



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

**Dyscyplina Naukowa**  
**Inżynieria Mechaniczna**

# **PRACA DOKTORSKA**

mgr inż. Mateusz Kiełbicki

**Metodyka projektowania i wytwarzania systemów mocowań  
przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami  
przyrostowymi dla przemysłu lotniczego**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

Promotor pomocniczy:

dr inż. Joanna Woźniak

Rzeszów 2024



<b>DATA OZNACZENIA (RRRR-MM-DD)</b>	13.09.2024	<b>NR PRACOWNICZY: (P...)</b>	P535345
-------------------------------------	------------	-------------------------------	---------



Zaznacz jeśli dokument **nie zawiera danych technicznych.**

lub

Wpisz wszystkie kody klasyfikacyjne, występujące w dokumencie zgodnie z wytycznymi.

<p>Kod klasyfikacyjny musi być zawsze podany w polach U.S. oraz Outside U.S.</p> <p>Klasyfikacja lokalna musi być zawsze podana gdy osoba wypełniająca tabelę znajduje się poza terenem Stanów Zjednoczonych.</p>	KLASYFIKACJA		
	LOKALIZACJA	REGULACJE U.S.	
		EAR	ITAR
	U.S.	P-ECCN	P-USML
	OUTSIDE U.S.	ECCN	USML
		REGULACJE LOKALNE	
	POLSKA	PL/UE	



# SPIS TREŚCI

<b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....</b>	<b>7</b>
<b>1. WSTĘP .....</b>	<b>9</b>
<b>2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA.....</b>	<b>13</b>
2.1. Konstrukcja oprzyrządowania .....	13
2.1.1. Modułowe systemy mocowań .....	15
2.1.2. Zmiennefazowe systemy mocowań .....	16
2.1.3. Uchwyty adaptacyjne .....	18
2.1.4. Uchwyty kontrolno-pomiarowe.....	20
2.1.5. Uchwyty hybrydowe .....	21
2.2. Dokładność przyrządów .....	21
2.3. Materiały konstrukcyjne .....	23
2.4. Druk 3D w oprzyrządowaniu .....	25
2.4.1. Technologie druku 3D z metalu w oprzyrządowaniu.....	29
2.5. Rodzaje spawania .....	36
2.5.1. Ogólny podział procesów spawalniczych.....	36
2.5.2. Spawanie metodą TIG .....	38
2.5.3. Spawanie plazmowe .....	39
2.5.4. Spawanie wiązką elektronów .....	41
2.5.5. Spawanie laserowe .....	42
2.6. Kanały konformalne .....	44
<b>3. CEL I ZAKRES PRACY .....</b>	<b>49</b>
3.1. Uzasadnienie wyboru tematu i podjęcia badań .....	49
3.2. Cele pracy i postawiona hipoteza .....	49
3.3. Przebieg procesu badawczego .....	50
3.4. Charakterystyka przedsiębiorstwa.....	51
<b>4. METODYKA BADAWCZA .....</b>	<b>53</b>
4.1. Opracowanie modelu badawczego 3D-CAD .....	53

4.2.	Opracowanie prototypu koncepcyjnego.....	57
4.3.	Opracowanie prototypu numerycznego .....	58
4.4.	Opracowanie prototypu wizualnego .....	60
4.5.	Opracowanie prototypu technologicznego.....	62
4.6.	Wykonanie prototypu technicznego.....	63
4.7.	Przeprowadzenie symulacji komputerowych na prototypie technicznym .....	65
4.8.	Przeprowadzenie badań laboratoryjnych na prototypie technicznym.....	71
4.9.	Przeprowadzenie badań na prototypie technicznym na wydziale produkcyjnym ...	73
4.10.	Analiza uzyskanych wyników i wyciągnięcie wniosków .....	74
<b>5.</b>	<b>REALIZACJA BADAŃ.....</b>	<b>75</b>
5.1.	Opis modeli badawczych .....	75
5.2.	Symulacje MES.....	79
5.2.1.	Symulacja rozkładu ciepła i tempa chłodzenia .....	79
5.2.2.	Symulacja wytrzymałościowe.....	93
5.3.	Badania laboratoryjne .....	95
5.3.1.	Opis badań laboratoryjnych .....	95
5.3.2.	Analiza wyników badań laboratoryjnych .....	97
5.4.	Badania na wydziale produkcyjnym .....	101
5.4.1.	Opis badań na wydziale produkcyjnym .....	101
5.4.2.	Analiza wyników badań w warunkach produkcyjnych .....	103
<b>6.</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....</b>	<b>107</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>113</b>
	<b>STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ .....</b>	<b>127</b>
	<b>ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION .....</b>	<b>129</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

**3D-CAD** - Trójwymiarowe projektowanie wspomagane komputerowo (Computer-Aided Design)

**DMLS** - Bezpośrednie spiekanie laserowe metali (Direct Metal Laser Sintering)

**LC** - Konsolidacja laserowa (Laser Consolidation)

**LMD** - Napawanie laserowe (Laser Metal Deposition)

**DMD** - Napawanie bezpośrednio metali (Direct Metal Deposition)

**LENS** - Kształtowanie siatki inżynierskiej za pomocą lasera (Laser Engineered Net Shaping)

**LPF** - Formowanie proszków laserowych (Laser Powder Forming)

**UAM** - Przyrostowe wytwarzanie ultradźwiękowe (Ultrasonic Additive Manufacturing)

**TKF** - Titomic Kinetic Fusion® - nazwa technologii natryskiwania na zimno

**SPEED3D** - Nazwa technologii natryskiwania na zimno

**ADAM** - Przyrostowe wytwarzanie dyfuzyjne atomów (Atomic Diffusion Additive Manufacturing)

**BJT** - Spajanie proszkowe (Binder Jetting)

**DED** - Bezpośrednie osadzanie materiału z użyciem energii (Direct Energy Deposition)

**MEX** - Ekstruzja materiału (Material Extrusion)

**MJT** - Warstwowy nadruk płynnego materiału (Material Jetting Additive)

**PBF** - Spiekanie w złożu proszkowym (Powder Bed Fusion)

**SHL** - Laminowanie arkuszy (Sheet Lamination)

**VPP** - Fotopolimeryzacja objętościowa (VAT Photopolymerization)

**TIG** - Spawanie metodą elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych (Tungsten Inert Gas)

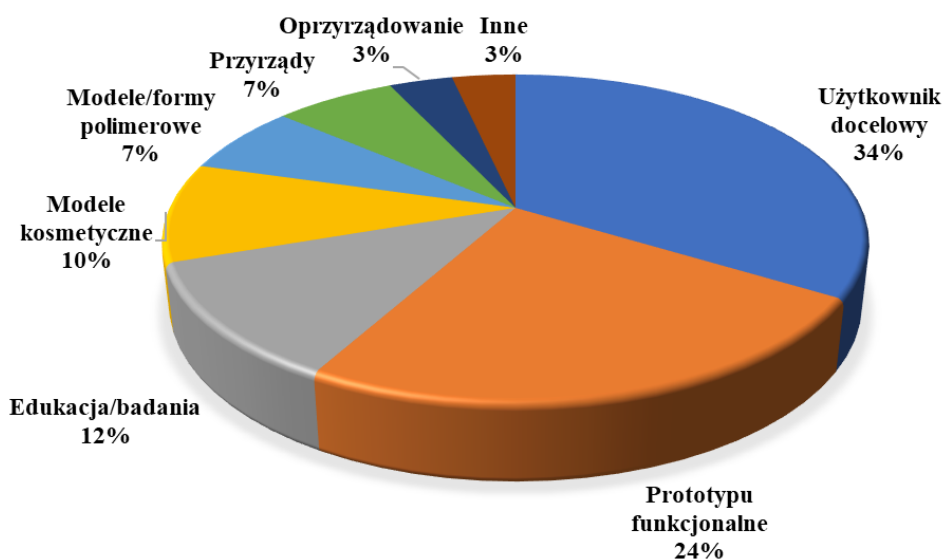
**MIG** - Spawanie metodą metalową w osłonie gazów obojętnych (Metal Inert Gas)





# 1. WSTĘP

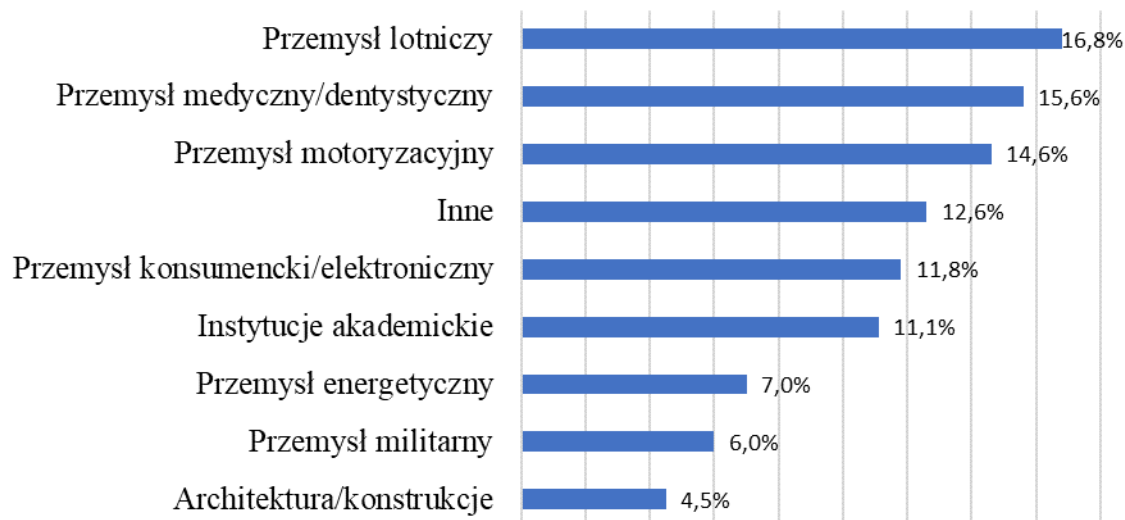
Czwarta rewolucja przemysłowa wyraźnie wskazuje na rosnące znaczenie technologii przyrostowych, szczególnie w kontekście sfery produkcji. Analizy i prognozy jednoznacznie przedstawiają ciągły dynamiczny wzrost wartości rynku maszyn i narzędzi stosowanych do wykonywania elementów metodą addytywną [1]. Zjawisko to może wynikać z coraz większego zainteresowania zarówno ze strony przemysłu, jak i konsumentów, którzy dostrzegają korzyści płynące z zastosowania tej innowacyjnej metody wytwarzania. Dane zebrane przez Wohlers'a zaprezentowane na wykresie (rys. 1.1) obrazują główne wykorzystanie technologii przyrostowych przez organizację do wytwarzania docelowych produktów i prototypów o funkcjonalnym charakterze. Dodatkowo techniki te znajdują zastosowanie w sferze edukacji, badań oraz wytwarzania form polimerowych czy narzędzi produkcyjnych. Świadczy to o wszechstronności oraz różnorodności wykorzystania druku 3D w kontekście różnych aspektów biznesowych i przemysłowych [2]



Rys. 1.1. Obszary zastosowań metod przyrostowych wraz z procentowym ich udziałem [2]

W obliczu tego nurtu niezmiennie istotne jest kontynuowanie badań nad procesem produkcji, zwłaszcza w zakresie jakości wyrobów w kontekście materiałów metalowych. Z raportu Wohlers'a wynika, że blisko połowa z 29 zewnętrznych dostawców materiałów dla technologii przyrostowych produkuje proszek metalowy, 11 z nich wytwarza proszek polimerowy, a 4 oferuje oba rodzaje materiałów [2]. W wielu sektorach przemysłu, takich jak lotnictwo, motoryzacja, energetyka czy obronność, właśnie te materiały odgrywają kluczową rolę. Również z raportu Wohlers'a wynika, że przemysł lotniczy oraz motoryzacyjny stanowią

blisko 1/3 branż obsługiwanych przez dostawców (rys. 1.2). Wraz z rozwojem technologii druku 3D i jej zaawansowaniem, wzrasta potrzeba ciągłego doskonalenia jakości wytworzonych części, aby sprostać wymaganiom surowych standardów każdej branży. Dlatego tak ważne jest zapewnienie wysokiej jakości w procesie produkcyjnym z wykorzystaniem metod addytywnych. Równocześnie badania nad nowymi materiałami i metodami obróbki odgrywają kluczową rolę w rozwijaniu potencjału technologii druku 3D [1, 2].



Rys. 1.2. Wpływ druku 3D na dochody firm z różnych branż [2]

Druk 3D oferuje wiele zalet, takich jak szybkie prototypowanie, redukcję kosztów, elastyczność projektowania czy personalizacja produktów. W procesach przyrostowych możliwe jest wytwarzanie skomplikowanych komponentów jako jednego elementu, co znacząco obniża koszty. Wraz ze wzrostem złożoności części, efektywność wytwarzania metodami przyrostowymi rośnie. Aktualne techniki produkcji, obejmujące druk 3D, przekształcają nie tylko sposoby wytwarzania, lecz także wzbogacają konwencjonalne podejście do procesów produkcyjnych. Początkowo jako narzędzia badawcze, stały się z czasem nieodłączną częścią technologii produkcji w przemyśle. Służą już nie tylko jako techniki wykorzystywane do wykonywania prototypów. Pozwalają na wytwarzanie gotowych wyrobów zespołów oraz części, rewolucjonizując różne gałęzie przemysłu [3, 4, 5, 6, 7].

Technologie przyrostowe mają swoje zastosowanie m. in. w produkcji oprzyrządowania. Warto zwrócić uwagę na to, że oprzyrządowanie jest kluczowym elementem w produkcji części lotniczych, zarówno małych podzespołów, jak i całych zespołów. Stanowi ono swoiste rusztowanie, które umożliwia poprawne wykonanie komponentów, utrzymując je

w odpowiednim położeniu i kształcie. Z uwagi na małoseryjny charakter produkcji lotniczej, każde oprzyrządowanie może być dostosowane do specyficznych potrzeb danego komponentu. Proces konstruowania oprzyrządowania uwzględnia wiele czynników, takich jak tolerancje wymiarowe, właściwości materiałowe, metody łączenia, koszty i czas produkcji.

Niezwykłym udogodnieniem dla konstruktorów oprzyrządowania jest zatem możliwość szybkiego tworzenia prototypów (RP – Rapid Prototyping). Pomimo korzyści płynących z programów 3D-CAD, które ułatwiają projektowanie, nie zawsze gwarantują one weryfikację dopasowania elementów czy poprawności montażu. Druk 3D staje się więc niezastąpionym, narzędziem, umożliwiającym stworzenie demonstratorów w kilka godzin. Tego typu modele mogą być przydatne także technologom oraz programistom CNC w celu sprawdzenia programów obróbczych i wczesnego wykrycia potencjalnych kolizji ścieżek programowych [8, 9, 10, 11].

W obszarze przemysłu lotniczego, na którym skupia się realizowany doktorat wdrożeniowy, druk 3D może mieć zastosowanie w tworzeniu pełnowartościowych komponentów przyrządów spawalniczych, oprzyrządowania niezbędnego do produkcji komponentów lotniczych. Technologie addytywne umożliwiają wytworzenie elementów o znacznie mniejszej masie w porównaniu z tradycyjnymi metodami, zachowując jednocześnie pełną funkcjonalność i spełniając rygorystyczne wymagania dotyczące kształtu i wymiarów. Metody te mogą znaleźć również zastosowanie przy wytwarzaniu elementów przyrządów spawalniczych, takich jak systemy mocowań, które działają w warunkach podwyższonej temperatury. Zastosowanie druku 3D może poprawić dystrybucję ciepła tych elementów lub przyspieszyć ich czas chłodzenia. To z kolei przekłada się na oszczędność czasu (mniejsze przerwy między procesami spawania potrzebne na wystudzenie przyrządu) oraz zmniejszenie zużycia cieplnego przyrządów jak ma to na przykład miejsce w formach wtryskowych chłodzonych kanałami konformalnymi [12, 13, 14, 15, 16].

Analiza literatury ukazuje, że pomimo wielu postępów w technologii oprzyrządowania, brakuje badań dotyczących konformalnych kanałów w oprzyrządowaniu, zwłaszcza w kontekście oprzyrządowania spawalniczego. Wszystkie badania skupione są na zastosowaniu takich kanałów w formach wtryskowych. Pozwala to jednak twierdzić, że podobne zastosowanie kanałów konformalnych w uchwytach spawalniczych przyniesie wymierne korzyści. Dlatego też, potrzeba dalszych badań w tym zakresie jest kluczowa, aby lepiej zrozumieć i optymalizować zastosowanie tych technologii w praktyce przemysłowej.

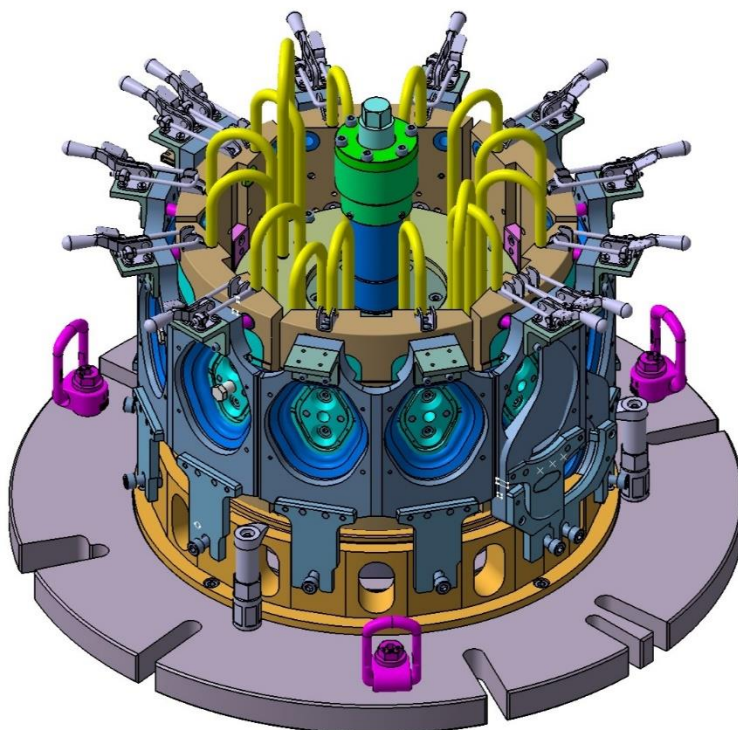
Niniejsza praca realizowana jest w ramach projektu Doktorat Wdrożeniowy.



## 2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

### 2.1. Konstrukcja oprzyrządowania

Oprzyrządowanie stanowi nieodłączny element w produkcji części lotniczych, zarówno tych małych pojedynczych podzespołów jak i całych zespołów. Jest ono w pewnym znaczeniu rusztowaniem umożliwiającym poprawne wykonanie danego komponentu, utrzymując część w odpowiednim położeniu oraz kształcie. Z racji tego, że produkcja lotnicza w głównej mierze jest produkcją małoseryjną każdy z przyrządów może cechować się indywidualnym podejściem do danego komponentu. Jednak w samym procesie konstruowania oprzyrządowania wykorzystuje się także elementy standardowe lub specjalne oferowane przez różnych producentów. Należy także uwzględnić wiele czynników, do których należą m. in. tolerancje wymiarowe, właściwości materiałowe (w zależności od konkretnego procesu), metody łączenia, koszty, a także czas produkcji. Warto podkreślić, że oprzyrządowanie jest elementem niezbędnym w zapewnieniu wysokiej wydajności i jakości produkcji komponentów lotniczych [17]. Przykładowe oprzyrządowanie spawalnicze wykorzystywane w Pratt & Whitney Rzeszów przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Przykład przyrządu spawalniczego wykorzystywanego w Pratt & Whitney Rzeszów [18]

Głównym zadaniem przyrządu jest umiejscowienie i zorientowanie części produkcyjnej opierając się o bazy technologiczne, które są punktami odniesienia dla części produkcyjnej, a następnie jej unieruchomienie odbierając jej stopnie swobody, tak aby proces był jak najdokładniejszy oraz powtarzalny. Odpowiada za to system mocowań, który wchodzi w skład każdego przyrządu. Wraz ze wzrostem skomplikowania obróbki części produkcyjnej zwiększa się także liczba tych mocowań. Przyrządy mogą być jednostkami wolnostojącymi, mocowane do obrabiarki lub stołu obrotowego, ale także do ramienia robota w przypadku produkcji zautomatyzowanej. Dopatrzyć można się także przyrządów mocowanych bezpośrednio do części produkcyjnej [19].

Poza podstawowymi funkcjami takimi jak odpowiednie bazowanie oraz zamocowanie części obrabianej, przyrząd musi charakteryzować się następującymi cechami [20, 21, 22]:

- prostota i szybkość obsługi (umożliwiająca szybki montaż i demontaż obrabianego elementu przez operatora),
- bezpieczeństwo operatora,
- zapewnienie jednoznaczności mocowania (tzw. Poka Yoke),
- trwałość i wytrzymałość,
- zgodność z zasadami BHP oraz ergonomią użytkownika,
- kompatybilność (o ile jest taka możliwość i potrzeba),
- łatwość czyszczenia i konserwacji.

Przyrządy niewątpliwie pomagają w produkcji. Niegdyś do dyspozycji konstruktora był tylko podstawowy zestaw kreślarski, natomiast wydziały produkcyjne dysponowały jedynie podstawowymi obrabiarkami konwencjonalnymi. Utrudniało to projektowanie i wykonanie skomplikowanych przyrządów, które często były nieergonomiczne.

Wraz z rozwojem technologii i wprowadzeniu do biur konstrukcyjnych programów 3D-CAD zmianie uległo podejście konstruktorów do danych problemów oraz wzrosła ich innowacyjność. Wprowadzenie obrabiarek wieloosiowych oraz centr obróbczych wywarło pozytywny wpływ na rozwój oprzyrządowania [23].

Niewątpliwie wprowadzenie do użytku powszechnego komputerów i oprogramowania CAD/CAM, w ostatnich trzech dekadach, miało również ogromny wpływ na rozwój oprzyrządowania [24, 25]. Jednak sama historia tych systemów sięga dużo dalej [26]. Systemy komputerowo wspomaganego projektowania (CAD) znacznie przyspieszyły prace konstruktorów oraz umożliwiły projektowanie przyrządów bardziej ergonomicznych oraz ekonomicznych. Z kolei rozwój systemów komputerowo wspomaganego wytwarzania (CAM)

przyczynił się do poprawy takich aspektów produkcji jak planowanie produkcji, planowanie zasobów materiałowych oraz na optymalizację ścieżek obróbczych. Umożliwiło to zminimalizowanie kolizji poprzez wykrycie ich jeszcze na etapie symulacji komputerowych [27].

Kolejnym etapem rozwoju konstrukcji przyrządów jest wykorzystanie ciągle rozwijającego się druku 3D [28, 29]. Zastosowanie technologii przyrostowych może pozytywnie wpłynąć na produkcję oprzyrządowania poprzez zmniejszenie czasu wykonania, zmniejszenie odpadów produkcyjnych a co za tym idzie zwiększenie oszczędności. Zmniejszenie odpadów powstałych na skutek obróbki części niesie za sobą także pozytywny wpływ na środowisko poprzez zmniejszenie energii potrzebnej na wykonanie danego elementu [30, 31, 32].

### **2.1.1. Modułowe systemy mocowań**

Modularność przyrządów charakteryzuje się możliwością łączenia ze sobą wielu systemów modułowych wraz ze standardowymi elementami. Do elementów tych należy zaliczyć płyty standardowe, nastawiaki, zaciski oraz inne elementy złączne. Moduły można łączyć w wiele kombinacji używając ich wraz z niestandardowymi (dedykowanymi) elementami, które mogą stanowić cały przyrząd. Elastyczność takiej konstrukcji polega na możliwości szybkiej wymiany lub przebrojenia przyrządu i dopasowania go do nowego detalu produkcyjnego. Zastosowanie tego typu przyrządów znajduje miejsce w produkcji mało i średnio seryjnej, gdzie elementy produkcyjne często zmieniają się, a wymianie ulegają tylko pewne elementy. Dzięki temu możliwa jest minimalizacja składu magazynowego. Przykład takiego rozwiązania zaprezentowano na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Przykład modułowego systemu mocowania firmy IMAO [33]

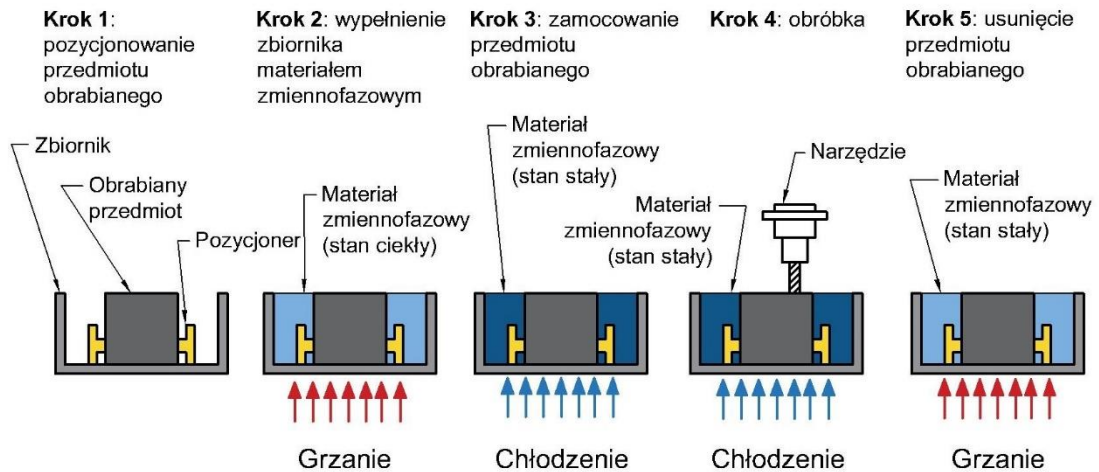
Podziału przyrządów modułowych można dokonać bazując na sposobie montażu modułów. Pierwszym rodzajem są przyrządy oparte na gniazdach, w których to właśnie specjalne gniazda bazują element modułowy. Najczęściej spotykanym tego typu rozwiązaniem są frezowane w płytach rowki T-owe. Drugi rodzaj przyrządów to przyrządy bazujące na otworach, które są wiercone w płytach z tolerancją zapewniającą wysoką dokładność oraz powtarzalność [34, 35]. Trzecim przykładem, są rekonfigurowalne przyrządy automatyczne. Przyrządy te wykorzystują podstawę w formie magnetycznej płyty oraz manipulatora robota, który w swobodny sposób zmienia oraz pozycjonuje konkretne moduły w zależności od potrzeby w danym momencie [36, 37].

Niestety, pomimo wielu zalet jakie niesie za sobą wykorzystanie przyrządów modułowych, rozwiązanie to posiada pewne ograniczenia, które w niektórych sytuacjach mogą decydować o wyborze danego rozwiązania nad drugim. Po pierwsze ze względu na sumę tolerancji poszczególnych modułów oraz dokładność montażu i pozycjonowania wraz z rozrastaniem się takiego przyrządu może znacząco zmaleć. Spowodowane jest to malejącą sztywności układu. Warto również zwrócić uwagę na to, że wraz ze zużyciem się takich modułów lub ich uszkodzeniu, problem ten narasta. Kolejnym ograniczeniem jest niewątpliwie ograniczenie ludzkie, a dokładniej, wymagane doświadczenie w projektowaniu oprzyrządowania modułowego. Ostatnim ograniczeniem jest koszt „wejścia” w standardowe moduły, które choć jednostkowo mogą być tanie w zakupie, to w perspektywie nabycia całego zestawu mogą niekiedy przewyższać możliwości finansowe danego przedsiębiorstwa [37].

### **2.1.2. Zmiennofazowe systemy mocowań**

Wykorzystanie indukowanej zmiany fazy ciała stałego, jest znane oraz powszechnie stosowane w przemyśle. Zasada działania polega na dostarczeniu źródła energii (np. pola magnetycznego, ciepła, rozproszonego ciśnienia, światła lub czynnika chemicznego) do elementu, który ze względu na swoje gabaryty, poziom skomplikowania lub cienkościenny charakter jest trudny do utrzymania za pomocą tradycyjnego przyrządu. Metodę tą można podzielić na dwie podgrupy: faktyczną zmianę fazy oraz pozorną zmianę fazy [38]. Schematycznie, zasadę działania zmiennofazowego systemu mocowania przedstawiono na rysunku 2.3.





Rys. 2.3. Schemat zasady działania zmiennofazowego systemu mocowania [39]

W metodzie opartej na faktycznej zmianie fazy, przedmiot zanurzony jest w substancji „uszczelniającej”, która początkowo znajduje się w stanie ciekłym. Po zanurzeniu i odpowiednim ustawieniu, substancja ta pod wpływem źródła energii zmienia swoją fazę na stan stały i utrzymuje obrabiany element w ustalonej orientacji i pozycji podczas całego procesu. Po zakończonym procesie, substancja wraca do stanu ciekłego, co umożliwia bezproblemowe wyciągnięcie obrobionego elementu. Większość uchwytów korzystających z tego typu rozwiązania wykorzystuje termicznie indukowaną zmianę stanu. Materiał ten musi spełniać wiele wymagań: brak jakiegokolwiek reakcji z obrabianym elementem, odpowiedni stopień skurczenia/rozszerzania podczas zmiany fazy, łatwość oczyszczania, energię potrzebną do zmiany fazy nie powodującą zmian w elemencie obrabianym oraz odpowiednia sztywność w stanie stałym.

Przemysł stara się wykorzystywać różne metody uchwytów opartych na zmianie fazy stosując przy tym: stopy bizmutu, woski termoplastyczne, smołę, wodę, lód czy kleje [40, 41, 42, 43, 44]. Wszystkie te metody mają swoje zalety, ale są także obarczone wadami. Przeciwdziałając temu, przedstawiona została innowacyjna technika o nazwie Reference Free Part Encapsulation (RFPE) umożliwiająca utrzymywanie oraz obrabianie wielu różnych kształtów elementów obrabianych. Odpowiednie ustawienie obrabianego elementu, zanurzonego w substancji, wymaga zastosowania specjalnych matryc lokalizacyjnych, co stanowi pewne ograniczenia w tej metodzie [45].

Uchwyty oparte na zmianie faz generują zdecydowanie niższą sztywność i wytrzymałość materiałów w porównaniu do tradycyjnych uchwytów. Efekt ten może jednak być kontrolowany i niwelowany, poprzez odpowiednie dobieranie materiałów oraz zwiększenie

powierzchni kontaktu z obrabianym elementem, minimalizując naprężenia powstające w materiale zmiennofazowym [46].

Ze względu na problemy z zanieczyszczeniami oraz żmudnym procesem oczyszczania popularność uchwytów opartych na zmiennych fazach nie zyskała jednak dużej popularności.

W odróżnieniu od metody opartej na autentycznej zmianie fazy, metoda pozornej zmiany fazy charakteryzuje się tym, że wykorzystuje stałe cząstki, które utrzymywane są w sypkiej zawieszynie podczas „fazy ciekłej”. W momencie aktywacji „fazy stałej” cząsteczki zostają do siebie przyciągnięte tworząc masę oddziałujących ze sobą ciał stałych cząsteczek uprzednio zawieszonych w zawieszynie. Metoda ta oferuje jednak mniejszą sztywność od poprzedniej, jednak zmiana fazy następuje znacznie szybciej [47].

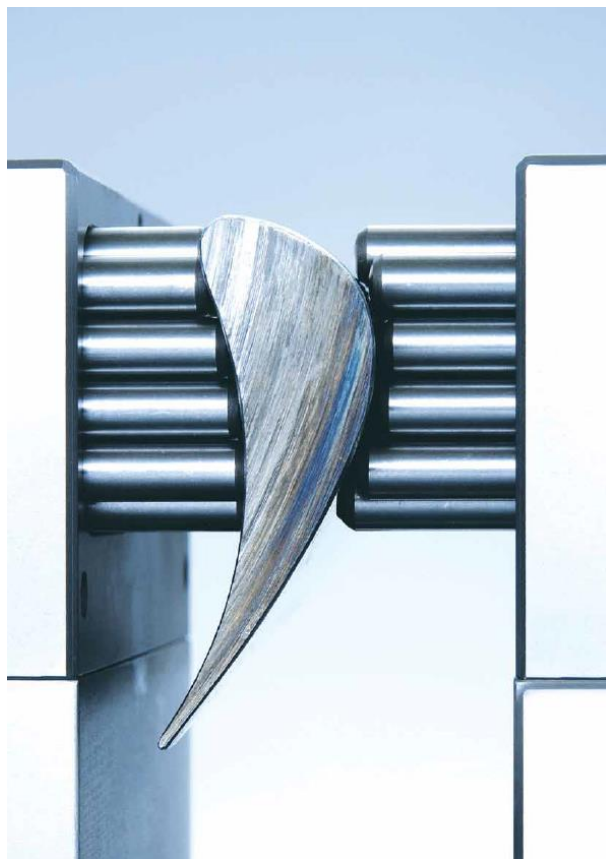
Chcąc usprawnić proces związany z temperaturą w systemach zmiennofazowych, naukowcy zaczęli badać różne podejścia. Znalazły się wśród nich: ciecze elektroteologiczne (ER – Electrorheological) oraz magnetoreologiczne (MR – magnetorheological), ale także nowatorskie rozwiązania jak żel elektroteologiczny (ERG – Electroheological Gel) oraz uchwyty oparte na złożu cząstek stałych (PFB – Particulate Fluidized Bed) [47, 48, 49, 50]. Pomimo zalet, takich jak elastyczne mocowanie cienkich elementów o złożonych kształtach, systemy te mogą powodować różne problemy. Systemy PFB w zależności od głębokości zanurzenia mogą stracić sztywność, natomiast systemy ER i MR charakteryzują się niską wytrzymałością w warunkach wysokiej temperatury. Odmienną koncepcją jest użycie granulowanego materiału w chwytakach robota. Wymagają one jednak pewnej uwagi ze względu na precyzję oraz wynikające ograniczenia, w zastosowaniach które wymagają wysokiej dokładności. Zupełnie innym podejściem był eksperyment wykorzystujący strukturę plastra miodu z wykorzystaniem proszku żelaza jako nowatorskie podejście mocowania struktur kompozytowych. Metodą tą udało się obniżyć błędy obróbcze o niemal 80%, jednak jest ona ograniczona w przypadku bardziej wymagających procesów obróbki [51].

Pomimo tego, że metody te mogą znaleźć zastosowanie jako systemy mocowań elementów cienkościennych o skomplikowanych kształtach to już operacje wymagające dużej precyzji oraz sztywności zamocowania mogą być dla tych metod ograniczeniem.

