalnych oraz podano charakterystykę urządzeń technologicznych i systemów pomiarowych zastosowanych w badaniach. W rozdziale VI zamieszczono analizę wyników badań rozpoznawczych zakończoną wnioskami umożliwiającymi zaplanowanie i przeprowadzenie badań właściwych, opisanych w rozdziale VII. Ostatnia część pracy (rozdział VIII) zawiera podsumowanie i wnioski z rozprawy doktorskiej z podziałem na wnioski poznawcze, utylitarne, metodyczne oraz wnioski do dalszych prac. Treść pracy uzupełnia wykaz symboli i akronimów stosowanych w jej tekście, wykaz użytych źródeł bibliograficznych, spis rysunków oraz spis tabel.

2. ANALIZA MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH W ZAKRESIE WYZNACZONYM TEMATEM PRACY

W polskiej gospodarce konieczność identyfikacji tendencji rozwojowych w poszczególnych dziedzinach nauki i techniki, tworzenia odważnych wizji i scenariuszy rozwoju jest szczególnie ważna. Zadanie szybkiego nadrobienia dystansu cywilizacyjnego w stosunku do najwyżej rozwiniętych krajów i regionów może się dokonać głównie poprzez działania innowacyjne, wyprzedzające a nie działania imitacyjne (Safin, 2010). Kultura myślenia o przyszłości w obecnych czasach jest bardzo zróżnicowana. Marnotrawstwo, kupowanie więcej niż jest potrzebne czy złe planowanie etapów produkcyjnych, to tylko niektóre ujemne cechy zarządzania produkcją. Takie działania są niedopuszczalne w dużych przedsiębiorstwach. Jest tam kładziony ogromny nacisk na rozwój, prognozykę oraz oszczędność. Powyższe problemy są powszechnie spotykane podczas organizacji produkcji. Niwelacja takich problemów przez kadre zarządzającą oraz przewidywanie, co może być firmie potrzebne w bliskiej i dalekiej przyszłości jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania przedsiębiorstwa.

Do najważniejszych problemów współczesnych technik wytwarzania zalicza się zapewnienie odpowiedniej jakości wytwarzanych wyrobów, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów ich produkcji i zwiększeniu wydajności procesu. Dzięki zastosowaniu techniki komputerowej, można skrócić czas oraz ograniczyć koszty badań nowych materiałów. Dodatkowo modelować można zjawiska szybkozmienne, których dokładna analiza jest uciążliwa podczas badań eksperymentalnych. Aspekty te dotyczą również techniki cięcia. Często duży wpływ na wybór metody cięcia ma czas wykonania tej operacji (Bohdal i Kukielka 2014). Potrzebna duża precyzja oraz krótki czas wycinania skłaniają ku wyborze cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii. Kiedy wycięty element ma być po operacji cięcia obrabiany skrawaniem, warto zastanowić się w jaki sposób stan krawędzi elementu po cięciu wpłynie na trwałość narzędzi skrawających.

Przecinanie to operacja występująca w wielu procesach produkcyjnych. Poddaje się jej bardzo szerokie spektrum materiałów: od mających zastosowanie w technice (metale, tworzywa sztuczne), przez surowce mineralne i materiały pochodne (skały, beton), aż po naturalne materiały biologiczne (drewno, tkanka organiczna: kości, mięśnie). Różnorodność ciętych materiałów jest związana z tym, że wykorzystywane są one w licznych sferach działalności człowieka: w przemyśle, medycynie, usługach itd. Zróżnicowanie cech przecinanych materiałów powoduje, że do ich cięcia muszą być wykorzystywane różne metody

i sposoby przecinania. W zależności od zastosowania, rozróżnia się również inne kryteria oceny rezultatów tej operacji. W większości procesów wytwórczych cięcie to jedna z początkowych operacji technologicznych, dlatego też cechy struktury geometrycznej powierzchni (SGP) przecinanej nie są tak istotne, choć w wybranych zastosowaniach mogą odgrywać ważną rolę w ocenie jakości tego procesu. Po cięciu następują kolejne operacje wprowadzające do struktury zmiany, takie jak obróbka skrawaniem czy spawanie. W prezentowanej analizie literatury wykorzystano wiele źródeł opisujących metody cięcia, które są używane we współczesnych przedsiębiorstwach skupiając się na metodach wykorzystujących wysoko skoncentrowany strumień energii.

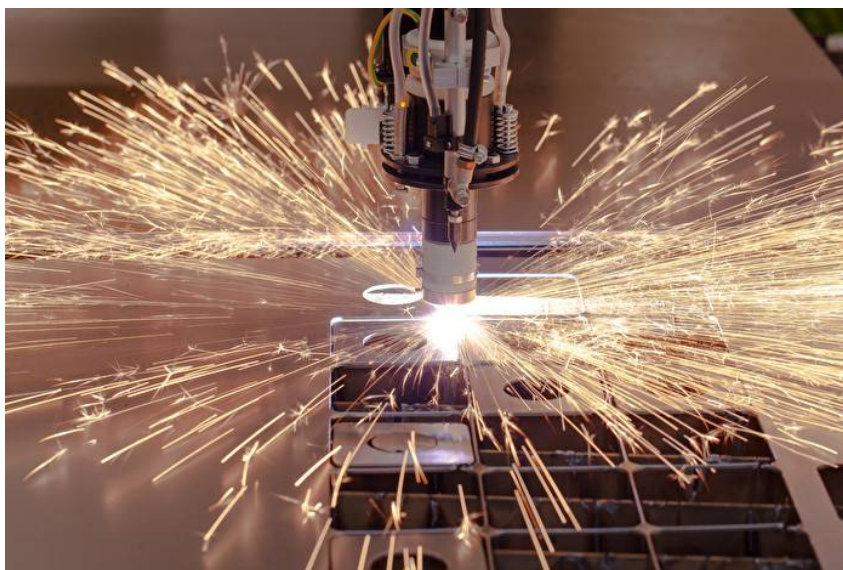
2.1. Charakterystyka metod cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii

Zwiększające się wymagania przemysłu w zakresie jakości produkowanych wyrobów przyczyniają się do znacznego postępu w rozwoju technologii obróbki skrawaniem, w tym również procesu cięcia. Dobór metody cięcia jest niezmiernie istotny z punktu widzenia ekonomii, jakości i szybkości produkcji.

Cięciem termicznym nazywa się powszechnie proces polegający na rozdzieleniu materiału na całej jego grubości, wzdłuż linii cięcia. Materiał poddawany temu procesowi, wskutek dostarczonej energii cieplnej doprowadza się do stanu ciekłego, następnie zostaje on wydmuchany z wykorzystaniem energii kinetycznej strumienia gazu lub osiąga na tyle wysoką temperaturę, przy której zostaje on utleniony w strumieniu czystego tlenu.

Kwestią sporną jest, którą metodę zastosować, aby cięcie było jak najmniej inwazyjne, lub też powodowało jak najmniej problemów w dalszej obróbce. Zależy to od wymagań i możliwości technicznych tj. rodzaju i grubości ciętego materiału, jakości cięcia, tolerancji wymiarowych, odchyłki prostopadłości, prędkości cięcia czy kształtu wycinanego elementu oraz od czynników ekonomicznych, do których zalicza się koszt inwestycji, koszt eksploatacji, efektywność procesu i stopień wykorzystania urządzenia (Romanowski i Nadolny, 2018).

Cięcie metali jest operacją technologiczną, od której najczęściej zaczyna się cały proces produkcyjny. Rozwój metod cięcia następuje w odpowiedzi na stawiane coraz większe wymagania, poczynając od cięcia prostoliniowego, poprzez cięcie 2D (w dwóch wymiarach) do cięcia 3D (w trzech wymiarach), pokazanego na rysunku 1 i 2 (Karpiański i inni, 2001).



Rys. 1. Cięcie 2D wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.chematex-scw.pl, 2019)



Rys. 2. Cięcie 3D wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.chematex-scw.pl, 2019)

W przemyśle metalurgicznym występuje wiele różnych wyrobów z metalu. Rury, profile, kształtowniki oraz blachy to tylko niektóre z nich. Istnieje wiele sposobów cięcia blachy. Część z nich nadaje się do automatyzacji, a część nie. Niektóre nadają się do cieńszych blach tj. do 15 mm grubości, a inne do grubszych tj. do 300 mm grubości. W celu uzyskania założonych wymiarów geometrycznych oraz jak najlepszej jakości cięcia elementów istotny wpływ ma również urządzenie, które jest używane do cięcia. Powinno być ono stabilne i odporne na drgania. Ciągły rozwój i doskonalenie metod cięcia oferuje coraz lepszą jakość przy relatywnie niskim koszcie urządzeń. Rozróżnia się następujące metody cięcia (Romanowski i inni, 2018):

- mechaniczne: szlifierką kątową przy użyciu ściernic tarczowych czy piłą tarczową, piłą taśmową, frezem piłkowo-tarczowym;

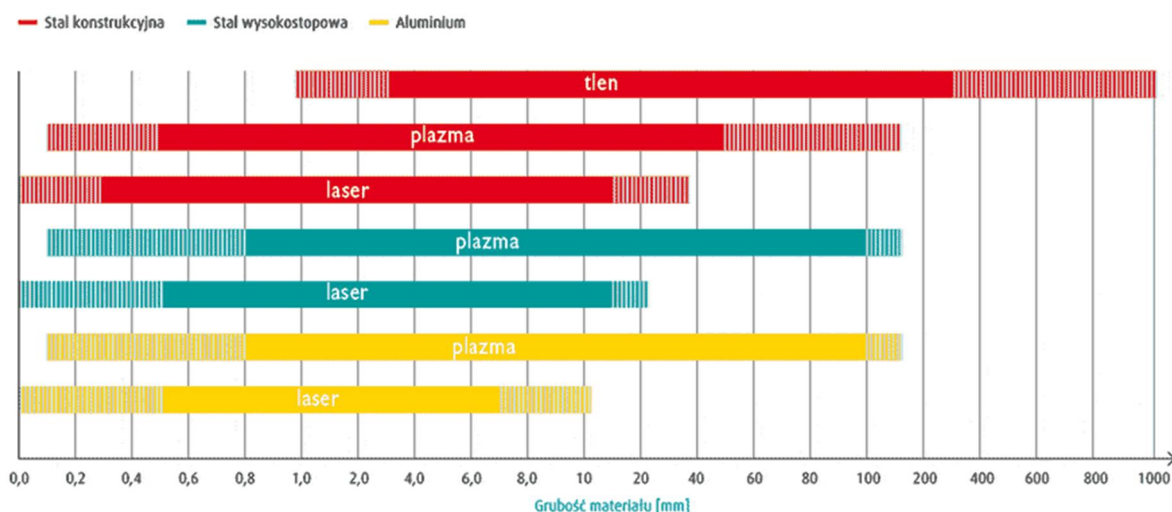
- skoncentrowanym strumieniem energii: strugą wodną lub wodno-ścierną, strumieniem fotonów, plazmą, ultradźwiękami w próżni, cięcie tlenowo-gazowe oraz cięcie strumieniem elektronów.

Porównanie metod cięcia zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Porównanie metod cięcia (<https://www.kmt-waterjet.pl>, 2020)

	Struga wodno- -ścierna	Strumień fotonów	Plazma
Materiały niemetaliczne	TAK	NIE	NIE
Możliwość zastosowania wielu głowic	TAK	NIE	OGRANICZONY
Cięcie wielowarstwowe	TAK	NIE	NIE
Materiały zespolone	TAK	NIE	NIE
Utwardzenie materiału	NIE	TAK	TAK
Tworzenie się zadziorów	Bardzo nieznaczna	TAK	TAK
Obróbka dodatkowa	Bardzo nieznaczna	TAK	TAK
Strata materiału	Bardzo nieznaczna	Wysoka	TAK
Tolerancje	0,1-0,3 mm	0,1 mm	0,2-0,5 mm
Tworzenie się trujących oparów	NIE	TAK	TAK
Grubość materiału	<305 mm	<25 mm	<80 mm
Odształcenie materiału	NIE	TAK	TAK

Zależnie od wybranej techniki cięcia, wydajności systemu tnącego oraz rodzaju materiału, możliwe jest cięcie elementów o grubości od ok. 0,5 mm do 160 mm, co pokazano na rysunku 3.



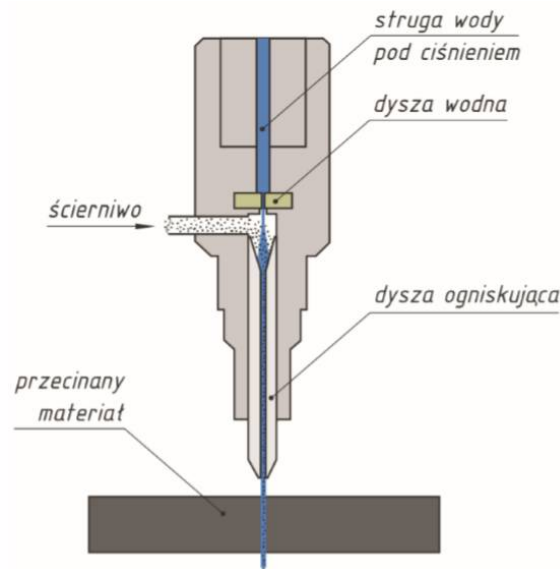
Rys. 3. Zestawienie metod cięcia stosowanych do cięcia w odpowiednich grubościach (<http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl>, 2019)

Najczęściej jednak stosowane jest cięcie strumieniem fotonów oraz strumieniem wody (Górka i Krysta, 2007).

2.1.1. Cięcie strugą wodną i wodno-ścierną

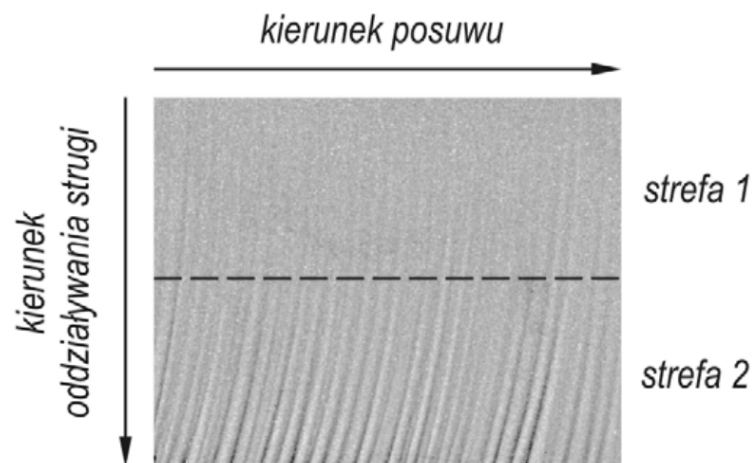
Strumień wody pod wysokim ciśnieniem doskonale nadaje się do cięcia różnej twardości stali, zapewniając równe i dokładne cięcie. Osiągnięcia naukowe ostatnich lat stworzyły podstawę dla dynamicznego rozwoju nowych technologii. Szczególny przypadek w tym zakresie stanowi technologia hydro-strumieniowa, wykorzystująca skoncentrowany strumień energii w postaci wysokociśnieniowej strugi wodnej, zawierającej ziarniste domieszki. W obszarze prac badawczych znajdują się analizy elementarnych zjawisk zachodzących na powierzchni obrabianej wysokociśnieniową strugą wodną domieszkowaną różnymi cząstkami stałymi (granatem, piaskiem kwarcowym, węglikiem krzemu, suchym lodem) (Borkowski i Benkowska, 2006). Kolejnym zagadnieniem opracowywanym przez badaczy jest rozmieszczenie ziaren ściernych wewnątrz wysokociśnieniowej strugi oraz procesu ich rozdrabniania podczas jej tworzenia.

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój tego sposobu obróbki materiałów, głównie metod cięcia strugą wodno-ścierną AWJ (ang. *Abrasive Water Jet*). Przecinanie strugą wodno-ścierną jest metodą kształtowania materiałów, powszechnie stosowaną w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, a nawet w medycynie (Borkowski, 2010). Doprowadzana miejscowo duża ilość skumulowanej energii (w postaci rozprędzonych ziaren ściernych) wywołuje skuteczną erozję materiału spowodowaną odrywaniem jego mikrocząstek od podstawowej masy. W procesie tym energia kinetyczna ziaren ściernych zamieniana jest na energię odkształcenia materiału w strefie obróbki. Sposób tworzenia strugi wodno-ściernej zaprezentowano na rysunku 4. Z pompy woda zostaje przesłana za pomocą wysokociśnieniowego przewodu do dyszy wodnej (rubinowej, szafirowej lub diamentowej). Wymiar średnicy tej dyszy zawiera się w przedziale 0,15-0,4 mm. W ten sposób energia potencjalna wody znajdującej się pod wysokim ciśnieniem zostaje zamieniona na energię kinetyczną uformowanej strugi. Struga wypływając z dyszy, wytwarza wewnątrz komory mieszania podciśnienie umożliwiające zassanie materiału ściernego. Zjawisko to jest ściśle związane z efektem Ventouriego.



Rys. 4. Sposób tworzenia strugi wodno-ścierniej (Sutowska, 2009)

Charakterystyczną cechą powierzchni przeciętych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną jest ich podział na dwie strefy o zróżnicowanym ukształtowaniu geometrycznym, co widać na rysunku 5 (Borkowski i Sutowska, 2007). Strefa 1 pozbawiona jest śladów obróbkowych natomiast strefa 2, na obszarze której wcześniej wspomniane ślady występują, tworząc zakrzywione rowki.



Rys. 5. Obraz powierzchni przeciętej strugą wodno-ścierną z zaznaczonymi strefami jakości (0H18N9, $v_f = 0,16$ mm/s, $p_w = 175$ MPa, $g = 35$ mm) (Borkowski i Sutowska, 2007)

Dokładność cięcia strugą wodno-ścierną może przewyższać dokładność cięcia laserowego, ponieważ chropowatość krawędzi może być mniejsza i nie występują odkształcenia cieplne. Ponadto, struga wodno-ścierna nie podlega ograniczeniom dotyczącym grubości ciętego materiału, jak cięcie laserowe i plazmowe. Wadą cięcia strugą wodno-ścierną jest koszt operacji. Wstępne koszty urządzeń są zazwyczaj większe niż w przypadku cięcia

strumieniem plazmy ze względu na wysoki koszt pompy multiplikatorowej, choć nie przewyższają kosztów cięcia strumieniem fotonów. Jednak roboczogodzina cięcia strugą wodno-ścierną kosztuje znacznie więcej, głównie z powodu kosztu piasku ściernego używanego do cięcia.

Cięcie strugą wodno-ścierną jest technologią uzupełniającą procesy cięcia mechanicznego oraz termicznego. Cięcie strugą wodno-ścierną stosuje się najczęściej do cięcia tych elementów, których wykonanie innymi technologiami jest trudne, kosztowne lub niemożliwe. Cięcie strugą wodno-ścierną jest technologią rozwijającą się w sposób bardzo dynamiczny. Metoda ta stosowana jest do cięcia tych elementów, których cięcie innymi technologiami jest trudne, kosztowne lub niemożliwe.

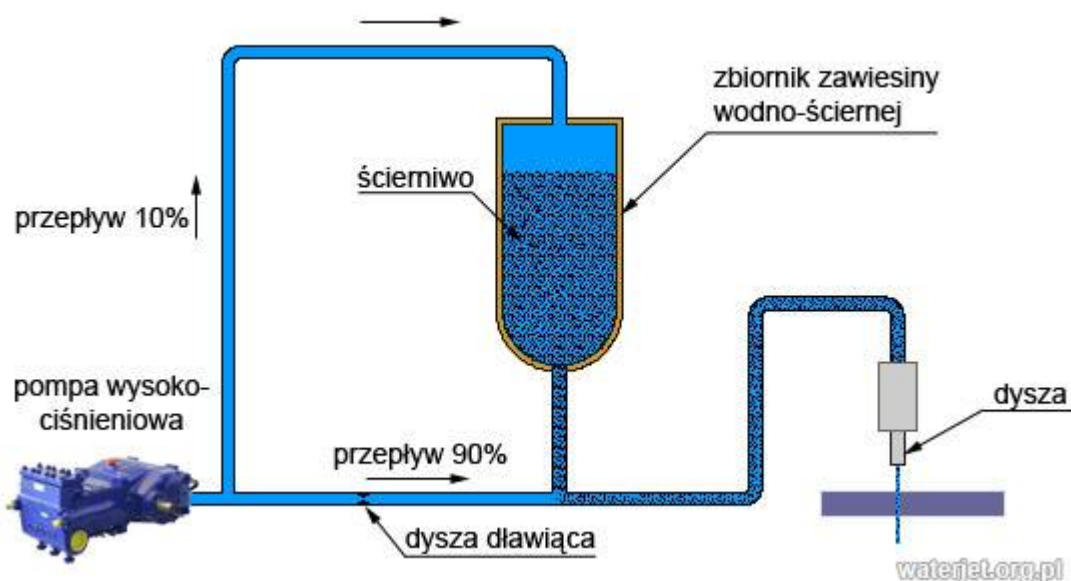
Do zalet tej metody należy zaliczyć:

- uzyskanie wysokiej jakości powierzchni cięcia,
- brak zmian strukturalnych materiału przy krawędziach (brak strefy wpływu ciepła – SWC),
- brak odkształceń cieplnych,
- wysoka czystość powierzchni,
- krótkie czasy przygotowawczo-zakończeniowe procesu
- wysoka wydajność procesu.

Metoda ta jest szczególnie opłacalna dla małych i średnich serii wyrobów (Feldshtein, Koman 2010 i Zheng, Han, Chen 1996). Cięcie strumieniem wody przy zastosowaniu silnie sprężonego strumienia wody umożliwia cięcie niemal wszystkich miękkich materiałów np. materiały izolacyjne, karton itp. Przy cięciu twardych materiałów jak metal, szkło, kamień itp. do strumienia wody zostaje doprowadzony materiał ścierny powodując zwiększenie siły cięcia, umożliwiając przy tym cięcie materiałów o grubościach dochodzących nawet do 300 mm. Dla wielu zastosowań, materiały cięte strumieniem wody nie wymagają dodatkowej obróbki wykończeniowej. Metoda ta także umożliwia cięcie przy użyciu wielu głowic i można to osiągnąć nawet za pomocą jednej pompy multiplikatorowej. Natomiast każda kolejna głowica tnąca wymaga dodatkowego przepływu wody, co wymusza zastosowanie większej pompy lub mniejszego otworu.

Oprócz licznych zalet istnieją również pewne ograniczenia przecinania materiałów strugą czystej wody. Należy do nich głównie tendencja do wywoływania na powierzchniach poddawanych działaniu strugi rozwarstwień lub wyraźnego prążkowania. W celu wyeliminowania tych niedogodności od 1982 roku zostały zintensyfikowane prace

wdrożeniowe nad dodawaniem luźnych środków ściernych do wysokociśnieniowej strugi wodnej. Działania te pozwoliły na usunięcie lub zminimalizowanie tych ograniczeń, zwiększając jednocześnie zakres obrabianych materiałów o materiały twarde (Sutowska, 2011). Z uwagi na brak strefy wpływu ciepła technologia nazwana jest „zimną”, dzięki czemu cięcie AWJ stało się w ostatnim czasie skuteczną i atrakcyjną metodą przecinania materiałów, głównie w przypadku obróbki elementów, których nie można nagrzewać (Spadło, 2014). Metodę taką przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. System tnący wykorzystujący technologię AWJ (Akkurt, 2009)

W obróbce wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną proces erozji odbywa się przy niewielkiej sile naporu na obrabiany materiał. Siła z jaką cięty jest materiał jest na tyle mała, że obróbka strugą wodno-ścierną nie wymaga rozbudowanego oprzyrządowania technologicznego w postaci elementów mocujących, uchwytów itp. W procesie cięcia występuje jedynie niebezpieczeństwo poderwania przez wodę elementów o małych gabarytach i niedużej masie, w takich przypadkach konieczne jest zastosowanie oprzyrządowania technologicznego do mocowania przedmiotów obrabianych. Inną bardzo ważną cechą technologii AWJ jest znikome oddziaływanie procesu na środowisko naturalne, które przejawia się brakiem powstawania w czasie procesu cięcia szkodliwych oparów (Krajcarz, 2014). Większość materiałów ściernych wykorzystywanych, jako medium intensyfikujące proces obróbczy, jest całkowicie obojętne dla środowiska i może zostać zutylizowanych, albo też wykorzystana ponownie w procesie cięcia, jak na przykład garnet. Garnet jest ściemniwem niemetalowym, stosowanym głównie do cięcia wodą, jak również do piaskowania powierzchni.

Ma wysoką trwałość i twardość ok. 8 w skali Mohsa. Charakteryzuje się niską zużywalnością i znacznie mniej pyli niż inne ścierniwa. Jest to surowiec ścierny, który należy do rodziny krzemianów. Ze względu na podobieństwo kamieni do owocu granatu jest również nazywany granatem almandynowym (szlachetnym).

Zalety cięcia garnetem (www.korund.pl, 2020):

- niska cena,
- nie wytwarza iskier podczas uderzenia ziaren o powierzchnie metalowe,
- wysoka czystość, brak pyłu żelaznego i kationów żelaznych oraz niska zawartość soli rozpuszczalnych (chlorków i siarczanów),
- wysoka skrawność ze względu na ostre krawędzie i twardość ziaren,
- bardzo niska pylność.

Cięcie strugą wodno-ścierną ma wiele zalet. Jest to metoda uniwersalna – można w ten sposób kształtować większości materiałów o różnych grubościach, co zapewnia jej szeroki zakres zastosowań obróbkowych. Proces erozji kształtowanego materiału pod wpływem oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej zależy od energii hydraulicznej strugi wody oraz energii kinetycznej użytych ziaren ściernych (Mazurkiewicz, 2008). W wyniku przekroczenia wytrzymałości doraźnej w obrabianym materiale tworzą się mikroszczeliny i ulega on erozji mechanicznej (Wantuch, 2000). Cięcie strugą wodno-ścierną jest konkurencyjne dla powszechnie wykorzystywanych metod cięcia materiałów (Harnicarova i inni, 2012). Technologia AWJ jest powszechnie używana przy wykonywaniu elementów o skomplikowanych kształtach.

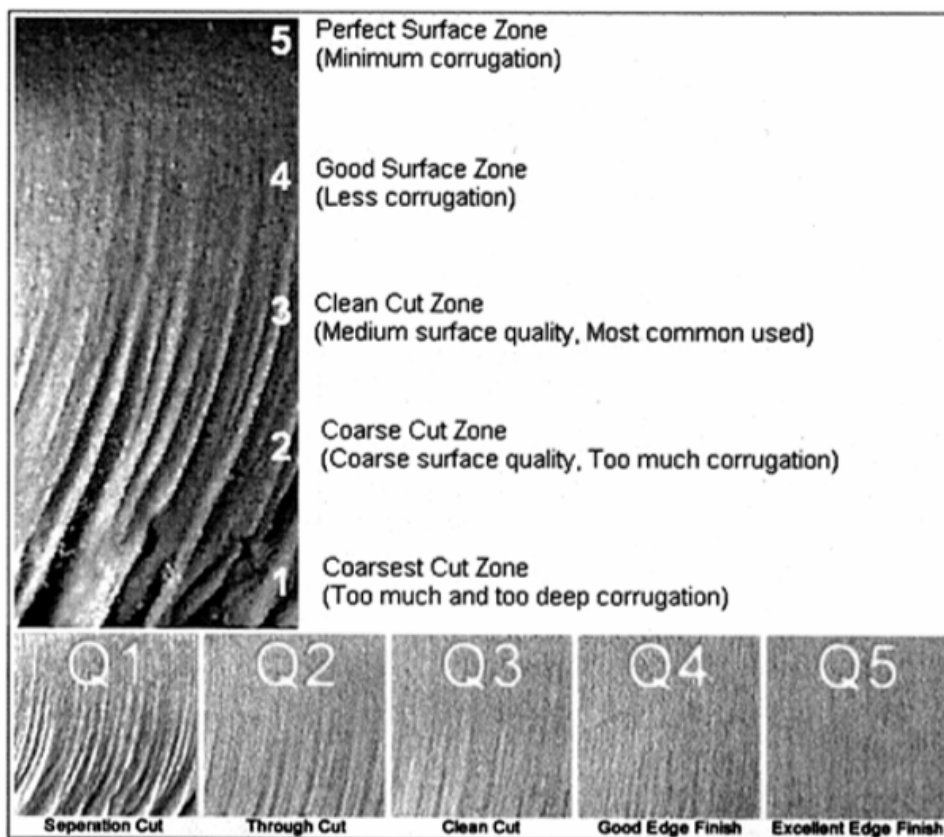
Parametry charakteryzujące proces cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną można podzielić na (Hlavac, 2009):

- hydrauliczne (ciśnienie strugi, średnica strugi, moc strugi);
- właściwości ścierniwa (rodzaj stosowanego ścierniwa, granulacja ścierniwa, wydatek ścierniwa);
- technologiczne procesu przecinania (prędkość posuwu głowicy tnącej, odległość końca dyszy wodno-ścierniej od ciętego materiału).

Dokładne poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu na jakość otrzymywanych powierzchni przecięcia pozwala opracować model procesu przecinania materiałów (Selvan i Raju, 2011), w którym nie będą występowały zaniżone parametry w postaci zbyt małej wartości prędkości posuwu czy wydatku dozowanego ścierniwa (Romanowski i Nadolny, 2019). Powierzchnia przecięcia będzie się natomiast charakteryzować

z góry zakładanymi parametrami jakości (Hlavac, 2009). Ważne jest, aby jakość powierzchni nie była zbyt niska lub za wysoka w miejscach, gdzie nie jest to wymagane.

Strukturę powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną określa się zazwyczaj w sposób wizualny za pomocą wskaźników klas jakości. Poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu obróbki na jakość otrzymywanych powierzchni przecięcia pozwoliło opracować model procesu przecinania badanego materiału (Selvan i Raju, 2011). Umożliwia to wyeliminowanie nadwyżek technologicznych procesu w postaci przykładowo zbyt małej wartości prędkości posuwu czy wydatku dozowanego ścierniwa. Uzyskanie dobrej czy bardzo dobrej jakości powierzchni po cięciu AWJ wiąże się z relatywnie większymi i niepotrzebnymi kosztami cięcia, które należy minimalizować. Jakość cięcia krawędzi ilustruje rysunek 7.



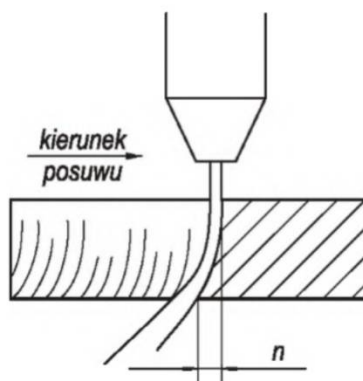
Rys. 7. Jakość cięcia krawędzi strugą wodno-ścierną (Akkurt, 2009)

Wytworzona w głowicy roboczej wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna sterowana jest przeważnie w układzie stołu 2D do wykonywania przedmiotów płaskich. Z rzeczywistych potrzeb rynkowych wynika, że blisko 100% zadań dotyczących typowych operacji cięcia i wycinania wymaga sterowania tylko w układzie XY. Wysoką efektywność tej technologii zapewniają układy wspomaganie projektowania przedmiotów (typu CAD/CAM) oraz niejawnie

modele doboru warunków obróbki z uwzględnieniem rodzaju obrabianego materiału (Borkowski, 2008).

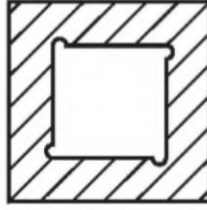
Wzrost głębokości wnikania strugi w materiał powoduje pogarszanie się jakości przecięcia. Kształt, który przyjmuje struga w trakcie przecinania materiałów, odwzorowuje się na bocznych powierzchniach przedmiotów w postaci zwykle równoległych, zakrzywionych rowków. Intensywność występowania śladów poobróbkowych zależy w istotnej mierze od ciśnienia strugi wody i prędkości cięcia, równoznacznej z prędkością posuwu (Oczos i Łabucki, 1992).

Podczas cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną można zaobserwować dwa ważne, z punktu widzenia jakości procesu, zjawiska. Pierwszym z nich jest odchylenie się strugi w kierunku przeciwnym do przemieszczania głowicy tnącej. Oznacza to, że podczas przemieszczania się głowicy tnącej wzdłuż obrabianego materiału, wypływ strugi następuje z opóźnieniem w stosunku do miejsca jej wejścia w materiał, co widać na rysunku 8 (Sutowska, 2014).



Rys. 8. Odchylenie strugi wodno-ścierniej podczas procesu przecinania (Zheng i inni, 2002)

Przy cięciu prostoliniowym struga wodno-ścierna może się przemieszczać z dużą prędkością, oddziałując na materiał obrabiany, ponieważ jej odchylenie nie wpływa na dokładność procesu. Jednakże w przypadku wycinania naroży zbyt duża prędkość przemieszczania się strugi wodno-ścierniej może być przyczyną powstawania błędów kształtu. Tę sytuację obrazuje rysunek 9. Z tego powodu, przy cięciu przedmiotów o złożonych kształtach prędkość posuwu musi być właściwie dobrana, aby wyeliminować tego rodzaju błędy technologiczne (Sutowska, 2014).



Rys. 9. Błędny kształt naroży spowodowany zakrzywieniem toru wybiegu strugi (Zheng i inni, 2002)

Warto zwrócić uwagę na fakt, że cięcie strugą wodną i wodno-ścierną może być stosowane do przecinania tworzyw konstrukcyjnych o różnych strukturach i składach chemicznych z satysfakcjonującą wydajnością. Można zatem stwierdzić, że powierzchnie po cięciu powyższą metodą mają strukturę pozwalającą na późniejszą skuteczną obróbkę krawędzi ciętych (Sutowska, 2014).

2.1.2. Cięcie strumieniem fotonów (cięcie laserowe)

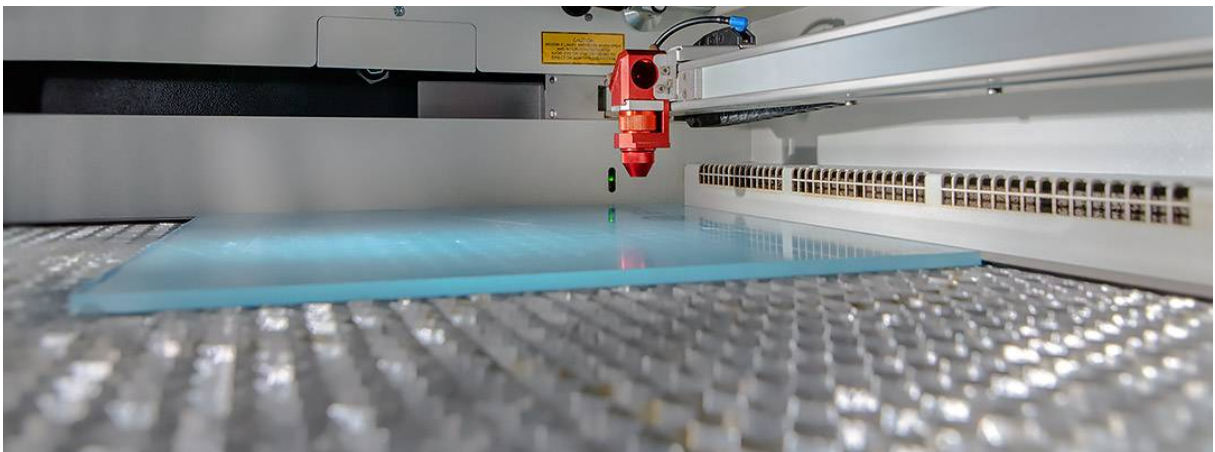
Laser jest urządzeniem emitującym promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni, które wykorzystuje zjawisko emisji wymuszonej. Nazwa jest akronimem od angielskiego określenia (ang. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), czyli wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Promieniowanie lasera jest spójne, zazwyczaj spolaryzowane i ma postać wiązki o bardzo małej rozbieżności. W laserze łatwo jest otrzymać promieniowanie o bardzo małej szerokości linii emisyjnej, co jest równoważne bardzo dużej mocy w wybranym, wąskim obszarze widma. W laserach impulsowych można uzyskać bardzo dużą moc w impulsie i bardzo krótki czas trwania impulsu (np. laser femtosekundowy) (Ziętek, 2008). Cięcie laserowe jest procesem, w którym energia wiązki laserowej, ciągłej lub impulsowej powoduje stopienie ciętego materiału w szczelinie cięcia lub jednoczesne stopienie i odparowanie oraz stopienie i spalanie ciętego materiału: metali, cermetali, ceramiki czy tworzyw sztucznych, a nawet drewna. Cięcie wiązką laserową jest stosunkowo nową techniką stosowaną w wielu dziedzinach przemysłu, na przykład samochodowym, lotniczym czy maszynowym. Pierwsze urządzenie emitujące koherentną i monochromatyczną wiązkę promieniowania elektromagnetycznego zbudował w 1960 r. dr T. H. Maiman, pompując światłem białym pręt z kryształu rubinu. Natomiast podstawy teoretyczne opisał Albert Einstein (Maiman, 1960).

Do zalet cięcia laserowego można zaliczyć (Feldshtein i Koman, 2010; Zheng i inni, 1996):

- łatwość automatyzacji procesu i jego dużą elastyczność,
- dużą szybkość procesu,

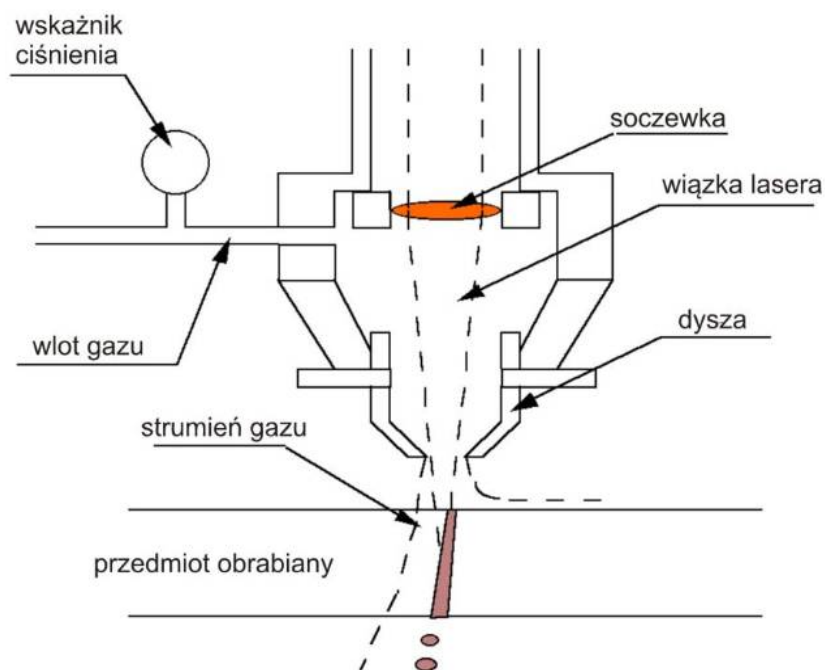
- szeroki zakres materiałów poddających się procesowi cięcia (od bardzo miękkich i kruchych do bardzo twardych),
- wąską szczelinę cięcia,
- bezkontaktowość procesu, co skutkuje brakiem zużycia narzędzia,
- wysoki stopień automatyzacji procesu,
- możliwość uzyskania dużej dokładności wymiarowo-kształtowej,
- sterowanie doprowadzeniem energii do ciętego materiału,
- dużą elastyczność procesu przy zmianie profilu produkcji, gdyż nie jest potrzebna wymiana narzędzi tnących.

Metoda ta pozwala na cięcie większości materiałów np. metali, tworzyw sztucznych, szkła, co przedstawia rysunek 10, czy materiałów izolacyjnych i daje możliwość wykonania wewnętrznych profili, skomplikowanych elementów czy precyzyjnych szczelin (Kirkpatrick, 1999; Banasik i Dworak, 2002).



Rys. 10. Cięcie szkła wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.laserem.pl, 2019)

Możliwości zastosowania cięcia laserowego są bardzo duże. Proces cięcia laserowego nadaje się do cięcia miękkiej stali o grubości do około 30 milimetrów. Uzyskanie dobrych rezultatów powyżej bariery 25 milimetrów wymaga wysokiej jakości wszystkich elementów, takich jak materiał (stal przeznaczona do cięcia laserowego), czystość gazu, stan dyszy i jakość wiązki. W procesie cięcia laserowego konieczny jest jednoczesny, współosiowy przepływ gazu z wiązką laserową. Gaz ten zwany jest gazem towarzyszącym (ang. *assist gas*). Jego zadaniem jest wydmuchanie ze szczeliny cięcia powstałych produktów (ciekłego i odparowanego materiału), co przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Schemat budowy głowicy laserowej do cięcia oraz widok procesu cięcia laserowego (Klimpel, 2011)

Cięcie laserowe nie jest najszybszym procesem, ponieważ w przypadku miękkiej stali to w zasadzie proces przepalania, który wykorzystuje ekstremalnie wysoką temperaturę skupionej wiązki lasera zamiast płomienia podgrzewającego. Dlatego posuw głowicy jest ograniczony przez szybkość reakcji chemicznej między żelazem i tlenem. Cięcie laserowe jest jednak procesem bardzo dokładnym. Tworzy bardzo wąską szczelinę, w związku z czym może wycinać wyjątkowo precyzyjne kontury i dokładne małe otwory. Jakość krawędzi jest zazwyczaj bardzo dobra, przy niezwykle małym ząbkowaniu i nawisach metalu, krawędzie są bardzo prostopadłe i występuje niewiele lub brak żużłu. Inną zaletą procesu cięcia laserem jest niezawodność. W urządzeniu do cięcia laserem trwałość materiałów eksploatacyjnych jest bardzo wysoka, a sterowanie maszyną na tyle zaawansowane, że dzięki temu wiele operacji cięcia laserowego może przebiegać w cyklu automatycznym. W wyniku złożoności podawania wiązki, lasery nie umożliwiają cięcia przy użyciu wielu głowic w jednej maszynie.

Procesowi stopienia i/lub odparowania metalu w szczelinie cięcia towarzyszyć musi jednocześnie oddziaływanie strumienia gazu współosiowego z wiązką laserową, którego zadaniem jest usunięcie ciekłego metalu i par metali ze szczeliny cięcia. Jeśli jako gaz towarzyszący zastosowany jest tlen, powietrze lub mieszanki gazów zawierających tlen, w szczelinie cięcia metalu dodatkowo zachodzi reakcja egzotermiczna spalania ciekłego metalu, zwiększająca energię cieplną procesu (Klimpel, 2011). W celu nagrzania metalu w obszarze szczeliny cięcia do temperatury topnienia lub parowania wiązka laserowa musi dostarczyć wymaganą wartość energii, której część tracona jest w wyniku odprowadzania

ciepła do ciętego przedmiotu, przez powierzchnię ciętych krawędzi. Gdy zogniskowana wiązka laserowa o dużej gęstości mocy uderza w powierzchnię ciętego metalu, część energii jest absorbowana, a część ulega odbiciu. Energia fotonów (kwantów promieniowania) wiązki laserowej absorbowana jest przez wolne elektrony chmury elektronowej otaczającej jądra atomów metalu (zjawisko znane jako odwrotne promieniowanie hamowania). Elektrony pod wpływem zaabsorbowanej energii fotonów przechodzą w stan wymuszonych drgań, który wyraża się w postaci energii cieplnej. Gdy dostarczona jest wymagana wartość energii kwantów promieniowania laserowego, drgania cieplne elektronów są tak intensywne, że następuje taki spadek siły wiązań cząsteczkowych metalu, iż metal ze stanu stałego przechodzi w stan ciekły. W przypadku dalszego wzrostu energii promieniowania laserowego zwiększa się znacznie energia drgań elektronów metalu, prowadząca do takiego spadku siły wiązań cząsteczkowych, że metal ze stanu ciekłego przechodzi w stan gazowy co zestawiono w tabeli 2.

Absorpcja energii promieniowania laserowego na powierzchni ciętego metalu jest określana jako stosunek pochłoniętej przez metal mocy wiązki laserowej do mocy wiązki padającej na powierzchnię metalu. Dla materiałów nieprzezroczystych, takich jak metale, absorpcja A jest określana jako $A = 1 - R$, gdzie R jest współczynnikiem odbicia powierzchni metalu.

Absorpcja (współczynnik absorpcji) promieniowania laserowego jest zależna od (Sato i inni, 1996):

- długości fali promieniowania,
- kąta padania promieniowania,
- polaryzacji wiązki laserowej,
- temperatury powierzchni metalu,
- stanu fazowego metalu.

Absorpcja metali zwiększa się w kierunku promieniowania widzialnego i ultrafioletowego. Jeśli wiązka laserowa pada pod kątem prostym do ciętej powierzchni metalu, współczynnik absorpcji jest równy dla polaryzacji równoległej i poprzecznej. Pochylenie wiązki laserowej względem powierzchni metalu sprawia, że zmniejsza się współczynnik odbicia wiązki o polaryzacji równoległej, a zwiększa się dla polaryzacji poprzecznej. Współczynnik absorpcji promieniowania zwiększa się wraz z temperaturą metalu i wynosi ok. 100%, gdy metal jest w postaci pary. Proces cięcia laserowego rozpoczyna się od przebicia ciętego przedmiotu i utworzenia kanału parowego – oczka o ściankach pokrytych ciekłym metalem i wypełnionym parami metalu. Ten etap procesu cięcia zależy w dużym stopniu od

współczynnika odbicia ciętego metalu. Aluminium i miedź cechują się wysokim współczynnikiem odbicia i wymagają znacznie wyższej mocy wiązki do rozpoczęcia procesu cięcia laserowego (Steen, 2003).

Tab. 2. Temperatura topnienia i wrzenia, gęstość, przewodność cieplna właściwa różnych materiałów metalowych (Klimpel, 2012)

Rodzaj metalu	Gęstość d kg/m ³	Temperatura topnienia t_t °C	Temperatura wrzenia t_w °C	Przewodność cieplna właściwa k W/(m·K)
Magnez	1700	650	1105	154,8
Aluminium	2700	660	2450	238,5
Cynk	7130	419,5	906	113
Srebro	10500	967	1761	418,4
Miedź	8900	1083	2600	393,3
Beryl	1800	1277	2770	201
Nikiel	8900	1453	2730	92,1
Chrom	7190	1875	2680	67
Kobalt	8910	1495	2900	69
Mangan	7430	1246	2065	7,79
Żelazo	7900	1553	3030	75,3
Tytan	4500	1668	3260	18,9
Cyrkon	6400	1857	3580	225,9
Wanad	6100	1860	3350	29,2
Niob	8570	2468	4927	53,7
Molibden	10220	2610	5550	142,6
Tantal	16650	2996	5400	57,5
Wolfram	19300	3410	5900	167,4
Stal niskowęglowa	7800	1490-1520	3050*	71,1
Stal wysokowęglowa	7800	1380-1490	3050*	66,9
Stal martenzytyczna 13% Cr	7800	1425-1530	3100*	28,7
Stal ferrytyczna 25% Cr	7800	1425-1530	3200*	24,4-26,3
Stal austenityczna	7800-8000	1400-1450	3200*	18,7-22,8
Stal duplex	7800-8000	1430-1450	3100*	16,2-19,0

* wartości przybliżone zależne od rzeczywistego składu chemicznego stali

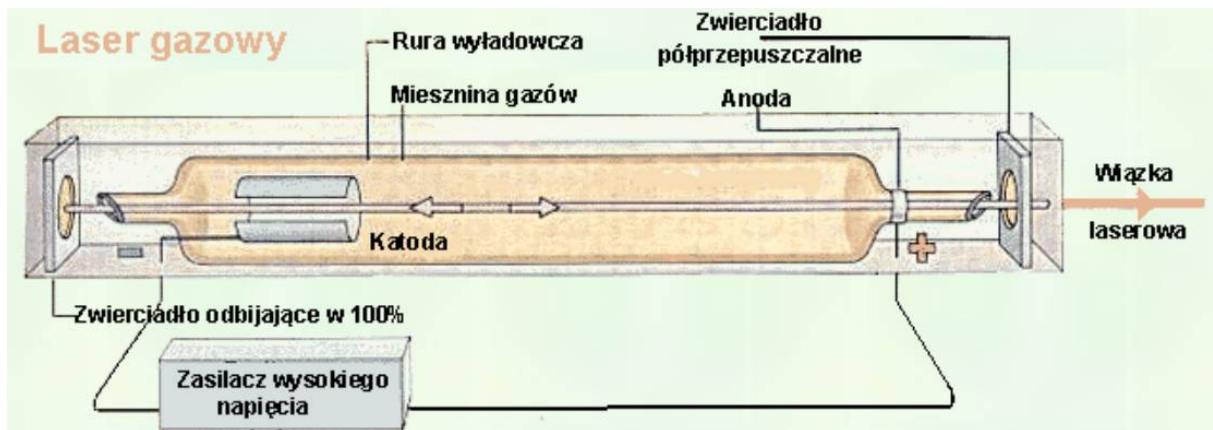
Przykładem urządzenia wykorzystującego technikę laserową jest robot spawalniczy firmy Panasonic przedstawiony na rysunku 12.



Rys. 12. Robot spawalniczy firmy Panasonic GIII (<https://www.panasonicfa.com>, 2020)

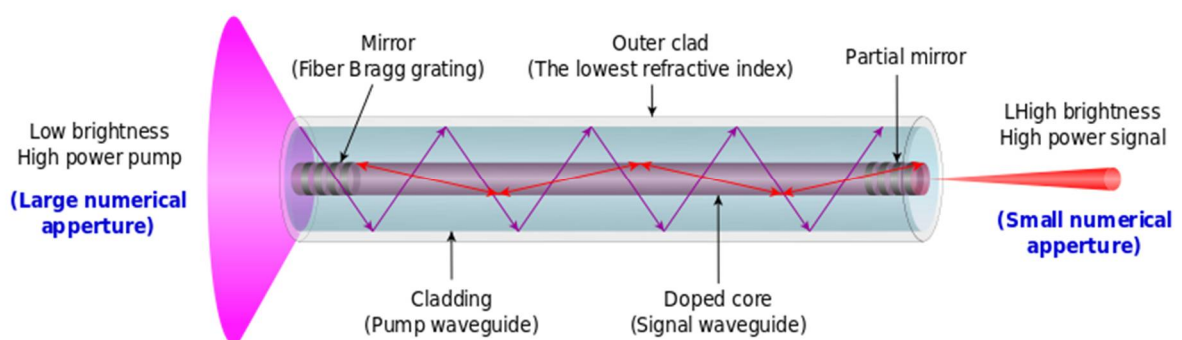
Poniżej scharakteryzowano dwa wiodące typy urządzeń wykorzystujących technikę laserową używanych wspólnie w procesach produkcyjnych: lasery gazowe i włóknowe.

Lasery gazowe są laserami, które bazują na mieszance gazowej dwutlenku węgla, aktywowanej elektrycznie. Biorąc pod uwagę długość fali wynoszącą $10,6 \mu\text{m}$ lasery te doskonale nadają się do obróbki materiałów niemetalicznych oraz większości tworzyw sztucznych. Lasery gazowe charakteryzują się stosunkowo dużą wydajnością i bardzo dobrą jakością promieniowania. Dlatego są najczęściej wykorzystywanymi laserami (w szczególności jako lasery do grawerowania). Opisany typ źródeł lasera nadaje się do obróbki następujących materiałów: drewna, akrylu, szkła, papieru, tekstyliów, tworzyw sztucznych, folii, skóry, kamienia. Schemat budowy lasera gazowego, wykorzystującego do cięcia CO_2 przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Schemat budowy lasera gazowego wykorzystującego CO₂ (www.fizyka.net.pl, 2019)

Lasery włóknowe (*fiber*) należą do grupy laserów krystalicznych. Wytwarzają one wiązkę lasera za pomocą światła laserowego (ang. *laser seed*) stabilizującego wydajność wiązki oraz wzmacniają ją w specjalnych włóknach szklanych, do których dostarczana jest energia za pośrednictwem diod pompujących. Dzięki długości fali wynoszącej 1,064 μm lasery włóknowe mają bardzo małą średnicę ogniska, przez co ich intensywność jest do 100 razy większa niż laserów wykorzystujących CO₂ o podobnej średniej mocy generowanej. Lasery włóknowe najlepiej nadają się do znakowania metali metodą wyżarzania, do grawerowania metali oraz do kontrastowego znakowania tworzyw sztucznych. Nie wymagają konserwacji i wyróżniają się długą żywotnością. Opisywane wyżej lasery włóknowe posiadają żywotność 50 000-100 000 godzin roboczych. Urządzenie do cięcia skoncentrowanym strumieniem fotonów, wykorzystujące technologię lasera włóknowego, przedstawiono na rysunku 14. Lasery włóknowe stosuje się do obróbki następujących materiałów: metali, metali powlekanych, tworzyw sztucznych.



Rys. 14. Schemat budowy maszyny do cięcia wykorzystującej technologię lasera włóknowego (www.commonswikimedia.org, 2020)

Cięcie laserami włóknowymi jest stosowane również do kształtowania otworów (perforacji, wiercenia) większości znanych materiałów inżynierskich. W stosunku do

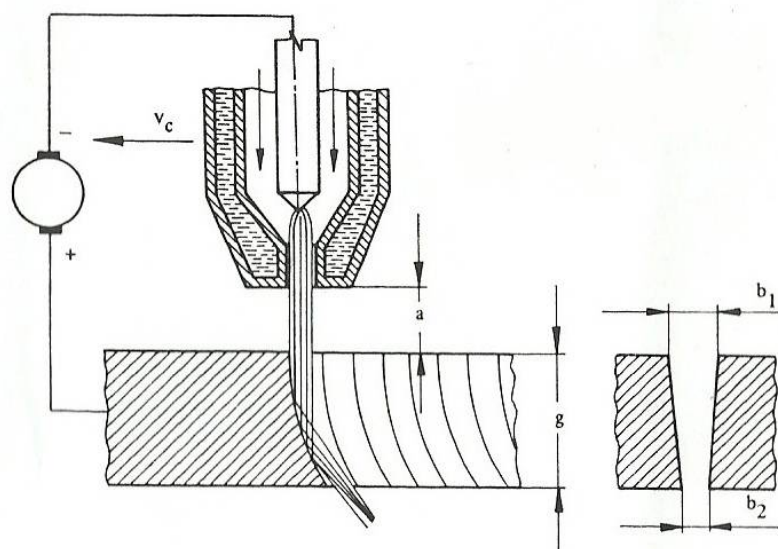
klasycznego procesu cięcia laserowego, perforacja wymaga ciągłego, impulsowego lub udarowego dostarczania energii wiązki laserowej, o znacznie większej gęstości mocy, w zakresie 104-1011 W/mm² w zależności od rodzaju ciętego metalu.

Struktury geometryczne powierzchni, występujące po cięciu metodą laserową, wykazują systematyczność. Wszystkie posiadają regularne rozkłady rzędnych profilu, zbliżone do normalnego. Powierzchnie nie zawierają zbyt wielu ekstremalnych miejscowych wzniesień ani wgłębień. Powstałe po cięciu laserowym powierzchnie należy sklasyfikować jako anizotropowe losowe, a w rzadkich przypadkach anizotropowe okresowe (Nowicki, 1991; Jakubiec i Malinowski, 2004).

2.1.3. Cięcie strumieniem plazmy

Plazma, nazywana czasami czwartym stanem skupienia, jest silnie zjonizowaną materią przypominającym gaz. Szacuje się, że 99% wszechświata jest zbudowane z plazmy. Zewnętrzna warstwa atmosfery ziemskiej, zwana jonosferą ma postać plazmy. W warunkach ziemskich plazma występuje stosunkowo rzadko, np. podczas wyładowań burzowych. Może też być wytwarzana sztucznie przez człowieka. Rozróżnia się plazmę niskotemperaturową (wyładowań elektrycznych – tak zwaną zimną) oraz plazmę wysokotemperaturową (gorącą) wytwarzaną podczas syntezy termojądrowej (Celiński, 1980; Romanowski i Nadolny, 2019). W technice wykorzystuje się głównie plazmę zimną. Plazma jest elektrycznie obojętna, pomimo tego, że wewnątrz niej występują zarówno jony jak i obojętne elektrycznie atomy. Plazma z łatwością przewodzi prąd elektryczny, ze względu na obecność dużej ilości jonów oraz swobodnych elektronów. Opór elektryczny plazmy maleje wraz ze zwiększaniem temperatury (Celiński, 1980).

Urządzenia do cięcia plazmowego są obecnie powszechnie wykorzystywane w wielu procesach technologicznych związanych z wytwarzaniem konstrukcji metalowych. Cięcie plazmą polega na topieniu i wyrzucaniu metalu ze szczeliny cięcia silnie skoncentrowanym plazmowym łukiem elektrycznym o dużej energii kinetycznej i przepuszczaniu przez niego zjonizowanego gazu. Schemat powstawania szczeliny przecięcia podczas cięcia plazmowego przedstawiono na rysunku 15. Łuk plazmowy przechodzi przez mocno chłodzoną dyszę, zawężającą średnicę jego strumienia (Pakos, 2012).

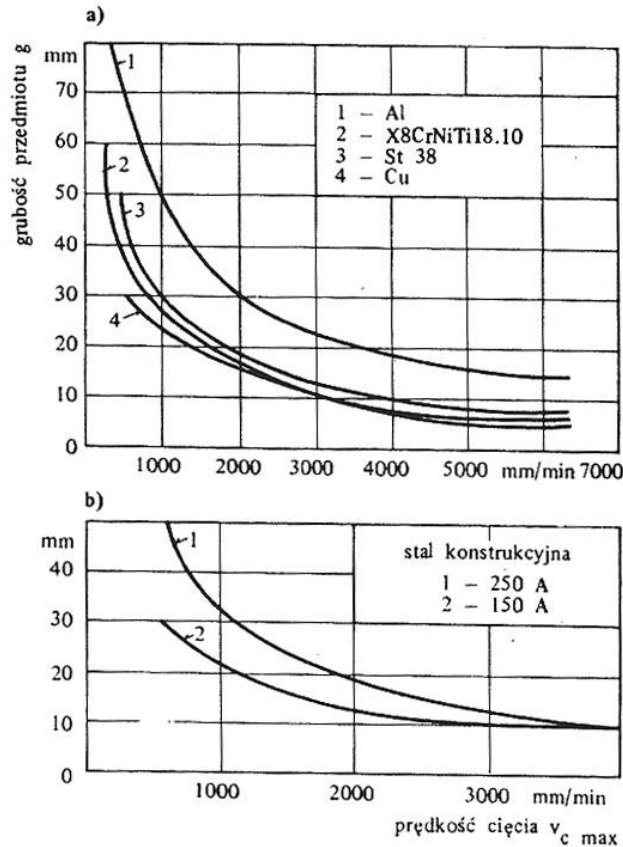


Rys. 15. Schemat powstawania szczeliny przecięcia podczas cięcia plazmowego (Klimpel, 1999)

W górnym odcinku ciętego materiału powstająca szczelina uzyskana została z prawidłowo ukształtowanej części słupa łukowego. Natomiast średni odcinek materiału przedstawia miejsce wygięcia czoła i obtopienie. W miejscu tym tworzy się tzw. obszar anodowy zwany również korozyjnym. Poniżej tego obszaru, na dolnym odcinku, tworzy się wytapiający plazmowy płomień gazu nagrzanego w słupie łukowym. Krawędzie szczeliny zwężają się ku dołowi. Wysokość palnika plazmowego nad przecinanym materiałem ma wpływ na głębokość zanurzenia się słupa łukowego w obrabiany materiał. Zbyt niskie opuszczenie palnika, może skutkować uszkodzeniem dyszy wypryskami metalu. W zależności od grubości ciętego materiału, odległość między przedmiotem obrabianym a dyszą palnika plazmowego wynosi od 5 do 10 mm. Prędkość cięcia zależy nie tylko od grubości, ale również od rodzaju przecinanego materiału oraz od parametrów pracy palnika. Najistotniejsze parametry, to rodzaj gazu roboczego oraz natężenie prądu łuku pokazane na rysunku 16.

Cięcie plazmowe stanowi jedną z podstawowych metod cięcia termicznego. Duża wydajność i niskie koszty eksploatacyjne, jak również możliwość przecięcia materiałów o większych grubościach (do ok. 150 mm) to główne zalety tej metody cięcia. Cięcie plazmowe jest procesem odpowiednim dla wszystkich rodzajów materiałów przewodzących prąd elektryczny np. stal, aluminium, żeliwo czy miedź. Urządzenia do cięcia plazmą, które charakteryzują się niskimi kosztami pracy, mogą być stosowane zarówno w trybie ręcznym jak i zautomatyzowanym. Cięcie plazmą – sterowane ręcznie lub automatycznie – wykorzystuje wysoką temperaturę w jądrze łuku plazmowego (10 000-30 000°C) i dużą prędkość strumienia plazmy, co powoduje, że cięty materiał jest topiony i wydmuchiwany ze szczeliny cięcia. Przy obróbce plazmą stosuje się źródła prądu o różnych natężeniach w zakresie 80-150 A –

w zależności od grubości przecinanego materiału. Od natężenia prądu uzależnione są temperatura i energia łuku plazmowego (im większe natężenie, tym większa prędkość cięcia i możliwość obróbki materiałów o większej grubości).



Rys. 16. Maksymalna prędkość cięcia plazmowego, przy zastosowaniu jako gazu roboczego: a) mieszanki argonowo-wodorowej (różne metale); b) sprężonego powietrza (przy różnym prądzie łuku) (Simler, 1986)

Maksymalną (optymalną) prędkość cięcia można określić na podstawie bilansu mocy cieplnej, wykorzystanej na stopienie i odparowanie metalu w objętości szczeliny przecięcia w jednostce czasu:

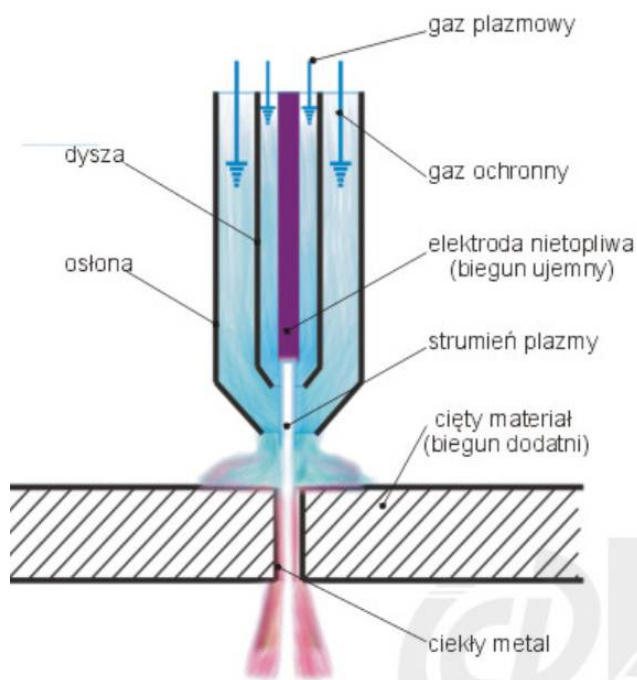
$$v_{c \max} = K \frac{I_{\tau} u_{\tau}}{b_{st} g}, \text{ cm/s}, \quad (1)$$

gdzie: $K=95$ dla aluminium, $K=44$ dla stali.

Z zależności (1) wynika, że przy danej grubości metalu, można, niezwiększając prądu łuku, istotnie zwiększać prędkość cięcia, zwiększając napięcie łuku poprzez wzrost natężenia pola elektrycznego słupa łukowego E , co osiąga się przez zastosowanie plazmotwórczych gazów o dużej entalpii i intensywne obciśnięcie słupa, czyli zwiększenie gęstości prądu w dyszy.

Palniki plazmowe wykorzystywane do cięcia metali są zbudowane w sposób przedstawiony na rysunku 17. Są one określane jako urządzenia PAC (ang. *Plasma Arc Cutting*)

(Stryczewka, 2009; Klimpel, 2013). W palniku plazmowym używane są dwa rodzaje gazów: gazy plazmowe i gazy osłonowe.



Rys. 17. Schemat konstrukcji palnika plazmowego (www.ciecielaserem.info, 2020)

Natomiast najbardziej powszechne są cztery zasadnicze odmiany cięcia plazmowego (Höpf, 1986):

- cięcie konwencjonalne (ang. *conventional PAC*),
- cięcie w osłonie gazowej (ang. *gas-shielded PAC*),
- cięcie w osłonie wodnej (ang. *water-shielded PAC*),
- cięcie z wtryskiem wody (ang. *water-injection PAC*).

Różnią się one głównie rodzajem zastosowanego gazu roboczego oraz budową palnika (tabela 3).

Prędkość i jakość powierzchni uzyskana po procesie cięcia plazmą, uzależnione są przede wszystkim od właściwości plazmotwórczych gazów roboczych. Azot, argon, tlen i wodór, to cztery głównie stosowane gazy, występujące pojedynczo lub w postaci ich połączenia (tabela 4). Stosowanie azotu, tlenu, wodoru i powietrza wpływa na zwiększenie skuteczności nagrzewania materiału. Najczęściej wykorzystywanym gazem w palnikach plazmowych jest azot. W przypadku bardzo cienkiej lub bardzo grubej blachy prostopadłość krawędzi ulega pogorszeniu, choć ilość żużlu może być znikoma. Można ciąć plazmowo wieloma palnikami na raz, choć dodatkowe koszty zazwyczaj ograniczają ich liczbę do dwóch.

Tab. 3. Charakterystyka głównych odmian cięcia plazmowego (Höpf, 1986)

Element charakterystyki		Odmiana cięcia plazmowego			
		Mieszkanką argonowo-wodorową lub argonowo-azotową	Powietrzem	W osłonie gazowej lub wodnej	Z wtryskiem wody
Gaz roboczy		Ar, H ₂ , N ₂	Sprężone powietrze	Gaz roboczy N ₂ Gaz ochronny CO ₂ woda	N ₂
Elektroda	Kształt	Elektroda ostrzowa	Elektroda powierzchniowa (płaska)		
	Materiał	Wolfram (z domieszką toru)	Stop hafnu lub cyrkonu	Miedź z wkładką wolframową	
Sposób chłodzenia dyszy		Pośredni	Bezpośredni		
Zasadnicze cechy		<ul style="list-style-type: none"> - niewielkie właściwe zużycie energii - prosta budowa palnika gazowego - moc cięcia od 10 do 100 kW - niecelowe dla stali miękkich 	<ul style="list-style-type: none"> - moc cięcia ograniczona do 30 kW - celowe dla stali miękkich - niskie koszty gazu roboczego - nieodzwonne urządzenia odciągowe 	<ul style="list-style-type: none"> - wymagana większa moc - skomplikowana budowa palnika 	<ul style="list-style-type: none"> - wymagana większa moc - celowe dla niestopowych lub niskostopowych stali - korzystniejsze dla obsługi i otoczenia

Tab. 4. Właściwości gazów plazmotwórczych (<http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl>, 2020)

Materiał	Grubość	Gaz tnący	Gaz pomocniczy	Uwagi
Stal niestopowa i niskostopowa	0,5-80 mm	Czysty tlen	Czysty tlen lub tlen/azot lub tlen/powietrze lub czysty azot	Tolerancja prostokątności do 25 mm, podobnie do lasera; gładka powierzchnia cięcia; brak osadów żużlu do grubości 40 mm; rozwiązanie opłacalne do grubości 50 mm
	80-160 mm	Argon/wodór	Czysty azot lub azot/wodór	Gładka powierzchnia cięcia; możliwe powstawanie żużlu
Stal wysokostopowa CrNi	1,0-6,0 mm	Czysty azot lub azot/wodór	Czysty azot lub azot/wodór	Mała tolerancja prostopadłości; gładkie krawędzie bez żużlu (w stali X5CrNi18-10)
	5-160 mm	Argon/wodór/azot lub argon/wodór	Czysty azot lub azot/wodór	Mała tolerancja prostopadłości; gładkie powierzchnie cięcia; brak osadów żużlu do grubości (w stali X5CrNi18-10)
Aluminium	1,0-6,0 mm	Powietrze	Czysty azot lub azot/wodór	Niemal idealne pionowe cięcie; cięcie bez osadów żużlu (AlMg ₃), ale z niewielkim nawisem od spodu; nierówności większe niż w przypadku stali
	5,0-160 mm	Argon/wodór/azot lub argon/wodór	Czysty azot lub azot/wodór	Niemal idealne pionowe cięcie; podłużny nawis od spodu (do 20mm), powstawanie niewielkich osadów żużlu (powyżej 20 mm), nierówności większe niż w przypadku stali

Z punktu widzenia przepisów o bezpieczeństwie i higienie pracy, emisje promieniowania elektromagnetycznego są także czynnikiem środowiskowym powodującym narażenia personelu obsługującego urządzenia. Palniki plazmowe (plazmotrony), podobnie jak wszystkie inne urządzenia elektryczne, powinny spełniać wymagania kompatybilności elektromagnetycznej, czyli nie wytwarzać szkodliwych pól elektromagnetycznych mogących zakłócić pracę innych urządzeń, oraz powinny być odporne na zakłócenia pochodzące od obcych pól elektromagnetycznych (Pakos, 2012).