### **2.1.3. Uchwyty adaptacyjne**

Zdaniem A.Y.C. Nee oraz współautorów, uchwyty adaptacyjne to takie, które potrafią dostosować swoją formę do geometrii obiektu poddawanego obróbce [35]. Ze względu na możliwości dopasowania się uchwytu do obrabianej części zapewnia on dużo większe podparcie. Przekłada się to na zmniejszenie deformacji geometrycznej podczas obróbki oraz

zmniejszenie wewnętrznych naprężeń wewnątrz obrabianego elementu. Przykład takiego uchwytu przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Przykład uchwytu adaptacyjnego firmy Matrix [52]

Ciekawym rozwiązaniem uchwytów tego typu są uchwyty na zasadzie dopasowujących się pinów ułożonych w szeregu [53]. Uchwyty te z reguły składają się z podstawy oraz regulowanych kołków, które dopasowują się do konkretnej powierzchni. Dopasowanie to może nastąpić ręcznie lub automatycznie. Ich głównym zadaniem jest wsparcie obrabianej części, ale ich wykorzystanie jest możliwe także jako elementy ustawcze. Po dopasowaniu kołków do konkretnej powierzchni następuje ich zablokowanie w sposób mechaniczny, aktywowany ręcznie lub pneumatycznie. Analizując artykuł A. Al-Habaibeh'a i współautorów można wywnioskować, że uchwyt z układem pinów, charakteryzował się lepszą odpowiedzią dynamiczną niż dedykowany uchwyt przy niższych prędkościach obróbki, co zostało przedstawione na podstawie lepszej jakości powierzchni obrobionej (bazując na podstawie parametru chropowatości). Przewaga tego rozwiązania malała jednak wraz ze wzrostem prędkości obrabiania, gdzie to uchwyt dedykowany przewyższał rozwiązanie z pinami, charakteryzując się lepszą jakością obrabianej powierzchni [54].

W artykule autorstwa K. Youcef-Toumi'ego oraz J.H. Buitrago, wskazano stopy z pamięcią kształtu (SMA – Shape Memory Alloys) jako alternatywne uchwyty chwytaków robota [55]. W rozwiązaniu tym uchwyt składa się z układu kołków 4x4, w których każdy z nich posiada sprężynę, utrzymywanych w danej pozycji przez zestaw szczęk kontrolowany przy pomocy dźwigni, którą uruchamia aktuator zaciskowy bazujący na SMA (w przypadku tego artykułu jest to nadprzewodzący stop NiTi). Zastosowanie SMA zmniejsza złożoność oraz minimalizuje liczbę części ruchomych. Rozwiązanie to charakteryzuje się wysokim stosunkiem mocy do masy (co jest porządne w przypadku chwytaków) oraz szybkim czasem reakcji. Wadą takiego rozwiązania jest jednak sztywność kołków.

Uchwyty te podobnie jak uchwyty zmienno-fazowe, pozwalają na proste i szybkie zamocowanie elementów o skomplikowanej geometrii, minimalizując przy tym deformacje wynikające z miejscowego przykładania siły mocującej. Warto zwrócić uwagę na to, że przed wybraniem danego rozwiązania należy rozważyć wszelkie ograniczenia, w pozycjonowaniu oraz podtrzymaniu, jakie są z nimi powiązane.

#### **2.1.4. Uchwyty kontrolno-pomiarowe**

Sensory są obecnie nieodłącznym elementem produkcji automatycznej. Tyczy się to także chwytaków, które są częścią składową takiej produkcji. Pomimo tego, że wykorzystanie czujników w chwytakach stosowanych w produkcji zautomatyzowanej jest powszechne, ich zastosowanie jest dość podstawowe. Przykładami mogą być tu czujniki typu „tak/nie” lub czujniki, które są w stanie wykryć różne warianty, np. czy dany element został założony poprawnie.

Uchwyty kontrolno-pomiarowe wyposażone w różnego rodzaju sensory w pewnym sensie rewolucjonizują technologię systemów mocujących. Dzieje się to za sprawą możliwości integracji dowolnej liczby czujników bezpośrednio z chwytakami. Dane zbierane przez te sensory „otwierają” drzwi dla inteligentnych algorytmów sterowania, umożliwiając wykonywanie różnorodnych funkcji. Rozwiązanie to doskonale wpisuje się w myśl nurtu Przemysłu 4.0. Przykładem może być automatyczna rekonfiguracja systemu, mająca na celu zwiększenie elastyczności, dostosowanie chwytaku w odpowiedzi na zmienność komponentu lub procesu, a także dostarczanie użytkownikowi informacji zwrotnej [56].

Uchwyty tego typu można podzielić na dwa systemy: otwarty i zamknięty. Systemy otwarte pozwalają dostarczyć użytkownikowi istotnych danych sensorycznych, np. o sile skrawania. Umożliwiają także rekonfigurację w trybie offline, co w skrócie oznacza, że są one w stanie dostosować się do różnych geometrii jeszcze przed procesem obróbki [57, 58, 59].

Systemy zamknięte, wykorzystują wcześniej zarejestrowane dane sensoryczne do automatycznego dostosowania się w trakcie procesu obróbki, np. odpowiednio regulując siłę zacisku [60, 61, 62].

### **2.1.5. Uchwyty hybrydowe**

Jak sama nazwa wskazuje, hybrydowe systemy mocujące łączą zdolności sensoryczne uchwytów kontrolno-pomiarowych z mechaniczną zdolnością adaptacji systemów mocowań. Dzięki temu, uchwyty te mają większą zdolność do obsługi elementów o skomplikowanej geometrii oraz zmienności obrabianych elementów, poprawiając przy tym jakość obrobionej powierzchni poprzez adaptacyjne dostosowanie procesu wraz z informacją zwrotną.

Przykładami takiego rozwiązania mogą być te przedstawione w artykule autorstwa K. Ch. Chan'a i C.S. Lin'a oraz publikacji M. Ryll i współautorów [63, 64]. W artykułach opisywany jest kluczowy problem mechanizmu kinematyki równoległej (PKM - Parallel Kinematics Mechanism) oraz określenie optymalnych pozycji węzłów w celu minimalizacji odkształceń obrabianego elementu. W celu rozwiązania tego problemu, zaproponowane zostało podejście oparte na spełnieniu określonych warunków (CSP – Constraint Satisfaction Problem) [65]. Globalny algorytm optymalizujący, wykorzystujący zarówno algorytmy genetyczne jak i metodę elementów skończonych, determinuje pozycje wszystkich węzłów [66]. Z kolei R.M. Molfino, M. Zoppi oraz D. Zlatanov, opisują elastyczny i adaptacyjny system mocowania wykorzystujący wiele współpracujących ze sobą robotów. Przedstawili oni projekt, implementację oraz wyniki testów dla tego systemu, pokazując jego skuteczność. Autorzy podkreślają możliwość zastosowania rozwiązania w różnych procesach produkcyjnych oraz sugerują dalsze kierunki badań [67].

Choć mogłoby się wydawać, że jest to rozwiązanie optymalne, wiąże się ono z wysokimi kosztami początkowymi, wynikającymi m. in. z zakupu specjalistycznego sprzętu. Zdaniem D. Golightly'ego i współautorów, mimo tych trudności podejście hybrydowe stanie się kluczowe w inteligentnym środowisku produkcyjnym, co będzie ściśle związane z postępem nurtu Przemysłu 4.0 [68].

## **2.2. Dokładność przyrządów**

Zgodnie z literaturą przedmiotu przyrządy spawalnicze, są jednymi z przykładów przyrządów do procesów specjalnych. Podstawowym zadaniem przyrządów spawalniczych jest odebranie tylu stopni swobody, aby dało się pospawać ze sobą co najmniej 2 elementy w wymaganym przez technologię położeniu oraz wymaganą dokładnością. Należy jednak

pamiętać o nieprzestalaniu układu [69]. Pozwoli to na odpowiednie wykonanie danego elementu [70]. Jako że spawanie jest to proces łączenia minimum 2 elementów, czasami niezbędne jest stosowanie wsporników/podpór, które ustalają w odpowiednim położeniu jedną z części składowej danego zespołu. Kolejnym ważnym elementem oprzyrządowania spawalniczego w niektórych przyrządach jest układ szczęk rozprężnych. Pozwala on na centrowanie konkretnego detalu względem przyrządu oraz na zachowaniu współosiowości łączonych ze sobą elementów. Dodatkowo, w przypadku elementów wykonanych z blachy, pozwala zachować dane wymagania kształtowo-wymiarowe, a także zapobiec deformacjom blachy oraz jej skurczom podczas procesu spawania. Podstawowym elementem przyrządu pozwalającym odebrać większość stopni swobody jest baza technologiczna oparta na płaszczyźnie oraz średnicy. Takie rozwiązanie wystarczy w niektórych procesach na poprawne wykonanie spawania. Natomiast najczęściej pojawia się jeszcze jeden wymóg, aby zorientować 2 elementy kątowo względem siebie. W obu przypadkach nieodłącznym elementem do poprawnego zablokowania tych elementów jest wykorzystanie zewnętrznych dociskaczy oraz mocowań ustawiających [21, 22].

Poza tymi podstawowymi zadaniami, przyrządy spawalnicze muszą charakteryzować się jeszcze jedną bardzo ważną właściwością. Elementy znajdujące się w pobliżu strefy wpływu ciepła powstającej w wyniku spawania muszą być w stanie „odebrać” ciepło od elementów spawanych na tyle szybko i skutecznie, aby zapobiec niepożądanym deformacjom czy przemieszczeniom. Jest to możliwe dzięki odpowiedniej konstrukcji oraz zastosowaniu odpowiednich materiałów.

Analizując powyższe informacje można więc dojść do wniosku, że im przyrząd masywniejszy (im więcej materiału) tym lepiej dla dokładności oraz samego procesu. Nic bardziej mylnego. Przyrząd musi być dopasowany do odpowiednich warunków procesu. Jeżeli nie ma potrzeby konstruowania przyrządu wielkogabarytowego powinien być on dostosowany do transportu ręcznego przez operatorów (nie więcej niż dwóch naraz) [71]. Przyrząd, który nie może spełnić warunków podanych w instrukcji, powinien mieć możliwość transportu przez suwnicę lub inny urządzenie. Widząc także dynamiczny rozwój przedsiębiorstw odnoszący się do koncepcji Przemysłu 4.0 coraz więcej linii produkcyjnych stawia na robotyzację procesów, która także wkracza w procesy spawalnicze [32, 72, 73]. Zastosowanie robotów przemysłowych w przedsiębiorstwach pozwala odciążyć pracownika od pracy w szkodliwych warunkach lub nieergonomicznych pozycjach przez dłuższy czas [74, 75]. Z tego względu przyrządy spawalnicze także muszą być rozwijane i muszą zapewnić integrację pomiędzy

środowiskiem robot-przyrząd oraz przyrząd-operator. Ważne jest również zwrócenie uwagi na [76]:

- dopasowanie do przestrzeni roboczej robota,
- maksymalne dopuszczalne obciążenie,
- rygorystyczne wymagania kształtowo-wymiarowe stawiane przez technologów procesu.

Każdy przyrząd musi zapewnić odzwierciedlenie wymiarów stawianych w technologii, dlatego wszystkie procesy technologiczne posiadają określone zakresy tolerancji, które są dopuszczalne do wykonania danego elementu. Jednak, aby tolerancja wymagana przez technologa procesu była możliwa do spełnienia, oprzyrządowanie musi charakteryzować się jeszcze większymi rygorami wykonania niż wymaga tego proces obrabianej części. Z reguły jest to dziesięciokrotność dokładności wymaganej w procesie. Często jest to parametr wystarczający i nie wymaga większego zawężania tolerancji. Należy jednak pamiętać, że przyrząd składa się z wielu elementów, które wykonywane są z tzw. tolerancją warsztatową (wymiary nietolerowane). Tolerancja ta może być określona indywidualnie normą zakładową przez dane przedsiębiorstwo, jednak jest ona narzucona również poprzez międzynarodowe standardy zarządzania jakością i opisana normą: DIN ISO 2768 [77]. Ścisłe tolerowanie wszystkich wymiarów mogłoby nie przynieść pożądaných rezultatów, a dodatkowo niepotrzebnie zwiększyłoby wykonanie poszczególnych składowych oprzyrządowania, a co za tym idzie całego przyrządu, którego cena może wynosić nawet 10-20% kwoty całego procesu [78]. Z tego względu najczęściej wymiary krytyczne, wymagane w technologii, wykonuje się i utrzymuje na końcu procesu po montażu przyrządu. Dodatkowo w celu zmniejszenia kosztów stosuje się, o ile to możliwe, elementy standardowe (znormalizowane) oraz rozwiązania dostępne przez różnych producentów. Zacieśnianie tolerancji nie zawsze jest najodpowiedniejszym krokiem w celu wykonania dokładnego przyrządu. Należy pamiętać, iż generowane podczas spawania ciepło może na tyle zdeformować spawane elementy, że przy zbyt rygorystycznym tolerowaniu wymiarów bez zastosowania odpowiednich luzów, łączone ze sobą elementy zacisną się i utrudnią demontaż po wykonaniu procesu.

### **2.3. Materiały konstrukcyjne**

Dobór odpowiedniego materiału jest niewątpliwie bardzo ważnym aspektem podczas projektowania przyrządów. Ma to przełożenie nie tylko na samą wytrzymałość przyrządu czy jego trwałość, ale także na sztywność, a w związku z tym możliwość uzyskania i utrzymania wymaganych warunków i wymiarów krytycznych oraz powtarzalność [79].

Dobierane materiały mogą się różnić w zależności od rodzaju i przeznaczenia oprzyrządowania, jednak do podstawowych materiałów wykorzystywanych podczas ich konstrukcji należą: stopy aluminium, stal, stal nierdzewna oraz miedź [80].

Stopy aluminium znajdują zastosowanie w konstrukcji ze względu na swoje właściwości mechaniczne w stosunku do masy. Stosuje się je najczęściej na duże płyty stanowiące podstawę lub elementy nie przenoszące dużych i kluczowych obciążeń oraz takie, których wymiary nie są bardzo istotne dla technologii. Wśród tych stopów wyróżnia się 8 serii, gdzie każda charakteryzuje się różnym składem chemicznym, a co za tym idzie różnymi właściwościami oraz przeznaczeniem [81]. W konstrukcji przyrządów najczęściej stosuje się potocznie nazywane „durale” czyli serię 2000, ale także serię 6000 i 7000. Dodatkowo stopy te można poddać procesowi anodowania twardego, który zwiększa właściwości, takie jak odporność na ścieranie, wzrost odporności na korozję czy powierzchniowe zwiększenie twardości [82].

Elementy poddawane obciążeniom oraz odpowiedzialne za utrzymanie istotnych wymiarów z punktu widzenia technologii procesu, wykonywane są ze stali lub też ze stali nierdzewnej. Wykonuje się z nich najczęściej pierścienie bazowe, kołki ustalające lub pozycjonujące. Podstawową zaletą stosowania stali jest jej wytrzymałość zarówno mechaniczna jak i termiczna, co ma też znaczenie w przypadku wykonywania przyrządów spawalniczych. Dobór stali nierdzewnej jest istotny nie tylko w przypadku przyrządów narażonych na działanie szkodliwych czynników zewnętrznych, ale także przy wykonywaniu konstrukcji przyrządów używanych w niektórych procesach spawalniczych [83].

Jak już wcześniej wspomniano, bardzo ważnym wymogiem dla przyrządów spawalniczych jest odebranie ciepła od elementów spawanych. W związku z tym w najbliższej okolicy strefy spawania stosuje się miedź, ponieważ w porównaniu do poprzednich materiałów najlepiej przejmuje i rozprowadza ciepło. Miedź wykazuje także jeszcze jeden ważny aspekt podczas spawania, mianowicie nie przywiera do elementów spawanych. W przypadku konstrukcji przyrządu z zastosowaniem szczęk rozprężnych, ze względu na koszt miedzi i ciężar, najczęściej nie wykonuje się z tego materiału całych segmentów szczęk, a tylko wkładki odpowiednich rozmiarów. Takie rozwiązanie zapewnia poprawne wykonanie procesu, a dodatkowo pozytywnie wpływa na koszt przyrządu oraz jego masę. Zaletą miedzi jest także dobra odporność na korozję oraz na ścieranie, a także fakt, że najczęściej charakteryzuje się ona mniejszą twardością od stali i nie pozostawia śladów na elementach spawanych.



## 2.4. Druk 3D w oprzyrządowaniu

Druk 3D nieustannie rozwijany jest od 1983, kiedy to miało miejsce wyprodukowanie pierwszej części metodą przyrostową przez Charlesa Hull'a [84]. Od tego czasu powstało wiele rozwiązań oraz metod wykorzystujących warstwowe nakładanie materiału. Wraz z rozwojem tej technologii wytwarzania, powstawały coraz to nowsze materiały dedykowane dla określonej metody druku, które mogą być dostosowane do wymagań danego projektu [28, 85]. W związku z tym metody szybkiego prototypowania przestały być stosowane jedynie na etapie projektowo-konstrukcyjnym. Obecnie służą one również do wytwarzania pełnowartościowych wyrobów gotowych (rapid manufacturing) oraz narzędzi (rapid tooling) [86].

Współcześnie wiele procesów i założeń w dziedzinie wytwarzania przyrostowego zostało uregulowanych poprzez normy. Jedną z kluczowych norm dotyczących technologii AM jest ISO/ASTM DIS 52900: Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia. Norma ta odnosi się do podstawowych pojęć i terminologii. Możemy w niej znaleźć podział na siedem głównych procesów wytwarzania przyrostowego, takich jak [87]:

- spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJT – Binder Jetting), proces, który polega na łączeniu sproszkowanego materiału poprzez nanoszenie płynnego spoiwa (kleju) z głowicy drukującej na warstwowy przekrój modelu,
- ukierunkowane stapianie dostarczonego materiału (DED – Direct Energy Deposition), proces, w którym skoncentrowana energia stapia warstwowo materiał podczas jego osadzania, z użyciem wiązki lasera, elektronów lub łuku plazmowego,
- wytłaczanie warstwowe materiału (MEX – Material Extrusion), proces, w którym materiał termoplastyczny jest wytłaczany do postaci włókna i układany warstwowo według wcześniej zaprogramowanej ścieżki numerycznej,
- warstwowy nadruk płynnego materiału (MJT – Material Jetting Additive), proces, gdzie płynny materiał jest namoczony w warstwach, a zmiana jego stanu skupienia z płynnego na stały następuje poprzez zastygnięcie lub fotopolimeryzację,
- selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF – Powder Bed Fusion), proces wykorzystujący energię cieplną do selektywnego stapiania warstw w objętości złoza proszkowego,
- laminacja warstwowa przekrojów (SHL – Sheet Lamination), proces obejmujący wycinanie kolejnych przekrojów modelu z arkuszy materiału, które są kolejno przyklejane do siebie,

- fotopolimeryzacja objętościowa (VPP – VAT Photopolymeryzation), proces polegający na tworzeniu warstw poprzez fotopolimeryzację w określonej objętości, z użyciem skoncentrowanej wiązki światła ultrafioletowego.

Wykorzystanie w druku 3D w oprzyrządowaniu przynosi wiele zalet. Jest to powiązane zarówno z mniejszymi stratami materiału powstałego podczas obróbki konwencjonalnymi metodami, ale także z szybszym czasem wykonania na gotowo konkretnego elementu. Kolejnym pozytywnym aspektem zastosowania tych technik jest możliwość wykonania skomplikowanej struktury elementów, zarówno tej zewnętrznej, która tworzy całościowy kształt, jak i tej wewnętrznej która jest czasami niemożliwa do wykonania w standardowy sposób. Technologie druku 3D są również stosowane w sytuacji, gdy wykonanie takiej struktury wewnętrznej metodami konwencjonalnymi nie przynosi wymaganych rezultatów (konieczność łączenia dwóch elementów). Taka struktura może stanowić nie tylko aspekt wizualny, ale przede wszystkim funkcjonalny, który powiązany jest z wytworzeniem elementu ergonomicznego. Niesie to także za sobą jeszcze jedną korzyść, mianowicie redukcję masy komponentu przy zachowaniu wymaganej wytrzymałości (sztywności) [29, 88, 89].

Rozwój materiałów w technologii druku 3D sprawił, że obecnie na rynku jest ogromne spektrum możliwości, które można wykorzystać. Zaczynając od tworzyw sztucznych, przechodząc przez metale, kompozyty oraz ceramikę, na materiałach biogodnych kończąc [90, 91]. W konstrukcji oprzyrządowania bardzo ważną rolę odgrywają tworzywa sztuczne oraz wszelkiego rodzaju metale.

W literaturze przedmiotu można doszukać się szeregu publikacji, gdzie druk 3D używany jest jako uzupełnienie lub alternatywa dla tradycyjnych metod produkcji oprzyrządowania spawalniczego, w zależności od wymagań i konkretnego zastosowania.

W swoich badaniach I. Knezevic i in. stwierdzili, że druk 3D oferuje wiele zalet w produkcji przyrządów spawalniczych do których należy zaliczyć: szybkość oraz łatwość wytworzenia przyrządów o dowolnym kształcie i rozmiarze, możliwość dostosowania oprawek spawalniczych do różnych elementów i późniejszych zmian w projekcie, zmniejszenie kosztów i zużycia, poprawa jakości i efektywności spawania. Autorzy jednak zwrócili uwagę na pewne ograniczenia i wyzwania w produkcji takich przyrządów, do których należy zaliczyć konieczność zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości, odporności na ciepło, dokładności oraz powtarzalności [92].

Praca autorstwa A. Gemerosa i in. skoncentrowana była głównie na wytwarzaniu przyrostowym w odniesieniu do oprzyrządowania, zwracając uwagę na ogólny brak zainteresowania zastosowaniem technologii przyrostowych w przyrządach i urządzeniach [21].

Niemniej jednak, w kluczowych źródłach wymieniono druk 3D jako technologie umożliwiającą tworzenie skomplikowanych geometrycznie osprzętów [93]. Firmy, takie jak Formlabs [94], Stratasys [95, 96] oraz Markforged [97], a także przedsiębiorstwa jak BMW (rys. 2.5) czy Mahle [98] już wykorzystują metody przyrostowe w przemyśle.



Rys. 2.5 Oprzyrządowanie wykorzystywane w firmie BMW do poprawnego umiejscowienia tylnej plakietki z oznaczeniem modelu [99].

G. Bergweiler i in. zastosowali druk 3D do stworzenia elementów przyrządów spawalniczych, prezentując możliwości powtarzalnego wytwarzania elementów nadwozi samochodowych z zachowaniem odpowiedniej tolerancji. Choć użytym materiałem był kwas polilaktydowy (PLA), który ma mniejszą sztywność od stali, wymusiło to zwiększenie grubości ścianek elementów. Pomimo tego autorzy odnotowali znaczną redukcję kosztów, sięgającą 30-50%, dla całego oprzyrządowania. Jednocześnie, poprzez zoptymalizowany i przyspieszony proces, redukcji uległy także nakłady związane z logistyką, a osprzęt został dostosowany do efektywnego przepływu sił [100]. Przeprowadzając wspólne prace z firmą Ford dotyczące wytwarzania oprzyrządowania metodami przyrostowymi wykorzystując proces FFF/FDM, G. Bergweiler i in. podkreślają, że przy redukcji kosztów produkcji o 55%, możliwe byłoby wytworzenie 30 zespołów spawanych z tolerancją  $\pm 1,5\text{mm}$ . Jako istotną cechę procesu uwzględniono potencjał dokonywania późniejszych, ekonomicznych modyfikacji produkcyjnych podczas rozwoju produktu, a także zużycie komponentów pod wpływem podwyższonej temperatury w procesie spawania [101].

Autorzy R. Forstmann i in. stworzyli metodologię wykorzystującą połączenie wytłaczanych profili aluminiowych z przyrostowo wytwarzanymi węzłami i elementami nośnymi [102].

W swoich badaniach A. Kampker i in. zaprezentowali podejście wyboru odpowiednich komponentów dla wytwarzania przyrostowego we wstępnych fazach oprzyrządowania, łącząc je z modułowymi elementami w celu tworzenia hybrydowych przyrządów spawalniczych [103]. Badanie to zostało także poddane analizie przez G. Schuha oraz innych współautorów [104]. Autorzy wzięli także pod uwagę specjalne dedykowane elementy mocować, które zostały zoptymalizowane pod kątem struktury oraz wykorzystując proces LPBF. Proces ten, oparty na metalu, skutkował redukcją masy o 51%, objętości o 52% oraz zmniejszeniem naprężeń o 14-78%. Jednakże, był on jednocześnie droższy od konwencjonalnego odpowiednika o 58%. Wskazano natomiast na możliwość wykorzystania chwytaków do robotów jako potencjalnego zastosowania, gdyż zmniejszenie wagi umożliwi osiągnięcie większych prędkości operacji oraz skrócenie cykli pracy [105].

Autorzy K. Lichtenthaeler i in. opracowali narzędzie do automatycznego projektowania przyrządów spawalniczych stosowanych w produkcji nadwozi samochodowych [106]. Narzędzie to ma na celu zwiększenie efektywności poprzez skrócenie czasu projektowania, redukcję błędów oraz optymalizację wykorzystania materiałów.

Wyniki kolejnych prac K. Lichtenthaler'a obejmują oszczędność zasobów, obniżenie kosztów produkcji nawet o 65%, a także zmniejszenie zużycia energii oraz emisji dwutlenku węgla. W tych pracach przedstawiono także zalecenia projektowe dotyczące oprzyrządowania wytwarzanego metodami przyrostowymi. Dodatkowo, stwierdzono, że procesy wykorzystujące metale mogą być kluczowe w przyszłych zastosowaniach przemysłowych oraz procesach automatyzacji [107].

Za pomocą technologii wytwarzania przyrostowego, M. Hillebricht i jego zespół dokonali bezpośredniego łączenia elementów oprzyrządowania z komponentami, które produkowali [108].

Technologie wytwarzania przyrostowego pozwalają na tworzenie systemów chwytających jako elementy jednoczęściowe dla robotyki [109]. Proces ten eliminuje potrzebę stosowania łączników [110], co umożliwia bezpośrednie połączenie i drukowanie zespołów jako całość, gdy jest to konieczne. Firma BMW stosuje technologie przyrostowe do produkcji zarówno małych jak i dużych partii, rocznie wytwarzając około 200 000 takich elementów. Należą do nich np. wirniki do pomp wodnych dla samochodów sportowych, indywidualne części do modeli Mini i uchwyty oraz prowadnice szyb w samochodzie BMW i8 Roadster [111]. Firma

Vasco zajmuje się kontrolą i testowaniem części wyprodukowanych w technologii 3D dla branży motoryzacyjnej [112]. W fabryce BMW w Landshu, elementy z polimerów wzmocnionych włóknem węglowym [113] są produkowane przez roboty przemysłowe, które mają efektory z chwytaków, wytworzonych za pomocą metod przyrostowych. Trzeba jednak zaznaczyć, że ciągle prowadzone są badania nad przyrządami wykonanymi za pomocą technologii przyrostowych [114, 115, 116, 117], nad wykorzystaniem urządzeń pomiarowych [118] oraz nad oceną żywotności elementów produkowanych w tej technologii [119].

W tym miejscu należy podkreślić, że często nie ma jasnej granicy dla wykorzystania druku 3D w konstrukcji oprzyrządowania. W szczególności możliwe są również kombinacje różnych podejść. Tytułem przykładu mogą być badania zaprezentowane przez K. Lichtenthaler'a, który wraz ze współautorami zaprezentował automatycznie zaprojektowany, wytwarzany metodą przyrostową, uchwyt spawalniczy, w którym użyto elementów modułowego systemu łączenia [106]. Rozwiązanie to łączy w sobie 2 podejścia: optymalizację strukturalną, polegającą na poprawie wytrzymałości konstrukcji przy minimalnym zużyciu materiałów oraz optymalizację procesową, koncentrującą się na usprawnieniu etapów produkcji, co prowadzi do redukcji kosztów i skrócenia czasu wytwarzania.

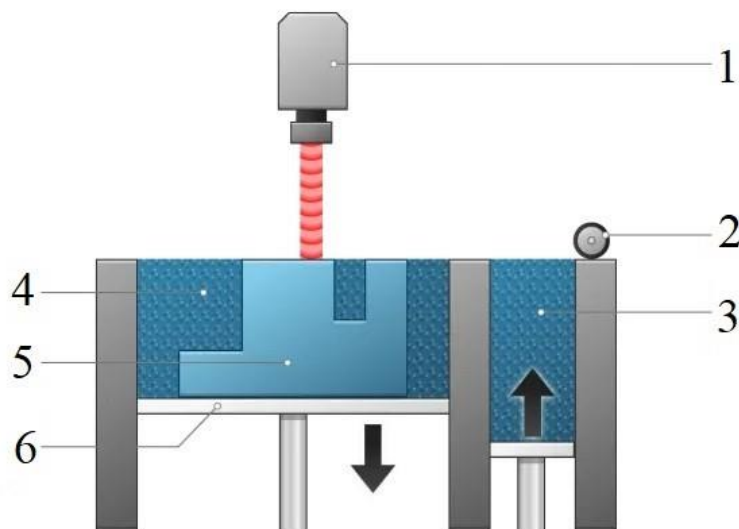
#### **2.4.1. Technologie druku 3D z metalu w oprzyrządowaniu**

Najczęściej wybieranymi materiałami w konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego są: stopy aluminium, stале, a także miedź i jej stopy. Nieustannie rozwijające się techniki przyrostowe dają możliwość wykorzystania proszkowych odpowiedników powyższych metali. Narzędzia wykonane za pomocą druku 3D mogą posiadać tę samą wytrzymałość, sztywność oraz odporność chemiczną co ich standardowe odpowiedniki [120, 121]. Ponadto zastosowanie rapid tooling pozwala dodatkowo minimalizować straty powstające w procesach obróbki konwencjonalnej oraz zwiększając ergonomię pojedynczego elementu, zwiększyć ją tym samym w całym przyrządzie.

W technologiach przyrostowych istnieje kilka metod, bazujących na materiałach metalowych, które z powodzeniem można wykorzystać do produkcji elementów oprzyrządowania spawalniczego.

Techniki PBF (Powder Bed Fusion) (rys. 2.6) opierające się na warstwowym spajaniu proszku, to jedne z najpopularniejszych metod wytwarzania przyrostowego metalowych elementów. Proces ten wykorzystuje złożę proszkowe oraz specjalny zasobnik, z którego uzupełniany jest proszek. Przed spajaniem kolejnych warstw, powierzchnia złoża jest równana przez specjalny zgarniacz. Spajanie kolejnych warstw odbywa się poprzez precyzyjnie

sterowaną wiązkę lasera za pomocą układu optycznego [122]. Nowoczesne maszyny PBF mogą być wyposażone w więcej niż jeden laser, co przekłada się na przyspieszenie procesu spiekania. Kluczową cechą tego procesu jest selektywne spiekanie obszarów pod wpływem energii lasera, co pozwala na precyzyjne kształtowanie obszarów w oparciu o model cyfrowy. Ważnym krokiem w procesach PBF jest dodanie podpór w krytycznych punktach konstrukcji. Podpory te mają dwie kluczowe role [123, 124]. Z racji, że w technikach PBF materiał nie jest samopodporowy (w odróżnieniu od metody SLS), elementy te służą jako wsporniki dla konstrukcji podtrzymując newralgiczne miejsca, takie jak nawisy czy mosty. Drugą ważną rolę podpór, jest poprawa odbioru ciepła z gotowego modelu podczas spiekania, co przekłada się na minimalizację deformacji. Po zakończonym procesie, należy usunąć podpory, a sam model oczyścić z niespieczonego proszku. Niespieczony proszek nadaje się do ponownego wykorzystania. W zależności od rodzaju metalu możliwe są różne obróbki końcowe, takie jak obróbka wibracyjna, cieplna czy obróbka powierzchniowa. Elementy wykonane w tej technologii posiadają wszystkie cechy fizyczne charakterystyczne dla danego materiału co ich konwencjonalne odpowiedniki, spełniając jednocześnie wszelkie oczekiwania co do funkcjonalności konstrukcji [125].



Rys. 2.6. Schemat metody PBF: (1) laser, (2) zgarniacz, (3) zasobnik proszku, (4) komora robocza, (5) prototyp, (6) platforma robocza [126]

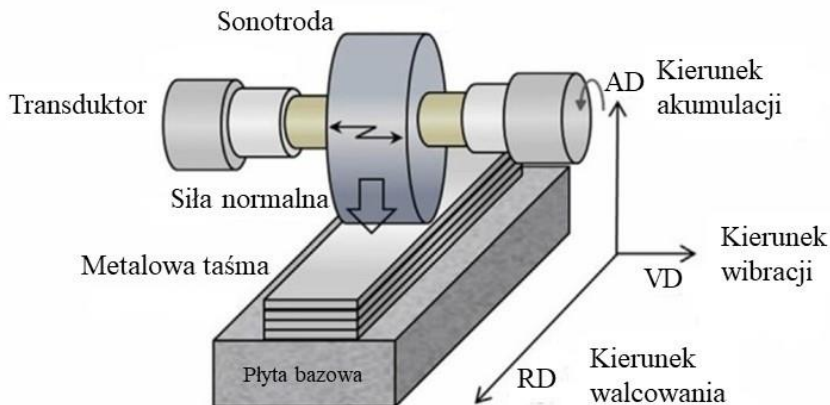
Metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering), została opatentowana ponad 20 lat temu. Ta technika służy do produkcji zarówno wyrobów seryjnych jak i prototypów. Proces DMLS jest obecnie wiodącym pod względem jakości i możliwości w obszarze druku 3D z metalu [127]. Jego główną cechą, odróżniającą go od innych, jest użycie ceramicznego ostrza zgarniającego

(recoatera). Ostrze to pomaga w eliminowaniu nawet najdrobniejszych nierówności na powierzchni złoza i co istotnie zmniejsza porowatość struktury. Źródłem wysoko skoncentrowanej energii jest wiązka laserowa, która topi kolejne fragmenty drukowanego modelu, prowadząc do ich zestalenia. Cały proces odbywa się w komorze procesowej, zazwyczaj wypełnionej gazem, często azotem. Gaz ten jest w ciągłym obiegu eliminując ewentualnie powstające frakcje odprysków. Energia pochodzi z lasera włóknowego pompowanego diodami, a stosowane źródła laserowe mają moc od 50 W do 2 kW. Wieloźródłowe konstrukcje z kilkoma rezonatorami laserowymi znacznie skracają czas obróbki. Wiązka jest odchylana zgodnie z algorytmem zawartym w kodzie źródłowym za pomocą mikro zwierciadeł umieszczonych na osiach galwanometrów, co umożliwia osiągnięcie satysfakcjonujących prędkości wiązki. W celu uzyskania jednolitej mocy plamki lasera w każdym położeniu platformy roboczej, układ prowadzenia wyposażony jest w soczewkę skupiającą i moduł kalibrujący moc. To rozwiązanie pozwala na drukowanie skomplikowanych, często delikatnych struktur [128, 129].

W procesach przyrostowych, gdzie proszek stanowi bazowy materiał podawany bezpośrednio do obszaru roboczego maszyny, istnieje szereg różnych metod. Jedną z nich jest, oparta na złożu proszkowym, technologia wykorzystująca wiązkę elektronów, znana jako EBM (Electron Beam Melting) [130]. To właśnie energia elektronów pełni kluczową rolę jako czynnik oddziaływania w tym procesie przemysłowym. W procesie EBM, wiązka elektronów generowana przez działko elektronowe oddziałuje na metalowy proszek w środowisku wysokiej próżni, powodując jego stopienie. Sterowanie odchyleniem wiązki elektronów odbywa się przy pomocy układów odchylania opartych na elektromagnesach. Warstwy proszku nanoszone są po obniżeniu platformy roboczej, co pozwala na powstawanie warstwowego obiektu. Niewykorzystany proszek może być ponownie użyty, co jest jedną z zalet tej metody. Metoda ta opierając się na zaawansowanej kontroli wiązki elektronów, rozwija się, dając różnorodne warianty. Jednak największym sukcesem jest opracowanie metody dystrybucji proszku, wykorzystując systemy dozowania i rozprowadzania kolejnych warstw proszku metalu [131].

Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) to kolejna technika przyrostowa, która polega na łączeniu warstw metalu za pomocą ultradźwięków i odpowiedniego nacisku (rys. 2.7). Proces ten nie powoduje przemiany fazowej, ponieważ materiał nie ulega stopieniu. Metalowe paski folii są łączone przez nacisk i ultradźwięki, tworząc warstwową strukturę, którą można później kształtować w konwencjonalnych procesach obróbki. Metoda ta cechuje się wysoką precyzją i umożliwia tworzenie struktur z różnych materiałów [132]. UAM pozwala na swobodne zmiany materiałów w trakcie procesu, eliminując ryzyko uszkodzenia produktu

i konieczność rozpoczynania produkcji od nowa. Dodatkowo, wprowadzenie dodatkowych składników podczas budowy pozwala na tworzenie "inteligentnych struktur" z właściwościami zmieniającymi się w zależności od lokalnych potrzeb, jak opór elektryczny czy przewodnictwo światła. [133].



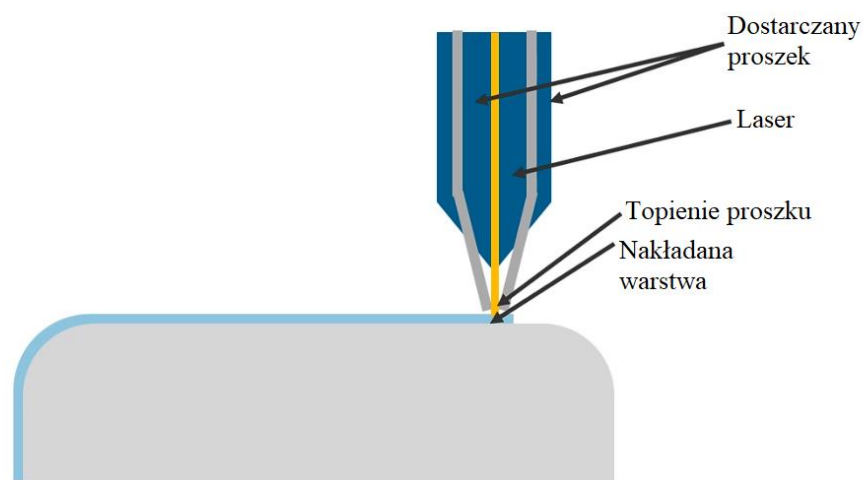
Rys. 2.7. Schemat działania techniki UAM [134]

Dwie bliźniacze metody, TKF (Titanic Kinetic Fusion) oraz SPEED3D, oparte są na tej samej zasadzie, jednak zostały opatentowane przez różne ośrodki. Obie te metody znane są jako „natryskiwanie na zimno” (cold spray) [135]. W odróżnieniu od innych metod, opartych na laserach czy innych źródłach ciepła, wykorzystują one energię kinetyczną. Proszek metalowy jest wystrzelony z dużą prędkością za pomocą sprężonego powietrza, co nadaje materiałowi wystarczającą energię do połączenia się z częściami stałymi, formując dodatkowe warstwy. Ruchome ramie, na którym umieszczona jest platforma robocza, eliminuje potrzebę stosowania dodatkowych struktur podpierających. Wyjątkową cechą tych metod jest brak konieczności stosowania próżni lub gazów osłonowych. Warunkami pracy procesu są warunki otoczenia, a sami producenci zapewniają, że nie ma to wpływu na właściwości końcowe wytwarzanych komponentów. Metody te najczęściej wykorzystywane są do napraw [136].

Ewolucja wykorzystania energii laserowej to kolejny dowód na potencjał technologii przyrostowych. Wzmocnienie światła poprzez wywołaną emisję promieniowania, czyli Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – to znaczenie skrótu „LASER”. Źródła laserowe charakteryzują się potężnym potencjałem energetycznym, mniej skomplikowaną reakcją na warunki otoczenia, szybkim przełączeniem między trybami oraz błyskawicznym rozprowadzaniem energii. Generują one spójną precyzyjną wiązkę promieniowania o idealnym skupieniu. To właśnie te cechy sprawiły, że lasery stały się pionierem w technologii druku 3D [137].



Laser Consolidation (LC), Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS) należą do grupy Laser Powder Forming (LPF). Opierają się one na topieniu powierzchni docelowej za pomocą intensywnego lasera oraz jednoczesnym dostarczaniu proszku metalu za pomocą strumienia gazu osłonowego lub procesowego (rys. 2.8). Podejście to pozwala na naprawę uszkodzeń oraz tworzenie struktur od podstaw. Osiągane konstrukcje wykazują solidne właściwości mechaniczne. Przestrzeń robocza w tych technologiach nie jest wypełniana w całości, co umożliwia tworzenie większych geometrii. Niestety, ogranicza to możliwość wykorzystania wykonania bardziej delikatnych i precyzyjnych struktur [138, 139, 140, 141].



Rys. 2.8. Schemat metody LPF [142]

Ion Fusion Formation (IFF), opisana przez Robbi'ego Adamsa [143] to nowatorska metoda wytwarzania przyrostowego opracowana przez Honeywell Aerospace. Proces ten polega na użyciu bardzo gorącego zjonizowanego gazu do osadzania metalu w małych, precyzyjnych ilościach, co umożliwia stopniowe budowanie kompletnej części o wysokiej precyzji i minimalnej potrzebie obróbki końcowej. IFF jest metodą bardziej ekonomiczną od innych metod, ponieważ wykorzystuje energię elektryczną zamiast drogich laserów czy wiązki elektronów. Metoda ta jest szczególnie przydatna w produkcji nowych komponentów oraz naprawie starszych, trudnodostępnych części, co czyni ją efektywną kosztowo oraz wszechstronną.

Z kolei DPM, czyli Digital Part Materialization, stanowi interesujące rozwiązanie oparte na patencie MIT, zaprojektowanym do masowej produkcji metalowych wyrobów i narzędzi. Firma ExOne wykorzystuje tę technologię pod nazwą PROMETAL jako wyłączny właściciel. Proces ten polega na nanoszeniu warstw proszku, a następnie przy pomocy specjalnej głowicy,

aplikowany jest materiał wiążący. Głowica ta swoją budową przypomina domowe drukarki atramentowe. Warstwy, aktywowane tym materiałem, budują strukturę przestrzenną. Otrzymany wydruk trafia do suszarki, gdzie jest wygrzewane lepiszcze, a następnie komora robocza jest oczyszczana z nieużytego proszku. W kolejnym kroku proszek zostaje zespolony w wysokiej temperaturze z dodatkową infiltracją ciekłego metalu. Elementy wytworzone w tym procesie mogą ulegać skurczowi przetwórczemu. Dzięki odpowiedniej organizacji procesu, wiele wsadów może być ładowanych jednocześnie do pieca wygrzewającego bez wpływu na ich właściwości, co istotnie skraca czas całego procesu [144].

W kontekście procesów addytywnych, wykorzystanie sproszkowanego metalu jako materiału bazowego nie zawsze wymaga bezpośredniej interakcji z samym proszkiem metalicznym. Przykładem może być technologia Material Extrusion (MEX), która oparta jest na zastosowaniu filamentów zawierających osnowę z proszków metalicznych, co stanowi kolejny przykład wykorzystania tych materiałów w druku 3D. Technika ta nie różni się znacząco od tradycyjnych metod FFF/FDM, gdzie ekstrudowane są materiały termoplastyczne. Jednakże, w przypadku MEX, stosowane są filamenty z metalicznymi proszkami, co umożliwia precyzyjne formowanie trójwymiarowych struktur zgodnie z cyfrowym modelem. Ostateczna struktura wykazuje podobne cechy do modeli uzyskanych przy wykorzystaniu standardowej metody MEX. Dodatkowy etap obróbki termicznej pozwala na separację struktury od nośnika, jakim jest tworzywo polimerowe. Technika ta obarczona jest skurczem występującym podczas tej operacji, jednak powstała struktura posiada właściwości charakterystyczne dla wykorzystanego w osnowie metalu [145, 146].

Technologia o nazwie „Atomic Diffusion Additive Manufacturing” (ADAM) została opatentowana przez firmę Markforged. Proszki metali są zamknięte w osnowie polimerowej, co nadaje im stałą formę oraz umożliwia wytłaczanie. Formowanie wydruku jest identyczne jak w metodzie FFF/FDM. Następnie wydrukowana część przechodzi przez proces termicznego spiekania w piecu o określonym profilu temperatury dostosowanym do danego materiału. Tak wytworzone części mogą charakteryzować się gęstością na poziomie 99,7%. Są one również wytrzymałe jak ich odlewane czy kute odpowiedniki. Wytrzymałość mierzona w każdej osi jest porównywalna, co świadczy o izotropowych właściwościach mechanicznych wydruków. Dodatkowo niektóre materiały, takie jak np. stal narzędziowa H13, mogą być poddane procesowi odpuszczania co dodatkowo zwiększa ich mechaniczne właściwości. W odróżnieniu od metod proszkowych, proces ADAM umożliwia budowanie kompletnie zamkniętych struktur siatkowych, co prowadzi to tworzenia części o bardzo wysokim stosunku wytrzymałości do masy [147].

Metoda Wire-Laser Metal 3D Printing stosowana przez firmę Meltio bazuje na technice Direct Energy Deposition (DED). Proces ten wykorzystuje wielolaserową głowicę oraz drut spawalniczy jako materiał wsadowy. Drut jest precyzyjnie topiony za pomocą skoncentrowanej wiązki laserowej, co pozwala na budowanie metalowych struktur warstwa po warstwie. Technologia ta charakteryzuje się wysoką wydajnością i precyzją umożliwiając drukowanie z różnych materiałów jednocześnie [148].

Można powiedzieć, że na chwilę obecną przełomu w dziedzinie druku 3D dokonali naukowcy z MIT, prezentując innowacyjną technikę, którą nazwali jako „Drukowanie Ciekłego Metalu” (LMP – Liquid Metal Printing). Metoda ta umożliwia szybkie tworzenie dużych części wykonanych z aluminium. Proces ten polega na nanoszeniu stopionego aluminium wzdłuż precyzyjnie zdefiniowanej ścieżki na warstwę małych szklanych kulek, co pozwala na natychmiastowe krzepnięcie aluminium i tworzenie skomplikowanych struktur przestrzennych. To co odróżnia tę metodę od innych procesów przyrostowych, bazujących na druku z metali, to przynajmniej dziesięciokrotny wzrost prędkości druku. Bardziej efektywna jest także procedura podgrzewania i topienia metalu. Jednak wszystko to dzieje się kosztem rozdzielczości druku. W tym przypadku pomocna może okazać się obróbka wydrukowanych elementów [149, 150].

Możliwości wykorzystania metody LMP przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Pełnowymiarowe krzesło wydrukowane za pomocą metody LMP [149]

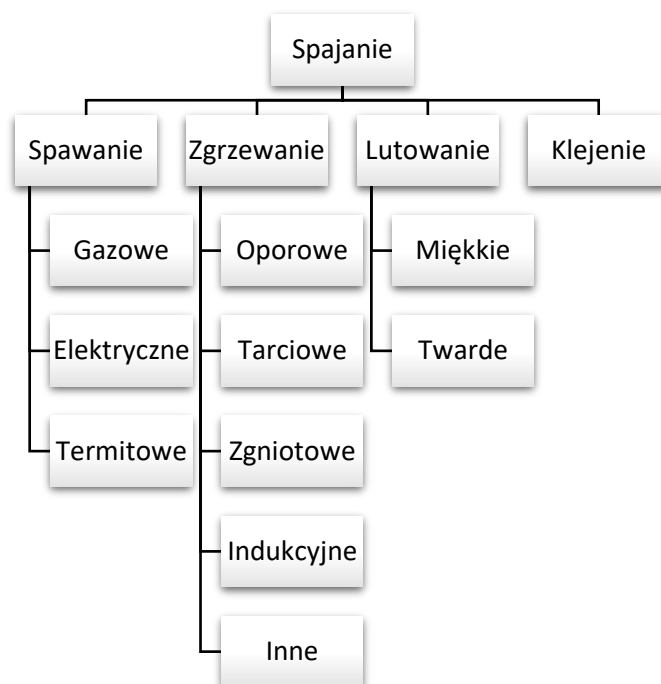
Przy podejmowaniu decyzji dotyczącej wyboru metody druku 3D warto zwrócić uwagę na kilka istotnych kwestii. Pierwszą z nich jest wytrzymałość materiałów. Różne metody mogą zapewniać różną wytrzymałość wyprodukowanych elementów. Czasem konieczne staje się wybranie materiału o określonej wytrzymałości lub odpornych na specyficzne warunki

zewewnętrzne. Kolejnym aspektem jest tolerancja. Nie wszystkie techniki druku 3D oferują tę samą precyzję wykonania. Niektóre projekty mogą wymagać wysokiej dokładności, co może wpłynąć na wybór konkretnej metody. Czas realizacji to także istotny czynnik. Różne metody druku mogą różnić się czasem potrzebnym na wyprodukowanie danej części. Ostatnim, lecz nie mniej ważnym aspektem są koszty wytworzenia. Zarówno sam proces jak i użyty materiał mogą mieć znaczący wpływ w różnicy w cenie. Nie zawsze najtańsza metoda jest najlepszym rozwiązaniem. Wybór metody druku powinien być dopasowany do konkretnych wymagań projektowych, biorąc pod uwagę wszystkie powyższe aspekty. Każdy z nich może mieć kluczowe znaczenie w powodzeniu realizacji danego projektu.

## 2.5. Rodzaje spawania

### 2.5.1. Ogólny podział procesów spawalniczych

Spawalnictwo to gałąź technologii zajmująca się metodami spajania materiałów oraz powiązаныmi technikami. Rodzaje procesów spajania zaprezentowano na rys. 2.10.

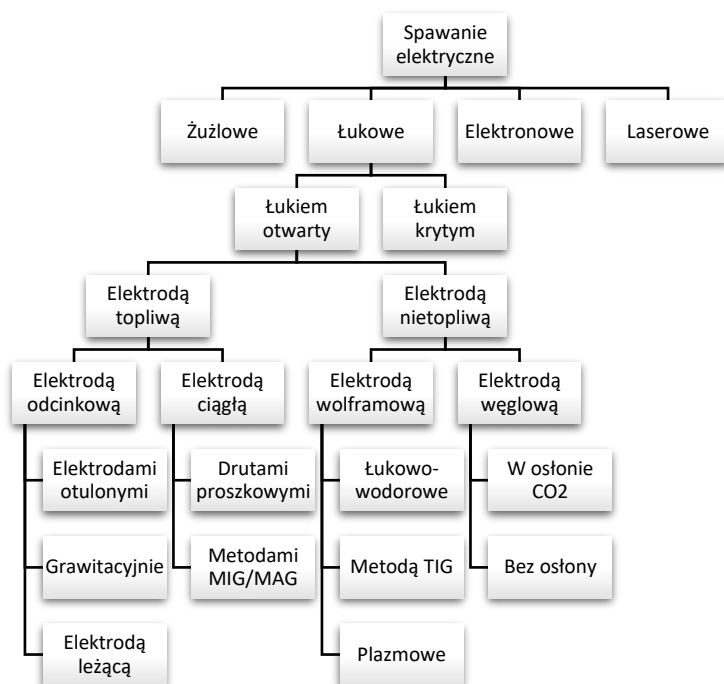


Rys. 2.10. Rodzaje procesów spawania [151]

Techniki spawania można podzielić na kilka podstawowych kategorii: spawanie, zgrzewanie, lutowanie oraz klejenie. Każda z tych metod ma swoje specyficzne zastosowanie i właściwości.

Procesy spawania różnią się między sobą w zależności od tego, jak łączony jest materiał podstawowy z materiałem dodatkowym, jaki rodzaj złącza powstaje oraz jakiego rodzaju i w jaki sposób dostarczana jest energia (cieplna i mechaniczna) potrzebna do utworzenia trwałego połączenia.

Spawanie wyróżnia się tym, że umożliwia łączenie różnych części poprzez skoncentrowane dostarczenie energii cieplnej, co powoduje ich lokalne stopienie i pozwala na powstanie trwałej spoiny, stanowiącej kluczową część połączenia. Zazwyczaj łączone są metal i ich stopy o podobnych właściwościach fizycznych i chemicznych. Spoina to efekt połączenia i stopienia zarówno materiałów bazowych i dodatkowych (spoiwa), ale także stopienie materiałów podstawowych. W przeciwieństwie do złącz, które wykorzystują różne łączniki, takie jak nity czy śruby, złącza spawane, wyróżniają się swoistą integralnością. Ponadto charakteryzują się one dużą szczelnością oraz wytrzymałością zachowując przy tym niską wagę. Złącza te można w łatwy sposób zabezpieczyć antykorozyjnie. Rys. 2.11 przedstawia rodzaje procesów spawania.



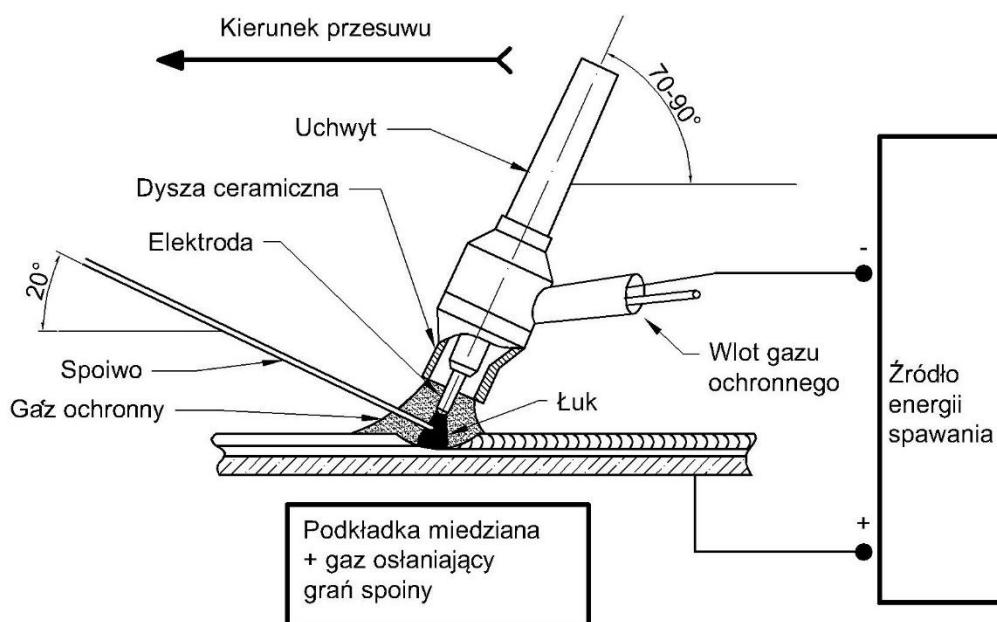
Rys. 2.11. Rodzaje procesów spawania [151]

W większości przypadków do spawania stosuje się energię elektryczną, szczególnie przy spawaniu łukowym. Niektóre metody spotykają się z ograniczeniami związanymi z niedostatecznymi właściwościami uzyskiwanego złącza. Przykład może stanowić spawanie gazowe czy elektrodą węglową. Techniki te często charakteryzują się ograniczoną wydajnością

oraz trudnościami w praktycznym zastosowaniu. Metody opierające się na ciepłe powstającym podczas spalania gazów lub reakcji chemicznej, tracą na znaczeniu. Rozwijają się jednak coraz bardziej zaawansowane techniki cechujące się wysoką energią oraz gęstością mocy takie jak spawanie plazmowe, wiązką elektronów czy laserowe.

### 2.5.2. Spawanie metodą TIG

Spawanie TIG to sposób łączenia metali wykorzystujący łuk elektryczny pomiędzy wolframową elektrodą, a spajanymi materiałami. Powstający łuk elektryczny, jarzy się pomiędzy elektrodą (która jest nietopliwa), a metalem. Proces odbywa się w osłonie gazu neutralnego (rys. 2.12). Powstająca spoina jest wynikiem stopienia łączonego metalu oraz dodatkowego materiału (spoiwa) lub też poprzez łączenie dwóch metali. Obojętny gaz odcina obszar płynnego metalu oraz nietopliwą elektrodę od dostępu powietrza. Proces ten nie powoduje zmian metalurgicznych, co przekłada się na czystość spoiny o dobrych właściwościach mechanicznych. Metoda TIG najczęściej używana jest do łączenia stali wysokostopowych, trudno-topliwych oraz reagujących chemicznie, włączając w to różnego rodzaju stopy [152, 153, 154].



Rys. 2.12. Schemat spawania metodą TIG [155]

Łuk zasilany jest poprzez urządzenia z konfiguracją o charakterze spadkowym lub stałym prądzie, zapewniając zarówno przemienny jak i stały prąd. Prąd stały z biegunem ujemnym na elektrodzie jest standardem dla większości metali z wyjątkami, jak np. aluminium, magnez oraz ich stopy czy też brązy aluminiowe. Biegunowość dodatnia na elektrodzie jest rzadko

stosowana z powodu wydzielania się tam aż 65% ciepła z łuku, co mogłoby skutkować szybkim topieniem elektrody [156].

Prąd pulsujący o kontrolowanej charakterystyce prądowo-czasowej jest powszechnie wykorzystywany w metodzie TIG. Umożliwia to precyzyjne regulowanie ciepła oraz tworzenie spoin o optymalnym kształcie i rozmiarze. Rolę stabilizatora podczas spawania, przejmuje łuk niewielkiej mocy, który nieustannie jarzy się pomiędzy elektrodą a materiałem spawanym. Zapobiega to jego wygaszeniu. Właśnie dzięki zastosowaniu prądu pulsującego ułatwione jest spawanie elementów cienkościennych lub takich, które zostały źle dopasowane [156].

Najczęściej stosowanymi gazami osłonowymi są argon lub mieszanka argonu z helem, czasami także sam hel, który jednak zwiększa temperaturę łuku. Warto jednak pamiętać o tym, że im większa zawartość helu, tym trudniejsza stabilność oraz zapłon łuku. Dodatek wodoru podnosi temperaturę łuku, odtlenia stopiony metal (działając redukująco) oraz poprawia wygląd spoiny. Stosuje się go jednak przy spawaniu stali austenitycznych. Nadmierna ilość gazu może spowodować zamieszanie i doprowadzić do wtłaczania powietrza w obszar łuku. Podczas spawania metali podatnych na utlenianie, stosuje się dodatkowe osłony na grani spoiny lub też spawa się w zamkniętych przestrzeniach wypełnionych gazem [152].

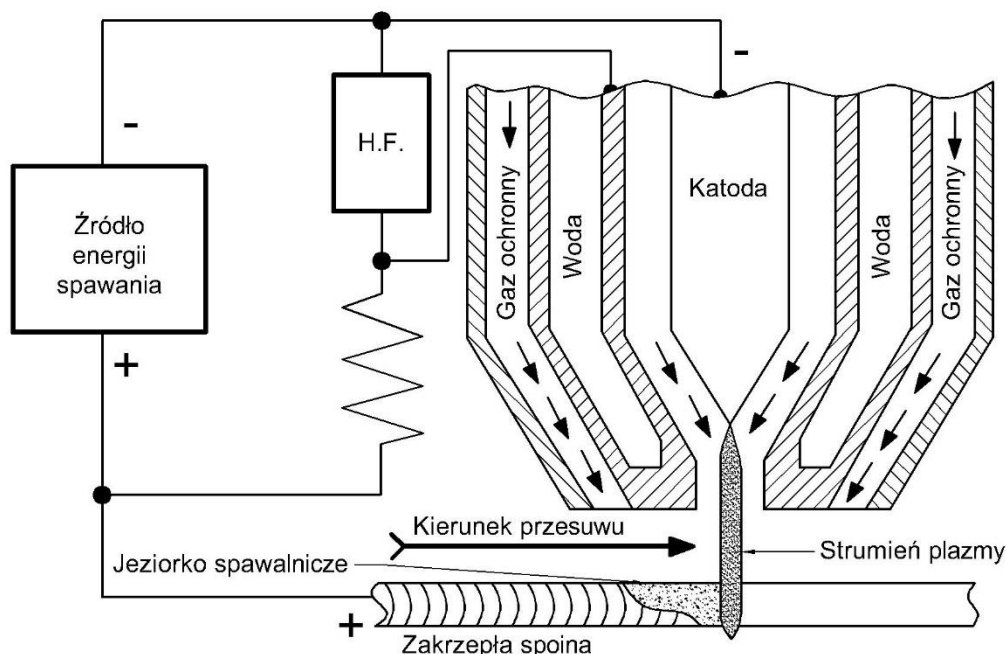
Efektywność wykorzystania energii cieplnej mieści się w zakresie 55-65%. Ze względu na pośredni sposób podgrzewania spoiwa przez łuk, wydajność spawania ręcznego metoda TIG jest niższa. Metodę tę wykorzystuje się przede wszystkim ze względu na wysoką jakość otrzymywanych spoin, szczególnie w przypadku łączenia elementów cienkich, precyzyjnych oraz przy wykonywaniu grani warstwowych [157].

Proces spawania metodą TIG jest zwykle procesem manualnym. Jednak w łatwy sposób możliwe jest jego ulepszenie poprzez automatyzację (robotyzację). Metoda ta umożliwia spawanie w różnych pozycjach. W celu ułatwienia zajarzenia łuku bez konieczności dotykania elektrody często stosuje się jonizatory, czyli układy o wysokim napięciu oraz wysokiej częstotliwości [158].

### **2.5.3. Spawanie plazmowe**

Spawanie plazmowe jest metodą spajania, wykorzystującą strumień plazmy do łączenia metali (rys. 2.13). Do stopienia łączonych krawędzi metali, a także, jeśli jest używany, dodatkowego materiału, wykorzystuje się źródło ciepła w postaci skupionego łuku spawalniczego, mechanicznie zawężonego w dyszy plazmowej głowicy. Dodatkowo łuk plazmowy, czyli pole elektromagnetyczne, aktywnie wspomaga ten proces. Łuk ten charakteryzuje się dużą gęstością mocy (ok 10 kW/mm<sup>2</sup>) oraz ekstremalnie wysoką

temperaturą dochodzącą do 20 000°C. W odróżnieniu do konwencjonalnego spawania TIG, łuk plazmowy charakteryzuje się niemal walcowym kształtem (ok 6° w porównaniu do 45-90°) [153, 154, 159].



Rys. 2.13. Schemat spawania plazmowego [155]

W spawaniu tym używa się dwóch głównych metod: plazmową TIG, która jest powszechniejsza oraz rzadziej spotykanej – plazmową MIG. Nazwy nawiązują do podobieństwa do tradycyjnych metod TIG i MIG. Obie te metody wykorzystują dwa rodzaje gazów: plazmowy oraz osłonowy. Doprowadzane są one osobno i pełnią różne funkcje. Gazem plazmowym jest zazwyczaj argon lub czasami hel, ale także wodór. Te same gazy używane są jako gaz osłonowy, z wyjątkiem spawania stali, gdzie z powodów ekonomicznych stosuje się dwutlenek węgla lub jego mieszanę z argonem [154].

W procesie spawania (ale także i cięcia) z wykorzystaniem różnych rodzajów palników wyróżnia się dwie główne metody: spawania łukiem zależnym oraz niezależnym. W powszechnie stosowanej technice spawania łukiem zależnym, łuk elektryczny formuje się pomiędzy elektrodą wolframową, a materiałem spawanym. Natomiast w głowicach roboczych używanych w spawaniu łukiem niezależnym, łuk elektryczny tworzy się między elektrodą, a miedzianą dyszą palnika. Strumień plazmy topi materiał poddawany obróbce (spawany, cięty, napawany), który nie musi być przewodnikiem prądu. Spawanie łukiem niezależnym, jest rzadko wykorzystywane, ponieważ nie jest wydajne energetycznie [160, 161].



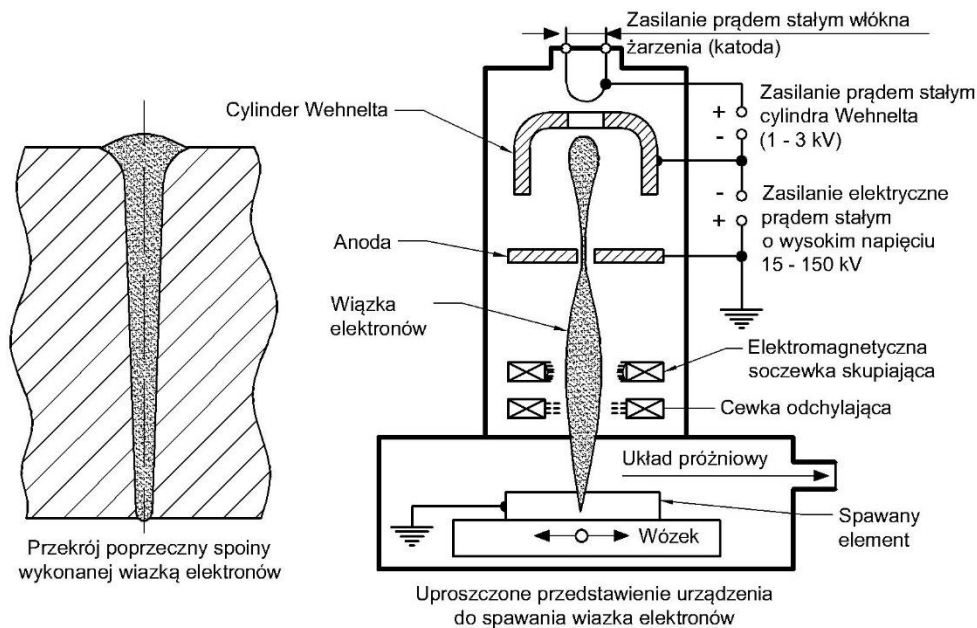
Obszar zastosowań spawania plazmowego pokrywa się z obszarem, gdzie wykorzystuje się tradycyjne metody TIG oraz MIG. Do zalet tego procesu należy zaliczyć [154, 161]:

- łuk o bardziej skoncentrowanej mocy, co umożliwia osiągnięcie głębokiego stopienia przy jednoczesnym otrzymaniu wąskiej spoiny,
- 2 lub nawet 3-krotnie większą szybkość spawania w porównaniu do metod tradycyjnych,
- wysoką elastyczność łuku, dającą kontrolę nad procesem spawania,
- minimalizację odkształceń materiału w trakcie procesu,
- wysoką jakość oraz estetykę połączenia.

W pewnych przypadkach spawanie plazmowe stanowi alternatywę dla kosztownych metod spawania laserowego oraz elektronowego oferując podobne rezultaty.

#### **2.5.4. Spawanie wiązką elektronów**

Spawanie elektronowe polega na wykorzystaniu skoncentrowanej wiązki elektronów emitowanej z wolframowej katody przy napięciu do 200 kV (rys. 2.14). Energia kinetyczna elektronów przekształca się w energię cieplną podczas ich zderzenia z metalem spawanym. Dzięki skupieniu wiązki przez pole magnetyczne do średnicy 0,1 mm i mocy około 200 kW uzyskiwana jest gęstość na poziomie  $10^4$ - $10^5$  kW/mm<sup>2</sup>. Pozwala to na spawanie stali nawet o grubości do 300 mm. Najlepsze parametry uzyskuje się spawając w próżni. Spawanie elektronowe jest najbardziej efektywne energetycznie spośród wszystkich procesów spawalniczych [153, 154].



Rys. 2.14. Schemat spawania wiązką elektronów [155]

Spawanie elektronowe charakteryzuje się dużą szybkością oraz efektywnością, gwarantując jednocześnie wysoką jakość łączenia większości metali, nawet tych trudno spawalnych za pomocą tradycyjnych metod. Właściwość ta pozwala na łączenie metali o różnych właściwościach fizycznych. Dzięki wytworzeniu próżni, która usuwa gazy z ciekłego stopu, spoiny są czyste. Obszar wpływu ciepła jest wyjątkowo wąski, co przekłada się na doskonałą jakość połączeń [162].

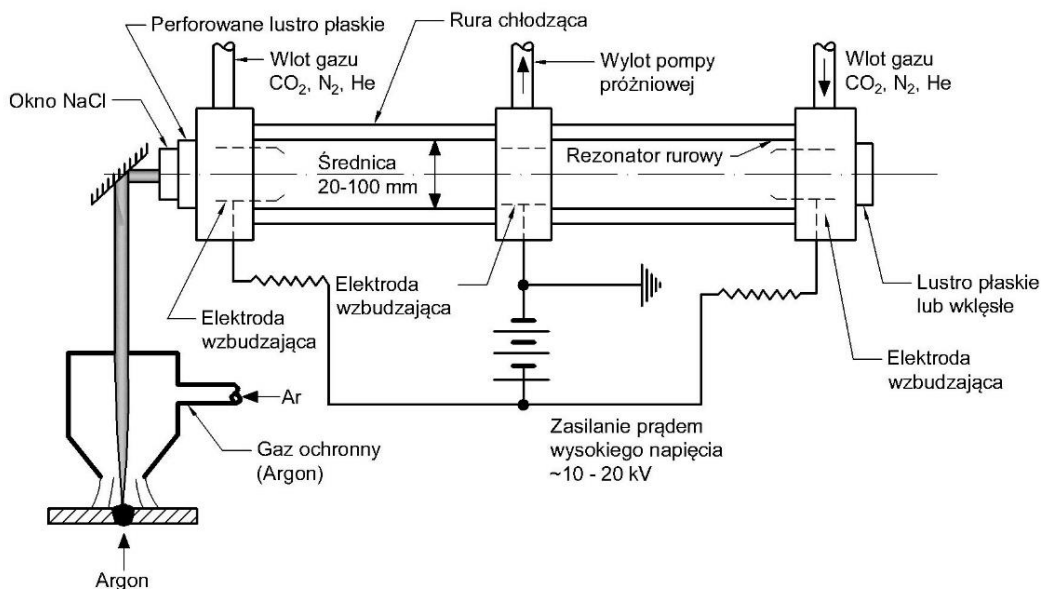
Proces spawania wiązką elektronów może odbywać się ciągłym strumieniem lub w trybie impulsowym, zarówno z użyciem dodatkowego spoiwa jak i bez niego. Elementy przeznaczone do spawania muszą być starannie oczyszczone zarówno mechanicznie jak i chemicznie, a także precyzyjnie dopasowane [163].

Zastosowanie spawania elektronowego dotyczy produkcji elementów o wyjątkowych wymaganiach, zwłaszcza w branży lotniczej, energetycznej, motoryzacyjnej czy elektronicznej. Jedną z głównych przeszkód uniemożliwiających powszechne wykorzystanie tej metody jest wysoki koszt urządzeń spawalniczych. Pod wieloma względami jest ono bardzo podobne do procesu spawania laserowego [162, 163, 164].

### 2.5.5. Spawanie laserowe

Spawanie laserowe to technika łączenia metali, w której używa się promienia laserowego do stopienia i połączenia materiałów, tworząc bardzo precyzyjne połączenie (rys. 2.15). Generowanie spójnego promieniowania elektromagnetycznego, które obejmuje widmo od dalekiej podczerwieni do nadfioletu, opiera się na mechanizmie wzmacniania światła za

pomocą wymuszonej emisji promieniowania, czyli lasera. Promieniowanie tego typu, zgodnie z prawem optyki, jest w stanie przekraczać duże odległości w powietrzu przy minimalnych stratach energetycznych [153, 154].