Można wyróżnić trzy różne rodzaje zjawisk świetlnych występujących podczas przepływu prądu w plazmie (Szałatkiewicz, 2010; Stryczewska, 2009):

- tzw. prąd czarny, który nie emituje światła widzialnego, charakterystyczny dla prądów o małym natężeniu;
- świecenie jarzeniowe, spowodowane przepływem prądów o większym natężeniu;
- łuk elektryczny, powstający podczas przepływu dużych prądów.

Geometria powierzchni po cięciu plazmowym jest strukturą praktycznie nieobrobioną i w większości zastosowań będzie wymagała dalszej obróbki. Są to zazwyczaj powierzchnie anizotropowe mieszane.

2.1.4. Cięcie ultradźwiękami w próżni

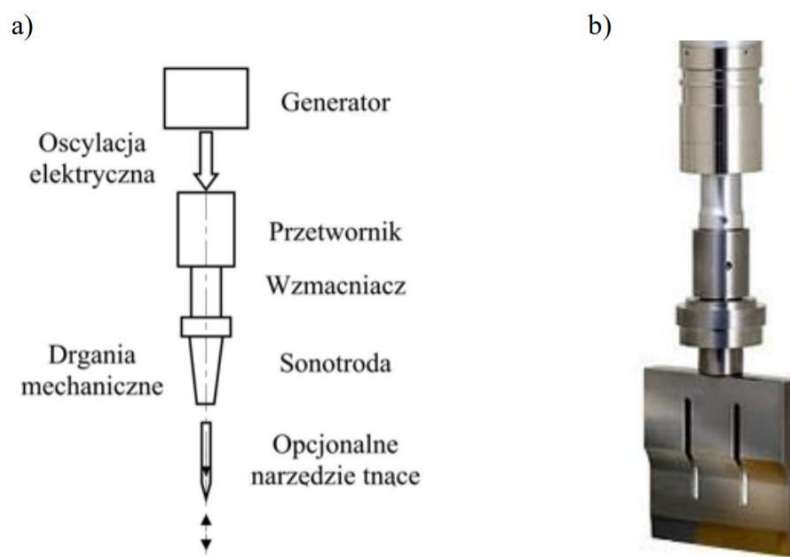
Ultradźwięki to fale sprężyste o częstotliwościach niesłyszalnych dla człowieka. Ze względu na specyfikę oddziaływań z materią znajdują szerokie zastosowanie w technice, przemyśle i medycynie. Dzieli się je na biernie i czynne ze względu na działanie ultradźwięków na środowisko, w którym się rozchodzą. Spośród biernych zastosowań jako najważniejsze wymienia się defektoskopię ultradźwiękową, hydrolokację oraz niezwykle istotną we współczesnej medycynie diagnostykę ultradźwiękową. Biernie zastosowanie polega na wytwarzaniu i detekcji fal ultradźwiękowych o takich natężeniach, które nie niszczą struktury badanego ośrodka (Miłowska, 2007).

Jednym z mechanizmów działania ultradźwięków jest mechanizm termiczny, gdyż energia akustyczna pochłaniana przez materię przekształcana jest w ciepło. Efekt termiczny jest zależny od absorpcji i rozpraszania energii ultradźwiękowej. Poza działaniem termicznym przechodzenie fali ultradźwiękowej wywołuje wiele działań nietermicznych, które można sklasyfikować jako kawitacyjne i naprężenia struktury materiału (Natori, 2004).

W procesie oddziaływania ultradźwięków z materią część energii zostaje zaabsorbowana i ulega przekształceniu w ciepło. Przyrost temperatury będący wynikiem tego procesu zależy od ilości zaabsorbowanej energii (natężenie i częstotliwość ultradźwięków), od ciepła

właściwego ośrodka oraz od równowagi dynamicznej między gromadzeniem a oddawaniem ciepła (Barnett, 2001).

Do cięcia ultradźwiękami wykorzystuje się ostrza zaprezentowane na schemacie zamieszczonym na rysunku 18, które w trakcie cięcia wibrują z częstotliwością 20 kHz (lub wyższą).



Rys. 18. Cięcie ultradźwiękowe: a) schemat układu tnącego; b) przykładowy nóż (Kosmowski i Dowgiałło, 2016)

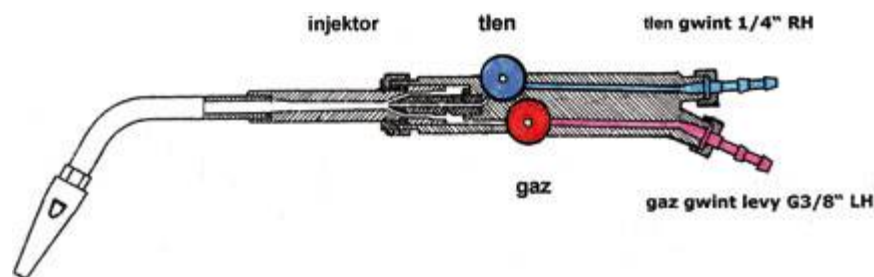
Systemy cięcia ultradźwiękowego składają się z łańcucha elementów przedstawionych na rysunku 18, które generują i propagują ultradźwiękowe wibracje do strefy separacji. Typowy ultradźwiękowy system cięcia tworzą cztery zespoły (Schneider i inni, 2011): zasilacz, przetwornik, wzmacniacz i narzędzie tnące. Zasilacz soniczny (generator) generuje prąd o częstotliwości ultradźwiękowej (zazwyczaj w zakresie 20-50 kHz). Przetwornik ultradźwiękowy jest elektromechanicznym urządzeniem, które przekształca energię elektryczną o wysokiej częstotliwości na drgania mechaniczne (przetwornik piezoelektryczny). Wzmacniacz (jednostka sprzęgająca) przenosi wibracje mechaniczne w postaci fali dźwiękowej na sonotrodę, zwiększa lub obniża amplitudę mechanicznego ruchu narzędzia (w zależności od układu mas na każdym końcu). Sonotroda działa jak mechaniczny rezonator, który wibruje głównie wzdłuż osi drgań. Narzędzie tnące jest urządzeniem, które wykonuje rzeczywiste cięcie.

Wartość siły cięcia zależy od parametrów przetwarzania, takich jak geometria cięcia, prędkość cięcia, kierunek, częstotliwość i amplituda wibracji, a także od właściwości materiału, takich jak mikrostruktura czy wrażliwość na temperaturę. Na przykład Wang i inni, 2002 wykazali, że siły cięcia kruchych materiałów są odwrotnie proporcjonalne do czasu kontaktu

narzędzia tnącego z materiałem. Charakterystyczne dla cięcia ultradźwiękowego jest to, że siła cięcia rośnie wraz z upływem czasu, podobnie jak podczas cięcia gilotynowego, jednak tylko do momentu niewielkiego zagłębienia się noża w materiał. Jej dalsze zwiększanie następuje w niewielkim stopniu lub siła pozostaje na niezmiennym poziomie. Do zalet cięcia ultradźwiękowego należy doskonała powierzchnia cięcia, zmniejszone deformacje, mniejsza tendencja do rozbicia (kruszenia), niewielkie rozmazywianie. Szczególną zaletą jest możliwość wycinania cienkich plastrów.

2.1.5. Cięcie tlenowo-gazowe

Cięcie tlenowo-gazowe jest bardzo popularną metodą rozdzielania metali, zwłaszcza cięcia stali niskowęglowych i niskostopowych. Proces cięcia gazowego polega doprowadzeniu materiału do tzw. temperatury zapłonu, a następnie spaleni i wydmuchaniu płynnych tlenków metalu za pomocą strumienia tlenowego pod dużym ciśnieniem. Metoda jest skuteczna dzięki konstrukcji stosowanego w niej palnika przedstawionego na rysunku 19, który wydmuchuje tlen, wcześniej mieszając go w odpowiedniej proporcji z gazem palnym.



Rys. 19. Palnik do cięcia metodą tlenowo-gazową (www.dachy.info.pl, 2021)

Gazem palnym, który służy do podgrzania może być acetylen lub propan-butan. Używanie acetylenu jest dużo korzystniejsze, gdy podczas pracy występują częste przerwy pomiędzy cięciami. Pozwala to dużo szybciej osiągnąć nagrzanie materiału do wysokiej temperatury, co wiąże się z oszczędnościami w zużyciu gazu. Z kolei propan ma niższą cenę rynkową, nagrzewa natomiast materiał około trzy razy dłużej, w związku z tym wykorzystuje się go przy cięciu dłuższych odcinków, z rzadkimi przerwami podczas pracy, co najczęściej występuje przy cięciu zautomatyzowanym (Klimpel, 1999).

Nie wszystkie metale mogą być cięte tą metodą z uwagi na dwa podstawowe warunki: zapłon materiału musi odbywać się w temperaturze niższej niż wynosi jego temperatura topnienia, natomiast topnienie powstających tlenków w temperaturze niższej niż zapłon. Metalami, które spełniają powyższe warunki jest żelazo, tytan oraz wolfram, jednak w praktyce cięcie tlenem jest używane głównie do stopów żelaza, a dokładnie stali niskostopowych

i niskowęglowych, ponieważ podwyższone ilości materiałów dodatkowych w stali znacząco utrudniają cięcie (Klimpel, 1999).

Cięcie metodą tlenową pozwala na rozdzielenie stali o grubościach dochodzących nawet do 300 mm, jednak ze względu na znaczny obszar strefy wpływu ciepła praktycznie niemożliwe jest rozdzielanie cienkiej blachy poniżej 3 mm. Wpływ na grubość cięcia ma dobór palnika, które dzielą się na uniwersalne (do spawania i cięcia) oraz przeznaczone wyłącznie do cięcia (mogą wydmuchiwac tlen pod wyższym ciśnieniem).

Zestaw jednobutlowy acetylenowy musi posiadać zabezpieczenie, jeśli nie używa się z nim palnika inżektorowego. Reduktor pokazany na rysunku 20, pełni również rolę zaworu zwrotnego zapobiegającego cofaniu się gazu do butli.



Rys. 20. Reduktor umieszczony na butli z gazem (www.dachy.info.pl, 2021)

Zalety cięcia tlenowo-gazowego:

- bardzo duży zakres grubości cięcia,
- dobra jakość cięcia grubszych materiałów,
- prostopadłe krawędzie cięcia,
- możliwość zautomatyzowania,
- możliwość cięcia pod różnymi kątami.

Wady cięcia tlenowo-gazowego:

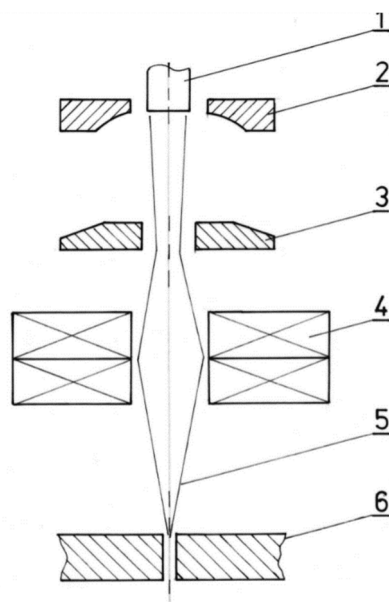
- duża strefa wpływu ciepła,
- brak możliwości cięcia stali wysokostopowych i o wysokiej zawartości węgla,
- wydłużony czas przebiccia przez materiał,
- wąski zakres ciętych materiałów,

– mała prędkość cięcia.

Cięcie gazowe znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie istnieje potrzeba cięcia grubszych materiałów wykonanych ze stali węglowej. Ze względu na niskie koszty sprzętu oraz eksploatacyjne, a zarazem duże możliwości, zakres stosowania tej metody jest bardzo szeroki i swoim zasięgiem obejmuje zarówno prace przydomowe, warsztaty jak i duże przedsiębiorstwa.

2.1.6. Cięcie strumieniem elektronów

Wiązka elektronów została po raz pierwszy wykorzystana do topienia stali w 1910 r. Stwierdzono wówczas, że przy bardzo wysokim napięciu przyspieszającym można nadać elektronom niemal nieograniczoną energię kinetyczną. W tym przypadku elektronom nadaje się bardzo dużą prędkość za pomocą specjalnie skonstruowanego działa elektronowego. Wykorzystuje się w nim soczewki magnetyczne rozpędzające elektrony do 200 000 km/s. Same elektrony okazały się natomiast tak małe, że przy uderzeniu w dowolną przeszkodę oddają jej energię na bardzo małej powierzchni, nagrzewając ją w bardzo krótkim czasie. Sterowanie wiązką jest stosunkowo proste, dzięki zastosowaniu soczewek magnetycznych. Schemat budowy drążarki elektronowej przedstawiono na rysunku 21 (Klimpel, 1997).



Rys. 21. Schemat drążarki elektronowej: 1 – katoda, 2 – elektroda sterująca, 3 – anoda, 4 – soczewki elektromagnetyczne (ogniskujące i sterujące), 5 – wiązka elektronów, 6 – materiał cięty (www.e-autonaprawa.pl, 2021)

Generowana wiązka ma dwie wady. Jedną nich są elektrony oddające energię każdej napotkanej przeszkodzie, np. atomom gazu. Dlatego też wiązka elektronów zachowuje swą energię jedynie w próżni i cięcie z jej użyciem powinno odbywać się w komorach próżniowych.

Drugą wadą są hamowane elektrony wyzwalające kwanty promieniowania przenikliwego, zwanego promieniowaniem X lub rentgenowskim. Dlatego obszary obróbki wiązką należy ekranować dla ochrony personelu (Klimpel, 1997).

Proces wykorzystuje się bardzo rzadko do wysoce wyspecjalizowanych produktów i produkcji seryjnej. Wynika to z konieczności utrzymania próżni w komorze. Sama technologia jest droga, ale pozwala uzyskać dużą dokładność. W praktyce cięcie wiązką elektronów bywa stosowane do kształtowania precyzyjnych elementów z cienkich blach, np. do produkcji elementów lamp elektronowych o dużej mocy. Znacznie częściej wiązki elektronów używa się do drążenia precyzyjnych otworów o małej średnicy.

2.1.7. Analiza porównawcza metod cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii

Wraz z rozwojem technologii cięcia coraz większe znaczenie mają właściwości powierzchni ciętej na późniejszą obróbkę kształtową i wykończeniową. Jakość obróbki w metodach cięcia charakteryzuje się następującymi wskaźnikami: zmianą właściwości materiału, odkształceniem krawędzi cięcia, właściwościami powierzchni cięcia i geometrią kanału cięcia. Stosowanie różnych procesów cięcia wpływa w różnym stopniu na późniejszy sposób obróbki. W tym kontekście, głównym celem jest znalezienie najszybszej, najtańszej i najwyższej jakości metody, która pozwala na uzyskanie jak najmniejszej deformacji na krawędzi cięcia i w jej pobliżu. W wielu przypadkach jedno lub więcej z tych kryteriów może zostać pominięte. Pomimo ciągłej ewolucji metod cięcia od ponad stulecia, pewne ograniczenia sprawiają, że poszukiwanie nowych metod jest nieuniknione. Jakość procesu cięcia wykonywanego dowolną metodą można określić mierząc niektóre właściwości, takie jak: chropowatość powierzchni, dokładność wymiarowa, płaskość i prostopadłość w odniesieniu do błędów geometrycznych. Parametry te muszą być brane pod uwagę przy porównywaniu powierzchni cięcia uzyskanych różnymi metodami (Akkurt, 2009).

Warto zwrócić uwagę na różnice pomiędzy cięciem strumieniem fotonów, strumieniem wody czy plazmą. Zjawiska podczas szybkiego przejścia gęstego strumienia energii, takiego jak plazma, są różne od zjawisk podczas szybkiego przejścia wysokoenergetycznych impulsów lasera, chociaż obie metody nazywane są „termicznymi”. Cięcie plazmowe to przede wszystkim klasycznie rozumiane oddziaływanie termiczne (promieniowanie, konwekcja) i kinetyczne. Natomiast wpływ wiązki fotonów przy braku masy spoczynkowej jest odmienny od oddziaływania strumienia jonów, gdzie zachodzi oddziaływanie kinetyczne i chemiczne gazów w zachodzących reakcjach (Zaborski i inni, 2017).

Zasadnicze różnice w podstawach procesu cięcia strugą wodno-ścierną, strumieniem fotonów oraz plazmą należy w praktyce przemysłowej przełożyć na wnioski stosowalne w technice. Analiza przemian zachodzących w strukturze stali pozwala wnioskować o różnych przebiegach rozpraszania energii podczas cięcia technikami wodnymi, laserowymi i plazmowymi. W ramach projektowania technologii wykonania elementu wiodącymi parametrami jest nie tylko estetyka elementu, ale też szybkość wykonania oraz energochłonność i czasochłonność. Niezwykle ważne jest rozpoznanie powstałych naprężeń własnych w materiale, przemian fazowych czy też zmian twardości na linii rozdziału materiału. W całym szeregu parametrów, cięcie strumieniem fotonów w szeroko rozumianym przemyśle metalowym i maszynowym jest efektywniejsze od plazmowego i gazowego, a tym bardziej od metod konwencjonalnych.

Liczne cechy przyczyniły się do powodzenia laserów w przemyśle, najistotniejsze to (Zaborski i Stechnij, 2011):

- powtarzalność ustawień lasera a tym samym gotowych elementów, podatność na zautomatyzowanie, sterowalność;
- umiarkowany hałas, umiarkowane ilości czynników szkodliwych dla człowieka (pyłów, promieniowania przenikliwego, ryzyka porażenia prądem elektrycznym);
- trwałość narzędzia oraz przewidywalność eksploatacyjna;
- szerokie spektrum zastosowań: cięcie, spawanie, spiekanie, obróbka cieplna;
- niskie straty materiałowe podczas cięcia.

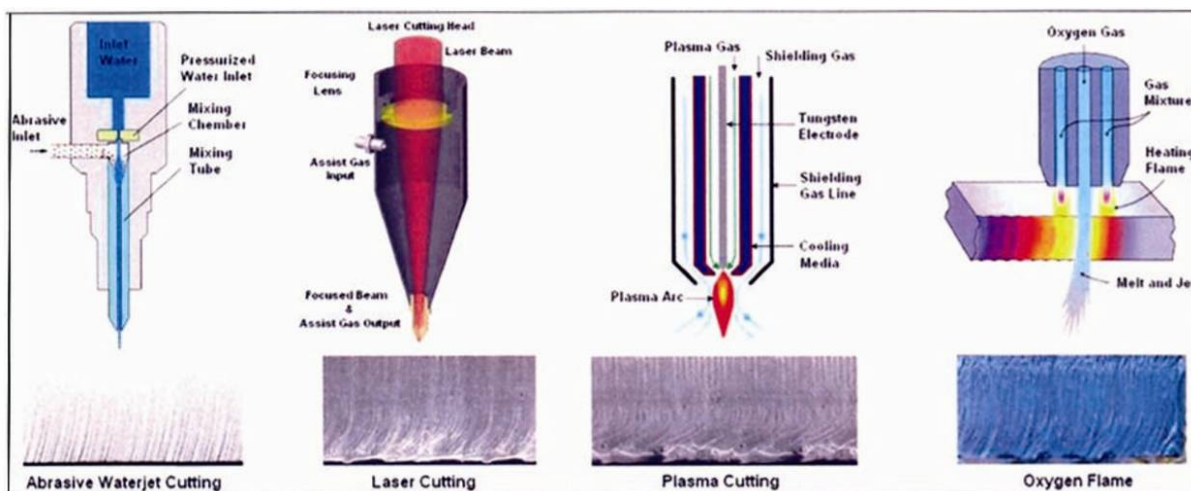
Można zauważyć, że moc niezbędna do przecięcia danej grubości materiału generowana przez urządzenie do cięcia plazmą jest mniejsza od mocy lasera, dla analogicznego przypadku (Stechnij i inni, 2017).

Podsumowując, typowe wymagania dla nowoczesnego cięcia materiałów to (Stechnij i inni, 2017):

- minimalna szerokość szczeliny cięcia,
- odpowiednia szybkość cięcia materiału,
- niewielkie uszkodzenia w objętości struktury krystalicznej,
- zminimalizowane naprężenia mechaniczne,
- zminimalizowane naprężenia cieplne,
- właściwa geometria uzyskiwanych elementów ciętych,
- uzyskiwanie oczekiwanej struktury geometrycznej krawędzi,
- łatwość eksploatacji obrabiarki,

- możliwość odzyskiwania odpadów.

Różnice w powierzchniach cięcia kształtowanych przez strefę przepływu strumienia wody, fotonów czy plazmy przedstawiono na rysunku 22. Zestawienie metod cięcia zaprezentowano w tabeli 5.



Rys. 22. Powierzchnia uzyskana przez strefę przepływu strumienia wody, fotonów czy plazmy (Akkurt, 2009)

Powyższa analiza potwierdza znane fakty związane z obróbką metali. Jednak w praktyce przemysłowej ich znajomość bywa niedoceniana, a proces technologiczny nie zawsze jest świadomie sterowany. Warto zwrócić uwagę na następujące praktyczne wnioski (Zaborski i Stechnij, 2011):

- pomimo, że omówione metody nazywamy termicznymi, różnią się one jednak znacząco, co do zasady emisji oraz transportu energii, zaś obrabiane metale reagują odmiennymi przemianami dla każdej z obróbek;
- chropowatość powierzchni na wejściu laserowej wiązki tnącej w objętość materiału, jest większa niż na wyjściu, im element jest grubszy tym różnica jest większa;
- cięcie plazmowe powoduje większe niż laserowe czy AWJ niekontrolowane ukosowanie. Cięcie laserowe skutkuje natomiast znacznie węższą szczeliną, a zatem mniejszymi stratami materiałowymi;
- ze względu na powstałe mikrostruktury, można wnioskować, że podczas cięcia plazmowego następuje znacznie większe zwiększenie twardości przełomu, niż w przypadku cięcia laserowego czy AWJ;
- cięcie laserowe czy AWJ, oprócz szybkości cięcia oraz dopuszczalnych gabarytów elementów, przewyższa techniki plazmowe w szerokim zakresie charakterystyk.

Tab. 5. Porównanie metod cięcia (<https://www.flowwaterjet.pl>, 2020)

	Struga wodno- -ścierna	Strumień plazmy	Strumień fotonów	Obróbka elektroerozyjna
Proces	Proces erozji: płynny papier ścierny o dużej prędkości	Proces spalania / topienia wykorzystujący zjonizowany łuk gazowy o wysokiej temperaturze	Proces topienia wykorzystujący skoncentrowaną wiązkę światła laserowego	Proces erozji wykorzystujący zjawisko wyładowania elektrycznego
Przetwarzanie wtórne	Zazwyczaj niewymagane. Strumień wody jest procesem cięcia na zimno, który pozostawia satynowo gładkie krawędzie	Zazwyczaj tak. Żużel szlifierski do usuwania SWC (strefa wpływu ciepła) i spłaszczenia, aby wyeliminować zniekształcenia pozostałe na skutek działania ciepła. Stosowany gaz pomocniczy ma wpływ na głębokość SWC.	Czasami tak. Usuwanie utlenionej krawędzi i SWC. Stosowane gazy mają wpływ na głębokość SWC	Zazwyczaj niewymagane. Bardzo płytkie przekazywanie SWC
Materiały	Każdy materiał	Głównie stal, stal nierdzewna i aluminium.	Głównie stal, stal nierdzewna i aluminium. Można również ciąć wiele innych materiałów	Tylko materiały o właściwościach przewodzących
Grubość	Do 600 mm, w zasadzie każdy materiał. Jedynym ograniczeniem grubości jest oś Z	Do 50-80 mm, w zależności od materiału	W zasadzie 25 mm lub mniej, zależności od materiału	Ogólnie, 300 mm lub mniej, w zależności od materiału
Dokładność części	Do 0,025 mm	Do 0,254 mm	Do 0,025 mm	Do 0,003 mm
Inwestycja kapitałowa	\$60 000 do ponad \$300 000	\$60 000 do ponad \$300 000	\$200 000 do ponad \$1 000 000	\$100 000 do ponad \$400 000
Konfiguracja maszyny	Taka sama dla wszystkich prac	Różna dla różnych prac	Różne gazy i parametry dla różnych prac	Różne typy przewodu dla różnych prac

2.2. Definicja jakości

Zwiększająca się świadomość klientów w kwestii jakości wyrobów wymusza na przedsiębiorstwach wytwarzanie jak najlepszych jakościowo produktów. W celu zwiększenia zadowolenia klienta przedsiębiorstwa produkcyjne starają się wykrywać wszelkie niezgodności półproduktów już podczas procesu produkcyjnego. Celem tych czynności jest zmniejszenie

kosztów związanych z ewentualnymi reklamacjami, wyjazdami serwisowymi czy zwrotami (Skalik i inni, 2018).

Rozwój nowoczesnego przemysłu wpływa na nasilenie kształtowania świadomości społeczeństwa dotyczącej jakości produktów. Dokonuje się on w określonych uwarunkowaniach wewnętrznych, a także wynika z otoczenia, które może generować impulsy sprzyjające czy przyspieszające jego rozwój, ale też impulsy wpływające na jego regres. Należy przyjąć, że uwarunkowania te umożliwiają kreowanie odpowiednich postaw przedsiębiorczych człowieka. Umożliwiają także rozwój firm, który nawiązuje do nasilającego się procesu koncentracji kapitału (Zioło, 2009).

Kształtowanie jakości wyrobu na etapie produkcji jest wynikiem szeregu działań tworzących tzw. cykl istnienia produktu. Jakość produktu oznacza bowiem poziom doskonałości produktu oraz jego zdolność do zaspokojenia potrzeb klientów. Jakość produktu finalnego jest uzależniona od wielu czynników, których nie można szeregować pod względem ważności. Do najważniejszych należą: jakość materiałów pośrednich i bezpośrednich, jakość maszyn i urządzeń oraz jakość realizowanej obsługi technicznej (Jasica i Heinrich, 2012).

Pojęciem jakość można określić związek z pewnymi cechami wyrobu lub usługi, które mają wpływ na postrzeganie ich przez klienta. Jest to stopień, w jakim zbiór inherentnych właściwości spełnia stawiane wymagania. Pojęcie *jakość* wywodzi się z czasów starożytnych, z greckiego tłumaczenia słowa *poiotes*. Po raz pierwszy użył je Platon, uznając, że: „*jakość konkretnych rzeczy to stopień osiągniętych przez nie doskonałości*”. Dokładne sformułowanie tego pojęcia jest trudne z uwagi na jego subiektywność. Ocena jakości uzależniona jest między innymi od doświadczenia, wiedzy oraz zapotrzebowania na wyrób. Pojęcie to ulega zmianom na skutek rozwoju ludzkości, produktu i zachodzących przemian jakościowych. Znacząco wpływa na jakość poziom świadomości pracowników, przełożonych oraz stopień wdrożenia koncepcji jakościowych w przedsiębiorstwie. Poziom jakości determinują też klienci. Jakość jest pojęciem wielowymiarowym i interdyscyplinarnym (Bielawa, 2011).

Według W.E. Deminga, jakość jest to „*przewidywany stopień jednorodności i niezawodności, przy możliwie niskich kosztach i dopasowaniu do wymagań rynku*” (Bielawa, 2011).

W ostatnich dekadach jakość stała się źródłem zainteresowania przemysłu. Wraz z rozwojem techniki i technologii uświadomiono sobie, że myślenie jakościowe może służyć do racjonalnego, a zarazem pełniejszego wykorzystania zasobów i możliwości przedsiębiorstwa. Jakość stała się, w związku z tym, jednym z najważniejszych zagadnień we współczesnym zarządzaniu. Jest uważana za najbardziej skuteczne narzędzie w konkurencji

rynkowej i handlu międzynarodowym. Jednak pomimo zauważalnego wzrostu liczby przedsiębiorstw działających zgodnie z polityką pro jakościową, nadal widoczny jest również wzrost znaczenia funkcji jakości, co wskazuje, że jakość nie jest stanem idealnym, lecz obiektywnym celem, do którego należy ciągle podążać (Frąś, 2017).

Jakość kształtowana jest na różnych etapach tworzenia i funkcjonowania wyrobów lub usług, począwszy od identyfikacji potrzeb, a skończywszy na sprawdzeniu czy potrzeby zostały zaspokojone. Na tak rozumiany proces składa się cały szereg wzajemnie powiązanych działań występujących na różnych etapach produkcji wyrobu lub usługi. Taki model współzależności działań określony jest jako pętla jakości (Wolniak, 2015).

System polegający na ustanawianiu polityki i celów jakościowych oraz skoncentrowany na ich realizacji nazywany jest systemem zarządzania jakością. System ten ma a na celu zapewnienie spełnienia wymagań klientów i stałą poprawę jakości produkowanych wyrobów lub świadczonych usług. Umożliwia również prowadzenie skutecznej i efektywnej działalności biznesowej pozwalającej zachować pozycję rynkową oraz dostosować się do zmieniających warunków na rynku. Zarządzanie jakością w organizacji wymaga kontroli procesów produkcyjnych w celu identyfikacji występujących w tych procesach wad i takiej poprawy procesu produkcyjnego, aby wyeliminować nie tylko same wady, ale także ich przyczyny. Jednym z często wykorzystywanych w tym celu sposobów jest ustalenie w przedsiębiorstwie tak zwanych punktów kontrolnych, w których będzie kontrolowany poziom jakości produktu i mierzone jego różne parametry (Wolniak, 2015).

Podjęcie procesowe stosowane podczas opracowywania, wdrażania i doskonalenia systemu zarządzania jakością usprawnia obieg informacji i dokumentów w instytucji oraz wprowadza dokładny podział zadań, uprawnień i odpowiedzialności dla wszystkich pracowników. Organizacja uzyskuje także efekt zwiększenia zadowolenia klientów poprzez dokładne spełnienie ich wymagań i oczekiwań.

Systemy zarządzania jakością stanowią podstawę do wdrażania kolejnych systemów zarządzania, takich jak zarządzanie środowiskowe lub zarządzanie BHP – takie systemy są wtedy zintegrowanymi systemami zarządzania (Grudowski i Kałużna, 2018).

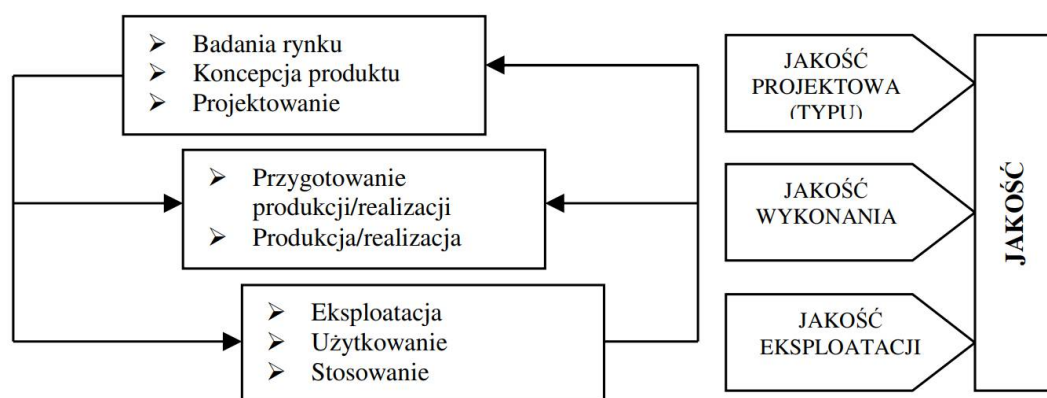
Doskonalenie procesów produkcyjnych jest podstawą konkurencyjności na rynku. Przedsiębiorstwo, które ponosi niższe koszty związane z reklamacjami czy zwrotami wyrobu od klienta jest w stanie zainwestować w nowoczesną linię produkcyjną czy szkolenia pracownicze. Elementy te stanowią istotne czynniki wpływające na poprawę jakości wyrobów gotowych oferowanych przez przedsiębiorstwo (Skalik, 2018).

Obecnie świat znajduje się w fazie przechodzenia do czwartej rewolucji przemysłowej, określanej jako Industry 4.0. Duża liczba przedsiębiorstw nie jest jeszcze gotowa na przeprowadzanie radykalnych zmian, lecz niektóre z nich skutecznie wdrażają rozwiązania techniczne. Warto zauważyć, że rola jakości technologicznej jest niezmiernie ważna dla rozwoju współczesnej techniki. Charakterystyczną cechą czasów obecnych jest zanikanie bariery pomiędzy ludźmi i maszynami. Innymi słowy dominuje integracja ludzi oraz maszyn sterowanych cyfrowo. Często nawet człowiek tylko nastawia maszyny i kontroluje jakość wyrobu przez nie wykonanego (Palka i Stecuła, 2018).

2.3. Klasyfikacja jakości

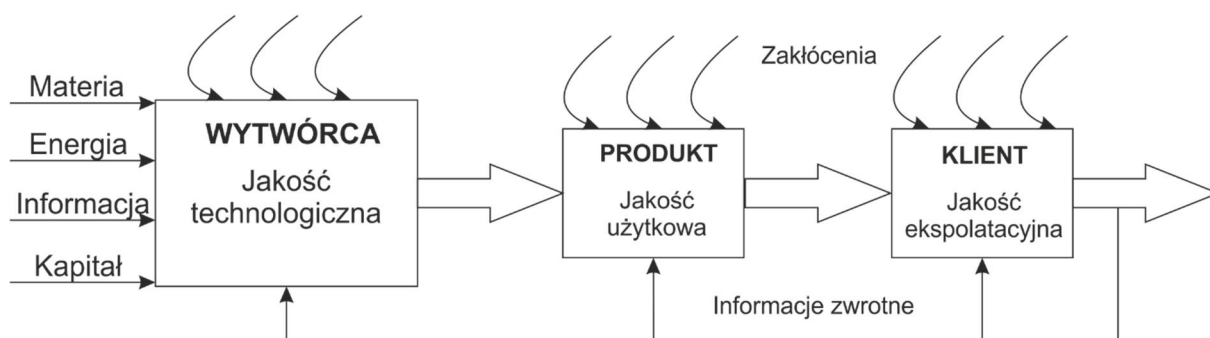
Analizując literaturę nie natrafiono na jednoznaczną klasyfikację jakości. Znalezione natomiast wiele źródeł, w których zaproponowano klasyfikację jakości ze względu na potrzeby danej im dziedziny.

Z rysunku 23 wynika, że każda organizacja musi uwzględnić znaczenie wszystkich faz budowania jakości, a szczególną uwagę zwrócić na procesy poprzedzające bezpośrednią produkcję/realizację usług (tzn. ustalenie wymagań, zawarcie umowy, planowanie realizacji) – tworzące tzw. jakość typu (Materiały Wielkopolskiej Izby Rzemieślniczej, 2018).



Rys. 23. Budowanie jakości (Materiały Wielkopolskiej Izby Rzemieślniczej, 2018)

Z kolei Gawlik i współautorzy (2013) wyróżnili również jakość technologiczną, użytkową oraz eksploatacyjną produktu. Jakość technologiczna kształtowana jest w operacjach technologicznych. Jakość użytkowa jest niezmiernie ważna w wyrobach o złożonej konstrukcji, gdzie znaczną rolę odgrywają procesy montażowe. Natomiast jakość eksploatacyjna jest miarą satysfakcji, jakiej doznaje użytkownik lub klient w związku z posiadaniem i użytkowaniem danego produktu, co pokazano na rysunku 24.



Rys. 24. Kształtowanie jakości produktu w procesie wytwarzania i eksploatacji (Gawlik i inni, 2013)

Jakość serwisowa natomiast to możliwość zachowania wszystkich cech produktu w stanie zapewniającym pełną jego użyteczność w dłuższym czasie. D.A. Garvin, uwzględniając wielowymiarowość jakości, wyodrębnił pięć wymiarów, w których może być rozpatrywana (Bielawa, 2011):

- jakość bezwzględna (doskonałość produktu od momentu gotowości do użytkowania) to stan doskonałości pozwalający rozróżnić poziomy jakości; jest osiągnięciem najwyższych standardów w przeciwieństwie do bycia zadowolonym z czegoś niechlujnego lub nieuczciwego,
- jakość odnosząca się do produktu, a dokładniej do sumy ocenionych atrybutów produktu; jest to więc zmienna mierzalna i precyzyjna,
- jakość odnosząca się do wytwarzania jest rozumiana jako stopień, w jakim określony produkt spełnia projekt albo specyfikację jako zgodność z wymaganiami sformułowanymi podczas projektowania produktu,
- jakość odnosząca się do użytkownika opierająca się na subiektywnej ocenie konsumenta przydatności do użytkowania wyrobu (zdolność użytkowania), własność charakteryzująca przydatność wyrobu do sprawnego spełniania funkcji oczekiwanych ze strony użytkowników,
- jakość odnosząca się do wartości to stopień doskonałości przy akceptowalnej cenie i sterowanie zmiennością przy akceptowalnym koszcie; jakość jest więc tym, co powoduje zmiany w wymaganiach klienta, przy akceptowalnym poziomie ceny lub koszcie nabycia czy użytkowania wyrobu.

Kolejną podstawową klasyfikację jakości wprowadził Kisielnicki (2005). Można wyróżnić następujące podstawowe rodzaje jakości:

- jakość wyrobu, którą określa się przez to w jaki sposób wyrób spełnia wymagania odbiorcy,

- jakość odnosząca się do wzorca, wyraża poziom technicznego rozwiązania wyrobu, gdzie wzorzec jest wynikiem poziomu wiedzy wykorzystywanej do przygotowania produkcji i wykonania wyrobów,
- jakość wykonania, która z kolei określana jest jako stopień zgodności wartości cech wyrobu z cechami określonymi w dokumentacjach i warunkach odbioru.

Wynika stąd więc, że jakość wyrobu jest wypadkową jakości wyrobu, typu i jakości wykonania. Kontrola jakości nazywana niekiedy jest kontrolą techniczną polegającą na sprawdzeniu zgodności wykonania wyrobu z przewidzianymi dla niego wymaganiami.

Kontrola może mieć następującą formę (Kisielnicki, 2005):

- bierna – kiedy dotyczy gotowych wyrobów i polega na eliminowaniu niezgodnych produktów,
- czynna – obejmuje całokształt procesu wykonania, w trakcie jej trwania następuje identyfikacja źródeł błędów,
- całkowita – gdy kontroli jakości podlegają wszystkie wytworzone wyroby. Jest to metoda kosztowna, ale najpewniejsza; nie może być zastosowana wszędzie, przykładem jest kontrola jakości zapalek lub żarówek,
- częściowa (wrywkowa) – gdy sprawdza się określoną liczbę produktów wybranych według określonego algorytmu, najczęściej losowego. Metoda ta często nosi nazwę statystycznej kontroli jakości. W zasadzie statystyczna kontrola jakości jest to wariant kontroli wrywkowej, której przebieg ustala się na podstawie danych statystycznych i rachunku prawdopodobieństwa.

2.4. Jakość technologiczna

Jakość technologiczna powierzchni elementów określana jest przez własności materiału, dokładność wymiarową oraz własności warstwy wierzchniej. Jest charakteryzowana za pomocą parametrów określających dokładność wymiarową oraz parametrów warstwy wierzchniej co ukazuje rysunek 25. Jakość użytkowa natomiast zależy od jakości technologicznej oraz warunków eksploatacji. Wyrób przekazany do klienta jest eksploatowany w różnorodnych warunkach i wówczas ujawnia się jego jakość eksploatacyjna (Adamczak, 2008).



Rys. 25. Czynniki wpływające na jakość technologiczną wyrobu (Kowalczyk, 2015)

Do czynników kształtujących stan warstwy wierzchniej należą (Gawlik i inni, 2013):

- technologiczne parametry skrawania (posuw, prędkość, głębokość, skrawania);
- ostrze narzędzia (geometria, stopień zużycia, materiał powierzchni roboczych ostrza);
- cechy fizyczne i chemiczne obrabianego materiału;
- właściwości ośrodka technologicznego obróbki.

Intensywność oddziaływania tych czynników zależy od zastosowanej metody i sposobu (rodzaju) obróbki. Jakość technologiczna wyrobu zmienia się w miarę stosowania kolejnych operacji technologicznych od operacji obróbki wstępnej, poprzez obróbkę kształtującą do operacji obróbki wykończeniowej (Gawlik i inni, 2013).

Odnosząc się do cięcia strugą wodno-ścierną warto zauważyć, że kluczowym parametrem wpływającym na jakość technologiczną powierzchni po cięciu AWJ są właściwości ścierniwa. Sklasyfikowano je według poniższej kategorii (Hashish, 1991):

- rodzaj ścierniwa,
- wymiary ziaren ściernych,
- kształt ziaren ściernych
- wydatek masowy ścierniwa.

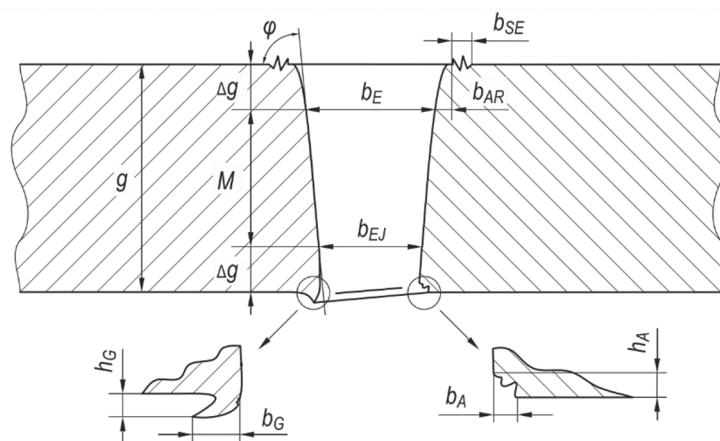
Poznanie wpływu poszczególnych właściwości ścierniwa na jakość otrzymywanych powierzchni przecięcia pozwala na opracowanie warunków procesu przecinania z uwagi na kryteria efektywności procesu oraz jakości przecinanej powierzchni badanego materiału, ocenianej na podstawie parametrów struktury geometrycznej powierzchni jak i dokładności

wymiarowo-kształtowej. Poszukuje się parametrów zadowalających stąd ważną zależnością jest im wyższa jakość cięcia tym wyższe koszty, które powinno się ograniczać. Mając na uwadze duży udział kosztów ścierniwa warto jest dobrać odpowiednio wymiar ziaren ściernych oraz wydatek masowy ścierniwa dla konkretnej operacji technologicznej. Ważne jest również, aby w procesie przecinania zminimalizować nadwyżki technologiczne, co również korzystnie wpłynie na jakość technologiczną cięcia (Hlavac i inni, 2015).

Dokonując oceny jakości technologicznej elementu wyciętego strugą wodno-ścierną, można posłużyć się wskaźnikami jakości kształtu szczeliny przecięcia. Do najważniejszych z nich należą (Sutowska, 2011):

- szerokość szczeliny przecięcia b_E ,
- lokalna szerokość szczeliny przecięcia b_{EJ} ,
- szerokość strefy uszkodzeń wtórnych b_{SE} ,
- szerokość zaokrąglenia w strefie wejścia strugi b_{AR} ,
- wysokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi h_G ,
- szerokość gratu obróbkowego w strefie wypływu strugi b_G ,
- wysokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi h_A ,
- szerokość ubytku materiału w strefie wypływu strugi b_A ,
- pochylenie płaszczyzny przecięcia u ,
- kąt zukosowania powierzchni przecięcia φ .

Postać graficzną wymienionych cech jakościowych szczeliny przecięcia zaprezentowano na rysunku 26.



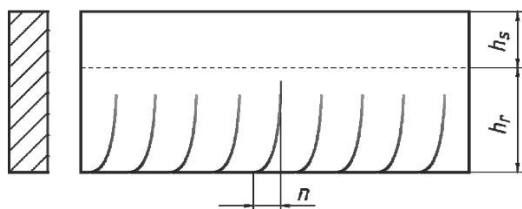
Rys. 26. Wskaźniki jakości kształtu szczeliny przecięcia (Sutowska, 2011)

Skala wskaźników jakości szczeliny przecięcia zależy w znacznej mierze od warunków procesu cięcia. Kształtowanie geometrii szczeliny przecięcia jest procesem ściśle związanym

z ciśnieniem strumienia wody, prędkością posuwu głowicy tnącej oraz rodzajem i grubością materiału obrabianego.

Oceny ukształtowania geometrycznego powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną można dokonać na podstawie wskaźników jakości topografii określonych w wytycznych niemieckiego stowarzyszenia AWT (niem. *Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie*) oraz w niemieckiej normie VDI 2906 (Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie, 1994). Należą do nich przedstawione na rysunku 27 wskaźniki:

- wysokość obszaru podwyższonej jakości cięcia pozbawionego rowków na powierzchni obrobionej h_s ,
- wysokość obszaru obniżonej jakości cięcia z makroskopowymi śladami obróbkowymi na powierzchni obrobionej h_r ,
- zakrzywienie toru wybiegu strugi n .



Rys. 27. Zakrzywienie toru wybiegu strugi (VDI-Richtlinien, 1994)

Proces kształtowania topografii powierzchni charakteryzuje się większą złożonością występujących w nim zjawisk w porównaniu z procesem formowania szczeliny przecięcia. Właściwy dobór technologicznych parametrów procesu cięcia wpływa na wysokość obszarów h_s i h_r oraz intensywność zakrzywienia toru wybiegu strugi n .

Do ilościowej oceny mikrogeometrii powierzchni przecięcia można zastosować parametry chropowatości powierzchni SGP rozpatrywane w układzie 3D (Adamczak, 2005). Parametry te zostały podzielone na pięć grup: parametry amplitudowe, parametry powierzchniowe i objętościowe, parametry przestrzenne, parametry hybrydowe oraz parametry funkcjonalne (Oczoś, 2003). Spośród wymienionych grup wskaźników SGP wyraźny wpływ parametrów procesu cięcia (ciśnienia wody, prędkości posuwu) odnotowano w przypadku parametrów amplitudowych. Wskaźniki te opisują cechy wysokościowe analizowanej nierówności powierzchni charakteryzując zmiany w kierunku normalnym (Białas, 2006). Należą do nich:

- średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni (S_a),
- średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni (S_q),

- całkowita wysokość nierówności powierzchni (St),
- wysokość chropowatości powierzchni wg 10 punktów (Sz),
- głębokość najniższego wgłębienia powierzchni (Sv),
- wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni (Sp).

Dodatkowo do oceny geometrii powierzchni wykorzystuje się współczynnik skośności (Ssk) i skupienia (Sku) (Sutowska, 2011). Ukształtowanie geometryczne powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną wskazuje również na występowanie na nich falistości, której intensywność wzrasta wraz z oddalaniem się od strefy wejścia strugi w materiał (Sutowska, 2011). W celu dokonania ilościowej oceny tego zjawiska, można posłużyć się parametrami określonymi przez polską normę PN-M-04255:1974. Definiuje ona sześć parametrów wysokościowych oraz jeden wzdłużny falistości powierzchni. Parametry wysokościowe są to wskaźniki charakteryzujące nierówności występujące w kierunku prostopadłym do linii średniej profilu falistości (Humienny, 2004). Można je podzielić na dwie zasadnicze grupy parametry opisujące wysokości wzniesień i głębokości wgłębień:

- maksymalna wysokość profilu falistości (Wm),
- maksymalna wysokość wzniesienia profilu falistości (Wp),
- maksymalna głębokość wgłębienia profilu falistości (Wv),
- średnia wysokość falistości (Wc),
- średnie arytmetyczne odchylenie profilu falistości (Wa),
- średnie kwadratowe odchylenie profilu falistości (Wq).

W skład grupy parametrów wzdłużnych falistości powierzchni wchodzi średni odstęp falistości (Swm) i wgłębienie profilu.

Inaczej ocenia się jakość technologiczną powierzchni po cięciu termicznym, w tym przypadku po cięciu strumieniem fotonów. Została do tego wydana norma ISO 9013:2002. Bierze się w niej pod uwagę chropowatość powierzchni oraz tolerancję prostopadłości powierzchni cięcia. Pozostałe parametry geometryczne (wielkość szczeliny cięcia, kąt ukosu, średnica otworu przebicia) traktowane są pomocniczo. W tym przypadku również duże znaczenie ma strefa wpływu ciepła – im większa tym gorzej. W ocenie jakości technologicznej brane są pod uwagę w tym przypadku również (Politowicz, 2010):

- prostopadłość krawędzi,
- wpływ powierzchni cięcia na późniejszą obróbkę,
- jakość cięcia bardzo małych elementów.

O technologicznej jakości cięcia decyduje głównie jakość wiązki laserowej, określona współczynnikiem jakości BPP (ang. *Beam Parameter Product*), który w zależności od rodzaju materiału i grubości ciętego przedmiotu powinien mieścić się w granicach od 0,1 do 5-10. Im mniejsza jest wartość współczynnika jakości wiązki laserowej BPP, tym wyższa jest jakość wiązki laserowej. Dlatego też wiązka laserowa o idealnej jakości, czyli stałej średnicy na całej długości wiązki, ma współczynnik $BPP = 0,0$, ponieważ wtedy jej kąt odchylenia w polu dalekim wynosi $\Theta_o = 0,0^\circ$. Im niższa jest jakość wiązki (większa rozbieżność strumienia światła), tym współczynnik jakości BPP jest większy. W praktyce współczynnik jakości BPP produkowanych obecnie laserów dużej mocy mieści się w granicach od ok. 0,3 do 25 mm·mrad, a wiązkę laserową uznaje się za wiązkę o bardzo wysokiej jakości, gdy $BPP < 5,0$. W przypadku laserów włóknowych i tarczowych osiągnęte są wyniki na poziomie 0,3 mm·mrad (Klimpel, 2011).

Jednym z ważniejszych parametrów określających jakość cięcia jest gładkość powierzchni cięcia (chropowatość). Związana jest ona z wieloma parametrami technologicznymi wybranej metody cięcia. Jakość powierzchni cięcia po obróbce laserowej zależy również od położenia ogniska wiązki laserowej (Mazurkiewicz, 2013).

Powierzchnia po cięciu strumieniem fotonów charakteryzuje się dwiema strefami o zróżnicowanej chropowatości. Parametry Ra , Rz oraz parametry krzywej Abbotta-Firestone'a są około dwukrotnie większe w strefie wyjścia niż wejścia. Następuje poprawa odporności na zużycie ściernie (parametr Rpk) oraz wzrasta tzw. obciążalność powierzchni (parametr Rk). Parametry Ra i Rz w odniesieniu do powierzchni po cięciu laserem zmniejszają swoją wartość około 10-krotnie. Zmianie ulegają także parametry z grupy Rk , które opisują cechy funkcjonalne powierzchni. Parametr Rpk zmniejsza się o ok. 90%, natomiast Rk – o około 92% (Skoczylas i Zalewski, 2016).

Punktem kontrolnym dotyczącym jakości elementów po cięciu są pomiary kształtu elementu, a także odchyłki wymiarowe. Odchyłka prostopadłości i pochylenia jest zdefiniowana jako odległość między dwiema równoległymi prostymi (stycznymi), między które jest wpisany profil powierzchni cięcia. Wszystkie te aspekty powinny być zgodne z dokumentacją przygotowaną przez technologów lub konstruktorów. Wykorzystywane są tutaj taśmy miernicze, suwmiarki oraz kątowniki pomiarowe. Elementy o prawidłowych wymiarach zwalniane są do następnego etapu produkcji. Natomiast kiedy zostanie stwierdzona niezgodność, wypełniany jest *raport niezgodności*, a element oznaczany zostaje żółtą taśmą. Oznacza to zakaz przekazania do kolejnego etapu produkcji. Następnie następuje ponowna kontrola elementu. Jeżeli nie ma zastrzeżeń, taśma zostaje usunięta, a element zostaje

zwolniony do kolejnego etapu. W przypadku, gdy wymiary elementu są mniejsze od wymaganych i nie ma możliwości usunięcia niezgodności, element zostaje oznaczony czerwoną taśmą, co oznacza usunięcie z linii produkcyjnej, Fakt ten zostaje odnotowany w *raporcie niezgodności*, a o dalszym postępowaniu z elementem decyduje kierownik ds. produkcji (Wolniak, 2015).

Kontrola jakości powinna odbywać się podczas realizacji każdego etapu procesu produkcyjnego począwszy od przyjmowania zakupionych materiałów do magazynu. Już na tym etapie warto jest sprawdzić, czy dostarczone materiały są wolne od wad oraz czy spełniają wymagania stawiane przez technologów. Gatunek używanych materiałów bezpośrednio wpływa na jakość ciętego wyrobu gotowego. Punkt kontrolny znajdujący się po zakończeniu procesu cięcia pozwala wstrzymać przed dalszą obróbką element, który nie spełnia założonych wymogów (Wolniak, 2015).

2.5. Wnioski z analizy literatury

W powyższej analizie literatury przedstawiono termin jakości oraz jakości technologicznej, scharakteryzowano metody cięcia wysokoskoncentrowanym strumieniem energii oraz zestawiono opisane metody. Analiza dotyczyła w głównej mierze metod cięcia strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną, które są przedmiotem dalszych analiz, i umożliwiła sformułowanie poniższych wniosków.

1. Przecinanie materiału stanowi zazwyczaj pierwszą operację procesu produkcyjnego w przemyśle metalowym.
2. Dobór metody cięcia jest niezmiernie istotny z punktu widzenia ekonomii, jakości i czasu koniecznego do wykonania operacji cięcia.
3. Przedstawiony stan wiedzy i techniki wskazuje, że spośród metod cięcia wysokoskoncentrowanym strumieniem energii w produkcji przemysłowej najczęściej stosowane jest cięcie strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną.
4. Przecinanie strugą wodno-ścierną jest polega na kształtowaniu materiałów poprzez erozję materiału spowodowaną odrywaniem jego mikrocząstek od podstawowej masy i jest powszechnie stosowaną w budowie maszyn, motoryzacji, lotnictwie, kosmonautyce, a nawet w medycynie.
5. Najważniejszymi zaletami cięcia strugą wodno-ścierną jest brak strefy wpływu ciepła, wysoka czystość powierzchni, bezkontaktowość procesu (brak zużycia narzędzia), duża wydajność procesu, brak konieczności wymiany narzędzi przy zmianach ciętych elementów oraz krótkie czasy przygotowawczo-zakończeniowe.

6. Do najważniejszych ograniczeń cięcia strugą wodno-ścierną należy zaliczyć tendencję do wywoływania na powierzchniach poddawanych działaniu strugi rozwarstwień lub wyraźnego prążkowania (śladów obróbkowych wywołanych przez zakrzywianie strugi wraz z wytracaniem jej energii).
7. Przecinanie laserowe wykorzystuje źródło lasera o dużej mocy, którego wiązka kierowana jest na powierzchnię materiału silnie ją nagrzewając, aż do stopienia lub całkowitego odparowania w asyście gazu towarzyszącego, którego zadaniem jest wydmuchanie ze szczeliny cięcia powstałych produktów (ciekłego i odparowanego materiału).
8. Do zalet cięcia laserowego można zaliczyć: łatwość automatyzacji procesu, szeroki zakres ciętych materiałów, dużą wydajność, wąską szczelinę cięcia i strefę wpływu ciepła, bezkontaktowość procesu (brak zużycia narzędzia), możliwość uzyskania dużej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz dużą elastyczność procesu przy zmianie profilu produkcji (nie jest potrzebna wymiana narzędzi tnących).
9. Istnieje wiele definicji jakości oraz różnych klasyfikacji określających jej rodzaje. Spośród znanych rodzajów jakości jakość technologiczna stanowi obszar bezpośrednio związany z rezultatami operacji technologicznych i może być stosowana do oceny elementów po operacji cięcia.
10. Na wydajność procesu cięcia materiałów wysokoskoncentrowanym strumieniem energii decydujący wpływ wywierają parametry obróbki, które determinują także uzyskiwaną jakość technologiczną.
11. Struktura geometryczna powierzchni jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o jakości technologicznej każdego rodzaju obróbki. Jakość elementów wyciętych daną metodą cięcia ocenia się również określając dokładność wymiarowo-kształtową.
12. Analiza materiałów źródłowych wykazała, że nie ma spójnego systemu oceny jakości technologicznej, który umożliwiłby porównywanie efektów operacji cięcia realizowanych różnymi technikami, w tym w szczególności wysokoskoncentrowanym strumieniem energii, jak. np. cięcie laserowe czy cięcie strugą wodno-ścierną.

3. HIPOTEZA, CELE, PROBLEMY BADAWCZE I ZAKRES PRACY

3.1. Hipoteza pracy

Na podstawie szczegółowej analizy wiedzy i techniki w zakresie wyznaczonym tematem pracy, a także własnych badań i analiz, sformułowano poniższą hipotezę pracy.

Należy przypuszczać, że możliwe jest opracowanie syntetycznego wskaźnika, złożonego ze zbioru parametrów oceny elementów ze stali X5CrNi18-10 kształtowanych wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów, który umożliwi wielokryterialne ilościowe porównanie ich jakości technologicznej, z uwzględnieniem zróżnicowanej geometrii i grubości.

3.2. Cele pracy

Mając na uwadze sformułowaną hipotezę zdefiniowano najważniejsze cele pracy z podziałem na cel poznawczy, utylitarny i metodyczny.

3.2.1. Cel poznawczy

Celem poznawczym pracy doktorskiej jest uzyskanie wiedzy dotyczącej sposobu oceny jakości technologicznej oraz możliwości sterowania jej poziomem w odniesieniu do elementów ze stali X5CrNi18-10 z uwzględnieniem ich zróżnicowanej geometrii i grubości. Planowane w pracy doktorskiej badania i analizy pozwolą na uzyskanie nowej wiedzy dotyczącej opracowywania strategii technologicznych w procesach produkcji elementów ze stali nierdzewnej (w szczególności stali X5CrNi18-10), co ma potencjalnie duże znaczenie aplikacyjne dla przemysłu maszynowego.

3.2.2. Cel utylitarny

Opracowanie wytycznych do zastosowania w praktyce przemysłowej przy wyborze metod cięcia elementów ze stali X5CrNi18-10, które podlegają dalszej obróbce.

3.2.3. Cel metodyczny

Opracowanie metodyki oceny jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10 ukształtowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów.

3.3. Problemy badawcze

Zdefiniowano zbiór problemów badawczych z podziałem na problem główny i problemy szczegółowe.

3.3.1. Główny problem badawczy

W jakim zakresie możliwe jest sterowanie jakością technologiczną powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10 w procesach cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów?

3.3.2. Szczegółowe problemy badawcze

1. Jaki jest stan powierzchni cięcia stali nierdzewnej po cięciu skoncentrowaną strugą wodno-ścierną?
2. Jaki jest stan powierzchni cięcia stali nierdzewnej po cięciu skoncentrowanym strumieniem fotonów?
3. Jaki jest wpływ zmian parametrów procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów, a także kształtu i grubości przedmiotów obrabianych wykonanych ze stali X5CrNi18-10, na jakość technologiczną wytwarzanych komponentów cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych?

3.4. Zakres pracy

W toku realizacji pracy doktorskiej planowana jest wykonanie następujących etapów prac analitycznych i badawczych, stanowiących zakres niniejszej pracy:

- analiza stanu wiedzy i techniki w zakresie wyznaczonym tematem pracy,
- zdefiniowanie problemów badawczych, celu oraz hipotezy badawczej pracy,
- opracowanie charakterystyki wybranych metod cięcia wysokoskoncentrowanym strumieniem energii,
- badania rozpoznawcze procesu cięcia elementów ze stali X5CrNi18-10,
- opracowanie wyników badań rozpoznawczych,
- opracowanie metodyki oceny jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10 ukształtowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów,
- przeprowadzenie właściwych badań doświadczalnych mających na celu określenie możliwości sterowania jakością technologiczną powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10 z uwzględnieniem ich kształtu i grubości,
- sformułowanie wniosków końcowych i określenie kierunków dalszych prac.

4. CHARAKTERYSTYKA NACZEPY DO PRZEWOZU PŁYNNYCH ŚRODKÓW SPOŻYWCZYCH

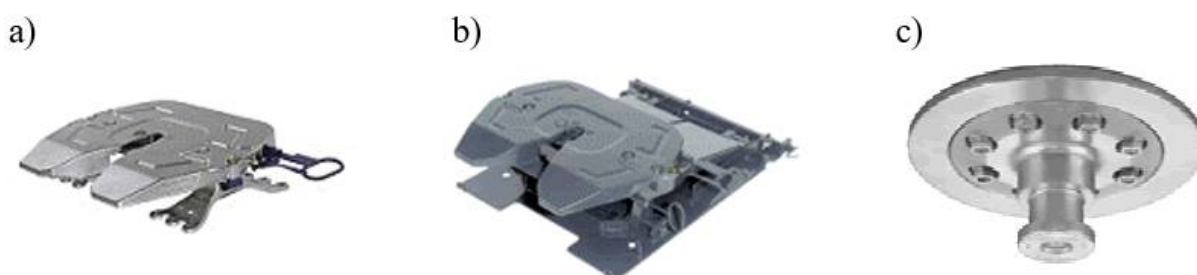
Niniejsza praca powstała we współpracy z producentem zbiorników i cystern ze stali nierdzewnej, przedsiębiorstwem PRO-WAM Sp. z o.o. z siedzibą w Koszalinie przy ul. Zwycięstwa 278. Motywacją do podjęcia prac badawczych przedstawionych w niniejszej rozprawie doktorskiej były problemy dotyczące jakości technologicznej podzespołów wchodzących w skład jednego z kluczowych produktów firmy: naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych. Z tego względu w rozdziale 4. przedstawiono krótką charakterystykę tego typu produktów, opisano najważniejsze układy funkcjonalne naczepy-cysterny oraz wskazano główne problemy w procesie jej wytwarzania związane z operacjami cięcia.

4.1. Charakterystyka naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych

Samochody ciężarowe cysterny to podstawowe środki transportu substancji płynnych w Polsce i zagranicą. Dzięki nim można szybko, sprawnie i co najważniejsze bezpiecznie przewozić różne typy ładunków począwszy od produktów spożywczych np. mleka, a na paliwach i chemikaliach skończywszy. Ze względu na tak dużą różnorodność przewożonych towarów współczesny rynek transportu przewoźniczego obfituje w dużą liczbę typów pojazdów, dzięki którym można przewozić określony typ i ilość ładunku. Między innymi do przewozu wykorzystuje się również naczepy-cysterny. Są one zaprojektowane bez przedniej osi, dzięki czemu ciężar ładunku rozkłada się na dwie lub trzy tylne osie i siodło ciągnika samochodowego (Michalski, 2014).

Zewnętrznie cysterny na przełomie lat zmieniają się nieznacznie. Współczesne pojazdy jednak są produkowane z bardziej trwałych i lżejszych materiałów niż kiedyś. Budowa z lżejszych komponentów ma na celu zwiększanie tzw. masy użytecznej. Dlatego np. w zbiornikach z grodziami wewnętrznymi bardzo często stosowane jest aluminium zamiast tradycyjnej blachy stalowej. Dotyczy to nie tylko części zewnętrznych zbiorników, ale również samego podwozia. Obniżenie masy własnej uzyskuje się również np. poprzez obniżenie masy felg (stosuje się felgi ze stopów lekkich). Mimo znacząco wyższych cen, coraz popularniejsze stają się cysterny z aluminiowym płaszczem zewnętrznym. Naczepa trzyosiowa tego rodzaju może ważyć nawet o tonę mniej od porównywalnej gabarytowo naczepy wykonanej z tradycyjnych materiałów.

Typowa naczepa składa się z ramy nośnej, osi kół jezdnych i ich zawieszenia, nóg podporowych, urządzenia sprzęgającego, instalacji hamulcowej i oświetleniowej oraz zabudowy. Urządzenie sprzęgające ciągnik siodłowy z naczepą składa się z siodła zamocowanego na ramie samochodu oraz sworznia zaczepowego (zwanego królewskim) zamocowanego na naczepie. Do zablokowania sworznia zaczepowego naczepy w siodle ciągnika siodłowego służy mechanizm blokujący, umieszczony pod płytą nośną siodła, co przedstawiono na rysunku 28. Mechanizm blokujący może być całkowicie mechaniczny, mechaniczno-hydrauliczny lub hydrauliczny.



Rys. 28. Elementy urządzenia sprzęgającego ciągnik siodłowy z naczepą: a) i b) siodło, c) sworznień zaczepowy (królewski) (Wojtkiewicz-Lazman, 2007)

Naczepy mogą być wyposażone w aparaturę umożliwiającą bardzo szybkie przepompowanie transportowanego ładunku oraz szereg czujników wskazujących ciśnienie i temperaturę w jej komorach.

Sprawna obsługa transportowa płynnych produktów spożywczych jest trudnym w realizacji zadaniem dla przewoźnika. Nieprawidłowe warunki podczas transportu czy nieodpowiednio przygotowane cysterny mogą być przyczyną obniżenia jakości przewożonych produktów. Ma to swoje konsekwencje nie tylko w postaci ogromnych strat finansowych, ale również może być zagrożeniem dla zdrowia konsumentów (www.mojafirma.infor.pl, 2017).

Zwiększenie jakości produktów spożywczych wywołało również większe oczekiwania dotyczące ich przewozu. Dodatkowo konkurencja na rynku transportowym również pozwoliła producentom żywności na skuteczniejsze wyegzekwowanie oczekiwanego poziomu usług przewozowych. Obecnie transport żywności bezwzględnie musi odbywać się taborem specjalistycznym, odpowiednio przygotowanym pod względem certyfikacyjnym, zapewniania szczelności, poziomu czystości i w kontrolowanej temperaturze.

Aktualnie wymagana jest bardzo szybka reakcja na każdym poziomie procesu transportowego. Dzieje się tak szczególnie w przypadku towarów, które nie mogą zbyt długo pozostawać magazynowane. Warunkiem koniecznym w takich przewozach jest nie tylko terminowość, ale również bardzo krótki czas tranzytu (www.mojafirma.infor.pl, 2017).

Klienci w segmencie spożywczym mają aktualnie większą świadomość roli przewoźnika w całym łańcuchu logistycznym. Przewoźnicy zdają sobie sprawę z tego, że niedokładnie umyty pojazd, bądź zbyt długi czas transportu mogą doprowadzić do zepsucia się przewożonego produktu lub też przestoju w procesie produkcji. Wiąże się to automatycznie z ogromnymi stratami. Na przewoźniku ciąży podwójna odpowiedzialność – odpowiada on bowiem nie tylko za jakość własnych usług, ale za produkt klienta oraz jego markę.

Oprócz krajowych i międzynarodowych uprawnień oraz licencji na przewóz rzeczy i towarów, tego typu transport prawnie reguluje ATP (umowa o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów) oraz konwencja CMR, która reguluje wszystkie kwestie formalno-prawne związane z wykonywaniem międzynarodowego transportu drogowego towarów.

Przepisy zawarte w umowie ATP określają warunki przewozu produktów spożywczych oraz wymagania dotyczące kontroli nadwozi. Umowa ATP określa m.in. warunki oraz temperatury podczas transportu artykułów spożywczych schłodzonych, kwestie kontroli oraz klasyfikacji pojazdów do transportu żywności, metody pomiarów i badań jak i znakowania pojazdów.

Konwencja CMR wprowadza i ujednolica m.in. takie kwestie jak warunki umowy o przewóz drogowy towarów, dokumentację przewozową, odpowiedzialność przewoźnika, tryb skarg i reklamacji czy roszczenia wynikające z przewozu (www.mojafirma.infor.pl, 2017).

Naczepę-cysternę, która stanowi obiekt analiz w niniejszym rozdziale, przedstawiono na rysunku 29.



Rys. 29. Naczepa do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017)

Często pojawia się zapotrzebowanie na naczepę uniwersalną, do przewozu różnych substancji płynnych, co stanowi duże wyzwanie konstrukcyjne. Przeważnie spotyka się naczepy trzykomorowe o pojemności do 34000 litrów. Aby wyprodukować właściwą naczepę, przede wszystkim należy ustalić ciśnienie przewożonego produktu, które głównie zależy od jego temperatury. Ważny jest również sposób rozładunku. W zależności od agresywności substancji przewożonej, dobiera się uszczelnienia złącz, włączów oraz zaworów. Kolejnym kluczowym aspektem, nad którym warto się zastanowić, jest falowanie ładunku. Podczas transportu ładunek płynny przemieszcza się. Jest to niepożądane i niebezpieczne zjawisko szczególnie podczas hamowania i pokonywania zakrętów. Rozwiązaniem konstrukcyjnym eliminującym falowanie jest oddzielanie komór naczepy falochronami, które są wykonane z blachy. Często jednak komory oddzielane są elipsoidalnymi lub toroidalnymi dennicami. Są to elementy wyoblane lub tłoczone na specjalnych prasach. Innym ważnym elementem są wszelkiego rodzaju czujniki informujące kierowcę o ciśnieniu, temperaturze, a ostatnio coraz częściej o pH przewożonego ładunku. Za utrzymywanie temperatury odpowiada również izolacja wykonana metodą natryskową PUR (poliuretan) lub z łupków styropianu. Wspomagana jest przez płaszczy grzewczy zasilany z agregatu grzewczego lub instalacji chłodzenia silnika ciągnika siodłowego. Niezmiernie istotny jest również wygląd naczepy. Poszycie zewnętrzne w większości wykonane jest z blachy nierdzewnej X5CrNi18-10 wyblyszczanej o wykończeniu powierzchni BA lub też z płaszcza GFK (niem. *Glasfaserverstricker Kunststoff* – laminat poliestrowy wzmocniany włóknem szklanym). Z tego samego materiału wykonane też są dennice zewnętrzne. Na zewnętrzną warstwę laminatu nakładany jest żelkot. Jest to barwiony roztwór styrenowy nienasyconego poliestru. Nadaje on estetyczny wygląd, kolor według palety RAL (niem. *Reichsausschuss für Lieferbedingungen*), zapewnia trwałość i odporność na działanie czynników atmosferycznych (woda, promieniowanie UV). Korzystne jest również to, że można go dowolnie malować na przykład kolorami metalicznymi, których nie można uzyskać stosując żelkot, lub też odświeżyć kolor za jakiś czas. Często również zdarza się, że klient życzy sobie, aby oprócz świateł zespolonych na górze tylnej dennicy, dołączyć również logo lub okleić całą naczepę foliami reklamującymi przedsiębiorstwo jak to przedstawiono na rysunku 30.