Rys. 2.15. Schemat spawania laserowego [155]

W obszarze działań spawalniczych, obejmujących spawanie, cięcie, modyfikację powierzchni oraz lutowanie, najczęściej wykorzystuje się lasery gazowe. Te typy laserów wykorzystują dwutlenek węgla jako generujący gaz aktywny, wspierany przez hel i azot jako gazy pomocnicze. Proces generowania promieniowania o długości fali 10,6 mikrometra polega na wywołaniu wyładowania elektrycznego w mieszance gazów, sterowanego kilkunastokilowoltowym napięciem z generatora do elektrod. Moc tych laserów CO<sub>2</sub> sięga 25 kW, co czyni je najpotężniejszymi wśród różnych typów laserów, przy sprawności na poziomie 10-15% [165].

W spawalnictwie stosuje się również lasery stałe neodymowe, gdzie ośrodkiem aktywnym są jony neodymu w granacie itrowo-glinowym (Nd: YAG) lub rzadziej w szkle (Nd: Glass) oraz rubinowe. Ze względu na moc praktycznie nie przekraczającą 5kW, wykorzystuje się je głównie do łączenia elementów cienkich i precyzyjnych z metalami o wysokiej refleksyjności. Dzięki możliwości przesyłania promieniowania o długości fali 10,6 μm za pomocą światłowodów, procesy te mogą być zautomatyzowane. Lasery diodowe o dużych mocach są stosowane do spawania techniką z jeziorkiem, napawania i lutowania [153, 154].

Za pomocą spawania laserowego można łączyć metale o różnej grubości w zależności od mocy lasera i rodzaju materiału. Wynikowe złącza mogą być bardzo głębokie i wąskie, co

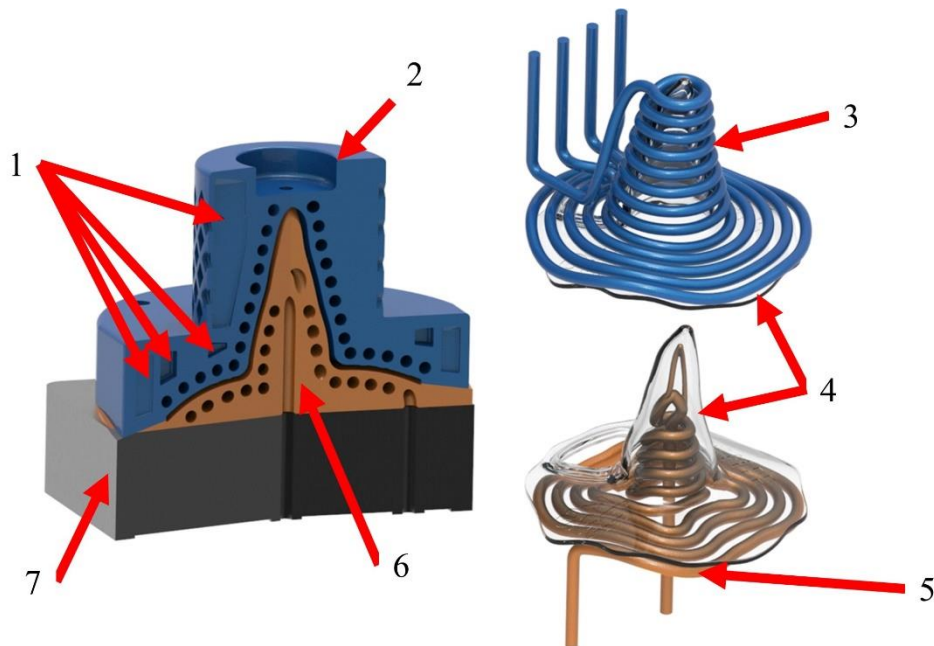
zależy od parametrów użytych podczas spawania. Ze względu na minimalne odkształcenia cieplne, takie połączenia mogą być gotowe do użycia bez potrzeby dodatkowej obróbki mechanicznej. Kluczowe jest precyzyjne wykonanie i dokładne zestawienie elementów składowych. Zazwyczaj stosuje się pojedyncze przejścia, bez dodatku spoiwa, czasem jednak może być ono dodawane sporadycznie [164, 165].

Spawanie laserowe to zazwyczaj proces zautomatyzowany. Wiązką laserową kieruje się za pomocą luster oraz przesłon i wykorzystuje się światłowody do przekazywania wiązki na znaczne odległości. Możliwe jest nawet spawanie przez przepuszczające światło, przegrody. Z tej metody korzysta się do spawania praktycznie wszystkich rodzajów stali, trudnotopliwych metali, materiałów reaktywnych, spieków, kompozytów i niektórych tworzyw sztucznych. Jakość złączy metali i stopów zazwyczaj jest lepsza niż przy użyciu innych metod spawania, głównie dzięki niewielkiej energii liniowej i dużej prędkości spawania, minimalizujących odkształcenia, naprężania i zmiany właściwości mechanicznych złączy. Jednakże intensywne chłodzenie może czasami powodować niekorzystne zmiany w strukturze niektórych metali o ograniczonej spawalności, prowadząc do pęknięć lub porowatości. W celu osłony ciekłego jeziora metalu używa się gazów, głównie argonu, helu lub ich mieszanek, dwutlenku węgla oraz azotu, dostosowując ich użycie do konkretnych warunków procesu spawania [164, 165].

## **2.6. Kanały konformalne**

Chłodzenie konformalne polega na dopasowaniu kanałów, chłodzących formy wtryskowe, do kształtu detalu. Jest to sposób na zwiększenie efektywności i jakości procesu wtrysku, ponieważ pozwala na szybsze i równomierne odprowadzanie ciepła z formy, co skraca czas cyklu oraz zmniejsza deformację wypraski. Chłodzenie konformalne jest możliwe dzięki zastosowaniu druku 3D w metalu, który umożliwia tworzenie skomplikowanych geometrii kanałów chłodzących, niemożliwych do wykonania tradycyjnymi metodami [166, 167].

Artykuł A. Kirchheim'a i in. bada zastosowanie technologii Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) do produkcji hybrydowych form wtryskowych z dynamicznymi kanałami chłodzenia konformalnego (rys. 2.16) [168]. Dzięki precyzyjnie umieszczonym kanałom chłodzenia, możliwa jest optymalizacja kontroli temperatury, co skutkuje znacznym skróceniem czasu cyklu formowania. Badania wykazały 24% redukcję czasu chłodzenia oraz poprawę jakości powierzchni formowanych części.



Rys. 2.16. Przekrój formy z kanałami chłodzenia konformalnego: (1) pusta przestrzeń, (2) wkładka formy wytworzona metoda przyrostową, (3) konformalne kanały chłodzące po stronie wtryskiwacza, (4) plastikowa część, (5) konformalne kanały chłodzące po stronie wypychacza, (6) hybrydowa wkładka formy wytworzona przyrostowo, (7) płyta bazowa wykonana w konwencjonalny sposób [168]

Z kolei M. Cader i M. Osiak opisali metodologię projektowania prototypu kanału chłodzącego przeznaczonego do pracy z głowicami przemysłowych drukarek 3D [169]. W badaniu wykorzystano nowoczesne narzędzia dostępne na rynku do optymalizacji konstrukcji mechanicznych, takie jak Ansys Discovery, które umożliwia natychmiastową symulację (w czasie rzeczywistym) oraz metody addytywne pozwalające na produkcję zoptymalizowanych zespołów. Autorzy potwierdzili skuteczność tych metod, demonstrując ich zastosowanie i projektując prototyp kanału chłodzącego w głowicy drukarki 3D. Wyniki były zgodne z przewidywaniami, co zostało potwierdzone bezkontaktowymi metodami pomiarowymi.

Autor P. Muszyński wraz z innymi, skupiają się w swoim artykule na omówieniu różnych metod chłodzenia form wtryskowych oraz na tendencjach rozwoju tych systemów, mających na celu zwiększenie ich efektywności [170]. W publikacji dokonano analizy zasad projektowania układów chłodzenia, które pozwalają na skuteczne, dynamiczne i równomierne odprowadzenie ciepła z formy wtryskowej.

W literaturze przedmiotu istnieje wiele publikacji dotyczących przeglądu i oceny projektowania, produkcji oraz zastosowania kanałów konformalnych [171, 172, 173, 174]. Analizowane przez autorów systemy chłodzenia pokazują duże możliwości jako zamienniki dla konwencjonalnych systemów chłodzenia, ponieważ mogą zapewnić bardziej jednolite

i efektywne obniżenie temperatury, a tym samym znacznie poprawić jakość i wydajność produkcji. Dzięki zastosowaniu dopasowanych kanałów konformalnych, czas cyklu może zostać skrócony nawet o 70%, a odchylenia błędu kształtu mogą być znacznie poprawione.

Artykuł autorstwa M.S. Shnide'a i K.M. Ashtankar'a dostarcza przeglądu zastosowań kanałów chłodzących wspomaganych przez szybkie prototypowanie oraz ukazuje potencjał tej technologii w różnych procesach produkcyjnych [175]. Autorzy przedstawiają również studium przypadku, w którym kanały chłodzące, wspomagane przez szybkie prototypowanie zostały z powodzeniem wykorzystane w procesie produkcyjnym form wtryskowych. Sugerują również, że techniki szybkiego prototypowania z powodzeniem mogą zastąpić konwencjonalne metody produkcji dla skomplikowanych struktur kanałów chłodzących, poprawiając ich jakość i wydajność.

Z kolei w swoich badaniach H.S. Park i N.H. Pham skupiają się na roli systemu chłodzenia w procesie wtryskiwania tworzyw sztucznych, który ma kluczowe znaczenie dla produktywności i jakości procesu [176]. Autorzy proponują metodę opracowania konformalnego systemu chłodzenia, który umożliwi jednolite chłodzenie całej powierzchni formy przy minimalnym czasie cyklu. Na podstawie rozkładu temperatury po etapie wypełnienia, powierzchnia formy jest dzielona na strefy, które będą chłodzone przez zoptymalizowane subkanały konformalne uzyskane z procesu optymalizacji. Proces optymalizacji, w którym funkcja celu jest określona jako minimalizacja czasu chłodzenia, zoptymalizuje układ chłodzenia pod względem rozmiaru i lokalizacji kanału chłodzącego. Ostatecznie wszystkie subkanały chłodzące są łączone, aby wygenerować cały konformalny system chłodzenia dla formy wtryskowej.

W artykule D.E. Dimla wraz ze współautorami skupiają się na optymalizacji i efektywnym projektowaniu kanałów chłodzących w formach wtryskowych, wykorzystując analizę termiczną oraz MES [177]. Autorzy stworzyli model 3D typowego komponentu odpowiedniego do wtrysku, a następnie wygenerowali narzędzia do formowania części. Analiza modeli wirtualnych pokazała, że modele z konformalnymi kanałami chłodzącymi mogą znacznie skrócić czas cyklu oraz poprawić jakość wykończenia powierzchni w porównaniu do chłodzonych tradycyjnymi metodami.

Autor A. Armillotta wraz z innymi w swojej publikacji [178] przedstawili eksperymentalne badanie matryc do odlewania ciśnieniowego z konformalnymi kanałami chłodzącymi, wytworzonymi bezpośrednio za pomocą technik przyrostowych z metalu. Do wytworzenia bloku z konformalnymi kanałami chłodzącymi zastosowano metodą SLM. Kanały zostały zaprojektowane zgodnie z geometrią części przy pomocy symulacji procesu. Testy wykazały,

że konformalne chłodzenie poprawia wykończenie powierzchni odlewów dzięki zmniejszonej potrzebie chłodzenia natryskowego, co jest możliwe dzięki wyższej i bardziej jednolitej szybkości chłodzenia. Dodatkowe korzyści objęły skrócenie czasu cyklu i porowatości.

Z kolei Przeszlowski Ł. i inni prezentują nowe podejście do problemu analizy kształtu i wymiarów kanałów konformalnych na przykładzie prototypu formy wtryskowej, zwracając uwagę na potencjalne problemy i proponując możliwe rozwiązania [179]. Autorzy przeprowadzili badania, aby zbadać możliwość wykorzystania technik przyrostowych w tworzeniu narzędzi lub ich prototypów, co otwiera drogę do poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych, niemożliwych do zastosowania przy tradycyjnych technikach produkcyjnych.

Biorąc powyższe pod uwagę można dojść do wniosku, że przedstawione badania naukowe oraz branżowe skupiają się na optymalizacji kanałów chłodzących, wykorzystując nowoczesne narzędzia i techniki, takie jak analiza termiczna, symulacje MES czy szybkie prototypowanie. Wyniki pokazują, że zastosowanie kanałów konformalnych pozwala znacznie poprawić jakość oraz wydajność procesu. Choć nie ma literatury dotyczącej zastosowania kanałów konformalnych w przyrządach spawalniczych, przegląd ten pozwala sugerować, że technologia ta może być z powodzeniem zastosowana w tego rodzaju oprzyrządowaniu.

Analiza stanu zagadnienia technologii addytywnych wykazuje rosnącą popularność druku 3D w dziedzinie oprzyrządowania produkcyjnego. Technologia ta, początkowo wykorzystywana głównie do celów prototypowych, obecnie znajduje coraz szersze zastosowanie w produkcji narzędzi i komponentów przemysłowych. Zyskuje ona na znaczeniu ze względu na możliwość redukcji kosztów oraz zwiększenie efektywności procesów produkcyjnych.

Druk 3D umożliwia tworzenie narzędzi o wysokim stopniu dopasowania do specyficznych potrzeb produkcyjnych. W kontekście oprzyrządowania spawalniczego, druk 3D z metalu wykazuje znaczący potencjał. Systemy mocowania, stosowane w przyrządach spawalniczych, wykonane z metalu muszą spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące wytrzymałości i odporności na wysokie temperatury. Technologia druku 3D z metalu umożliwia tworzenie narzędzi o złożonej geometrii, które są trudne lub niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami. W efekcie możliwe jest wytwarzanie bardziej efektywnych i trwałych uchwytów spawalniczych, co znacząco wpływa na jakość i precyzję procesu spawania.

Zastosowanie konformalnych kanałów chłodzących, które są szeroko stosowane w formach wtryskowych, również przynosi znaczące korzyści. Kanały te zapewniają bardziej równomierne i efektywne chłodzenie, co przekłada się na wyższą jakość końcowego produktu

oraz skrócenie cyklu produkcyjnego. Transfer tej technologii do oprzyrządowania spawalniczego może przynieść analogiczne korzyści. Konformalne kanały chłodzące w przyrządach spawalniczych mogą poprawić efektywność odprowadzania ciepła (co jest kluczowe dla zwiększenia ich trwałości) oraz skrócić przestoje produkcji spowodowane stygnięciem oprzyrządowania.

Podsumowując, analiza stanu zagadnienia wskazuje na znaczący potencjał technologii druku 3D w produkcji oprzyrządowania, ze szczególnym uwzględnieniem systemów mocowań wykorzystywanych w przyrządach spawalniczych. Implementacja technologii addytywnych w produkcji tych narzędzi może przyczynić się do poprawy ich jakości i funkcjonalności, a także przynieść znaczące korzyści ekonomiczne poprzez redukcję kosztów i zwiększenie efektywności procesów produkcyjnych. Druk 3D z metalu oraz konformalne kanały chłodzące stanowią kluczowe elementy, które mogą zrewolucjonizować oprzyrządowanie spawalnicze, przynosząc wymierne korzyści zarówno producentom, jak i użytkownikom końcowym.



## **3. CEL I ZAKRES PRACY**

### **3.1. Uzasadnienie wyboru tematu i podjęcia badań**

W obecnym dynamicznym środowisku przemysłowym, charakteryzującym się wzrostem zarówno produkcji jak i robotyzacji procesów, nieodłączne jest adaptowanie nowatorskich rozwiązań w konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego. W tym kontekście, skupienie się na oprzyrządowaniu spawalniczym jako obszarze potencjalnych innowacji, szczególnie poprzez zastosowanie technologii przyrostowych, wydaje się naturalnym krokiem w rozwoju tej dziedziny.

Przeгляд literaturowy poświęcony temu zagadnieniu ukazuje ograniczoną ilość badań, które bezpośrednio zajmują się zastosowaniem nowoczesnych technologii, takich jak druk 3D, w odniesieniu do oprzyrządowania spawalniczego. Większość dostępnych prac koncentruje się głównie na obszarze form wtryskowych dla przetwarzania polimerów.

Temat niniejszych badań ma szczególne znaczenie w kontekście przemysłu lotniczego, gdzie procesy spawania stanowią nieodłączny element łączenia skomplikowanych elementów części lotniczych. Rozwinięcie technologii druku 3D w oprzyrządowaniu spawalniczym może przynieść realne korzyści, poprawiając zarówno efektywność jak i jakość końcowych wyrobów.

Niniejsze badania mogą mieć zatem znaczący wpływ na rozwój oprzyrządowania spawalniczego, szczególnie z perspektywy projektu realizowanego w przedsiębiorstwie Pratt & Whitney, jakim jest Doktorat Wdrożeniowy oraz przemysłu lotniczego. Badania mogą stanowić istotny wkład w rozwój konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego, wykorzystując technologie przyrostowe, co może być postępowaniem w dziedzinie spawalnictwa.

Podsumowując, podejście badawcze, koncentrujące się na nowoczesnym projektowaniu oprzyrządowania spawalniczego wykorzystującego technologie przyrostowe, doskonale odpowiada na dynamiczne wyzwania współczesnego przemysłu. Korzyści jakie płyną z tych badań nie tylko obejmują poprawę efektywności procesu, ale także poprawiają jego jakość oraz umożliwiają dostosowanie się do specyficznych wymagań przemysłu lotniczego.

### **3.2. Cele pracy i postawiona hipoteza**

**Głównym celem pracy jest opracowanie metodyki projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi stosowanych w przemyśle lotniczym.**

Zakres pracy jest wieloetapowy w związku z tym wprowadzono cele pomocnicze. Przedstawiają się one następująco:

- wykonanie prototypów zaprojektowanych uchwytów,
- przeprowadzenie symulacji komputerowych, dotyczących rozkładu ciepła i tempa chłodzenia opracowanych modeli uchwytów spawalniczych,
- przeprowadzenie symulacji komputerowych, dotyczących badania wytrzymałości opracowanych modeli uchwytów spawalniczych,
- przeprowadzenie testów w warunkach laboratoryjnych,
- przeprowadzenie badań w warunkach produkcyjnych.

Technologie przyrostowe, bazujące na przetwórstwie metalowych proszków, znajdują zastosowania w wielu gałęziach przemysłu pozwalając na wytwarzanie elementów o skomplikowanych geometrycznie kształtach nie tylko zewnętrznych, ale i wewnętrznych. Analiza stosowania kanałów konformalnych, np. w formach wtryskowych pozwala postawić następującą hipotezę badawczą:

*Zakłada się, że zastosowanie wewnętrznych kanałów chłodzących w systemach mocowania stosowanych w przyrządach spawalniczych wykorzystując techniki przyrostowe może wpłynąć na skrócenie czasu chłodzenia takiego elementu oraz zmniejszyć jego zużycie powstałe w wyniku podwyższonej temperatury.*

Przyjęta hipoteza została zweryfikowana w trakcie badań empirycznych.

### **3.3. Przebieg procesu badawczego**

Proces badawczy został zrealizowany w okresie trwania projektu Doktorat Wdrożeniowy i składał się z dziesięciu głównych etapów:

- Etap 1 – Opracowanie modelu badawczego 3D-CAD,
- Etap 2 – Opracowanie prototypu koncepcyjnego,
- Etap 3 – Opracowanie prototypu numerycznego,
- Etap 4 – Opracowanie prototypu wizualnego,
- Etap 5 – Opracowanie prototypu technologicznego,
- Etap 6 – Wykonanie prototypu technicznego,
- Etap 7 – Przeprowadzenie symulacji komputerowych na prototypie technicznym,
- Etap 8 – Przeprowadzenie badań laboratoryjnych na prototypie technicznym,
- Etap 9 – Przeprowadzenie badań na prototypie technicznym na wydziale produkcyjnym,
- Etap 10 – Analiza uzyskanych wyników i wyciągnięcie wniosków.

### 3.4. Charakterystyka przedsiębiorstwa

Zakład Narzędziowy i Utrzymania Ruchu, w którym realizowany jest doktorat wdrożeniowy to centrum produkcyjno-serwisowe z 85-letnią tradycją. Specjalizuje się w projektowaniu i wytwarzaniu oprzyrządowania do obróbki skrawaniem, elektroerozyjnej, laserowej, galwanicznej, plastycznej oraz do montażu czy spawania w tym przyrządów zautomatyzowanych (pneumatycznych/hydraulicznych) oraz wykonanych w technologii druku 3D. Dział utrzymania ruchu zapewnia serwis maszyn i urządzeń z obsługą predykcijną, wspierając rozwój regionu i społeczności lokalnej [180].

Z perspektywy firmy Pratt&Whitney Rzeszów, a szczególnie wydziału Narzędziowego i Utrzymania Ruchu, można wyróżnić następujące kluczowe etapy rozwoju druku 3D:

- 2015 – start programu druku 3D oraz nawiązanie pierwszych współpracy z poddostawcami,
- 2016 – wyprodukowanie pierwszego przyrządu,
- 2017 – zakup oraz wdrożenie pierwszej drukarki typu FFF/FDM. Podjęcie pierwszych prób zastosowania optymalizacji topologicznej,
- 2018 – wyprodukowanie pierwszego elementu wykonanego z metalu. Zastosowanie wielokryterialnej optymalizacji topologicznej,
- 2020 – warsztaty i szkolenia zespołu konstruktorów oprzyrządowania w zakresie CAx,
- 2022 – zakup przemysłowej drukarki FFF/FDM oraz drukarki do elementów elastycznych,
- 2023 – utworzenie placówki do druku 3D.

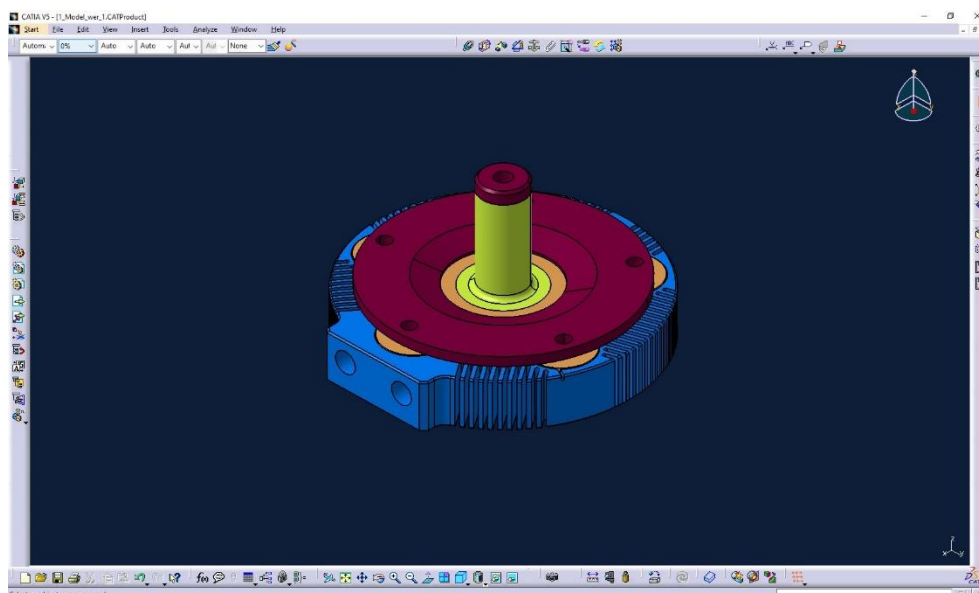
Pratt&Whitney Rzeszów S. A. ma tradycje sięgające 1937 roku. Wytwórnia Silników Nr 2 została założona w ramach Centralnego Okręgu Przemysłowego. W latach przedwojennych produkowano silniki tłokowe na licencji czeskiej firmy Walter, oznakowane jako PZInż „Junior” i „Major”, oraz silniki na licencji angielskiej firmy Bristol. W okresie powojennym zakład przekształcił się w Państwowe Zakłady Lotnicze [181]. Obecnie Pratt & Whitney Rzeszów S. A. specjalizuje się w produkcji komponentów lotniczych, a także kompletnych jednostek napędowych. Zakład produkuje m.in. łopatki lotnicze, elementy aparatury paliwowej, wirniki turbin, kadłuby, przekładnie oraz silniki lotnicze. Firma zajmuje się także remontami, serwisem oraz modernizacją maszyn i urządzeń. Posiada hamownie silników do testowania swoich wyrobów. Jest największym zakładem przemysłowym w regionie, dbającym o pracowników i rozwój technologiczny [182].

Dzięki ciągłym inwestycjom w nowoczesne technologie oraz rozwijaniu umiejętności pracowników, Pratt & Whitney Rzeszów umacnia swoją pozycję jako lider. Inicjatywy podejmowane w Zakładzie Narzędziowym i Utrzymania Ruchu nie tylko wspierają innowacyjność i efektywność produkcji, ale także przyczyniają się do wzrostu konkurencyjności firmy zarówno na rynku lokalnym jak i globalnym. Ta strategia długoterminowego rozwoju technologicznego umacnia pozycje Pratt & Whitney Rzeszów jako kluczowego gracza w sektorze lotniczym, gotowego sprostać wyzwaniom przyszłości.

## 4. METODYKA BADAWCZA

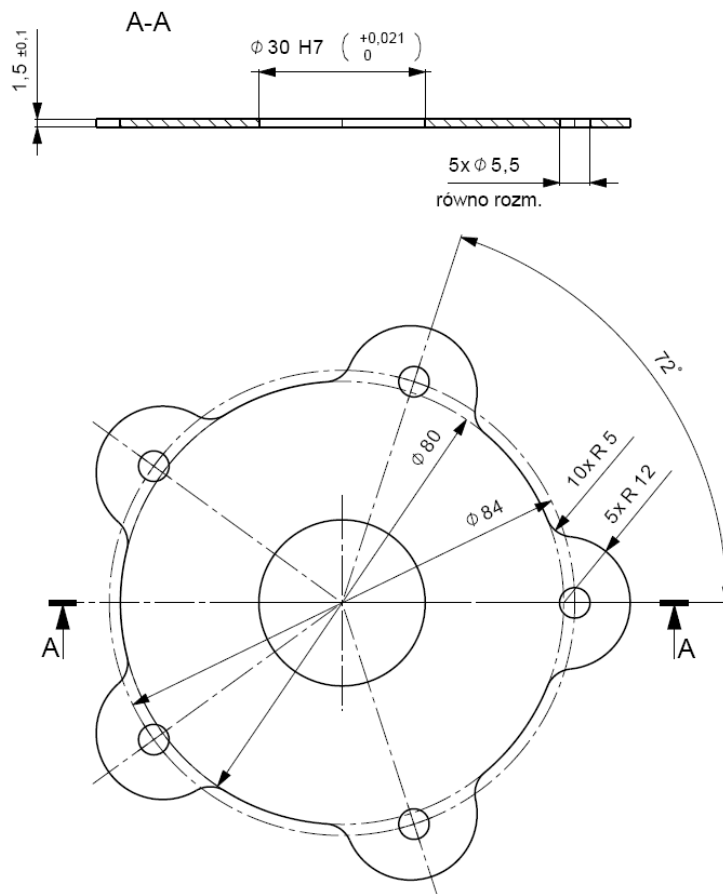
### 4.1. Opracowanie modelu badawczego 3D-CAD

W ramach niniejszych badań w pierwszej kolejności przeprowadzono szczegółowe modelowanie komputerowe przy użyciu zaawansowanego oprogramowania 3D-CAD. Obecnie wykorzystanie modelowania przy zastosowaniu programów 3D-CAD jest fundamentalnym etapem w procesie projektowania inżynierskiego, umożliwiającym precyzyjne odwzorowanie geometrii badanych elementów. W tym celu posłużono się oprogramowaniem CATIA V5 (rys. 4.1), które oferuje szeroki zakres funkcji, takich jak modelowanie powierzchni, brył oraz złożenia zespołów, co pozwala na kompleksowe podejście do projektowania i analizy inżynierskiej.



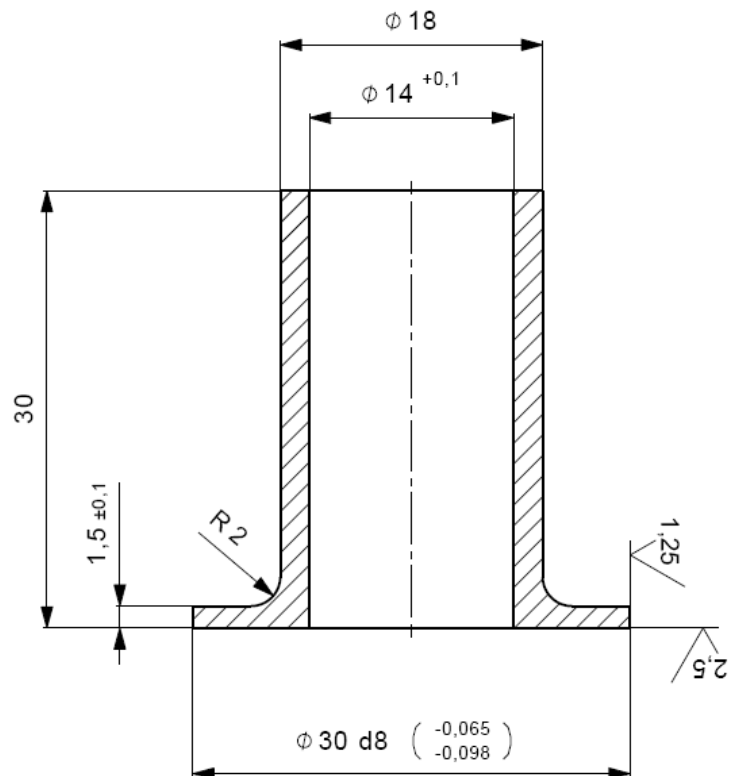
Rys. 4.1. Widok złożenia badanego uchwytu w środowisku Catia V5

Wszystkie elementy składające się na badany obiekt zostały szczegółowo odwzorowane w środowisku CATIA V5. Proces ten obejmował zamodelowanie kołnierza o grubości 1,5 mm, przyjmującego pięcioramienny kształt z otworami montażowymi (rys. 4.2). Centralnie kołnierz posiada otwór o średnicy 30 mm do montażu drugiego elementu badawczego. Przyjęta grubość, stanowi średnią grubość najczęściej spawanych elementów blaszanych. Dodatkowo wybór grubszej blachy wpływa na wymagania dotyczące procesu spawania, gdyż grubsza blacha absorbuje więcej ciepła, co prowadzi do większego nagrzewania się przyrządu. Kołnierz został zaprojektowany z uwzględnieniem standardów przemysłowych.



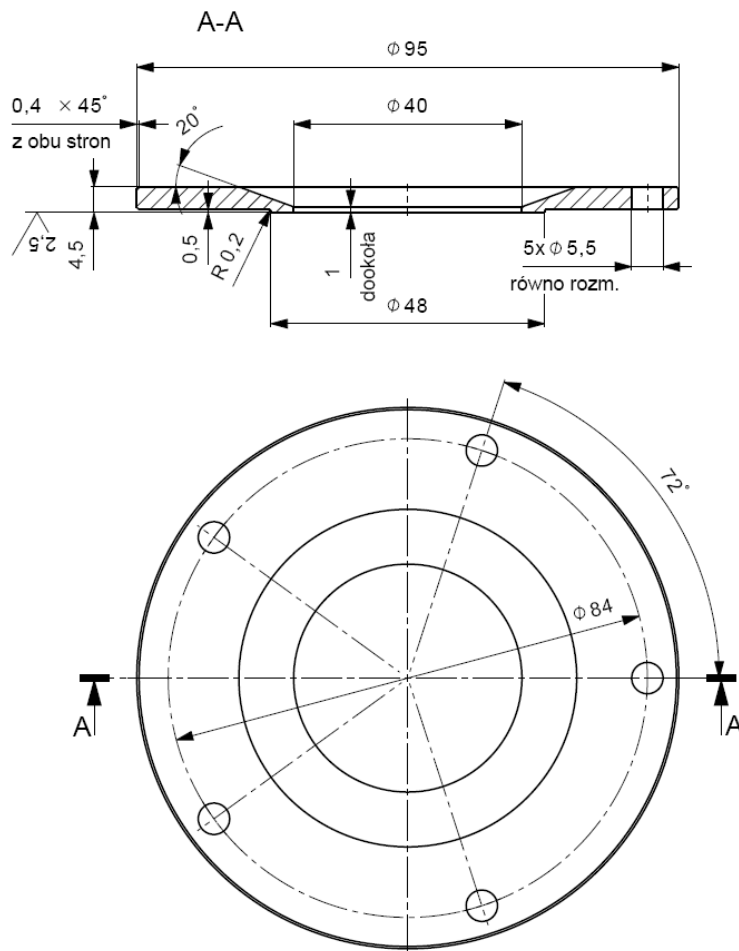
Rys. 4.2. Rysunek wykonawczy badanego kołnierza

Drugim zamodelowanym elementem badawczym była rurka o średnicy 18 mm i kołnierzem o średnicy 30 mm i grubości 1,5mm oraz centralnym otworem przelotowym o średnicy 14 mm (rys. 4.3). Rurka ta odwzorowuje nabki wykorzystywane w produkcji lotniczej, gdzie precyzja wykonania ma kluczowe znaczenie. Elementy te zostały zaprojektowane tak, aby odwzorować te wykorzystywane w lotnictwie jednak ze względu na specyfikę wykonywanej produkcji przez firmę Pratt & Whitney Rzeszów nie odwzorowują tych elementów bezpośrednio. Elementy te zostały wykonane ze stali nierdzewnej AISI 304.

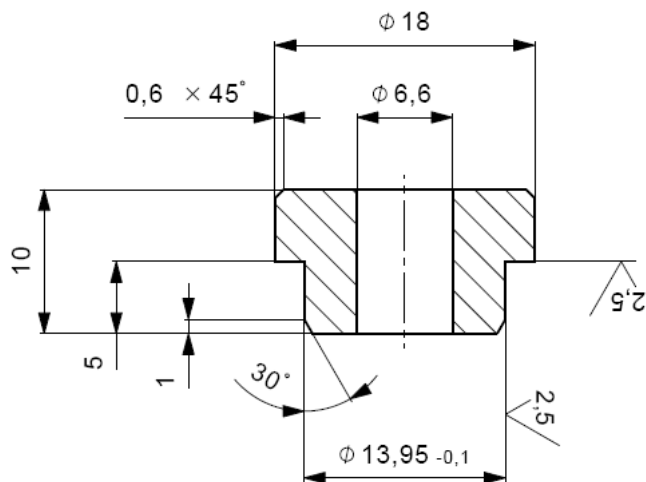


Rys. 4.3. Rysunek wykonawczy badanej rurki.

Dodatkowo wykonano także modele elementów montażowych (docisków) w celu zapewnienia stabilności oraz precyzji montażu tych elementów w uchwycie spawalniczym (rys. 4.4 – 4.5).



Rys. 4.4. Rysunek wykonawczy docisku kołnierza



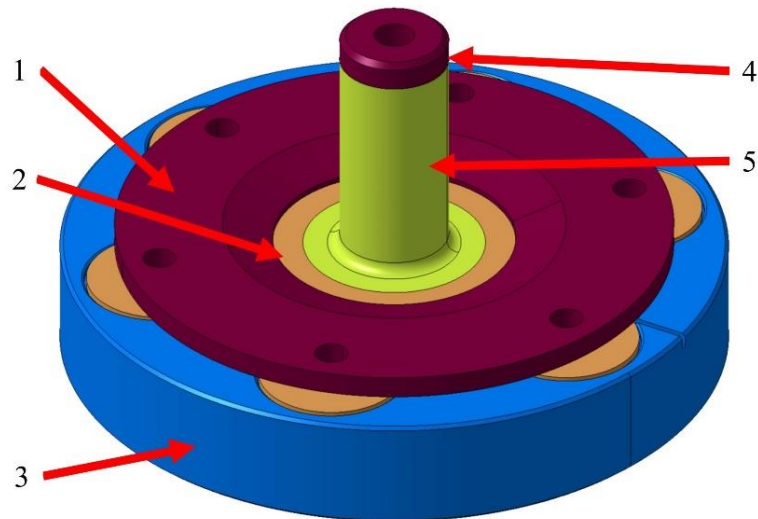
Rys. 4.5. Rysunek wykonawczy docisku rurki

Elementy montażowe wraz z kołnierzem i rurką zostały poddane dalszym badaniom.



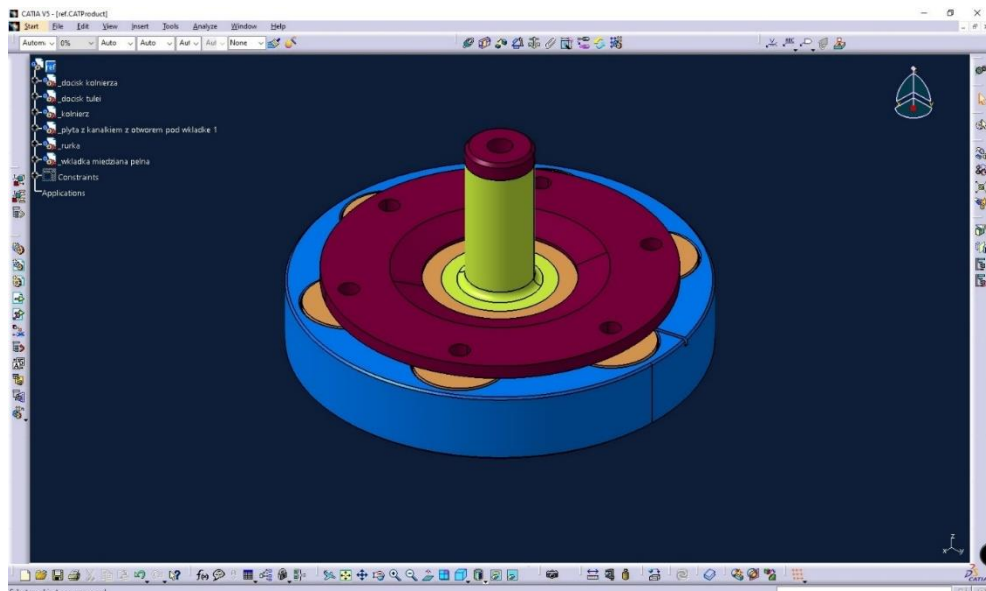
## 4.2. Opracowanie prototypu koncepcyjnego

Kolejny etap badań polegał na opracowaniu prototypu koncepcyjnego (rys. 4.6), który w uproszczony sposób przedstawia założenia konstrukcyjne i funkcjonalne wyrobu [1].



Rys. 4.6. Model prototypu koncepcyjnego uchwytu: (1) docisk kołnierza, (2) kołnierz, (3) uchwyt, (4) docisk rurki, (5) rurka

Model został opracowany w programie Catia V5 (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Widok prototypu koncepcyjnego uchwytu w programie Catia V5

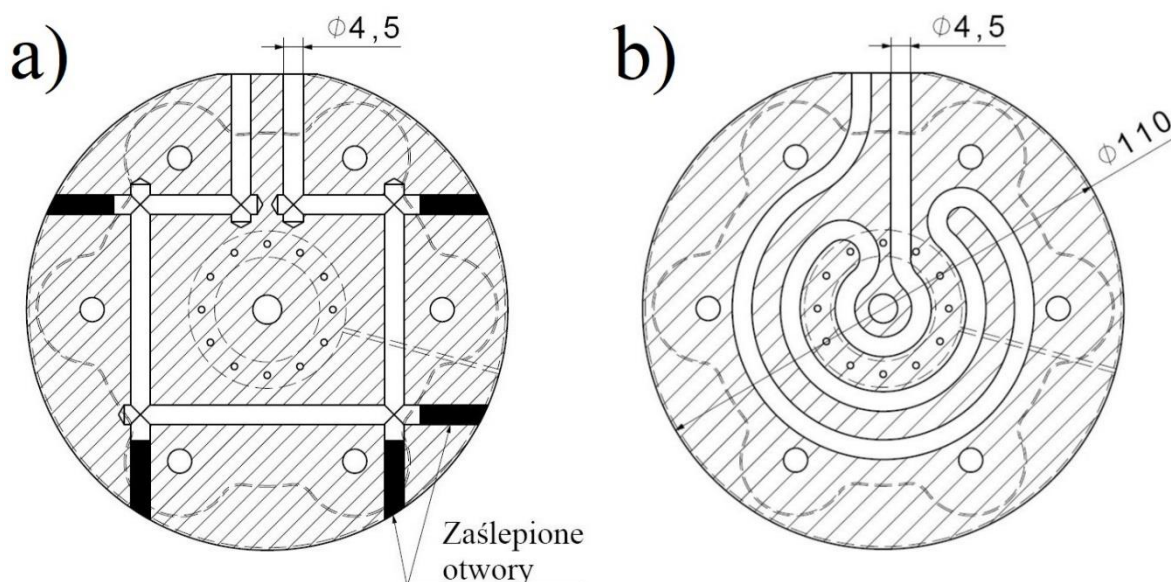
Proces modelowania oraz złożenia wszystkich elementów pozwolił na dokładne dopasowanie i uniknięcie ewentualnych niezgodności. Tolerancja wykonawcza H7/d8 na

kołnierzu i rurce, pozwoliła na bezproblemowy montaż pozostawiając jednocześnie odpowiednią szczelinę spawalniczą.

### 4.3. Opracowanie prototypu numerycznego

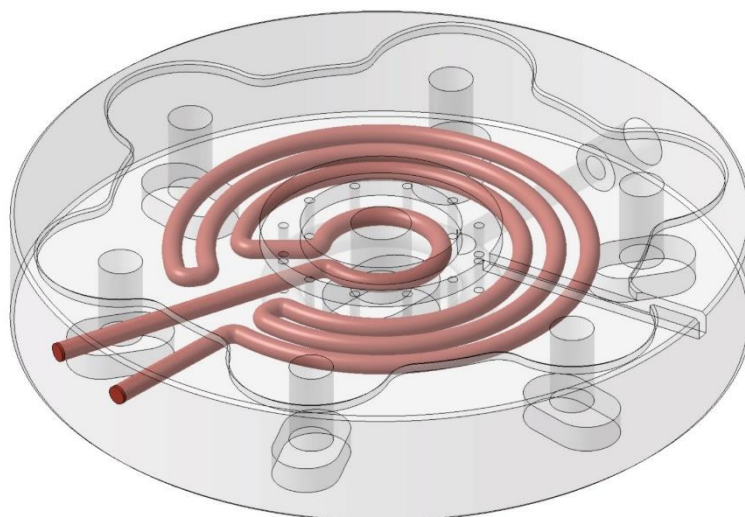
W dalszej części badań opracowano prototyp numeryczny. Jest to opracowany w środowisku programowym model, który pozwala na przeprowadzenie wizualizacji oraz symulacji termicznych i symulacji obciążeń, a także przygotowanie danych do produkcji oraz weryfikacji opartej na systemach wspomaganych komputerowo [1].

Uchwyty spawalnicze najczęściej wykonywane są w sposób konwencjonalny prowadząc do dużych strat materiału powstałego w wyniku obróbki ubytkowej. Chcąc wykonać kanały konformalne w tradycyjny sposób, należy wiercić kilka otworów ślepych przecinających się pod różnymi kątami, by ostatecznie zaślepić wejścia, które nie zostaną wykorzystane (rys. 4.8).

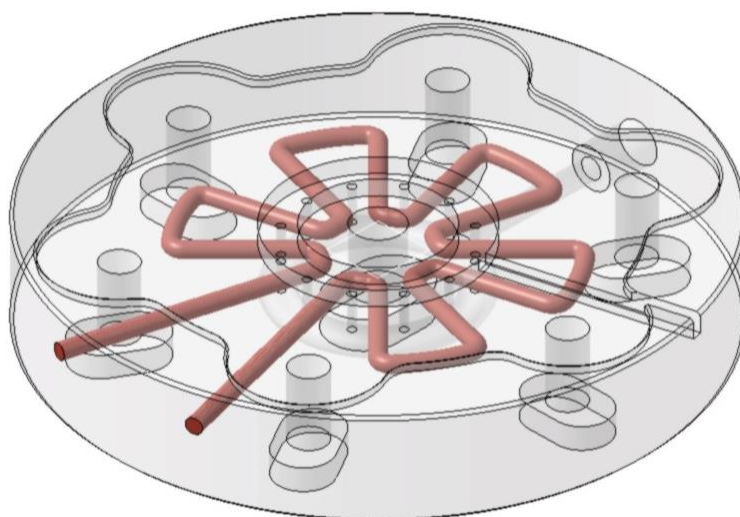


Rys. 4.8. Porównanie wytwarzania kanałów chłodzących: a) konwencjonalnie, b) z zastosowaniem nowoczesnych technik wytwarzania

W celu optymalizacji geometrii kanałów wewnętrznym przeprowadzono symulacje z różnymi konfiguracjami. Porównano układ ślimakowy (rys. 4.9), czyli kanały w kształcie spirali mające na celu równomierne rozprowadzanie ciepła, oraz układ promieniowy (rys. 4.10), gdzie kanały rozchodzą się promieniście od środka. Średnice kanałów dobrano zgodnie z gabarytami modelu i części montażowych (przyłącza cieczy), a także na podstawie wskazówek eksperta z firmy EOS, S. Mayer'a, opartych na jego doświadczeniu z formami wtryskowymi [183].



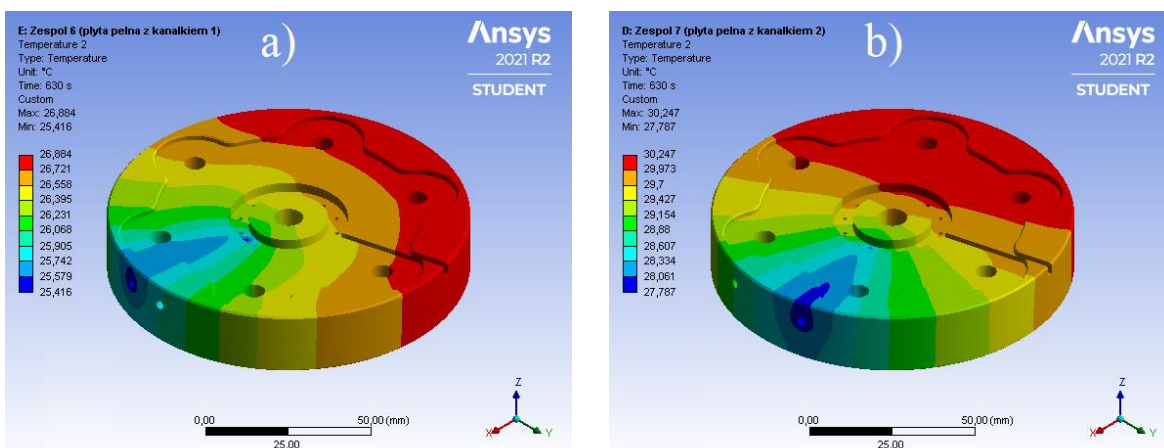
Rys. 4.9. Ślimakowy układ kanałków



Rys. 4.10. Promieniowy układ kanałków

Symulacje przeprowadzono dla kanałów o różnych średnicach, aby ocenić ich wpływ na efektywność chłodzenia i przepływ medium chłodzącego (rys. 4.11).

Warunki brzegowe związane z obciążeniami termicznymi zostały wyznaczone na podstawie wyników wstępnych badań eksperymentalnych przeprowadzonych w Pratt & Whitney Rzeszów. W toku badań zdefiniowano wstępne parametry geometryczne uchwyty, w tym średnicę podstawy wynoszącą  $\text{Ø}110$  mm oraz grubość równą 20 mm. Ponadto, określono średnicę kanału chłodzącego wynoszącą  $\text{Ø}4,5$  mm.



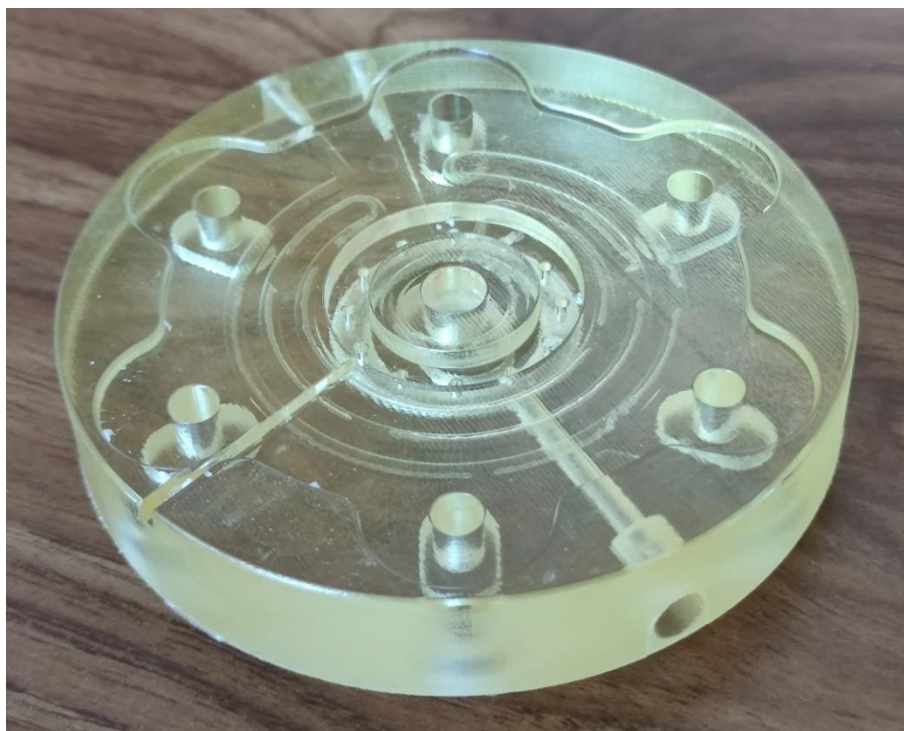
Rys. 4.11. Wstępne symulacje uchwytów: a) dla układu ślimakowego, b) dla układu promieniowego

Symulacje Metodą Elementów Skończonych zostały przeprowadzone w programie ANSYS w wersji 2021 R2, z wykorzystaniem rozszerzenia ACT - Moving Heat Extension, do symulacji procesu spawania. Modele wykonane w programie CATIA V5 zostały zapisane w formacie STP i zaimportowane do środowiska ANSYS Workbench.

#### 4.4. Opracowanie prototypu wizualnego

Czwarty etap badań polegał na opracowaniu prototypu wizualnego. Jest to model fizyczny, który przedstawia gabaryty rzeczywiste (lub w założonej skali), cechy geometryczne, a także kolorystykę lub/i fakturę powierzchni wyrobu [1].

Po wyborze optymalnej geometrii kanałów przystąpiono do wytworzenia demonstratorów (rys. 4.12), które zostały wykonane w technologii PolyJet z materiału roboczego RGD720 oraz materiału podporowego RGD706 na drukarce Stratasys Connex 3 będącej wyposażeniem Katedry Konstrukcji Maszyn, na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa na Politechnice Rzeszowskiej. Drukarkę, którą wykorzystano do wytworzenia demonstratorów przedstawiono na rysunku 4.13.



Rys. 4.12. Demonstrator wykonany w technologii PolyJet



Rys. 4.13. Drukarka Stratasys Connex 3 w pracowni Katedrze Konstrukcji Maszyn

Proces ten pozwolił na wstępną ocenę możliwości wykonania kanałów oraz wczesne wykrycie błędów geometrii, takich jak zbyt skomplikowana geometria kanałów uniemożliwiająca ich wyczyszczenie.

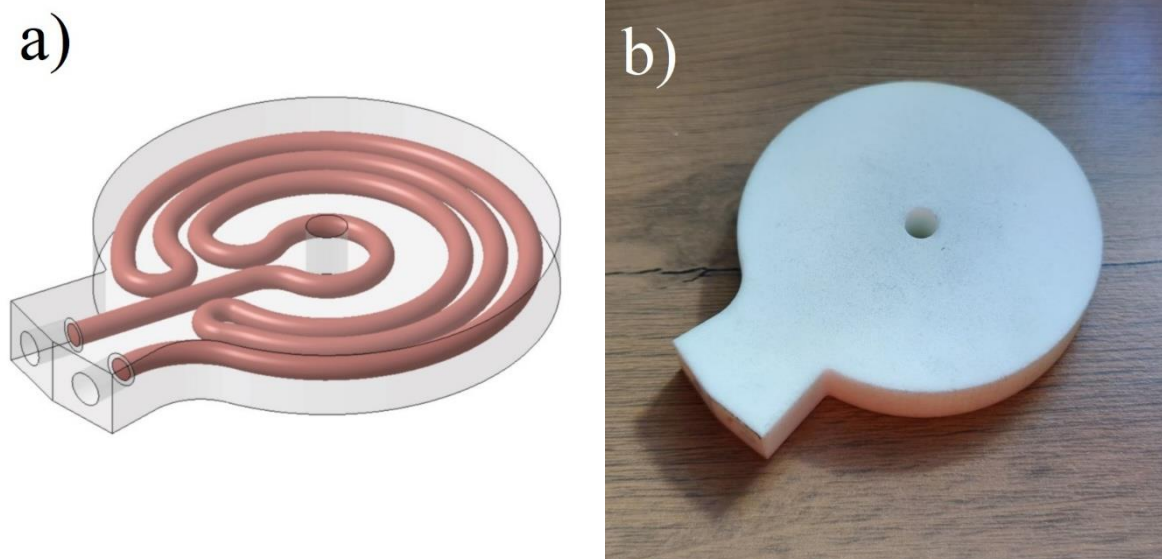
Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano trzy warianty geometrii wewnętrznych kanałków. Dobór średnicy kanałka wynoszącej  $\varnothing 4,5$  mm został dokonany

zgodnie z wymaganiami technicznymi, które w metodzie PBF zalecają unikanie stosowania średnic większych niż 5 mm ze względu na potrzebę stosowania podpór lub modyfikacji geometrii kanałków. Ponadto, określono kształt oraz średnicę kanałka doprowadzającego argon do obszaru spoiny, wynoszącą  $\varnothing 4$  mm.

#### 4.5. Opracowanie prototypu technologicznego

W ramach etapu piątego przystąpiono do przygotowania prototypu technologicznego. Zadaniem prototypu technologicznego jest opracowanie oraz weryfikacja założeń technologicznych dla procesu produkcyjnego danego wyrobu [1].

Opracowany model stanowił fragment docelowego uchwytu, z głównym naciskiem na technologiczność kanałów wewnętrznych (rys. 4.14). Prototyp został wykonany przy użyciu technologii SLS z materiału PA6. Dzięki zastosowaniu tej technologii możliwe było dokładne odwzorowanie zaprojektowanych kanałów wewnętrznych, co pozwoliło na przeprowadzenie dokładnych analiz technologicznych.



Rys. 4.14. Prototyp technologiczny: a) model 3D-CAD, b) prototyp wykonany w technologii SLS z materiału PA6

Analiza potwierdziła, że technologia SLS jest odpowiednim narzędziem do tworzenia prototypów elementów o skomplikowanej geometrii wewnętrznej oraz sprawdzenia technologiczności. Technologia ta, jest zbliżona pod względem zasad wytwarzania elementu do technologii PBF z której ma być wykonany docelowy uchwyt ukazując jednocześnie wszystkie błędy technologiczne, które mogłyby się pojawić w przypadku wykonania na gotowo.

## 4.6. Wykonanie prototypu technicznego

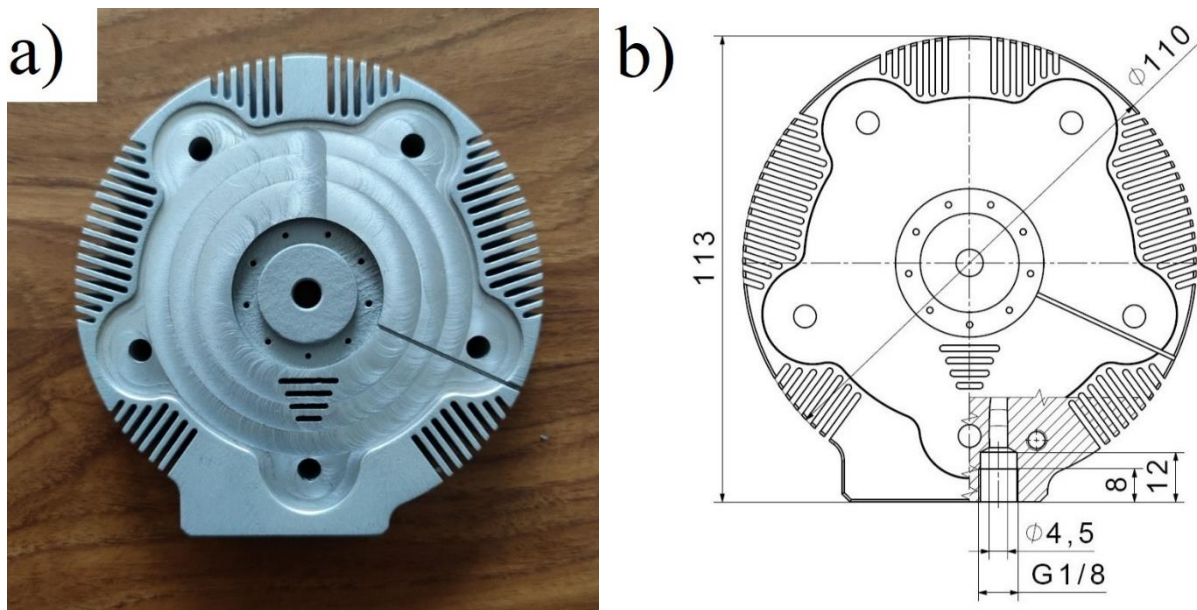
Kolejny etap polegał na opracowaniu prototypu technicznego, który z założenia posiada wszystkie funkcje i wygląd końcowego produktu, co umożliwia testowanie go w rzeczywistych warunkach użytkowania [1].

Po wykonaniu kilkudziesięciu prób i symulacji, prototypy techniczne zdecydowano się wykonać w technologii PBF ze stopu aluminium AlSi10Mg, co pozwoliło na uzyskanie założonej tolerancji na poziomie  $\pm 0,1$  mm. Uchwyty wykonano w standardowej grubości warstwy 0,09mm (rys. 4.15). Modele te wymagały dodatkowej obróbki wykańczającej w obszarze montowania próbek oraz wykonania gwintów, aby zapewnić precyzyjne dopasowanie i funkcjonalność (rys. 4.16). W tym celu na powierzchniach przeznaczonych do obróbki założono naddatki materiałowe wynoszące 1 mm, co umożliwiło osiągnięcie wymaganej dokładności.



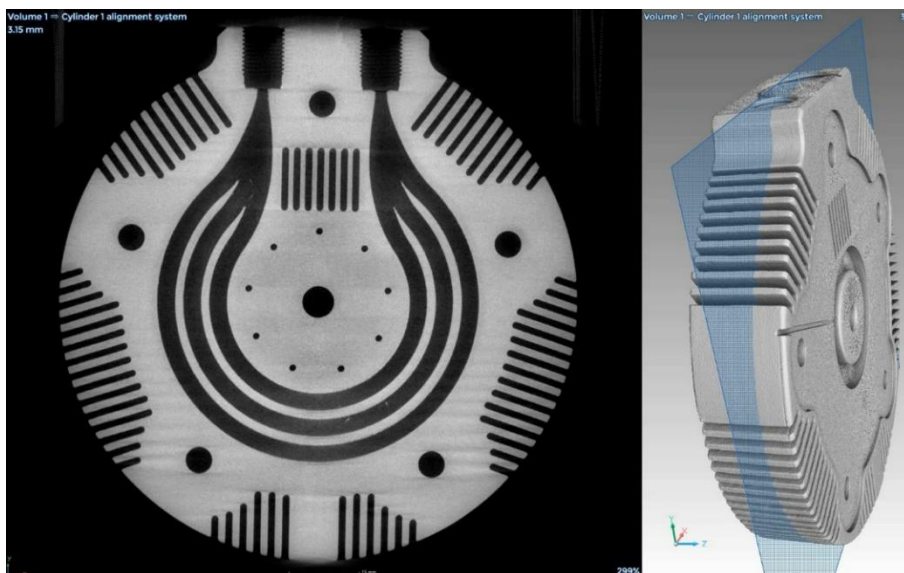
Rys. 4.15. Wydrukowany reprezentatywny uchwyt przed obróbką wykańczającą z materiału AlSi10Mg

Geometria modelu obejmowała również zewnętrzne uźebrowanie, mające na celu zwiększenie powierzchni odprowadzania ciepła.



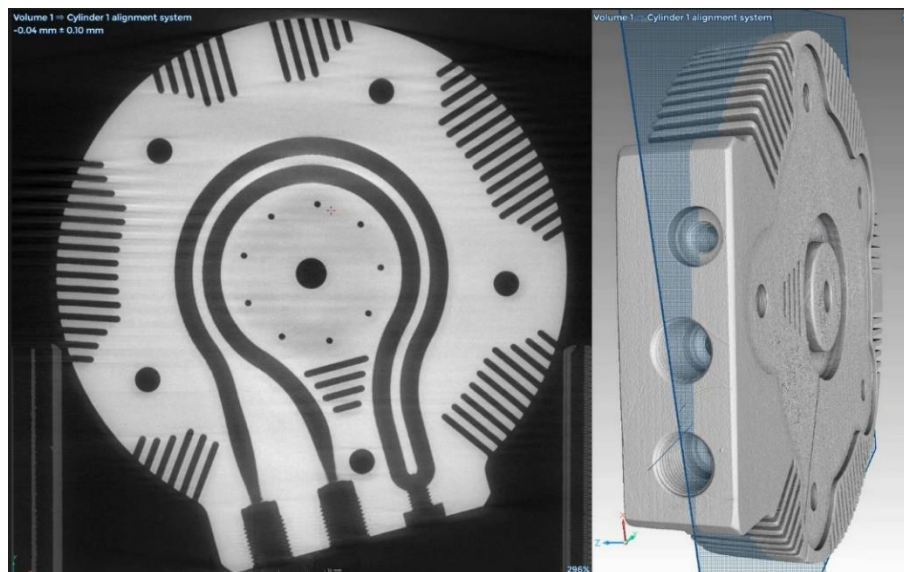
Rys. 4.16. Reprezentatywny uchwyt wykonany w technologii PBF z materiału AlSi10MG: a) uchwyt po obróbce wykańczającej, b) podstawowe wymiary uchwytu

Następnie przeprowadzono kontrolę jakości za pomocą tomografii, co pozwoliło na sprawdzenie w sposób nieniszczący poprawności wykonania wewnętrznych kanałów w uchwytach, w tym ich drożności oraz skuteczności usunięcia proszku (rys. 4.17 - 4.19).

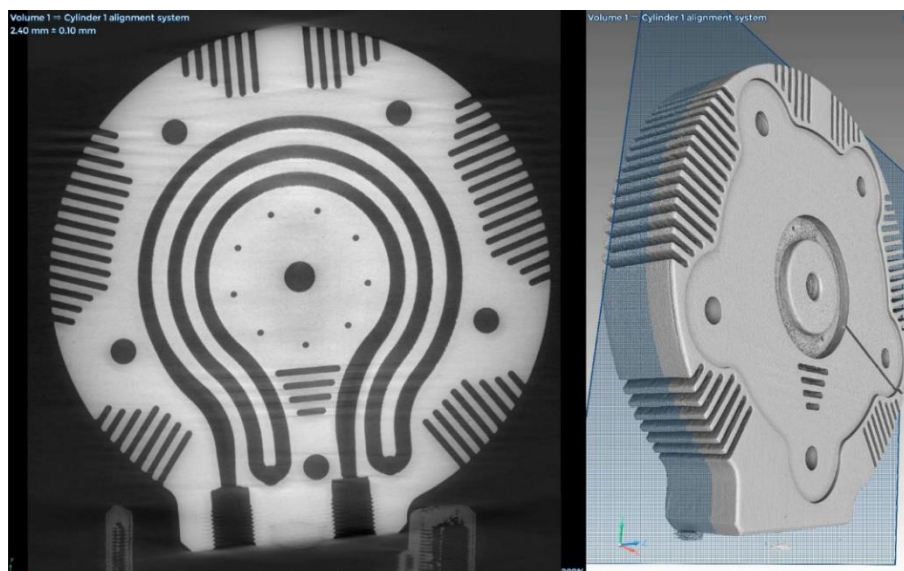


Rys. 4.17. Obraz tomograficzny kanałów uchwytu w wersji 1 w przekroju poprzecznym





Rys. 4.18. Obraz tomograficzny kanałów uchwytu w wersji 2 w przekroju poprzecznym.

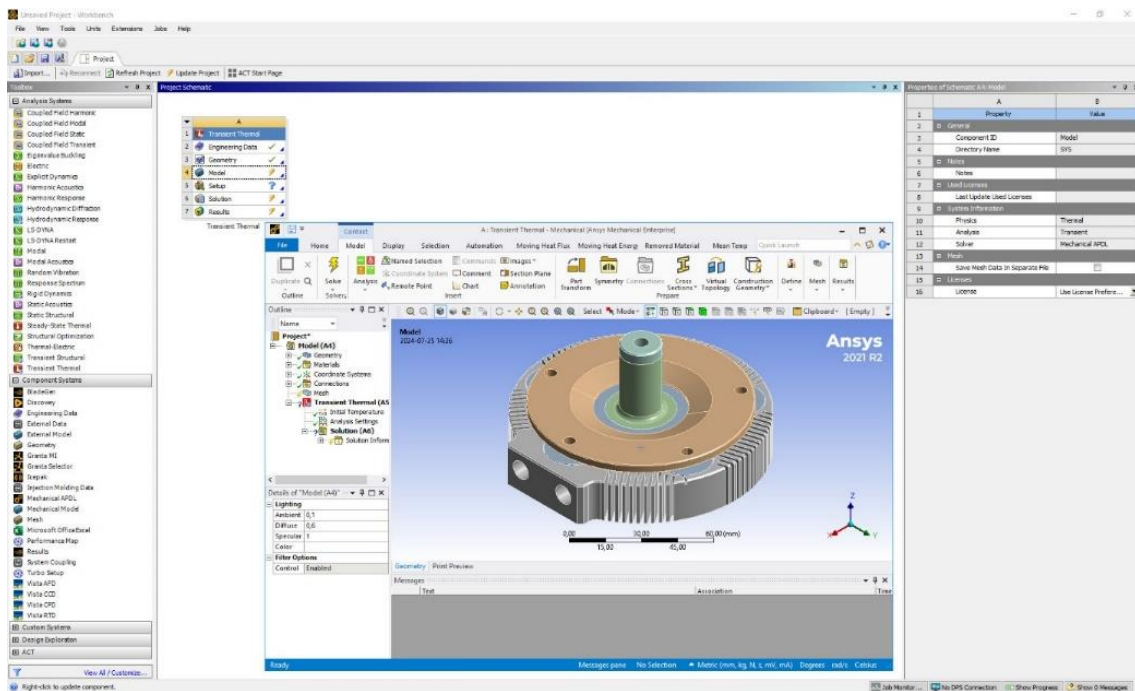


Rys. 4.19. Obraz tomograficzny kanałów uchwytu w wersji 3 w przekroju poprzecznym.

Na opracowanym prototypie technicznym przeprowadzono badania właściwe, które obejmowały: symulacje komputerowe, badania laboratoryjne oraz badania na wydziale produkcyjnym firmy Pratt & Whitney Rzeszów.

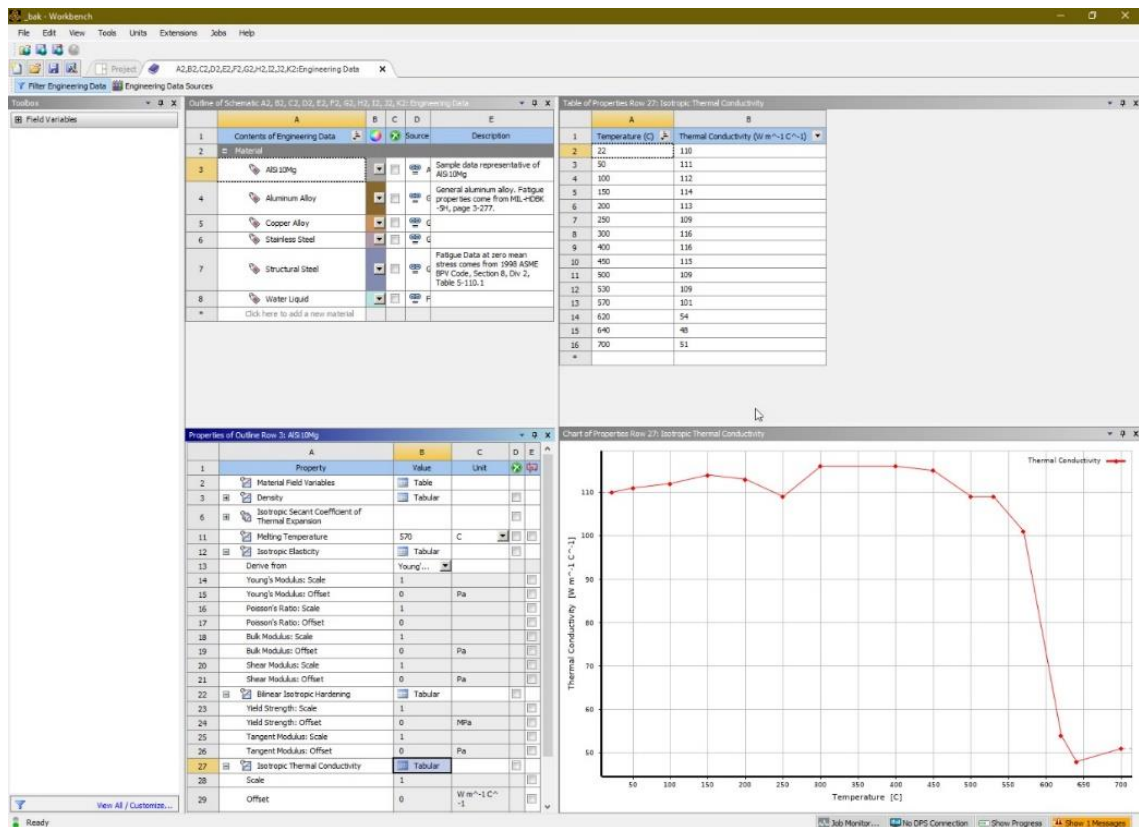
#### 4.7. Przeprowadzenie symulacji komputerowych na prototypie technicznym

Kolejny etap badań koncentrował się na symulacji rozkładu ciepła oraz wytrzymałościowych w uchwycie spawalniczym za pomocą Metody Elementów Skończonych (MES) w programie ANSYS 2021 R2 (rys. 4.20).