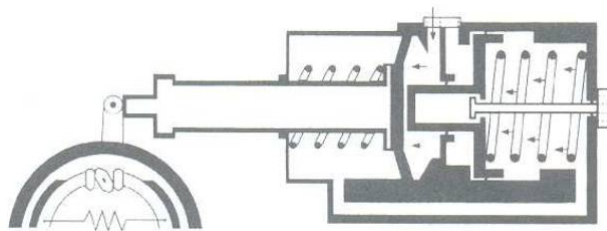


Rys. 30. Przykład możliwości umieszczenia reklam na płaszczu zewnętrznym naczepy do przewozu mleka (Romanowski i Nadolny, 2017)

Na rysunku 30 przedstawiono przykładowy efekt końcowy niestandardowego wykończenia kolorystycznego naczepy trzykomorowej do przewozu mleka wykonanej w przedsiębiorstwie PRO-WAM Sp. z o.o. Najważniejsze jest jednak bezpieczeństwo poruszania się naczepy po drogach. Nad nim czuwa specjalnie zaprojektowane podwozie z układem hamulcowym szybko reagującym na warunki na drodze. System zamontowany w takim układzie to ABS (ang. *Anti-Lock Braking System*). Jest uruchamiany automatycznie poprzez czujniki zamontowane w skrajnych kołach po obydwu stronach naczepy, gdy koła te tracą przyczepność z asfaltem na mokrej nawierzchni lub też suchej przy nagłym hamowaniu.

Stosowane początkowo w samochodach ciężarowych i autobusach hamulce sterowane mechanicznie lub hydraulicznie okazały się niewystarczająco skuteczne dla coraz cięższych i szybszych pojazdów oraz dla ich przyczep i naczep. Z wielu rozwiązań układów hamulcowych obecnie stosuje się w samochodach ciężarowych, autobusach, przyczepach i naczepach głównie pneumatyczne układy hamulcowe. Układy hamulcowe składają się z czterech podstawowych bloków urządzeń: układu zasilania sprężonym powietrzem, układu uruchamiania hamulca głównego (nośnego) działającego na wszystkie koła pojazdu, układu uruchamiania hamulca pomocniczego (postojowego, używanego też jako awaryjny), działającego na niekierowaną oś (lub osie pojazdu) oraz układu uruchamiania hamulców w przyczepie lub naczepie. Do sprężania powietrza stosuje się sprężarki jedno lub dwutłokowe napędzane za pomocą przystawki. Powietrze użytkowane w układzie hamulcowym musi być odpowiednio przygotowane tj. oczyszczone, odwodnione, odolejone oraz musi mieć właściwe

ciśnienie. Sprężone powietrze jest przechowywane w zbiornikach ciśnieniowych łączonych ze sobą równolegle. Dodatkowo przy zbiornikach znajdują się zawory zwrotne uniemożliwiające utratę powietrza ze wszystkich zbiorników w przypadku uszkodzenia jednego z nich. Ze względów bezpieczeństwa hamulce samochodu muszą być zaopatrywane z co najmniej dwóch niezależnych zbiorników, a pojazd przystosowany do holowania przyczepy wyposaża się w dodatkowy trzeci zbiornik. Siłę potrzebną do hamowania uzyskuje się przez doprowadzenie sprężonego powietrza przez odpowiedni zawór do dwustronnych cylindrów hamulcowych. W przypadku uruchamiania hamulca głównego kierowca naciskając na pedał hamulca uruchamia zawór, który precyzyjnie dozuje dopływ sprężonego powietrza do siłowników. Siła nacisku na pedał przekłada się na odpowiedni wzrost ciśnienia w siłownikach pneumatycznych a tym samym na wartość siły hamowania. W przypadku hamulca postojowego utrzymywanie ciśnienia w siłowniku przez cały czas postoju pojazdu ze względu na nieuniknione ubytki powietrza wynikające z nieszczelności jest niemożliwe. Dlatego używa się siłowników dwustronnego działania o specjalnej konstrukcji, co przedstawiono na rysunku 31 (Wojtkiewicz-Lazman, 2007).



Rys. 31. Zasada pracy dwustronnego cylindra hamulcowego, obsługującego hamulec zasadniczy i postojowy (Wojtkiewicz-Lazman, 2007)

Po włączeniu hamulca postojowego rozpięracze mechaniczne są uruchamiane siłą sprężyny, a więc niezależnie od ciśnienia powietrza. Hamowanie następuje poprzez podanie ciśnienia do odpowiedniej komory siłownika. Hamulce przyczep i naczep uruchamiane są w taki sam sposób jak hamulce pojazdu ciągnącego. Połączenie instalacji pneumatycznej ciągnika i przyczepy umożliwiają specjalne złącza. Budowa złączy jest znormalizowana, co umożliwia łączenie ciągnika z różnego rodzaju naczepami. Złącza przewodów sterujących mają pokrywy w kolorze żółtym, a przewodów zasilających w kolorze czerwonym (Wojtkiewicz-Lazman, 2007).

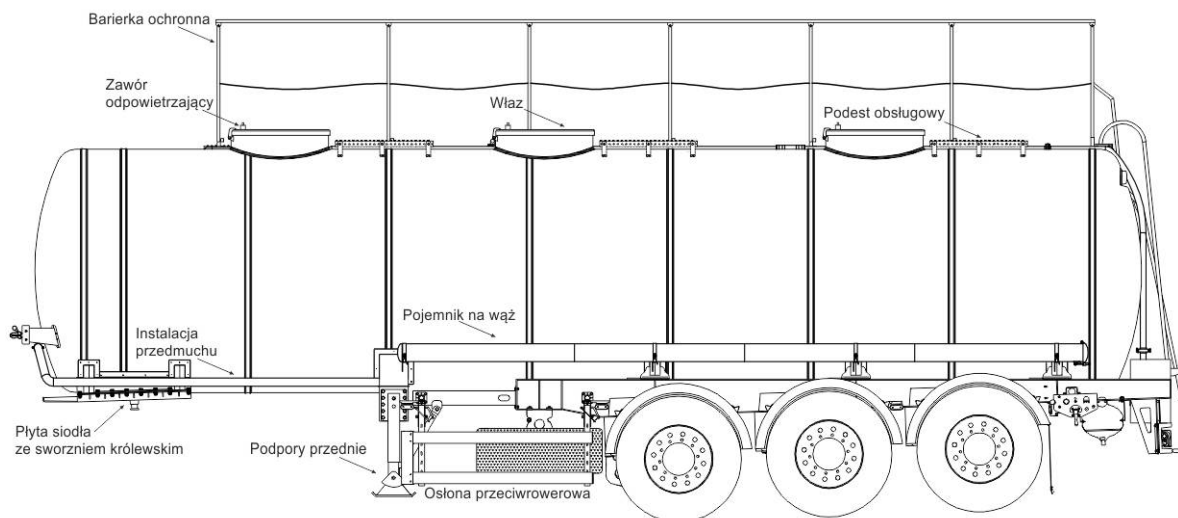
Nowoczesne hamulce pneumatyczne łączone są w dwa (lub więcej) niezależnych obwodów zasilania poprawiających bezpieczeństwo. Dodatkowo posiadają samoczynne korektory siły hamowania kół tylnej osi, które dostosowują siłę hamowania do aktualnego

obciążenia pojazdu. W rozwiązaniach starszych połączenie przyczepy z ciągnikiem było jednoprzewodowe co powodowało opóźnienie działania hamulców przyczepy w stosunku do hamulców pojazdu ciągnącego z powodu dłuższej drogi sprężonego powietrza. Było to zjawisko utrudniające prowadzenie zestawu, gdyż chwilowo nie hamowana przyczepa miała tendencję do zarzucania. Połączenie dwuprzewodowe eliminuje tę niedogodność. Coraz częściej w pojazdach użytkowych stosuje się elektropneumatyczne układy sterowania hamulców oznaczane skrótem EBS (ang. *Electronic Braking System*). Zaletą ich jest skrócenie czasu uruchamiania mechanizmów hamulcowych. Układy EBS dają duże możliwości regulacji siły hamowania oraz umożliwiają współpracę z układem ASR (ang. *Advanced Vehicle Control Systems*) zapobiegającym poślizgowi kół podczas ruszania. Istotą działania takich systemów jest wykorzystywanie elektronicznych układów do sterowania działaniem pneumatycznych elementów wykonawczych (siłowników). Elektryczne sygnały wygenerowane w module sterującym podawane są do pneumatycznych elektrozaworów a te z kolei uruchamiają siłowniki przy kołach pojazdu. Informacji o przebiegu hamowania dostarczają centralnej jednostce sterującej czujniki prędkości kół jezdnych, sygnały z pedału hamulca, sygnały od urządzenia sprzęgającego. W zależności od tych sygnałów jednostka sterująca określa wartość siły hamowania oraz decyduje, czy uruchomić hamulec roboczy czy tylko zwalniacz (retarder) (Wojtkiewicz-Lazman, 2007).

Poza układem jezdnyim istotny jest również układ utrzymujący odpowiednie projektowane ciśnienie komór. Elementem odpowiadającym za zapewnienie właściwego podciśnienia i nadciśnienia w komorach jest zawór bezpieczeństwa zamontowany w pokrywie każdego wjazdu. Zawory te mają możliwość regulacji wymaganego ciśnienia w komorze, którą zamykają. Jak przedstawiono na rysunku 32 wejście do każdej z komór umożliwia podest obsługowy z barierką ochronną podnoszony dźwignią drabiny. Na boku naczepy zamocowano pojemniki na węże służące do rozładunku komór.

Kolejnym ważnym układem w naczepie jest centralny układ mycia naczepy CIP (ang. *Cleaning-In-Place*). Jest on zbudowany z rurociągu z głowicą myjącą w każdej komorze. Nieodzownym elementem każdej głowicy jest jej zawór odcinający, umożliwiający mycie każdej komory osobno. Naczepy powinny być czyszczone oraz zdezynfekowane po wykonaniu każdego przewozu. Pojazdy te posiadają termografy, które po zakończeniu przewozu umożliwiają wydruk temperatury utrzymywanej w trakcie transportu, dzięki czemu odbiorca może przeanalizować, jak przewóz wpłynął na stan danego produktu. Niektóre z nich posiadają GPS (ang. *Global Positioning System*), który umożliwia kontrolę, gdzie przewożony ładunek aktualnie się znajduje. Przyrządy umożliwiające kontrolę temperatury ładunku głęboko

mrożonego transportowanego na terenie Unii Europejskiej muszą spełniać wymogi narzucone przez Europejski Komitet Normalizacyjny (Sarnacka i Solecka, 2014).



Rys. 32. Budowa naczepy trzykomorowej do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017)

Naczepa wyposażona jest również w podpory przednie oraz tzw. osłonę przecirowerową, jak przedstawiono na rysunku 32. To specjalna bariera powodująca zablokowanie ewentualnego rowerzysty przy manewrach przed wпадnięciem pod naczepę. Na przodzie naczepy znajduje się płyta siodła wraz ze sworzniem królewskim umożliwiającym podłączenie jej do ciągnika siodłowego. Z przodu naczepy znajduje się również element instalacji przedmuchowej, wykonany z rury o małej średnicy. Instalacja ta służy do rozładunku przewożonego produktu powietrzem lub do wydmuchiwania resztek produktu z układu przeładunkowego. To jednak cecha naczepy przedstawionej na rysunku 32. Do rozładunku najczęściej używa się pomp membranowych, wirnikowych, krzywkowych lub z napędem hydraulicznym, pneumatycznym czy elektrycznym, zamontowanych w szafie zamontowanej w tylnej części naczepy.

Jak wspomniano powyżej naczepa wykonana jest głównie ze stali nierdzewnej. Określa się, że procent użycia stali nierdzewnej w naczepie (w zależności od modelu) mieści się w przedziale 80-95%.

Proces produkcyjny naczepy rozpoczyna się od cięcia blachy. Jest to niezmiernie ważny etap w produkcji całej naczepy. Wycięte powierzchnie elementów muszą zachowywać odpowiednią jakość technologiczną powierzchni po cięciu, wykazywać się zmniejszoną strefą wpływu ciepła tam, gdzie jest to wymagane. Elementy, które są badane w dalszych etapach

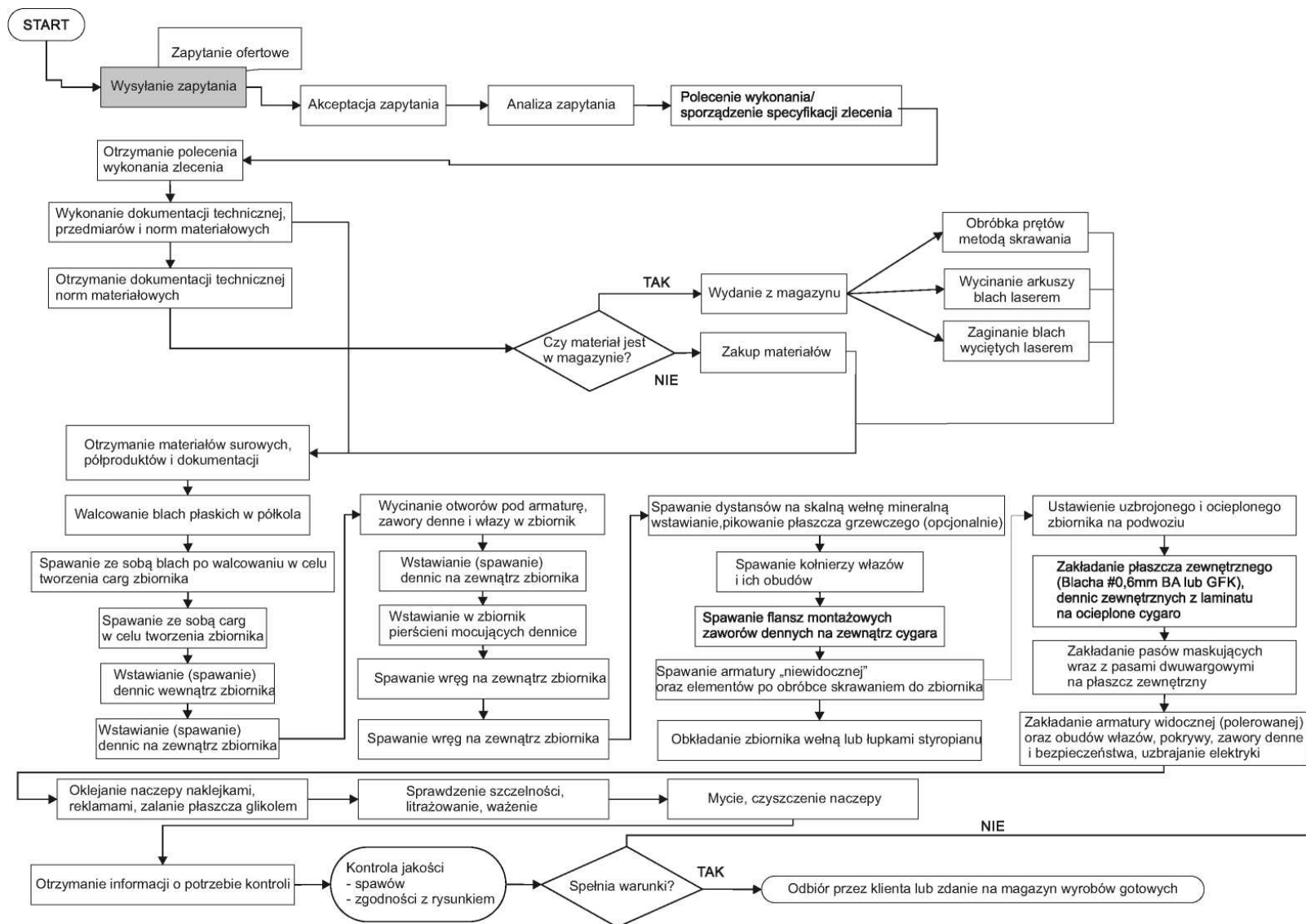
pracy wykonane są właśnie ze stali nierdzewnej X5CrNi18-10, z której wykonywana jest naczepa-cysterna.

4.2. Problemy w procesie wytwarzania cysterny związane z operacjami cięcia

W celu scharakteryzowania najważniejszych problemów związanych z procesem cięcia blachy nierdzewnej przedstawiono skrótowo najważniejsze etapy procesu jej produkcji.

Cysterna montowana na naczepie przeważnie składa się z trzech komór. Przed przystąpieniem do produkcji naczepa jest projektowana w biurze projektowym. Tworzona jest dokumentacja produkcyjna dla każdego działu wykonawczego produkcji przedsiębiorstwa. Opracowywane są również normy materiałowe dla działu przygotowania produkcji oraz zaopatrzenia. Każdy z tych działów po dokładnych analizach, przekazuje odpowiednim działom wykonawczym dalsze instrukcje. Jednym z nich jest magazyn, który wydaje elementy handlowe oraz półprodukty. Po uzupełnieniu braków przez dział zaopatrzenia, rozpoczyna się proces produkcji. Komplet materiałów do produkcji przekazywany jest do odpowiednich jednostek w przedsiębiorstwie, co pokazano na rysunku 33.

W pierwszym etapie budowy naczepy wykonywany jest korpus zbiornika. Komory w zbiorniku wykonane są z blachy nierdzewnej X5CrNi18-10 walcowanej na zimno o powierzchni 2B. Aby blacha osiągnęła pożądany kształt walca obrabia się ją na prasach walcowych o określonym rozstawie. Z odpowiednio przystosowanych arkuszy blachy buduje się pierścienie, łączy się je metodą spawania TIG (ang. *Tungsten Inert Gas*) tworząc cargo. Następnie łączy się je, tą samą metodą spawania, tworząc pusty w środku walec, kształtowany za pomocą odpowiednich rozpór. W kolejnym etapie wstawia się do walca dennice tłoczone wewnętrzne oraz zewnętrzne. Następnie wycinane są otwory na włazy, zawory denne oraz armaturę. Pierścienie mocujące dennice są wstawiane po zakończeniu poprzednich prac. Na zewnątrz zbiornika mogą jednocześnie trwać prace polegające na przygotowaniu i umocowaniu wręg oraz płaszczy grzewczych. Następnie odbywa się wyprowadzanie króćców armatury poprzez wcześniej ukształtowane otwory metodą spawania TIG.



Rys. 33. Mapa procesu produkcyjnego naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017)

W drugim etapie naczepa jest przygotowywana do ułożenia izolacji termicznej. Aby izolacja utrzymała się w odpowiednim miejscu, montuje się dystanse metodą spawania TIG. Wtedy montaż dystansów jest zbędny. W przypadku gdy specyfikacja naczepy przewiduje wyposażenie jej w system podgrzewania ładunku, w kolejnym etapie pikuje się płaszcz grzewczy. Następnie odbywa się spawanie kołnierzy włączów oraz zaworów dennych metodą TIG. Po dospawaniu armatury niewidocznej (armatura ukryta pod płaszczem zewnętrznym oraz izolacją), można obkładać naczepę wełną lub wcześniej wyciętymi na ploterze łupkami styropianu w celu zapewnienia wymaganej izolacji termicznej. Najczęściej na tym etapie produkcji jest dostarczane podwozie, na którym montowany jest zbiornik. Płaszcz zewnętrzny jest nieodzownym elementem wyglądu naczepy. Montowany jest na tzw. felc. (rowek wykonany na prasie). Jak przedstawiono na rysunku 33, kolejny etap to tzw. litrażowanie, naklejanie reklam i czyszczenie. Litrażowanie polega na sprawdzeniu, ile faktycznie cieczy, najczęściej wody, może być umieszczone w naczepie oraz instalacji przeładunkowej. Jeżeli naczepa spełnia wszystkie kryteria jakościowe, jest gotowa do przekazania odbiorcy. Jeżeli natomiast nie spełnia wymogów kontroli jakości następuje etap usuwania usterek powstałych w procesie produkcyjnym (Romanowski i Nadolny, 2017).

Probleмами napotykanymi podczas operacji cięcia zarówno strumieniem fotonów, jak i strugą wodno-ścierną, są nieprawidłowo dobrane parametry cięcia dla danej grubości blachy. Następuje wówczas niedokładne przecięcie krawędzi, co skutkuje nieoddzieleniem wycinanego elementu od reszty arkusza blachy. Dzieje się tak podczas dobrania parametrów o zbyt małej wartości do danej grubości blachy. W przypadku realizacji procesu cięcia z parametrami zawyżonymi od wymaganych, w cięciu strumieniem fotonów można zaobserwować wyraźnie szerszą strefę wpływu ciepła wraz z nadpaleniami krawędzi wyciętego elementu. Przy cięciu strugą wodno-ścierną zawyżenie parametrów przecinania (np. wydatku ścierniwa) będzie korzystniejsze z uwagi na jakość krawędzi cięcia, jednak odpowiednie dobranie parametrów w obu metodach cięcia wpłynie korzystnie na wskaźniki ekonomiczne całego procesu (mniejsze zużycie prądu, garnetu czy wody) oraz wydłużenie żywotności narzędzia (rezonatora, soczewki czy dyszy).

Dąży się do maksymalizacji prędkości przecinania przy jednoczesnym zachowaniu żądanej jakości elementu ciętego. Przy ocenie jakości procesu brane są pod uwagę następujące kryteria (Przetakiewicz i inni, 1993):

- szerokość szczeliny przecięcia,
- chropowatość (gładkość) powierzchni przecięcia, związana z występowaniem na niej charakterystycznych nierówności (prażków),

- obecność produktów ubocznych w postaci nacieków i żużla na dolnej krawędzi cięcia,
- prostopadłość powierzchni przecięcia do powierzchni obrabianego materiału.

Wyroby, które zostały wycięte przy nieodpowiednio dobranych parametrach cechują się występowaniem zendry, zadziórów, rantów na górnej krawędzi cięcia, nadmiernych zaokrągleń powierzchni przecięcia lub występowaniem nieregularnej strefy chropowatej na powierzchni przecięcia. Spotyka się również problemy związane z zapewnieniem stabilności procesu (Bohdal i Gotowała, 2015):

- spowodowane niejednorodnością materiału czy występowaniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej,
- związane z dokładnością wymiarowo-kształtową wyrobów,
- zmianami fizykochemicznymi w strefie cięcia na skutek silnych deformacji.

Wycięty element musi być użyty w dalszym ciągu technologicznym procesie wytwarzania naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych. Z reguły element ten jest w kolejnym etapie spawany lub obrabiany w procesie frezowania. Warto zaznaczyć, że w przypadku, gdy strefa wpływu ciepła po procesie cięcia jest mała, frezowanie odbywa się z mniejszym zużyciem narzędzia, niż w przypadku zwiększonego oddziaływania ciepła na strukturę materiału w procesie cięcia. Żużel powstały przy cięciu strumieniem fotonów może natomiast niekorzystnie wpłynąć na późniejszy proces spawania wyciętego elementu (Romanowski i Nadolny, 2017).

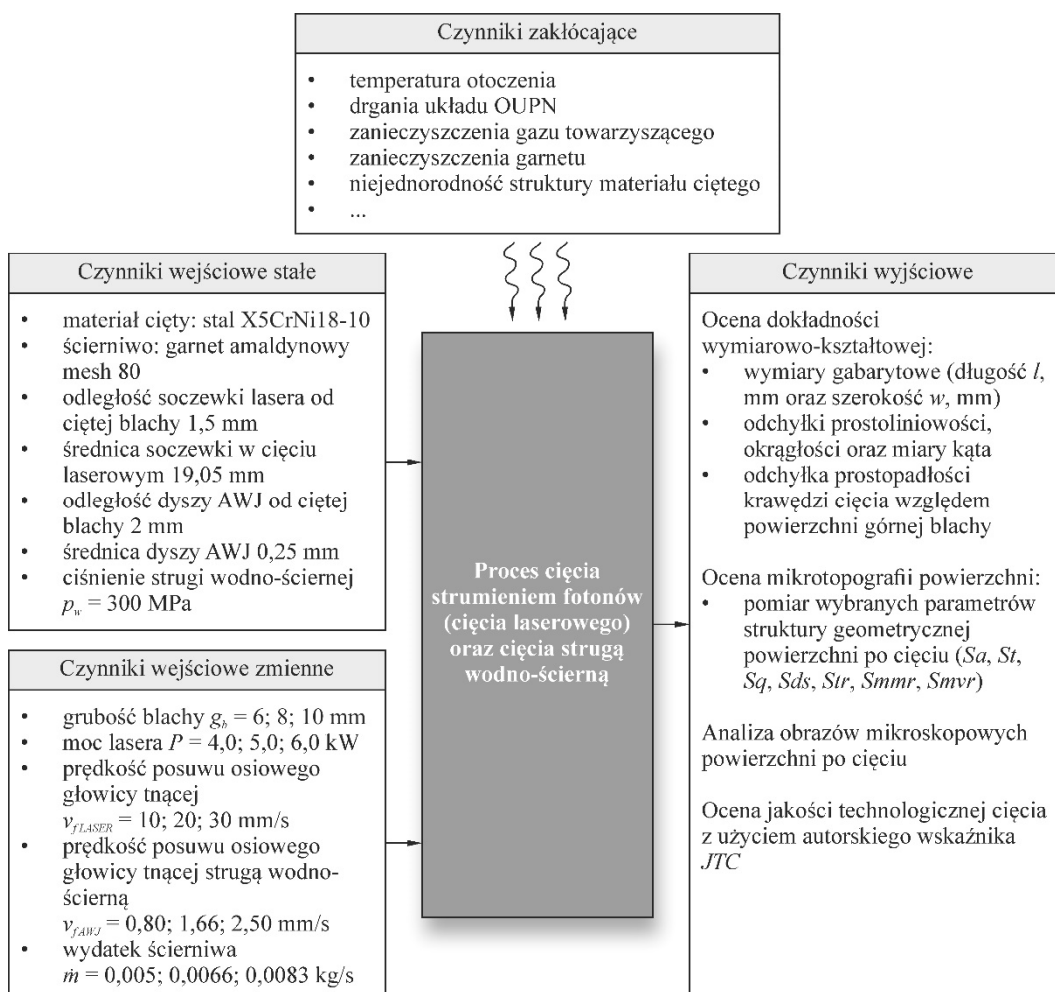
4.3. Wnioski

Przedstawiona charakterystyka budowy naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych umożliwiła sformułowanie poniższych wniosków.

1. Większość elementów w naczepie wykonanych jest ze stali nierdzewnej gatunku X5CrNi18-10.
2. Cięcie materiału wejściowego jest początkowym etapem w produkcji każdej naczepy.
3. Wysokie wymagania dotyczące jakości technologicznej operacji cięcia uzasadniają podjęcie badań dotyczących procesu cięcia z użyciem wysokoskoncentrowanego strumienia energii.
4. W procesie produkcji naczep-cystern najczęściej stosowane jest cięcie laserowe oraz cięcie strugą wodno-ścierną.

5. METODYKA BADAŃ

Badania doświadczalne były prowadzone w zakresie procesu cięcia strumieniem fotonów (cięcia laserowego) oraz strugą wodno-ścierną (AWJ). Tematyka objętych zakresem pracy działań wymagała stworzenia odpowiednich warunków, zestawienia stanowiska badawczego oraz przyjęcia określonych parametrów procesu cięcia. Zakres zmienności parametrów obróbkowych przyjęto w przedziale najczęściej stosowanych w praktyce przemysłowej z uwzględnieniem możliwości użytych urządzeń technologicznych. Zastosowano metody i techniki pomiarowe o możliwie najwyższej precyzji. Schemat przedstawiony na rysunku 34 obrazuje wielkości wejściowe, wyjściowe oraz zakłócenia w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych. Planowane w pracy badania i analizy miały na celu uzyskanie nowej wiedzy dotyczącej oceny jakości technologicznej w procesach cięcia elementów ze stali nierdzewnej (w szczególności stali X5CrNi18-10), co ma potencjalnie duże znaczenie aplikacyjne dla przemysłu maszynowego. Zamierzone cele badawcze osiągnięto realizując prace w dwóch etapach obejmujących badania rozpoznawcze i badania właściwe.



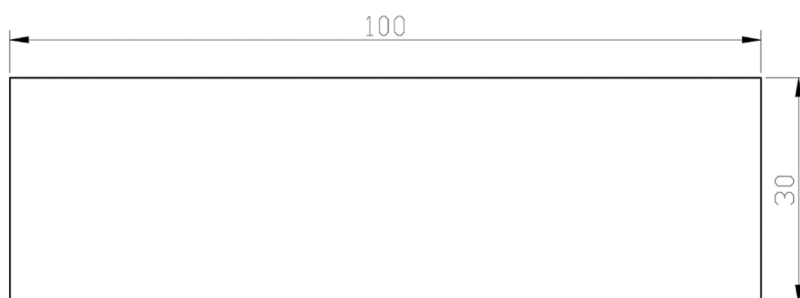
Rys. 34. Schemat badań jakości technologicznej w procesie cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną

5.1. Metodyka badań rozpoznawczych

Celem badań rozpoznawczych było określenie najkorzystniejszych parametrów badanych procesów ze względu na osiąganą dokładność wymiarową oraz jakość powierzchni po cięciu blachy wykonanej ze stali X5CrNi18-10. Aby osiągnąć cel wycięto 54 elementy z czego 27 strumieniem fotonów a 27 strugą wodno-ścierną przy zmiennych wartościach nastawnych rozpatrywanych procesów cięcia.

Prace badawcze wykonywano w procesie cięcia blachy austenitycznej X5CrNi18-10 strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną. Cięcie strumieniem fotonów odbywało się przy użyciu urządzenia sterowanego numerycznie typu Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW, szerzej opisanego w podrozdziale 5.3.1. Cięcie strugą wodno-ścierną odbywało się przy użyciu urządzenia sterowanego numerycznie typu PTV JETS 3,8/60 Basic, szerzej opisanego w podrozdziale 5.3.3.

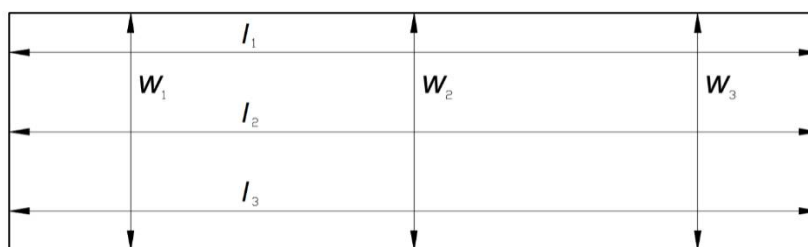
Proces cięcia przeprowadzono zaczynając od ustalenia położenia i zamocowania materiału wejściowego jakim był arkusz blachy ze stali X5CrNi18-10 o wymiarach 1250×2500 mm, z którego wycinano elementy o kształcie prostokąta pokazanego na rysunku 35.



Rys. 35. Wymiary wyciętego elementu ze stali X5CrNi18-10

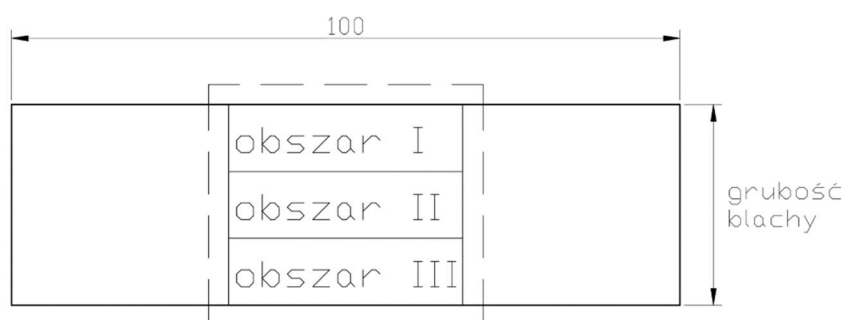
Następnie zaprogramowano proces cięcia zgodnie z przyjętym planem eksperymentu. Wprowadzono wartości nastawne zgodnie z planem zamieszczonym w podrozdziale 5.1.4. W następnej kolejności otrzymanym elementom nadano unikalne oznaczenia. Nie zanotowano zakłóceń, cięcie odbyło się zgodnie z planem.

W dalszym etapie badań laboratoryjnych przystąpiono do pomiarów dokładności wymiarowej wyciętych elementów. Zastosowano w tym celu mikrometry cyfrowe QLR MMT IP54 o zakresach pomiarowych 25-50/0,001 mm oraz 50-100/0,001 mm szerzej opisane w podrozdziale 5.4.3. Pomiarów długości i szerokości dokonano mierząc odległość pomiędzy przeciwległymi krawędziami wyciętych przedmiotów w trzech miejscach zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 36.



Rys. 36. Schemat pomiaru elementu ze stali X5CrNi18-10 o wymiarach 100×30 mm

Przeprowadzono również pomiary struktury geometrycznej powierzchni ukształtowanej w procesie cięcia strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną przy użyciu wielogłowicowego systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd., szerzej opisanego w podrozdziale 5.4.1. Zarejestrowano także obrazy mikroskopowe wyciętych elementów, w sposób pokazany na rysunku 37. Obserwowana powierzchnia przecięcia została podzielona na trzy obszary badawcze: część górną (obszar I), dolną (obszar III), środkową (obszar II). Ponadto zarejestrowano ogólny (linia przerywana) obraz mikroskopowy powierzchni po cięciu blachy metodą mikroskopii opto-cyfrowej przy użyciu cyfrowego mikroskopu pomiarowego typu Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co., szerzej opisanego w podrozdziale 5.4.2.



Rys. 37. Orientacja obszarów obserwacji mikroskopowej powierzchni cięcia

5.1.1. Wielkości wejściowe stałe

Przyjęto następujące wielkości stałe:

- dla obu technik cięcia blacha wykonana była ze stali X5CrNi18-10,
- proces cięcia wszystkich elementów odbył się jednego dnia,
- cały proces cięcia był obsługiwany przez jednego operatora,
- do cięcia strugą wodno-ścierną użyto tego samego garnetu amaldynowego mesh 80 o wielkości nominalnej ziarna ściernego 0,18 mm w przedziale (106-300 μm),
- przy cięciu strumieniem fotonów ustawiono stałą odległość soczewki lasera od ciętej blachy wynoszącą 1,5 mm, przy cięciu strugą wodno-ścierną zachowano stałą odległość dyszy od ciętej blachy, wynoszącą 2 mm,

- średnica soczewki użytej w cięciu laserowym to $\varnothing 19,05$ mm, średnica dyszy użytej do cięcia AWJ to $\varnothing 0,25$ mm; Soczewka oraz dysza były ustawione pod tym samym niezmiennym kątem prostym w stosunku do ciętej blachy przez cały proces cięcia,
- podczas cięcia urządzenia nie uległy awarii ani nie użyto nowych części eksploatacyjnych,
- do cięcia strugą wodno-ścierną była doprowadzona woda bezpośrednio z sieci wodociągowej o stałym ciśnieniu 0,3 MPa,
- w przypadku urządzenia zastosowanego w badaniach ciśnienie strugi wodno-ścierniej było niesterowalne, dlatego też przez cały proces strugę podawano pod ciśnieniem $p_w = 300$ MPa,
- dzięki niezmiennej konfiguracji stanowiska, zakłócenia również pozostały niezmiennie: temperatura otoczenia, drgania układu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie), zanieczyszczenia gazu w przypadku cięcia strumieniem fotonów, zanieczyszczenia garnetu w przypadku cięcia strugą wodno-ścierną, niejednorodność struktury materiału.

5.1.2. Wielkości wejściowe zmienne

Wielkości wejściowe zmienne, za których pośrednictwem można oddziaływać na obiekt badań, reprezentują sterowanie (oddziaływanie celowe) lub zakłócenie (czynnik niepożądany).

Jako wartości wejściowe zmienne analizowane były następujące parametry dla cięcia strumieniem fotonów:

- grubość blachy g_b w mm – opisywana jest jako grubość płaskiego lub zwiniętego wyrobu hutniczego, znacznie mniejszego niż jego długość i szerokość, zakres stosowany w badaniach to 6; 8; 10 mm,
- moc lasera P w W – opisywana jako moc wyjściowa, znormalizowana; jest skalarną wielkością fizyczną informującą o pracy wykonanej w czasie, zakres stosowany w badaniach to 4,0; 5,0; 6,0 kW,
- prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej v_{FLASER} w mm/s – jest to posuw głowicy tnącej laserem w stosunku do przedmiotu obrabianego w jednostce czasu, zakres stosowany w badaniach to 10; 20; 30 mm/s.

Jako zmienne wejściowe analizowane były następujące parametry dla cięcia strugą wodno-ścierną:

- grubość blachy w mm, zakres stosowany w badaniach to 6; 8; 10 mm,

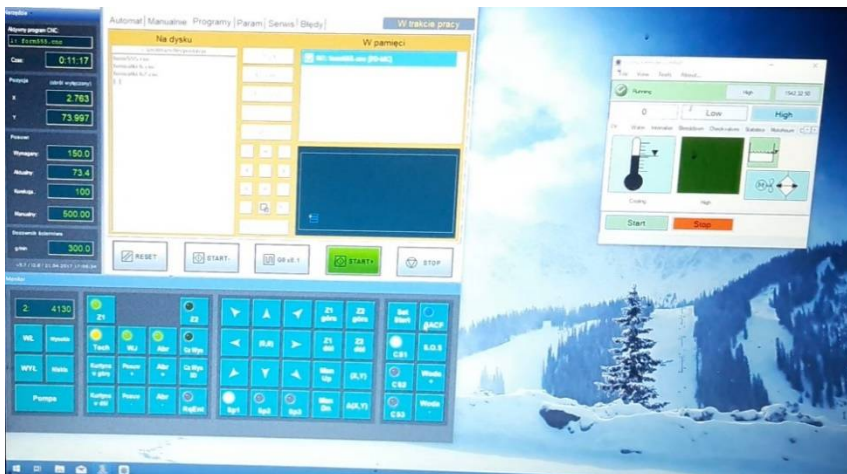
- prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej strugą wodno-ścierną v_{fAWJ} w mm/min, zakres stosowany w badaniach to 0,80; 1,66; 2,50 mm/s,
- procesem sterowano regulując wydatek ścierniwa \dot{m} w kg/s, zakres stosowany w badaniach to 0,005; 0,0066; 0,0083 kg/s.

Przy mniejszych wartościach parametrów niż wyżej wymienione, proces przebiegał nieprawidłowo z uwagi na niedocinanie elementów oraz komunikaty wyświetlane na panelu operatorskim o nieprawidłowych parametrach.

Wartości wejściowe zmienne ustawiane były w urządzeniach tnących w sposób cyfrowy na panelach operatorskich pokazanych na rysunku 38 i 39.



Rys. 38. Panel operatorski urządzenia do cięcia strumieniem fotonów Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW



Rys. 39. Panel operatorski urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic

5.1.3. Wielkości wyjściowe

Wielkości wyjściowe podzielono ze względu na parametry ilościowe i jakościowe zarówno dla metody cięcia strumieniem fotonów oraz dla cięcia strugą wodno-ścierną.

Parametry wyjściowe ilościowe:

- wymiary gabarytowe (długość l , mm oraz szerokość w , mm) wyciętych elementów mierzone przy pomocy mikrometru cyfrowego QLR MMT o zakresie 25-50 mm oraz 50-100 mm opisanego szerzej w podrozdziale 5.4.3.,
- pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni po cięciu,
- analiza mikrotopografii po cięciu,
- do charakterystyki stereometrii powierzchni wykorzystano parametry (Oczóś i Liubimow, 2003):
 - Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni),
 - St (całkowita wysokość nierówności powierzchni),
 - Sq (średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni),
 - Sds (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni),
 - Str (wskaźnik tekstury powierzchni),
 - $Smmr$ (średnia objętość materiału),
 - $Smvr$ (średnia objętość pustek – miejsc wolnych od materiału).

Parametry wyjściowe jakościowe:

- analiza obrazów mikroskopowych powierzchni po cięciu.

5.1.4. Plan badań

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały zgodnie z trójpoziomym planem eksperymentu, co umożliwiło wyznaczenie dwóch modeli matematycznych obiektu badań (MMOB): jeden dla elementów wyciętych strumieniem fotonów oraz jeden dla elementów wyciętych strugą wodno-ścierną. Opisano tym samym wpływ czynników wejściowych na czynniki wyjściowe dla:

- cięcia strumieniem fotonów: grubość blachy g_b , moc lasera P , prędkość posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} ,
- strugi wodno-ściernej: grubość blachy g_b , prędkość posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} , wydatek ścierniwa \dot{m} .

Łącznie wymagane było przeprowadzenie $N_c=27 \cdot r$ pomiarów dla każdej metody (cięcia strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną) zgodnie ze wzorem (2):

$$N_c \cdot r = L^S \cdot r = 3^3 \cdot r = 27 \cdot r, \quad (2)$$

w którym r jest liczbą powtórzeń pomiarów dla każdego układu. W przyjętym planie próby cięcia przeprowadzono bez powtórzeń ($r = 1$).

W celu analizy porównawczej wyników badań rozpoznawczych sporządzono tabele dla dziewięciu wariantów przy trzech różnych wartościach powyższych parametrów dla każdej metody (ogółem $N_c=27$ punktów planu badań doświadczalnych dla cięcia strumieniem fotonów i 27 punktów planu badań doświadczalnych dla cięcia strugą wodno-ścierną). Wartości parametrów nastawnych dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów zamieszczono w tabeli 6, natomiast dla urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną w tabeli 7.

Tab. 6. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów

Lp.	Grubość blachy g_b , mm	P , kW	v_{fLASER} , mm/s
1.	6	4	10
2.	8	4	10
3.	10	4	10
4.	6	5	10
5.	8	5	10
6.	10	5	10
7.	6	6	10
8.	8	6	10
9.	10	6	10
10.	6	4	20
11.	8	4	20
12.	10	4	20
13.	6	5	20
14.	8	5	20
15.	10	5	20
16.	6	6	20
17.	8	6	20
18.	10	6	20
19.	6	4	30
20.	8	4	30
21.	10	4	30
22.	6	5	30
23.	8	5	30
24.	10	5	30
25.	6	6	30
26.	8	6	30
27.	10	6	30

Tab. 7. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do strugą wodno-ścierną

Lp.	Grubość blachy g_b , mm	v_{fAWJ} , mm/s	\dot{m} , kg/s
1.	6	0,80	0,005
2.	8	0,80	0,005
3.	10	0,80	0,005
4.	6	1,66	0,005
5.	8	1,66	0,005
6.	10	1,66	0,005
7.	6	2,50	0,005
8.	8	2,50	0,005
9.	10	2,50	0,005
10.	6	0,80	0,0066
11.	8	0,80	0,0066
12.	10	0,80	0,0066
13.	6	1,66	0,0066
14.	8	1,66	0,0066
15.	10	1,66	0,0066
16.	6	2,50	0,0066
17.	8	2,50	0,0066
18.	10	2,50	0,0066
19.	6	0,80	0,0083
20.	8	0,80	0,0083
21.	10	0,80	0,0083
22.	6	1,66	0,0083
23.	8	1,66	0,0083
24.	10	1,66	0,0083
25.	6	2,50	0,0083
26.	8	2,50	0,0083
27.	10	2,50	0,0083

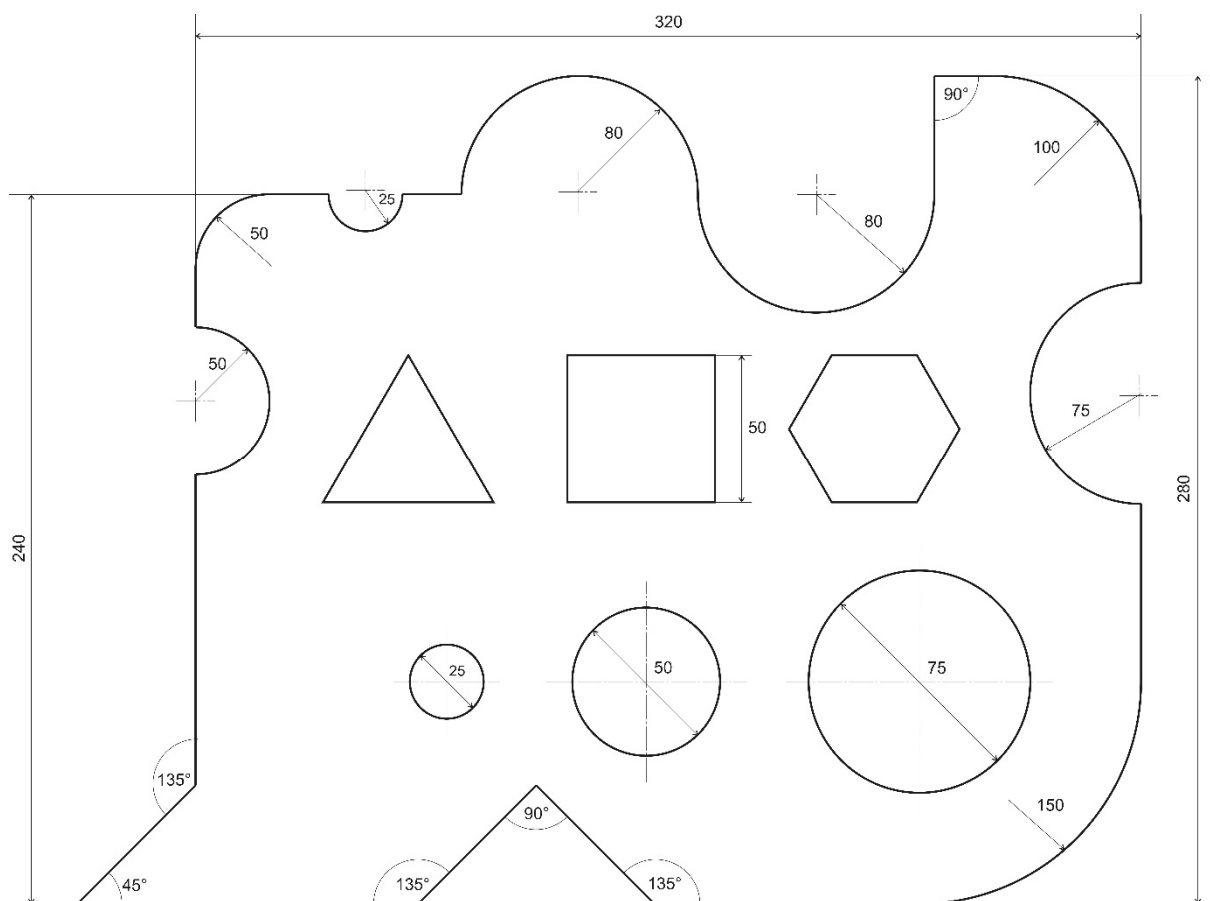
5.2. Metodyka badań właściwych

Celem badań właściwych było określenie jakości technologicznej elementów ze stali X5CrNi18-10 z uwzględnieniem wpływu ich kształtu oraz grubości blachy g_b przy zastosowaniu parametrów cięcia określonych w badaniach rozpoznawczych. Aby osiągnąć cel wycięto 6 elementów z czego 3 strumieniem fotonów i 3 strugą wodno-ścierną przy stałych wartościach nastawnych rozpatrywanych procesów cięcia tj. mocy lasera $P = 5$ kW i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fLASER} = 10$ mm/s (dla cięcia strumieniem fotonów), natężeniu przepływu ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s (dla cięcia strugą wodno-ścierną) oraz zmiennej grubości blachy $g_b = 6, 8, 10$ mm.

Prace badawcze wykonywano w procesie cięcia blachy austenitycznej X5CrNi18-10 strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną. Cięcie strumieniem fotonów odbywało się przy użyciu urządzenia sterowanego numerycznie typu TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW,

szerzej opisanego w podrozdziale 5.3.2. Cięcie strugą wodno-ścierną odbywało się przy użyciu urządzenia sterowanego numerycznie typu PTV JETS 3,8/60 Basic, szerzej opisanego w podrozdziale 5.3.3.

Proces cięcia przeprowadzono zaczynając od ustalenia położenia i zamocowania materiału wejściowego jakim był arkusz blachy wykonanej ze stali X5CrNi18-10 o wymiarach 1250×2500 mm, z którego wycinano elementy o kształcie pokazanym na rysunku 40.

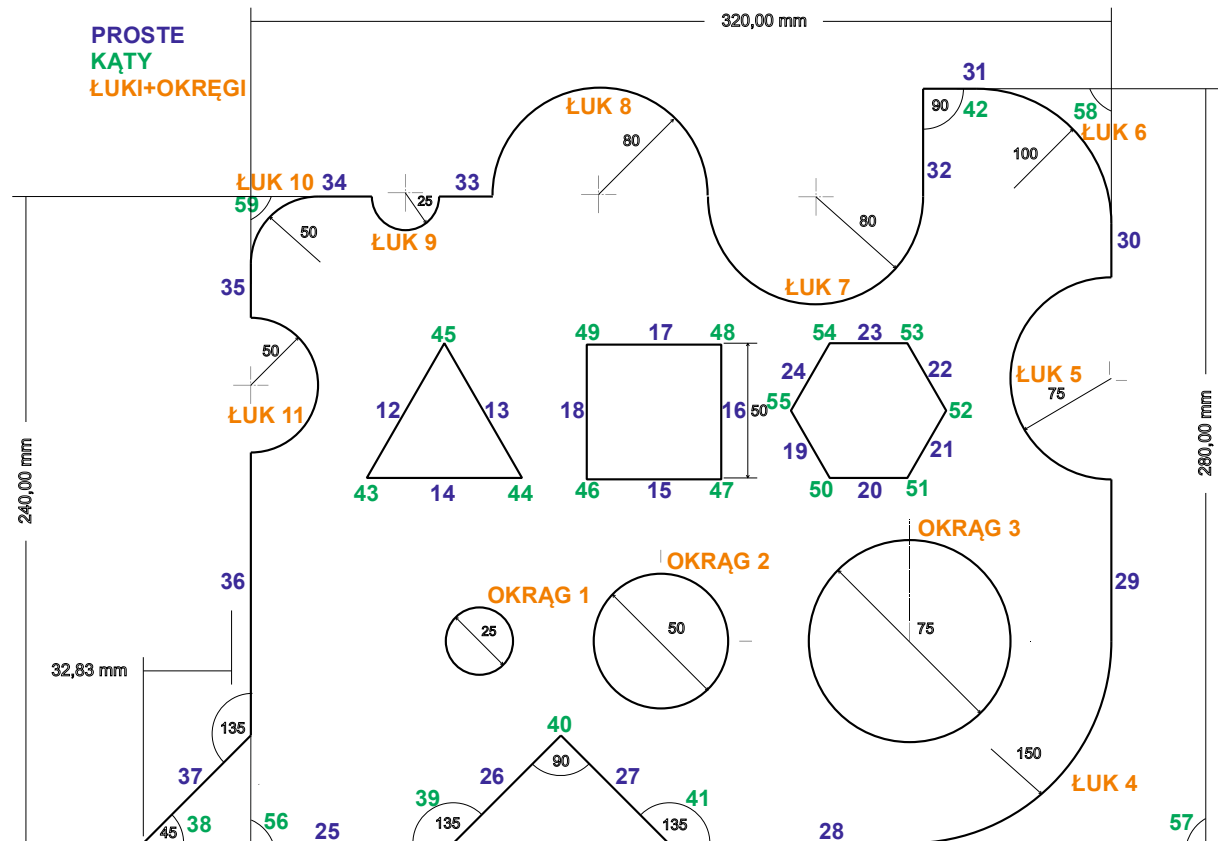


Rys. 40. Geometria elementu testowego opracowanego na potrzeby badań właściwych procesu cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną

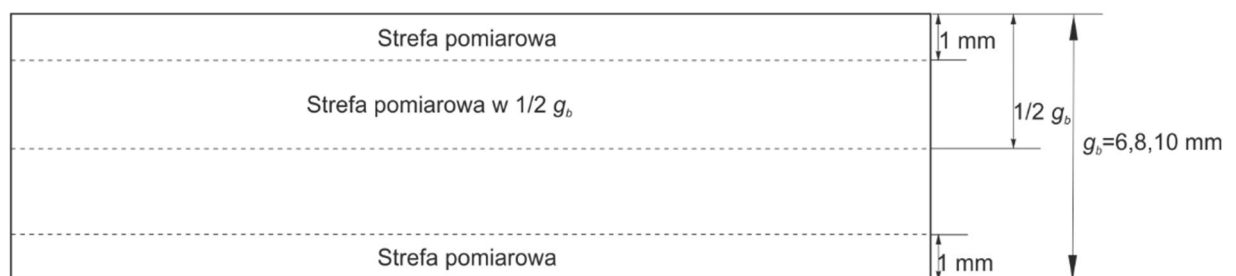
Następnie wprowadzono wartości nastawne zgodnie z planem zamieszczonym w podrozdziale 5.2.4. W następnej kolejności otrzymanym elementom nadano unikalne oznaczenia. Nie zanotowano zakłóceń, cięcie odbyło się zgodnie z planem.

W dalszym etapie badań laboratoryjnych przystąpiono do pomiarów dokładności wymiarowo-kształtowej wyciętych elementów. Zastosowano w tym celu współrzędnościową maszynę pomiarową Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 do pomiarów współrzędnościowych wyciętych elementów o zakresie pomiarowym (oś x , y , z) 500×400×400 mm, szerzej opisaną w podrozdziale 5.4.4. Pomiarów dokładności wymiarowo-kształtowej dokonano zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 41. Pomiarów

dokonano w trzech punktach kontrolnych umiejscowionych na krawędzi ciętej, 1 mm od górnej powierzchni blachy, w środku elementu (dla grubości blachy 6 mm – 3 mm od górnej powierzchni, dla grubości blachy 8 mm – 4 mm od górnej powierzchni, dla grubości blachy 10 mm – 5 mm od górnej powierzchni) oraz 1 mm od dolnej powierzchni blachy, co obrazuje rysunek 42.



Rys. 41. Schemat prezentujący kolejność pomiarów cech geometrycznych (odchyłki prostoliniowości, okrągłości oraz miary kąta) wykonanych w badaniach właściwych na elemencie testowym ze stali X5CrNi18-10 i opisanych poszczególnymi kolorami



Rys. 42. Orientacja obszarów wyciętego elementu rejestrowanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544

5.2.1. Wielkości wejściowe stałe

Przyjęto następujące wielkości stałe:

- dla obu technik cięcia blacha wykonana była ze stali X5CrNi18-10,

- proces cięcia wszystkich elementów odbył się jednego dnia,
- cały proces cięcia był obsługiwany przez jednego operatora,
- moc lasera $P = 5,0$ kW,
- prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej $v_{fLASER} = 10$ mm/s.
- przy cięciu strumieniem fotonów ustawiono stałą odległość soczewki lasera od ciętej blachy wynoszącą 1,5 mm, przy cięciu strugą wodno-ścierną zachowano stałą odległość dyszy od ciętej blachy, wynoszącą 2 mm,
- średnica soczewki użytej w cięciu laserowym to $\varnothing 19,05$ mm, średnica dyszy użytej do cięcia to $\varnothing 0,25$ mm; Soczewka oraz dysza były ustawione pod tym samym niezmiennym kątem prostym w stosunku do ciętej blachy przez cały proces cięcia,
- w przypadku urządzenia zastosowanego w badaniach ciśnienie strugi wodno-ścierniej było niesterowalne, dlatego też przez cały proces panowało ciśnienie $p_w = 300$ MPa,
- prędkość posuwu osiowego głowicy tnącej strugą wodno-ścierną $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/min,
- wydatek ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s (przyjęto wartość wyznaczoną w badaniach rozpoznawczych jako najkorzystniejszą dla największej grubości blachy spośród stosowanego w badaniach $g_b = 10$ mm – podrozdział 6.5.),
- do cięcia strugą wodno-ścierną użyto tego samego garnetu amaldynowego mesh 80 o wielkości nominalnej ziarna ściernego 0,18 mm w przedziale (106-300 μ m),
- do cięcia strugą wodno-ścierną była doprowadzona woda bezpośrednio z sieci wodociągowej o stałym ciśnieniu 0,3 MPa,
- podczas cięcia urządzenia nie uległy awarii ani nie użyto nowych części eksploatacyjnych,
- dzięki niezmiennej konfiguracji stanowiska, zakłócenia również pozostały niezmiennie: temperatura otoczenia, drgania układu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie), zanieczyszczenia gazu w przypadku cięcia strumieniem fotonów, zanieczyszczenia garnetu w przypadku cięcia strugą wodno-ścierną, niejednorodność struktury materiału.

5.2.2. Wielkości wejściowe zmienne

Wielkością wejściową zmienną w badaniach właściwych była grubość blachy g_b zarówno dla strumienia fotonów i strugi wodno-ścierniej, która wynosiła 6, 8 i 10 mm.

5.2.3. Wielkości wyjściowe

Wielkości wyjściowe podzielono ze względu na parametry ilościowe i jakościowe zarówno dla metody cięcia strumieniem fotonów oraz dla cięcia strugą wodno-ścierną.

Parametry wyjściowe ilościowe:

- pomiary dokładności wymiarowo-kształtowej (pomiar odchyłek prostoliniowości, okrągłości oraz miary kątów) wyciętych elementów wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544, opisanej szerzej w podrozdziale 5.4.4.,
- analiza mikrotopografii po cięciu,
- do charakterystyki stereometrii powierzchni wykorzystano parametry (Oczos i Liubimow, 2003):
 - Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni),
 - St (całkowita wysokość nierówności powierzchni),
 - Sq (średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni),
 - Sds (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni),
 - Str (wskaźnik tekstury powierzchni),
 - $Smmr$ (średnia objętość materiału),
 - $Smvr$ (średnia objętość pustek – miejsc wolnych od materiału).

Parametry wyjściowe jakościowe:

- analiza obrazów mikroskopowych powierzchni po cięciu.

5.2.4. Plan badań

W przeprowadzonych badaniach właściwych podstawowymi kryteriami oceniającymi badany proces były dokładność wymiarowo-kształtowa, prostopadłość powierzchni cięcia względem powierzchni górnej blachy, obserwacje mikroskopowe defektów powstałych w procesie cięcia oraz parametry struktury geometrycznej powierzchni po cięciu.

Łącznie wymagane było przeprowadzenie $N_c=3 \cdot r$ pomiarów dla każdej metody (cięcie strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną) zgodnie ze wzorem (3):

$$N_c \cdot r = L^s \cdot r = 3^1 \cdot r = 3 \cdot r, \quad (3)$$

w którym r jest liczbą powtórzeń pomiarów dla każdego układu. W przyjętym planie próby cięcia przeprowadzono bez powtórzeń ($r = 1$).

W celu analizy porównawczej wyników badań właściwych sporządzono tabele zawierające plan badań (ogółem $N_c=3$ punktów planu badań doświadczalnych dla cięcia strumieniem fotonów i $N_c=3$ punktów planu badań doświadczalnych dla cięcia strugą wodno-

-ścierną). Wartości parametrów nastawnych dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów zamieszczono w tabeli 8, natomiast dla urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną w tabeli 9.

Tab. 8. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów

Lp.	Grubość blachy g_b , mm	P , kW	v_{fLASER} , mm/s
1.	6	5	10
2.	8		
3.	10		

Tab. 9. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do strugą wodno-ścierną

Lp.	Grubość blachy g_b , mm	v_{fAWJ} , mm/s	\dot{m} , kg/s
1.	6	1,66	0,0066
2.	8		
3.	10		

5.3. Stanowiska badawcze

5.3.1. Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów stosowane w badaniach rozpoznawczych

Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów w badaniach rozpoznawczych wyposażone było w urządzenie Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW, co pokazano na rysunku 43.



Rys. 43. Widok stanowiska badawczego wyposażonego w urządzenie do wycinania strumieniem fotonów Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW

Ta wycinarka laserowa umożliwia szybkie i wydajne wycinanie zadanych kształtów z arkuszy blach o grubości do 20 mm ze stali konstrukcyjnej, do 15 mm ze stali nierdzewnej i aluminium. Zaprezentowane na rysunku 43 urządzenie charakteryzuje się przyspieszeniem głowicy tnącej dochodzące do $9,8 \text{ m/s}^2$ oraz prędkości pozycjonowania rzędu $2,6 \text{ m/s}$.

Natomiast jej duża wydajność i dokładność cięcia przy prędkości 1 m/s jest uzyskana dzięki układom pomiarowym położenia i rozdzielczości 0,001 mm firmy Renishaw. W urządzeniu Kimla zastosowano także regulatory pozycji o częstotliwości 400 do 2000 Hz oraz system sterowania z dynamiczną analizą wektorów, która pozwala na kontrolę prędkości posuwu w trzech osiach jednocześnie.

Używana w laserze włóknowym głowica tnąca bardziej koncentruje energię niż głowica w laserze CO₂. Dzieje się tak z uwagi na krótszą drogę przebycia wiązki światła poprzez mniej rozbudowany układ optyczny niż w głowicach laserowych CO₂. Dodatkowo zastąpiono występujące w głowicach laserowych CO₂ lustra, wiązkami światłowodowymi. Obniżenie kosztów cięcia w wycinarkach włóknowych umożliwia również zwiększenie sprawności energetycznej, która w opisywanym urządzeniu może wynosić do 35% (w wycinarkach CO₂ nie przekracza zazwyczaj 5%) (<https://kimla.pl>, 2020). Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW użytego do badań zamieszczono w tabeli 10.

Tab. 10. Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW

Model i typ	LF 1530
Zasilanie	400 V
Moc	50 kW
Masa	10 000 kg
Ciśnienie sprężonego powietrza zasilającego urządzenie	0,7 MPa
Przyłącze azotu	2 MPa
Przyłącze tlenu	1 MPa
Wymiary stołu	3000 mm × 1500 mm
Grubość ciętej blachy	Stal konstrukcyjna np. S235JR do 20 mm Stal nierdzewna np. 1,4301 do 15 mm Aluminium np. PA6 do 15 mm
Rok produkcji	2014

Do badań użyto soczewkę laserową ogniskującą z autofocusem o średnicy 30 mm i długości ogniskowej 150 mm. Aby sterować głowicą tnącą użyto układów pomiarowych orientacji i położenia o rozdzielczości 0,001 mm firmy Renishaw. Jako gaz wspomagający proces cięcia użyto azotu, co powodowało, że prędkość cięcia została zwiększona. Użyte ciśnienie 2 MPa gazu obojętnego nie powodowało ubocznego efektu chłodzenia, przez co zadana moc lasera mogła pozostać utrzymana.

Jak zapewnia producent w użytym do badań urządzeniu Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW zastosowano soczewki w głowicy wykonanej ze szkła kwarcowego o bardzo wysokiej

czystości. Promieniowanie świetlne padające na powierzchnię soczewki częściowo się od niej odbija co powoduje straty mocy. Każda powierzchnia szklana powoduje straty mocy cięcia rzędu około 4%. W tym przypadku występuje od 6 do 14 powierzchni szklanych, przez które musi przejść światło, dlatego w normalnych warunkach w głowicy występuje obawa dwukrotnej straty mocy. Rozwiązując ten problem, producent zastosował specjalne pokrycia antyodblaskowe, które redukują odbicie od pojedynczej powierzchni nawet do 0,1% (<https://kimla.pl>, 2020).

W przecinarnie laserowej Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW użyto precyzyjną oraz podatną na przeciążenia głowicę. Dlatego ważne jest, aby proces cięcia nie odbywał się przy pełnej mocy urządzenia. Moc powinna być normowana w zależności od grubości oraz właściwości fizycznych materiału poddawanego obróbce. Głowica wyposażona jest w soczewki skupiające o długościach ogniskowych od 125 mm do 200 mm, używanych w zależności od potrzeb użytkownika. W tym przypadku użyto ogniskową o długości 150 mm, która w zależności od zadanej mocy urządzenia, pozwala na cięcie blach ze stali nierdzewnej o grubości do 15 mm, co było wystarczające do przeprowadzenia badań (<https://kimla.pl>, 2020).

Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarnie laserowej Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW zestawiono w tabeli 11.

Tab. 11. Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarnie laserowej Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW (<https://kimla.pl>, 2020)

Regulacja ostrości głowicy	1 mm/1 pełny obrót pręta ustawiającego
Długość kolimacji ogniskowej	100 mm
Długość ogniskowej	125 mm/150 mm/200 mm
Średnica soczewki ogniskującej	30 mm (0-3 kW) 37 mm (0-4 kW)
Zakres ogniskowania pionowy	+10 mm – 15 mm
Zakres ogniskowania poziomy	±1,5 mm
Maksymalne ciśnienie podawanego azotu	2 500 000 Pa
Masa głowicy laserowej	4,2 kg

5.3.2. Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów stosowane w badaniach właściwych

Ze względu na brak możliwości kontynuacji badań i wycięcia elementu właściwego na tym samym stanowisku co w przypadku badań rozpoznawczych, w badaniach właściwych użyto przecinarki laserowej TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW. Zachowano przy tym odpowiednie wielkości nastawne stałe i zmienne, zgodnie z przyjętą metodyką badań.

Stanowisko do cięcia strumieniem fotonów w badaniach właściwych wyposażone było w urządzenie TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW, co pokazano na rysunku 44. Ta wycinarka laserowa umożliwia szybkie i wydajne wycinanie zadanych kształtów z arkuszy blach o grubości do 25 mm ze stali konstrukcyjnej, do 25 mm ze stali nierdzewnej i aluminium do 15 mm. Zaprezentowane na rysunku 44 urządzenie charakteryzuje się przyspieszeniem głowicy tnącej dochodzącym do 10,2 m/s² oraz prędkością pozycjonowania rzędu 3,1 m/s. Natomiast jego duża wydajność i dokładność cięcia przy prędkości 1 m/s jest uzyskana dzięki układom pomiarowym położenia i rozdzielczości 0,001 mm firmy Renishaw. W urządzeniu Trumpf zastosowano także regulatory pozycji o częstotliwości 400 do 2000 Hz oraz system sterowania z dynamiczną analizą wektorów, która pozwala na kontrolę prędkości posuwu w trzech osiach jednocześnie.



Rys. 44. Widok stanowiska badawczego wyposażonego w urządzenie do wycinania strumieniem fotonów TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW

Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW użytego w badaniach właściwych zamieszczono w tabeli 12.

Tab. 12. Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW

Model i typ	TruFlow 6000 6 kW
Zasilanie	400 V
Moc	50 kW
Masa	14 000 kg
Ciśnienie sprężonego powietrza zasilającego urządzenie	0,7 MPa
Przyłącze azotu	2 MPa
Przyłącze tlenu	1 MPa
Typ CNC	Siemens Sinumerik 840 D S
Wymiary stołu	4000 mm × 2000 mm
Grubość ciętej blachy	Stal konstrukcyjna np. S235JR do 25 mm Stal nierdzewna np. 1,4301 do 25 mm Aluminium np. PA6 do 15 mm
Rok produkcji	2016

W badaniach użyto soczewkę laserową ogniskującą z autofocusem o średnicy 30 mm i długości 150 mm. Aby sterować głowicą tnącą użyto układów pomiarowych orientacji i położenia o rozdzielczości 0,001 mm firmy Renishaw. Użyte ciśnienie 2 MPa gazu obojętnego (azotu) nie powodowało ubocznego efektu chłodzenia, przez co zadana moc lasera mogła pozostać utrzymana.

Jak zapewnia producent w użytym do badań urządzeniu TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW zastosowano soczewki w głowicy wykonanej ze szkła kwarcowego o bardzo wysokiej czystości.

Głowica wyposażona jest w soczewki skupiające o długościach ogniskowych od 125 mm do 200 mm, używanych w zależności od potrzeb użytkownika. W tym przypadku użyto ogniskową o długości 150 mm, która w zależności od zadanej mocy urządzenia, pozwala na cięcie blach ze stali nierdzewnej o grubości do 15 mm, co było wystarczające do przeprowadzenia badań właściwych. Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarni laserowej TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW zestawiono w tabeli 13.

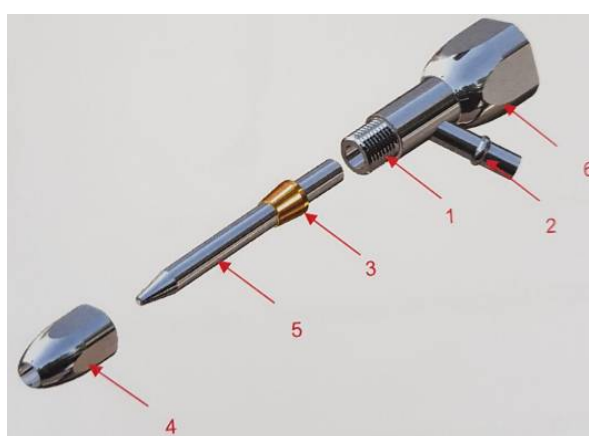
Tab. 13. Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarnie laserowej TRUMPF CO₂ serii TruFlow 6000 6 kW (<https://trumpf.pl>, 2021)

Regulacja ostrości głowicy	1 mm/1 pełny obrót pręta ustawiającego
Długość kolimacji ogniskowej	100 mm
Długość ogniskowej	125 mm, 150 mm, 200 mm
Średnica soczewki ogniskującej	30 mm (0-3 kW) 37 mm (0-4 kW)
Zakres ogniskowania pionowy	+10 mm – 15 mm
Zakres ogniskowania poziomy	±1,5 mm
Maksymalne ciśnienie podawanego azotu	2 500 000 Pa
Masa głowicy laserowej	4,6 kg

5.3.3. Stanowisko do cięcia strugą wodno-ścierną

Stanowisko do cięcia strugą wodno-ścierną wyposażone było w urządzenie do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic. Użyta do ukształtowania elementów wycinarka to system precyzyjnego cięcia wodą pod wysokim ciśnieniem $p_w > 300$ MPa. Stosowana jest do cięcia różnorodnych materiałów miękkich o małej wytrzymałości mechanicznej, do których zalicza się: karton, papier, sklejkę, piankę, gumę, izolację, włókna szklane, niektóre plastiki oraz produkty spożywcze (Sutowska, 2009). Do materiałów o wysokiej wytrzymałości mechanicznej możliwych do przecięcia na urządzeniu PTV można zaliczyć blachy metalowe, kompozyty oraz granit.