Rys. 4.20. Program ANSYS 2021 R2 z widocznym środowiskiem Workbench oraz symulacja Transient Thermal

Metodologia etapu wstępnej symulacji obejmowała kilka kluczowych kroków. Pierwszym z nich było określenie danych materiałowych, przyjętych dla badanych uchwytów. W tym celu posłużono się bazą materiałową programu ANSYS (rys. 4.21), która zawierała dane materiałowe dla aluminium AlSi10Mg, z którego zostały wykonane fizyczne uchwyt. W bazie tej znalazły się także dane materiałowe: miedzi, stali nierdzewnej, stopu aluminium oraz stali konstrukcyjnej, z których zostały wykonane pozostałe elementy wchodzące w skład badanego uchwytu.



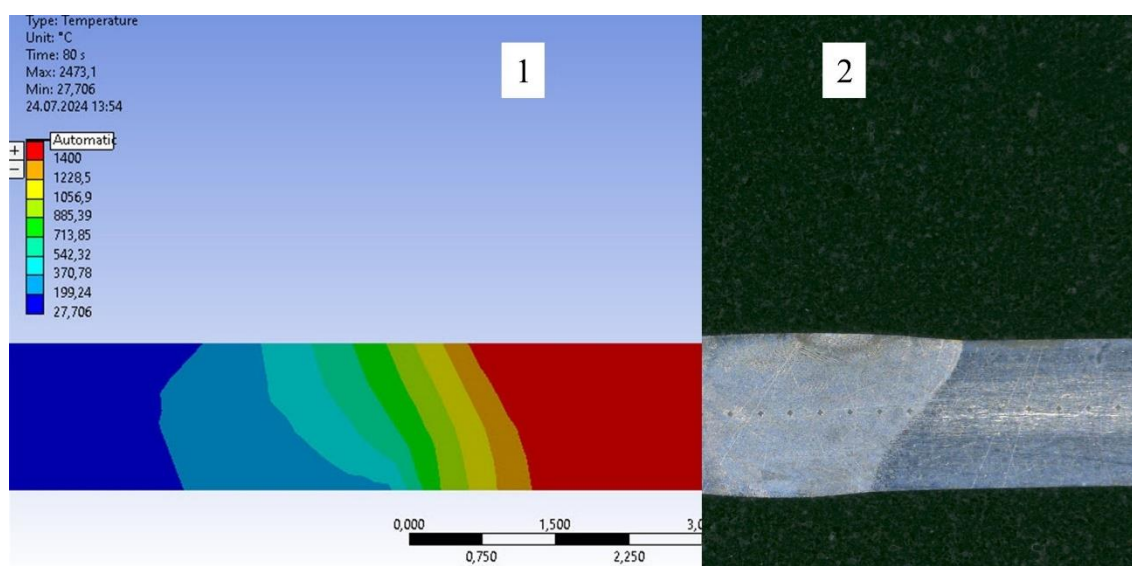
Rys. 4.21. Wartości przewodnictwa cieplnego dla materiału AlSi10Mg w programie ANSYS

Prędkość oraz czas spawania zostały określone na podstawie praktycznych prób przeprowadzonych przez spawacza na próbkach o grubości 1,5 mm wykonanych ze stali nierdzewnej (AISI 304). Pospawana reprezentatywna próbka została przedstawiona na rys. 4.22. Próbka po spawaniu miała wymiary 100x100x1,5 mm.



Rys. 4.22. Pospawana reprezentatywna próbka do celów ustalenia parametrów symulacji

Z kolei promień oraz intensywność źródła ciepła używanego do spawania, zostały określone na podstawie symulacji komputerowych w odniesieniu do badanej próbki (rys. 4.23). Symulacje te miały na celu uzyskanie odpowiedniej temperatury topnienia oraz rozmiaru spoiny.



Rys. 4.23. Próbką: (1) symulacja komputerowa, (2) zgląd metalograficzny pospawanej próbki

W związku z powyższym przyjęto następujące parametry symulacji ruchomego źródła ciepła:

Tab. 4.1 Parametry ruchomego źródła ciepła

Parametr	Wartość	Jednostka
Prędkość	1	mm/s
Promień źródła ciepła	2,5	mm
Intensywność źródła ciepła	15	W/mm <sup>2</sup>
Czas spawania	94	s

Kolejnym etapem było ustalenie parametrów konwekcji podczas symulacji. Konwekcję swobodną o wartości 5 W/m<sup>2</sup> przyjęto jako stałą dla wszystkich symulacji. Z kolei konwekcja wymuszona została przeliczona dla każdego z uchwytów. W przypadku symulacji wytrzymałościowej kluczowym parametrem było ustawienie wartości parametru ciśnienia. Parametr ten przyjęto stały dla wszystkich symulacji na poziomie ciśnienia maksymalnego jakie jest w stanie wytworzyć dobrana chłodnica, czyli 0,3 MPa.

Po określeniu wszystkich parametrów przeprowadzono symulacje komputerowe z użyciem programu ANSYS. Symulacje te miały na celu zweryfikowanie teoretycznych założeń projektu. Przy ich pomocy zasymulowano proces spawania oraz chłodzenia uchwytu z trzema wariantami geometrii wewnętrznej kanałów konformalnych. Dzięki temu możliwe było uzyskanie wstępnych wyników, które posłużyły jako podstawa do dalszych analiz.

Symulacje rozkładu temperatur za pomocą ruchomego źródła ciepła umożliwiły analizę teoretycznych profili temperatur w różnych miejscach uchwytu. Dodatkowo możliwe było zbadanie wpływu wewnętrznego chłodzenia na tempo schładzania poszczególnych uchwytów w odniesieniu zarówno do uchwytu wykonanego metoda druku 3D, ale także do uchwytu wykonanego w konwencjonalny sposób projektowania.

W symulacjach wykorzystano rozszerzenie ACT opisujące ruchome źródło ciepła o charakterystyce Gaussowskiej wg wzoru (1) [184].

$$q = C_2 e^{-\frac{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2]}{C_1^2}} \quad (1)$$

gdzie:

q – strumień ciepła na wybranej powierzchni,

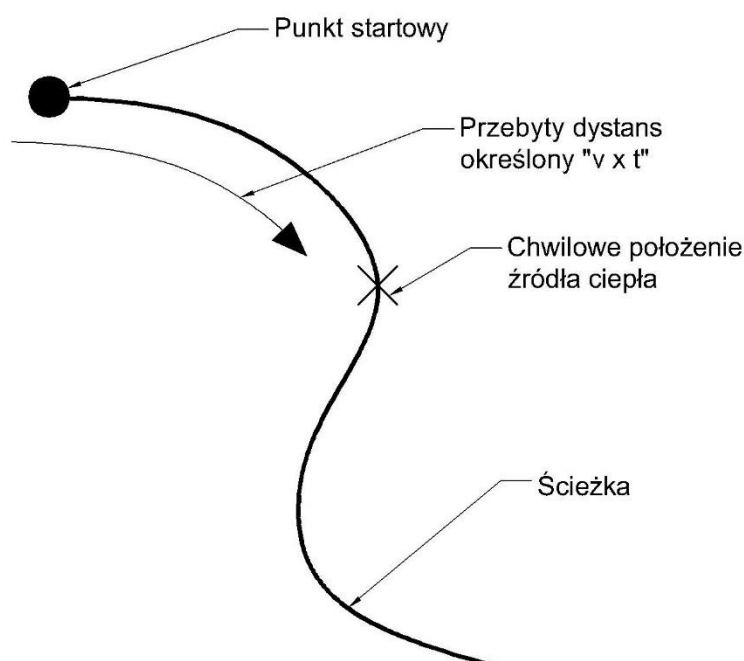
C<sub>1</sub> – promień źródła ciepła,

C<sub>2</sub> – intensywność źródła mocy,

(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) – chwilowa pozycja środka strumienia ciepła, który znajduje się na „ścieżce” w odległości „v x t” od punktu startowego (rys. 4.24),

$v$  – prędkość poruszającego się źródła ciepła,

$t$  – czas.



Rys. 4.24 Schemat ruchomego źródła ciepła [184]

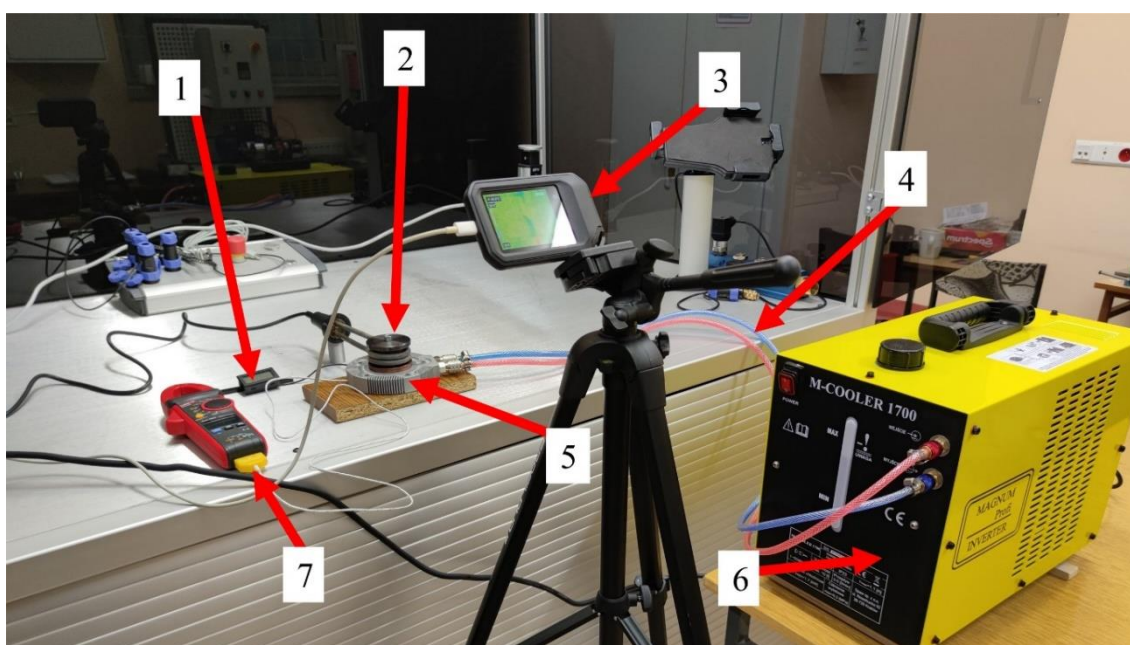
Z kolei symulacja wytrzymałościowa jest kluczowym narzędziem w inżynierii mechanicznej, umożliwiającym ocenę zdolności konstrukcji do wytrzymywania obciążeń jeszcze na etapie projektowania. W symulacji pominięto wszystkie elementy złączne oraz kołnierz z tulejką i dociski. Decyzja ta jest podyktowana chęcią uproszczenia modelu oraz skupieniu się na analizie wytrzymałościowej uchwytów na zadane ciśnienie. Elementy pominięte w symulacji mogą wprowadzać dodatkowe zmienne, takie jak naprężenia skupione, które mogą znacząco wpływać na wyniki symulacji. Ich pominięcie pozwala na bardziej precyzyjną ocenę wpływu samego ciśnienia na wytrzymałość uchwytu.

Symulacja ciśnienia koncentruje się na analizie naprężeń i odkształceń wywołanych poprzez działające na kanałki wewnętrzne ciśnienie. Kluczowe aspekty analizy obejmują rozkład naprężeń oraz identyfikację obszarów maksymalnych naprężeń, które mogą być potencjalnymi miejscami pęknięć. W krytycznych obszarach uchwytu, również istotna jest ocena odkształceń sprężystych i plastycznych konstrukcji. Wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa uchwytów, stanowi kluczowy element symulacji poprzez analizę bezpieczeństwa, która polega na porównaniu uzyskanych naprężeń z granicą plastyczności i wytrzymałością przyjętego materiału na rozciąganie.

## 4.8. Przeprowadzenie badań laboratoryjnych na prototypie technicznym

Kolejny etap stanowiły eksperymenty laboratoryjne, w ramach, których zastosowano element grzewczy jako zastępstwo rzeczywistego procesu spawania. Etap ten umożliwił precyzyjne kontrolowanie parametrów grzania podczas prób, co pozwoliło na zebranie danych, które mogły zostać porównane z wynikami uzyskanymi w symulacji MES. Badania te pozwoliły na walidację teoretycznych modeli oraz na weryfikację założeń przyjętych w symulacji.

Aby zrealizować przedstawione cele należało przeprowadzić kilka kluczowych kroków. Pierwszym z nich było przygotowanie stanowiska badawczego (rys. 4.25).

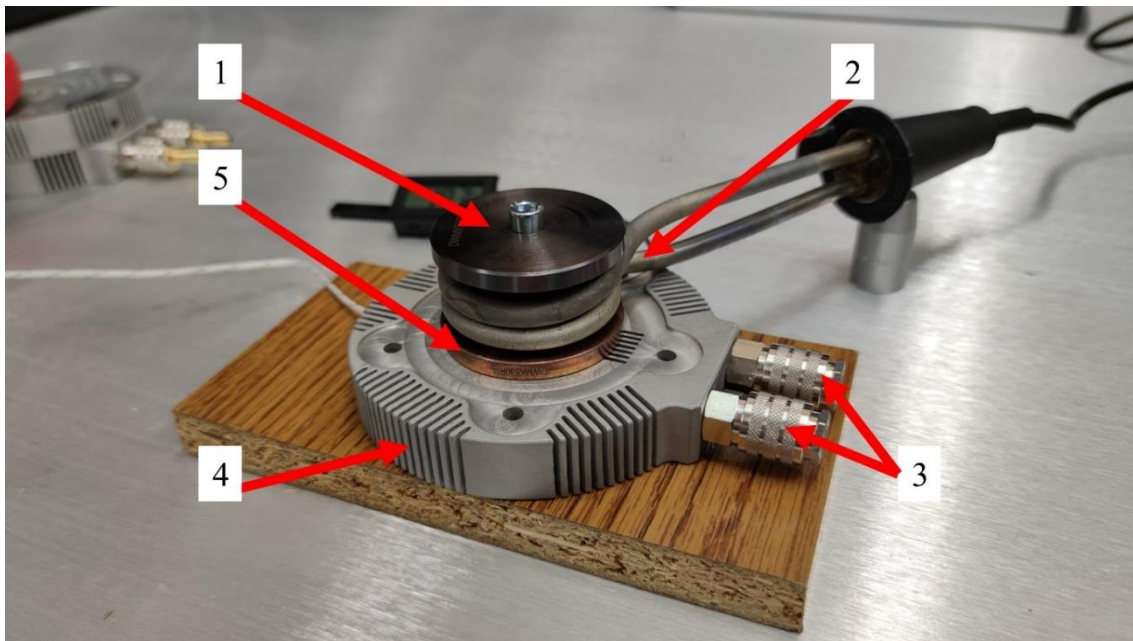


Rys. 4.25. Stanowisko badawcze: (1) wskaźnik czujnika umieszczonego wewnątrz uchwytu, (2) element grzewczy, (3) kamera termowizyjna, (4) przewody doprowadzające chłodziwo, (5) badany uchwyt, (6) chłodnica, (7) wskaźnik czujnika umieszczonego w kanale argonowym

Stanowisko to składało się ze specjalnie zaprojektowanego elementu grzewczego, kontrolnej kamery termowizyjnej, badanego uchwytu, chłodnicy wraz z przewodami (doprowadzającym i odprowadzającym ciecz z uchwytu) oraz dwóch czujników rejestrujących temperaturę.

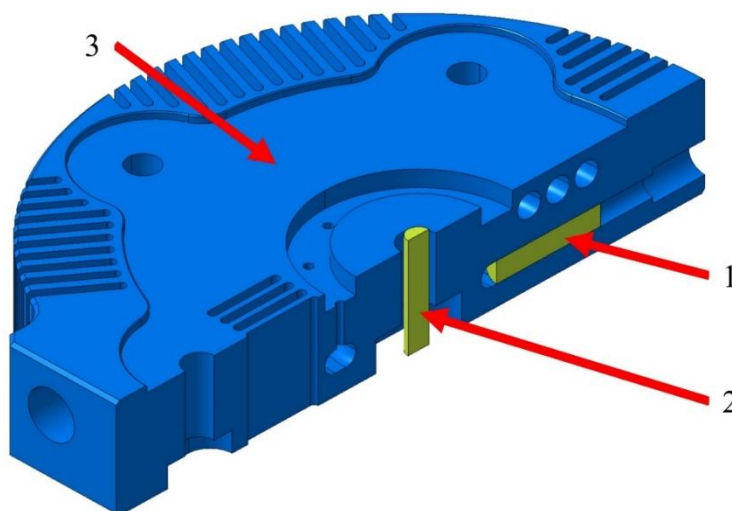
Specjalnie zaprojektowany element grzewczy (rys. 4.26) składał się z grzałki nurkowej Eliko GN 0,9 o mocy znamionowej 900 W i sprawności ok 56%, bloku cieplnego wykonanego z miedzi oraz elementów montażowych, a jego zadaniem było przekazanie ciepła z grzałki do

uchwyty. Element grzewczy został umiejscowiony na uchwycie w miejscu największego oddziaływania temperatury wytworzonej w procesie spawania.



Rys. 4.26. Element grzewczy: (1) elementy montażowe, (2) grzałka, (3) załącza przyłączeniowe, (4) uchwyt, (5) blok cieplny

Do zbierania danych pomiarowych wykorzystano 2 czujniki temperatury. Pierwszy z nich (o zakresie pomiaru od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $110^{\circ}\text{C}$ ) umieszczony był centralnie wewnątrz uchwytu, drugi (o zakresie pomiaru o  $0^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$ ) doprowadzony był poprzez kanał argonowy do obszaru znajdującego się najbliżej spoiny (rys. 4.27).



Rys. 4.27. Schemat umiejscowienia czujników temperatury: (1) czujnik umiejscowiony w kanale argonowym, (2) czujnik umiejscowiony wewnątrz uchwytu, (3) uchwyt



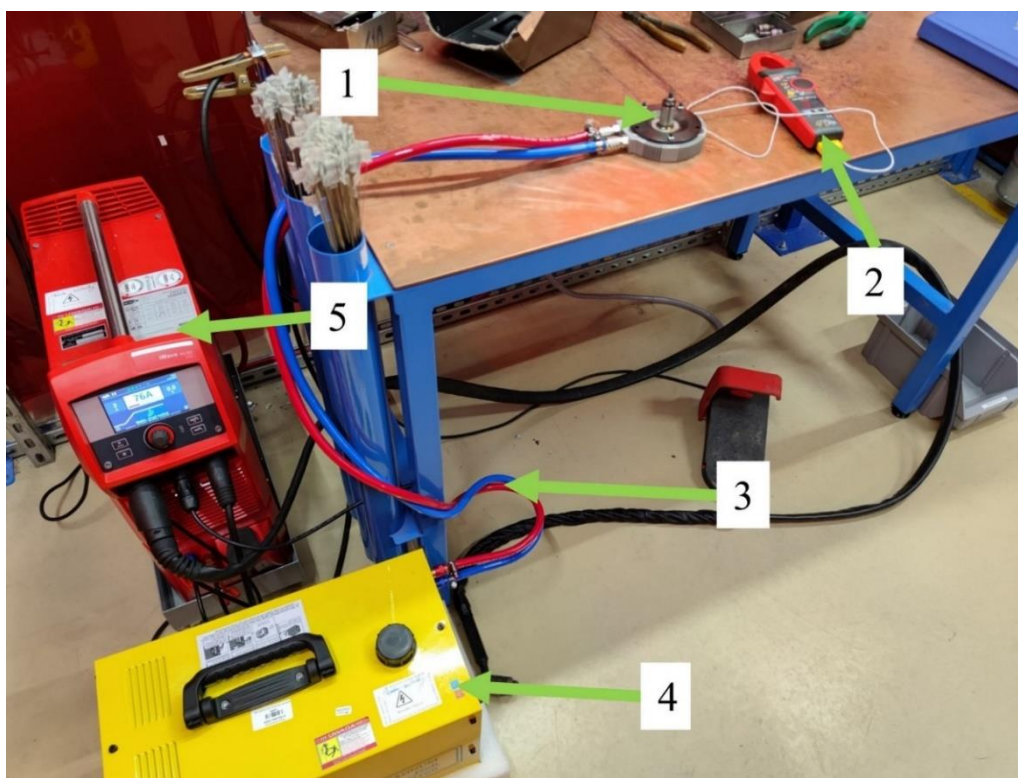
Urządzeniem wprowadzającym ciecz w obieg była typowa chłodnica spawalnicza Magnum M-Cooler 1700, charakteryzująca się maksymalną mocą 1700 W, przepływem 3-5 l/min oraz ciśnieniem wylotowym 0,3 MPa.

Uchwyty nagrzewano do temperatury 150°C, którą zmierzono przy pomocy czujnika umieszczonego w kanale argonowym. Dane pomiarowe były zapisywane w programie Excel, co 1 minutę przez 10 minut oraz dodatkowo rejestrowane poprzez nagrywanie procesu w formie wideo.

#### 4.9. Przeprowadzenie badań na prototypie technicznym na wydziale produkcyjnym

Dziewiąty etap badań obejmował próby przeprowadzone na wydziale produkcyjnym, gdzie rzeczywiste procesy spawania były realizowane na próbkach w warunkach produkcyjnych. Celem tego etapu było zweryfikowanie wyników symulacji oraz badań laboratoryjnych w kontekście rzeczywistych warunków przemysłowych, co pozwoliło na ocenę praktycznej skuteczności opracowanych modeli oraz na identyfikację ewentualnych rozbieżności pomiędzy wynikami teoretycznymi a praktycznymi.

Przed przystąpieniem do badań, przygotowano zostało odpowiednie stanowisko (rys. 4.28).



Rys. 4.28. Stanowisko badawcze na wydziale produkcyjnym: (1) uchwyt z zamontowaną próbką, (2) rejestrator temperatury, (3) przewody doprowadzające i odprowadzające ciecz, (4) chłodnica, (5) spawarka

Stanowisko do przeprowadzenia prób na wydziale produkcyjnym składało się z podobnych elementów jak to wykonane do przeprowadzenia badań laboratoryjnych. Ze względu na montaż spawanych próbek, niemożliwe było wykorzystanie czujnika znajdującego się wewnątrz uchwytu. Dla każdego z uchwytów przeprowadzono 5 procesów spawania (łącznie 15). Podczas tych badań temperatura rejestrowana była tylko poprzez czujnik znajdujący się w kanale argonowym. Pomiary zbierane były co 1 minutę przez 10 minut od momentu zakończenia spawania. Podobnie jak poprzednio dane zapisywane były w programie Excel oraz nagrywane w formie wideo. Do procesu spawania wykorzystana została spawarka Fronius iWave 230i AC/DC.

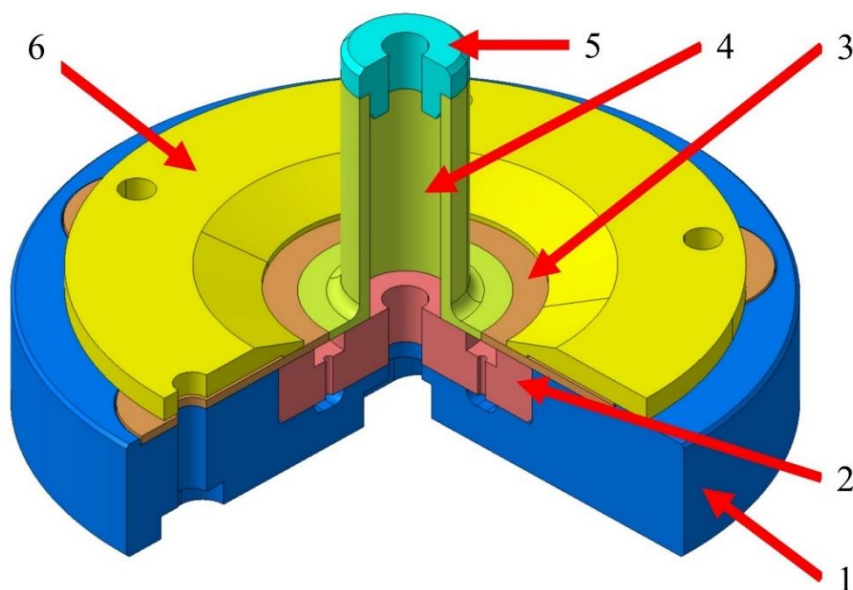
#### **4.10. Analiza uzyskanych wyników i wyciągnięcie wniosków**

Ostatni etap stanowił analizę i podsumowanie badań empirycznych. Przeprowadzony proces badawczy pozwolił na osiągnięcie celu pracy, weryfikację postawionej hipotezy, wyciągnięcie wniosków oraz opracowanie propozycji dalszych kierunków badań, które w przyszłości mogą zostać zrealizowane.

## 5. REALIZACJA BADAŃ

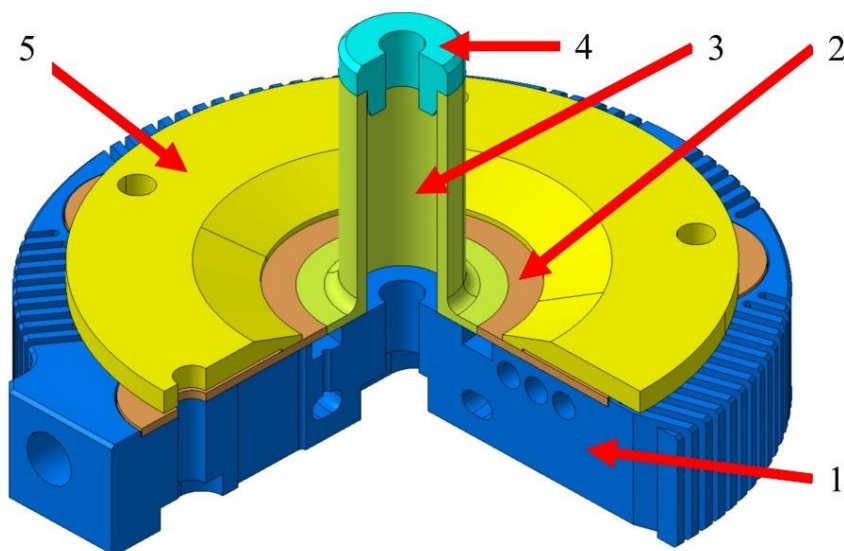
### 5.1. Opis modeli badawczych

Modele badawcze posłużyły w symulacji do analizy tempa chłodzenia uchwytów w odniesieniu do standardowo projektowanego uchwytu spawalniczego, zamodelowanego jako model referencyjny. Model referencyjny widoczny na rysunku 5.1 reprezentuje typowy uchwyt składający się z aluminiowego korpusu oraz centralnej wkładki miedzianej, a także uwzględnia dodatkowe elementy, takie jak dociski elementów spawanych.



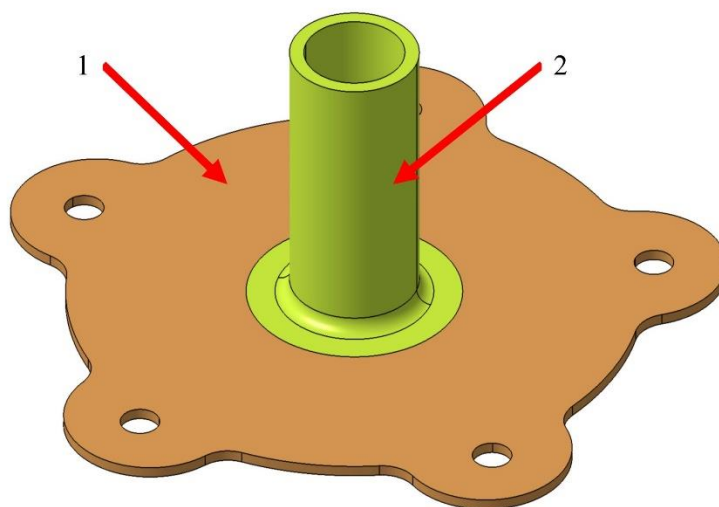
Rys. 5.1. Model 3D-CAD konwencjonalnego uchwytu spawalniczego: (1) korpus, (2) miedziana wkładka, (3) kołnierz, (4) rurka, (5) docisk rurki, (6) docisk kołnierza

Zaproponowane nowe rozwiązanie (rys. 5.2) zostało pozbawione miedzianej wkładki, natomiast zawiera kanałki wewnętrzne, służące do przepływu cieczy, poprawiając przy tym tempo chłodzenia całego uchwytu. Dodatkowym elementem usprawniającym proces studzenia uchwytu są radiatory rozmieszczone na obwodzie uchwytu.



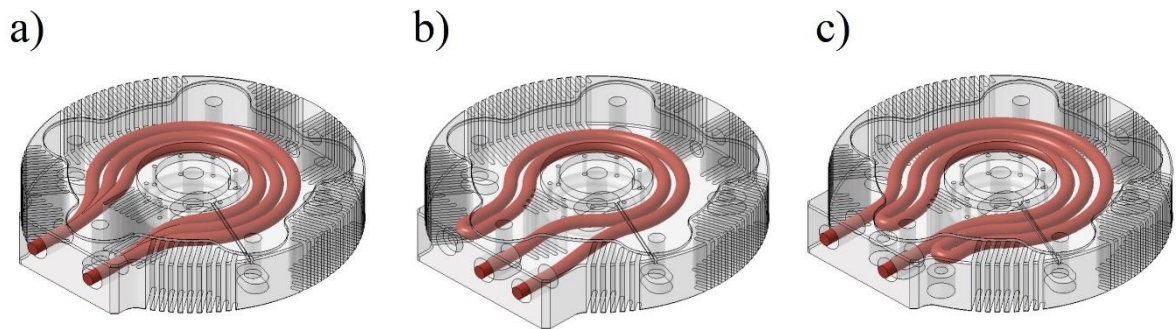
Rys. 5.2. Model 3D-CAD badanego uchwytu spawalniczego z wykonanymi wewnętrznymi kanałami chłodzącymi: (1) uchwyt, (2) kołnierz, (3) rurka, (4) docisk rurki, (5) docisk kołnierza

Elementami spawanymi były tuleja oraz kołnierz (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Model 3D-CAD: (1) kołnierz, (2) tulejka

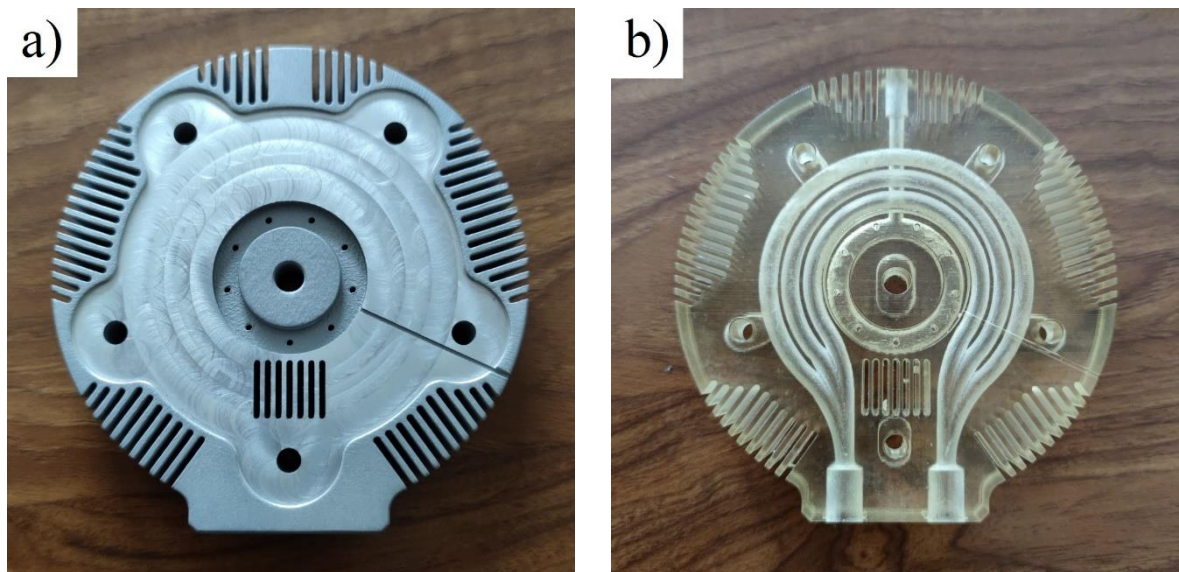
Badanymi przedmiotami są uchwyty spawalnicze, które stanowią składową część całego przyrządu spawalniczego lub też mogą być samodzielnym przyrządem spawalniczym. Elementy te zostały wykonane w technologii PBF z materiału AlSi10Mg. Uchwyty posiadają wewnętrzne kanały konformalne, zamodelowane w trzech wariantach (rys. 5.4), które mają za zadanie poprawić odprowadzanie ciepła powstającego w wyniku spawania poprzez wymuszony przepływ cieczy. Dodatkowym elementem mogącym poprawić prędkość odprowadzania nagromadzonego ciepła są radiatory umieszczone na obwodzie uchwytów.



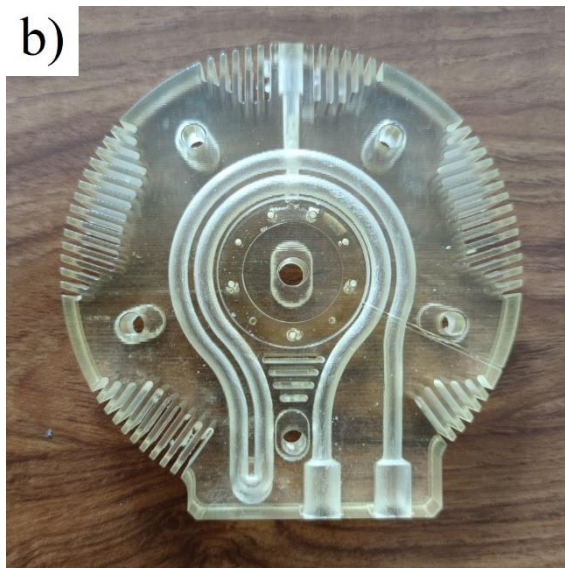
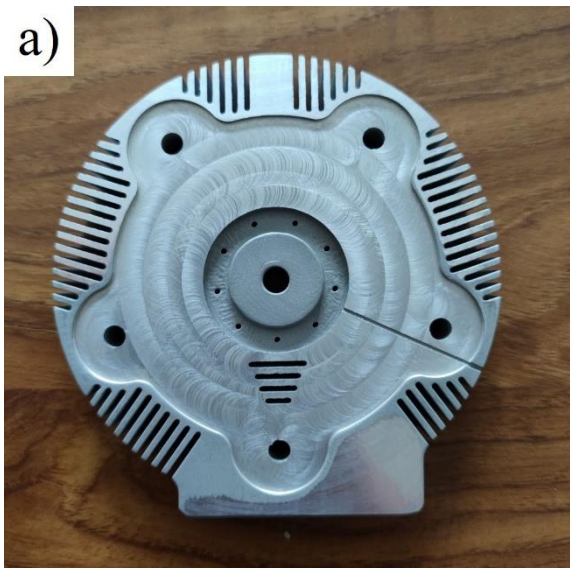
Rys. 5.4. Zamodelowane uchwyty wraz z kanałami chłodzącymi: a) w wersji 1, b) w wersji 2, c) w wersji 3

Na podstawie wyników badań i symulacji ustalono średnicę kanałka na  $\text{Ø}4,5$  mm. Dobór takiej średnicy jest podyktowany specyfiką procesu PBF, w którym kanały wewnętrzne o średnicy do  $\text{Ø}5$  mm mogą być wytwarzane bez konieczności stosowania podpór, co upraszcza proces technologiczny.

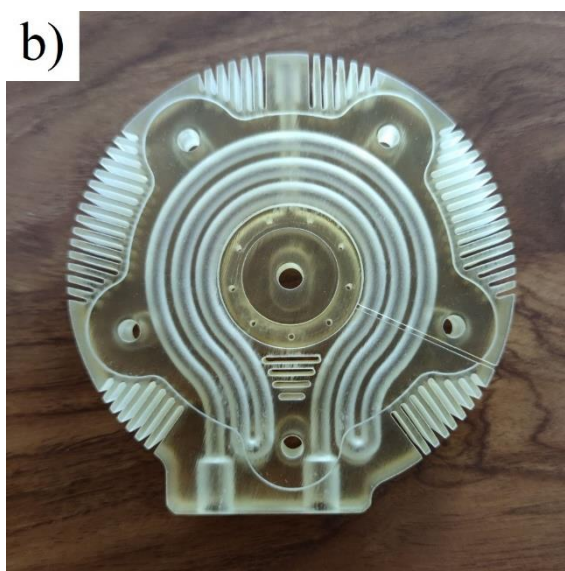
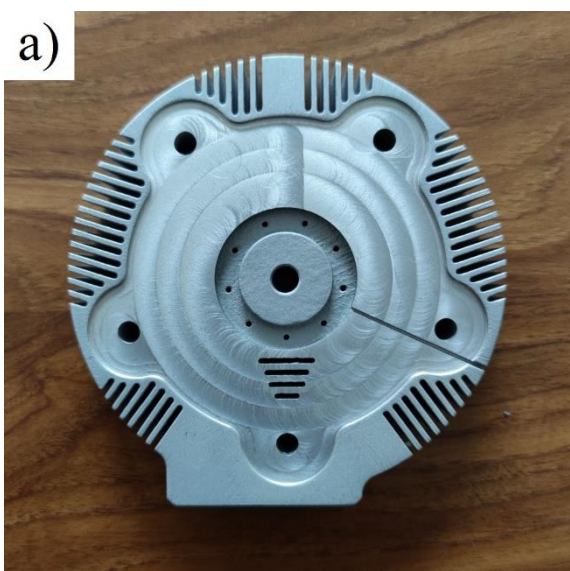
W celu wizualizacji geometrii kanałów wewnętrznych wykonano poglądowe modele w technologii PolyJet, która charakteryzuje się możliwością wykorzystania przezroczystych żywic, umożliwiając pokazanie struktur wewnętrznych (rys. 5.5 - 5.7).



Rys. 5.5. Badany uchwyt w wersji 1: a) wykonany w technologii PBF, b) wykonany w technologii PolyJet



Rys. 5.6. Badany uchwyt w wersji 2: a) wykonany w technologii PBF, b) wykonany w technologii PolyJet



Rys. 5.7. Badany uchwyt w wersji 3: a) wykonany w technologii PBF, b) wykonany w technologii PolyJet

Warunki brzegowe wykorzystane do analizy wytrzymałościowej oraz rozkładu ciepła badanych modeli numerycznych wynikały z:

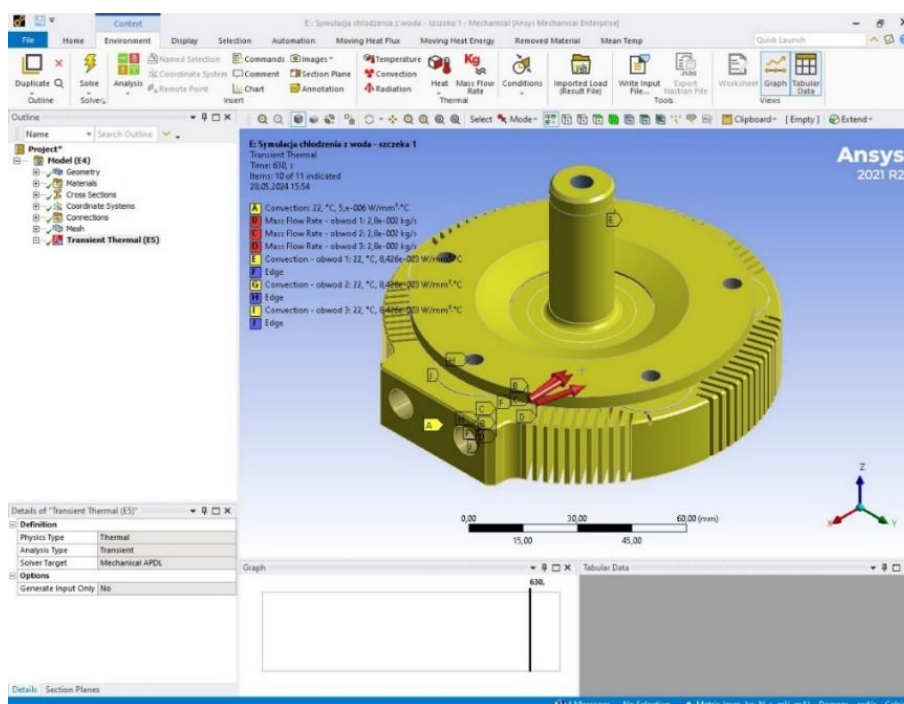
- maksymalnego ciśnienia wytworzonego przez chłodnicę,
- maksymalnego przepływu wytworzonego przez chłodnicę,
- parametrów spawania,
- konwekcji swobodnej,
- konwekcji wymuszonej.

Parametry te były stałe i niezmiennie dla wszystkich symulacji.

## 5.2. Symulacje MES

### 5.2.1. Symulacja rozkładu ciepła i tempa chłodzenia

Omawiany etap badawczy miał na celu ocenę zasadności podjęcia pracy badawczej oraz uzyskanie wstępnych wyników, które mogłyby potwierdzić słuszność wybranego tematu. W ramach tego etapu przeprowadzono 7 symulacji komputerowych w programie ANSYS. Symulacje w głównej mierze dotyczyły badania rozkładu ciepła w uchwycie po spawaniu w stanie swobodnym oraz z wymuszonym wewnętrznym obiegiem cieczy (rys. 5.8).



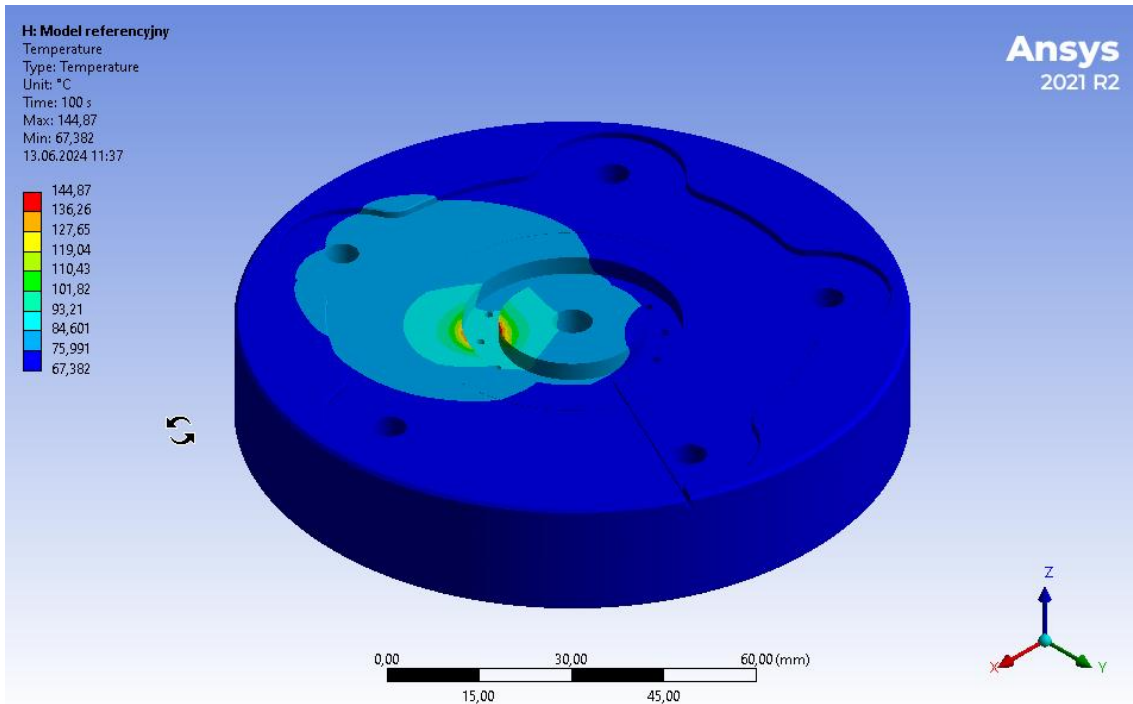
Rys. 5.8. Widok środowiska Transcient Thermal w programie ANSYS

Pierwsza część badań tego etapu obejmowała szczegółowe symulacje rozkładu ciepła w uchwycie spawalniczym za pomocą symulacji wykonanych w programie ANSYS. Symulacje przeprowadzono dla czterech różnych modeli uchwytów, aby ocenić wpływ konstrukcji oraz układów chłodzenia na efektywność odprowadzania ciepła.

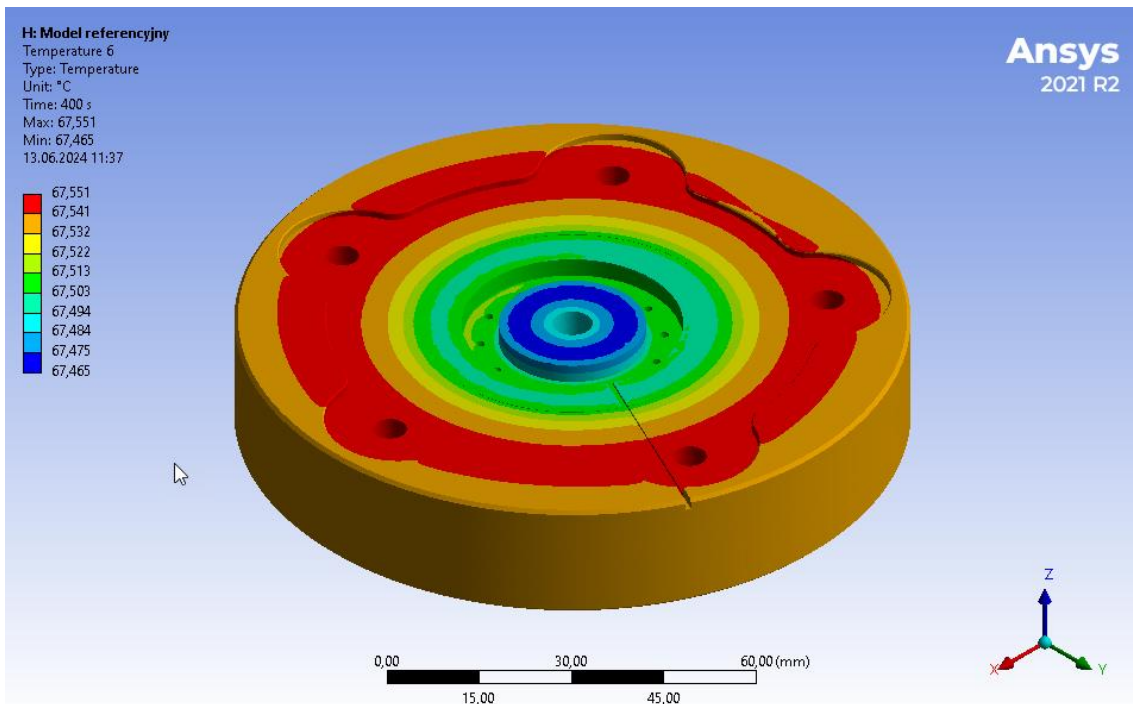
Pierwszy model (rys. 5.1), pełniący rolę referencyjną, został zaprojektowany zgodnie z powszechną zasadą konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego, składał się z aluminiowego korpusu oraz miedzianej wkładki. Modele badawcze (rys. 5.2) zostały zaprojektowane w nowoczesny sposób, umożliwiając ich wydrukowanie, i wyposażone w różne układy wewnętrznych kanałów chłodzących.

Na rysunkach 5.9 - 5.20 zaprezentowano wyniki symulacji chłodzenia swobodnego w czasie 600s od zakończenia spawania.

### 5.2.1.1. Chłodzenie swobodne

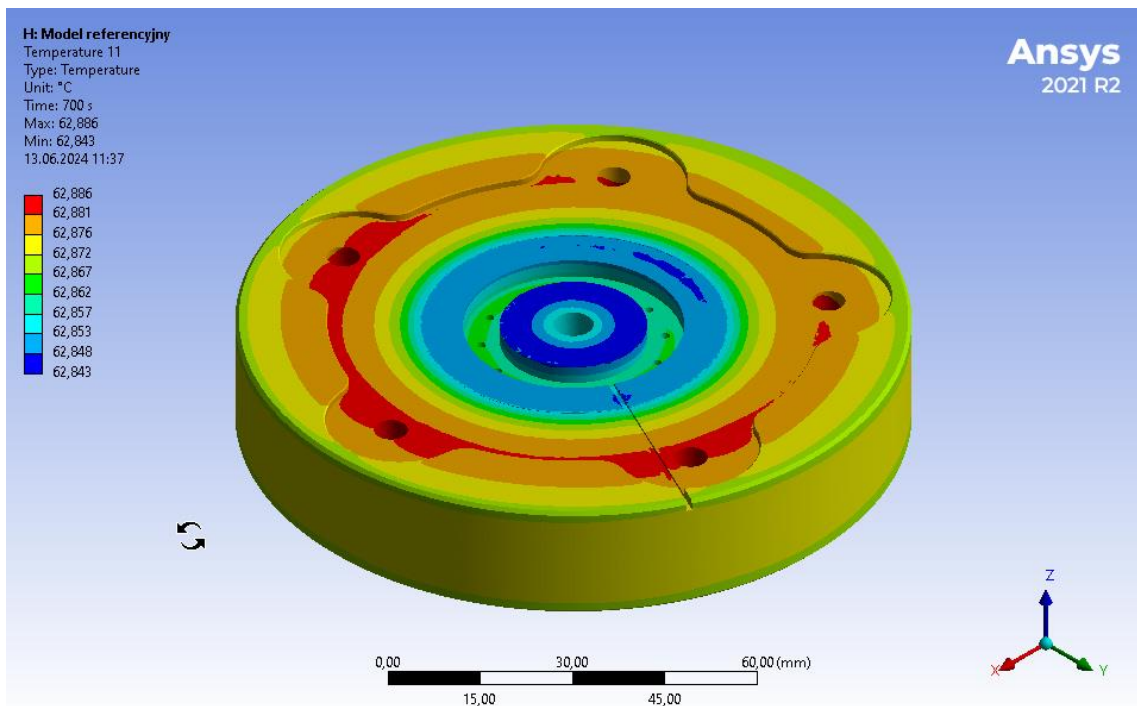


Rys. 5.9. Rozkład temperatury w modelu referencyjnym podczas chłodzenia swobodnego po spawaniu

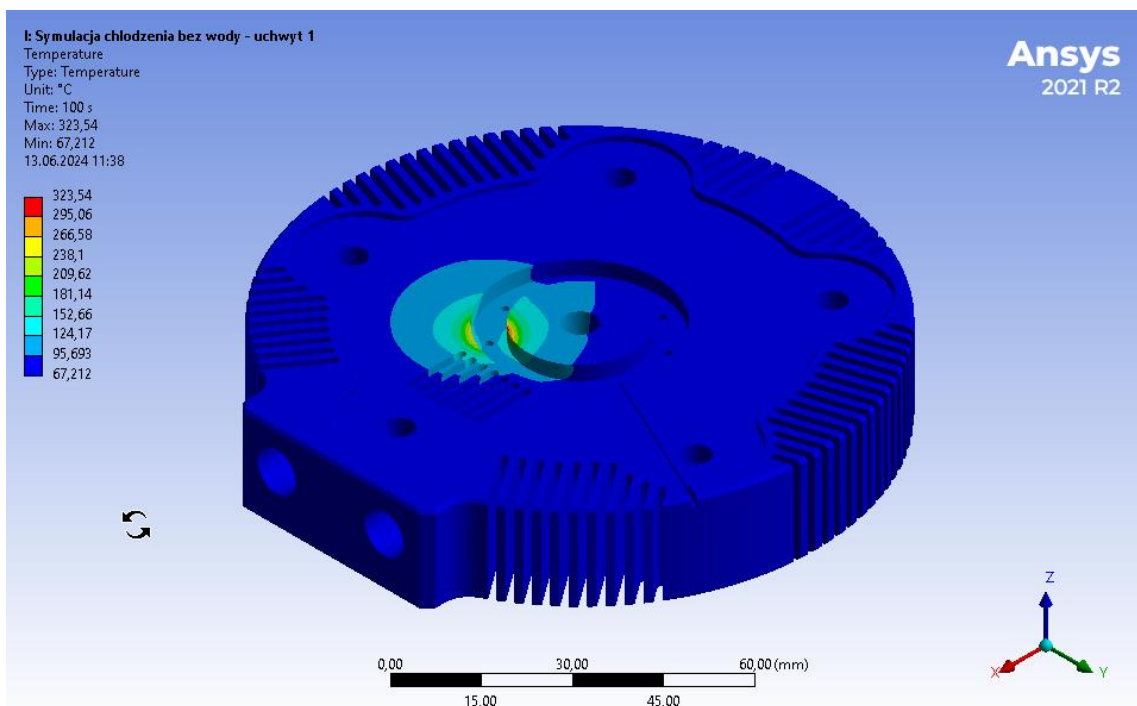


Rys. 5.10. Rozkład temperatury w modelu referencyjnym podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania

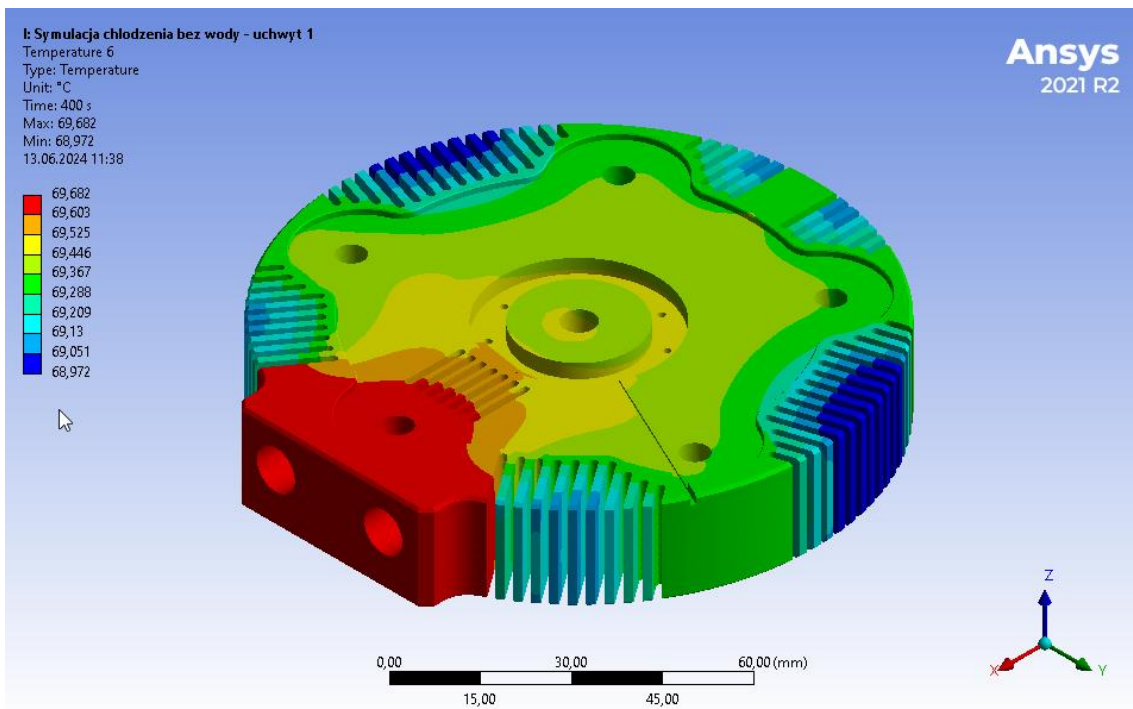




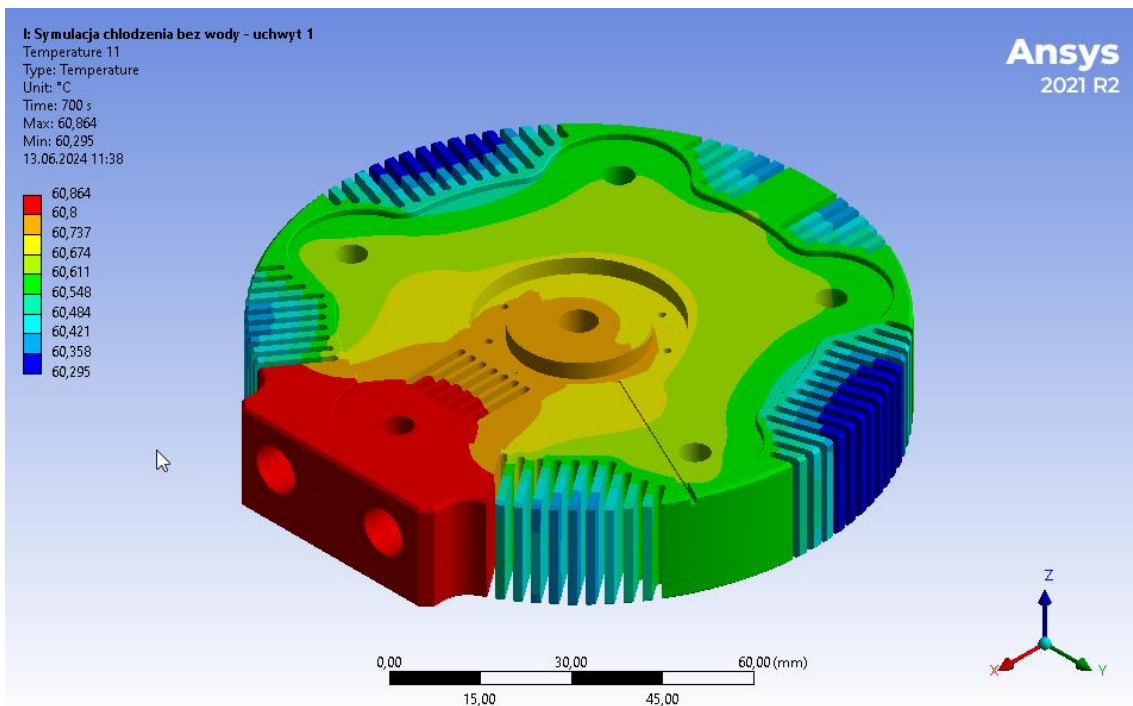
Rys. 5.11. Rozkład temperatury w modelu referencyjnym podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania



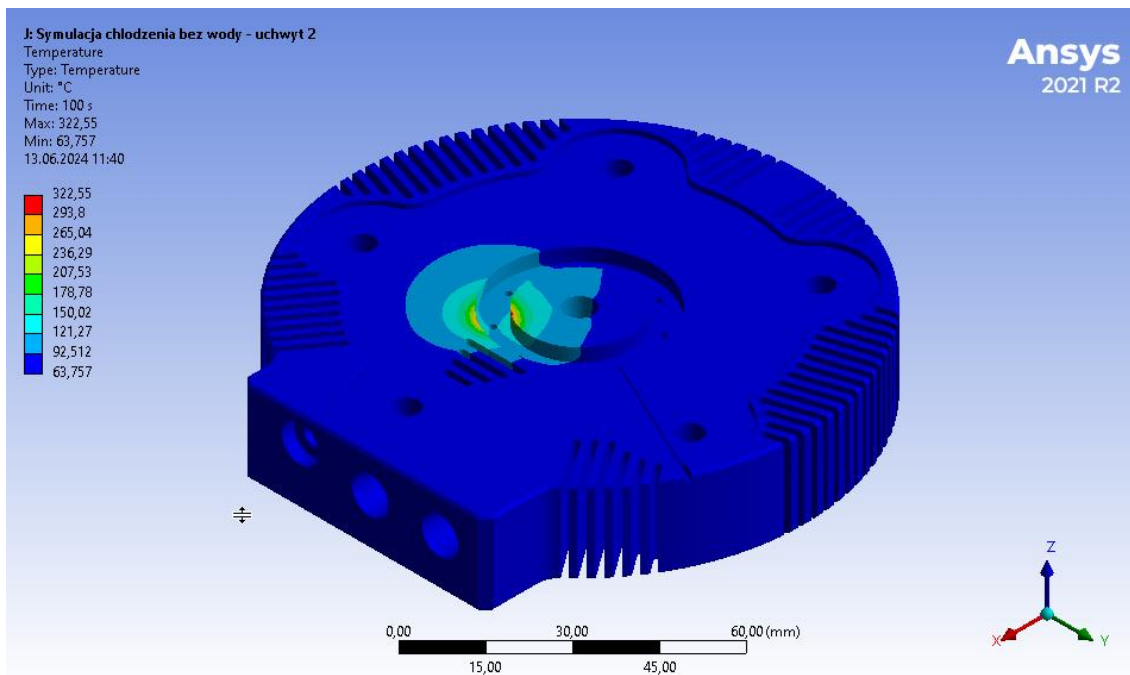
Rys. 5.12. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas chłodzenia swobodnego po spawaniu



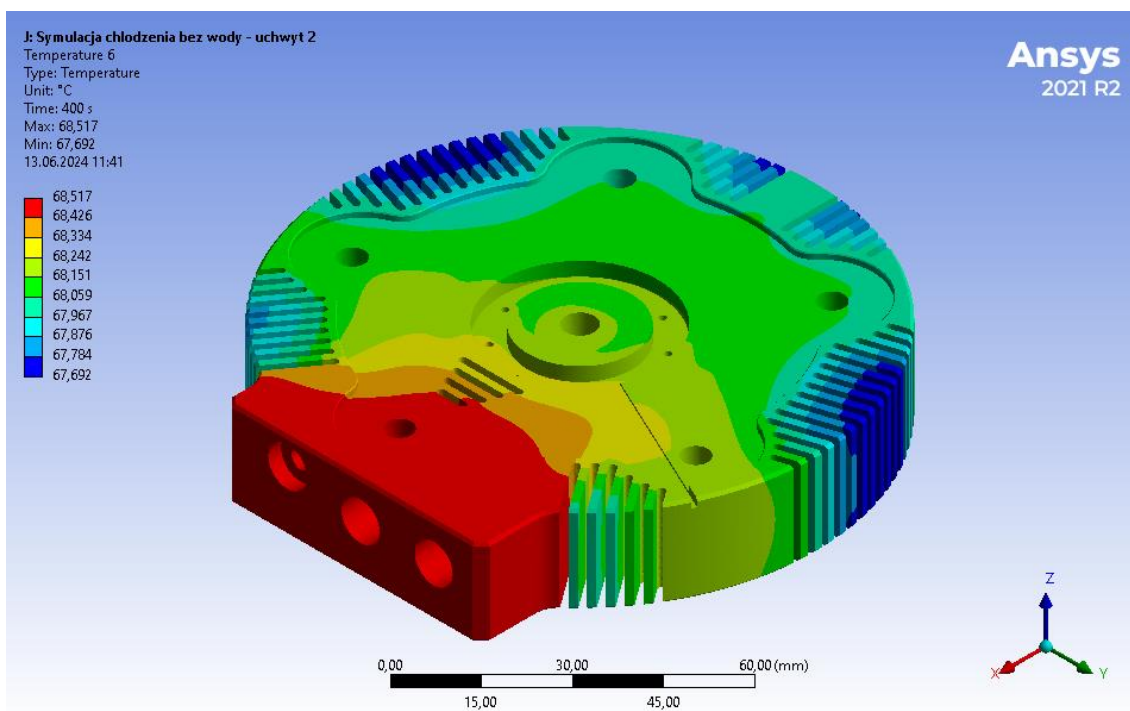
Rys. 5.13. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania



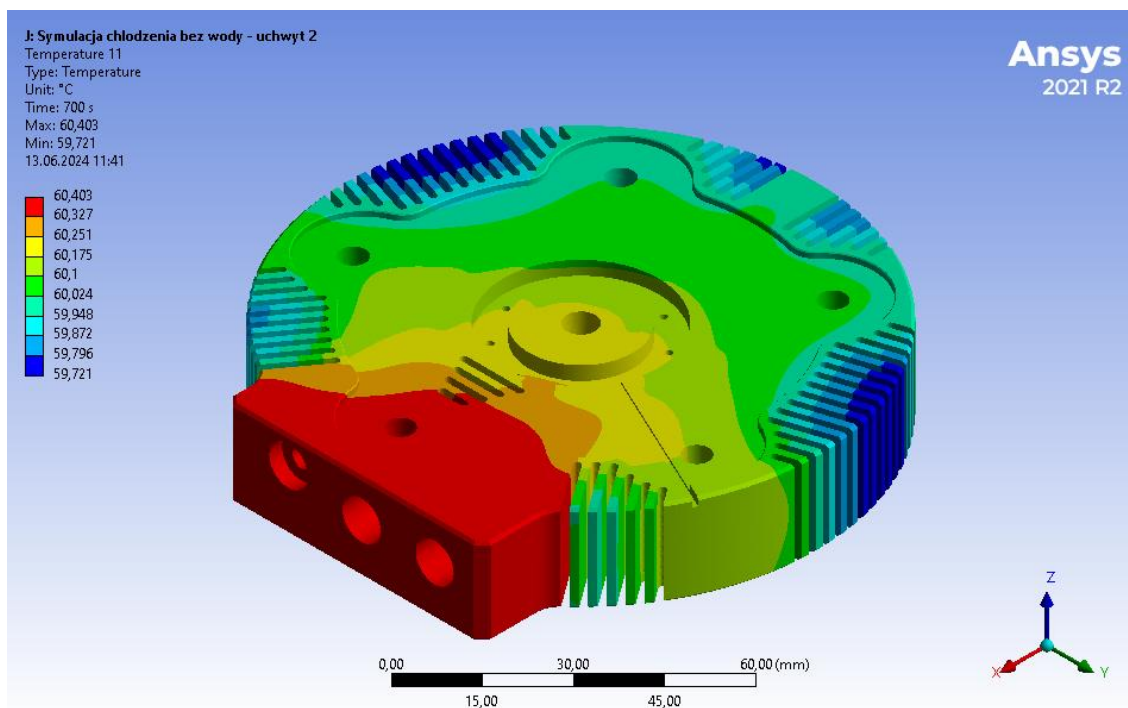
Rys. 5.14. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania



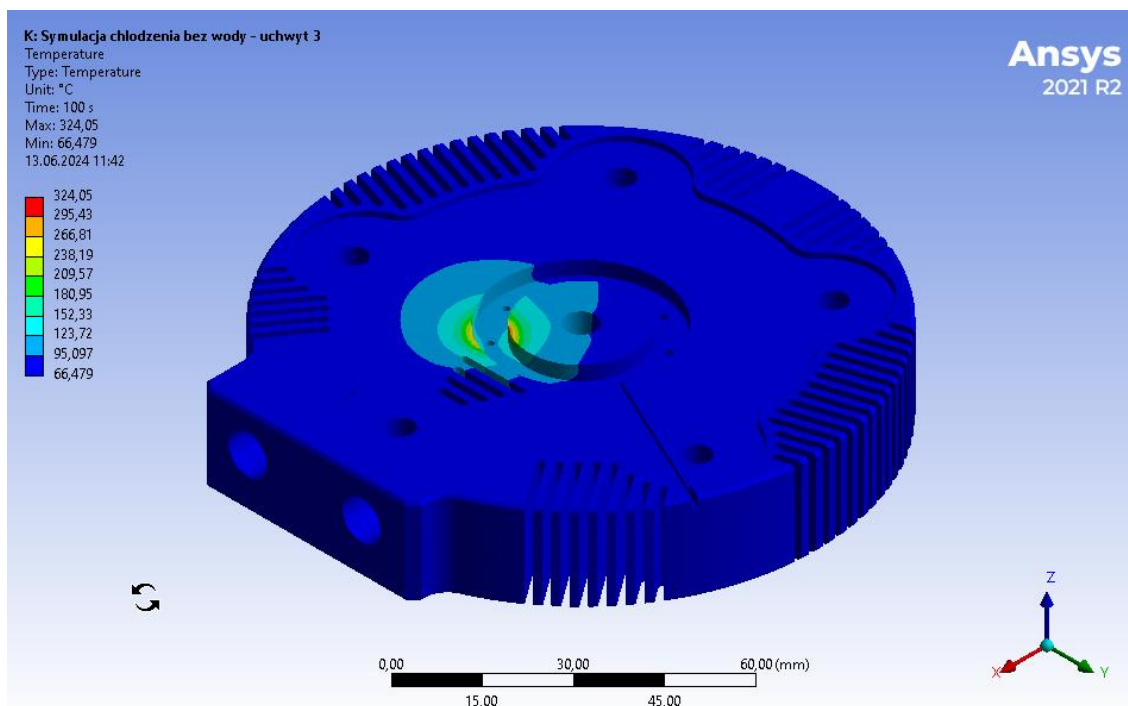
Rys. 5.15. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 2 podczas chłodzenia swobodnego po spawaniu



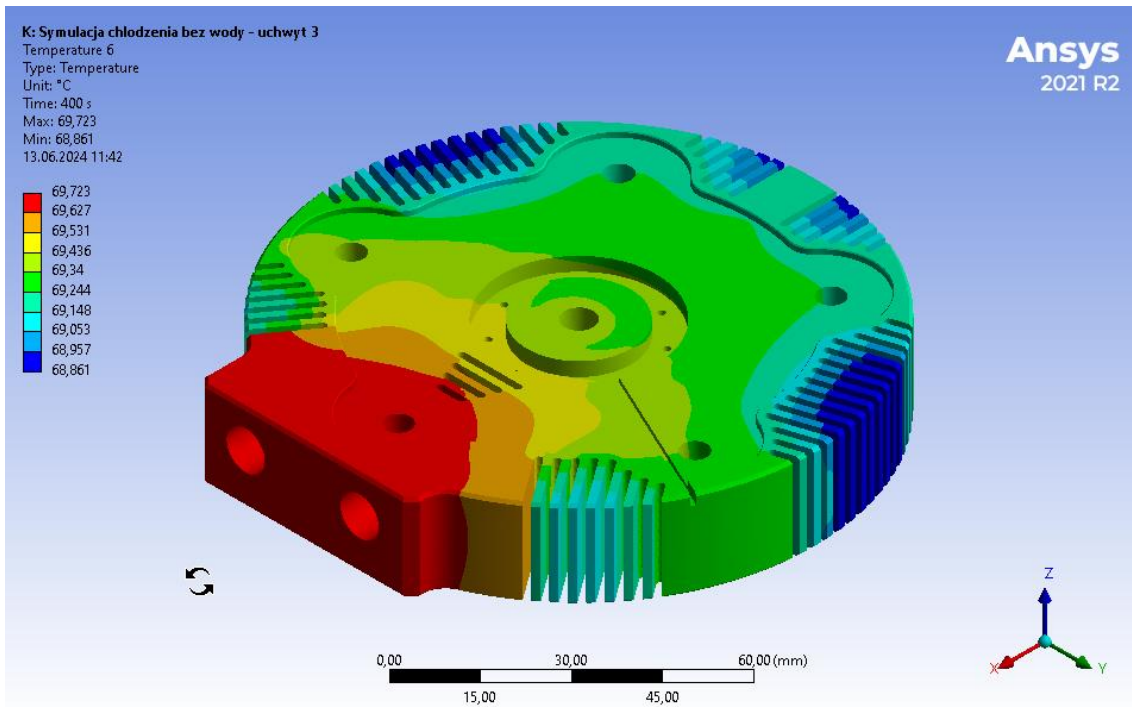
Rys. 5.16. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 2 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania



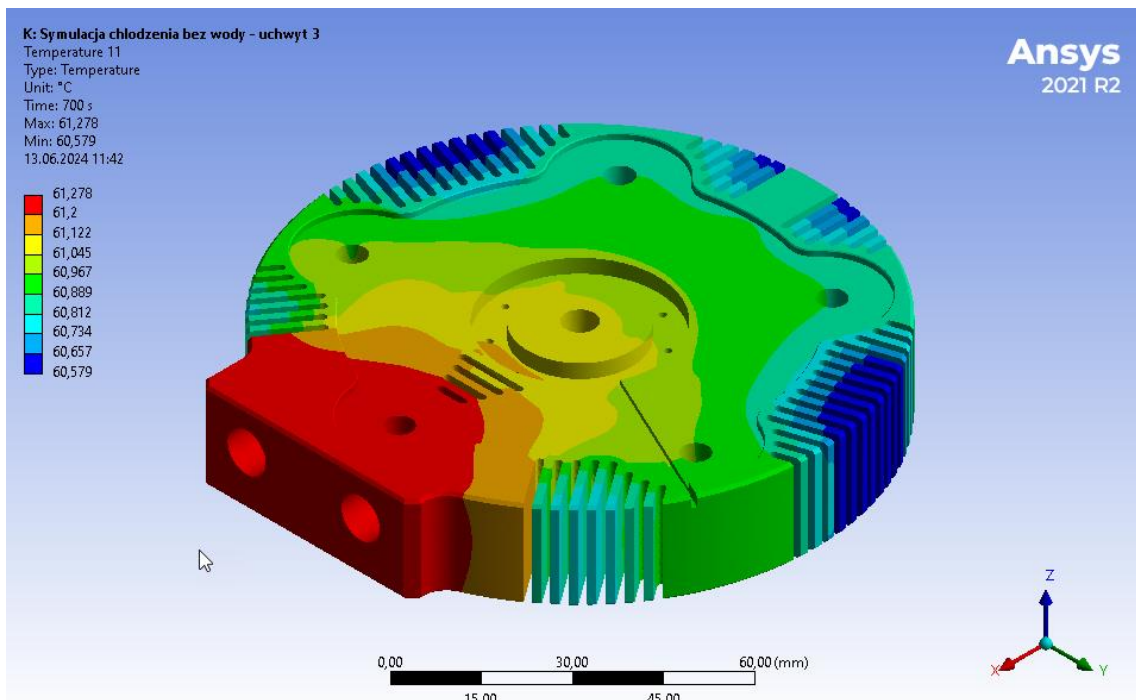
Rys. 5.17. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 2 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania



Rys. 5.18. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas chłodzenia swobodnego po spawaniu



Rys. 5.19. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania



Rys. 5.20. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas chłodzenia swobodnego po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania

Model referencyjny, stworzony zgodnie ze standardowymi zasadami konstrukcyjnymi, po procesie spawania wykazał maksymalną temperaturę  $144,87^{\circ}C$  oraz minimalną  $67,382^{\circ}C$  (rys.