Do badań używano głowicę tnącą typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato, wyposażoną w dyszę wodno-ścierną o średnicy $\varnothing 0,25$ mm pokazaną na rysunku 45.



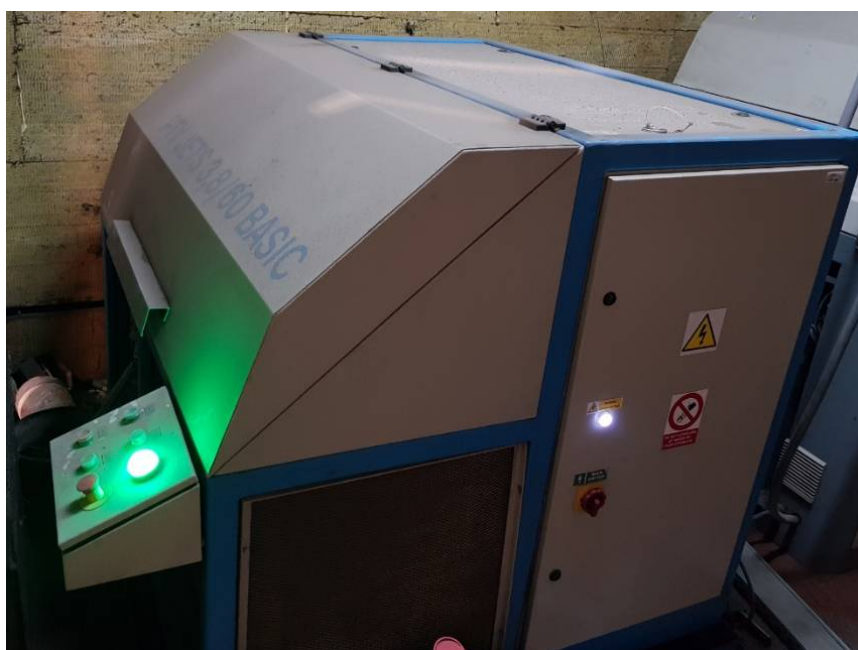
Rys. 45. Budowa głowicy tnącej typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato: 1 – korpus głowicy, 2 – łącznik poboru ścierniwa, 3 – pierścień zaciskający, 4 – nakrętka zaciskowa, 5 – dysza ścierniwa, 6 – matryca (instrukcja obsługi urządzenia)

Do przecinania blachy ze stali X5CrNi18-10 stosowano strugę wodno-ścierną, do której wytwarzania używano garnet amaldynowy mesh 80. Wielkość nominalna ziarna ściernego to

0,18 mm w przedziale 106-300 μm . Do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej stosowano wzmacniacz ciśnienia wyposażony w silnik elektryczny o mocy 37 kW ($P_{max}= 415 \text{ MPa}$, $Q_{max}= 3,8 \text{ dm}^3/\text{min}$). Wspomniane wyżej urządzenie zostało przedstawione na rysunkach 46 i 47.



Rys. 46. Urządzenie do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic



Rys. 47. Wzmacniacz ciśnienia – pompa wysokociśnieniowa urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic

Użyta wycinarka charakteryzuje się następującymi cechami pracy (<http://ptv.com.pl>, 2020):

- utrzymuje wydajność 3,8 l/min przy ciśnieniu 413 MPa,
- może być stosowana do kilkunastu cięć samą wodą,
- może być stosowana do cięcia abrazyjnego z jedną kryzą o rozmiarze 14 lub z dwiema o rozmiarze 10,
- posiada pełne sterowanie numeryczne,
- emituje niską pulsację ciśnienia,
- utrzymuje wysoki poziom ciśnienia roboczego.

Posiada funkcjonalną, prostą i łatwą w obsłudze pompę, która zawiera:

- dwustopniowy zespół filtrów oczyszczania mechanicznego na wejściu wody,
- automatyczny zawór spustowy (*Bleed Down*) zrzucający z układu wodę pod ciśnieniem po wyłączeniu pompy,
- stopniowany wzrost ciśnienia zmniejszający niekontrolowane uderzenia ciśnienia,
- wewnętrzny system diagnostyczny ochraniający pompę przy przekroczeniu kontrolowanych limitów,
- chłodnicę oleju hydraulicznego z wentylatorem, pracującą w obiegu zamkniętym, zintegrowaną z obudową, zintegrowana z pompą rozdzielnicą elektryczną,
- panel sterowania z ekranem dotykowym,
- możliwość zdalnego sterowania pompą w zakresie 10 poziomów ciśnienia z panelu sterowania stołu CNC oraz z programu.

Użyte urządzenie PTV charakteryzuje się parametrami pracy zestawionymi w tabeli 14 (<http://ptv.com.pl>, 2020).

Tab. 14. Zestawienie parametrów pracy urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic (<http://ptv.com.pl>, 2020)

Multiplikator model H ₂ O	1 sztuka
Maksymalne ciśnienie robocze	415 MPa
Zapotrzebowanie mocy	37 kW (50 HP / 80 A)
Wydajność wody	3,8 l/min
Silnik elektryczny Siemens 1CV3206B	O mocy 37 kW
Pompa hydrauliczna Parker PVCMMZN1	o wydajności 16-270 ml/obr.
Sterowanie	PLC
Poziomy ciśnienia	10, przełączane (9 poziomów + 0)
Masa	1 800 kg
Głębokość	1 550 mm
Szerokość	1 690 mm
Wysokość	1 550 mm
Min. Ciśnienie wody	350 000 Pa
Max. Ciśnienie wody	600 000 Pa
Odczyn Ph wody	6-8
Zbiornik oleju hydraulicznego	170 l
Lepkość oleju hydraulicznego	HM 46
Chłodzenie oleju hydraulicznego	Standardowo: olej /powietrze (chłodnica lamelowa z wentylatorem i pompą cyrkulacyjną)

5.4. Stanowiska pomiarowe

5.4.1. Stanowisko do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej powierzchni metodą triangulacji laserowej

Stanowisko do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej powierzchni metodą triangulacji laserowej wyposażone jest w pokazany na rysunku 48 wielogłowicowy system pomiarowy TalySurf CLI 2000 produkcji Taylor Hobson o obszarze pomiarowym (oś x , y , z)

200 × 200 × 200 mm i najdokładniejszym próbkowaniu tej powierzchni równym 0,5 μm. Za pomocą wielogłowicowego systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 można zmierzyć elementy w układzie 2D i 3D, których ciężar nie przekracza 15 kg. System ten jest wyposażony w trzy rodzaje głowic pomiarowych (Romanowski i Nadolny, 2020):

- indukcyjną o rozdzielczości 2 nm przy 2,5 mm zakresie roboczym w osi pionowej,
- bezstykową głowicę CLA 800 (wskaźnik konfokalny) wykorzystujący zjawisko aberracji o rozdzielczości 25 nm przy 800 μm zakresie roboczym w osi z,
- laserową (wykorzystującą triangulację laserową) o rozdzielczości do 1 μm przy 10 mm zakresie roboczym w osi pionowej.



Rys. 48. Stanowisko pomiarowe wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd.

Ogólną charakterystykę wyżej wymienionych głowic wykorzystywanych w systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. podano w tabeli 15.

Tab. 15. Charakterystyka metod wykorzystywanych w systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. (Taylor, 2005)

Metoda pomiaru	Zakres pomiarowy	Rozdzielczość pomiaru	Zalety metody
Stykowa	0,1 mm	2 nm	Duża rozdzielczość i dokładność pomiarów
	2,5 mm	40 nm	
Optyczna konfokalna	3 mm	100 nm	Duża rozdzielczość i dokładność pomiarów, relatywnie krótki czas oceny
	1 mm	30 nm	
	300 μ m	10 nm	
Optyczna triangulacja laserowa	10 mm	1 μ m	Szeroki zakres pomiarowy, duża efektywność
	30 mm	3 μ m	

System pomiarowy Talysurf CLI 2000 charakteryzuje się budową modułową. Podstawę urządzenia stanowi płyta granitowa z portalem, na którym zamocowana jest obudowa głowicy pomiarowej oraz prowadnica pionowa (oś z). Głowica posiada gniazda do mocowania opcjonalnych sond pomiarowych. W płycie umieszczony jest zmotoryzowany stolik pomiarowy realizujący ruch roboczy w osi x oraz y .

Pomiary triangulacyjne zrealizowano przez bezstykowy czujnik laserowy LK-031 firmy Keyence zamontowany na systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000 brytyjskiej firmy Taylor-Hobson Ltd. Współpracował on z kontrolerem LK-2001 tej samej firmy i pozwalał na uzyskanie rozdzielczości pomiarów rzędu 1 μ m. Pomiarów dokonano przy pomocy dołączonego przez producenta oprogramowania Talyscan CLI 2000 w wersji 2.6.1. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych danych pomiarowych użyto oprogramowania TalyMap Platinum w wersji 4.0 wykorzystującym Mountains Technology™ firmy Digital Surf. Producent ten dostarcza także moduł sterowania poszczególnymi elementami systemu pod nazwą Volcanyon®.

5.4.2. Stanowisko do rejestracji obrazów powierzchni ciętej metodą mikroskopii opto-cyfrowej

Do obserwacji powierzchni ukształtowanej w procesie cięcia blachy zastosowano stanowisko wyposażone w cyfrowy mikroskop pomiarowy typu Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. wraz z dedykowanym oprogramowaniem DinoCapture 2.0 co ilustrują rysunki 49 i 50.



Rys. 49. Stanowisko do rejestracji obrazów CPS oraz powierzchni obrobionej metodą mikroskopii opto-cyfrowej wyposażone w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. (<https://optek.pl>, 2020)



Rys. 50. Elementy składowe stanowiska do rejestracji obrazów czynnej powierzchni oraz powierzchni obrobionej metodą mikroskopii opto-cyfrowej wyposażonego w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co.

Mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT umożliwia rejestrację obrazów cyfrowych o rozdzielczości 5 Mpx (2592×1944 pixeli) w świetle widzialnym w powiększeniu od 10× do 230×, a także pozwala na rejestrację sekwencji wideo (30 klatek na sekundę). Mikroskop jest zasilany za pośrednictwem przewodu sygnałowego podłączonego do portu USB komputera klasy PC. Mikroskop AM7915MZT wyposażony jest w źródło światła, które stanowi osiem zintegrowanych diod LED (ang. *Light-Emitting Diode*) charakteryzujących się funkcją sterowania intensywnością oświetlenia FLC (ang. *Flexible LED Control*).

W tabeli 16 przedstawiono szczegółowe zestawienie najważniejszych parametrów technicznych cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT.

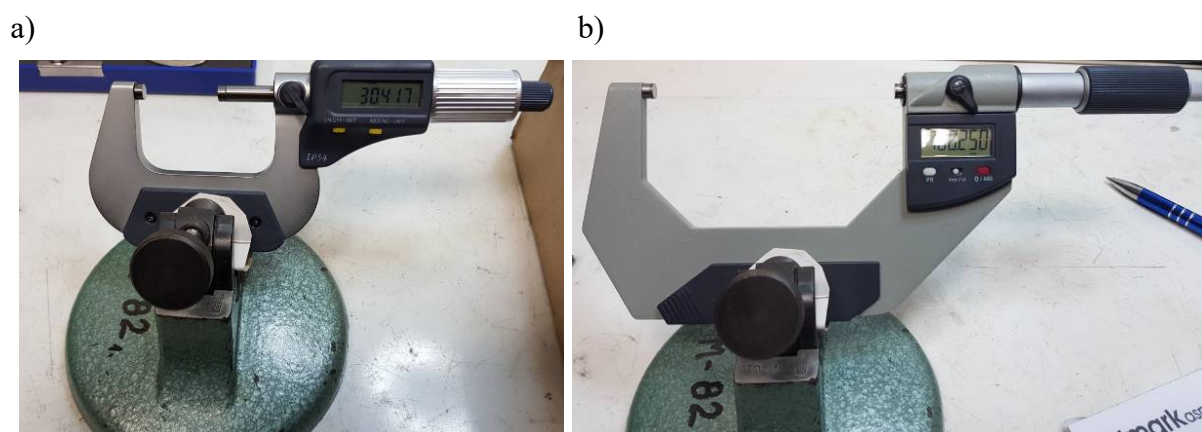
Tab. 16. Parametry techniczne cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. (<https://optek.pl>, 2020)

Oświetlenie	Źródło światła	LED
	Barwa światła	Biała
	Liczba diod	8
	Możliwość przełączania diod	Tak
	Polaryzator	Tak (liniowy)
	Filtr podczerwieni	Tak (powyżej 650 nm)
Obiektyw	Powiększenie	10-230×
	Pole obserwacji	1,8 × 1,3 mm
	Typ obiektywu	Szkło z warstwą antyrefleksyjną
Matryca	Typ matrycy	CMOS
	Rozdzielczość	5 Mpx (2592 × 1944 pixeli)
	Klatki na sekundę	30 klatek/s
Kompatybilność	Interfejs	USB 2.0
	System operacyjny	Windows: XP, Vista, 7, 8, 10
	Dołączone oprogramowanie	DinoCapture 2.0
	Obsługiwane formaty plików graficznych	BMP; GIF; PNG; JPG; TIF; RAS; PNM; TGA; PCX; MNG; WBMP; JP2; JPC; PGX
	Obsługiwany format plików video	WMV; FLV; SWF
Obudowa	Materiał obudowy	Aluminium
	Blokada powiększenia	Tak
	Wymiary	10,5 × 3,2 cm (długość × średnica)
	Masa	137 g
Cechy urządzenia	Cechy szczególne	AMR; EDR; EDOF; FLC
	Możliwość dokonywania pomiaru obiektu	Tak
	Możliwość kalibracji urządzenia	Tak
	Funkcja Microtouch	Tak

Oprogramowanie DinoCapture 2.0 posiada funkcję rejestracji obrazów w rozszerzonym zakresie dynamicznym EDR (ang. *Extended Dynamic Range*), która pozwala na wyeksponowanie ciemniejszych bądź jaśniejszych obszarów obrazu przez nakładane na siebie obrazów rejestrowanych z różnym czasem ekspozycji. Ponadto oprogramowanie to umożliwia rejestrację obrazów mikroskopowych w trybie rozszerzonej głębi ostrości EDOF (ang. *Extended Depth of Field*), która zapewnia uzyskiwanie wyraźnych obrazów nawet bardzo nierównych powierzchni. W trybie EDOF rejestrowana jest seria obrazów na różnych głębokościach ogniskowania, a następnie automatycznie (lub ręcznie) łączone (nakładane) są one w pojedynczy obraz. Dino-Lite Edge AM7915MZT ma wbudowany filtr polaryzacyjny co znacząco ułatwia pracę z błyszczącymi lub odblaskowymi obiektami, takimi jak metal, tworzywa sztuczne, szkło, biżuteria, elementy elektroniki.

5.4.3. Stanowisko do rejestracji wymiarów gabarytowych

Widoczne na rysunku 51 cyfrowe mikrometry zewnętrzne QLR MMT IP54 o zakresach pomiarowych 25-50/0,001 mm (rys. 51a) oraz 50-100/0,001 mm (rys. 51b) zostały w opisywanych badaniach użyte do pomiarów gabarytów zewnętrznych wyciętych elementów o wymiarach 30×100 mm. Zastosowanie dwóch mikrometrów było konieczne z uwagi na zakresy pomiarowe jakimi dysponują. Zastosowany w obu mikrometrach przetwornik elektroniczny wraz z cyfrowym wyświetlaczem zapewniają dużą dokładność pomiaru oraz pozwalają uniknąć błędów odczytu z bębna śruby mikrometrycznej. Mikrometry posiadają stopień zabezpieczenia IP54, który zapewnia pyłoszczelność oraz bryzgoszczelność. Dane techniczne obu mikrometrów zamieszczono w tabeli 17.



Rys. 51. Mikrometry cyfrowe QLR MMT o zakresach pomiarowych: a) 25-50/0,001 mm; b) 50-100/0,001 mm

Tab. 17. Dane techniczne Mikrometru cyfrowego QLR MMT o zakresie 25-50 mm oraz 50-100 mm (<https://mikromierz.pl>, 2020)

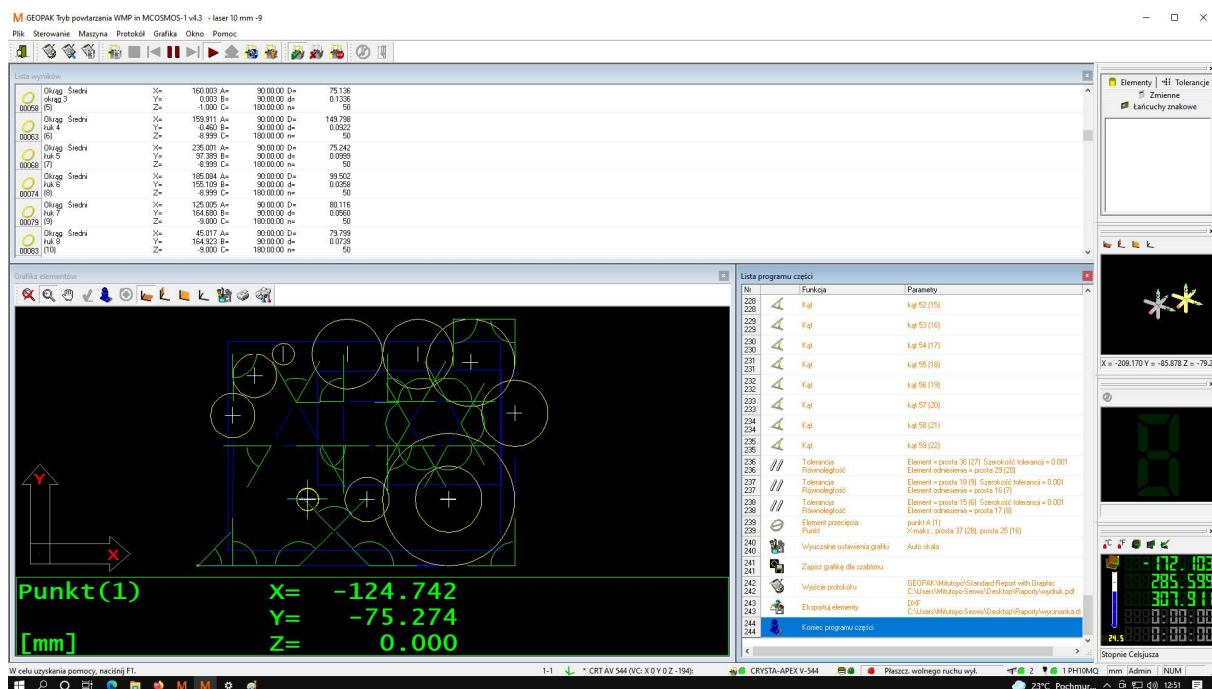
Zakres pomiarowy	25-50 mm; 50-100 mm
Rozdzielczość	0,001 mm
Błąd maksymalny	0,003 mm
Stopień zabezpieczenia	IP 54
Powierzchnie pomiarowe	Węglík spiekany
Interfejs	Wyjście danych
Zgodność z normami	DIN 863

5.4.4. Stanowisko do pomiarów współrzędnościowych

Przedstawiona na rysunku 52 współrzędnościowa maszyna pomiarowa Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 wraz z dedykowanym oprogramowaniem GEOPAK WMP in MCOSMOS-1 v4.3 została użyta do pomiarów współrzędnościowych wyciętych elementów. Na rysunku 53 został pokazany widok ekranu programu sterującego pracą maszyny.



Rys. 52. Elementy składowe stanowiska do pomiarów współrzędnościowych wyposażonego w zautomatyzowaną maszynę pomiarową Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544



Rys. 53. Widok okna programu GEOPAK WMP in MCOSMOS-1 v4.3

Wykorzystana w niej technika wieloczujnikowa gwarantuje elastyczność dzięki zastosowaniu czujników wizyjnych i laserowych, jak również sondy skanującej. Zakres pomiarowy wynosi (oś x , y , z) $500 \times 400 \times 400$ mm. Maszyna wyposażona jest w system kompensacji temperatury w czasie rzeczywistym, który w znacznym stopniu przyczynia się do zachowania wysokiej dokładności pomiaru. Maksymalny dopuszczalny błąd w trakcie pomiaru długości to $1,7 \mu\text{m}$ (tj. niepewność $2 \mu\text{m}$ dla mierzonej długości 100 mm). Dane techniczne opisywanej współrzędnościowej maszyny pomiarowej zamieszczono w tabeli 18.

Tab. 18. Dane techniczne współrzędnościowej maszyny pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 (Mitutoyo CRYSTA Apex V 54 – broszura informacyjna producenta, 2021)

Zakres pomiarowy	$500 \times 400 \times 400$ mm
Błąd maksymalny	$1,7 \mu\text{m}$
Maksymalna prędkość napędu	519 mm/s
Maksymalne przyspieszenie napędu	2309 mm/s ²
Maksymalna prędkość pomiaru	5 mm/s
Wymiary gabarytowe	$1082 \times 1191 \times 2185$ mm
Masa	515 kg
Ciśnienie dopływu powietrza	$0,4$ MPa

5.4.5. Stanowisko do pomiaru parametrów mikrogeometrii powierzchni obrobionej

W badaniach właściwych pomiar mikrotopografii powierzchni elementu testowego przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH z jednostką przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic zaprezentowanego na rysunku 54.



Rys. 54. Stanowisko do pomiaru mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH

Profilometr ten pozwala na wykonywanie pomiarów zarówno w ujęciu dwuwymiarowym (rejestracja profilu chropowatości powierzchni), jak i przestrzennym (rejestracja mikrotopografii powierzchni). Urządzenie wyposażone było w jednostkę przesuwu głowicy pomiarowej Waveline™ 60 Basic o zakresie pomiarowym w osi x wynoszącym 60 mm. Głowica zamontowana była na kolumnie Wavelift™ 400 M, służącej do jej przesuwu w osi z (w zakresie 400 mm) oraz do pochylania głowicy w zakresie 45° . Kolumna zamocowana była na płycie granitowej Wavesystem™ 780. W płycie znajdowała się szyna mocująca zmotoryzowany stolik pomiarowy wyposażony w silnik krokowy, przeznaczony do realizacji precyzyjnych przemieszczeń w osi y .

Pomiarów wewnętrznych powierzchni walcowych pierścieni po szlifowaniu dokonywano przy użyciu czujnika indukcyjnego TKL 100/17 z diamentowym ostrzem

odwzorowującym w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym równym 90° , promieniu wierzchołka $r = 5 \mu\text{m}$ i sile nacisku $0,8 \text{ N}$.

Podczas badań korzystano z oprogramowania Turbo Roughness for Windows w wersji 3.1 oraz HommelMap Basic w wersji 3.1.0, służącego do sterowania elementami urządzenia (głowica pomiarowa) oraz dokonywania pomiarów. Do analizy i wizualizacji zarejestrowanych mikrotopografii powierzchni zastosowany został program TalyMap Platinum 4.0 firmy Taylor-Hobson Ltd., wykorzystujący Mountain Technology™ firmy Digital Surf, który na podstawie wprowadzonych danych wejściowych obliczał wartości parametrów chropowatości powierzchni.

5.5. Charakterystyka stali X5CrNi18-10

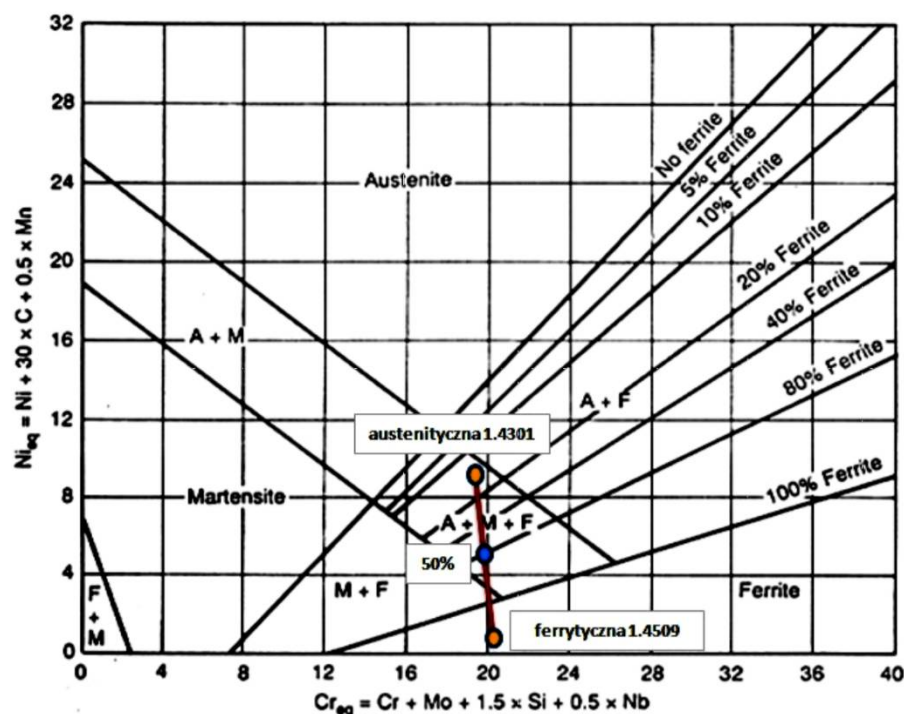
Stal jest to plastycznie, ewentualnie cieplnie, obrobiony stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami, otrzymywany w procesach stalowniczych ze stanu ciekłego.

Stal nierdzewna to stal o dobrej odporności na jednorodny lub lokalny atak środowiska. Przy zawartości chromu zbliżonej do 10,5% i przy większych zawartościach, na powierzchni stali tworzy się cienka warstwa tlenków chromu i żelaza o grubości rzędu \AA , tzw. warstwa pasywna, o zwartej budowie i spójna z podłożem, powodująca skokowy wzrost potencjału chemicznego, tj. odporności korozyjnej. Warstwa pasywna musi mieć zdolność do odtwarzania się w wypadku mechanicznego uszkodzenia powierzchni. Przy mniejszych zawartościach chromu, tworząca się warstwa tlenków jest porowata i mało spójna z podłożem, co powoduje dostęp czynnika korodującego do powierzchni stali i rozwój korozji (Hucińska, 1995).

Stale nierdzewne ze względu na ich mikrostrukturę można podzielić na (Hucińska, 1995):

- ferrytyczne,
- martenzytyczne i umacniane wydzieleniowo,
- austenityczne,
- ferrytyczno-austenityczne.

Zmiany twardości stali pod wpływem temperatury przedstawiono na wykresie fazowym zamieszczonym na rysunku 55.



Rys. 55. Wykres Schaeffera z zaznaczonymi punktami odpowiadającymi stalom nierdzewnym (Mazurkiewicz i Maciejewski, 2017)

Stal ferrytyczna – ze względu na stosunkowo niską zawartość chromu jej odporność na korozję (np. w niekorzystnych warunkach atmosferycznych lub mediach wodnych) jest ograniczona. Stąd często spotykane określenie stali tylko o podwyższonej odporności na korozję. Szczególną zaletą tych stali, w przeciwieństwie do stali austenitycznych, jest to, że wykazują znacznie większą odporność na śródkrystaliczną korozję naprężeniową wywoływaną chlorkami (Hucińska, 1995).

Stal martenzytyczna – powstaje, gdy stale austenityczne zostaną w procesie produkcji nagle schłodzone, tzn. ulegną zahartowaniu, wówczas uzyskują one strukturę martenzytyczną. Stale te, charakteryzują się znacznie większą od innych twardością oraz odpornością na ścieranie, dodatkowo w stanie ulepszonym, uzyskują wysokie wartości wytrzymałościowe (Hucińska, 1995).

Stal austenityczna – najważniejszą własnością tej grupy jest wysoka odporność na korozję, która w miarę zwiększania udziału takich dodatków stopowych jak chrom i molibden zwiększa się jeszcze bardziej. Różni je fakt, że w przeciwieństwie do stali martenzytycznych, nie są one hartowane w procesie produkcji oraz posiadają prawie dwukrotnie wyższe od stali ferrytycznych wartości wydłużania (Hucińska, 1995).

Stale austenityczno-ferrytyczne – określane często jako stale podwójne (Duplex), w ostatnim czasie zyskują na znaczeniu. Z uwagi na ich profil własności, znajdują szereg

zastosowań dla tych stali, głównie w aparaturze chemicznej, w ochronie środowiska oraz w technice związanej z morzem (Hucińska, 1995).

Stal X5CrNi18-10 jest gatunkiem standardowym z grupy austenitycznych stali chromowo-niklowych. Wykazuje dobrą odporność na korozję w środowisku naturalnym. Nie nadaje się do stosowania w środowisku zasolonym oraz o wysokim stężeniu chloru. Istnieje ryzyko korozji międzykrystalicznej w wysokich temperaturach np. podczas spawania.

Główne zastosowania: przemysł motoryzacyjny, budownictwo, przemysł chemiczny, spożywczy, naftowy. Cechuje się doskonałą spawalnością i polerownością. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne i fizyczne opisywanej stali przedstawiono w tabeli 19, 20 i 21.

Tab. 19. Skład chemiczny stali X5CrNi18-10 według PN-71/H-86020

X5CrNi18-10	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Min.						17,5		8	
Max.	0,07	1,0		0,045	0,03	19,5		10,5	

Tab. 20. Właściwości mechaniczne osiągnięte przez stal X5CrNi18-10 (<http://www.sebros.eu>, 2020)

Granica plastyczności	$R_e (R_{p0,2}) \min = 230 \text{ MPa}$
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_m = 540-750 \text{ MPa}$
Twardość	$HB_{max} = 215 \text{ Br}$

Tab. 21. Właściwości fizyczne stali X5CrNi18-10 (<http://www.sebros.eu>, 2020)

Gęstość d przy 20°C	7900 kg/m ³
Moduł sprężystości E przy 20°C	200 GPa
Współczynnik przewodzenia ciepła λ	15 W/m·K
Ciepło właściwe c przy 20°C	500 J/kg·K
Opór właściwy ρ	0,73 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Gatunek stali nierdzewnej X5CrNi18-10 wyróżnia się (Brytan, 2009):

- dobrą przeróbką plastyczną na zimno,
- świetną spawalnością,
- znakomitą udarnością,
- ciągliwością,
- bardzo dobrą odpornością korozyjną,
- dostateczną wytrzymałością,
- brakiem magnetyzmu.

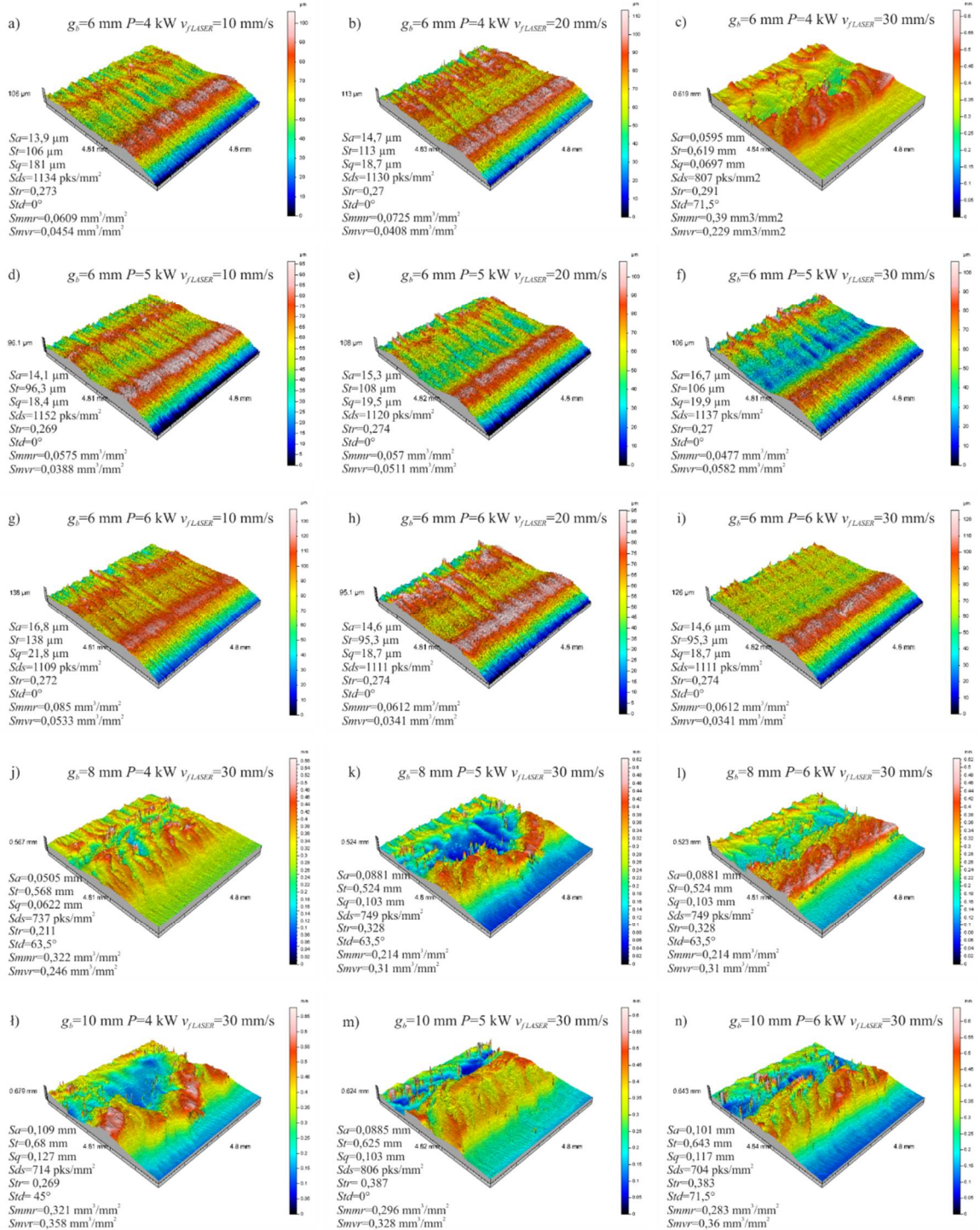
6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ROZPOZNAWCZYCH

W wyniku przeprowadzonych badań rozpoznawczych ustalono wpływ zmienności parametrów: grubości blachy g_b , mocy lasera P , prędkości posuwu głowicy v_{FLASER} dla cięcia strumieniem fotonów oraz grubości blachy g_b , prędkości posuwu głowicy v_{AWJ} , wydatku ścierniwa m dla cięcia strugą wodno-ścierną na jakość technologiczną wyciętych elementów. W trakcie badań rozpoznawczych potwierdzono istotność wpływu wymienionych parametrów na jakość technologiczną krawędzi cięcia i wyznaczono najkorzystniejsze wartości wielkości wyjściowych badanego procesu, ze względu na mierzone rezultaty cięcia.

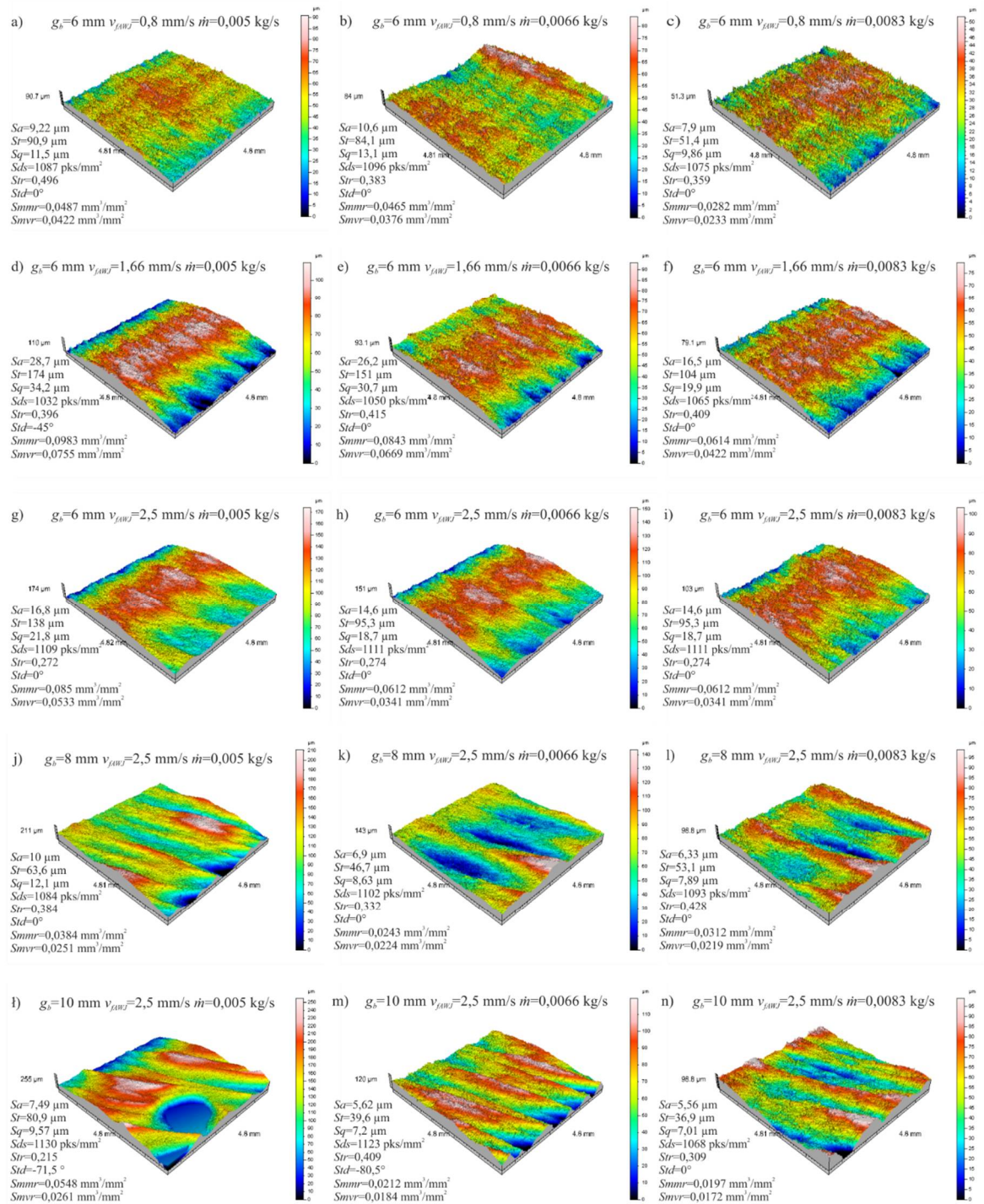
6.1. Analiza struktury geometrycznej wyciętych elementów

Wyniki pomiarów prowadzonych na wielogłowicowym systemie pomiarowym TalySurf CLI 2000 produkcji Taylor Hobson (szerzej opisanym w podrozdziale 5.4.1) wykazały znaczne różnice występujące między wartościami parametrów SGP zmierzonymi w obszarze wejścia i wypływu strugi wodno-ścierniej oraz strumienia fotonów z materiału. Dowodzi to obniżonej skuteczności oddziaływania strugi wodno-ścierniej, jako narzędzia erozyjnego, w kształtowaniu dolnej części strefy cięcia. Podobnie jest przy cięciu strumieniem fotonów, gdzie występujące w dolnej części przecinanego elementu zakrzywienie wiązki laserowej, zniekształca krawędź cięcia od połowy grubości blachy ku jej dołowi. Wobec powyższego zdecydowano, że pomiary topografii powierzchni ciętej będą wykonywane wyłącznie w dolnej części strefy cięcia, co znacznie skróciło czas pomiaru. Na każdej próbce w dolnej części strefy cięcia rejestrowano mikrotopografię powierzchni o wymiarach (oś x , y): $4,8 \times 4,8$ mm. Podczas pomiaru rejestrowanych było 321 profili (oś y). Odległość między profilami wynosiła $15 \mu\text{m}$. Na jednym profilu rejestrowano 2401 punktów (oś x). Odległość między punktami profilu wynosiła $2 \mu\text{m}$. Każdy pomiar był realizowany w trybie jednorzebiegowym. Czas pomiaru jednego obszaru wynosił 4024 s. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano analizie przy użyciu specjalistycznego oprogramowania TalyMap Platinum 4.0 firmy Taylor-Hobson Ltd.

Zestawienie otrzymanych mikrotopografii powierzchni zamieszczono na rysunku 56 dla powierzchni po procesie cięcia strumieniem fotonów oraz na rysunku 57 dla powierzchni po procesie cięcia strugą wodno-ścierną.



Rys. 56. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b=6\text{ mm}$ (a-i) przy zmiennych parametrach $P = 4, 5, 6\text{ kW}$ oraz prędkości posuwu $v_{LASER} = 10, 20, 30\text{ mm/s}$; o grubości $g_b=8\text{ mm}$ (j-l) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6\text{ kW}$ i stałej prędkości posuwu $v_{LASER} = 30\text{ mm/s}$; o grubości $g_b=10\text{ mm}$ (ł-n) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6\text{ kW}$ i stałej prędkości posuwu $v_{LASER} = 30\text{ mm/s}$ z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętymi strumieniem fotonów



Rys. 57. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b = 6$ mm (a-i) przy zmiennych parametrach $v_{fAWJ} = 0,8; 1,66; 2,5$ mm/s oraz $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s; o grubości $g_b = 8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s; o grubości $g_b = 10$ mm (l-n) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strugą wodno-ścierną

Dla każdej z otrzymanych mikrotopografii powierzchni wyznaczano wartości wybranych parametrów SGP, zgodnie z powszechnie stosowaną metodyką dla tego typu powierzchni (Nowicki, 1991, Oczko i Liubimow, 2003):

- Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni),
- St (całkowita wysokość nierówności powierzchni),
- Sq (średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni),
- Sds (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni),
- Str (wskaźnik tekstury powierzchni),
- $Smmr$ (średnia objętość materiału),
- $Smvr$ (średnia objętość pustek – miejsc wolnych od materiału).

W tabelach 22-28 zestawiono parametry Sa , St , Sq , Sds , Str , $Smmr$, $Smvr$ zmierzone na wyznaczonej powierzchni po wycięciu elementów zgodnie z przyjętą metodyką badań. Natomiast na rysunkach 58-64 zaprezentowano wykresy ilustrujące zmiany wartości parametrów SGP w zależności od przyjętych parametrów procesu cięcia strumieniem fotonów (na rysunkach od 58a-c do 64a-c) i strugą wodno-ścierną (na rysunkach od 58a-c do 64d-f) dla trzech rozpatrywanych grubości blachy g_b wynoszącej 6, 8 i 10 mm.

Tab. 22. Wyniki pomiarów wartości parametru Sa chropowatości powierzchni

Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_f LASER, mm/s	Sa dla $g_b=6$ mm, μm	Sa dla $g_b=8$ mm, μm	Sa dla $g_b=10$ mm, μm	Prędkość posuwu głowicy v_f AWJ, mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Sa dla $g_b=6$ mm, μm	Sa dla $g_b=8$ mm, μm	Sa dla $g_b=10$ mm, μm
4,0	10	13,9	31,1	49,8	0,8	0,0050	9,22	10,0	7,49
4,0	20	14,7	25,5	51,0	0,8	0,0066	10,0	6,9	5,62
4,0	30	59,9	50,5	109	0,8	0,0083	7,9	6,33	5,56
5,0	10	14,1	25,4	19,7	1,66	0,0050	23,7	11,6	13,8
5,0	20	15,3	19,8	95,5	1,66	0,0066	13,0	8,86	7,15
5,0	30	16,7	88,1	88,5	1,66	0,0083	14,0	12,2	12,0
6,0	10	16,8	82,3	20,9	2,5	0,0050	28,7	25,7	46,3
6,0	20	14,6	88,2	84,5	2,5	0,0066	26,2	19,9	17,3
6,0	30	14,7	85,4	101	2,5	0,0083	16,5	14,6	15,4

Tab. 23. Wyniki pomiarów wartości parametru St chropowości powierzchni

Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_f LASER, mm/s	St dla $g_b=6$ mm, μm	St dla $g_b=8$ mm, μm	St dla $g_b=10$ mm, μm	Prędkość posuwu głowicy v_f AWJ, mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	St dla $g_b=6$ mm, μm	St dla $g_b=8$ mm, μm	St dla $g_b=10$ mm, μm
4,0	10	106	151	453	0,8	0,0050	90,9	63,6	80,9
4,0	20	113	157	578	0,8	0,0066	84,1	46,7	36,6
4,0	30	619	568	680	0,8	0,0083	51,4	53,1	36,9
5,0	10	96,0	139	139	1,66	0,0050	110	87,7	79,2
5,0	20	108	126	767	1,66	0,0066	93,2	61,7	54,2
5,0	30	106	524	625	1,66	0,0083	79,2	79,2	91,2
6,0	10	138	639	151	2,5	0,0050	174	211	255
6,0	20	95,0	501	682	2,5	0,0066	151	143	120
6,0	30	126	523	643	2,5	0,0083	104	99,0	99,0

Tab. 24. Wyniki pomiarów wartości parametru Sq chropowości powierzchni

Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_f LASER, mm/s	Sq dla $g_b=6$ mm, μm	Sq dla $g_b=8$ mm, μm	Sq dla $g_b=10$ mm, μm	Prędkość posuwu głowicy v_f AWJ, mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Sq dla $g_b=6$ mm, μm	Sq dla $g_b=8$ mm, μm	Sq dla $g_b=10$ mm, μm
4,0	10	18,1	36,7	0,6	0,8	0,0050	11,5	12,1	9,57
4,0	20	18,7	30,3	0,6	0,8	0,0066	13,1	8,63	7,2
4,0	30	7,1	6,3	1,3	0,8	0,0083	9,86	7,89	7,01
5,0	10	18,4	31,3	25,1	1,66	0,0050	27,6	14,4	16,9
5,0	20	19,5	25,8	1,1	1,66	0,0066	16,0	10,8	8,97
5,0	30	19,9	10,4	1	1,66	0,0083	16,9	14,8	15,1
6,0	10	21,8	9,9	26,6	2,5	0,0050	34,2	33,6	55,4
6,0	20	18,7	10,4	10	2,5	0,0066	30,7	24,8	21,7
6,0	30	20,7	1	1,1	2,5	0,0083	19,9	18,0	19,1

Tab. 25. Wyniki pomiarów wartości parametru Sds chropowości powierzchni

Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_f LASER, mm/s	Sds dla $g_b=6$ mm, $1/\text{mm}^2$	Sds dla $g_b=8$ mm, $1/\text{mm}^2$	Sds dla $g_b=10$ mm, $1/\text{mm}^2$	Prędkość posuwu głowicy v_f AWJ, mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Sds dla $g_b=6$ mm, $1/\text{mm}^2$	Sds dla $g_b=8$ mm, $1/\text{mm}^2$	Sds dla $g_b=10$ mm, $1/\text{mm}^2$
4,0	10	1134	1076	835	0,8	0,0050	1087	1084	1130
4,0	20	1130	1120	785	0,8	0,0066	1096	1102	1123
4,0	30	807	737	714	0,8	0,0083	1075	1093	1068
5,0	10	1152	1107	1118	1,66	0,0050	1047	1090	1107
5,0	20	1120	1121	775	1,66	0,0066	1064	1085	1103
5,0	30	1137	749	806	1,66	0,0083	1051	1105	1113
6,0	10	1109	774	1112	2,5	0,0050	1032	970	904
6,0	20	1111	764	763	2,5	0,0066	1050	1094	1058
6,0	30	1173	778	704	2,5	0,0083	1065	1108	1080

Tab. 26. Wyniki pomiarów wartości parametru Str chropowatości powierzchni

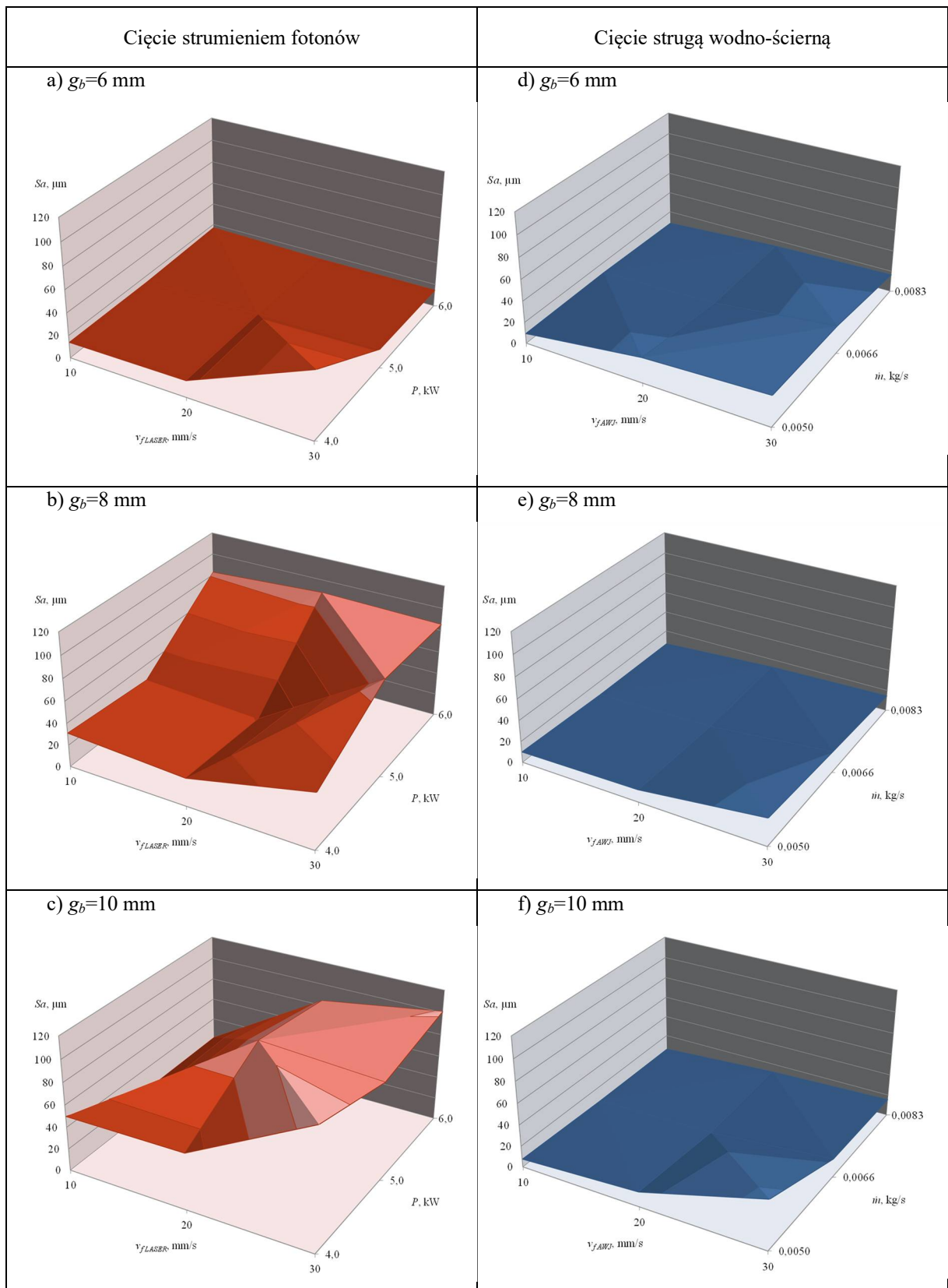
Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_{LASER} , mm/s	Str dla $g_b=6$ mm	Str dla $g_b=8$ mm	Str dla $g_b=10$ mm	Prędkość posuwu głowicy v_{FAWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Str dla $g_b=6$ mm	Str dla $g_b=8$ mm	Str dla $g_b=10$ mm
4,0	10	0,273	0,386	0,279	0,8	0,0050	0,496	0,384	0,215
4,0	20	0,27	0,386	0,181	0,8	0,0066	0,383	0,332	0,409
4,0	30	0,291	0,211	0,269	0,8	0,0083	0,359	0,428	0,309
5,0	10	0,269	0,387	0,392	1,66	0,0050	0,488	0,164	0,246
5,0	20	0,274	0,388	0,378	1,66	0,0066	0,393	0,352	0,0949
5,0	30	0,27	0,328	0,387	1,66	0,0083	0,393	0,348	0,297
6,0	10	0,272	0,325	0,391	2,5	0,0050	0,396	0,24	0,386
6,0	20	0,274	0,287	0,263	2,5	0,0066	0,415	0,328	0,27
6,0	30	0,269	0,264	0,383	2,5	0,0083	0,409	0,238	0,237

Tab. 27. Wyniki pomiarów wartości parametru $Smmr$ chropowatości powierzchni

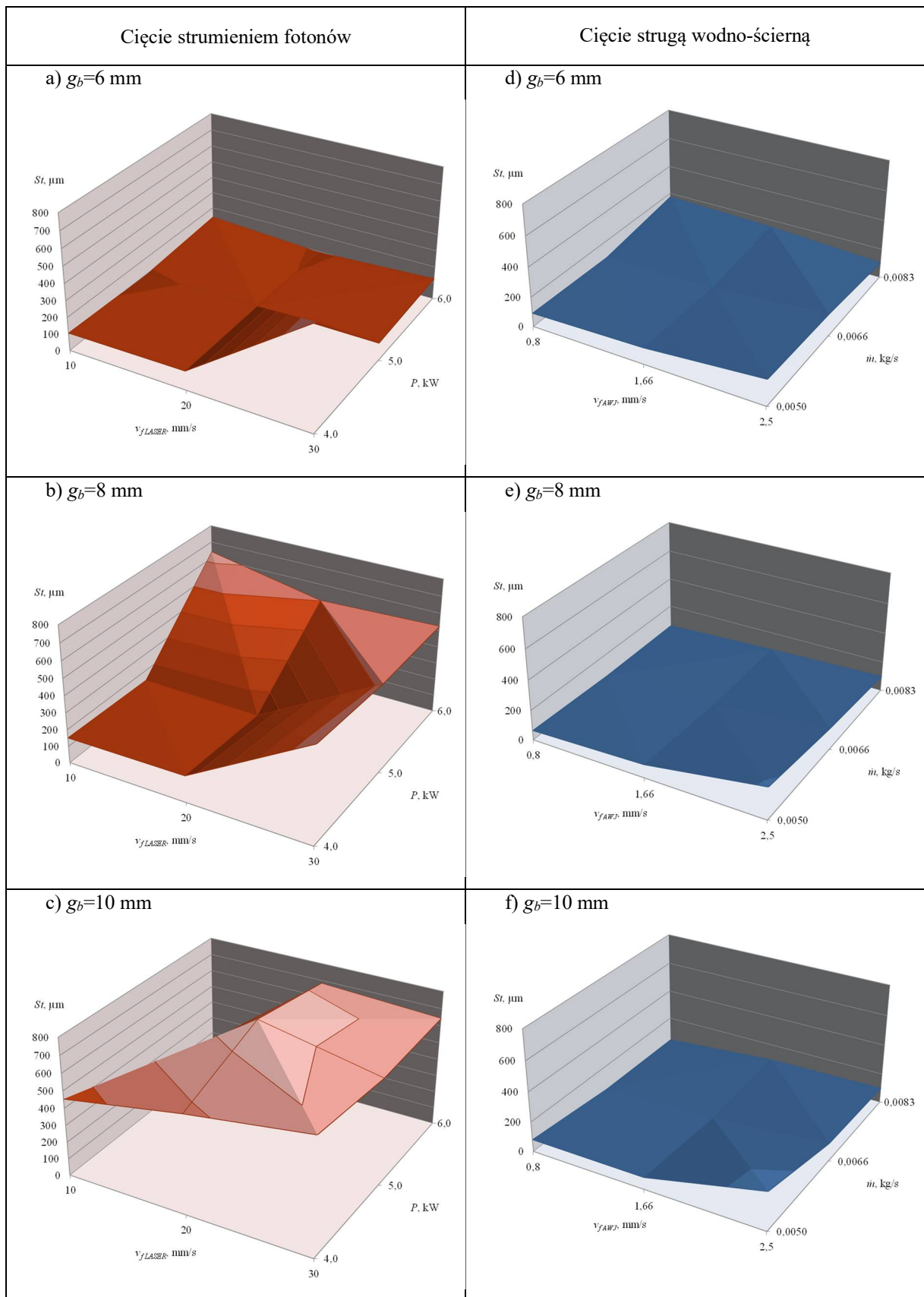
Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_{LASER} , mm/s	$Smmr$ dla $g_b=6$ mm, mm^3/mm^2	$Smmr$ dla $g_b=8$ mm, mm^3/mm^2	$Smmr$ dla $g_b=10$ mm, mm^3/mm^2	Prędkość posuwu głowicy v_{FAWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	$Smmr$ dla $g_b=6$ mm, mm^3/mm^2	$Smmr$ dla $g_b=8$ mm, mm^3/mm^2	$Smmr$ dla $g_b=10$ mm, mm^3/mm^2
4,0	10	0,0609	0,0949	0,204	0,8	0,0050	0,0487	0,0384	0,0548
4,0	20	0,0725	0,0455	0,244	0,8	0,0066	0,0465	0,0243	0,0212
4,0	30	0,390	0,322	0,321	0,8	0,0083	0,0282	0,0312	0,0197
5,0	10	0,0575	0,0848	0,0833	1,66	0,0050	0,0622	0,0443	0,0359
5,0	20	0,057	0,0782	0,431	1,66	0,0066	0,0556	0,0314	0,0288
5,0	30	0,0477	0,213	0,297	1,66	0,0083	0,046	0,047	0,0467
6,0	10	0,085	0,308	0,0889	2,5	0,0050	0,0983	0,107	0,135
6,0	20	0,0612	0,213	0,395	2,5	0,0066	0,0843	0,0605	0,0688
6,0	30	0,0715	0,268	0,282	2,5	0,0083	0,0614	0,0499	0,0504

Tab. 28. Wyniki pomiarów wartości parametru $Smvr$ chropowatości powierzchni

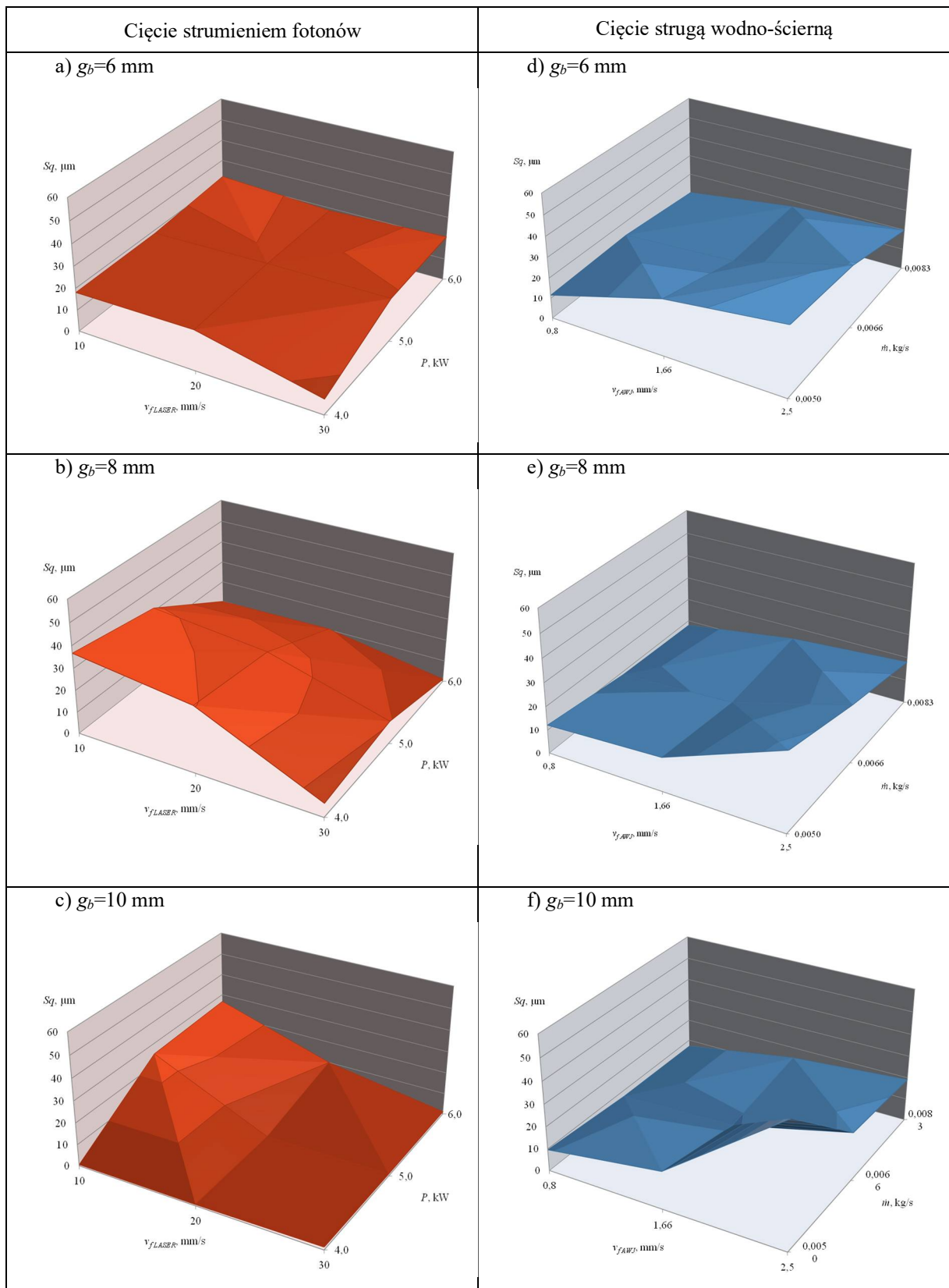
Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów					Proces cięcia strugą wodno-ścierną				
Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy v_{LASER} , mm/s	$Smvr$ dla $g_b=6$ mm, mm^3/mm^2	$Smvr$ dla $g_b=8$ mm, mm^3/mm^2	$Smvr$ dla $g_b=10$ mm, mm^3/mm^2	Prędkość posuwu głowicy v_{FAWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	$Smvr$ dla $g_b=6$ mm, mm^3/mm^2	$Smvr$ dla $g_b=8$ mm, mm^3/mm^2	$Smvr$ dla $g_b=10$ mm, mm^3/mm^2
4,0	10	0,0454	0,056	0,248	0,8	0,0050	0,0422	0,0251	0,0261
4,0	20	0,0408	0,111	0,334	0,8	0,0066	0,0376	0,0224	0,0184
4,0	30	0,229	0,246	0,358	0,8	0,0083	0,0233	0,0219	0,0172
5,0	10	0,0388	0,0543	0,056	1,66	0,0050	0,0475	0,0433	0,0433
5,0	20	0,0511	0,0481	0,337	1,66	0,0066	0,0376	0,0303	0,0256
5,0	30	0,0582	0,311	0,328	1,66	0,0083	0,0332	0,0322	0,0445
6,0	10	0,0533	0,331	0,0617	2,5	0,0050	0,0755	0,105	0,121
6,0	20	0,0341	0,288	0,287	2,5	0,0066	0,0669	0,083	0,0509
6,0	30	0,0543	0,255	0,361	2,5	0,0083	0,0422	0,0491	0,0486



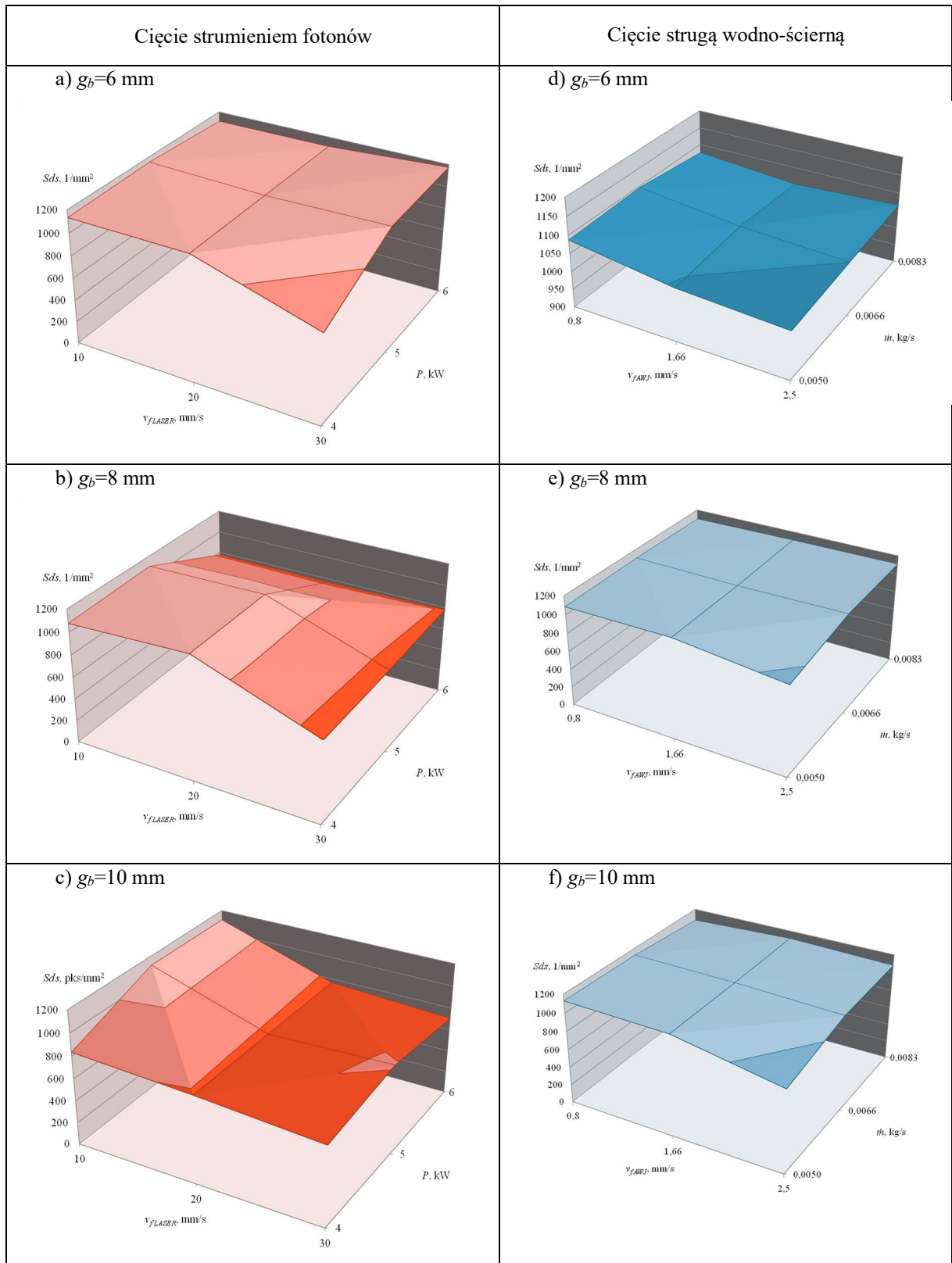
Rys. 58. Zmiany wartości parametru S_a powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{LASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{AWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



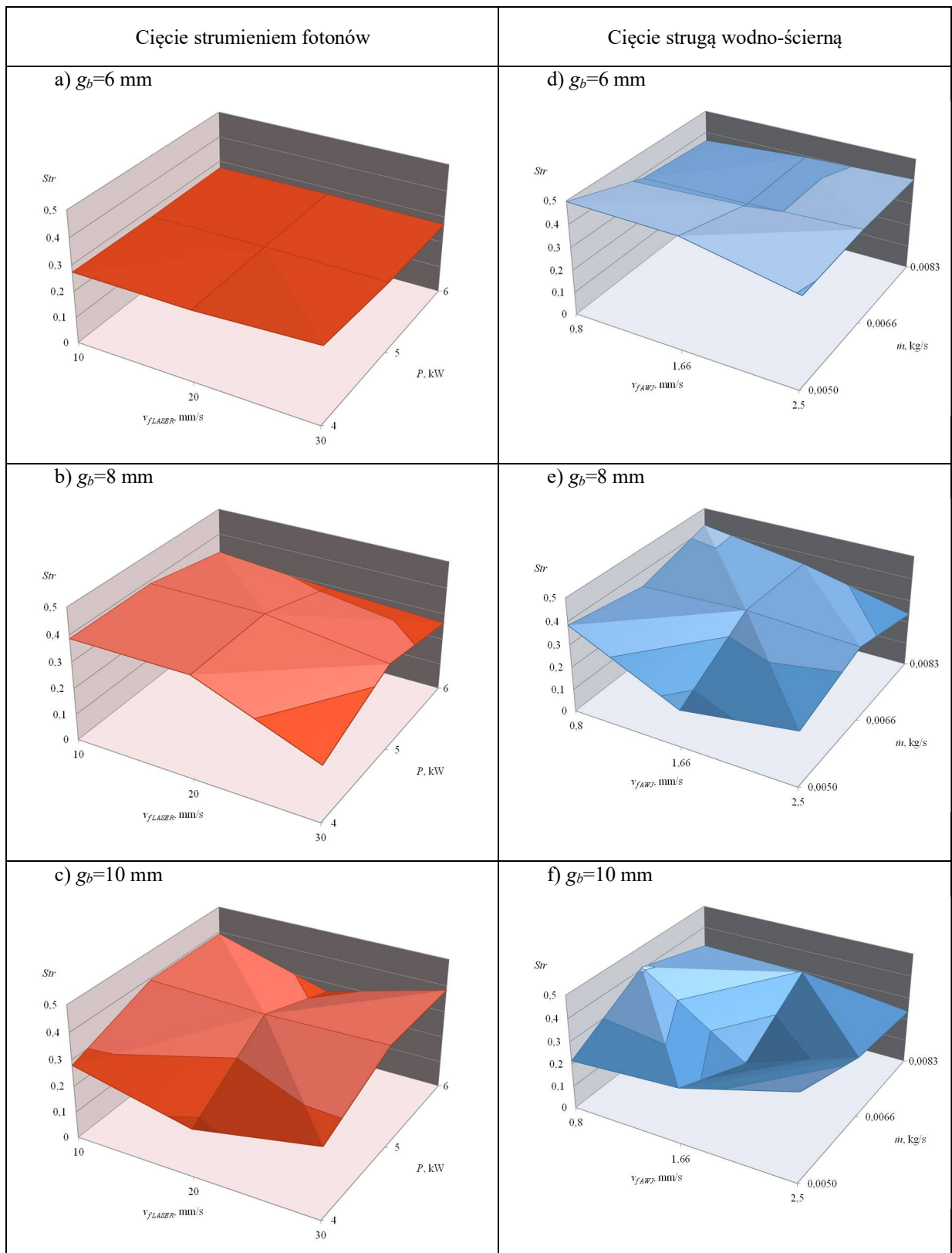
Rys. 59. Zmiany wartości parametru St powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



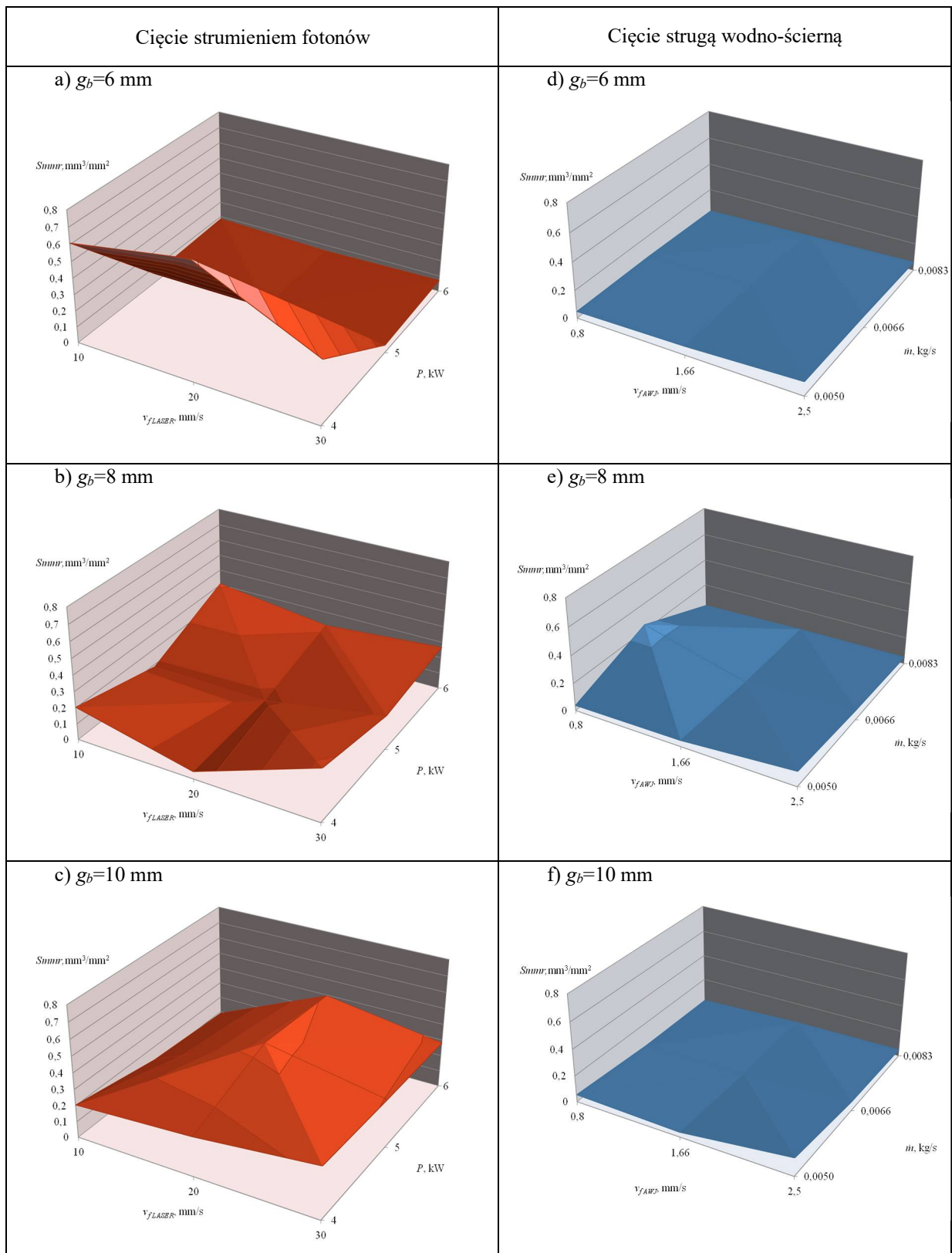
Rys. 60. Zmiany wartości parametru S_q powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{LASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{AWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



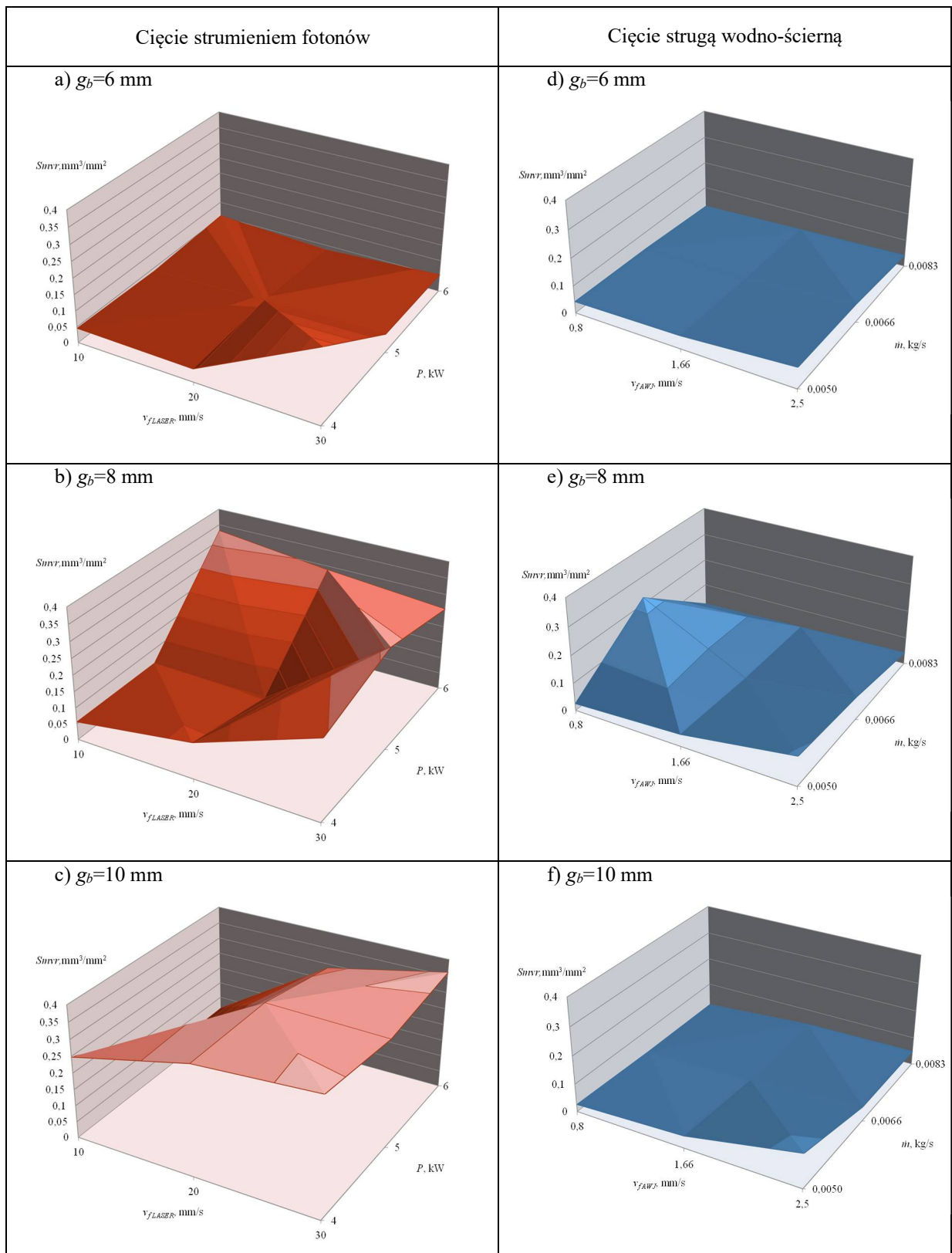
Rys. 61. Zmiany wartości parametru Sds powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{LASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa m , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{AWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



Rys. 62. Zmiany wartości parametru Str powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



Rys. 63. Zmiany wartości parametru $Smmr$ powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną



Rys. 64. Zmiany wartości parametru $Smvr$ powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w zależności od zmiennej mocy P oraz prędkości posuwu głowicy tnącej v_{LASER} oraz v_{AWJ} w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną

Analiza zmian wartości parametru Sa dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów pokazanych na rysunku 58a-c wykazała, że najbardziej znaczący wpływ na uzyskane wyniki pomiarów ma grubość ciętego materiału. Zmiana grubości blachy z 6 mm na 8 mm, a w ostateczności na 10 mm, spowodowała w przybliżeniu podwojenie wartości średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni Sa . Wpływ pozostałych zmiennych parametrów procesu (prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} oraz mocy źródła laserowego P) był mniej znaczący i różnił się w odniesieniu do poszczególnych grubości blach. Natomiast wpływ pozostałych zmiennych parametrów procesu cięcia strugą wodno-ścierną pokazanych na rysunku 58d-f (prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} oraz od wydatku ścierniwa \dot{m}) był znacznie mniejszy.

Analiza zmian wartości parametru St dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów pokazanych na rysunku 59 wykazała, że najbardziej znaczący wpływ na uzyskane wyniki pomiarów ma grubość ciętego materiału g_b oraz prędkość posuwu głowicy v_{fLASER} . Najwyższą całkowitą wysokość nierówności 767 μm zmierzono na powierzchni po cięciu strumieniem fotonów przy średniej prędkości cięcia 20 mm/s oraz średniej mocy lasera $P=5$ kW (rys. 59b). Wysokość nierówności równą 682 μm zanotowano przy cięciu średnią wartością prędkości posuwu 20 mm/s i największej wartości mocy strumienia fotonów $P=6$ kW (rys. 59c). Najmniejszą natomiast wartość parametru St o wartości 36,9 μm zaobserwowano po cięciu strugą wodno-ścierną dla blachy 10 mm i parametrów cięcia: prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} 0,8 i wydatku ścierniwa \dot{m} 0,0066 oraz 0,0083.

Analiza wartości parametru Sq przedstawionych w formie wykresów na rysunku 60 wykazała, że zwiększanie wartości prędkości posuwu głowicy tnącej v_f powoduje zmniejszanie wartości tego parametru, zmierzonej na powierzchni po cięciu. Dotyczy to obu analizowanych metod cięcia. Drugim istotnie wpływającym czynnikiem była grubość blachy g_b . Zwiększenie grubości blachy g_b z 6 mm do 10 mm spowodowało około 4% zmniejszenie wartości parametru Sq w przypadku powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną, oraz zwiększenie parametru o około 5% dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów. Dla pozostałych wielkości nastawnych eksperymentów (mocy źródła laserowego P oraz wydatku ścierniwa \dot{m}) nie zauważono jednoznacznego wpływu na średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni przecięcia Sq . Zwiększenie grubości blachy g_b spowodowało duże niedokładności w cięciu strumieniem fotonów i związane z tym zwiększenie wartości parametru Sq . Nie zaobserwowano tak dużego zwiększania parametru przy cięciu strugą wodno-ścierną, gdzie powierzchnia po cięciu była zbliżona dla blachy 6, 8 oraz 10 mm. Wartość parametru Sq była największa dla małych wartości mocy lasera P i dużych wartości prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} .

Analiza zmian wartości parametru Sds dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 61 wykazała, że największą gęstość wierzchołków nierówności powierzchni po cięciu zaobserwowano na powierzchni po cięciu strumieniem fotonów blachy o $g_b=6$ mm, gdzie parametr Sds wyniósł około 1130 $1/\text{mm}^2$ przy cięciu z mocą $P=30$ kW oraz prędkością posuwu $v_{fAWJ}=30$ mm/s (rys. 61a). Podobną wartość około 1130 $1/\text{mm}^2$ można zaobserwować przy cięciu elementu z blachy grubości $g_b=8$ i 10 mm strugą wodno-ścierną z najmniejszą prędkością posuwu głowicy $v_{fAWJ}=0,8$ mm/s oraz najmniejszym wydatkiem ścierniwa $\dot{m}=0,005$ kg/s (rys. 61e-f). Nie zauważono znaczącego wpływu grubości blachy g_b na zmierzone wartości opisywanego parametru. Zagęszczenie występowania wierzchołków nierówności nieznacznie zmniejsza się wraz ze zwiększaniem prędkości posuwu głowicy tnącej v_f dla obu metod.

Analiza zmian wartości parametru Str dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 62 wykazała najwyższą wartość tego parametru (opisującego izotropowość) dla wyników przedstawionych na rysunku 62d, gdzie parametr ten wyniósł $0,5$ przy najmniejszej wartości prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} w procesie cięcia strugą wodno-ścierną oraz najmniejszym poziomie wartości wydatku ścierniwa \dot{m} . Następnie po tym wyniku wartości parametru wynoszące około $0,4$ zarejestrowano na powierzchniach ciętych strumieniem fotonów z prędkością $v_{fLASER}=10$ mm/s z blachy o grubości $g_b=8$ mm przy mocy lasera $P=4$ i 5 kW (rys. 62b) oraz z blachy o grubości $g_b=10$ mm przy mocy lasera $P=5$ i 6 kW (rys. 62c). Przy cięciu strugą wodno-ścierną wartość parametru $Str=0,4$ osiągnięto tnąc przy największej i najmniejszej wartości wydatku ścierniwa \dot{m} z blachy o grubości $g_b=8$ mm oraz najmniejszej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ}=0,8$ mm/s (rys. 62e).

Analiza zmian wartości parametru $Smmr$ dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 63 wykazała, że najbardziej znaczący wpływ na uzyskane wyniki pomiarów ma prędkość posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} . Najwyższą wartość parametru $Smmr$ (około $0,6$ średniej objętości materiału w mm^3 na mm^2) osiągnięto przy cięciu strumieniem fotonów przy najmniejszej mocy P oraz najmniejszej wartości prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (rys. 63a). Najniższą wartość parametru wynosiła $0,005$ przy cięciu strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=8$ i 10 mm dla wszystkich parametrów (rys. 63a i 63c) oraz przy cięciu strumieniem fotonów z prędkością posuwu $v_{fLASER}=20$ mm/s i mocy lasera $P=5$ kW z blachy o grubości $g_b=8$ mm (rys. 63b) gdzie wartość ta wynosiła $0,072$.

Analiza zmian wartości parametru $Smvr$ dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 64 wykazała, że najbardziej znaczący wpływ

na uzyskane wyniki pomiarów ma prędkość cięcia v_{fLASER} oraz v_{fAWJ} . Największą wartość 0,36 średniej objętości pustek w mm^3 na mm^2 osiągnięto w cięciu strumieniem fotonów przy grubości blachy 10 mm, największej i najmniejszej mocy P oraz największej prędkości głowicy v_{fLASER} (rys. 64c). Najmniejszą wartość parametru 0,0172 zaobserwowano tnąc blachę o grubości $g_b=10$ mm strugą wodno-ścierną z najmniejszą prędkością $v_{fAWJ}=0,8$ mm/s i najmniejszym wydatku ściernia $\dot{m}=0,0050$ kg/s.

Analizując wykresy z rysunków 58-64 można zauważyć, że parametry SGP dla obu metod cięcia są bardzo podobne.

Przy cięciu strumieniem fotonów zaobserwowano, że wraz ze zwiększaniem prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} na powierzchni zarejestrowano niższe wartości parametrów Sa , St , Sq , Sds , Str , co jest korzystne z punktu widzenia jakości powierzchni przecięcia. Szczególnie jest to zauważalne przy cięciu z mocą 4 kW. Przy cięciu z mocą 5 i 6 kW wpływ prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} na jakość krawędzi ciętej był mniej zauważalny. Z kolei wartości parametrów $Smmr$ i $Smvr$ przy cięciu strumieniem fotonów są bardzo zróżnicowane. Wartość parametru $Smmr$ zauważalnie spada przy cięciu z mocą $P=5$ i 6 kW przy cięciu blachy o grubości $g_b=6$ i 8 mm. Parametr ten rośnie natomiast przy cięciu blachy o $g_b=10$ mm w całym zakresie mocy P , jednak tylko przy prędkości posuwu głowicy $v_{fLASER}=20$ mm/s (rys. 63c). Warto również zauważyć, że przy prędkości posuwu głowicy $v_{fLASER}=20$ mm/s oraz 30 mm/s parametr $Smmr$ ma mniejszą wartość. Możliwym wytłumaczeniem takich rezultatów pomiarów jest wpływ niemierzalnych zakłóceń występujących w procesie cięcia realizowanym w przemysłowych warunkach technologicznych, które w opisany sposób wpłynęły na wartości parametru $Smmr$. Parametr $Smvr$ szczególnie zwiększa wartość przy cięciu z mocą $P=6$ kW dla blachy o grubości $g_b=8$ mm oraz przy całym zakresie mocy przy blasze o grubości $g_b=10$ mm. W szczelinie cięcia stali X5CrNi18-10 zachodzi reakcja egzotermiczna spalania ciekłego metalu co w połączeniu z wydmuchiwanym materiałem przez gaz towarzyszący, przyczynia się do zwiększenia udziału średniej objętości pustek na powierzchni po cięciu materiału. Zauważono również, że cięcie z najwyższymi zadanymi parametrami nie jest korzystne z uwagi na powstanie zbyt dużych nierówności w postaci dolin w przecinanym elemencie. Przy największej wartości $P=6$ kW z przyjętego zakresu mocy oraz przy najmniejszej wartości prędkości posuwu głowicy tnącej $v_{fLASER}=10$ mm/s, zmierzone po cięciu parametry SGP przyjmują najkorzystniejsze wartości.

Przy cięciu strugą wodno-ścierną sytuacja jest podobna. Dla parametrów Sa , St , Sq , Sds , Str prędkość posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} nie wykazała znaczącego wpływu na wartości wymienionych parametrów. Nie zauważono natomiast znaczącego wpływu wydatku ścierniwa

\dot{m} na wartości parametrów SGP, ponieważ energia kinetyczna wytwarzana przez cząstki ściernie była stała z uwagi na stałą wartość ciśnienia strugi. Jednak zwiększenie grubości g_b przecinanego materiału przyczynia się do zwiększenia wartości parametrów opisujących falistość w dolnej części krawędzi przecięcia. Nie zauważono jednak wyraźnego wpływu zmian nastaw procesu na parametry $Smmr$ i $Smmvr$, z wyjątkiem cięcia blachy o grubości $g_b=8$ mm (rys. 63e i 64e), gdzie występuje nieznaczne zwiększenie obu parametrów przy wydatku ścierniwa $\dot{m}=0,0066$ kg/s i najmniejszej wartości prędkości cięcia $v_{fAWJ}=0,8$ mm/s. Można przypuszczać, że było to spowodowane intensywnym oddziaływaniem erozyjnym w strefie cięcia cząstek ścierniwa związanym z małą wartością prędkości posuwu v_{fAWJ} .

6.2. Analiza dokładności wymiarowej wyciętych elementów

Dodatkowo wykonano serię pomiarów dokładności wymiarowej 54 elementów wyciętych strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną w celu wyznaczenia najkorzystniejszych parametrów cięcia z punktu widzenia wytypowanych wskaźników oceny jakości po cięciu blachy wykonanej ze stali X5CrNi18-10. Wyniki pomiarów geometrycznych (długość wyciętego elementu l , mm oraz szerokość wyciętego elementu w , mm) elementów wyciętych z blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm zestawiono odpowiednio w tabelach 29-31.

Po przeprowadzeniu pomiarów dokładności wymiarowej wyznaczono odchyłki wyników pomiarów od wartości nominalnej (zadanej w procesie cięcia). Przy $g_b=6$ mm każdy wycięty strumieniem fotonów element wykazał ujemną odchyłkę od wymiaru zadanego wynoszącą około 0,1 mm, za wyjątkiem elementów 7-9 (tab. 29) wyciętych przy parametrach $P=4$ kW i $v_{fLASER}=30$ mm/s, dla których wynik pomiaru był większy od wymiaru zadanego o około 0,2 mm (rys. 65a i 66a). Wynikło to ze zbyt dużej prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} oraz zbyt niskiej mocy lasera P . Wartość mocy P oraz prędkość posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} wykazały znaczący wpływ na szerokość szczeliny przecięcia, co potwierdzają również badania Yilbasa i innych, 2012. Podobna sytuacja jest przy cięciu strugą wodno-ścierną, jednak tu odchyłkę ujemną od wymiaru zadanego wykazała szerokość we wszystkich przecinanych elementach (rys. 67a-c). Długość przecinanego elementu również była poniżej wymiaru zadanego nawet o 0,8 mm z wyjątkiem elementów 19-27 (tab. 29), które były wycięte z odchyłką dodatnią wynoszącą około 0,04-0,1 mm (rys. 68a-c). Nawet największa wartość wydatku ścierniwa \dot{m} 0,0083 kg/s z przyjętego zakresu przy cięciu strugą wodno-ścierną, nie wykazała wpływu na wielkość i kształt szczeliny przecięcia, co zaobserwowano w przypadku elementów 19-27 (tab. 29). Twierdzenie to potwierdzają również badania Spadło i innych, 2017.

Tab. 29. Wyniki pomiarów gabarytowych 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=6$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki)

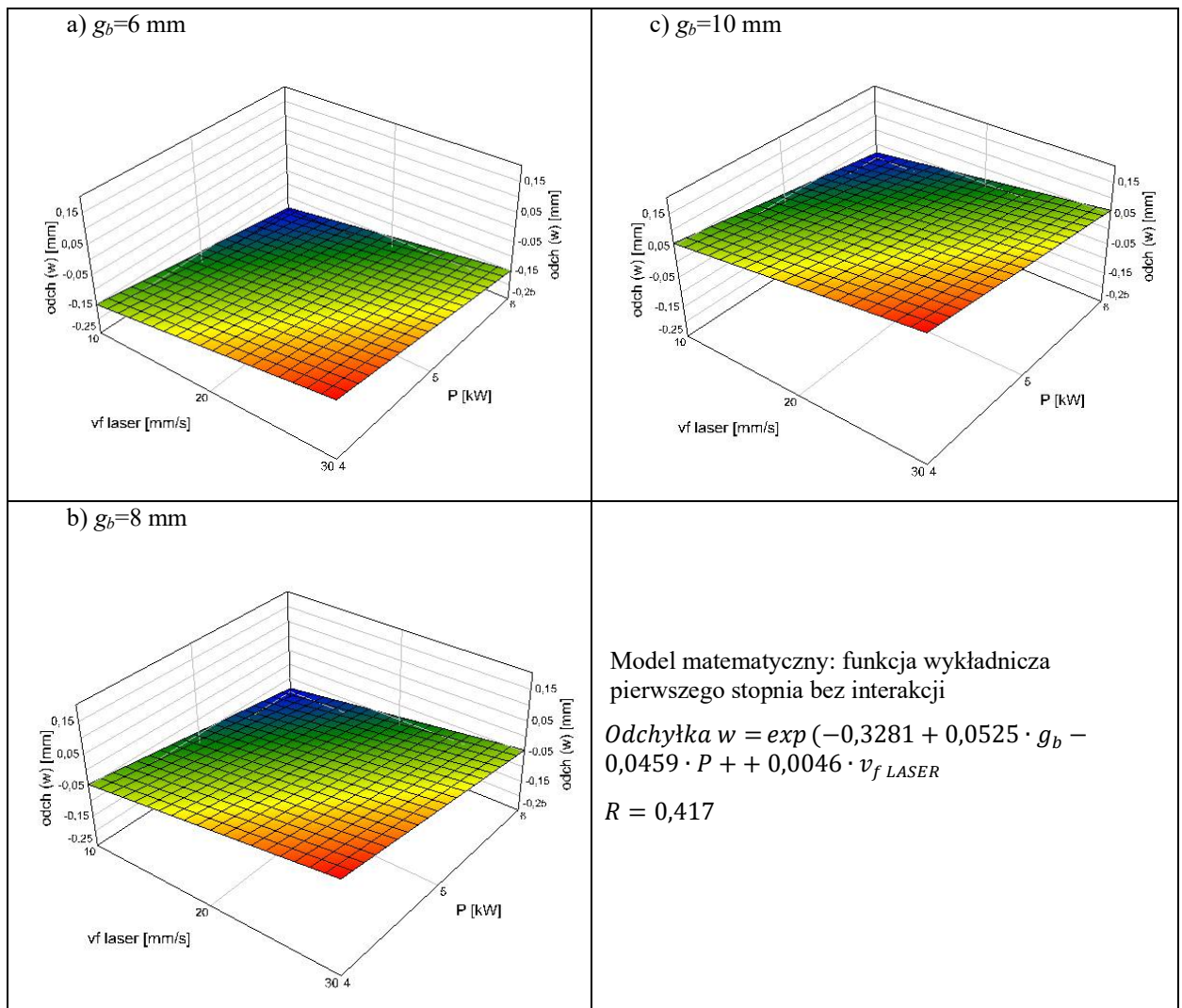
Nr pomiaru	Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{LASER} , mm/s	Strumień fotonów		Posuw głowicy tnącej strugą wodno-ścierną v_{AWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Struga wodno-ścierna	
			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm
1.	4	10	-0,074	-0,066	0,8	0,005	-0,253	-0,196
2.			-0,091	0,097			-0,314	-0,182
3.			-0,092	-0,046			-0,315	-0,194
4.	4	20	-0,088	-0,160	0,8	0,0066	-0,377	-0,219
5.			-0,044	-0,198			-0,360	-0,187
6.			0,121	-0,202			-0,225	-0,215
7.	4	30	0,228	0,216	0,8	0,0083	-0,367	-0,330
8.			0,563	0,142			-0,371	-0,254
9.			0,252	0,162			-0,377	-0,309
10.	5	10	-0,129	-0,190	1,66	0,005	-0,174	-0,009
11.			-0,115	-0,167			-0,223	-0,036
12.			0,097	-0,185			-0,725	-0,036
13.	5	20	-0,083	-0,042	1,66	0,0066	-0,217	-0,132
14.			-0,093	-0,033			-0,288	-0,039
15.			0,123	-0,017			-0,758	-0,073
16.	5	30	-0,090	-0,068	1,66	0,0083	-0,651	-0,072
17.			-0,064	-0,163			-0,267	-0,027
18.			-0,053	-0,116			-0,170	-0,036
19.	6	10	-0,136	-0,167	2,5	0,005	-0,007	0,105
20.			-0,380	-0,186			-0,068	0,148
21.			-0,113	-0,060			-0,243	0,183
22.	6	20	-0,047	-0,174	2,5	0,0066	-0,170	-0,033
23.			-0,048	-0,142			-0,235	0,046
24.			-0,027	-0,183			-0,242	0,047
25.	6	30	-0,097	-0,076	2,5	0,0083	-0,313	0,100
26.			-0,087	-0,125			-0,147	0,045
27.			-0,094	-0,030			-0,118	0,087

Tab. 30. Wyniki pomiarów dokładności wymiarowej 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=8$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki)

Nr pomiaru	Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{LASER} , mm/s	Strumień fotonów		Posuw głowicy tnącej strugą wodno-ścierną v_{AWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Struga wodno-ścierna	
			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm
1.	4	10	-0,253	-0,196	0,8	0,005	-0,313	-0,063
2.			-0,314	-0,182			-0,309	-0,125
3.			-0,315	-0,194			-0,252	-0,121
4.	4	20	-0,377	-0,219	0,8	0,0066	-0,319	-0,192
5.			-0,360	-0,187			-0,308	-0,155
6.			-0,225	-0,215			-0,143	-0,184
7.	4	30	-0,367	-0,330	0,8	0,0083	-0,336	-0,195
8.			-0,371	-0,254			-0,338	-0,232
9.			-0,377	-0,309			-0,320	-0,230
10.	5	10	-0,174	-0,009	1,66	0,005	-0,088	0,105
11.			-0,223	-0,036			-0,102	0,246
12.			-0,725	-0,036			-0,126	0,158
13.	5	20	-0,217	-0,132	1,66	0,0066	-0,152	-0,063
14.			-0,288	-0,039			-0,188	0
15.			-0,758	-0,073			-0,119	0
16.	5	30	-0,651	-0,072	1,66	0,0083	-0,206	0
17.			-0,267	-0,027			-0,111	-0,011
18.			-0,170	-0,036			-0,155	0
19.	6	10	-0,007	0,105	2,5	0,005	0,060	0,414
20.			-0,068	0,148			0,083	0,575
21.			-0,243	0,183			0,119	0,485
22.	6	20	-0,170	-0,033	2,5	0,0066	-0,038	0,380
23.			-0,235	0,046			-0,078	0,292
24.			-0,242	0,047			0,033	0,345
25.	6	30	-0,313	0,100	2,5	0,0083	0	0,265
26.			-0,147	0,045			-0,007	0,246
27.			-0,118	0,087			-0,028	0,191

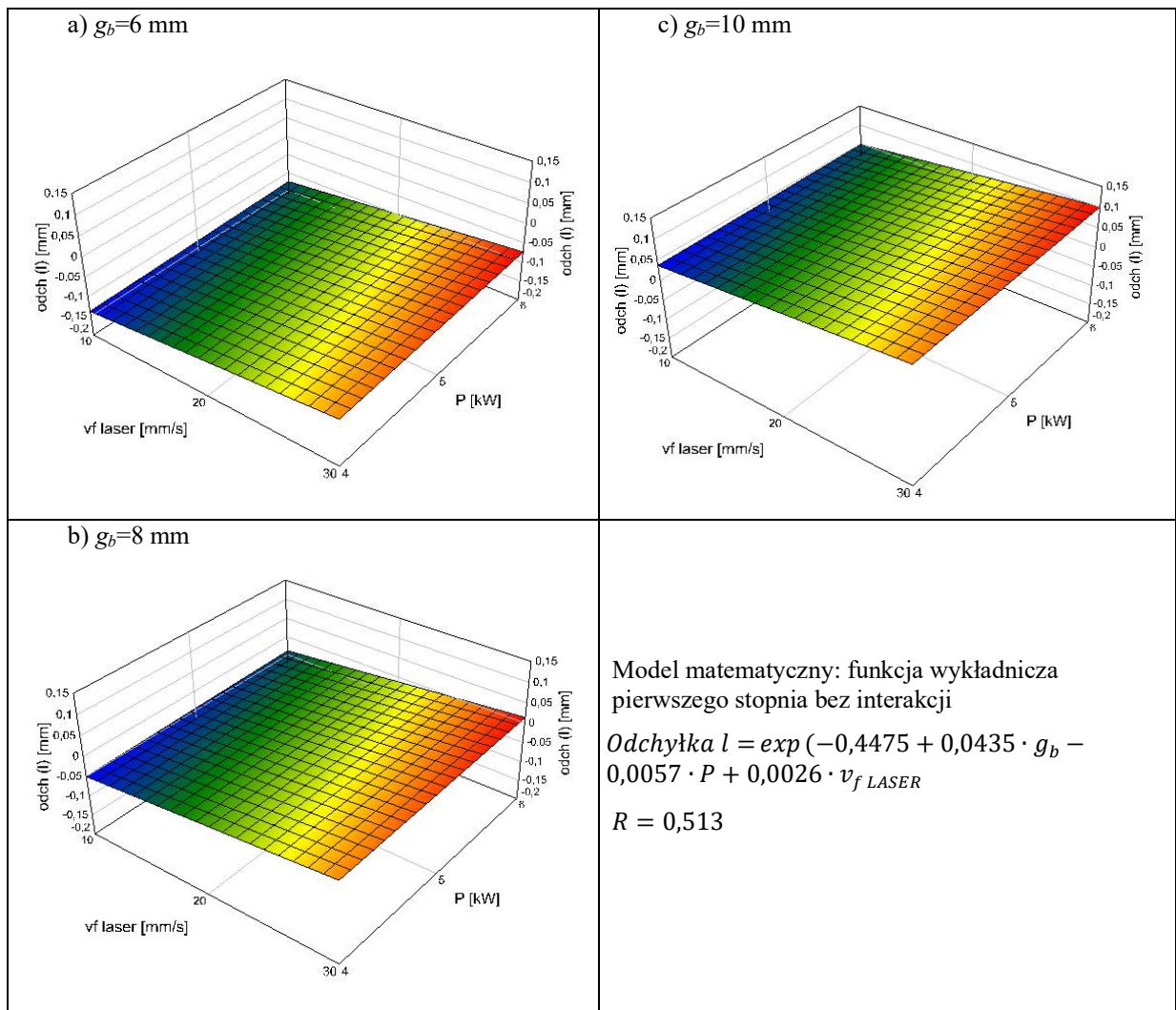
Tab. 31. Wyniki pomiarów dokładności wymiarowej 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=10$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki)

Nr pomiaru	Moc lasera P , kW	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{LASER} , mm/s	Strumień fotonów		Posuw głowicy tnącej strugą wodno-ścierną v_{AWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Struga wodno-ścierna	
			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm			Odchyłka szerokości wyciętego elementu w , mm	Odchyłka długości wyciętego elementu l , mm
1.	4	10	0,282	0,245	0,8	0,005	-0,263	-0,147
2.			0,396	0,063			-0,214	-0,043
3.			0,401	0,221			-0,206	-0,157
4.	4	20	0,271	0,100	0,8	0,0066	-0,351	-0,230
5.			0,269	0,098			-0,071	-0,230
6.			0,279	0,163			-0,261	-0,165
7.	4	30	0,267	0,156	0,8	0,0083	-0,046	-0,096
8.			0,242	0,221			-0,352	-0,195
9.			0,223	0,123			-0,282	-0,191
10.	5	10	0,007	-0,039	1,66	0,005	0,013	0,063
11.			0,064	-0,058			-0,011	0,221
12.			0,053	0,303			0,092	0,300
13.	5	20	0,223	0,104	1,66	0,0066	-0,193	0,250
14.			0,306	0,122			-0,083	0,142
15.			0,305	0,114			-0,164	0,144
16.	5	30	0,313	0,248	1,66	0,0083	-0,162	-0,017
17.			0,338	0,197			-0,067	0,085
18.			0,227	0,169			-0,124	0,082
19.	6	10	-0,237	-0,236	2,5	0,005	0,268	0,285
20.			-0,21	-0,188			0,278	0,563
21.			-0,21	-0,206			0,091	0,479
22.	6	20	0,274	0,140	2,5	0,0066	0,009	0,482
23.			0,346	0,115			0,010	0,565
24.			0,269	0,271			0,080	0,462
25.	6	30	0,011	0,027	2,5	0,0083	0,032	0,352
26.			0,028	0			0,157	0,528
27.			0,027	0,048			-0,022	0,474



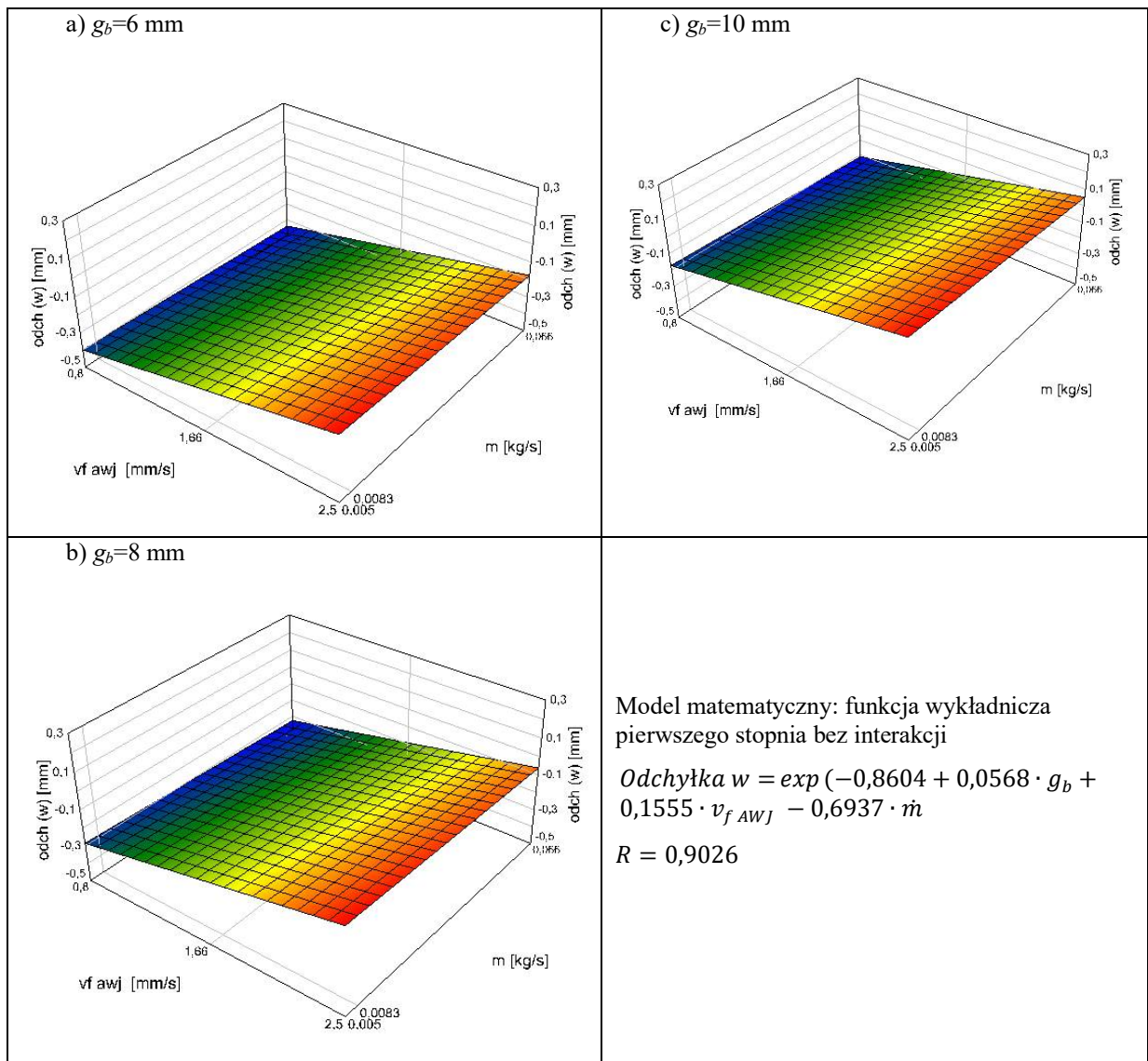
Rys. 65. Wykres modelu matematycznego odchyłki szerokości w opracowanego na podstawie danych z pomiarów szerokości elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy $v_{f \text{ LASER}}$ oraz mocy lasera P

Przy cięciu strumieniem fotonów blachy $g_b=8$ mm elementy 1-6, 10-15 wykazały się ujemną odchyłką wymiarową o około 0,2 mm (tab. 30). Pozostałe elementy miały większą zarówno szerokość o około 0,2 mm jak i długość o około 0,1 mm. Elementy wycięte strugą wodno-ścierną z tej samej grubości blachy wykazały ujemną odchyłkę szerokości nawet o 0,3 mm za wyjątkiem elementu 20-21 oraz 24-25. Długość elementów 1-9 była mniejsza od zadanej o około 0,05-0,2 mm, pozostałe elementy zostały wycięte z wartością większą od zadanej nawet 0,5 mm. Warto zaznaczyć, że podobnie jak przy cięciu blachy $g_b=6$ mm wydatek ścierniwa m nie wpływał znacząco na wymiar elementu po cięciu, natomiast duży wpływ miała prędkość głowicy $v_{f \text{ AWJ}}$.



Rys. 66. Wykres modelu matematycznego odchyłki długości l opracowanego na podstawie danych z pomiarów długości elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy $v_{f \text{ LASER}}$ oraz mocy lasera P

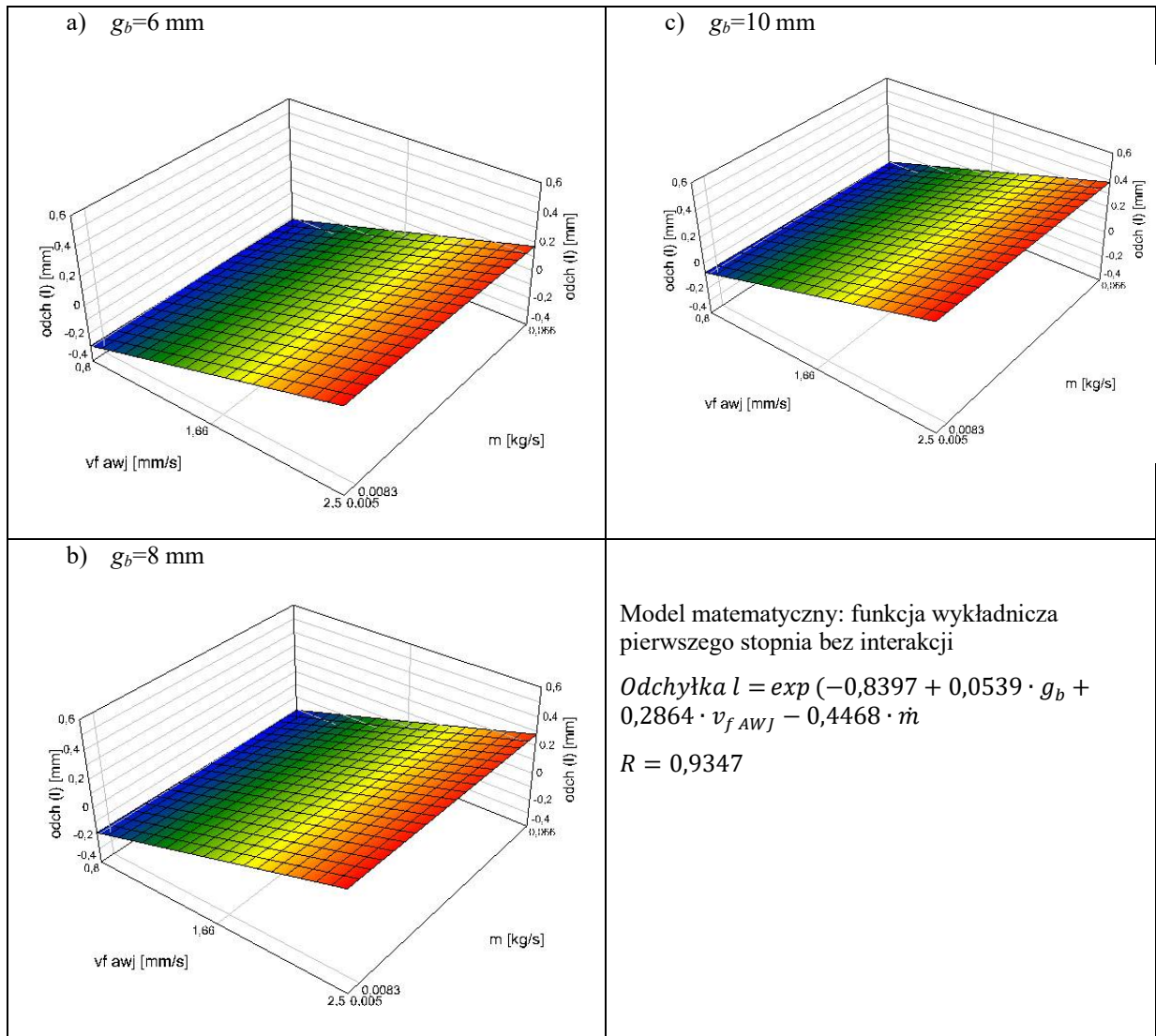
Wymiar elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy $g_b=10$ mm odznaczał się dużą odchyłką dodatnią szerokości nawet o 0,4 mm (rys. 67c) za wyjątkiem elementów 19-21 (tab. 31), gdzie wykazano odchyłkę ujemną 0,2 mm zarówno dla szerokości w jak i dla długości l (rys. 66c i 67c). Oznacza to, że mimo najwyższej mocy lasera P i najniższej prędkości $v_{f \text{ LASER}}$ nie uzyskano żądanych wartości wymiarów gabarytowych ciętych elementów, które odznaczały się ujemną odchyłką od zadanych wartości. Przycinanie strugą wodno-ścierną elementów blachy $g_b=10$ mm wykazało nieznaczny zauważalny wpływ nastaw procesu na dokładność wymiarową. W elementach od 1-18 szerokość elementu charakteryzowała się odchyłką ujemną od około 0,2 do około 0,05 mm, natomiast w elementach od 19-27 zaobserwowano odchyłkę dodatnią około 0,2 mm. Podobnie jest z długością, gdzie elementy 1-9 miały ujemną odchyłkę wymiarową, a elementy 10-27 dodatnią nawet do około 0,6 mm.



Rys. 67. Wykres modelu matematycznego odchyłki szerokości w opracowanego na podstawie danych z pomiarów szerokości elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy $v_{f AWJ}$ oraz wydatku ścierniwa \dot{m}

Oceniając elementy z dodatnią odchyłką wymiarową stwierdzono, że elementy poszerzały się ku dolnej części, co uwidoczniło się w zarejestrowanych wynikach pomiarów. Było to spowodowane mniejszą energią kinetyczną ziaren ściernych w dolnej części ciętego elementu przy cięciu strugą wodno-ścierną. Energia ta traciła na wartości wraz z zagłębianiem się w materiał. Podobnie jest przy cięciu strumieniem fotonów, gdzie wpływ mocy P jest zauważalnie mniejszy na wielkość szczeliny przecięcia w dolnej jej części, co potwierdzają badania Yilbasa i innych (2012), którzy wprowadzili w swoich badaniach trzy współczynniki szerokości szczeliny przecięcia. Stwierdzono również, że szerokość szczeliny przecięcia zwiększa się wraz ze zwiększaniem mocy lasera P . Warto zauważyć też, że w obu metodach cięcia, zwiększanie grubości blachy g_b przyczynia się do występowania znacznych falistości

w okolicy dolnej krawędzi przecięcia, będącej skutkiem nasilenia intensywności powstawania defektów, co powoduje zmniejszenie pochylenia płaszczyzny szczeliny powstałej na skutek cięcia, co zaobserwowała również Sutowska, 2011.



Rys. 68. Wykres modelu matematycznego odchyłki długości l opracowanego na podstawie danych z pomiarów długości elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy $v_{f AWJ}$ oraz wydatku ścierniwa \dot{m}

W następnym etapie wyznaczono modele matematyczne pozwalające określić najkorzystniejsze w przyjętym zakresie zmienności warunki cięcia, tj. moc lasera P , prędkość posuwu obu głowic $v_{f LASER}$ i $v_{f AWJ}$ oraz wydatek ścierniwa \dot{m} . Dla modeli wyznaczono współczynniki korelacji wielowymiarowej R , które umożliwiły ocenę dopasowania modelu do wyników eksperymentu. Dane z tabel 29-31 zostały wprowadzone w program Experiment Planner 1.1., który posłużył do wyznaczenia MMOB oraz sporządzenia ich wykresów. Uzyskane wyniki analiz miały na celu wytypowanie parametrów cięcia do badań właściwych.

Wantuch i Kot (2003) podają w swoim opracowaniu, że przy badaniu śladów po cięciu wysokoskoncentrowanym strumieniem energii warto wybrać funkcję opisującą zarejestrowane wyniki z największym dopasowaniem. Pewnymi przesłankami co do wyboru odpowiedniej postaci modelu matematycznego mogą być wcześniejsze badania (Kukiełka, 2002). Dlatego też w planie eksperymentu założono, że modele matematyczne opisane będą z użyciem funkcji wykładniczej (ekspotencjalnej) pierwszego stopnia, bez interakcji (Borkowski i Benkowska, 2006). W tym przypadku wartość współczynnika korelacji wynosi $R=0,417$ dla odchyłki szerokości w oraz $R=0,513$ dla odchyłki długości l przy cięciu strumieniem fotonów. Przy cięciu strugą wody wartość współczynnika korelacji wynosi $R=0,9026$ dla odchyłki szerokości w oraz $R=0,9347$ dla odchyłki długości l .

Na podstawie zestawionych wyników pomiarów dokładności wymiarowej wyznaczono modele matematyczne funkcji wykładniczej pierwszego stopnia bez interakcji oraz sporządzono wykresy modelu matematycznego opracowanego na podstawie danych z pomiarów szerokości w (rys. 65, 67a-c) i długości l (rys. 66, 68a-c) elementów wyciętych strumieniem fotonów (rys. 65, 66) oraz strugą wodno-ścierną (rys. 67, 68) z blachy o grubości blachy g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm. Sporządzono także wykresy zależności prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} , mm/s od mocy lasera P , kW (rys. 65, 67) oraz prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} , mm/s od wydatku ścierniwa \dot{m} , kg/s (rys. 67, 68).

Przedstawione modele matematyczne opisują wpływ zmian prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} oraz mocy P przy cięciu strumieniem fotonów (rys. 65 i 66) a także v_{fAWJ} i wydatku ścierniwa \dot{m} (rys. 67 i 68) na dokładność wymiarową wyciętych elementów. Na rysunkach 65 i 66, gdzie zaprezentowano wyniki w postaci wykresu wpływu szerokości w oraz długości l , zauważyć można nieznaczny wpływ mocy lasera P na dokładność wymiarową, natomiast wpływ prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} powoduje odchyłkę nawet 0,2 mm co jest szczególnie widoczne na rysunku 65b i 66c. Wpływ na odchyłkę wymiarową ma również grubość blachy g_b . Im grubsza blacha, tym odchyłka dodatnia jest większa. Wpływ zmiennych parametrów cięcia powoduje zjawisko powstawania śladów poobróbkowych, które również wpływają na zarejestrowane wartości wymiarów gabarytowych.

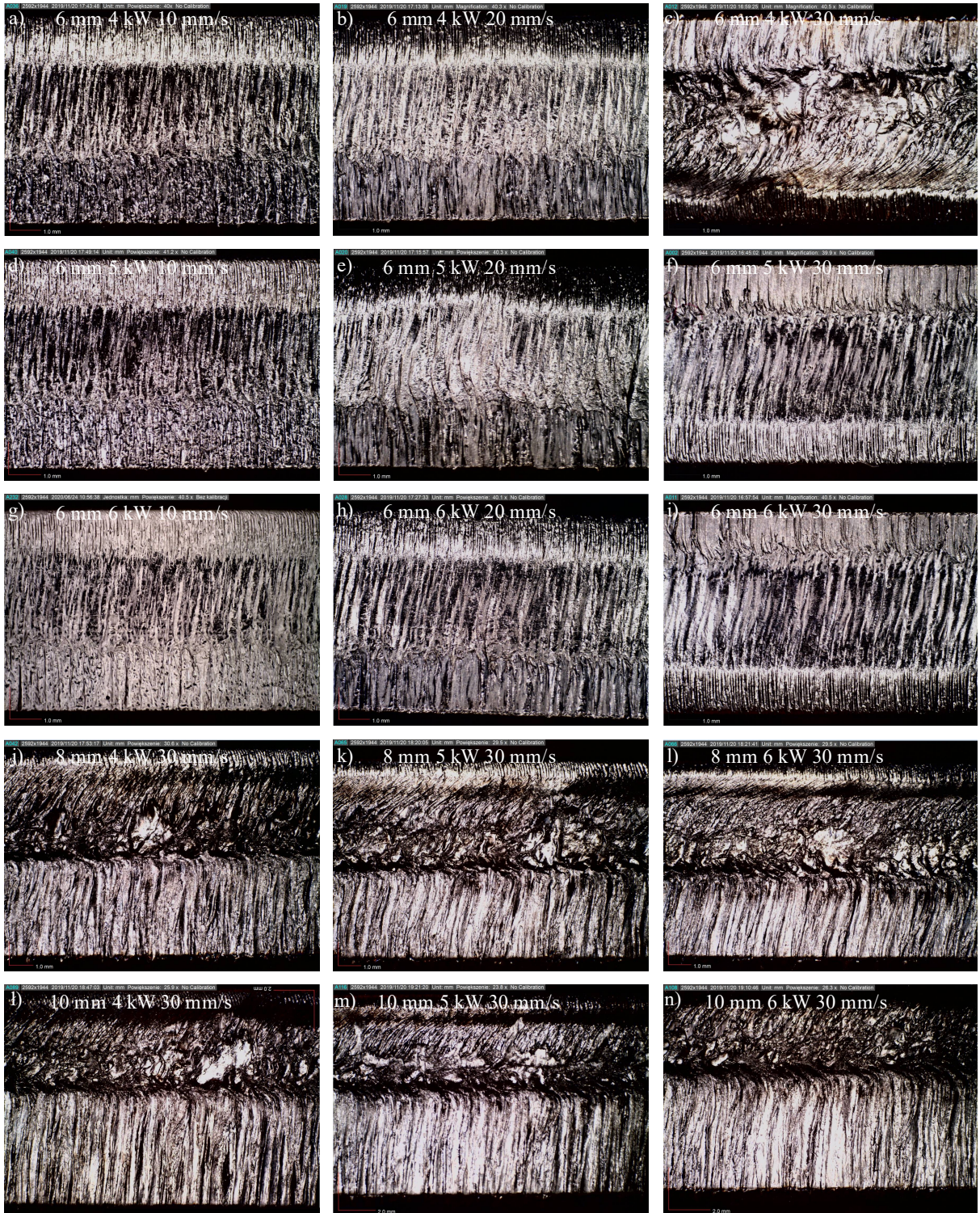
W cięciu strugą wodno-ścierną jest podobnie, jednak występująca odchyłka jest większa i wynosi nawet 0,3 mm dla szerokości w , co widać na rysunku 67b oraz 1,0 mm dla długości l , co widać na rysunku 68a-c. Uzyskane rezultaty pomiarów wykazały, że zwiększenie prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} powoduje odchylenie od prostopadłości powierzchni ukształtowanej w procesie cięcia strugą wodno-ścierną, co powoduje różnice w wymiarze rejestrowanym na dolnej i górnej części wyciętego elementu. Zauważono, że prędkość posuwu głowicy v_{fAWJ}

wpływa na wzrost odchyłki wymiarowej, co zaobserwowali również Klimpel, 1997 i Mazurkiewicz, 2010.

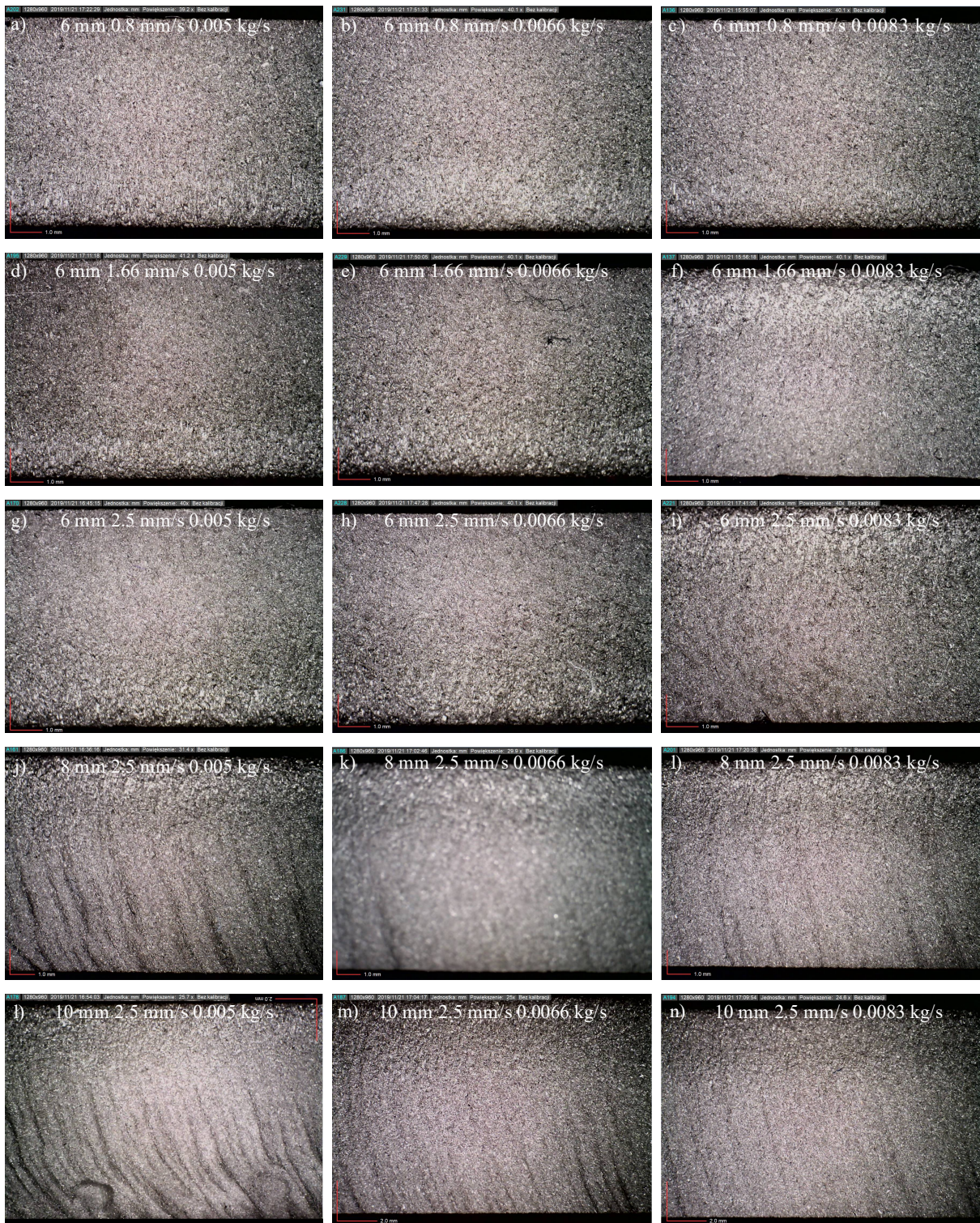
Wydatek ścierniwa \dot{m} nieznacznie wpłynął na różnicę pomiędzy wymiarem zadanym szerokości w a rzeczywiście wyciętym, jest to zauważalne na rysunku 67a-c. Nie zaobserwowano jednak znaczącego wpływu wydatku ścierniwa \dot{m} na odchyłki długości l . Można to wyjaśnić tym, że ścierniwo \dot{m} jest tylko czynnikiem usprawniającym proces cięcia, powodującym większą degradację ciętego materiału, jednak nie wpływającym znacznie na wymiar wyciętego elementu. W konsekwencji pochylenie płaszczyzny przecięcia ulega zmniejszeniu. Twierdzenie to potwierdzają również badania Sutowskiej (2011).

6.3. Analiza obrazów mikroskopowych wyciętych elementów

W kolejnym etapie zarejestrowano obrazy mikroskopowe krawędzi ciętej, w rozdzielczości 2592×1944 pikseli, za pomocą mikroskopu Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. szerzej opisanego w podrozdziale 5.4.2. Dokonując oceny obrazów mikroskopowych powierzchni elementów po cięciu strumieniem fotonów (realizowanego z następującym zakresem parametrów: $P=4-6$ kW oraz $v_{fLASER}=10-30$ mm/s), można stwierdzić, że na powierzchni próbek występowały liczne defekty takie jak deformacje plastyczne, które nie były obecne na powierzchni ciętej strugą wodno-ścierną, co widać na rysunkach 69 (obrazy mikroskopowe powierzchni po cięciu strumieniem fotonów) i 70 (obrazy mikroskopowe powierzchni po cięciu strumieniem strugą wodno-ścierną). Powstałe po cięciu powierzchnie należy sklasyfikować jako anizotropowe losowe, a w rzadkich przypadkach anizotropowe okresowe. W elementach wyciętych strugą wodno-ścierną można natomiast zaobserwować najmniej chropowatą powierzchnię przy każdej grubości blachy. Usytuowanie śladów obróbkowych na przeciętych powierzchniach wskazuje na ukierunkowanie struktury geometrycznej tych przecięć. Zauważono również wyraźny związek kierunku oddziaływania strumienia energii z kierunkiem posuwu zarówno głowicy tnącej dla cięcia laserowego, jak i AWJ. W niektórych przypadkach otrzymana w wyniku cięcia mikrostruktura jest powierzchnią przejściową pomiędzy anizotropową a izotropową.



Rys. 69. Przykład obrazów mikroskopowych elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) wyciętych przy zmiennych parametrach $P = 4, 5, 6$ kW oraz prędkości posuwu $v_{LASER} = 10, 20, 30$ mm/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{LASER} = 30$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (l-n) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{LASER} = 30$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strumieniem fotonów



Rys. 70. Przykład obrazów mikroskopowych elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) wyciętych przy zmiennych parametrach prędkości posuwu $v_{fAWJ} = 0,8, 1,66, 2,5$ mm/s oraz wydatku ścierniwa $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (l-n) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strugą wodno-ścierną

Powierzchnia elementów ukształtowanych w procesie cięcia strugą wodno-ścierną z blachy grubości $g_b=6$ mm (rys. 70a-i) nie wyróżnia się podziałem na strefy jakości (strefa 1 wpływu strugi i strefa 2 wypływu strugi, co szerzej opisano w podrozdziale 2.1.1.) jak również wskazuje na występowanie na nich falistości, której intensywność wzrasta wraz z oddalaniem się od strefy wejścia strugi w materiał, co określają parametry wyznaczone przez polską normę PN-M-04255:1974. Natomiast w elementach wyciętych z blachy grubości $g_b=8$ i 10 mm (rys. 70j-n) można rozróżnić dwie strefy jakości, z których pierwsza (górną badanego elementu) kształtowana była w procesie mikroskrawania ziaren ściernych, druga w erozji mechanicznej, co zauważył również Hashish (1991).

Zauważono podobne właściwości na powierzchni po cięciu strumieniem fotonów, jednak tylko w elementach wyciętych z blachy o grubości $g_b=8$ i 10mm (rys. 69j-n). Na elementach wyciętych z blach o grubości $g_b=6$ mm widoczne są trzy strefy jakości (rys. 69a-i). W strefie pierwszej zauważalny jest ślad po dokładnym cięciu prostopadle do powierzchni blachy. Strefa druga odznacza się większą falistością powierzchni, co prawdopodobnie jest skutkiem skumulowania energii w tym miejscu. W strefie trzeciej duży wpływ na jakość powierzchni ma stopiony w górnej strefie materiał wyrzucany przez gaz towarzyszący, co zauważył również Pacroni (2010).

Analizując obrazy mikroskopowe, można stwierdzić, że najsilniejszy wpływ na kształtowanie struktury obserwowanej powierzchni przeciętych elementów wywiera prędkość posuwu v_f , która decyduje o czasie oddziaływania energii z głowicy na obrabiany materiał, co potwierdzają również badania Borkowskiego i Sutowskiej (2012). Zauważono również zmienność powierzchni obserwowanej wraz ze zmianą strefy przecięcia (strefa 1 i 2) zarówno dla cięcia strugą wodno-ścierną jak również cięcia strumieniem fotonów. Dowodzi to obniżonej skuteczności oddziaływania strumienia energii jako narzędzia erozyjnego w kształtowaniu dolnej części strefy cięcia oraz zróżnicowania obrazów mikroskopowych w zależności od grubości blachy g_b . Opisany wpływ potwierdzają również wyniki badań opisanych przez Przetakiewicza i innych (1993).

6.4. Ocena jakości technologicznej powierzchni cięcia

Przeprowadzone badania rozpoznawcze pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących oceny jakości technologicznej na podstawie pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni (opisanych w podrozdziale 6.1.), oceny dokładności wymiarowej (opisanej w podrozdziale 6.2.) oraz analizy obrazów mikroskopowych powierzchni po cięciu (przedstawionych w podrozdziale 6.3.).

Uzyskane wyniki pomiarów SGP świadczą o tym, że na zmniejszenie wartości parametrów chropowatości, które można interpretować jako zwiększenie jakości powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną, wpływa zwiększenie wartości wydatku ścierniwa m oraz zmniejszenie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} . Podobnie jest przy cięciu strumieniem fotonów: zwiększanie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} wraz ze spadkiem mocy przecinania P , wpływa niekorzystnie na SGP powierzchni po cięciu. Odnosząc się do grubości blachy g_b dla obu metod cięcia, można przypuszczać, że grubość blachy g_b znacząco wpływa na jakość powierzchni po cięciu. Przy najmniejszej z zakresu badanej grubości blachy $g_b=6$ mm, nie zaobserwowano znacznych śladów obróbkowych wynikających z oddziaływania skoncentrowanego strumienia energii, które uwidoczniły się przy cięciu blachy grubości $g_b=8$ i 10 mm, co wpływało na zwiększenie wartości parametrów SGP.

Pomiary dokładności wymiarowej wykonane w badaniach rozpoznawczych pozwoliły na określenie odchyłek wymiarowych, a przeprowadzona analiza statystyczna na ich podstawie pozwoliła określić modele matematyczne dla poszczególnych wymiarów gabarytowych ukształtowanych elementów. Największą odchyłkę dodatnią 0,563 mm od wymiaru szerokości w zaobserwowano w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=6$ mm strumieniem fotonów z mocą $P=4$ kW z prędkością posuwu głowicy tnącej $v_{fLASER}=30$ mm/s. Największą odchyłkę dodatnią 0,609 mm od wymiaru długości l zaobserwowano w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=8$ mm strumieniem fotonów z mocą $P=4$ kW z prędkością posuwu głowicy tnącej $v_{fLASER}=30$ mm/s. Największą odchyłkę ujemną 0,237 mm od wymiaru szerokości w zaobserwowano w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=10$ mm strumieniem fotonów z mocą $P=6$ kW z prędkością posuwu głowicy tnącej $v_{fLASER}=10$ mm/s. Największą odchyłkę ujemną 0,236 mm od wymiaru długości l zaobserwowano w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=10$ mm strumieniem fotonów z mocą $P=6$ kW z prędkością posuwu głowicy tnącej $v_{fLASER}=10$ mm/s. Po analizie powyższych wyników odchyłek można stwierdzić, że największą niedokładność wymiarową uzyskano w procesie cięcia strumieniem fotonów. Zauważyć przy tym należy, że proces ten odbywał się z około 10-krotnie większymi wartościami prędkości posuwu głowicy tnącej, niż cięcie strugą wodno-ścierną.

Obserwacja obrazów mikroskopowych pozwoliła zidentyfikować wady powierzchni po cięciu oraz zaobserwować strefy jakościowe występujące w obu metodach cięcia. Występowanie erozji mechanicznej ziaren ściernych przy cięciu strugą wodno-ścierną (rys. 70f) zauważalnie wpływa na degradację powierzchni po cięciu. Zwiększanie grubości blachy z $g_b=6$ mm do 8 mm i następnie do 10 mm skutkowało zwiększeniem liczby deformacji powierzchni obserwowanych techniką mikroskopową w obu metodach cięcia. Z kolei przy

najmniejszej wartości wydatku ścierniwa m na powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną odnotowano wyraźne ślady deformacji dla grubości blachy $g_b=8$ mm i 10 mm. Podobna sytuacja została zaobserwowana na powierzchni po cięciu elementów kształtowanych ze średnią oraz z największą prędkością posuwu głowicy $v_{fAWJ}= 1,66$ mm/s i 2,5 mm/s. Powierzchnia po cięciu strumieniem fotonów charakteryzowała się zdecydowanie większą intensywnością deformacji w porównaniu z powierzchnią po cięciu strugą wodno-ścierną. Zwiększanie wartości mocy lasera P oraz prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} miało niekorzystny wpływ na kształtowanie powierzchni po cięciu. Uwidoczniło to wyraźny podział na trzy strefy powierzchni po cięciu. Na podstawie obserwacji dokonano oceny powierzchni po cięciu oraz sporządzono tabelę 32, w której zamieszczono ocenę intensywności deformacji (ID) oraz identyfikacji stref cięcia (ISC). Wynik wyrażono znakiem „+” (plus), gdzie zwiększenie liczby znaków oznaczało zwiększenie wizualnych oznak zjawiska.

W tabeli 33 zaprezentowano wartości brane pod uwagę w ocenie jakości technologicznej procesu cięcia strumieniem fotonów. Parametrami zmiennymi pozostały grubość blachy g_b , posuw głowicy lasera v_{fLASER} , oraz moc lasera P . Do oceny SGP wybrano parametr Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni) oraz St (całkowita wysokość nierówności powierzchni). Średnia odchyłka wymiarowa została zestawiona dla szerokości w i długości l . Parametry: intensywność deformacji (ID) oraz identyfikacja stref cięcia (ISC) wyrażone przy pomocy cyfry od 1 do 3 określają liczbę znaków „+” (plus).

W tabeli 34 zestawiono wartości brane pod uwagę w ocenie jakości technologicznej procesu cięcia strugą wodno-ścierną. Parametrami zmiennymi pozostały grubość blachy g_b , posuw głowicy v_{fAWJ} , oraz wydatek ścierniwa m . Do oceny SGP wybrano parametr Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni) oraz St (całkowita wysokość nierówności powierzchni). Średnia odchyłka wymiarowa została zestawiona dla szerokości w i długości l . Parametry: intensywność deformacji (ID) oraz identyfikacja stref cięcia (ISC) wyrażone przy pomocy cyfry od 1 do 3 określają liczbę znaków „+” (plus).

W kolejnym etapie wartości z tabel 33 i 34 znormalizowano. Miało to na celu ujednoczenie danych wejściowych w celu ich wzajemnego porównania i dalszej analizy na tym samym poziomie. Każdą wartość podzielono przez największą liczbę w populacji dla danej metody cięcia zgodnie ze wzorem (4):

$$x_n = \frac{y}{y_{max}}, \quad (4)$$

gdzie: x_n – wartość po normalizacji, y – liczba normalizowana, y_{max} – liczba o najwyższej wartości z populacji.

Tab. 32. Tabela oceny wad powstałych na skutek cięcia przeprowadzonej na podstawie obserwacji mikroskopowych

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{LASER} , mm/s	Moc lasera P , kW	Strumień fotonów		Prędkość posuwu strugi wodno-ścierniej v_{AWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Struga wodno-ścierna	
			Intensywność deformacji (ID)	Identyfikacja stref cięcia (ISC)			Intensywność deformacji (ID)	Identyfikacja stref cięcia (ISC)
6	10	4	++*	++	0,8	0,005	+	+
		5	+	+		0,0066	+	+
		6	+	+		0,0083	+	+
	20	4	++	++	1,66	0,005	+	+
		5	+++	+		0,0066	+	+
		6	+	++		0,0083	+	+
	30	4	+++	+	2,5	0,005	+	+
		5	++	+++		0,0066	++	+
		6	++	+++		0,0083	++	+
8	10	4	+++	++	0,8	0,005	+	+
		5	+	+		0,0066	+	+
		6	+++	+++		0,0083	+	+
	20	4	+	+	1,66	0,005	+	+
		5	+	+		0,0066	+	+
		6	+++	+++		0,0083	+	+
	30	4	+++	++	2,5	0,005	++	++
		5	+++	++		0,0066	++	++
		6	+++	++		0,0083	++	++
10	10	4	+	+++	0,8	0,005	+	+
		5	++	+		0,0066	++	+
		6	+++	+++		0,0083	+	+
	20	4	+++	+++	1,66	0,005	++	+
		5	+++	+++		0,0066	+	+
		6	+++	+++		0,0083	+	+
	30	4	+++	++	2,5	0,005	+++	+++
		5	+++	++		0,0066	++	++
		6	+++	++		0,0083	++	++

*. „+” oznacza intensywność zjawiska

Tab. 33. Zestawienie wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{FLASER} , mm/s	Moc lasera P , kW	Sa , μm	St , μm	Średnia odchyłka wymiarowa		ID	ISC
					OW_w , mm	OW_l , mm		
6	10	4	13,9	106	-0,086	-0,005	2,0	2,0
		5	14,1	96,0	-0,049	-0,181	1,0	1,0
		6	16,8	138	-0,210	-0,138	1,0	1,0
	20	4	14,7	113	-0,004	-0,187	2,0	2,0
		5	15,3	108	-0,018	-0,031	3,0	1,0
		6	14,6	95,0	-0,041	-0,166	1,0	2,0
	30	4	59,5	619	0,348	0,173	3,0	1,0
		5	16,7	106	-0,069	-0,116	2,0	3,0
		6	14,7	126	-0,093	-0,077	2,0	3,0
8	10	4	31,1	151	-0,141	-0,144	3,0	2,0
		5	25,4	139	-0,104	-0,114	1,0	1,0
		6	82,3	639	0,040	0,056	3,0	3,0
	20	4	25,5	157	-0,128	-0,182	1,0	1,0
		5	19,8	126	-0,113	-0,146	1,0	1,0
		6	88,2	501	0,288	0,235	3,0	3,0
	30	4	50,5	568	0,239	0,414	3,0	2,0
		5	88,1	524	0,336	0,279	3,0	2,0
		6	85,4	523	0,217	0,248	3,0	2,0
10	10	4	49,8	453	0,360	0,176	1,0	3,0
		5	19,7	139	0,041	0,069	2,0	1,0
		6	20,9	151	-0,219	-0,210	3,0	3,0
	20	4	51,0	578	0,273	0,120	3,0	3,0
		5	95,5	767	0,278	0,113	3,0	3,0
		6	84,5	682	0,296	0,175	3,0	3,0
	30	4	109	680	0,244	0,167	3,0	2,0
		5	88,5	625	0,293	0,205	3,0	2,0
		6	101	643	0,022	0,025	3,0	2,0

Tab. 34. Zestawienie wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy strugi wodno-ścierniej v_{fAWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Sa , μm	St , μm	Średnia odchyłka wymiarowa		ID	ISC
					OW_w , mm	OW_l , mm		
6	0,8	0,005	9,22	90,9	-0,294	-0,191	1,0	1,0
		0,0066	10,6	84,1	-0,321	-0,207	1,0	1,0
		0,0083	7,9	51,4	-0,372	-0,298	1,0	1,0
	1,66	0,005	23,7	110	-0,374	-0,027	1,0	1,0
		0,0066	13,0	93,2	-0,421	-0,081	1,0	1,0
		0,0083	14,0	79,2	-0,363	-0,045	1,0	1,0
	2,5	0,005	28,7	174	-0,106	0,145	1,0	1,0
		0,0066	26,2	151	-0,216	0,020	2,0	1,0
		0,0083	16,5	104	-0,193	0,077	2,0	1,0
8	0,8	0,005	10,0	63,6	-0,291	-0,103	1,0	1,0
		0,0066	6,9	46,7	-0,257	-0,177	1,0	1,0
		0,0083	6,33	53,1	-0,331	-0,219	1,0	1,0
	1,66	0,005	11,6	87,7	-0,105	0,170	1,0	1,0
		0,0066	8,86	61,7	-0,153	-0,021	1,0	1,0
		0,0083	12,2	79,2	-0,157	-0,004	1,0	1,0
	2,5	0,005	25,7	211	0,087	0,491	2,0	2,0
		0,0066	19,9	143	-0,028	0,339	2,0	2,0
		0,0083	14,6	99,0	-0,012	0,234	2,0	2,0
10	0,8	0,005	7,49	80,9	-0,228	-0,116	1,0	1,0
		0,0066	5,62	39,6	-0,228	-0,208	2,0	1,0
		0,0083	5,56	36,9	-0,227	-0,161	1,0	1,0
	1,66	0,005	13,8	79,2	0,031	0,195	2,0	1,0
		0,0066	7,15	54,5	-0,147	0,179	1,0	1,0
		0,0083	12,0	91,2	-0,118	0,050	1,0	1,0
	2,5	0,005	46,3	255	0,212	0,442	3,0	3,0
		0,0066	17,3	120	0,033	0,503	2,0	2,0
		0,0083	15,4	99,0	0,056	0,451	2,0	2,0

Wartości po normalizacji zestawiono w tabeli 35 dla cięcia strumieniem fotonów i tabeli 36 dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną.

Tab. 35. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{FLASER} , mm/s	Moc lasera P , kW	Sa_n	St_n	Średnia odchyłka wymiarowa		ID_n	ISC_n
					OW_{wn}	OW'_{ln}		
6	10	4	0,128	0,138	-0,239	-0,012	0,67	0,67
		5	0,129	0,125	-0,136	-0,437	0,33	0,33
		6	0,154	0,180	-0,583	-0,333	0,33	0,33
	20	4	0,135	0,147	-0,011	-0,452	0,67	0,67
		5	0,140	0,141	-0,050	-0,075	1,00	0,33
		6	0,134	0,124	-0,114	-0,401	0,33	0,67
	30	4	0,546	0,807	0,967	0,418	1,00	0,33
		5	0,153	0,138	-0,192	-0,280	0,67	1,00
		6	0,135	0,164	-0,258	-0,186	0,67	1,00
8	10	4	0,285	0,197	-0,392	-0,348	1,00	0,67
		5	0,233	0,181	-0,289	-0,275	0,33	0,33
		6	0,755	0,833	0,111	0,135	1,00	1,00
	20	4	0,234	0,205	-0,356	-0,440	0,33	0,33
		5	0,182	0,164	-0,314	-0,353	0,33	0,33
		6	0,809	0,653	0,800	0,568	1,00	1,00
	30	4	0,463	0,741	0,664	1,000	1,00	0,67
		5	0,808	0,683	0,933	0,674	1,00	0,67
		6	0,783	0,682	0,603	0,599	1,00	0,67
10	10	4	0,457	0,591	1,000	0,425	0,33	1,00
		5	0,181	0,181	0,114	0,167	0,67	0,33
		6	0,192	0,197	-0,608	-0,507	1,00	1,00
	20	4	0,468	0,754	0,758	0,290	1,00	1,00
		5	0,876	1,000	0,772	0,273	1,00	1,00
		6	0,775	0,889	0,822	0,423	1,00	1,00
	30	4	1,000	0,887	0,678	0,403	1,00	0,67
		5	0,812	0,815	0,814	0,495	1,00	0,67
		6	0,927	0,838	0,061	0,060	1,00	0,67

Tab. 36. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy strugi wodno-ścierniej v_{fAWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	Sa_n	St_n	Średnia odchyłka wymiarowa		ID_n	ISC_n
					OW_{wn}	OW_{ln}		
6	0,8	0,005	0,199	0,356	-0,698	-0,380	0,33	0,33
		0,0066	0,229	0,330	-0,762	-0,412	0,33	0,33
		0,0083	0,171	0,202	-0,884	-0,592	0,33	0,33
	1,66	0,005	0,512	0,431	-0,888	-0,054	0,33	0,33
		0,0066	0,281	0,365	-1,000	-0,161	0,33	0,33
		0,0083	0,302	0,311	-0,862	-0,089	0,33	0,33
	2,5	0,005	0,620	0,682	-0,252	0,288	0,33	0,33
		0,0066	0,566	0,592	-0,513	0,040	0,67	0,33
		0,0083	0,356	0,408	-0,458	0,153	0,67	0,33
8	0,8	0,005	0,216	0,249	-0,691	-0,205	0,33	0,33
		0,0066	0,149	0,183	-0,610	-0,352	0,33	0,33
		0,0083	0,137	0,208	-0,786	-0,435	0,33	0,33
	1,66	0,005	0,251	0,344	-0,249	0,338	0,33	0,33
		0,0066	0,191	0,242	-0,363	-0,042	0,33	0,33
		0,0083	0,263	0,311	-0,373	-0,008	0,33	0,33
	2,5	0,005	0,555	0,827	0,207	0,976	0,67	0,67
		0,0066	0,430	0,561	-0,067	0,674	0,67	0,67
		0,0083	0,315	0,388	-0,029	0,465	0,67	0,67
10	0,8	0,005	0,162	0,317	-0,542	-0,231	0,33	0,33
		0,0066	0,121	0,155	-0,542	-0,414	0,67	0,33
		0,0083	0,120	0,145	-0,539	-0,320	0,33	0,33
	1,66	0,005	0,298	0,311	0,074	0,388	0,67	0,33
		0,0066	0,154	0,214	-0,349	0,356	0,33	0,33
		0,0083	0,259	0,358	-0,280	0,099	0,33	0,33
	2,5	0,005	1,000	1,000	0,504	0,879	1,00	1,00
		0,0066	0,374	0,471	0,078	1,000	0,67	0,67
		0,0083	0,333	0,388	0,133	0,897	0,67	0,67

Podsumowując badania rozpoznawcze dotyczące oceny jakości technologicznej opracowano zależność (5) opisującą syntetyczny wskaźnik jakości technologicznej cięcia JTC wyrażony w % i oznaczono odpowiednio jako JTC_{LASER} dla procesu cięcia strumieniem fotonów oraz JTC_{AWJ} dla cięcia strugą wodno-ścierną (Romanowski i Nadolny, 2021):

$$JTC_{LASER \text{ i } AWJ} = 1 - [(Sa_n \cdot St_n) \cdot |(OW_{wn} \cdot OW_{ln})| \cdot (ID_n \cdot ISC_n)] \cdot 100\%. \quad (5)$$

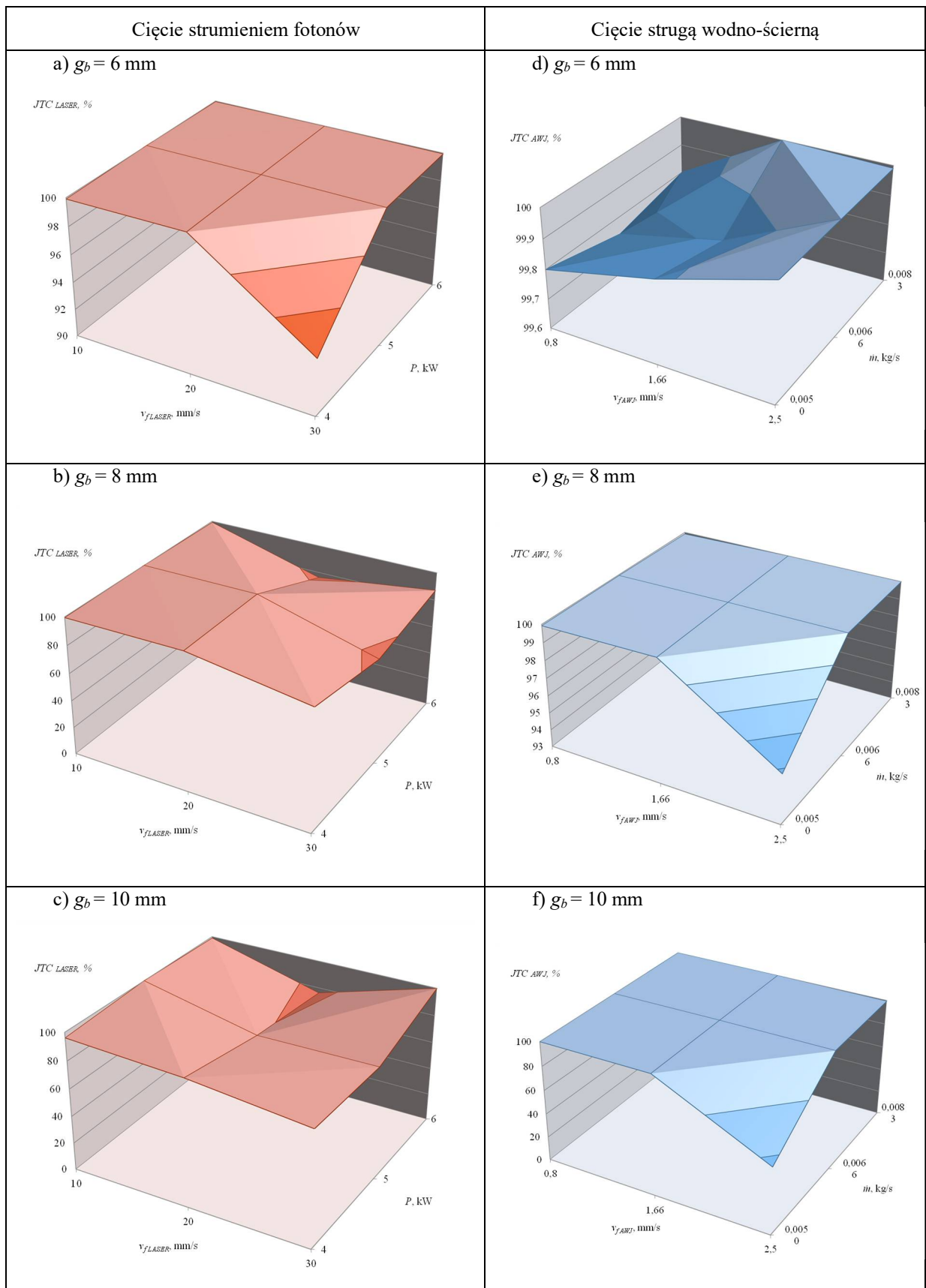
Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia wskaźnika JTC_{LASER} (6) dla następujących parametrów procesu cięcia strumieniem fotonów: grubość blachy $g_b=6$ mm, posuw głowicy lasera $v_{fLASER}=10$ mm/s oraz moc lasera $P=5$ kW:

$$JTC_{LASER} = 1 - [(0,129 \cdot 0,125) \cdot |(-0,136 \cdot -0,437)| \cdot (0,33 \cdot 0,33)] \cdot 100\% = 99,99\%. \quad (6)$$

W tabeli 37 zestawiono wyniki obliczeń wskaźnika JTC dla obu metod cięcia. Drukiem pogrubionym z podkreśleniem zaznaczono największe wartości wskaźnika, które jednoznacznie wyznaczają nastawy parametrów cięcia, które będą użyte w badaniach właściwych dla każdej metody cięcia i dla poszczególnych grubości blachy g_b . Zmienność uzyskanych wartości wskaźnika JTC dla obu rozpatrywanych metod cięcia przedstawiono także w formie wykresów na rysunku 71.

Tab. 37. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości JTC dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów JTC_{LASER} oraz cięcia strugą wodno-ścierną JTC_{AWJ}

Grubość blachy g_b , mm	Prędkość posuwu głowicy lasera v_{LASER} , mm/s	Moc lasera P , kW	JTC_{LASER} , %	Prędkość posuwu głowicy strugi wodno-ściernej v_{AWJ} , mm/s	Wydatek ścierniwa \dot{m} , kg/s	JTC_{AWJ} , %
6	10	4	99,9	0,8	0,005	99,80
		5	100,00		0,0066	99,74
		6	99,94		0,0083	99,80
	20	4	99,99	1,66	0,005	99,88
		5	99,99		0,0066	99,82
		6	99,98		0,0083	100,00
	30	4	94,12	2,5	0,005	99,99
		5	99,92		0,0066	99,99
		6	99,93		0,0083	99,99
8	10	4	99,49	0,8	0,005	99,92
		5	99,96		0,0066	99,94
		6	99,06		0,0083	99,89
	20	4	99,92	1,66	0,005	100,00
		5	99,95		0,0066	99,99
		6	76,00		0,0083	99,99
	30	4	84,74	2,5	0,005	95,84
		5	76,75		0,0066	99,99
		6	87,08		0,0083	99,99
10	10	4	96,21	0,8	0,005	99,93
		5	99,99		0,0066	99,91
		6	98,83		0,0083	99,97
	20	4	92,24	1,66	0,005	99,94
		5	81,54		0,0066	100,00
		6	76,04		0,0083	99,99
	30	4	83,76	2,5	0,005	55,70
		5	82,13		0,0066	99,38
		6	99,81		0,0083	99,31



Rys. 71. Zmiany wartości wskaźnika JTC powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{LASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{AWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną

Szczegółowa analiza uzyskanych wyników badań rozpoznawczych pozwoliła na wyznaczenie najkorzystniejszych, pod względem uzyskiwanej jakości technologicznej kształtowanego wyrobu, wartości parametrów nastawnych (z przyjętego zakresu zmienności) obu rozpatrywanych procesów cięcia. W ocenie tej uwzględniono wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni, odchyłki wymiarów wyciętych elementów oraz rezultaty obserwacji mikroskopowych deformacji ukształtowanej powierzchni przecięcia. W rezultacie określono, że dla przyjętego zakresu zmienności rozpatrywanych parametrów technologicznych procesu cięcia strumieniem fotonów, dla poszczególnych grubości blachy, za najkorzystniejsze można uznać następujące wartości parametrów:

- dla grubości blachy $g_b = 6$ mm: moc lasera $P = 5$ kW oraz prędkość posuw głowicy $v_{fLASER} = 10$ mm/s ($JTC_{LASER} = 100,00\%$),
- dla grubości blachy $g_b = 8$ mm: moc lasera $P = 5$ kW oraz prędkość posuwu głowicy $v_{fLASER} = 10$ mm/s ($JTC_{LASER} = 99,96\%$),
- dla grubości blachy $g_b = 10$ mm: moc lasera $P = 5$ kW oraz prędkość posuwu głowicy $v_{fLASER} = 10$ mm/s ($JTC_{LASER} = 99,99\%$).

Natomiast dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną, jako najkorzystniejsze w rozpatrywanych warunkach przyjęto następujące wartości parametrów:

- dla grubości blachy $g_b = 6$ mm: wydatek ścierniwa $\dot{m} = 0,0083$ kg/s oraz prędkość posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s ($JTC_{AWJ} = 100,00\%$),
- dla grubości blachy $g_b = 8$ mm: wydatek ścierniwa $\dot{m} = 0,005$ kg/s oraz prędkość posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s ($JTC_{AWJ} = 100,00\%$),
- dla grubości blachy $g_b = 10$ mm: wydatek ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s oraz prędkość posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s ($JTC_{AWJ} = 100,00\%$).

Na przykładzie analiz dotyczących procesu cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną stali nierdzewnej o oznaczeniu X5CrNi18-10 dowiedziono, że zaproponowany syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej powierzchni po cięciu JTC może być skutecznie stosowany do wyznaczenia najkorzystniejszych parametrów procesu cięcia. Wskaźnik JTC może być stosowany do porównywania między sobą rezultatów procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach. Konstrukcja wskaźnika JTC umożliwia uwzględnienie innych cech analizowanej powierzchni oraz rozszerzenie ich liczby, np. poprzez dodanie parametrów oceny struktury warstwy wierzchniej, mikrotwardości powierzchni itp. Przedstawiony szeroki zbiór analiz wykazał, że opracowany wskaźnik JTC

stanowi uniwersalne narzędzie wartościujące, pozwalające na dokonywanie oceny ilościowej cech związanych z jakością technologiczną rezultatów procesu cięcia.

6.5. Wnioski z badań rozpoznawczych

Przedstawione w niniejszym rozdziale analizy z zakresu oceny jakości technologicznej powierzchni po cięciu laserowym i cięciu strugą wodno-ścierną umożliwiły sformułowanie poniższych wniosków podsumowujących wyniki badań rozpoznawczych.

1. Wyniki analizy struktury geometrycznej powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną dowodzą, że zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych (S_a i S_t) spowodowane jest przez zmniejszanie natężenia przepływu ścierniwa \dot{m} oraz zwiększanie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} .
2. W procesie cięcia laserowego zwiększenie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} wywołało zwiększenie wartości parametrów amplitudowych S_a i S_t struktury geometrycznej powierzchni po cięciu, jednocześnie wpływ mocy cięcia P nie był jednoznaczny w analizowanych wynikach badań.
3. Dla najmniejszej grubości blachy w badanym zakresie $g_b = 6$ mm, nie zaobserwowano znaczących śladów obróbkowych skoncentrowanego strumienia energii, które uwidoczniły się wyraźnie przy grubości przecinanej blachy wynoszącej $g_b = 8$ i 10 mm.
4. W procesie cięcia laserowego na dokładność wymiarową kształtowanych elementów największy wpływ miała prędkość posuwu głowicy v_{fLASER} (duża wartość prędkości posuwu spowodowała odchyłki dochodzące do 0,2 mm) oraz grubość przecinanej blachy g_b (im grubsza płyta, tym większa odchyłka dodatnia wymiaru).
5. W przypadku cięcia strugą wodno-ścierną tendencje są podobne, jednak występujące odchyłki wymiarowe są większe i wynoszą nawet do 0,3 mm. Dodatkowo zauważono, że zwiększanie prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} powoduje odchylenie od prostopadłości kształtowanej powierzchni przecięcia. Nie zaobserwowano istotnego wpływu natężenia przepływu ścierniwa \dot{m} na odchyłki wymiarowe.
6. Analiza obrazów mikroskopowych wykazała, że zwiększenie grubości przecinanej blachy z $g_b = 6$ mm do 8 mm, a następnie do 10 mm spowodowała zwiększenie intensywności deformacji powierzchni w obu metodach cięcia.
7. Powierzchnia po cięciu laserowym charakteryzowała się znacznie większą intensywnością odkształceń (z widocznym podziałem na trzy strefy powierzchni ciętej) w porównaniu z powierzchnią po cięciu strugą wodno-ścierną.

8. Przeprowadzona analiza wykazała, że najkorzystniejszą (największą) wartość JTC z całego zbioru analizowanych wyników ($JTC_{AWJ} = 100,00\%$) uzyskano dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną przy grubości blachy $g_b = 10$ mm, natężeniu przepływu ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s.
9. Najkorzystniejszą wartość wskaźnika JTC dla procesu cięcia wiązką fotonową ($JTC_{LASER} = 100,00\%$) uzyskano dla grubości blachy $g_b = 6$ mm, mocy lasera $P = 5$ kW i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fLASER} = 10$ mm/s.
10. Względna (procentowa) postać wskaźnika JTC powoduje, że może on być stosowany do porównywania wyników procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach.
11. Opracowany wskaźnik JTC stanowi uniwersalne narzędzie wartościujące, pozwalające na dokonywanie oceny ilościowej cech związanych z jakością technologiczną rezultatów procesu cięcia.

7. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WŁAŚCIWYCH

W wyniku przeprowadzonych badań właściwych oceniono wpływ kształtu wyciętych elementów, ich cech geometrycznych oraz grubości g_b na jakość technologiczną przy zastosowaniu stałych parametrów cięcia określonych w badaniach rozpoznawczych. Ponadto w badaniach właściwych zastosowano autorski wskaźnik *JTC* do oceny jakości technologicznej elementów ze stali X5CrNi18-10 po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną.

7.1. Analiza dokładności wymiarowo-kształtowej wyciętych elementów

Wykonano serię pomiarów dokładności wymiarowej na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 elementów o złożonym zarysie ze stali X5CrNi18-10 o trzech grubościach (6, 8 i 10 mm) wyciętych strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną w celu określenia ich dokładności wymiarowo-kształtowej. Następnie wyznaczono odchyłki prostoliniowości, okrągłości i miary kąta osobno dla szeregu mierzonych cech geometrycznych (okręgów, łuków, prostych, kątów). W tabeli 38 przedstawiono wyjaśnienie oznaczeń skrótowych przyjętych do opisu wyników pomiarów. Aby zestawić pomiary kątów, współrzędne przeliczono na wartości dziesiętne stopnia. Wyniki obliczeń odchyłek mierzonych elementów wyciętych z blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm zestawiono odpowiednio w tabelach 39-44, natomiast oznaczenia mierzonych cech zawarto na rysunku 41 w podrozdziale 5.2. Z uzyskanych wartości sporządzono wykresy odchyłek mierzonych cech geometrycznych (rysunek 72, 74, 76) oraz kątów (rysunek 73, 75, 77) elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6 mm (rysunek 72, 73), 8 mm (rysunek 74, 75) i 10 mm (rysunek 76, 77).

Tab. 38. Zestawienie mierzonych cech geometrycznych

Nazwa używana w badaniach	Mierzona cecha geometryczna
okrąg	Odchyłka okrągłości okręgu
łuk	Odchyłka okrągłości łuku
prosta	Odchyłka prostoliniowości prostej
kąt	Odchyłka miary kąta

Tab. 39. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6 mm

Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 3 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 3 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, mm
okrąg 1	0,070	0,217	0,080	0,098	0,143	0,159
okrąg 2	0,043	0,046	0,043	0,149	0,154	0,210
okrąg 3	0,042	0,042	0,041	0,212	0,212	0,208
łuk 4	0,016	0,017	0,028	0,055	0,053	0,071
łuk 5	0,020	0,017	0,016	0,105	0,102	0,110
łuk 6	0,011	0,013	0,011	0,036	0,043	0,052
łuk 7	0,056	0,031	0,032	0,143	0,150	0,141
łuk 8	0,033	0,027	0,310	0,091	0,098	0,122
łuk 9	0,028	0,030	0,030	0,093	0,109	0,111
łuk 10	0,009	0,017	0,010	0,059	0,058	0,093
łuk 11	0,017	0,013	0,014	0,098	0,117	0,123
prosta 12	0,009	0,009	0,012	0,028	0,025	0,032
prosta 13	0,017	0,132	0,053	0,024	0,028	0,056
prosta 14	0,011	0,043	0,014	0,079	0,111	0,160
prosta 15	0,014	0,014	0,014	0,021	0,032	0,050
prosta 16	0,034	0,107	0,211	0,015	0,023	0,052
prosta 17	0,010	0,014	0,097	0,014	0,029	0,055
prosta 18	0,023	0,043	0,045	0,036	0,047	0,128
prosta 19	0,007	0,054	0,014	0,021	0,036	0,045
prosta 20	0,018	0,028	0,008	0,024	0,035	0,134
prosta 21	0,016	0,019	0,532	0,024	0,053	0,063
prosta 23	0,020	0,211	0,373	0,023	0,052	0,090
prosta 24	0,015	0,012	0,017	0,018	0,046	0,056
prosta 25	0,016	0,055	0,025	0,021	0,028	0,033
prosta 26	0,166	0,110	0,311	0,062	0,062	0,065
prosta 27	0,013	0,014	0,014	0,026	0,044	0,041
prosta 28	0,016	0,018	0,016	0,039	0,048	0,086
prosta 29	0,237	0,416	0,449	0,162	0,165	0,165
prosta 30	0,009	0,018	0,007	0,021	0,028	0,032
prosta 31	0,009	0,008	0,010	0,022	0,028	0,025
prosta 33	0,020	0,021	0,023	0,026	0,038	0,057
prosta 34	0,325	0,326	0,324	0,284	0,248	0,258
prosta 35	0,021	0,019	0,018	0,021	0,034	0,058
prosta 36	0,016	0,027	0,013	0,021	0,034	0,046
prosta 37	0,008	0,007	0,011	0,017	0,026	0,052

Tab. 40. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6 mm

Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 3 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 3 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, °
kąt 38	0,021	0,004	0,009	0,155	0,138	0,123
kąt 39	0,035	0,039	0,043	0,023	0,034	0,025
kąt 40	0,022	0,007	0,017	0,042	0,050	0,054
kąt 41	0,010	0,011	0,002	0,055	0,055	0,070
kąt 42	0,235	0,227	0,241	0,127	0,124	0,149
kąt 43	0,009	0,000	0,018	0,288	0,302	0,292
kąt 44	0,042	0,028	0,059	0,274	0,277	0,296
kąt 45	0,020	0,021	0,035	0,027	0,032	0,010
kąt 46	0,008	0,006	0,009	0,177	0,171	0,185
kąt 47	0,030	0,031	0,045	0,193	0,193	0,198
kąt 48	0,020	0,022	0,025	0,186	0,186	0,173
kąt 49	0,011	0,011	0,010	0,183	0,177	0,166
kąt 50	0,003	0,009	0,011	0,142	0,157	0,208
kąt 51	0,017	0,019	0,162	0,043	0,045	0,092
kąt 52	0,045	0,015	0,255	0,114	0,129	0,161
kąt 53	0,024	0,011	0,098	0,170	0,169	0,191
kąt 54	0,007	0,005	0,010	0,149	0,142	0,147
kąt 55	0,026	0,009	0,014	0,027	0,030	0,026
kąt 56	0,011	0,027	0,028	0,134	0,126	0,124
kąt 57	0,002	0,008	0,013	0,460	0,462	0,461
kąt 58	0,092	0,092	0,098	0,403	0,390	0,407
kąt 59	0,024	0,014	0,016	0,198	0,258	0,261

Tab. 41. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 8 mm

Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 4 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 7 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 4 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 7 mm od górnej krawędzi elementu, mm
okrąg 1	0,196	0,222	0,232	0,129	0,155	0,181
okrąg 2	0,039	0,034	0,079	0,125	0,129	0,223
okrąg 3	0,064	0,053	0,053	0,137	0,138	0,136
łuk 4	0,011	0,017	0,019	0,039	0,042	0,044
łuk 5	0,021	0,017	0,018	0,106	0,114	0,116
łuk 6	0,013	0,013	0,018	0,041	0,048	0,075
łuk 7	0,030	0,030	0,031	0,138	0,139	0,133
łuk 8	0,027	0,027	0,033	0,109	0,096	0,110
łuk 9	0,022	0,020	0,022	0,073	0,075	0,084
łuk 10	0,020	0,011	0,010	0,034	0,038	0,060
łuk 11	0,014	0,016	0,017	0,117	0,110	0,127
prosta 12	0,071	0,072	0,175	0,029	0,039	0,055
prosta 13	0,062	0,061	0,059	0,017	0,029	0,056
prosta 14	0,113	0,113	0,113	0,060	0,074	0,170
prosta 15	0,013	0,011	0,062	0,018	0,036	0,066
prosta 16	0,005	0,006	0,007	0,017	0,042	0,070
prosta 17	0,036	0,031	0,137	0,018	0,060	0,071
prosta 18	0,021	0,019	0,019	0,032	0,060	0,149
prosta 19	0,011	0,011	0,016	0,029	0,049	0,042
prosta 20	0,011	0,011	0,015	0,026	0,056	0,123
prosta 21	0,011	0,016	0,023	0,025	0,057	0,112
prosta 23	0,009	0,016	0,016	0,035	0,081	0,127
prosta 24	0,025	0,016	0,026	0,026	0,064	0,106
prosta 25	0,070	0,087	0,351	0,026	0,050	0,051
prosta 26	0,060	0,072	0,211	0,022	0,029	0,050
prosta 27	0,015	0,054	0,018	0,018	0,042	0,060
prosta 28	0,009	0,010	0,026	0,038	0,064	0,181
prosta 29	0,284	0,410	0,303	0,093	0,077	0,094
prosta 30	0,009	0,010	0,011	0,018	0,024	0,029
prosta 31	0,013	0,019	0,015	0,024	0,043	0,039
prosta 33	0,013	0,014	0,014	0,026	0,040	0,066
prosta 34	0,322	0,321	0,316	0,323	0,319	0,317
prosta 35	0,022	0,023	0,026	0,031	0,056	0,093
prosta 36	0,011	0,012	0,018	0,023	0,047	0,097
prosta 37	0,023	0,011	0,012	0,026	0,043	0,055

Tab. 42. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 8 mm

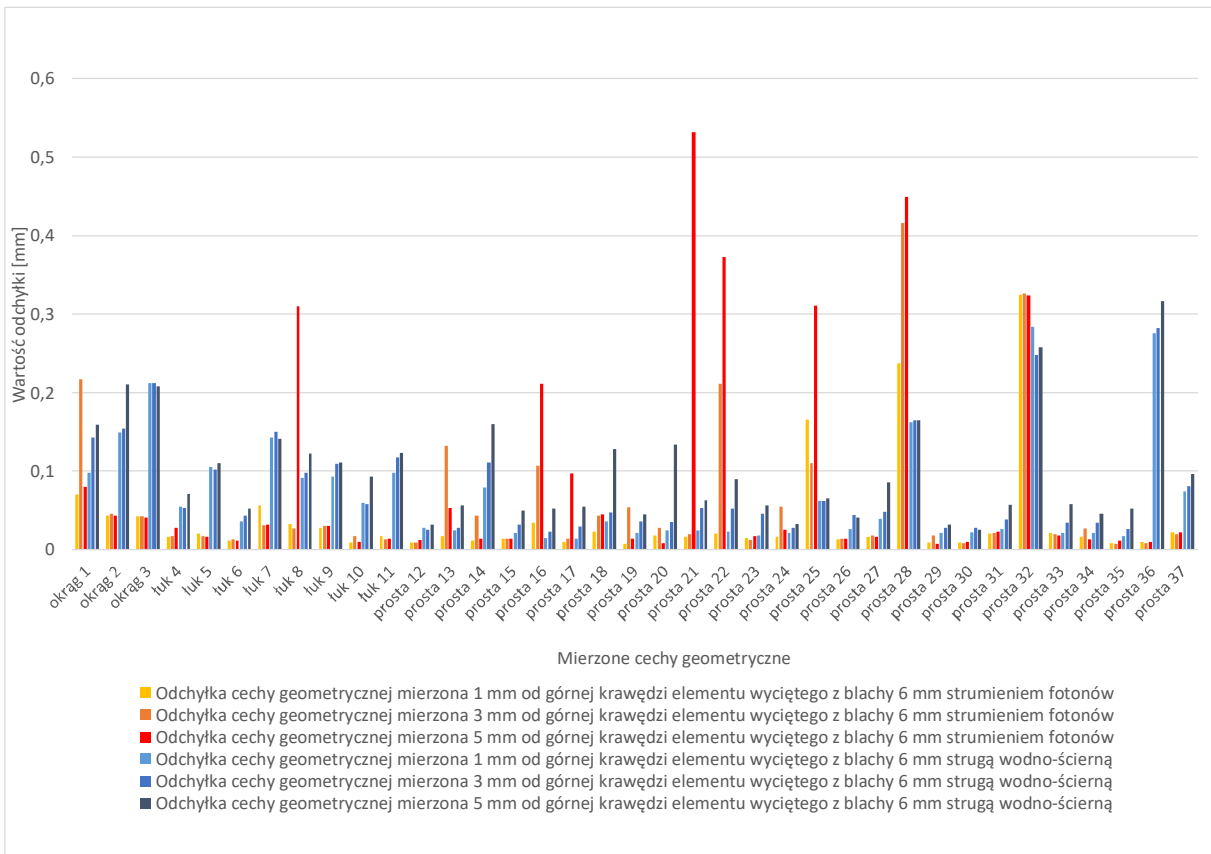
Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 4 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 7 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 4 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 7 mm od górnej krawędzi elementu, °
kąt 38	0,017	0,024	0,015	0,137	0,122	0,107
kąt 39	0,038	0,054	0,041	0,094	0,094	0,097
kąt 40	0,034	0,037	0,023	0,002	0,009	0,026
kąt 41	0,050	0,051	0,053	0,184	0,188	0,184
kąt 42	0,241	0,239	0,253	0,094	0,066	0,029
kąt 43	0,027	0,054	0,052	0,157	0,155	0,173
kąt 44	0,029	0,041	0,030	0,108	0,099	0,113
kąt 45	0,011	0,027	0,029	0,062	0,063	0,074
kąt 46	0,005	0,004	0,007	0,235	0,226	0,237
kąt 47	0,011	0,012	0,009	0,196	0,198	0,196
kąt 48	0,003	0,017	0,009	0,191	0,186	0,158
kąt 49	0,010	0,018	0,006	0,244	0,228	0,212
kąt 50	0,026	0,036	0,036	0,174	0,173	0,234
kąt 51	0,010	0,014	0,017	0,075	0,059	0,060
kąt 52	0,029	0,026	0,016	0,077	0,115	0,164
kąt 53	0,043	0,059	0,060	0,142	0,152	0,154
kąt 54	0,029	0,075	0,033	0,176	0,162	0,177
kąt 55	0,028	0,000	0,044	0,016	0,008	0,008
kąt 56	0,043	0,045	0,045	0,175	0,176	0,176
kąt 57	0,025	0,032	0,041	0,374	0,392	0,395
kąt 58	0,100	0,096	0,100	0,259	0,221	0,217
kąt 59	0,088	0,104	0,090	0,325	0,363	0,509

Tab. 43. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 10 mm

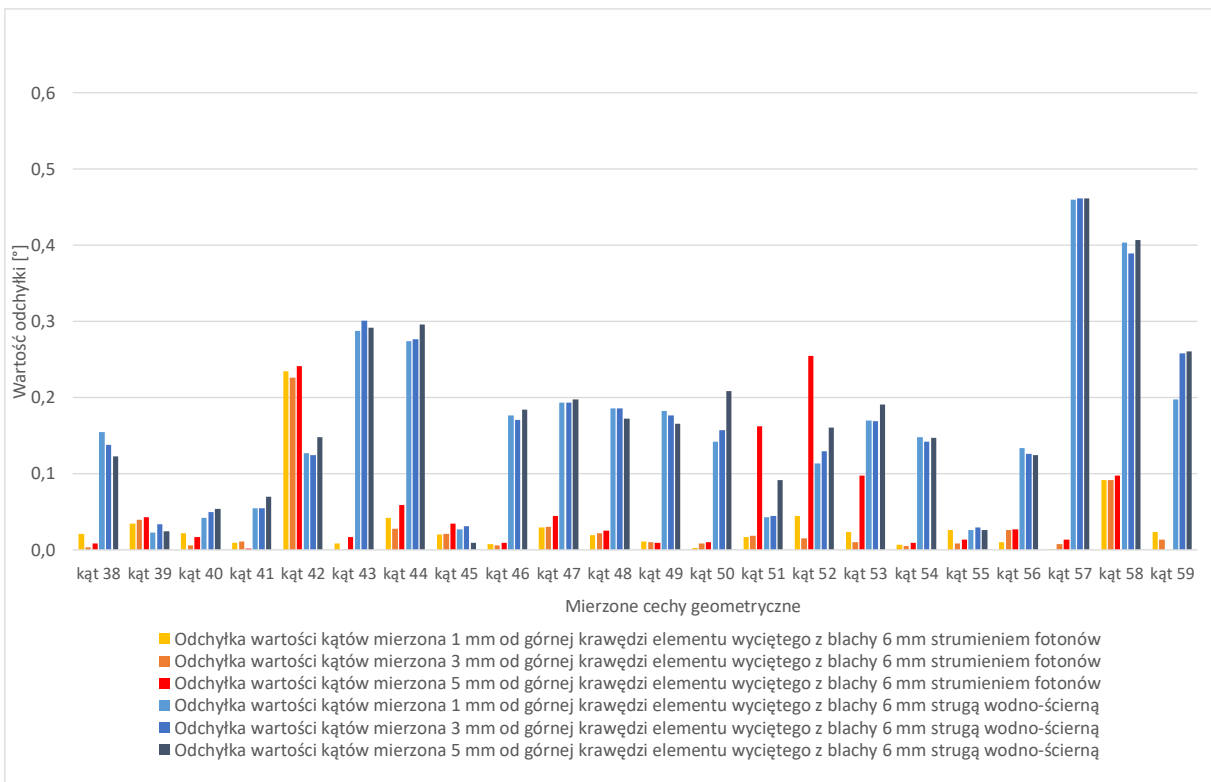
Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 9 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Odchyłka mierzona 9 mm od górnej krawędzi elementu, mm
okrąg 1	0,063	0,085	0,162	0,111	0,135	0,172
okrąg 2	0,096	0,079	0,119	0,111	0,119	0,226
okrąg 3	0,133	0,133	0,134	0,134	0,132	0,130
łuk 4	0,033	0,048	0,092	0,040	0,033	0,051
łuk 5	0,062	0,077	0,100	0,104	0,118	0,135
łuk 6	0,045	0,030	0,036	0,036	0,045	0,059
łuk 7	0,026	0,038	0,056	0,129	0,126	0,111
łuk 8	0,026	0,031	0,074	0,140	0,147	0,163
łuk 9	0,051	0,066	0,119	0,095	0,076	0,069
łuk 10	0,014	0,023	0,053	0,035	0,023	0,051
łuk 11	0,054	0,087	0,177	0,103	0,102	0,183
prosta 12	0,081	0,070	0,164	0,080	0,103	0,256
prosta 13	0,025	0,025	0,213	0,027	0,073	0,050
prosta 14	0,055	0,053	0,069	0,047	0,099	0,159
prosta 15	0,049	0,149	0,204	0,031	0,055	0,112
prosta 16	0,040	0,123	0,203	0,026	0,054	0,089
prosta 17	0,196	0,205	0,503	0,033	0,077	0,080
prosta 18	0,066	0,079	0,216	0,049	0,066	0,137
prosta 19	0,169	0,150	0,187	0,047	0,064	0,066
prosta 20	0,054	0,068	0,052	0,041	0,090	0,151
prosta 21	0,010	0,019	0,045	0,038	0,096	0,149
prosta 23	0,022	0,017	0,093	0,046	0,112	0,123
prosta 24	0,037	0,030	0,198	0,038	0,097	0,103
prosta 25	0,158	0,171	0,160	0,033	0,064	0,066
prosta 26	0,133	0,218	0,125	0,087	0,112	0,245
prosta 27	0,013	0,018	0,238	0,125	0,138	0,164
prosta 28	0,048	0,083	0,069	0,061	0,082	0,139
prosta 29	0,353	0,534	0,396	0,059	0,086	0,096
prosta 30	0,016	0,024	0,056	0,017	0,029	0,036
prosta 31	0,401	0,026	0,049	0,031	0,057	0,045
prosta 33	0,159	0,052	0,085	0,033	0,078	0,086
prosta 34	0,362	0,331	0,299	0,342	0,344	0,345
prosta 35	0,058	0,141	0,123	0,039	0,087	0,138
prosta 36	0,019	0,025	0,036	0,029	0,061	0,105
prosta 37	0,045	0,072	0,061	0,070	0,045	0,091

Tab. 44. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 10 mm

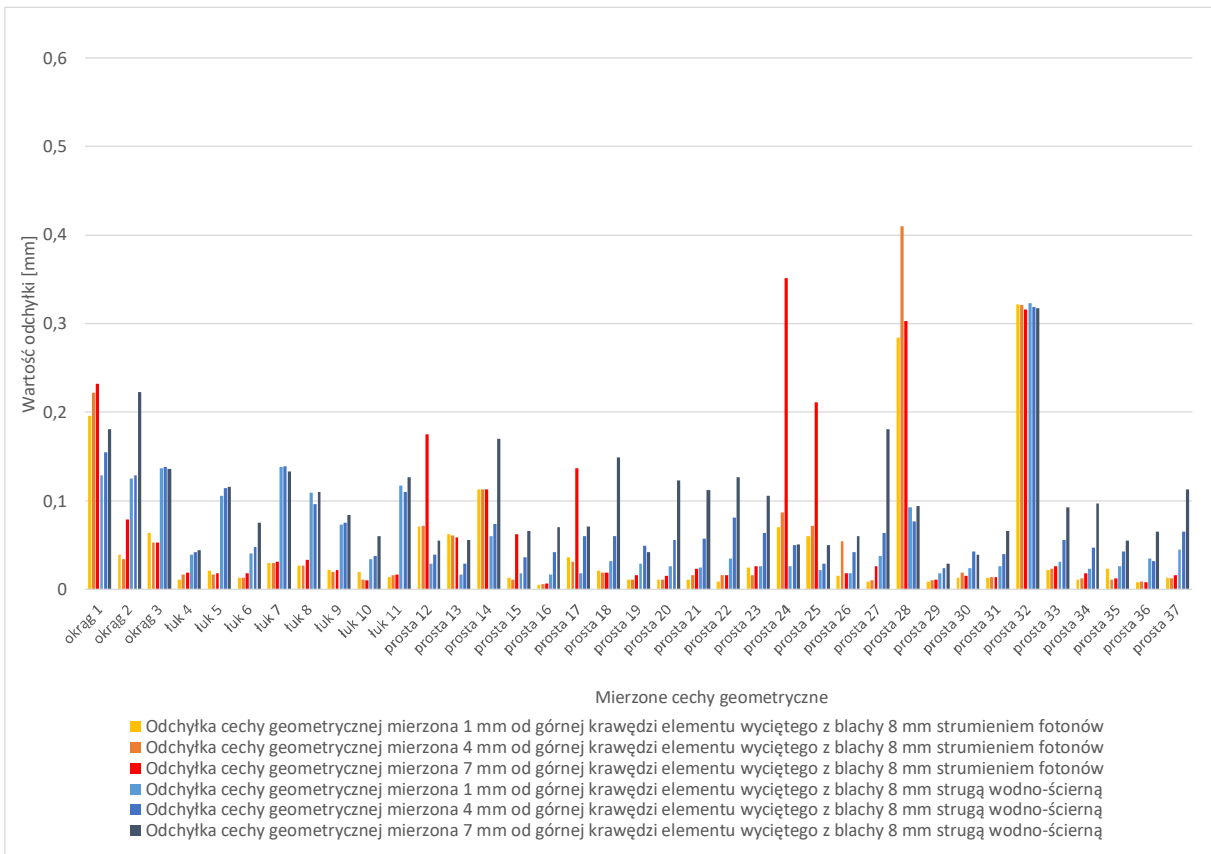
Cecha geometryczna	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 9 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 5 mm od górnej krawędzi elementu, °	Odchyłka wartości kątów mierzona 9 mm od górnej krawędzi elementu, °
kąt 38	0,072	0,024	0,119	0,175	0,156	0,154
kąt 39	0,025	0,027	0,067	0,166	0,141	0,210
kąt 40	0,083	0,111	0,061	0,050	0,031	0,001
kąt 41	0,008	0,005	0,036	0,168	0,157	0,252
kąt 42	0,236	0,404	0,473	0,082	0,032	0,028
kąt 43	0,058	0,085	0,043	0,205	0,193	0,187
kąt 44	0,035	0,021	0,008	0,131	0,125	0,115
kąt 45	0,100	0,112	0,048	0,081	0,081	0,079
kąt 46	0,005	0,007	0,009	0,224	0,236	0,210
kąt 47	0,015	0,048	0,090	0,200	0,213	0,226
kąt 48	0,033	0,025	0,032	0,207	0,176	0,175
kąt 49	0,036	0,053	0,100	0,244	0,212	0,179
kąt 50	0,020	0,024	0,006	0,156	0,157	0,257
kąt 51	0,029	0,007	0,058	0,046	0,040	0,074
kąt 52	0,052	0,057	0,065	0,109	0,162	0,196
kąt 53	0,009	0,001	0,179	0,142	0,155	0,150
kąt 54	0,230	0,262	0,255	0,148	0,148	0,149
kąt 55	0,175	0,209	0,096	0,015	0,018	0,008
kąt 56	0,063	0,060	0,018	0,204	0,207	0,226
kąt 57	0,043	0,064	0,083	0,344	0,375	0,374
kąt 58	0,501	0,260	0,331	0,223	0,156	0,167
kąt 59	0,193	0,208	0,164	0,275	0,550	0,526



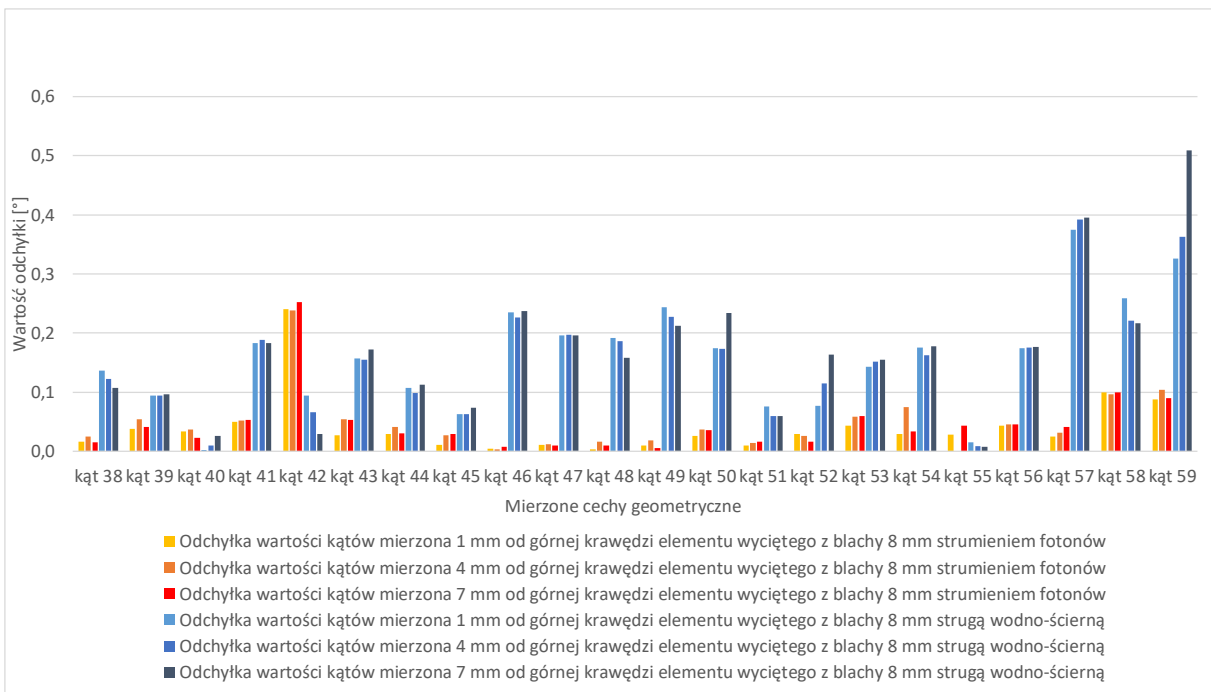
Rys. 72. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6 mm



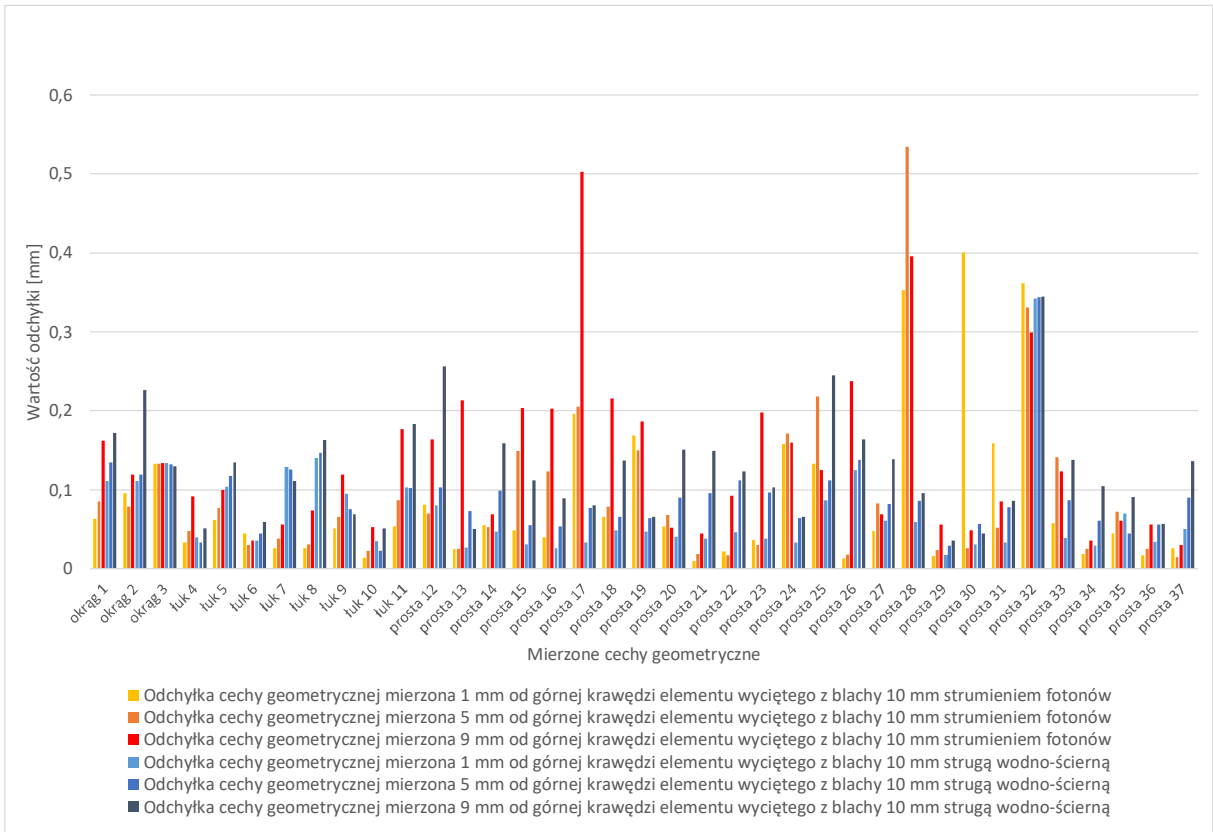
Rys. 73. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6 mm



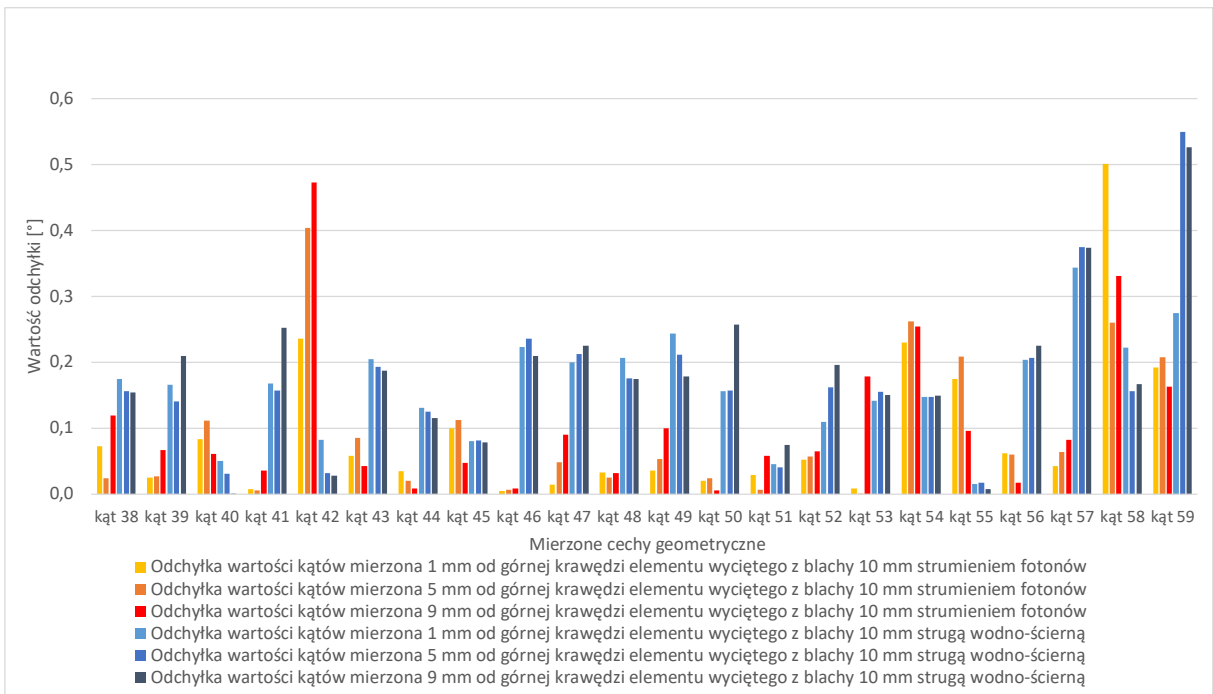
Rys. 74. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 8 mm



Rys. 75. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 8 mm



Rys. 76. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm



Rys. 77. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm

Spośród cech geometrycznych wyciętych strumieniem fotonów w elemencie z $g_b=6$ mm największą odchyłkę (wynoszącą 0,532 mm) wykazała prosta 21 (tab. 39 i rys. 72) – pomiar 1 mm od dolnej krawędzi. Natomiast najmniejszą odchyłkę (wynoszącą niespełna 0,007 mm) zaobserwowano przy pomiarze 1 mm od górnej krawędzi na prostej 19. Przy cięciu strugą wodno-ścierną największą odchyłkę można zaobserwować na prostej 36, gdzie mierzony 1 mm od dolnej krawędzi element odznaczał się odchyłką prostoliniowości wynoszącą 0,316 mm. Odchyłka o najmniejszej wartości (0,01 mm) została odnotowana na prostej nr 17 elementu wyciętego strumieniem fotonów. Pomiar zlokalizowany był 1 mm od góry elementu. Dla cech geometrycznych wyciętych strumieniem fotonów w elemencie z $g_b=6$ mm największą odchyłkę wynoszącą $0,2545^\circ$ odnotowano przy pomiarze 1 mm od dołu elementu, dla kąta nr 52. Natomiast najmniejszą (wynoszącą $0,0002^\circ$) zaobserwowano dla kąta nr 43 co widać w tab. 40 i na rys. 73. W elemencie wyciętym strugą wodno-ścierną odchyłka o największej wartości ($0,4615^\circ$) wystąpiła w pomiarze kąta nr 57 w $\frac{1}{2}$ grubości elementu. Najmniejszą wartość odchyłki ($0,0095^\circ$) zaobserwowano przy pomiarze kąta nr 45 wyznaczonym 1 mm od dołu elementu.

W elementach wyciętych strumieniem fotonów o $g_b=8$ mm największą odchyłkę 0,284 mm zaobserwowano mierząc prostą 28 w jej $\frac{1}{2}$ g_b . Najmniejszą odchyłkę (0,005 mm) wyznaczono dla prostej nr 16 zmierzonej 1 mm od górnej krawędzi elementu (tab. 41 i rys. 74). W przypadku elementu ukształtowanego strugą wodno-ścierną odchyłkę o największej wartości (0,323 mm) można zaobserwować na prostej nr 32 przy pomiarze 1 mm od górnej krawędzi elementu. Odchyłkę o najmniejszej wartości (0,017 mm) zaobserwowano natomiast na prostych nr 13 i nr 16, w obu przypadkach mierzonych 1 mm od góry elementu. Przy pomiarach kątów elementu o $g_b=8$ mm wyciętego strumieniem fotonów największą odchyłkę kąta rzeczywistego od nominalnego ($0,2527^\circ$) zaobserwowano dla kąta nr 42, mierząc 1 mm od dolnej krawędzi (tab. 42 i rys. 75). Natomiast najmniejszą odchyłkę odnotowano dla kąta nr 48 zmierzonego 1 mm od góry elementu. Odchyłka ta wynosiła $0,0032^\circ$. Największa odchyłka wartości kąta w elemencie wyciętym strugą wodno-ścierną ($0,5088^\circ$) wystąpiła dla kąta nr 59 i zmierzona została 1 mm od dołu elementu. Natomiast najmniejsza odchyłka ($0,0023^\circ$) została zmierzona dla kąta nr 40 – pomiar 1 mm od góry elementu.

Największą odchyłkę wymiaru cech geometrycznych w elemencie o $g_b=10$ mm wyciętym strumieniem fotonów wyznaczono dla prostej nr 28 i wynosiła ona 0,534 mm (tab. 43 i rys. 76). Zmierzono ją w $\frac{1}{2}$ g_b . Odchyłkę o najmniejszej wartości wynoszącej 0,01 mm zmierzono dla prostej nr 21 przy pomiarze 1 mm od górnej krawędzi. Dla elementu ukształtowanego strugą wodno-ścierną największą odchyłkę prostoliniowości zarejestrowaną dla prostej nr 32 i wartość

ta wyniosła 0,345 mm mierząc 1 mm od dolnej krawędzi. Odchyłkę o najmniejszej wartości w przypadku cięcia strugą wodno-ścierną (0,017 mm) zaobserwowano dla prostej nr 29 mierząc 1 mm od góry elementu. W pomiarach kątów dla cech geometrycznych wyciętych strumieniem fotonów w elemencie z $g_b=10$ mm największą odchyłkę ($0,4725^\circ$) wyznaczono dla kąta nr 42 – pomiar w odległości 1 mm od dołu elementu (tab. 44 i rys. 77). Odchyłkę o najmniejszej wartości zarejestrowano dla kąta nr 53 i wyniosła ona $0,0005^\circ$ przy pomiarze w $\frac{1}{2} g_b$. W przypadku cięcia strugą wodno-ścierną największej wartości odchyłki zarejestrowano dla kąta nr 59 – wyniosła ona $0,5498^\circ$ i zmierzona została w $\frac{1}{2} g_b$. Natomiast najmniejszą wartość odnotowano dla odchyłki kąta nr 40 zmierzonej 1 mm od dołu elementu, która wyniosła $0,0005^\circ$.

W dalszej kolejności wyniki z tabel 39-44 uśredniono sporządzając wykresy zbiorcze dla poszczególnych cech geometrycznych, grubości blachy oraz techniki cięcia. Wartości te zamieszczono w tabelach 45-47, a wykresy na rysunkach 78-80.

W przypadku mierzonych cech geometrycznych zaobserwowano, że wielkość odchyłki zwiększa się wraz z grubością blachy g_b zarówno dla cięcia strumieniem fotonów jak i dla strugi wodno-ściernej (rys. 78). Wartość odchyłek zwiększa się również wraz z wykonywaniem pomiaru w głąb elementu poprzez $\frac{1}{2} g_b$, aż do pomiaru 1 mm od dolnej krawędzi elementu. Spowodowane jest to głównie słabnącą mocą skoncentrowanego strumienia energii wraz z oddalaniem się od głowicy (w głąb ciętego elementu). Odchyłkę o największej średniej wartości około 0,14 mm zauważono mierząc element o $g_b=10$ mm po przecięciu strumieniem fotonów, natomiast najmniejszą (około 0,04 mm) dla $g_b=6$ mm po cięciu tą samą metodą.

Przy pomiarach kątów odchyłki o największej średniej wartości rzędu nawet $0,18^\circ$ zauważono na elementach wyciętych strumieniem fotonów, co przedstawia rysunek 79. Nie zauważono natomiast, aby wartości te zmieniały się dla pomiarów wykonywanych w coraz większym oddaleniu od wylotu strumienia energii z głowicy tnącej. Spowodowane to było tym, że mierzone kąty były umiejscowione na obwodzie elementu, co ułatwiało przecinanie na dłuższych odległościach w porównaniu do krótkich cięć wewnętrznych cech geometrycznych jak okrąg czy trójkąt. Odchyłka o najmniejszej średniej wartości $0,03^\circ$ została zmierzona na elemencie wykonanym z $g_b=6$ mm ukształtowanym strumieniem fotonów.

Rysunek 80 obrazuje średnie wartości odchyłek dla każdego rodzaju pomiaru. Wyraźnie widać, że odchyłka o największej wartości wystąpiła dla kątów w elementach wyciętych strugą wodno-ścierną. Odchyłkę o najmniejszej wartości natomiast zaobserwowano również przy pomiarze kątów, jednak przy cięciu strumieniem fotonów i $g_b=6$ mm.

Tab. 45. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych cech geometrycznych dla strumienia fotonów i strugi wodno-ściernej dla wybranych grubości blach

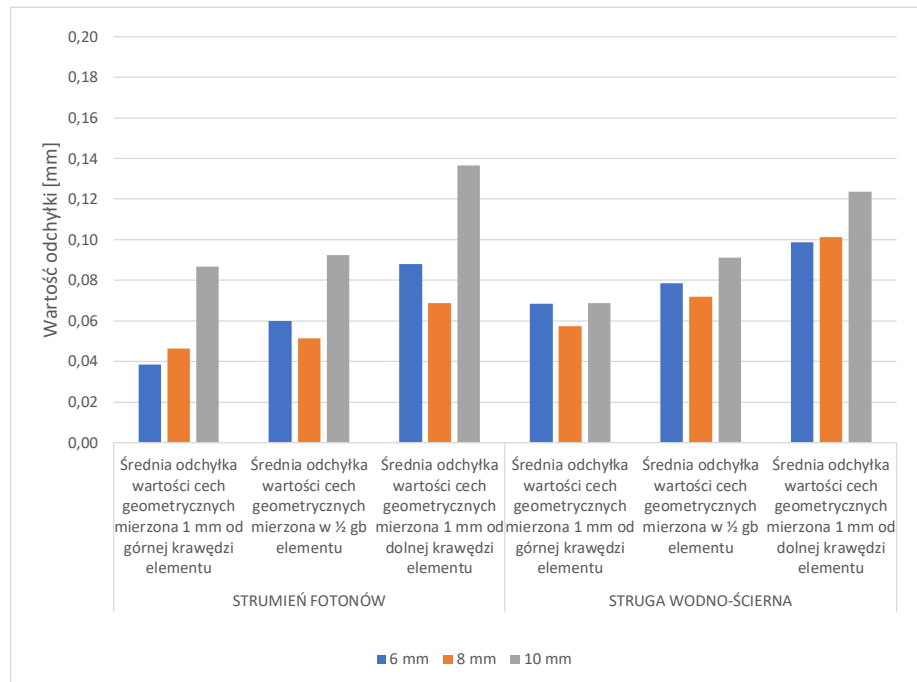
Grubość blachy, mm	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona w $\frac{1}{2} g_b$ elementu, mm	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona 1 mm od dolnej krawędzi elementu, mm	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, mm	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona w $\frac{1}{2} g_b$ elementu, mm	Średnia odchyłka cech geometrycznych mierzona 1 mm od dolnej krawędzi elementu, mm
6	0,039	0,060	0,088	0,069	0,078	0,099
8	0,046	0,051	0,069	0,058	0,072	0,101
10	0,087	0,092	0,137	0,069	0,091	0,124

Tab. 46. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych kątów dla strumienia fotonów i strugi wodno-ściernej dla wybranych grubości blach

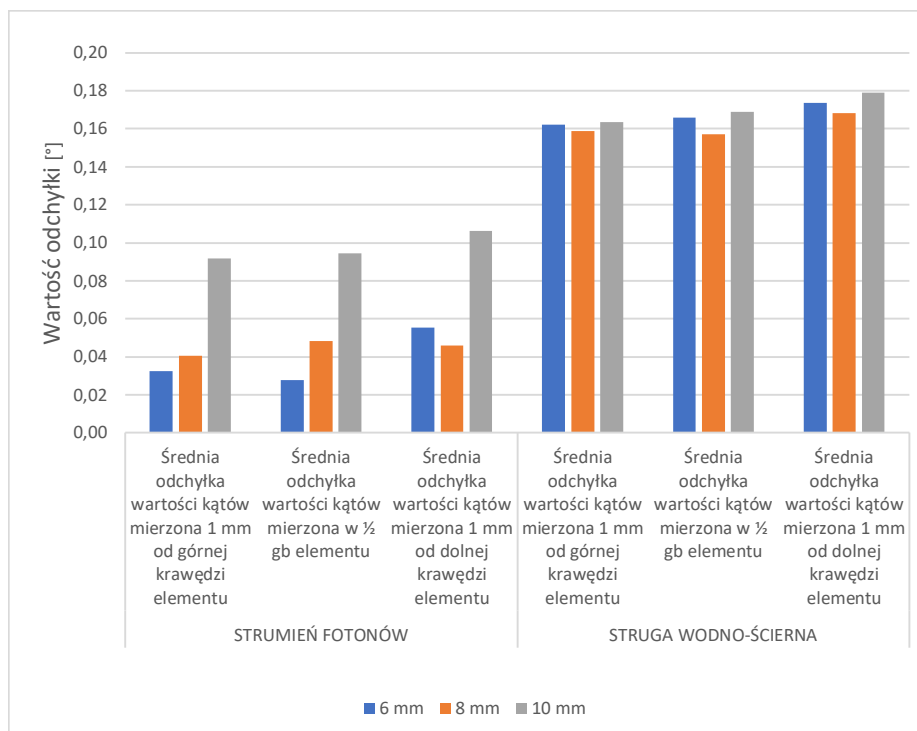
Grubość blachy, mm	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona w $\frac{1}{2} g_b$ elementu, °	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od dolnej krawędzi elementu, °	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od górnej krawędzi elementu, °	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona w $\frac{1}{2} g_b$ elementu, °	Średnia odchyłka wartości kątów mierzona 1 mm od dolnej krawędzi elementu, °
6	0,032	0,028	0,055	0,162	0,166	0,174
8	0,041	0,048	0,046	0,159	0,157	0,168
10	0,092	0,094	0,106	0,163	0,169	0,179

Tab. 47. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych cech geometrycznych i kątów dla strumienia fotonów i strugi wodno-ściernej

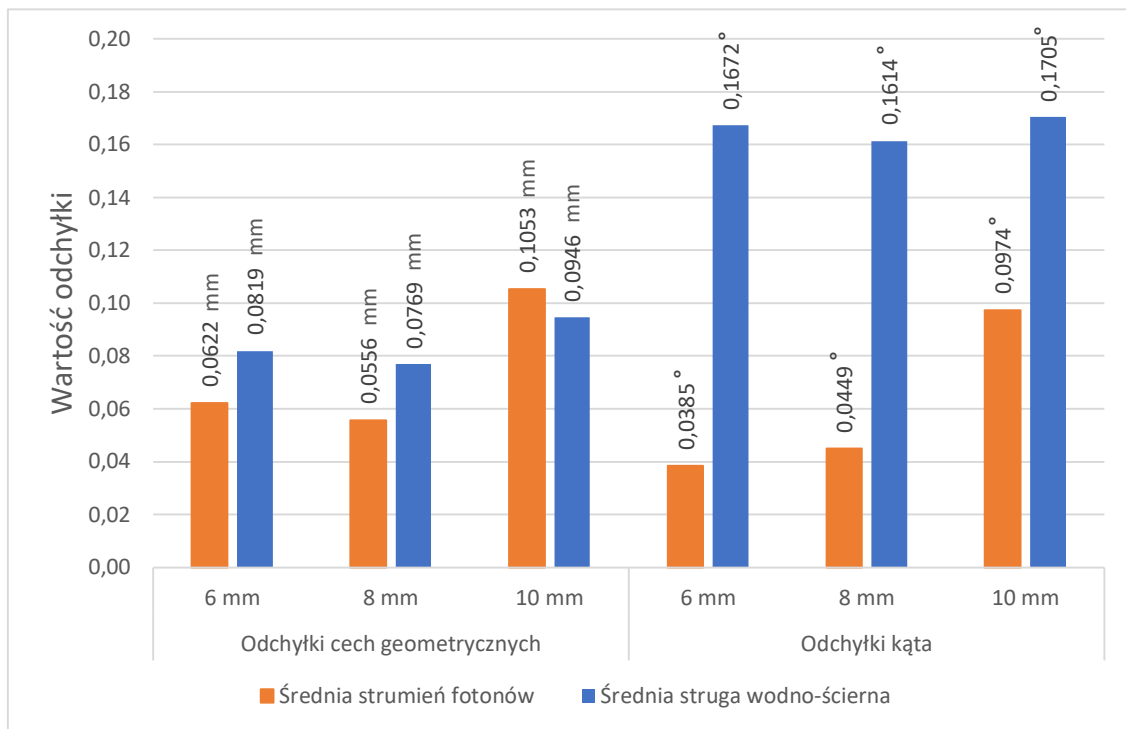
Rodzaj pomiaru	Grubość blachy, mm	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów	Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej
Cechy geometryczne, mm	6	0,062	0,082
	8	0,056	0,077
	10	0,105	0,095
Kąty, °	6	0,039	0,167
	8	0,045	0,161
	10	0,097	0,170



Rys. 78. Wykres wartości średnich odchyłek cech geometrycznych elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną mierzonych w trzech strefach krawędzi cięcia (1 mm od górnej krawędzi blachy, 1/2 gb i 1 mm od dolnej krawędzi blachy)



Rys. 79. Wykres wartości średnich odchyłek kątów dla elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną (1 mm od górnej krawędzi blachy, 1/2 gb i 1 mm od dolnej krawędzi blachy)



Rys. 80. Wykres wartości średnich odchyłek mierzonych cech geometrycznych i kątów dla elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną dla trzech grubości ciętej blachy $g_b=6, 8$ i 10 mm

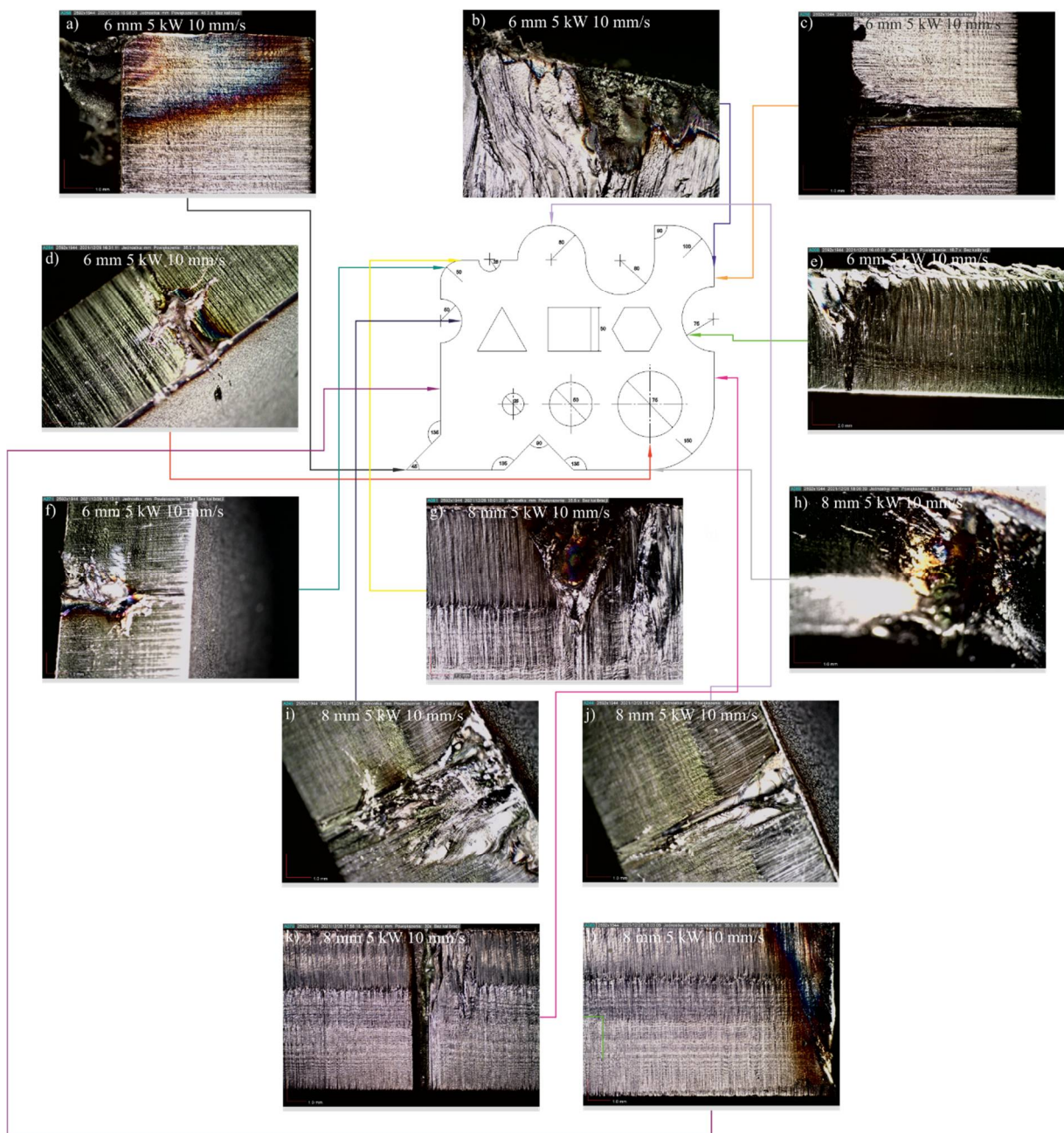
Analizując wykres wartości średnich odchyłek wymiaru mierzonych cech geometrycznych (rys. 78) można zauważyć, że wartości są do siebie zbliżone, poza $g_b=10$ mm dla obu metod cięcia, gdzie wartości są największe dla odchyłki wymiarowej zmierzonej 1 mm od dołu elementu. Było to spowodowane słabnącą mocą wiązki zarówno laserowej jak i strugi wodno-ściernej podczas cięcia w dolnej części elementu, jak również rozdzielaniem się tej wiązki. Podobną zależność zaobserwowano na wykresie wartości średnich odchyłek kątów (rys. 79), zaobserwowano, że wartości odchyłek są największe w dolnej części przeciętego elementu (mierzone 1 mm od dołu elementu dla obu metod cięcia). W obu metodach cięcia odległość dyszy od aktualnego miejsca przecinania rośnie wraz zagłębianiem w materiał. Dlatego też potencjał skoncentrowanego strumienia energii spada i powoduje zwiększenie odchyłki w dolnej części elementu. Rysunek 80 obrazuje wpływ grubości blachy na wartość odchyłki w obu metodach cięcia, na którym to zauważono, że im grubsza blacha, tym większa odchyłka. Większe i zróżnicowane odchyłki powstały w wyniku rozszczepienia wiązki wysokoskoncentrowanego strumienia energii. Moc cięcia przy powierzchni elementu jest największa co zapewnia mniejsze odchyłki wymiarowe niż po zagłębieniu się strumienia energii w głąb materiału.

7.2. Analiza obrazów mikroskopowych wyciętych elementów

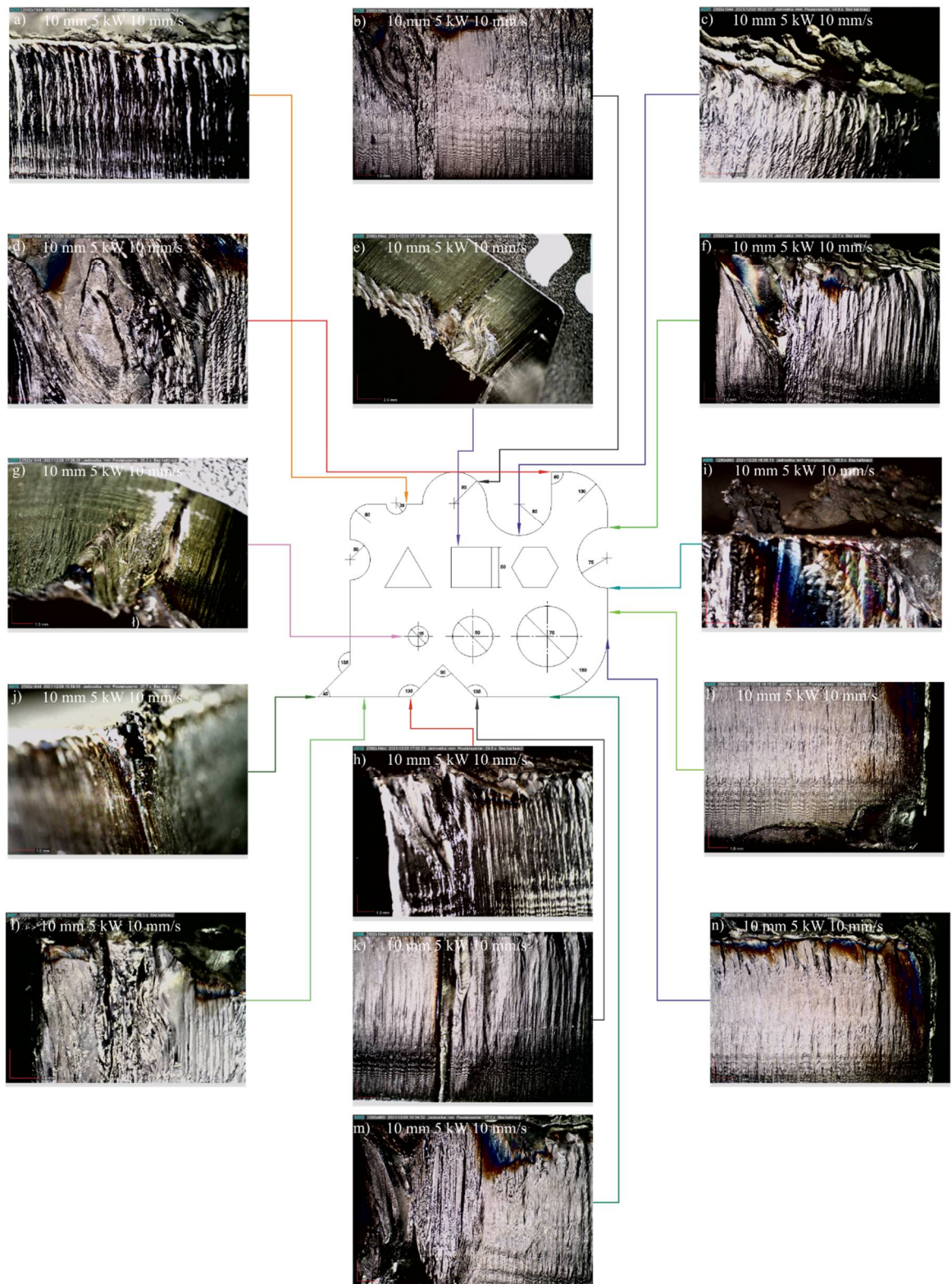
Za pomocą mikroskopu Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. (szerzej opisanego w podrozdziale 5.4.2) zarejestrowano obrazy mikroskopowe wybranych fragmentów krawędzi ciętej o rozdzielczości 2592×1944 pikseli. Wybierając miejsce do obserwacji poszukiwano w szczególności defektów powierzchni ciętej, takich jak zendra, nadpalenie materiału czy pierwsze wejście głowicy tnącej w materiał. Wyniki obserwacji zamieszczono w sposób zbiorczy na rysunkach 81-84, na których kolorowymi strzałkami zaznaczono miejsca obserwacji na zarysie wyciętego elementu.

Dokonując oceny obrazów mikroskopowych powierzchni elementów po cięciu strumieniem fotonów (realizowanego z następującymi parametrami: $P=5$ kW oraz $v_{fLASER}=10$ mm/s) dla grubości blachy $g_b=6$ i 8 mm można stwierdzić, że w porównaniu do blachy $g_b=10$ mm na powierzchni wyciętych elementów dużo rzadziej występowały defekty takie jak deformacje plastyczne, co widać na rysunkach 81 i 82 (obrazy mikroskopowe powierzchni po cięciu strumieniem fotonów). Deformacje plastyczne obecne na powierzchni ciętej strugą wodno-ścierną, były sporadyczne i dużo mniej widoczne, co zobrazowano na rysunkach 83 i 84 (obrazy mikroskopowe powierzchni po cięciu strumieniem strugą wodno-ścierną).

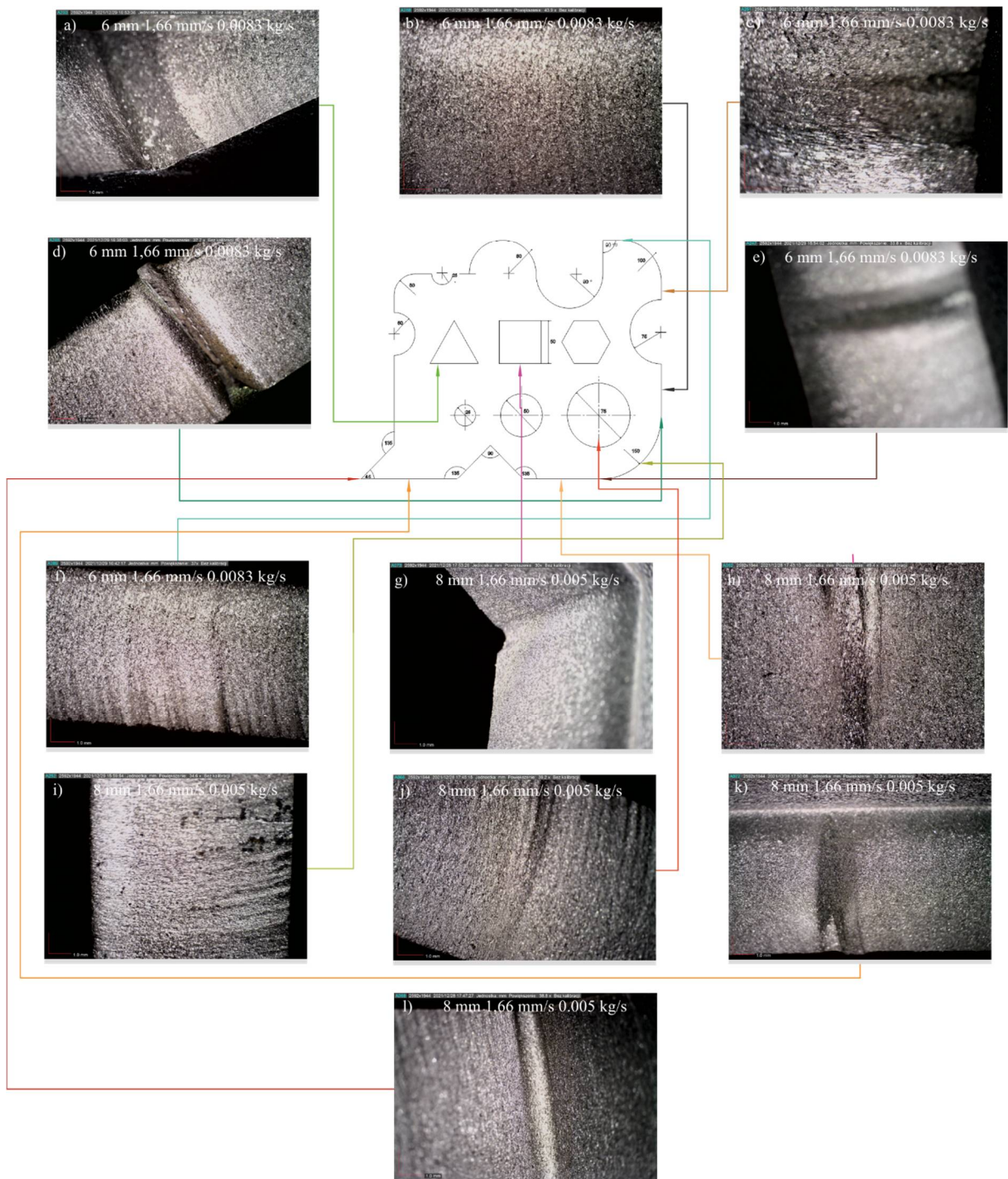
Powierzchnia elementów ukształtowanych w procesie cięcia strugą wodno-ścierną odznaczała się znacznie mniejszą ilością defektów niż w przypadku elementów wyciętych strumieniem fotonów. Zaobserwowano tylko jedną bardziej znaczącą wadę w miejscu inicjowania cięcia (wejście strugi wodno-ściernej w materiał) w przypadku blach o grubości $g_b=8$ i 10 mm (rysunek 82g, 84a i 84e). Kontynuując obserwację elementów ukształtowanych strugą wodno-ścierną sporządzono rysunki 83f, 83j oraz 84e, które obrazują miejscową falistość krawędzi cięcia elementów o grubości $g_b=6, 8, 10$ mm. Intensywność falistości wzrasta wraz z oddalaniem się od strefy wejścia strugi w materiał. Nie zaobserwowano natomiast podziału na strefy jakości z wyjątkiem rysunku 83f, na którym widać powierzchnię elementu wyciętego z blachy $g_b=6$ mm. Zauważono również miejsce, gdzie głowica tnąca kończyła swoją pracę. Odznaczało się to charakterystycznym brakiem przecięcia materiału o szerokości około 1 mm (ukazują to obrazy 83d, 83k oraz 84d). Zaobserwowano również zbiór ciemnych plam o kształtach nieregularnych, co może być skutkiem erozji materiału przez garnet w procesie cięcia (rysunek 82i).



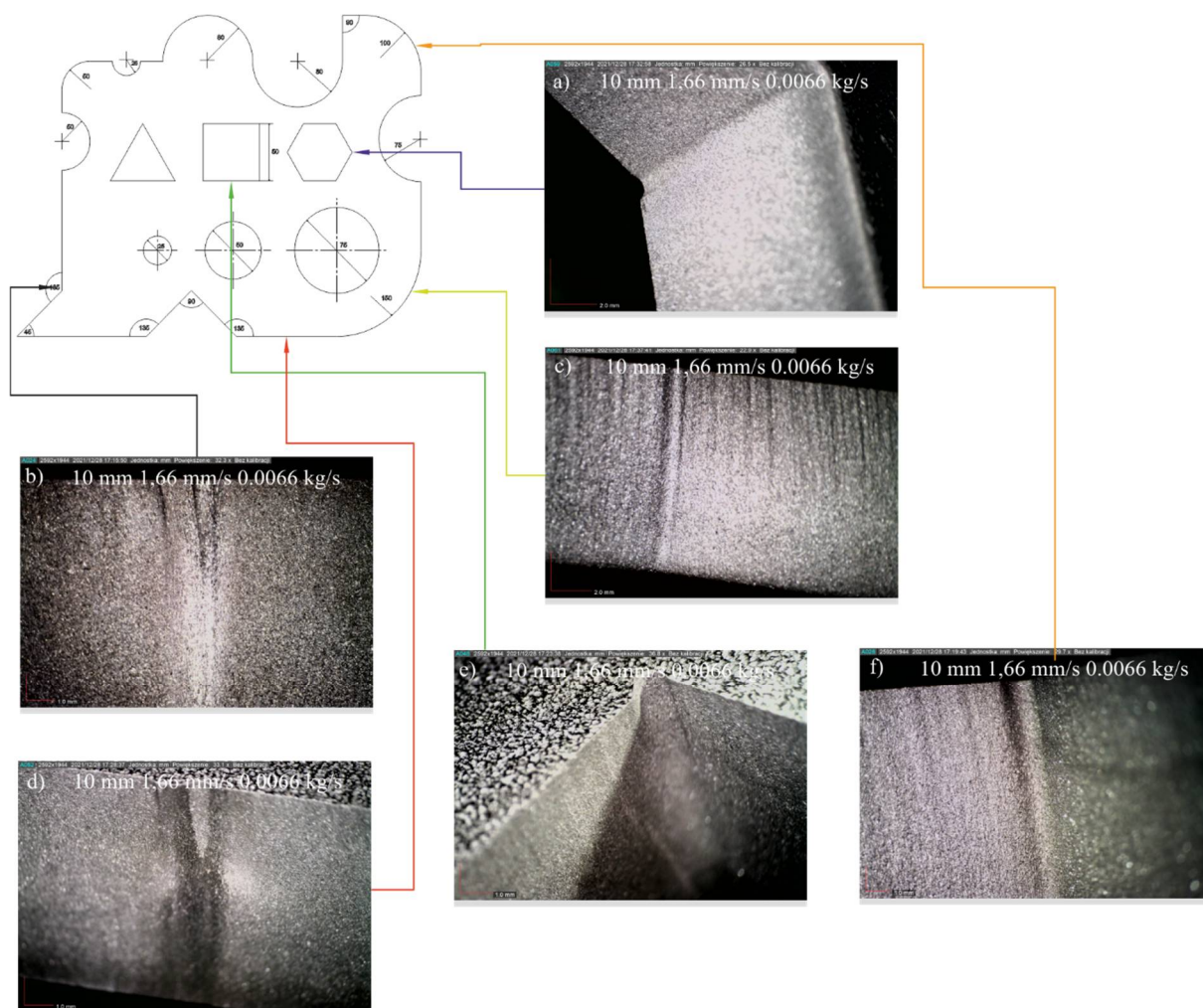
Rys. 81. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a-f) i 8 mm (g-l) z widocznymi deformacjami i defektami



Rys. 82. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=10$ mm z widocznymi deformacjami i defektami



Rys. 83. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a-f) i 8 mm (g-l) z widocznymi deformacjami i defektami

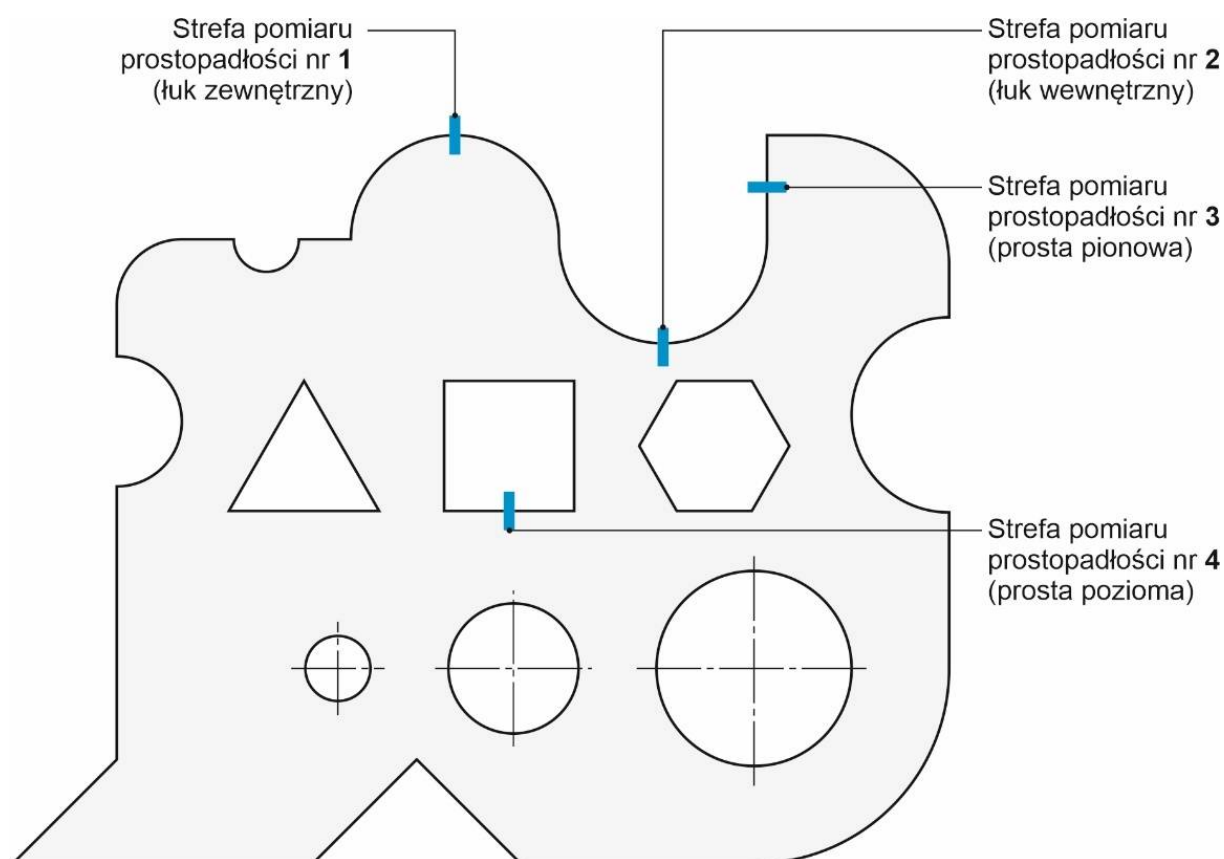


Rys. 84. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=10$ mm z widocznymi deformacjami i defektami

W wyniku obserwacji wybranych obszarów z największymi defektami zauważono, że elementy wycięte strugą wodno-ścierną odznaczały się większą liczbą defektów. Podobnie jak w przypadku elementów wyciętych strugą wodno-ścierną, również w przypadku blach ciętych strugą wodno-ścierną zaobserwowano wyraźną strefę, w której głowica robocza kończyła cięcie. Defekt ten uwidocznił się dla każdej grubości wycinanego elementu po cięciu strugą wodno-ścierną – obrazuje to rysunek 81c, 81k oraz 82k. Ponadto na obrazach 81a, 81f-g, 81l oraz 82b, 82d, 82i, 82l-n można zauważyć liczne nadpalenia odznaczające się zmianą barwy materiału, co prawdopodobnie jest skutkiem skumulowania energii cieplnej w tych obszarach. Duży wpływ na jakość powierzchni cięcia ma stopiony w górnej strefie materiał wyrzucany przez gaz towarzyszący, co zauważył również Pacroni (2010). Szczególnie widoczne jest to na całym obwodzie blachy o $g_b=10$ mm (rysunek 82e, 82g, 82l).

7.3. Analiza błędu prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy

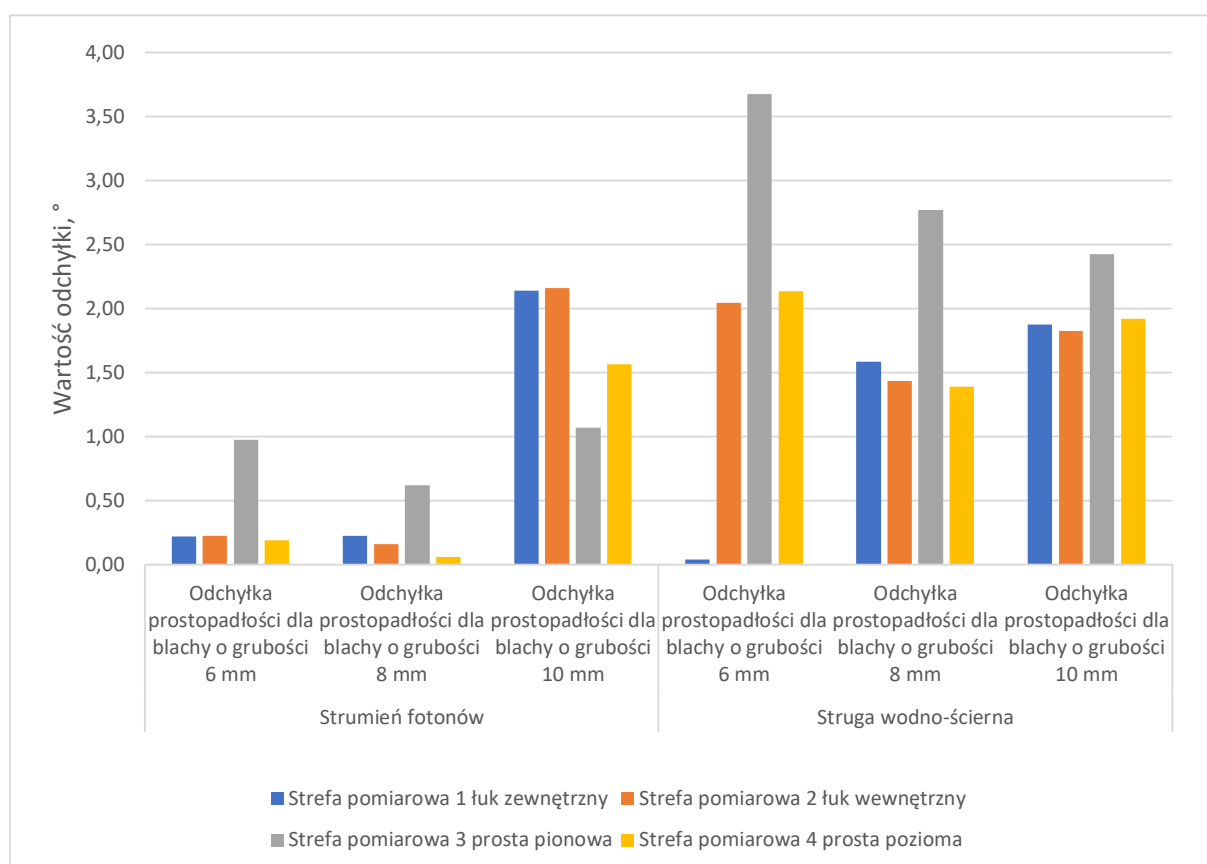
Na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 przeprowadzono serię pomiarów prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej elementów ze stali X5CrNi18-10 o trzech grubościach (6, 8 i 10 mm) ukształtowanych strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną. Następnie wyznaczono odchyłki prostopadłości osobno dla zarysu prostej poziomej, pionowej oraz łuków wewnętrznego i zewnętrznego elementu testowego. Aby zestawić pomiary kątów, współrzędne przeliczono na wartości dziesiętne stopnia. Wyniki obliczeń odchyłek mierzonych elementów wyciętych z blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm zestawiono w tabeli 48, natomiast oznaczenia mierzonych stref zamieszczono na rysunku 85. Z uzyskanych wartości sporządzono wykres odchyłek prostopadłości (rysunek 86) elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6, 8 i 10 mm.



Rys. 85. Oznaczenia stref pomiarowych prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy

Tab. 48. Zestawienie odchyłek prostopadłości na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6, 8 i 10 mm

Strefa pomiarowa	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów			Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej		
	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 6 mm, °	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 8 mm, °	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 10 mm, °	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 6 mm, °	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 8 mm, °	Odchyłka prostopadłości dla blachy o grubości 10 mm, °
1. łuk zewnętrzny	0,218	0,224	2,142	0,038	1,585	1,872
2. łuk wewnętrzny	0,222	0,157	2,159	2,043	1,436	1,825
3. prosta pionowa	0,972	0,617	1,068	3,675	2,770	2,423
4. prosta pozioma	0,190	0,059	1,566	2,137	1,387	1,922



Rys. 86. Wykres odchyłek wartości kątów mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm

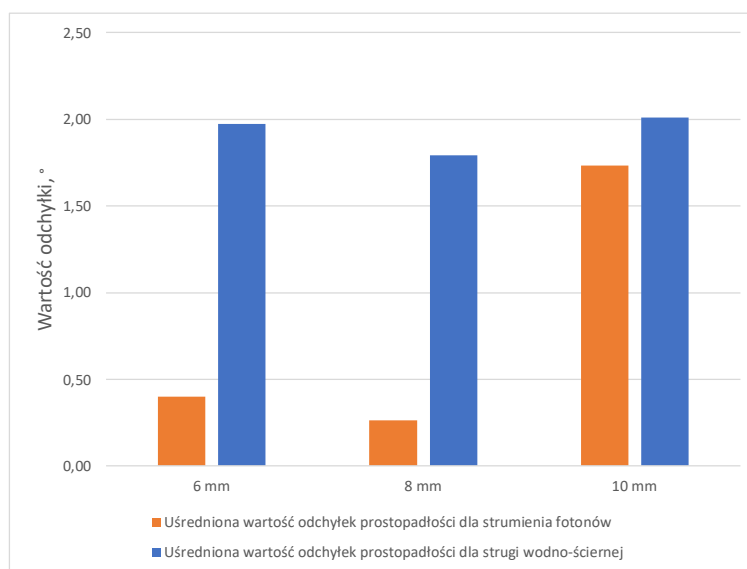
Spośród zmierzonych prostopadłości odchyłkę o największej wartości (wynoszącą 2,159°) wykazała strefa pomiarowa 2, czyli pomiar łuku wewnętrznego dla blachy o $g_b=10$ mm wyciętej strumieniem fotonów (tab. 48 i rys. 86). Natomiast najmniejszą odchyłkę (wynoszącą

niespełna $0,059^\circ$) zaobserwowano w strefie pomiarowej 4, czyli pomiar prostej poziomej dla blachy o $g_b=8$ mm. Dla cięcia strugą wodno-ścierną spośród zmierzonych prostopadłości odchyłkę o największej wartości (wynoszącą aż $3,675^\circ$) wykazała strefa pomiarowa 3, czyli pomiar prostej pionowej dla blachy o $g_b=6$ mm wyciętej strugą wodno-ścierną. Natomiast najmniejszą odchyłkę (wynoszącą niespełna $0,038^\circ$) zaobserwowano na strefie pomiarowej 1, czyli pomiar łuku zewnętrznego również dla blachy o $g_b=6$ mm.

W dalszej kolejności wyniki z tabeli 48 uśredniono sporządzając wykres zbiorczy dla wszystkich stref pomiarowych, grubości blachy oraz techniki cięcia. Wartości te zamieszczono w tabeli 49, a wykres na rysunku 87.

Tab. 49. Zestawienie wartości średnich odchyłek prostopadłości elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6, 8 i 10 mm

Grubość blachy g_b , mm	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów, °	Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej, °
6	0,401	1,973
8	0,264	1,795
10	1,734	2,011



Rys. 87. Wykres wartości średnich odchyłek prostopadłości elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną dla trzech grubości ciętej blachy $g_b=6, 8$ i 10 mm

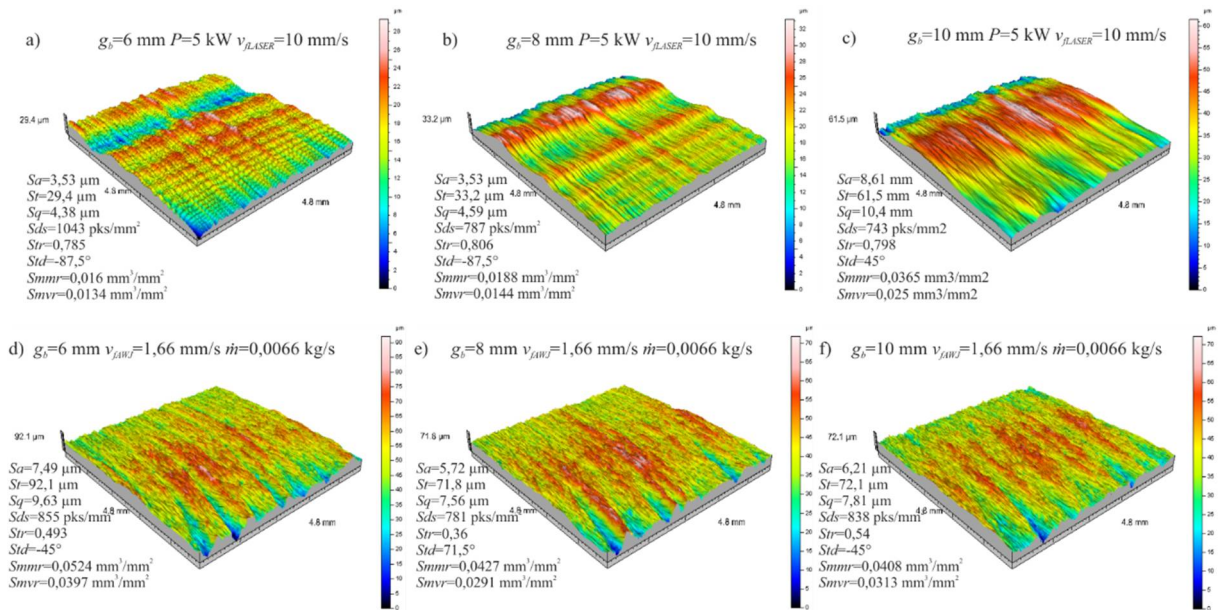
Analizując sporządzone zestawienie wyników pomiarów zaobserwowano, że wielkość średniej odchyłki prostopadłości dla cięcia strugą wodno-ścierną jest zbliżona i wynosiła od $1,79-2,01^\circ$ niezależnie od strefy pomiarowej i od grubości blachy. Oznacza to, że dla zastosowanych parametrów technologicznych cięcia strugą wodno-ścierną nie można określić

jednoznacznie wpływu zmian grubości ciętego materiału w zakresie przyjętym w opisywanych badaniach. Zauważono również, że średnia odchyłka prostopadłości dla cięcia strumieniem fotonów ma znacznie mniejszą wartość niż średnia wyznaczona na podstawie wyników pomiarów elementów po cięciu strugą wodno-ścierną i wynosiła dla blachy $g_b=6$ mm $0,40^\circ$, dla $g_b=8$ mm $0,26^\circ$, a dla $g_b=10$ mm $1,73^\circ$. Kształt litery „V” w szczelinie przecięcia, zaobserwowany podczas mierzenia prostopadłości, może być wynikiem zmniejszenia liczby ziaren ściernych w procesie erodowania materiału ziarnami garnetu przy cięciu strugą wodno-ścierną na jednostkę powierzchni ciętej w określonym czasie. W efekcie prostopadłość szczeliny cięcia do górnej krawędzi przecinanego elementu odbiega od kąta prostego. Natomiast w cięciu strumieniem fotonów elementu z $g_b=10$ mm zaobserwowano odchyłkę prostopadłości o znacznie większej wartości, gdzie słabnąca wiązka strumienia fotonów odchyłała się podczas cięcia do wewnątrz szczeliny cięcia.

7.4. Analiza struktury geometrycznej powierzchni cięcia

Wyniki pomiarów mikrotopografii powierzchni elementu testowego wycinanego w badaniach właściwych przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w profilometr stykowy Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH z jednostką przesuwu głowicy pomiarowej Waveline 60 Basic, zaprezentowanego w podrozdziale 5.4.5. Z uwagi na gabaryty mierzonego elementu nie dało się go umocować w całości do badań na stanowisku pomiarowym, dlatego też wycięto w tym celu fragment elementu testowego do pomiarów. Zdecydowano również, że pomiary topografii powierzchni ciętej będą wykonywane wyłącznie w dolnej części strefy cięcia, co znacznie skróciło czas pomiaru – analogicznie, jak to miało miejsce w badaniach rozpoznawczych. Na każdej próbce w dolnej części strefy cięcia rejestrowano mikrotopografię powierzchni o wymiarach (oś x , y): $4,8 \times 4,8$ mm. Podczas pomiaru rejestrowanych było 241 profili (oś y). Odległość między profilami wynosiła $20 \mu\text{m}$. Na jednym profilu rejestrowano 9530 punktów (oś x). Odległość między punktami profilu wynosiła $0,5 \mu\text{m}$. Każdy pomiar był realizowany w trybie jednoprzebiegowym. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano analizie przy użyciu specjalistycznego oprogramowania TalyMap Platinum 4.0 firmy Taylor-Hobson Ltd.

Zestawienie otrzymanych mikrotopografii powierzchni zamieszczono na rysunku 88 dla powierzchni po procesie cięcia strumieniem fotonów (rys. 88a-c) oraz strugą wodno-ścierną (rys. 88d-f).



Rys. 88. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a,d), 8 mm (b,e) i 10 mm (c, f) wyciętych strumieniem fotonów (a-c) przy stałych parametrach: mocy $P=5$ kW i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{LASER}=10$ mm/s oraz strugą wodno-ścierną (d-f) przy stałych parametrach: natężeniu przepływu ścierniwa $\dot{m}=0,0066$ kg/s i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{AWJ}=1,66$ mm/s

Dla każdej z otrzymanych mikrotopografii powierzchni wyznaczano wartości wybranych wskaźników SGP, które wymieniono poniżej (Nowicki, 1991, Oczóś i Liubimow, 2003):

- Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni),
- St (całkowita wysokość nierówności powierzchni),
- Sq (średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni),
- Sds (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni),
- Str (wskaźnik tekstury powierzchni),
- $Smmr$ (średnia objętość materiału),
- $Smvr$ (średnia objętość pustek – miejsc wolnych od materiału).

W tabeli 50 zestawiono wartości parametrów Sa , St , Sq , Sds , Str , $Smmr$, $Smvr$, zmierzone na wyznaczonej powierzchni po wycięciu elementów zgodnie z przyjętą metodyką badań. Natomiast na rysunku 89 zaprezentowano wykresy ilustrujące zmiany wartości parametrów SGP w zależności od metody cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną dla trzech rozpatrywanych grubości blachy g_b wynoszącej 6, 8 i 10 mm.

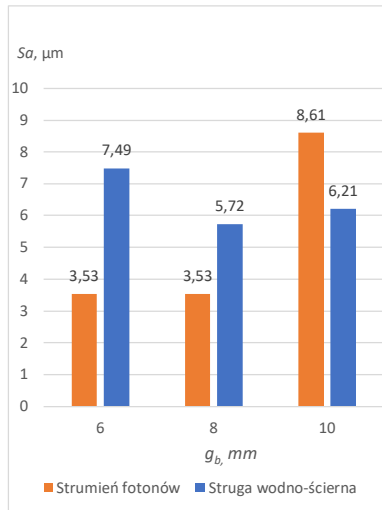
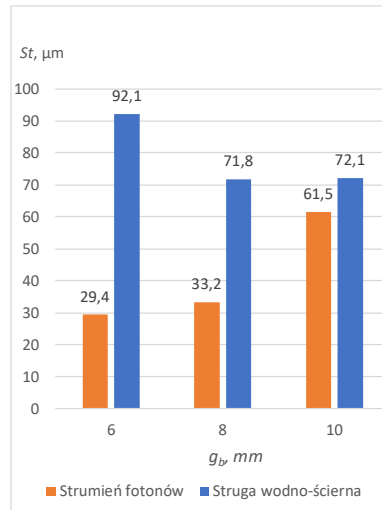
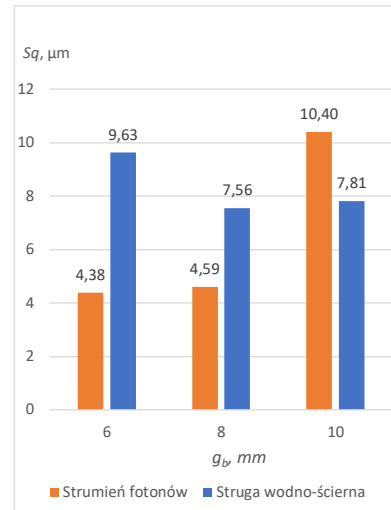
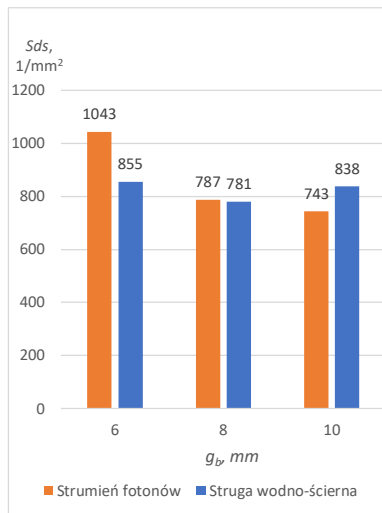
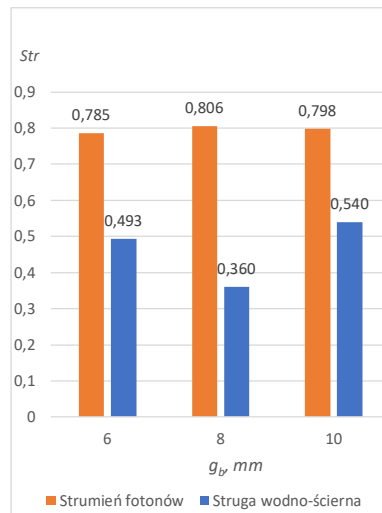
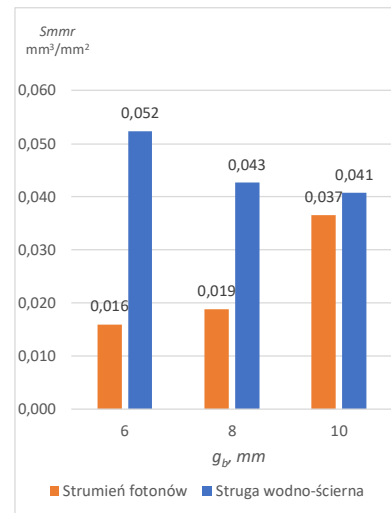
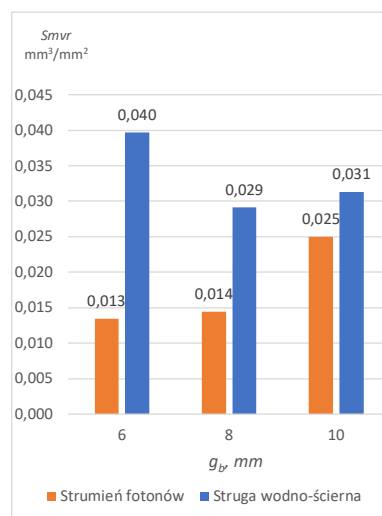
Tab. 50. Wyniki pomiarów wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni

Parametr SGP	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów $v_{fLASER}=10\text{ mm/s}, P = 5\text{ kW}$			Proces cięcia strugą wodno-ścierną $v_{fAWJ}=1,66\text{ mm/s}, \dot{m} = 0,0066\text{ kg/s}$		
	$g_b=6\text{ mm}$	$g_b=8\text{ mm}$	$g_b=10\text{ mm}$	$g_b=6\text{ mm}$	$g_b=8\text{ mm}$	$g_b=10\text{ mm}$
$Sa, \mu\text{m}$	3,53	3,53	8,61	7,49	5,72	6,21
$St, \mu\text{m}$	29,4	33,2	61,5	92,1	71,8	72,1
$Sq, \mu\text{m}$	4,38	4,59	10,4	9,63	7,56	7,81
$Sds, 1/\text{mm}^2$	1043	787	743	855	781	838
Str	0,785	0,806	0,798	0,493	0,36	0,54
$Smmr, \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,0160	0,0188	0,0365	0,0524	0,0427	0,0408
$Smvr, \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,0134	0,0144	0,0250	0,0397	0,0291	0,0313

Analiza zmian wartości parametru Sa dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów pokazana na rysunku 89a wykazała, że dla blach o grubości $g_b=6$ i 8 mm wartość tego parametru jest taka sama i wynosi $3,53\ \mu\text{m}$. Ponaddwukrotnie większą wartość tego parametru zaobserwowano dla blachy o grubości $g_b=10\text{ mm}$ dla tej samej metody. Dla cięcia strugą wodno-ścierną w przypadku elementu wyciętego z blachy o grubości $g_b=6\text{ mm}$ $Sa=7,49\ \mu\text{m}$. Zbliżoną wartość $Sa=5,72\ \mu\text{m}$ zmierzono w przypadku $g_b=8\text{ mm}$, natomiast dla $g_b=10\text{ mm}$ wartość parametru Sa wynosiła $6,21\ \mu\text{m}$ dla tej samej metody cięcia.

Analiza zmian wartości parametru St dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów pokazana na rysunku 89b wykazała, że najbardziej znaczący wpływ na uzyskane wyniki pomiarów ma grubość ciętego materiału. Najwyższą całkowitą wysokość nierówności $61,5\ \mu\text{m}$ zmierzono na powierzchni po cięciu strumieniem fotonów przy grubości blachy $g_b=10\text{ mm}$. Wartość ta spadła do $33,2\ \mu\text{m}$ dla $g_b=8\text{ mm}$ i w ostateczności zaobserwowano wynik o najmniejszej wartości $29,4\ \mu\text{m}$ dla elementu wyciętego z $g_b=6\text{ mm}$. Sytuacja odwrotna została zauważona dla elementów wyciętych strugą wodno-ścierną. Największą wartość parametru $St=92,1\ \mu\text{m}$ zmierzono dla $g_b=6\text{ mm}$, elementy wycięte z $g_b=8$ i 10 mm miały zbliżoną wartość parametru równą w przybliżeniu $72\ \mu\text{m}$.

Analiza wartości parametru Sq przedstawionych w formie wykresów na rysunku 89c wykazała, że sytuacja jest niemalże identyczna jak dla parametru St dla obu metod cięcia. Przy cięciu strumieniem fotonów wraz ze wzrostem grubości blachy g_b wartość parametru rośnie od $4,38\ \mu\text{m}$ przez $4,59\ \mu\text{m}$ aż do $10,4\ \mu\text{m}$ odpowiednio dla $g_b=6, 8$ i 10 mm . Dla strugi wodno-ściernej największa wartość parametru średniego kwadratowego odchylenia chropowatości $Sq=9,63\ \mu\text{m}$ została zaobserwowana na powierzchni wyciętej z $g_b=6\text{ mm}$. Zbliżone wartości około $7,6\ \mu\text{m}$ zauważono dla $g_b=8$ i 10 mm .

a) Sa b) St c) Sq d) Sds e) Str f) $Smmr$ g) $Smvr$ 

Rys. 89. Zmiany wartości parametru a) Sa , b) St , c) Sq , d) Sds , e) Str , f) $Smmr$, g) $Smvr$ powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w zależności od grubości blachy g_b w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną

Analiza zmian wartości parametru Sds dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 89d wykazała, że największą gęstość wierzchołków nierówności powierzchni po cięciu zaobserwowano na powierzchni po cięciu strumieniem fotonów blachy o $g_b=6$ mm, gdzie parametr Sds wyniósł około 1043 $1/\text{mm}^2$. Nie zauważono znaczącego wpływu grubości blachy g_b na zmierzone wartości opisywanego parametru. Zagęszczenie występowania wierzchołków nierówności wyniosło od 781 $1/\text{mm}^2$ do 855 $1/\text{mm}^2$ dla obu metod cięcia.

Analiza zmian wartości parametru Str opisującego izotropowość powierzchni po cięciu strumieniem fotonów pokazana na rysunku 89e wykazała niemal jednakowe wartości tego parametru w zależności od grubości blachy ($0,785$ - $0,806$). Natomiast w przypadku elementów wyciętych strugą wodno-ścierną zaobserwowano najmniejszą wartość $Str=0,36$ dla $g_b=8$ mm przy porównywalnych wartościach dla pozostałych dwóch grubości blachy ($Str=0,49$ - $0,54$).

Analiza zmian wartości parametru $Smmr$ dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 89f wykazała, że wartości dla wszystkich grubości blach są bardzo zbliżone dla cięcia strugą wodno-ścierną ($0,042$ - $0,052$ mm^3/mm^2). Sytuacja jest nieco inna dla elementów wyciętych strumieniem fotonów, gdzie zbliżone są tylko wartości dla $g_b=6$ i 8 mm ($0,016$ - $0,019$ mm^3/mm^2), natomiast przy $g_b=10$ mm wartość parametru $Smmr$ jest niemal dwa razy większa ($0,037$ mm^3/mm^2). Największą wartość parametru $Smmr$ (około $0,05$ średniej objętości materiału w mm^3 na mm^2) wyznaczono na powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną blachy o grubości $g_b=6$ mm. Najniższą wartość parametru $Smmr$ wynoszącą $0,016$ mm^3/mm^2 wyznaczono również dla $g_b=6$ mm przy cięciu strumieniem fotonów. Dodatkowo zauważono, że wartość opisywanego parametru rośnie wraz ze wzrostem grubości blachy g_b w cięciu strumieniem fotonów, a maleje w cięciu strugą wodno-ścierną.

Analiza zmian wartości parametru $Smvr$ dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną pokazana na rysunku 89g wykazała, że wartość mierzonego parametru rośnie wraz ze wzrostem grubości blachy dla cięcia strumieniem fotonów, natomiast przy strudze wodno-ścierną sytuacja jest odwrotna. Największą wartość $0,04$ średniej objętości pustek w mm^3 na mm^2 osiągnięto w cięciu strugą wodno-ścierną przy grubości blachy $g_b=6$ mm, natomiast najmniejszą $0,013$ również dla tej samej grubości blachy wyciętej strumieniem fotonów, co jest podobne do pozostałych wcześniej opisywanych parametrów. Podobnie jak w przypadku parametru $Smmr$ wartość $Smvr$ rośnie wraz ze wzrostem grubości blachy g_b w cięciu strumieniem fotonów, a maleje w cięciu strugą wodno-ścierną.

Analizując wykresy z rysunku 89a-g można stwierdzić, że na wartości wybranych parametrów SGP znacznie bardziej wpływa grubość blachy w przypadku cięcia laserowego.

Dla parametrów Sa , St , Sq , $Smmr$ oraz $Smvr$ zauważono wyraźne zwiększenie wartości w przypadku powierzchni cięcia z blachy o grubości 10 mm. Wzrost ten był nawet ponad dwukrotny w przypadku parametru Sa czy Sq . Tłumaczyć to można nieliniowym charakterem wytracania energii przez strumień fotonów penetrujący cięty materiał. Jakość uzyskiwanej powierzchni przecięcia po procesie cięcia laserowego zależy w dużym stopniu od skutecznego wydmuchiwania ze szczeliny cięcia powstałych produktów (ciekłego i odparowanego materiału). W przypadku cięcia blachy o największej grubości (spośród wytypowanych do badań) usuwanie produktów procesu jest utrudnione, co skutkuje znaczącym zwiększeniem wartości parametrów amplitudowych (Sa , St , Sq) oraz powierzchniowo-objętościowych ($Smmr$ i $Smvr$) SGP.

W przypadku powierzchni ukształtowanych w procesie cięcia strugą wodno-ścierną wyznaczone parametry SGP nie wykazywały wyraźnej zależności w funkcji zmian grubości ciętej blachy (Sa , St , Sq , Sds , Str) lub wskazywały na zmniejszanie wartości danego parametru wraz ze zwiększaniem g_b ($Smmr$ i $Smvr$). Zaznaczyć przy tym należy, że zmniejszenie wartości tych parametrów było relatywnie nieduże i wynosiło około 20-25%. Można zatem wnioskować, że ilość skumulowanej w strudze wodno-ściernej energii była dla przyjętych warunków badań na tyle duża, że nie zauważono wyraźnego wpływu grubości przecinanego materiału na parametry amplitudowe i przestrzenne SGP. Świadczy to o skutecznej erozji materiału spowodowanej odrywaniem jego mikrocząstek od podstawowej masy.

7.5. Ocena jakości technologicznej

Przeprowadzone badania właściwe pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących oceny jakości technologicznej na podstawie oceny dokładności wymiarowo-kształtowej (opisanej w podrozdziale 7.1.), analizy obrazów mikroskopowych powierzchni po cięciu (przedstawionych w podrozdziale 7.2.), analizy błędu prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy (przedstawionych w podrozdziale 7.3.) oraz pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni (opisanych w podrozdziale 7.4.).

Pomiary dokładności wymiarowo-kształtowej wykonane w badaniach właściwych pozwoliły na określenie odchyłek wybranych cech geometrycznych. Największą odchyłkę 0,534 mm mierzonych cech geometrycznych zaobserwowano na prostej 28 w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=10$ mm strumieniem fotonów. Zmierzone ją w $\frac{1}{2} g_b$. Najmniejszą odchyłkę wynoszącą 0,01 mm mierzonych cech geometrycznych zaobserwowano na prostej 17 (pomiar zlokalizowany był 1 mm od góry elementu) w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=6$ mm oraz na prostej 21, gdzie pomiar był wykonany dla $g_b=10$ mm

w $\frac{1}{2} g_b$. W obu przypadkach element był wycięty strumieniem fotonów. Największa odchyłka mierzonych kątów ($0,5088^\circ$) wystąpiła dla kąta 59 i zmierzona została 1 mm od dołu elementu w elemencie wyciętym z blachy o grubości $g_b=8$ mm strugą wodno-ścierną. Najmniejsza odchyłka mierzonych kątów ($0,0002^\circ$) wystąpiła dla kąta 43 i zmierzona została pośrodku elementu ($1/2 g_b$), który wycięty był z blachy o grubości $g_b=6$ mm strumieniem fotonów.

Obserwacja obrazów mikroskopowych pozwoliła zidentyfikować wady powierzchni po cięciu oraz zaobserwować strefy jakościowe występujące w obu metodach cięcia. Występowanie erozji mechanicznej ziaren ściernych przy cięciu strugą wodno-ścierną (rys. 83f i 84c) zauważalnie wpływa na degradację powierzchni po cięciu. Zauważono też strefę, w której wyraźnie widać obszar, w którym głowica robocza kończyła cięcie. Powierzchnia po cięciu strumieniem fotonów charakteryzowała się zdecydowanie większą intensywnością deformacji w porównaniu z powierzchnią po cięciu strugą wodno-ścierną. Zaobserwowano również wyraźny podział na strefy powierzchni po cięciu. Na podstawie obserwacji dokonano oceny powierzchni po cięciu oraz sporządzono tabelę 51, w której zamieszczono ocenę intensywności deformacji (*ID*) oraz identyfikacji stref cięcia (*ISC*). Wybrano po 6 obszarów najbardziej zdeformowanych (rysunki 81-84) na elementach ciętych każdą z metod i z każdej grubości blachy g_b . Wynik wyrażono znakiem „+” (plus), gdzie zwiększenie liczby znaków oznaczało zwiększenie wizualnych oznak zjawiska.

W pomiarach prostopadłości wyznaczono odchyłkę o największej wartości (wynoszącą $3,675^\circ$), którą określono dla strefy pomiarowej 3 (pomiar prostej pionowej) dla blachy o $g_b=6$ mm wyciętej strugą wodno-ścierną. Natomiast najmniejszą odchyłkę (wynoszącą niespełna $0,038^\circ$) zaobserwowano w strefie pomiarowej 1 (pomiar łuku zewnętrznego), również dla blachy o $g_b=6$ mm wyciętej strugą wodno-ścierną.

Uzyskane wyniki pomiarów SGP świadczą o tym, że grubość blachy g_b wpłynęła na wartości parametrów chropowatości, tylko w przypadku blachy o $g_b=8$ mm i 10 mm, co można interpretować jako zmniejszenie jakości powierzchni przeciętych strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów. Przy najmniejszej z badanego zakresu grubości blachy $g_b=6$ mm, nie zaobserwowano natomiast znacznych śladów oddziaływania skoncentrowanego strumienia energii, które uwidoczniły się przy cięciu blachy grubości $g_b=8$ mm i 10 mm.

W tabeli 51 zaprezentowano wartości brane pod uwagę w ocenie jakości w procesie cięcia strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną. Średnia odchyłka wymiarowa została zestawiona dla odchyłek cech geometrycznych, odchyłek kątów i prostopadłości krawędzi cięcia względem górnej powierzchni blachy. Parametry: intensywność deformacji (*ID*) oraz identyfikacja stref cięcia (*ISC*), wyrażone przy pomocy cyfry od 1 do 3 określają liczbę znaków

„+” (plus). Cyfry te uśredniono dla każdej metody i każdej grubości blachy g_b i zestawiono w tabeli 52. Do oceny SGP wybrano uśredniony parametr Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni) oraz St (całkowita wysokość nierówności powierzchni).

Tab. 51. Tabela oceny wad powstałych na skutek cięcia przeprowadzonej na podstawie obserwacji mikroskopowych

Grubość blachy g_b , mm	Strumień fotonów		Struga wodno-ścierna	
	Intensywność deformacji (ID)	Identyfikacja stref cięcia (ISC)	Intensywność deformacji (ID)	Identyfikacja stref cięcia (ISC)
6	+*	+++	+	+++
	+++	+	+	+++
	+	+++	+	+++
	+++	+++	+++	+++
	+++	++	++	+++
	+++	+++	+	+++
8	+++	++	+	+
	+++	+	+++	+
	+++	+	++	+++
	+++	++	++	+++
	++	+++	++	+
	++	+++	++	+
10	+++	+++	+	+
	+++	+	++	+++
	+++	+	+	+++
	+++	++	+++	+
	+++	++	++	+
	+++	+	++	+++

*. „+” oznacza intensywność zjawiska

W tabeli 53 zamieszczono zestawienie uśrednionych wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną uwzględnionych we wzorze na syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej cięcia JTC .

Tab. 52. Uśrednione zestawienie intensywności deformacji *ID* i identyfikacji stref cięcia *ISC*

Cecha	Grubość blachy, mm	Proces cięcia z użyciem strumienia fotonów	Proces cięcia z użyciem strugi wodno-ściernej
Intensywność deformacji <i>ID</i>	6	2,33	1,50
	8	2,66	2,00
	10	3,00	1,83
Identyfikacja stref cięcia <i>ISC</i>	6	2,50	3,00
	8	2,00	1,66
	10	1,66	2,00

Tab. 53. Zestawienie uśrednionych wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną

Grubość blachy g_b , mm	Metoda cięcia	Sa , μm	St , μm	Średnia odchyłka wymiarowa			<i>ID</i>	<i>ISC</i>
				OW_{CG} , mm	OW_K , $^\circ$	OP , $^\circ$		
6	Strumień fotonów	3,53	29,4	0,062	0,039	0,401	2,33	2,50
	Struga wodno-ścierna	7,49	92,1	0,082	0,167	1,973	1,50	3,00
8	Strumień fotonów	3,53	33,2	0,056	0,045	0,264	2,66	2,00
	Struga wodno-ścierna	5,72	71,8	0,077	0,161	1,795	2,00	1,66
10	Strumień fotonów	8,61	61,5	0,105	0,097	1,734	3,00	1,66
	Struga wodno-ścierna	6,21	72,1	0,095	0,17	2,011	1,83	2,00

W kolejnym etapie wartości z tabeli 53 znormalizowano. Miało to na celu ujednoczenie danych wejściowych w celu ich wzajemnego porównania i dalszej analizy na tym samym poziomie. Każdą wartość podzielono przez największą liczbę w populacji dla danej metody cięcia zgodnie ze wzorem użytym już w badaniach rozpoznawczych (5).

Wartości po normalizacji zestawiono w tabeli 54 dla cięcia strumieniem fotonów i dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną. Normalizacja przebiegała przy dzieleniu wyniku przez największy wspólny dzielnik, ale tylko w obrębie danej metody cięcia.

Tab. 54. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną

Grubość blachy g_b , mm	Metoda cięcia	Sa_n , μm	St_n , μm	Średnia odchyłka wymiarowa			ID_n	ISC_n
				OW_{CG_n} , mm	OW_{Kn} , $^\circ$	OP_n , $^\circ$		
6	Strumień fotonów	0,410	0,478	0,590	0,402	0,231	0,777	1,000
	Struga wodno-ścierna	1,000	1,000	0,863	0,982	0,981	0,750	1,000
8	Strumień fotonów	0,410	0,540	0,533	0,464	0,152	0,887	0,667
	Struga wodno-ścierna	0,764	0,780	0,811	0,947	0,893	1,000	0,553
10	Strumień fotonów	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,553
	Struga wodno-ścierna	0,829	0,783	1,000	1,000	1,000	0,915	0,667

W tabeli 55 przedstawiono wartości po normalizacji, którą przeprowadzono w nieco odmienny sposób. Dany wynik dzielono przez największy wspólny dzielnik wybierając go spośród wartości dla obu metod. Dzięki temu porównano obie metody względem siebie.

Tab. 55. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną (zbiorczo dla obu metod) – porównanie obu metod cięcia

Grubość blachy g_b , mm	Metoda cięcia	Sa_n , μm	St_n , μm	Średnia odchyłka wymiarowa			ID_n	ISC_n
				OW_{CG_n} , mm	OW_{Kn} , $^\circ$	OP_n , $^\circ$		
6	Strumień fotonów	0,410	0,319	0,590	0,229	0,199	0,777	0,833
	Struga wodno-ścierna	0,870	1,000	0,781	0,982	0,981	0,500	1,000
8	Strumień fotonów	0,410	0,360	0,533	0,265	0,131	0,887	0,667
	Struga wodno-ścierna	0,664	0,780	0,733	0,947	0,893	0,667	0,553
10	Strumień fotonów	1,000	0,668	1,000	0,571	0,862	1,000	0,553
	Struga wodno-ścierna	0,721	0,783	0,905	1,000	1,000	0,610	0,667

Podsumowując badania właściwe oceny jakości technologicznej opracowano zależność (7) opisującą syntetyczny wskaźnik jakości technologicznej cięcia JTC wyrażony w % i oznaczono odpowiednio jako JTC_{LASER} dla procesu cięcia strumieniem fotonów oraz JTC_{AWJ} dla cięcia strugą wodno-ścierną:

$$JTC_{LASER \text{ i } AWJ} = 1 - [(Sa_n \cdot St_n) \cdot |(OW_{CG_n} \cdot OW_{K_n})| \cdot (ID_n \cdot ISC_n) \cdot OP_n] \cdot 100\%. \quad (7)$$

Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia wskaźnika JTC_{LASER} (8) dla grubości blachy $g_b=6$ mm (dane podstawiono z tabeli 54):

$$JTC_{LASER} = 1 - [(0,410 \cdot 0,478) \cdot |(0,590 \cdot 0,402)| \cdot (0,777 \cdot 1,000) \cdot 0,231] \cdot 100\% = 99,17\%. \quad (8)$$

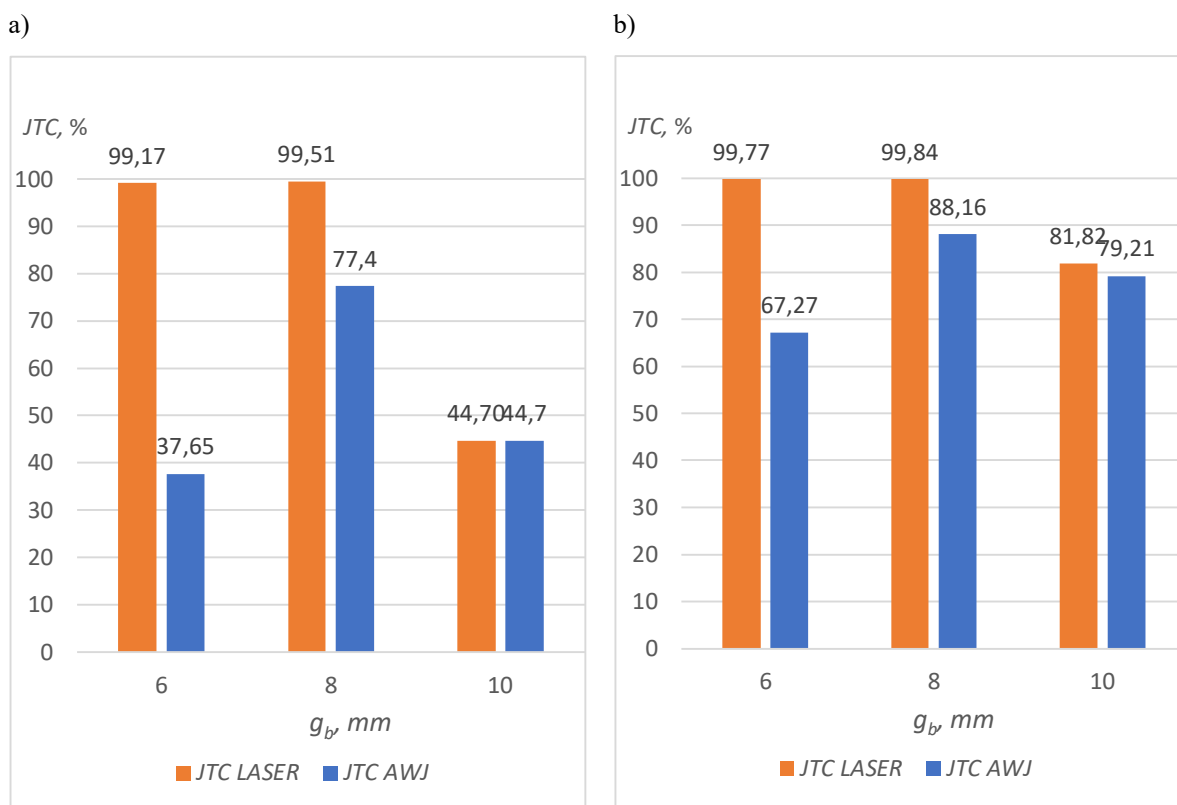
W tabeli 56 zestawiono wyniki obliczeń wskaźnika JTC dla obu metod cięcia, gdzie normalizację przeprowadzono tylko w obrębie danej metody cięcia, natomiast w tabeli 57 zamieszczono wyniki obliczeń wskaźnika JTC dla przypadku, w którym największy wspólny dzielnik przy normalizacji był brany pod uwagę z obu metod wspólnie. Zmienność uzyskanych wartości wskaźnika JTC dla obu rozpatrywanych metod cięcia przedstawiono także w formie wykresów na rysunku 90.

Tab. 56. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości JTC dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów JTC_{LASER} oraz cięcia strugą wodno-ścierną JTC_{AWJ}

Grubość blachy g_b , mm	JTC_{LASER} , %	JTC_{AWJ} , %
6	99,17	37,65
8	99,51	77,40
10	44,7	44,7

Tab. 57. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości JTC dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów JTC_{LASER} oraz cięcia strugą wodno-ścierną JTC_{AWJ} (zbiorczo dla obu metod) – porównanie obu metod cięcia

Grubość blachy g_b , mm	JTC_{LASER} , %	JTC_{AWJ} , %
6	99,77	67,27
8	99,84	88,16
10	81,82	79,21



Rys. 90. Zmiany wartości wskaźnika JTC powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną: a) parametry wejściowe pozyskane z tabeli 54 (normalizacja odbyła się tylko w obrębie danej metody cięcia), b) parametry wejściowe pozyskane z tabeli 55 (normalizacja odbyła się dla obu metod zbiorczo)

Szczegółowa analiza uzyskanych wyników wskaźnika JTC w badaniach właściwych pozwoliła na sporządzenie wniosków dotyczących uzyskanej jakości technologicznej kształtowanego elementu w przypadku obu rozpatrywanych procesów cięcia. W ocenie tej uwzględniono wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni, odchyłki cech geometrycznych, odchyłki prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy oraz rezultaty obserwacji mikroskopowych deformacji zidentyfikowanych na powierzchni przecięcia.

Wskaźnik JTC_{LASER} dla cięcia strumieniem fotonów jest wyraźnie wyższy niż dla cięcia strugą wodno-ścierną, co zauważono na rysunku 90a, jednakże tylko dla blachy o $g_b = 6$ mm i 8 mm, i wynosił powyżej 99%, co jest największą wartością na wykresie. Spowodował to wpływ parametrów Sa_n , St_n , OW_{CGn} oraz OW_{Kn} , których mała wartość zapewniła relatywnie największą wartość wskaźnika JTC . Natomiast parametry ID_n i ISC_n nie wpłynęły znacznie na podaną wartość wskaźnika. Ich duża wartość oznaczała znaczący udział defektów zaobserwowanych na powierzchni cięcia. Dla blachy o $g_b = 6$ mm i cięcia strumieniem fotonów JTC_{LASER} osiągnął natomiast najniższą wartość (wynoszącą 44,70%) spośród wszystkich grubości blach. Było to spowodowane tym, że aż trzy rozpatrywane kryteria oceny jakości

technologicznej w tym przypadku uzyskały najwyższą wartość spośród wszystkich uwzględnionych w porównaniu. W rezultacie w tym przypadku przy normalizacji uzyskano wartość maksymalną dla tych kryteriów, które zmniejszyły wartość JTC_{AWJ} . Oznaczało to, że element został wycięty z relatywnie najniższą jakością technologiczną spośród porównywanych. Nieco inaczej wartości JTC zmieniały się w przypadku cięcia strugą wodno-ścierną, gdzie dla blachy o $g_b = 6$ mm wartość wskaźnika JTC_{AWJ} wyniosła 37,65%. Była to najmniejsza wartość wskaźnika spośród obu metod. Było to spowodowane tym, że aż dwa rozpatrywane kryteria oceny jakości technologicznej w tym przypadku uzyskały najwyższą wartość spośród wszystkich uwzględnionych w porównaniu, a kolejne dwa były relatywnie blisko wartości 1,0. Największą wartość wskaźnika JTC_{AWJ} (wynoszącą 44,7% dla metody cięcia strugą wodno-ścierną) wyznaczono w przypadku $g_b = 10$ mm. Relatywnie dużą wartość parametru JTC_{AWJ} spowodowała mała wartość parametrów OW_{CGn} , OW_{Kn} oraz OP_n , podobnie jak to miało miejsce w wskaźniku JTC_{LASER} .

Na rysunku 90b sporządzono wykres wskaźnika JTC , gdzie normalizacja odbyła się dla obu metod zbiorczo umożliwiając względne porównanie między sobą jakości technologicznej w obu metodach cięcia. Podobnie jak na wykresie 90a największe wartości parametru zauważono dla cięcia strumieniem fotonów, ale tylko dla blachy o $g_b = 6$ mm i 8 mm i wyniosły one od 99,77% do 99,84%, co jest najwyższą wartością na wykresie. Spowodował to wpływ parametrów Sa_n , St_n , OW_{CGn} oraz OW_{Kn} , których mała wartość zapewniła relatywnie największą wartość wskaźnika JTC . Natomiast parametry ID i ISC nie wpłynęły znacznie na podaną wartość wskaźnika. Dla blachy o $g_b = 10$ mm wartość wskaźnika była najmniejsza i wyniosła niecałe 82%. Najmniejszą wartość na wykresie 67,27% dla obu metod cięcia zauważono blachy o $g_b = 6$ mm przy cięciu strugą wodno-ścierną. Dla blachy o $g_b = 8$ mm i 10 mm w obrębie tej metody osiągnięto odpowiednio 88,16% i 79,21%. Było to spowodowane, że aż dwa parametry osiągnęły wartość bliską 1,0 dla blachy o $g_b = 8$ mm, natomiast dla blachy o $g_b = 10$ mm dwa czynniki były równe 1,0. Ich wysoka wartość zaniżyła obliczoną wartość parametru JTC .

Na przykładzie analiz dotyczących procesu cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną stali nierdzewnej o oznaczeniu X5CrNi18-10 potwierdzono, że zaproponowany syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej powierzchni po cięciu JTC może być skutecznie stosowany do porównywania między sobą rezultatów procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach. Jest uniwersalny i zastosowana w badaniach właściwych modyfikacja jego konstrukcji stanowi przykład możliwości elastycznego dopasowywania go do żadanego zbioru kryteriów oceny jakości technologicznej. Konstrukcja wskaźnika JTC umożliwia uwzględnienie innych cech analizowanej powierzchni oraz

rozszerzanie ich liczby, np. poprzez dodanie parametrów oceny stanu warstwy wierzchniej, mikrotwardości powierzchni itp. Tak też zrobiono w obliczeniach wskaźnika *JTC* w badaniach właściwych, rozszerzono wzór o czynnik opisujący prostopadłość powierzchni *OP*. Przedstawiony szeroki zbiór analiz wykazał, że opracowany wskaźnik *JTC* stanowi uniwersalne narzędzie wartościujące, pozwalające na dokonywanie oceny ilościowej cech związanych z jakością technologiczną rezultatów procesu cięcia.

Syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej cięcia *JTC* ma budowę iloczynu, pozwalając na uzyskanie wartości z przedziału 0-1. Wartości podstawiane do opracowanego wzoru są najpierw poddawane normalizacji, w celu ujednoczenia wag poszczególnych cech składających się na ocenę jakości technologicznej. Normalizacja wartości powoduje, że wraz ze zmniejszającą się różnicą pomiędzy wartościami podlegającymi normalizacji zwiększa się wartość liczby po normalizacji. Przypadek taki może zajść np. gdy do oceny wytypowany zostanie mało liczny zbiór ocenianych przedmiotów po cięciu, jak to miało miejsce w przypadku analizy wyników badań właściwych (analizowano jakość technologiczną 6 elementów po cięciu: trzech po cięciu laserowym i trzech po cięciu metodą AWJ).

Opisana zależność powoduje, że do wzoru na wskaźnik *JTC* podstawiane są czynniki o większej wartości (bardziej zbliżone do 1), niż miałyby to miejsce dla bardziej rozproszonego i większego zbioru danych (np. takiego, jaki analizowany był w badaniach rozpoznawczych). W takiej multiplikatywnej formie wskaźnik nie zwróci wysokiej wartości w przypadku, gdy jeden ze składników iloczynu będzie o bardzo wysokiej wartości, a pozostałe o wartości małej i na odwrót. Oznacza to, że nie wynik końcowy nie jest narażony na pozytywną ocenę przypadku, w którym jeden ze wskaźników oceny jakości technologicznej przyjmuje rażąco niepoprawną wartość, natomiast pozostałe są o wartości dopuszczalnej i to rekompensują. Mnożenie wówczas wymusza spełnienie wymogów w przypadku wszystkich kryteriów oceny.

Konstrukcja wskaźnika *JTC* sprawia, że przyjmuje on wartości tym mniejsze, im większe są wartości ocenianych cech oceny jakości technologicznej po normalizacji. Zależność ta ujawniła się wyraźnie w opisywanych badaniach szczególnie w przypadku oceny przedmiotów po cięciu AWJ, dla których wartość wskaźnika *JTC_{AWJ}* przyjmowała wartości od 37,65%. Ponieważ z natury wskaźnik ten ma charakter odniesieniowy (wyznaczany jest na podstawie danych z pomiarów cech oceny jakości technologicznej analizowanych przedmiotów bez uwzględnienia wartości referencyjnej, np. żądanej wartości parametru opisującego chropowatość powierzchni lub dopuszczalnej liczby defektów) jego wartości należy traktować jako relatywną miarę służącą porównywaniu między sobą wyników procesu cięcia. Dla każdego porównania wartości *JTC* będą inne, gdyż silnie zależą od normalizacji czynników

wejściowych i nie mogą stanowić podstawy do oceny bezwzględnej pomiędzy różnymi zbiorami porównywanych przedmiotów po cięciu.

To ograniczenie wskaźnika *JTC* mogłoby zostać przewyżnione, gdyby w jego budowie zamiast relatywnej oceny różnic pomiędzy wartościami w ocenianym zbiorze parametrów uwzględnić procentowy stopień spełnienia założonej normy jakościowej przez dany parametr. Jednocześnie oznaczałoby to konieczność każdorazowego podawania żądanych progów oceny jakości dla każdej z ocenianych cech jakości technologicznej przez użytkownika przed przystąpieniem do oceny, ponieważ ich wartości mogą być różne w zależności od przyjętych wymagań jakościowych.

7.6. Wnioski z badań właściwych

Przedstawione w niniejszym rozdziale analizy z zakresu oceny jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i cięciu strugą wodno-ścierną umożliwiły sformułowanie poniższych wniosków podsumowujących wyniki badań właściwych.

1. W przypadku mierzonych cech geometrycznych można zauważyć, że wielkość odchyłki analizowanych cech geometrycznych zwiększa wraz z grubością blachy g_b zarówno dla cięcia strumieniem fotonów jak i dla cięcia strugą wodno-ścierną.
2. W pomiarach kątów odchyłki o największej średniej wartości na elementach wyciętych strumieniem fotonów są niekiedy o 200% mniejsze niż przy cięciu strugą wodno-ścierną. Nie zauważono natomiast, aby wartości te zmieniały się dla pomiarów wykonywanych z coraz to grubszej blachy, zarówno dla cięcia strumieniem fotonów jak i strugą wodno-ścierną.
3. Energia cięcia przy powierzchni elementu jest największa co zapewnia mniejsze odchyłki, niż po zagłębieniu się strumienia energii w głąb materiału.
4. W przeciwieństwie do badań rozpoznawczych, obserwacja obrazów mikroskopowych wykazała, że zwiększenie grubości przecinanej blachy z $g_b = 6$ mm do 8 mm nie spowodowało zwiększenia intensywności deformacji powierzchni w obu metodach cięcia. Nieco inna sytuacja została zaobserwowana dla $g_b = 10$ mm, gdzie deformacje są największe. Brak znaczącego wpływu grubości blachy g_b na deformacje może być spowodowany dobrze dobraną mocą cięcia P , której wartość wytypowano na podstawie wyników badań rozpoznawczych.
5. Na podstawie obserwacji wybranych obszarów krawędzi cięcia z największymi defektami zauważono, że elementy wycięte strumieniem fotonów odznaczały się

dużo większą intensywnością występowania defektów niż miało to miejsce w przypadku elementów ciętych strugą wodno-ścierną.

6. Duży wpływ na występowanie defektów powierzchni po cięciu strumieniem fotonów ma stopiony w górnej strefie materiał wyrzucany ze szczeliny cięcia przez gaz towarzyszący, szczególnie widoczne jest to w postaci zendry i rantu na całym obwodzie blachy o $g_b=10$ mm.
7. Średnia odchyłka prostopadłości dla cięcia strumieniem fotonów miała znacznie mniejszą wartość (aż o $1,5^\circ$) dla $g_b = 6$ mm i 8 mm, natomiast dla $g_b = 10$ mm o $0,3^\circ$, niż średnia wyznaczona na podstawie wyników pomiarów elementów po cięciu strugą wodno-ścierną. Należy przypuszczać, że było to spowodowane zakrzywieniem strugi wodno-ściernej wynikającym z wytracaniem jej energii wraz z oddalaniem od wylotu dyszy.
8. Wyniki analizy struktury geometrycznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów wykazały, że wartości parametrów amplitudowych (S_a i S_t) są bardzo zbliżone przy cięciu elementów z grubości blachy $g_b = 6$ mm i 8 mm.
9. W przypadku obu analizowanych metod cięcia grubość blachy g_b nieznacznie wpływa na zwiększenie parametrów SGP po cięciu, jest to jednak bardziej zauważalne przy cięciu strumieniem fotonów.
10. Ilość skumulowanej w strudze wodno-ściernej energii była dla przyjętych warunków badań na tyle duża, że nie zauważono wyraźnego wpływu grubości przecinanego materiału na parametry amplitudowe i przestrzenne SGP.
11. Przeprowadzona analiza wykazała, że najkorzystniejszą (największą) wartość JTC z całego zbioru analizowanych wyników ($JTC_{LASER} = 99,84\%$) uzyskano dla procesu cięcia strumieniem fotonów przy grubości blachy $g_b = 8$ mm (podczas normalizacji biorąc pod uwagę największy wspólny dzielnik dla obu metod).
12. Najkorzystniejszą wartość wskaźnika JTC dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną ($JTC_{AWJ} = 88,16\%$) uzyskano również dla grubości blachy $g_b = 8$ mm (podczas normalizacji biorąc pod uwagę największy wspólny dzielnik dla obu metod).
13. Wskaźnik JTC ma charakter odniesieniowy (wyznaczany jest na podstawie danych z pomiarów cech oceny jakości technologicznej analizowanych przedmiotów bez uwzględnienia wartości referencyjnej) i jego wartości należy traktować jako relatywną miarę służącą porównywaniu między sobą wyników procesu cięcia.

14. Dla każdego przypadku porównania wartości *JTC* będą inne, gdyż silnie zależą od normalizacji czynników wejściowych i nie mogą stanowić podstawy do oceny bezwzględnej pomiędzy różnymi zbiorami porównywanych przedmiotów po cięciu.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone w szerokim zakresie badania doświadczalne wykazały, że zaproponowana autorska zależność na syntetyczny wskaźnik JTC może być z powodzeniem stosowana w przemyśle metalowym do porównywania jakości technologicznej procesu cięcia. Cel pracy osiągnięto poprzez zrealizowanie przyjętego zakresu badań i analiz oraz potwierdzając przyjętą hipotezę badawczą. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych, które podzielono na cztery grupy: wnioski poznawcze, wnioski użytkowe, wnioski metodyczne oraz wnioski do dalszych prac.

8.1. Wnioski poznawcze

1. Zmniejszanie natężenia przepływu ścierniwa \dot{m} oraz zwiększanie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} w procesie cięcia strugą wodno-ścierną spowodowało zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych (Sa i St) struktury geometrycznej powierzchni po cięciu. Podobnie w przypadku cięcia laserowego zmniejszanie prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} wywołało zmniejszenie wartości parametrów amplitudowych Sa i St powierzchni po cięciu, przy czym nie zaobserwowano jednoznacznego wpływu zmian mocy cięcia P na parametry SGP.
2. Ilość skumulowanej w strudze wodno-ścierniej energii była dla warunków przyjętych w badaniach właściwych na tyle duża, że nie zauważono wyraźnego wpływu grubości przecinanego materiału na parametry amplitudowe i przestrzenne SGP.
3. W procesie cięcia laserowego na dokładność wymiarową kształtowanych elementów największy wpływ miała prędkość posuwu głowicy v_{fLASER} (duża wartość prędkości posuwu spowodowała odchyłki dochodzące do 0,2 mm) oraz grubość przecinanej blachy g_b . W procesie cięcia strugą wodno-ścierną tendencje są podobne, jednak zmierzone odchyłki wymiarowe są większe i wynoszą nawet do 0,3 mm. Nie zaobserwowano istotnego wpływu natężenia przepływu ścierniwa \dot{m} na odchyłki wymiarowe.
4. Ocena dokładności wymiarowo-kształtowej elementów po cięciu wykazała, że wielkość odchyłki prostoliniowości i okrągłości zwiększa wraz ze zwiększeniem grubości blachy g_b zarówno dla cięcia strumieniem fotonów jak i dla cięcia strugą wodno-ścierną. Ocena odwzorowania kątów wykazała, że odchyłki o największej średniej wartości zmierzone na elementach wyciętych strumieniem fotonów są nawet o 200% mniejsze niż przy cięciu strugą wodno-ścierną.

5. Średnia odchyłka prostopadłości krawędzi cięcia względem górnej powierzchni blachy dla cięcia strumieniem fotonów miała znacznie mniejszą wartość (aż o $1,5^\circ$) dla $g_b = 6$ mm i 8 mm, natomiast dla $g_b = 10$ mm o $0,3^\circ$, niż średnia wyznaczona na podstawie wyników pomiarów elementów po cięciu strugą wodno-ścierną. Należy przypuszczać, że było to spowodowane zakrzywieniem strugi wodno-ściernej wynikającym z wytracaniem jej energii wraz z oddalaniem od wylotu dyszy.
6. Analiza obrazów mikroskopowych wykazała, że zwiększenie grubości przecinanej blachy z $g_b = 6$ mm do 8 mm, a następnie do 10 mm spowodowała zwiększenie intensywności deformacji powierzchni w obu metodach cięcia, przy czym powierzchnia po cięciu laserowym charakteryzowała się znacznie większą intensywnością odkształceń (z widocznym podziałem na trzy strefy powierzchni ciętej) w porównaniu z powierzchnią po cięciu strugą wodno-ścierną.
7. Na podstawie obserwacji mikroskopowych wybranych obszarów krawędzi cięcia z największymi defektami zauważono, że elementy wycięte strumieniem fotonów odznaczały się dużo większą intensywnością występowania defektów niż miało to miejsce w przypadku elementów ciętych strugą wodno-ścierną.
8. Duży wpływ na występowanie defektów powierzchni po cięciu strumieniem fotonów ma stopiony w górnej strefie materiał usuwany ze szczeliny cięcia przez gaz towarzyszący, co skutkuje występowaniem zendry i rantu na całym obwodzie blachy o $g_b = 10$ mm.
9. Przeprowadzone badania rozpoznawcze wykazały, że najkorzystniejszą (największą) wartość syntetycznego wskaźnika oceny jakości technologicznej cięcia JTC uzyskano dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną przy grubości blachy $g_b = 10$ mm, natężeniu przepływu ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fAWJ} = 1,66$ mm/s ($JTC_{AWJ} = 100,00\%$), natomiast najkorzystniejszą wartość wskaźnika JTC dla procesu cięcia laserowego ($JTC_{LASER} = 100,00\%$) uzyskano dla grubości blachy $g_b = 6$ mm, mocy lasera $P = 5$ kW i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{fLASER} = 10$ mm/s.
10. Przeprowadzona analiza wyników badań właściwych wykazała, że najkorzystniejszą wartość JTC z całego zbioru analizowanych wyników ($JTC_{LASER} = 99,84\%$) uzyskano dla procesu cięcia strumieniem fotonów przy grubości blachy $g_b = 8$ mm, podczas normalizacji biorąc pod uwagę największy wspólny dzielnik dla obu metod. Najkorzystniejszą wartość wskaźnika JTC dla procesu cięcia strugą wodno-ścierną ($JTC_{AWJ} = 88,16\%$) uzyskano również dla grubości blachy $g_b = 8$ mm.

8.2. Wnioski uytylitarne

1. Przeprowadzona charakterystyka naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych oraz procesu jej wytwarzania wykazała, że większość jej elementów wykonanych jest ze stali nierdzewnej gatunku X5CrNi18-10, które na początkowym etapie obróbki kształtowane są w procesie cięcia.
2. Zaproponowana autorska zależność na wskaźnik *JTC* umożliwia kompleksową kontrolę jakości technologicznej procesu cięcia i może posłużyć do poszukiwania metod ograniczenia kosztów tego procesu poprzez dobór parametrów technologicznych w zależności od żądanej jakości wyrobu.
3. Zastosowanie zaproponowanego wskaźnika oceny jakości technologicznej cięcia *JTC* w warunkach przemysłowych nie wymaga angażowania dodatkowych środków finansowych, wystarczy krótka adaptacja do warunków konkretnego przedsiębiorstwa, jego parku maszynowego oraz wymagań jakościowych.
4. Badania doświadczalne procesu cięcia strugą wodno-ścierną oraz cięcia laserowego a także analizy jakości technologicznej prowadzono na elementach wyciętych z austenitycznej stali chromowo-niklowej o symbolu X5CrNi18-10. Gatunek ten jest szeroko stosowany m.in. do wykonywania elementów konstrukcyjnych zbiorników i cystern ze stali nierdzewnej. Dzięki temu uzyskane wyniki badań i analiz mogą zostać relatywnie łatwo wdrożone m.in. w przedsiębiorstwie PRO-WAM Sp. z o.o., we współpracy z którym powstała niniejsza praca.

8.3. Wnioski metodyczne

1. Względna (procentowa) postać wskaźnika *JTC* powoduje, że może on być stosowany do porównywania wyników procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach a także składowe zaproponowanej zależności mogą być rozszerzane o kolejne wskaźniki oceny jakości technologicznej.
2. Wskaźnik *JTC* ma charakter odniesieniowy (wyznaczany jest na podstawie danych z pomiarów cech oceny jakości technologicznej analizowanych przedmiotów bez uwzględnienia wartości referencyjnej) i jego wartości należy traktować jako relatywną miarę służącą porównywaniu między sobą wyników procesu cięcia.
3. Dla każdego przypadku porównania wartości *JTC* będą inne, gdyż silnie zależą od normalizacji czynników wejściowych i nie mogą stanowić podstawy do oceny bezwzględnej pomiędzy różnymi zbiorami porównywanych przedmiotów po cięciu.

4. W przyjętej w niniejszej pracy metodyce oceny jakości technologicznej elementów ciętych zastosowano ocenę wizualną śladów obróbkowych przez co ocena taka staje się subiektywna i mniej jednoznaczna.

8.4. Wnioski do dalszych badań

1. Celem dalszych prac rozwojowych powinno być rozszerzenie zakresu czynników uwzględnionych w ocenie jakości technologicznej i wskaźniku *JTC*, np. o parametry związane ze stanem warstwy wierzchniej powierzchni ciętej (stan naprężeń własnych, mikrotwardość).
2. Dalsze badania mogą również dotyczyć weryfikacji możliwości zastosowania wskaźnika *JTC* do oceny innych metod cięcia niż uwzględnione w niniejszej rozprawie doktorskiej a także odmiennych materiałów konstrukcyjnych, np. stali konstrukcyjnej niestopowej S355JR, która jest często stosowana do wyrobu elementów walcowanych na gorąco szeroko stosowanych w przemyśle metalowym, lub stali kwasoodpornej 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) coraz częściej stosowanej w przemyśle spożywczym.
3. W dalszych pracach rozwojowych w zakresie konstrukcji wskaźnika *JTC* można w jego budowie zamiast relatywnej oceny różnic pomiędzy wartościami z ocenianego zbioru parametrów uwzględnić procentowy stopień spełnienia założonej normy jakościowej przez dany parametr.

8.5. Upowszechnienie rezultatów rozprawy

Efekty prac badawczych zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej pozwoliły na sporządzenie ogółem 15 prac naukowych opublikowanych w języku polskim i angielskim, w tym jednego artykułu wydanego w czasopiśmie z tzw. *listy filadelfijskiej*.

1. **ROMANOWSKI M., NADOLNY K.:** Analiza procesu produkcji naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych z zastosowaniem metody mapowania procesów. Materiały XX Konferencji Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane, 26-28.02.2017 r., Tom 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2017 s., 668-676.
2. **ROMANOWSKI M., NADOLNY K., SUTOWSKI P.:** Value stream mapping of the production process of tankers for the transport of liquid food products. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 1(2017)2, pp. 123-128.
3. **ROMANOWSKI M., NADOLNY K., BAŁASZ B.:** Metody analityczne w ocenie efektywności procesów produkcyjnych. W: *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji pod redakcją R. Knosali*, Tom 1, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2018, s., 322-333.

4. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Methods of graphical analysis of production processes. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2(2018)1, pp. 33-42. DOI: 10.30464/jmee.2018.2.1.33
5. NADOLNY K., **ROMANOWSKI M.**: Porównanie stanu powierzchni stali X5CRNi18-10 po cięciu strugą wodno-ścierną, strumieniem fotonów (laser) oraz strumieniem plazmy. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 7(2018)5-6, s. 72-78.
6. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Characteristics of the systems of computer modelling and simulation of production processes. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2(2018)2, pp. 95-100. DOI: 10.30464/jmee.2018.2.2.95
7. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Technological foresight: Characterisation of research methods used in prospective analysis. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2(2018)2, pp. 101-108. DOI: 10.30464/jmee.2018.2.2.101
8. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Analiza morfologii powierzchni po cięciu strumieniem plazmy. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 8(2019)5-6, s. 32-36.
9. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K., PLICHTA J.: Ocena powierzchni stali X5CRNi18-10 kształtowanej w procesie cięcia wysokoskoncentrowanymi strumieniami energii. W: *Innowacyjne metody i technologie w badaniach inżynierskich*, pod red. B. Bałasza i innych, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 364, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2019, s. 209-216.
10. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Problemy kształtowania powierzchni po cięciu w procesach frezowania. W: *Innowacyjne metody i technologie w badaniach inżynierskich*, pod red. B. Bałasza i innych, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 364, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2019, s. 217-224.
11. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Analiza struktury geometrycznej powierzchni blachy ze stali X5CRNi18-10 po cięciu strugą wodno-ścierną oraz strumieniem fotonów. W: *Tendencje rozwojowe w badaniach inżynierskich*, pod red. B. Bałasza i innych, Monografia Wydziału Mechanicznego nr 382, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2020, s. 295-314.
12. **ROMANOWSKI M.**, NADOLNY K.: Surface texture analysis of the X5CrNi18-10 steel after cutting with abrasive water jet and photon beam (laser). *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4(2020)4, pp. 365-374. DOI: 10.30464/jmee.2020.4.4.365
13. NADOLNY K., **ROMANOWSKI M.**: Analiza struktury geometrycznej powierzchni stali X5CRNi18-10 po cięciu plazmowym. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 10(2021)5-6, s. 66-74.
14. NADOLNY K., **ROMANOWSKI M.**: Porównanie jakości technologicznej powierzchni stali X5CRNi18-10 po cięciu laserowym i cięciu strugą wodno-ścierną. *STAL Metale & Nowe Technologie*, 10(2021)7-8, s. 56-66.
15. **ROMANOWSKI M.**, ŁUKIANOWICZ C., SUTOWSKA M., ZAWADKA W., PIMENOV D.Y., NADOLNY K.: Assessment of the Technological Quality of X5CRNi18-10 Steel Parts after Laser and Abrasive Water Jet Cutting Using Synthetic Index of Technological Quality. *Materials*, 2021, 14(17), 4801. DOI: 10.3390/ma14174801 (*IF*₂₀₂₀ = 3,623)

Bibliografia

1. Adamczak S., 2005, Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. *Mechanik*, nr 78 (2005), s. 492–495.
2. Adamczak S., 2008, *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, WNT, Warszawa.
3. Akkurt Adnan, 2009, Surface properties of the cut face obtained by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials, *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, Vol. 16, pp. 373-384, Turkey.
4. Barnett S.B., 2001, Intracranial temperature elevation from diagnostic ultrasound. *Ultrasound Med. Biol* 27: 883–888.
5. Bielawa A., 2011, Postrzeganie i rozumienie jakości – przegląd definicji jakości., *Studia i prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania* nr 21.
6. Bohdal Ł., K. Gotowała, Numeryczna i eksperymentalna analiza wpływu geometrii narzędzia na rozkład naprężeń i odkształceń podczas cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych. *Mechanik* nr 3/2015, strona 261.
7. Bohdal Ł., Kukielka L., Application of variational and FEM methods to the modelling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity. *Mechanika*. 20 (2), 197–204, 2014.
8. Borkowski J., Benkowska M.: Wpływ głównych parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na jakość powierzchni przecięcia. *ATMiA*, Vol.26, Nr 2, 2006, s. 11-18.
9. Borkowski J., Borkowski P.: *Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe*. Monografia INTH nr 154, WUPK, Koszalin, 2008.
10. Borkowski P.: *Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych*. Monografia INTH nr 174, WUPK, Koszalin, 2010.
11. Borkowski J., Sutowska M.: The quality of surface cut after highpressure abrasive-water cutting. *Journal of Machine Engineering*, Vol. 7, No. 3, 2007, pp.19-28.
12. Borkowski J., Sutowska M.: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na parametry SGP, *ATMiA*, Vol.27, Nr 2, 2007, s. 43-51.
13. Borkowski P., Borkowski J.: *Obrabiarki do cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną*. W: *Wysokociśnieniowe Technologie Hydro strumieniowe*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008, str. 151-162.
14. Borkowski J., Sutowska M.: Oddziaływanie warunków procesu cięcia AWJ na wybrane wskaźniki SGP, *Instytut niekonwencjonalnych technologii strumieniowych*, Koszalin, 2012, PAK 5/2012 str. 468.
15. Celiński Z., *Plazma*. PWN Warszawa 1980.
16. Banasik M., Dworak J., 2002, *Cięcie i spawanie laserem CO₂*, *Przegląd spawalnictwa* 8-10/2002.
17. Białas S., 2006, *Metrologia techniczna z podstawami tolerowania wielkości geometrycznych dla mechaników*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.

18. Brytan Z., 2009, Spawanie, korozja, właściwości – wprowadzenie do Stali Nierdzewnych, Materiały Seminarium, Poznań.
19. Feldshtein E., Koman I.: Wycinanie laserowe elementów dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej. „Przegląd Mechaniczny”, 4/2010, s. 13-18.
20. Fraś J., Fraś T., Fraś M., Model instrumentów zarządzania jakością w procesach produkcyjnych. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 6, 2017, s. 175 – 188.
21. Gawlik J., Plichta J., Świć A., 2013, Procesy produkcyjne, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne
22. Górka J., Krysta M., 2007, Jakość cięcia stali obrobionej termomechanicznie plazmą powietrzną, laserem i strumieniem wody, Przegląd Spawalnictwa 8/2007, str. 102.
23. Grudowski P, Kałużna M., 2018, Uwarunkowania dotyczące wdrażania zakładowej kontroli produkcji w sektorze MŚP, 231-238.
24. Harnicarova M., Valicek J., Zajac J, Hloch S., Cep R., Dzubakova I., Tofil S., Hlavacek P., Klich J., Cepova L. „Techno-economical comparison of cutting material by laser, plasma and oxygen”. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette. 19, 4 (2012): s. 813–817.
25. Hashish M., 1991, Optimization factory in abrasive waterjet machining. Transactions of the ASME. Journal of Eengineering for industry, vol. 113, No.1, pp. 29-37.
26. Hlavac L., Hlavacova I., Gembalova L., Kalicinsky J., Fabian S., Mestanek J., Kmec J., Madra V. „Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality”. Journal of Materials Processing Technology. 209, 20 (2009): s. 6190–6195.
27. Hlavac L., Spadło S., Krajczar D., Hlavacova I., 2015, Influence traverse speed on surface quality after water-jet cutting for Hardox steel. Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials, pp. 723-728.
28. HÖPF M.: Plasmaschneidten mit Industrierobotern. Schweizer Maschinenmarkt, nr 6, 1986, 28-30
29. Hucińska J., 1995, Metaloznawstwo, Materiały do ćwiczeń laboratoryjnych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
30. Humienny Z., 2004, Specyfikacje geometrii wyrobów. GPS, WNT.
31. Jasica G., Heinrich M., 2012, Kształtowanie jakości wyrobu w procesie produkcyjnym., Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
32. Karpiński S., Moszumański J., Radwan-Wiatrowski K.: Laboratorium z podstaw spawalnictwa. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej Koszalin 2001.
33. Kirkpatrick I., Profile cutting = which method?, 1999, Welding & Metal Fabrication.
34. Kisielnicki J., Podstawy Organizacji i Zarządzanie., wykład X Kontrola, pkt. 5 Jakość – Kontrola i zarządzanie. (<http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/poz/scb/index76.html>)
35. Kosmowski M., A. Dowgiałło, Niekonwencjonalne sposoby cięcia w żywności Acta Scientiarum Polonorum. Technica Agraria. [Vol.] 15, [nr] 3/4 (2016), s. 3-13.
36. Klimpel A., Podręcznik spawalnictwa. T.1. Technologia spawania i cięcia. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
37. Klimpel A., 1999, Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali., Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, Warszawa.

38. Klimpel A., Technologia spawania i cięcia metali. WPS, Gliwice 1997. Rozdział 14, s 501-515.
39. Klimpel A., Technologie laserowe w spawalnictwie. Wyd. Pol. Śląskiej, 2011.
40. Kowalczyk S., 2015, Nadzorowanie procesu produkcji. Podręcznik do nauki zawodów technik mechanik.WSiP. Warszawa.
41. Krajcarz D., Młynarczyk P., Analiza technologii cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, Współczesne uwarunkowania rozwoju społeczno-gospodarczego, Świat – Polska – Region świętokrzyski, ISBN 978-83-63423-10-0, 617-626, 2014.
42. Kukielka S., Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań. Praca magisterska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2002.
43. Kukielka L., Podstawy badań inżynierskich, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2002.
44. Jakubiec W., Malinowski J., 2004, Metrologia wielkości geometrycznych, WNT, Warszawa.
45. Maiman T. H.: Stimulated Optical Radiation in Rubys. Nature, 1960, 187 (4736), 493-494.
46. Materiały Wielkopolskiej Izby Rzemieślniczej, 2018, Moduł 1: Wprowadzenie do problematyki jakości, znaczenie jakości we współczesnej gospodarce.
47. Mazurkiewicz A., Czynniki wpływające na błąd kształtu i chropowatość powierzchni stali po cięciu strumieniem wodno-ściernym. Inżynieria materiałowa, 6/166/, 686-689, 2008.
48. Mazurkiewicz A., Przecinanie materiałów na obrabiarkach CNC – wybór metody. Autobusy, nr 3/2013.
49. Mazurkiewicz A., Maciejewski P. Analiza jakości spawania laserowego różnoimiennych stali odpornych na korozję. Autobusy, nr 12/2017.
50. Mazurkiewicz A., Wybrane właściwości warstwy wierzchniej po przecinaniu różnymi metodami, 2010.
51. Michalski R., Janulin M., Goner J., Modele relacji diagnostycznych w diagnozowaniu ciągnika kołowego. Biuletyn WAtVol. IXiii, nr 1, 2014.
52. Miłowska K., 2007, Ultradźwięki – mechanizmy działania i zastosowanie w terapii sonodynamicznej, Postepy Hig Med Dosw. (online), 2007; 61: 338-349 e-ISSN 1732-2693.
53. Natori M., 2004, Ultrasound safety: overview and what we do need in daily clinics for a safe use of diagnostic ultrasound. International Congress Series, 1274: 125–128
54. Nowicki B., 1991, Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa.
55. Oczó E., Liubimov V., 2003: Struktura geometryczna powierzchni. OWPRz. Rzeszów.
56. Oczó K., Łabudzki R., Obróbka strumieniem wodno-ściernym materiałów metalowych i niemetalowych (część I), Mechanik, 1992, 11, s. 349–356.
57. Palka D., Stecuła K., 2018, Postęp technologiczny – dobrodziejstwo czy zagrożenie? Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Zakopane.

58. Pakos R., 2012, Wpływ metody cięcia na właściwości stalowej krawędzi ciętej, Przegląd Spawalnictwa nr 8/2012.
59. Pacroni J., 2010, Dynamic laser piercing od thick section metals, optics and laser in engineering, vol. 100.
60. PN-M-04255:1974: Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.
61. Politowicz K., 2010, Technologie cięcia termicznego i hydrobrazynowego. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie.
62. Przetakiewicz W., Kaczmerek S., Pawlata A., Rafa J., Analiza efektów cięcia blach ze stali niskowęglowych laserem technologicznym, 1993, str. 16, Inżynieria materiałowa NR 1 UKD 669.15-194:621.791.054.
63. Romanowski M., Nadolny K., Analiza morfologii powierzchni po cięciu strumieniem plazmy, Dwumiesięcznik „STAL”, nr 5-6/2019, strona 32.
64. Romanowski M., Łukianowicz Cz., Sutowska M, Zawadka W., Yurievich Pimenov D., Nadolny K., Assessment of the technological quality of X5CRNI18-10 steel parts after laser and abrasive water jet cutting using synthetic index of technological quality. Materials (Basel) 2021 Aug 24;14(17):4801. doi: 10.3390/ma14174801.
65. Romanowski M., Nadolny K., Analiza procesu produkcji naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych z zastosowaniem metody mapowania procesów, 2017, Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Zakopane.
66. Romanowski M., Nadolny K., Plichta J., Ocena powierzchni stali X5CRNI18-10 kształtowanej w procesie cięcia wysokoskoncentrowanymi strumieniami energii, Materiały XV Krajowej Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki 17-18 maja 2018, Dziwnów. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej.
67. Romanowski M., Nadolny K., Porównanie jakości technologicznej powierzchni stali X5CRNI18-10 po cięciu laserowym i cięciu strugą wodno-ścierną., Dwumiesięcznik „STAL”, nr 7-8/2021, strona 56.
68. Romanowski M., Nadolny K., Porównanie stanu powierzchni stali X5CRNI18-10 po cięciu strugą wodno-ścierną, strumieniem fotonów (LASER) oraz strumieniem plazmy, 2018. Wydawca ELAMED Sp. z o.o. Sp.k., Czasopismo Stal, Metale & Nowe Technologie, Tom nr 5-6, Strony 72-78.
69. Romanowski M., Nadolny K., Problemy frezowania powierzchni po cięciu wysokoskoncentrowanymi strumieniami energii. Artykuł na konferencję „XVI Konferencja Studentów i Młodych Pracowników Nauki”, Koszalin, 30-31 maj 2019.
70. Romanowski M., Nadolny K., Surface texture analysis of the X5CrNi18-10 steel after cutting with abrasive water jet and photon beam (laser). ”artykuł na konferencję „XVII Konferencja Studentów i Młodych Pracowników Nauki”, Koszalin, listopad 2020, wydany jako Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej 12/2020, s. 295-314 ISSN 0239-7129.
71. Safin K., 2010, Foresight jako metoda kształtowania przyszłości, Drukarnia „DRUKAT”, Katowice.

72. Sarnacka M., Solecka P., 2014, Transport materiałów wymagających specjalnych warunków podczas przewozu, *Translogistics*, Naukowe Koło Logistyki Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
73. Sato S., Takahashi K., Mehmetli B., 1996, *J. Appl. Phys.* 79 8917.
74. Schneider Y., Zahn S., Rohm H., 2011. Ultrasonic Cutting of Foods. In: *Ultrasound technologies for food and bioprocessing*, Feng, H., Barbosa-Cárovas, G.V., Weiss, J. (eds). Chapter 9. Springer, New York–Dordrecht–Heidelberg–London.
75. Selvan M., Raju S., Assessment of process parameters in abrasive waterjet cutting of stainless steel, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, July 2011. ©IJAET ISSN: 2231-1963.
76. Simler H., Michel W., Jagiarniak P.: Plasmaschneidarbeitsplatz. *Schweisstechnik*, nr 4, 1986, 158-160
77. Skalik P., Prusak R., Górská M., Ocena i identyfikacja niezgodności w celu doskonalenia jakości w wybranym procesie wytwarzania., 2018, wydawnictwo PTZP.
78. Skoczylas A., Zalewski K., 2016, Badania wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów ze stali C45 po cięciu laserem, frezowaniu wykończeniowym oraz nagniataniu odśrodkowym, *Mechanik* nr 8-9/2016.
79. Spadło S., Krajczarz D. „A Comparison of Laser Cutting and Water Jet Cutting”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 66, 2 (2014): s. 87–92.
80. Spadło S., Gajewski T., Krajczarz D., Drabik Z., Badania wpływu wielkości ziaren ściernych na jakość technologiczną w procesie przecinania AWJ stali S235JR, *Mechanik* 11/2017.
81. Steen W. M.: *Laser Material Processing*, 3rd ed. 2003, Springer-Verlag, London.
82. Sutowska M. Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną [Quality indicators of abrasive water-jet cutting process]. *Measure Automat Monitor* 2011; 57(5): 535–537.
83. Sutowska M., 2009, Problematyka krzywoliniowego przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną uwzględniająca kryteria jakości powierzchni. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska.
84. Sutowska M., 2011, Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną. *PAK* vol. 57, nr 5/2011.
85. Sutowska M., 2011, Wpływ wybranych parametrów obróbki na pochylenie płaszczyzny przecięcia, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, vol. 31, nr 2/2011.
86. Sutowska M., 2014, Jakościowy model procesu cięcia AWJ wybranych materiałów konstrukcyjnych. *PAK* vol. 60, nr 10/2014.
87. Stryczewska H. D., *Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
88. Szałatkiewicz J., Zastosowanie plazmy w technice – aktualne tendencje. „*Pomiary Automatyka Robotyka*” 2/2010, 17-20.
89. Taylor Hobson Ltd., Talysurf CLI 3D Surface Profiling Systems. Product bulletin, 2005.

90. Wang X., Zhou M., Gan J.G.K., Ngoi B., 2002, Theoretical and experimental studies of ultraprecision machining of brittle materials with ultrasonic vibration. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 20, 99–102.
91. Wantuch E., Wskaźniki technologiczne i koszty obróbki stali wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym. *Szkoła naukowa obróbek erozyjnych*, 83-95, Warszawa 2000.
92. Wantuch E., Kot R., Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodno-ściernym, in: *XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej*, Łódź 2003, s. 329–337.
93. Wojtkiewicz-Lazman J., 2007, Charakteryzowanie budowy pojazdów samochodowych, *Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy*, Radom.
94. Wolniak R., 2015, Wykorzystanie punktów kontroli jakości do poprawy procesu produkcyjnego, *Wydawnictwo PTZP*.
95. VDI-Richtlinien: Schnittflächenqualität beim Schneiden, 1994, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall. *Abrasiv- Wasserstrahlschneiden*, VDI 2906.
96. Yilbas B.S., Akhtar S.S., Bayraktar E., Gasem Z., 2012, Laser Cutting of Thin Aluminum and Silicon alloy: Influence of Laser Power on Kerf width, *Advanced Materials Research Vol. 445 (2012)* pp 442-447, Szwajcaria.
97. Zaborski S., Stechnij T., Laserowe i plazmowe cięcie blach ze stali niskostopowych i kwasoodpornych, *Inżynieria Maszyn*, R. 16, z. 4, 2011.
98. Zaborski S., Stechnij T., Masalski J., Poroś D., Właściwości fizykochemiczne powierzchni wybranych materiałów po obróbce strumieniowo-ściernej. *Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej 295, Mechanika 89 RUTMech*, t. XXXIV, z. 89 (4/17), październik-grudzień 2017, s. 555-561.
99. Ziętek B., *Lasery*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2008, ISBN 978-83-231-2195-4
100. Ziolo Z., 2009, Rola przemysłu w procesie kształtowania społeczeństwa informacyjnego. *Prace Komisji Geografii i Przemysłu nr 13*. Warszawa – Kraków.
101. Zheng X., Chen F., Siores E., Steele P., Biskup C., Pude F.: Two dimensional and three dimensional abrasive waterjet machining of aerospace composite components. *International Conference on Water Jetting, BHR, Aix-en-Provence, 2002*, pp. 211-224.
102. <http://ciecielaserem.info/ciecie-plazma/>, (dostęp: lipiec 2020)
103. <http://chematex-scw.pl/portfolio-item/temat7/> (dostęp: luty 2019)
104. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_high_power_fiber_laser_using_a_double-clad_fiber.svg, (dostęp: luty 2020)
105. www.dachy.info.pl, (dostęp: kwiecień 2021)
106. www.e-autonaprawa.pl, (dostęp: maj 2021)
107. http://fizyka.net.pl/aktualnosci/aktualnosci_t.html (dostęp: maj 2019)
108. <https://www.flowwaterjet.pl>, (dostęp: luty 2020)
109. <https://kimla.pl/informacje/glowice-laserow-swiatlowodowych> (dostęp: maj 2020)
110. <https://www.kmt-waterjet.pl>, (dostęp: luty 2020)

111. <http://laserem.pl/>, (dostęp: maj 2019)
112. <http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl>, (dostęp: wrzesień 2020)
113. <https://www.korund.pl>, (dostęp: luty 2020)
114. <https://mikromierz.pl>, (dostęp: 2020)
115. <http://mojafirma.infor.pl/moto/logistyka/transport/672538,Logistyka-plynnych-produktow-spozywczych.html> (dostęp: kwiecień 2017)
116. <https://optek.pl>, (dostęp: maj 2020)
117. <https://www.panasonicfa.com> (dostęp: luty 2020)
118. <http://ptv.com.pl>, (dostęp: wrzesień 2020)
119. <http://www.sebros.eu>, (dostęp: wrzesień 2020)
120. <https://trumpf.pl>, (dostęp, listopad 2021)

Spis rysunków

Rys. 1. Cięcie 2D wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.chematex-scw.pl, 2019).....	16
Rys. 2. Cięcie 3D wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.chematex-scw.pl, 2019).....	16
Rys. 3. Zestawienie metod cięcia stosowanych do cięcia w odpowiednich grubościach (http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl, 2019)	17
Rys. 4. Sposób tworzenia strugi wodno-ścierniej (Sutowska, 2009).....	19
Rys. 5. Obraz powierzchni przeciętej strugą wodno-ścierną z zaznaczonymi strefami jakości (0H18N9, $v_f = 0,16$ mm/s, $p_w = 175$ MPa, $g = 35$ mm) (Borkowski i Sutowska, 2007)	19
Rys. 6. System tnący w wykorzystujący technologię AWJ (Akkurt, 2009)	21
Rys. 7. Jakość cięcia krawędzi strugą wodno-ścierną (Akkurt, 2009)	23
Rys. 8. Odchylenie strugi wodno-ścierniej podczas procesu przecinania (Zheng i inni, 2002)	24
Rys. 9. Błędny kształt naroży spowodowany zakrzywieniem toru wybiegu strugi (Zheng i inni, 2002).....	25
Rys. 10. Cięcie szkła wysoko skoncentrowanym strumieniem fotonów (www.laserem.pl, 2019).....	26
Rys. 11. Schemat budowy głowicy laserowej do cięcia oraz widok procesu cięcia laserowego (Klimpel, 2011).....	27
Rys. 12. Robot spawalniczy firmy Panasonic GIII (https://www.panasonicfa.com, 2020).....	30
Rys. 13. Schemat budowy lasera gazowego wykorzystującego CO ₂ (www.fizyka.net.pl, 2019)	31
Rys. 14. Schemat budowy maszyny do cięcia wykorzystującej technologię lasera włóknowego (www.commonswikimedia.org, 2020)	31
Rys. 15. Schemat powstawania szczeliny przecięcia podczas cięcia plazmowego (Klimpel, 1999).....	33
Rys. 16. Maksymalna prędkość cięcia plazmowego, przy zastosowaniu jako gazu roboczego: a) mieszanki argonowo-wodorowej (różne metale); b) sprężonego powietrza (przy różnym prądzie łuku) (Simler, 1986)	34
Rys. 17. Schemat konstrukcji palnika plazmowego (www.ciecielaserem.info, 2020).....	35
Rys. 18. Cięcie ultradźwiękowe: a) schemat układu tnącego; b) przykładowy nóż (Kosmowski i Dowgiałło, 2016).....	38
Rys. 19. Palnik do cięcia metodą tlenowo-gazową (www.dachy.info.pl, 2021).....	39
Rys. 20. Reduktor umieszczony na butli z gazem (www.dachy.info.pl, 2021)	40
Rys. 21. Schemat drążarki elektronowej: 1 – katoda, 2 – elektroda sterująca, 3 – anoda, 4 – soczewki elektromagnetyczne (ogniskujące i sterujące), 5 – wiązka elektronów, 6 – materiał cięty (www.e-autonaprawa.pl, 2021).....	41
Rys. 22. Powierzchnia uzyskana przez strefę przepływu strumienia wody, fotonów czy plazmy (Akkurt, 2009)	44

Rys. 23. Budowanie jakości (Materiały Wielkopolskiej Izby Rzemieślniczej, 2018).....	48
Rys. 24. Kształtowanie jakości produktu w procesie wytwarzania i eksploatacji (Gawlik i inni, 2013)	49
Rys. 25. Czynniki wpływające na jakość technologiczną wyrobu (Kowalczyk, 2015)	51
Rys. 26. Wskaźniki jakości kształtu szczeliny przecięcia (Sutowska, 2011).....	52
Rys. 27. Zakrzywienie toru wybiegu strugi (VDI-Richtlinien, 1994).....	53
Rys. 28. Elementy urządzenia sprzęgającego ciągnik siodłowy z naczepą: a) i b) siodło, c) sworzeń zaczepowy (królewski) (Wojtkiewicz-Lazman, 2007).....	61
Rys. 29. Naczepa do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017).....	62
Rys. 30. Przykład możliwości umieszczenia reklam na płaszczu zewnętrznym naczepy do przewozu mleka (Romanowski i Nadolny, 2017).....	64
Rys. 31. Zasada pracy dwustronnego cylindra hamulcowego, obsługującego hamulec zasadniczy i postojowy (Wojtkiewicz-Lazman, 2007)	65
Rys. 32. Budowa naczepy trzykomorowej do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017).....	67
Rys. 33. Mapa procesu produkcyjnego naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych (Romanowski i Nadolny, 2017)	69
Rys. 34. Schemat badań jakości technologicznej w procesie cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną.....	72
Rys. 35. Wymiary wyciętego elementu ze stali X5CrNi18-10	73
Rys. 36. Schemat pomiaru elementu ze stali X5CrNi18-10 o wymiarach 100×30 mm.....	74
Rys. 37. Orientacja obszarów obserwacji mikroskopowej powierzchni cięcia.....	74
Rys. 38. Panel operatorski urządzenia do cięcia strumieniem fotonów Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW.....	76
Rys. 39. Panel operatorski urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic	76
Rys. 40. Geometria elementu testowego opracowanego na potrzeby badań właściwych procesu cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną	80
Rys. 41. Schemat prezentujący kolejność pomiarów cech geometrycznych (odchyłki prostoliniowości, okrągłości oraz miary kąta) wykonanych w badaniach właściwych na elemencie testowym ze stali X5CrNi18-10 i opisanych poszczególnymi kolorami.....	81
Rys. 42. Orientacja obszarów wyciętego elementu rejestrowanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544	81
Rys. 43. Widok stanowiska badawczego wyposażonego w urządzenie do wycinania strumieniem fotonów Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW.....	84
Rys. 44. Widok stanowiska badawczego wyposażonego w urządzenie do wycinania strumieniem fotonów TRUMPF CO ₂ serii TruFlow 6000 6 kW.....	87
Rys. 45. Budowa głowicy tnącej typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato: 1 – korpus głowicy, 2 – łącznik poboru ścierniwa, 3 – pierścień zaciskający, 4 – nakrętka zaciskowa, 5 – dysza ścierniwa, 6 – matryca (instrukcja obsługi urządzenia).....	89

Rys. 46. Urządzenie do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic.....	90
Rys. 47. Wzmacniacz ciśnienia – pompa wysokociśnieniowa urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic	90
Rys. 48. Stanowisko pomiarowe wyposażone w wielogłowicowy system pomiarowy Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd.....	93
Rys. 49. Stanowisko do rejestracji obrazów CPS oraz powierzchni obrobionej metodą mikroskopii opto-cyfrowej wyposażone w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. (https://optek.pl , 2020).....	95
Rys. 50. Elementy składowe stanowiska do rejestracji obrazów czynnej powierzchni oraz powierzchni obrobionej metodą mikroskopii opto-cyfrowej wyposażonego w cyfrowy mikroskop pomiarowy Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co.	95
Rys. 51. Mikrometry cyfrowe QLR MMT o zakresach pomiarowych: a) 25-50/0,001 mm; b) 50-100/0,001 mm.....	97
Rys. 52. Elementy składowe stanowiska do pomiarów współrzędnościowych wyposażonego w zautomatyzowaną maszynę pomiarową Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544.....	98
Rys. 53. Widok okna programu GEOPAK WMP in MCOSMOS-1 v4.3	99
Rys. 54. Stanowisko do pomiaru mikrotopografii powierzchni przedmiotów obrobionych metodą stykową wyposażone w profilometr Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke GmbH	100
Rys. 55. Wykres Schaeffera z zaznaczonymi punktami odpowiadającymi stalom nierdzewnym (Mazurkiewicz i Maciejewski, 2017).....	102
Rys. 56. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) przy zmiennych parametrach $P = 4, 5, 6$ kW oraz prędkości posuwu $v_{fLASER} = 10, 20, 30$ mm/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{fLASER} = 30$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (ł-n) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{fLASER} = 30$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strumieniem fotonów	105
Rys. 57. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) przy zmiennych parametrach $v_{fAWJ} = 0,8; 1,66; 2,5$ mm/s oraz $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (ł-n) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005; 0,0066; 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strugą wodno-ścierną	106
Rys. 58. Zmiany wartości parametru Sa powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną.....	110
Rys. 59. Zmiany wartości parametru St powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną.....	111

- Rys. 60. Zmiany wartości parametru Sq powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną..... 112
- Rys. 61. Zmiany wartości parametru Sds powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną..... 113
- Rys. 62. Zmiany wartości parametru Str powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną..... 114
- Rys. 63. Zmiany wartości parametru $Smmr$ powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną..... 115
- Rys. 64. Zmiany wartości parametru $Smvr$ powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w zależności od zmiennej mocy P oraz prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} oraz v_{fAWJ} w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną..... 116
- Rys. 65. Wykres modelu matematycznego odchyłki szerokości w opracowanego na podstawie danych z pomiarów szerokości elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} oraz mocy lasera P 124
- Rys. 66. Wykres modelu matematycznego odchyłki długości l opracowanego na podstawie danych z pomiarów długości elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy v_{fLASER} oraz mocy lasera P 125
- Rys. 67. Wykres modelu matematycznego odchyłki szerokości w opracowanego na podstawie danych z pomiarów szerokości elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} oraz wydatku ścierniwa \dot{m} 126
- Rys. 68. Wykres modelu matematycznego odchyłki długości l opracowanego na podstawie danych z pomiarów długości elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a), $g_b=8$ mm (b) i $g_b=10$ mm (c) w funkcji zmian wartości prędkości posuwu głowicy v_{fAWJ} oraz wydatku ścierniwa \dot{m} 127
- Rys. 69. Przykład obrazów mikroskopowych elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) wyciętych przy zmiennych parametrach $P = 4, 5, 6$ kW oraz prędkości posuwu $v_{fLASER} = 10, 20, 30$ mm/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{fLASER} = 30$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (ł-n) przy zmiennym parametrze $P = 4, 5, 6$ kW i stałej prędkości posuwu $v_{fLASER} = 30$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strumieniem fotonów..... 130

Rys. 70. Przykład obrazów mikroskopowych elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a-i) wyciętych przy zmiennych parametrach prędkości posuwu $v_{fAWJ} = 0,8, 1,66, 2,5$ mm/s oraz wydatku ścierniwa $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s; o grubości $g_b=8$ mm (j-l) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s; o grubości $g_b=10$ mm (ł-n) przy zmiennym parametrze $\dot{m} = 0,005, 0,0066, 0,0083$ kg/s i stałej prędkości posuwu głowicy $v_{fAWJ} = 2,5$ mm/s z widocznymi deformacjami plastycznymi wyciętych strugą wodno-ścierną	131
Rys. 71. Zmiany wartości wskaźnika JTC powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm (a, d), 8 mm (b, e) i 10 mm (c, f) w zależności od zmiennej mocy P , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fLASER} (a-c) oraz zmiennym wydatku ścierniwa \dot{m} , prędkości posuwu głowicy tnącej v_{fAWJ} (d-f) w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną.....	141
Rys. 72. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6 mm.....	152
Rys. 73. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 6 mm	152
Rys. 74. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 8 mm.....	153
Rys. 75. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 8 mm	153
Rys. 76. Wykres odchyłek mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm.....	154
Rys. 77. Wykres odchyłek wartości kątów elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm	154
Rys. 78. Wykres wartości średnich odchyłek cech geometrycznych elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną mierzonych w trzech strefach krawędzi cięcia (1 mm od górnej krawędzi blachy, $\frac{1}{2} g_b$ i 1 mm od dolnej krawędzi blachy).....	158
Rys. 79. Wykres wartości średnich odchyłek kątów dla elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną (1 mm od górnej krawędzi blachy, $\frac{1}{2} g_b$ i 1 mm od dolnej krawędzi blachy).....	158
Rys. 80. Wykres wartości średnich odchyłek mierzonych cech geometrycznych i kątów dla elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną dla trzech grubości ciętej blachy $g_b=6, 8$ i 10 mm.....	159
Rys. 81. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a-f) i 8 mm (g-l) z widocznymi deformacjami i defektami	161
Rys. 82. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strumieniem fotonów z blachy o grubości $g_b=10$ mm z widocznymi deformacjami i defektami	162
Rys. 83. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=6$ mm (a-f) i 8 mm (g-l) z widocznymi deformacjami i defektami	163
Rys. 84. Wybrane obrazy mikroskopowe elementów wyciętych strugą wodno-ścierną z blachy o grubości $g_b=10$ mm z widocznymi deformacjami i defektami	164

Rys. 85. Oznaczenia stref pomiarowych prostopadłości krawędzi cięcia względem powierzchni górnej blachy.....	165
Rys. 86. Wykres odchyłek wartości kątów mierzonych cech geometrycznych elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy o grubości 10 mm	166
Rys. 87. Wykres wartości średnich odchyłek prostopadłości elementów wyciętych strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną dla trzech grubości ciętej blachy $g_b=6, 8$ i 10 mm.....	167
Rys. 88. Zestawienie mikrotopografii powierzchni elementów o grubościach $g_b=6$ mm (a,d), 8 mm (b,e) i 10 mm (c, f) wyciętych strumieniem fotonów (a-c) przy stałych parametrach: mocy $P = 5$ kW i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{LASER} = 10$ mm/s oraz strugą wodno-ścierną (d-f) przy stałych parametrach: natężeniu przepływu ścierniwa $\dot{m} = 0,0066$ kg/s i prędkości posuwu głowicy roboczej $v_{AWJ} = 1,66$ mm/s	169
Rys. 89. Zmiany wartości parametru a) S_a , b) S_t , c) S_q , d) S_{ds} , e) S_{tr} , f) S_{mmr} , g) S_{mvr} powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w zależności od grubości blachy g_b w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną	171
Rys. 90. Zmiany wartości wskaźnika JTC powierzchni po cięciu blachy o grubości g_b wynoszącej 6 mm, 8 mm i 10 mm w procesie cięcia strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną: a) parametry wejściowe pozyskane z tabeli 54 (normalizacja odbyła się tylko w obrębie danej metody cięcia), b) parametry wejściowe pozyskane z tabeli 55 (normalizacja odbyła się dla obu metod zbiorczo).....	179

Spis tabel

Tab. 1. Porównanie metod cięcia (https://www.kmt-waterjet.pl , 2020)	17
Tab. 2. Temperatura topnienia i wrzenia, gęstość, przewodność cieplna właściwa różnych materiałów metalowych (Klimpel, 2012).....	29
Tab. 3. Charakterystyka głównych odmian cięcia plazmowego (Höpf, 1986)	36
Tab. 4. Właściwości gazów plazmotwórczych (http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl , 2020)	36
Tab. 5. Porównanie metod cięcia (https://www.flowwaterjet.pl , 2020)	45
Tab. 6. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów.....	78
Tab. 7. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do strugą wodno-ścierną	79
Tab. 8. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do cięcia strumieniem fotonów.....	84
Tab. 9. Zestawienie wartości parametrów planu eksperymentu dla urządzenia do strugą wodno-ścierną	84
Tab. 10. Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW.....	85
Tab. 11. Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarnie laserowej Kimla FlashCUT LF 1530 6 kW (https://kimla.pl , 2020)	86
Tab. 12. Dane techniczne oraz parametry pracy urządzenia TRUMPF CO ₂ serii TruFlow 6000 6 kW	88
Tab. 13. Parametry głowicy laserowej użytej w przecinarnie laserowej TRUMPF CO ₂ serii TruFlow 6000 6 kW (https://trumpf.pl , 2021).....	89
Tab. 14. Zestawienie parametrów pracy urządzenia do cięcia strugą wodno-ścierną PTV JETS 3,8/60 Basic (http://ptv.com.pl , 2020)	92
Tab. 15. Charakterystyka metod wykorzystywanych w systemie pomiarowym Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson Ltd. (Taylor, 2005)	94
Tab. 16. Parametry techniczne cyfrowego mikroskopu pomiarowego Dino-Lite Edge AM7915MZT firmy ANMO Electronics Co. (https://optek.pl , 2020)	96
Tab. 17. Dane techniczne Mikrometru cyfrowego QLR MMT o zakresie 25-50 mm oraz 50-100 mm (https://mikromierz.pl , 2020).....	98
Tab. 18. Dane techniczne współrzędnościowej maszyny pomiarowej Mitutoyo CRYSTA – WMP CNC serii Apex V 544 (Mitutoyo CRYSTA Apex V 54 – broszura informacyjna producenta, 2021)	99
Tab. 19. Skład chemiczny stali X5CrNi18-10 według PN-71/H-86020.....	103
Tab. 20. Właściwości mechaniczne osiągnięte przez stal X5CrNi18-10 (http://www.sebros.eu , 2020).....	103
Tab. 21. Właściwości fizyczne stali X5CrNi18-10 (http://www.sebros.eu , 2020)	103
Tab. 22. Wyniki pomiarów wartości parametru S_a chropowatości powierzchni.....	107

Tab. 23. Wyniki pomiarów wartości parametru St chropowatości powierzchni.....	108
Tab. 24. Wyniki pomiarów wartości parametru Sq chropowatości powierzchni.....	108
Tab. 25. Wyniki pomiarów wartości parametru Sds chropowatości powierzchni	108
Tab. 26. Wyniki pomiarów wartości parametru Str chropowatości powierzchni	109
Tab. 27. Wyniki pomiarów wartości parametru $Smmr$ chropowatości powierzchni.....	109
Tab. 28. Wyniki pomiarów wartości parametru $Smvr$ chropowatości powierzchni.....	109
Tab. 29. Wyniki pomiarów gabarytowych 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=6$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki).....	121
Tab. 30. Wyniki pomiarów dokładności wymiarowej 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=8$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki).	122
Tab. 31. Wyniki pomiarów dokładności wymiarowej 18 elementów wyciętych z blachy o grubości $g_b=10$ mm strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną (odchyłki)	123
Tab. 32. Tabela oceny wad powstałych na skutek cięcia przeprowadzonej na podstawie obserwacji mikroskopowych	135
Tab. 33. Zestawienie wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów.....	136
Tab. 34. Zestawienie wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną.....	137
Tab. 35. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów	138
Tab. 36. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną	139
Tab. 37. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości JTC dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów JTC_{LASER} oraz cięcia strugą wodno-ścierną JTC_{AWJ} ...	140
Tab. 38. Zestawienie mierzonych cech geometrycznych.....	145
Tab. 39. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6 mm.....	146
Tab. 40. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6 mm	147
Tab. 41. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 8 mm.....	148
Tab. 42. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 8 mm	149
Tab. 43. Zestawienie odchyłek mierzonych cech geometrycznych na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 10 mm.....	150
Tab. 44. Zestawienie odchyłek mierzonych kątów na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 10 mm	151
Tab. 45. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych cech geometrycznych dla strumienia fotonów i strugi wodno-ściernej dla wybranych grubości blach	157
Tab. 46. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych kątów dla strumienia fotonów i strugi wodno-ściernej dla wybranych grubości blach.....	157

Tab. 47. Zestawienie średniej odchyłek mierzonych cech geometrycznych i kątów dla strumienia fotonów i strugi wodno-ścierniej	157
Tab. 48. Zestawienie odchyłek prostopadłości na elemencie wyciętym strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6, 8 i 10 mm	166
Tab. 49. Zestawienie wartości średnich odchyłek prostopadłości elementu wyciętego strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną z blachy 6, 8 i 10 mm	167
Tab. 50. Wyniki pomiarów wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni.....	170
Tab. 51. Tabela oceny wad powstałych na skutek cięcia przeprowadzonej na podstawie obserwacji mikroskopowych	175
Tab. 52. Uśrednione zestawienie intensywności deformacji <i>ID</i> i identyfikacji stref cięcia <i>ISC</i>	176
Tab. 53. Zestawienie uśrednionych wartości branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną	176
Tab. 54. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną	177
Tab. 55. Zestawienie wartości po normalizacji branych pod uwagę w ocenie jakości technologicznej powierzchni po cięciu strumieniem fotonów i strugą wodno-ścierną (zbiorczo dla obu metod) – porównanie obu metod cięcia.....	177
Tab. 56. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości <i>JTC</i> dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów <i>JTC_{LASER}</i> oraz cięcia strugą wodno-ścierną <i>JTC_{AWJ}</i> ...	178
Tab. 57. Zestawienie wartości syntetycznego wskaźnika jakości <i>JTC</i> dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów <i>JTC_{LASER}</i> oraz cięcia strugą wodno-ścierną <i>JTC_{AWJ}</i> (zbiorczo dla obu metod) – porównanie obu metod cięcia.....	178