5.9). Po 300 sekundach od zakończenia spawania symulacja wykazała maksymalną temperaturę  $67,557^{\circ}\text{C}$  i minimalną  $67,465^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.10). Po 600 sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura wyniosła  $62,886^{\circ}\text{C}$ , a minimalna  $62,843^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.11).

W uchwycie w wersji 1, po procesie spawania z symulacji można odczytać maksymalną temperaturę na poziomie  $323,54^{\circ}\text{C}$  oraz minimalną  $67,212^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.12). Po 300 sekundach od zakończenia spawania można odczytać maksymalną temperaturę na poziomie  $69,682^{\circ}\text{C}$  oraz minimalną  $68,972^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.13). Po 600 sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura wyniosła  $60,864^{\circ}\text{C}$ , a minimalna  $60,295^{\circ}\text{C}$  (5.14).

Symulacja uchwytu w wersji 2 po spawaniu wykazała maksymalną temperaturę na poziomie  $322,55^{\circ}\text{C}$  oraz minimalną  $63,757^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.15). Po 300 sekundach od zakończenia spawania uchwyt w wersji 2 wykazał maksymalną temperaturę  $68,517^{\circ}\text{C}$  oraz minimalną  $67,692^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.16). Po 600 sekundach temperatura maksymalna wynosiła  $60,403^{\circ}\text{C}$ , natomiast minimalna  $59,721^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.17).

Maksymalna temperatura po spawaniu dla uchwytu w wersji 3 wyniosła  $324,05^{\circ}\text{C}$ , natomiast minimalna  $66,479^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.18). Po 300 sekundach od zakończenia spawania w uchwycie w wersji 3, odnotowano maksymalną temperaturę na poziomie  $69,723^{\circ}\text{C}$  natomiast minimalna na poziomie  $68,861^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.19). Po 600 sekundach maksymalna temperatura wyniosła  $61,278^{\circ}\text{C}$ , natomiast minimalna  $60,579^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.20).

Analiza symulacji rozkładu ciepła po spawaniu przy swobodnym stygnięciu wskazuje, że po 300 sekundach wszystkie modele badawcze wykazały wyższe maksymalne temperatury niż model referencyjny. Najwyższą wartość zaobserwowano w uchwycie w wersji 3 ( $69,723^{\circ}\text{C}$ ), a najniższą w uchwycie w wersji 2 ( $68,517^{\circ}\text{C}$ ). Po 600 sekundach od zakończenia spawania, maksymalne temperatury we wszystkich modelach badawczych były niższe niż w modelu referencyjnym, przy czym najniższą wartość odnotowano w uchwycie w wersji 2 ( $60,403^{\circ}\text{C}$ ), a najwyższą w uchwycie w wersji 3 ( $61,278^{\circ}\text{C}$ ).

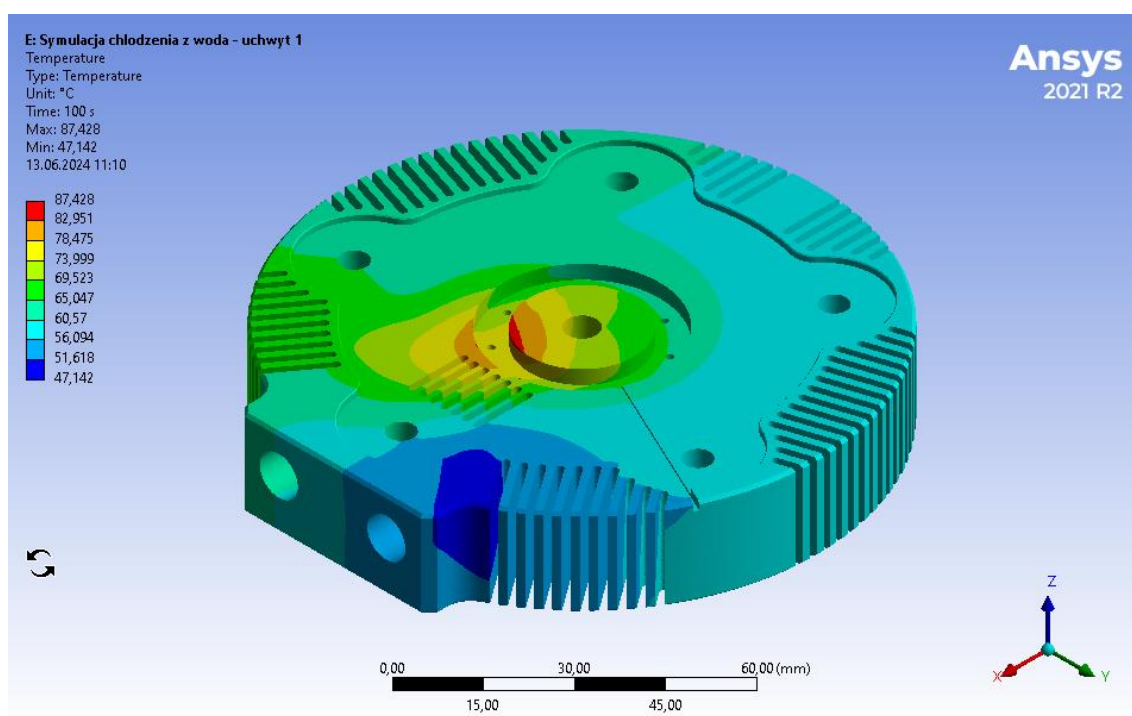
Minimalne temperatury w modelach badawczych po 300 sekundach od zakończenia spawania były niższe niż w modelu referencyjnym, przy czym najniższą wartość odnotowano w uchwycie w wersji 2 ( $67,692^{\circ}\text{C}$ ). Po 600 sekundach od zakończenia spawania, minimalne temperatury były również niższe niż w modelu referencyjnym, a najniższą wartość odnotowano w uchwycie w wersji 2 ( $59,721^{\circ}\text{C}$ ).

Wnioski z przeprowadzonej analizy stygnięcia uchwytu na „wolnym” powietrzu sugerują, że uchwyty z wykonanymi radiatorami wykazują lepszą zdolność do odprowadzania ciepła po 600 sekundach od zakończenia spawania, co sugeruje, że zastosowanie tych radiatorów poprawia

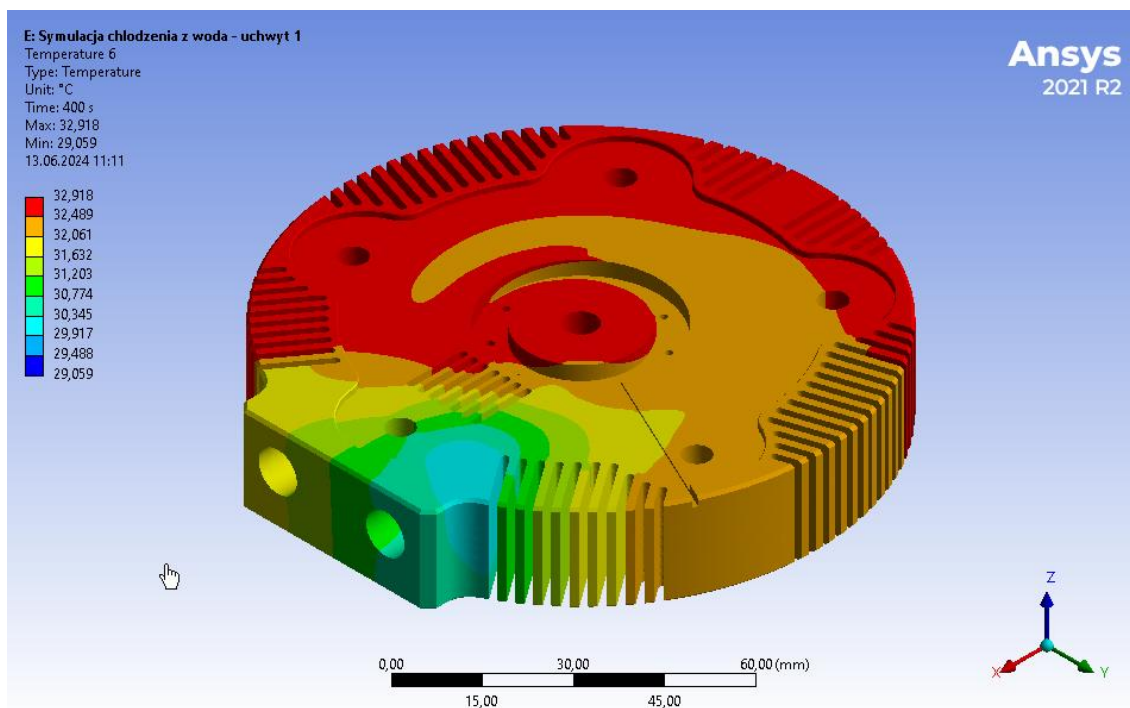
długoterminowe odprowadzanie ciepła z uchwytu. Wprowadzenie takich radiatorów może przyczynić się także redukcji naprężeń termicznych.

### 5.2.1.2. Chłodzenie z wymuszonym wewnętrznym obiegiem cieczy

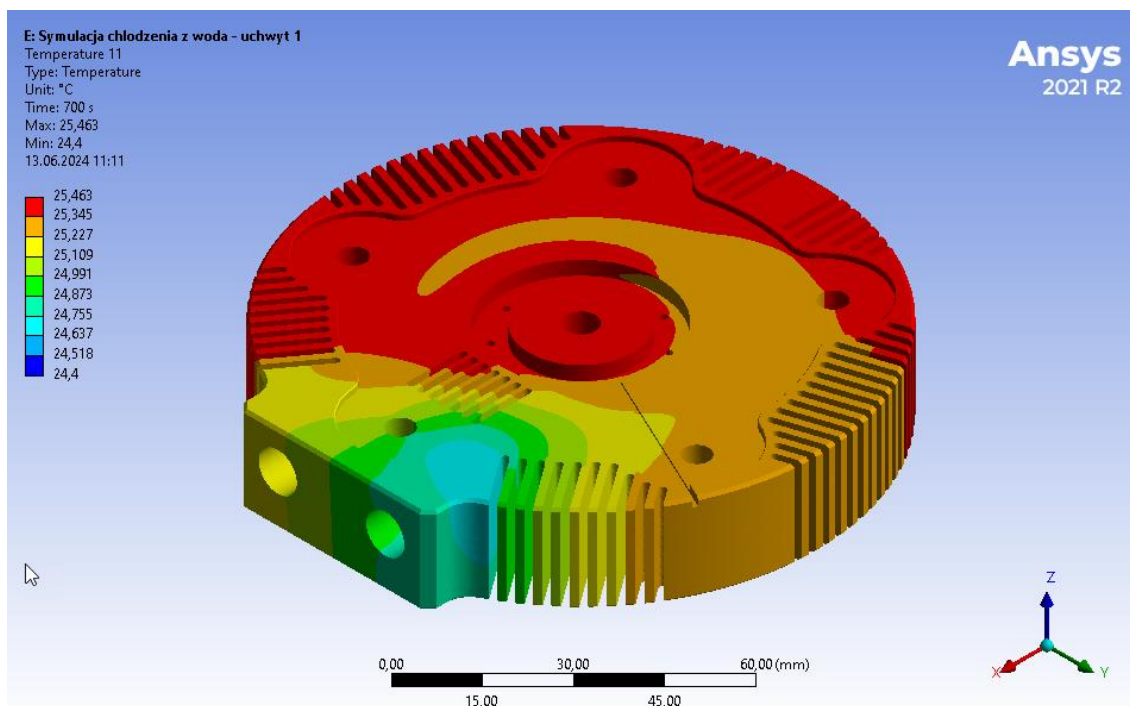
Druga część badania polegała na symulacji tempa chłodzenia z wymuszonym wewnętrznym obiegiem cieczy. Na rysunkach 5.21 – 5.29 zaprezentowano wyniki symulacji chłodzenia uchwytów wykonanych za pomocą technik przyrostowych z wymuszonym obiegiem cieczy w czasie 600s od zakończenia spawania.



Rys. 5.21. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po zakończeniu spawania

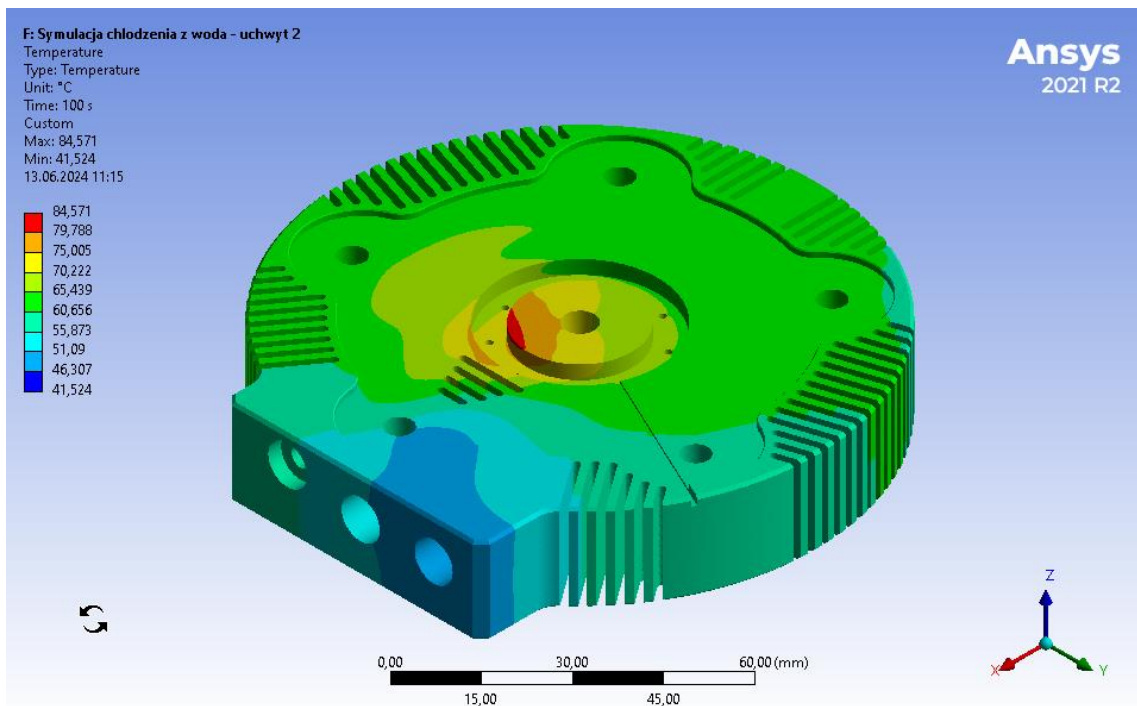


Rys. 5.22. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania

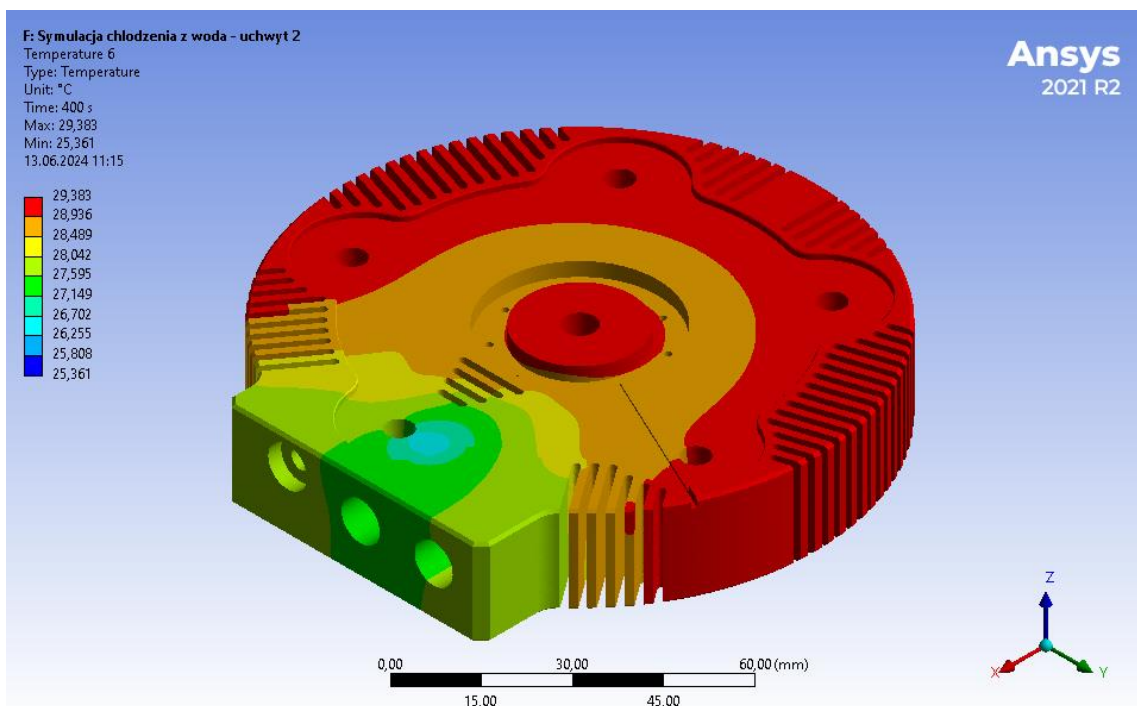


Rys. 5.23. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania

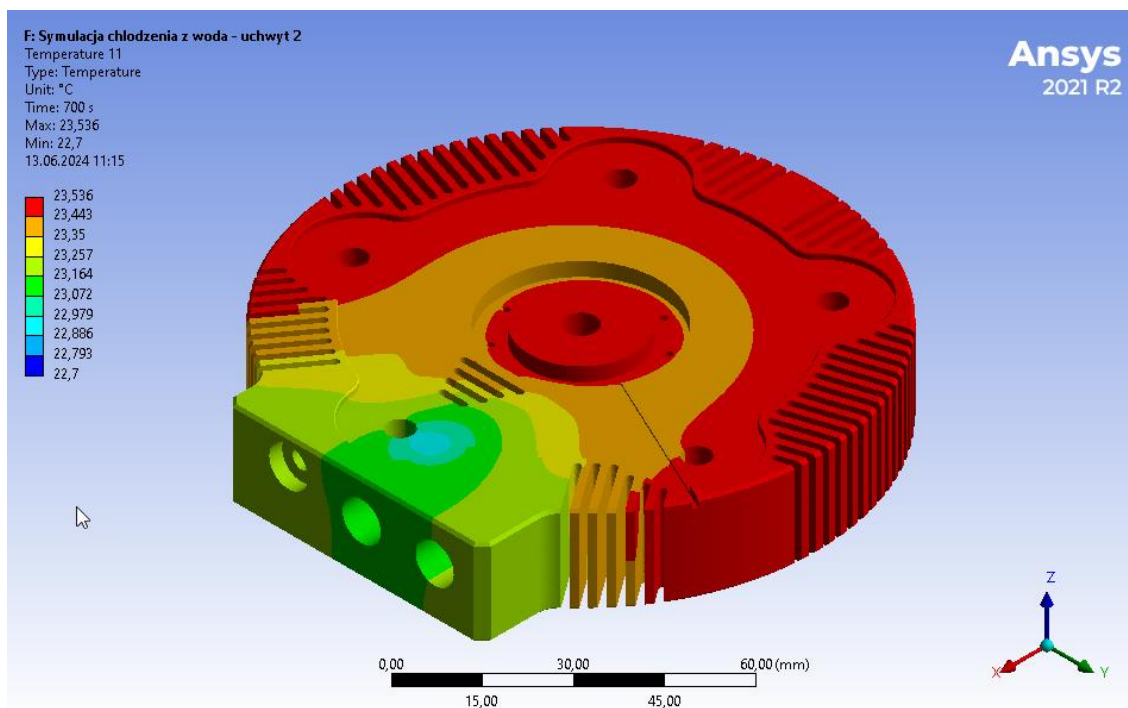




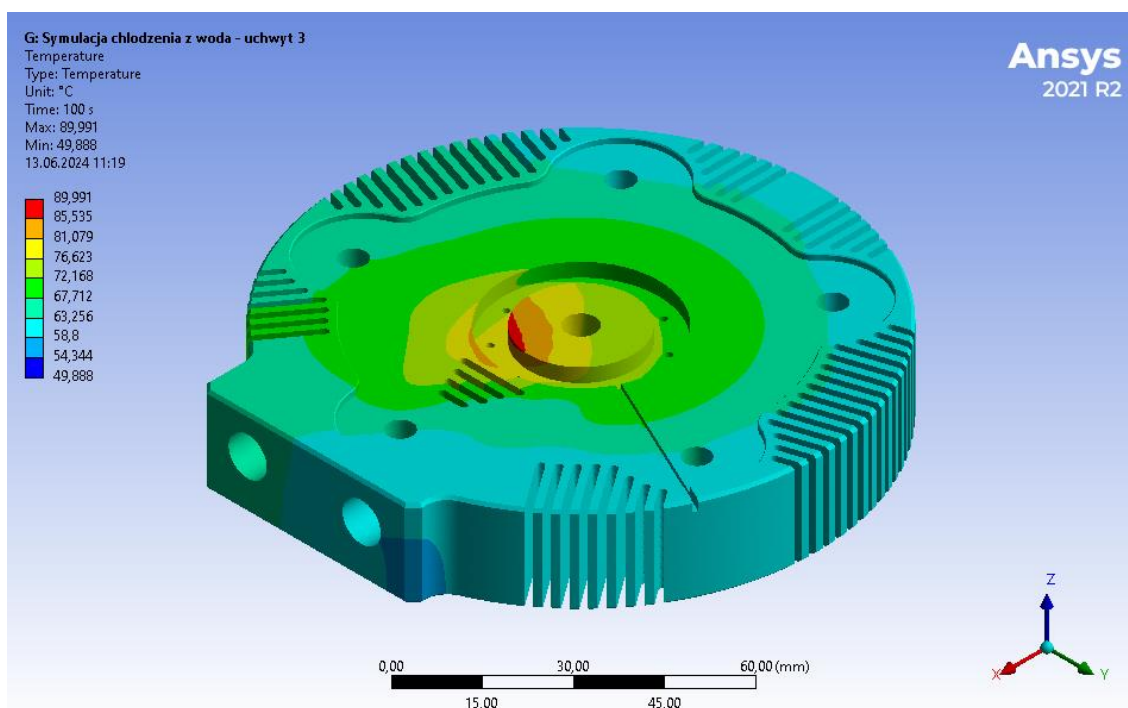
Rys. 5.24. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 2 podczas wymuszonego obiegu wewnętrzznego chłodziwa po zakończeniu spawania



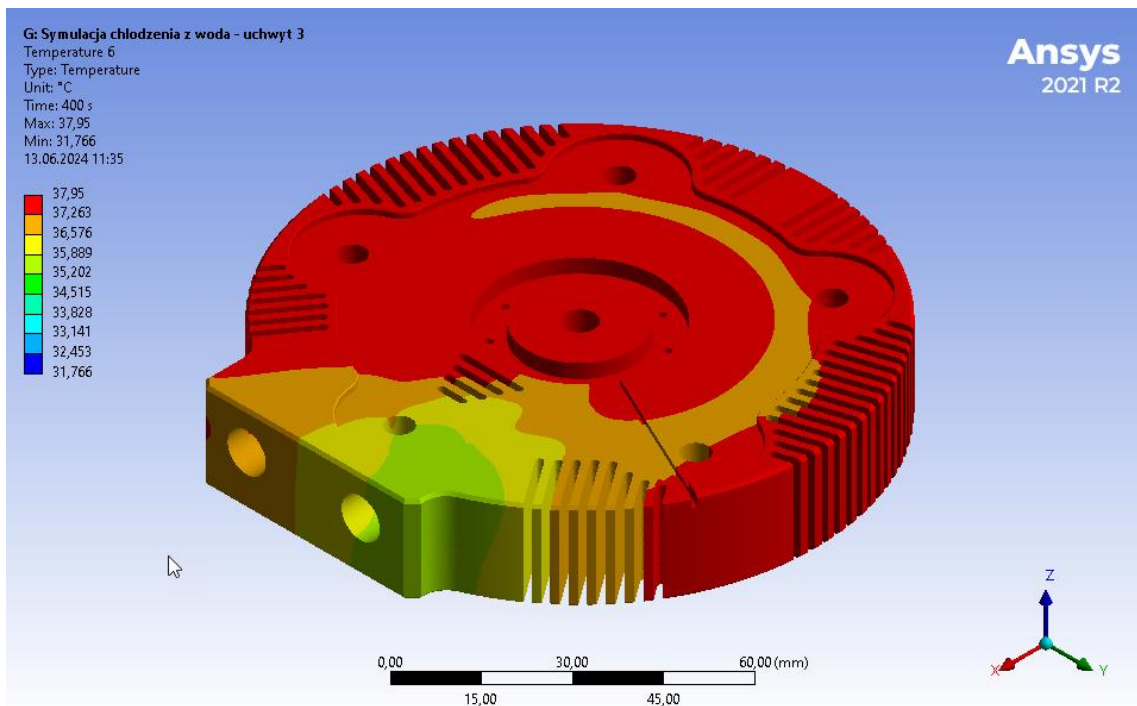
Rys. 5.25. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 1 podczas wymuszonego obiegu wewnętrzznego chłodziwa po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania



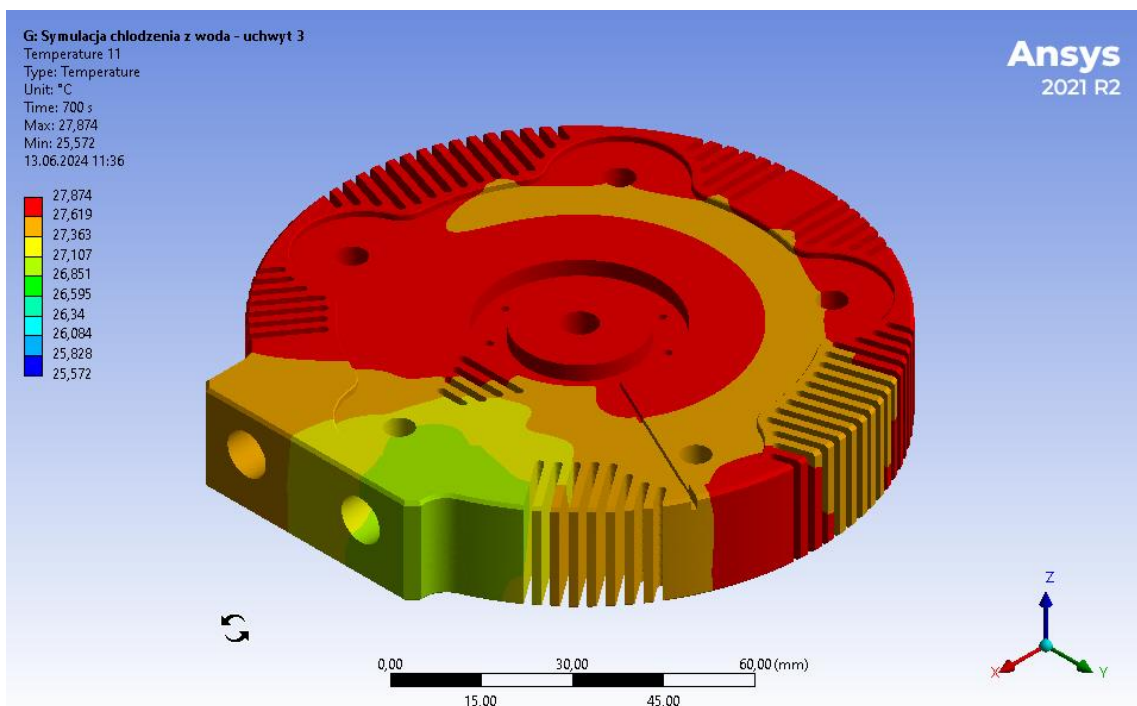
Rys. 5.26. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 2 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania



Rys. 5.27. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po zakończeniu spawania



Rys. 5.28. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po czasie  $t=300s$  od zakończenia spawania



Rys. 5.29. Rozkład temperatury w uchwycie w wersji 3 podczas wymuszonego obiegu wewnętrznego chłodziwa po czasie  $t=600s$  od zakończenia spawania

Po procesie spawania w uchwycie w wersji 1 zanotowano maksymalną temperaturę  $87,428^{\circ}\text{C}$  oraz minimalną  $47,142^{\circ}\text{C}$  (rys. 5.21). Uchwyt w wersji 1 wykazał, że po 300

sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura wyniosła 32,918°C, a minimalna 29,059°C (rys. 5.22). Po 600 sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura uchwytu spadła do 25,463°C, a minimalna do 24,4°C (rys. 5.23).

W uchwycie w wersji 2 zanotowano temperaturę maksymalną na poziomie 84,571°C oraz minimalną 41,524°C (rys. 5.24) po procesie spawania. Po 300 sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura wyniosła 29,383°C, a minimalna 25,361°C (rys. 5.25). Po 600 sekundach maksymalna temperatura wyniosła 23,536°C, natomiast minimalna 22,7°C (rys. 5.26).

Uchwyt w wersji 3 po zakończeniu procesu spawania wykazał maksymalną temperaturę 89,991°C oraz minimalną 49,888°C (rys. 5.27). Po 300 sekundach od zakończenia spawania, maksymalna temperatura wyniosła 37,95°C, a minimalna 31,766°C (rys. 5.28). Po 600 sekundach, maksymalna temperatura spadła do 27,874°C, a minimalna do 25,572°C (rys. 5.29).

Analiza wyników symulacji wskazuje, że wszystkie modele z wewnętrzną strukturą wykazują się szybszym odprowadzeniem ciepła w porównaniu zarówno do modelu referencyjnego jak i uchwytów bez wymuszonego obiegu chłodziwa. Uchwyt w wersji 1, mimo że początkowo (po 300 sekundach) miał wyższą maksymalną temperaturę niż uchwyt w wersji 2, ostatecznie po 600 sekundach od zakończenia spawania osiągnął niższe wartości temperatur. Uchwyt w wersji 2 od początku wykazujący najniższe wartości temperatur, okazał się najskuteczniejszy w długoterminowym odprowadzaniu ciepła, osiągając najniższe wartości zarówno maksymalnej, jak i minimalnej temperatury po 600 sekundach.

Uchwyt w wersji 3, mimo że początkowo (po 300 sekundach) miał najwyższą maksymalną temperaturę, co może sugerować mniej efektywne początkowe odprowadzanie ciepła, po 600 sekundach wykazał znaczną poprawę, choć nadal osiągał wyższe wartości temperatur niż pozostałe modele. Minimalna temperatura dla tego uchwytu po 600 sekundach była jednak niższa niż minimalna temperatura dla uchwytu w wersji 1 po tym samym czasie, co wskazuje na pewną efektywność tej struktury.

Na podstawie przeprowadzonych analiz porównawczych chłodzenia za pomocą cieczy oraz chłodzenia swobodnego dla różnych uchwytów można jednoznacznie stwierdzić, że chłodzenie cieczą jest znacznie bardziej efektywne. Dla każdego z badanych przypadków chłodzeni wodą osiągało temperaturę poniżej 60°C w czasie około 100 sekund, podczas gdy chłodzenie powietrzem potrzebowało na to aż 600 sekund.

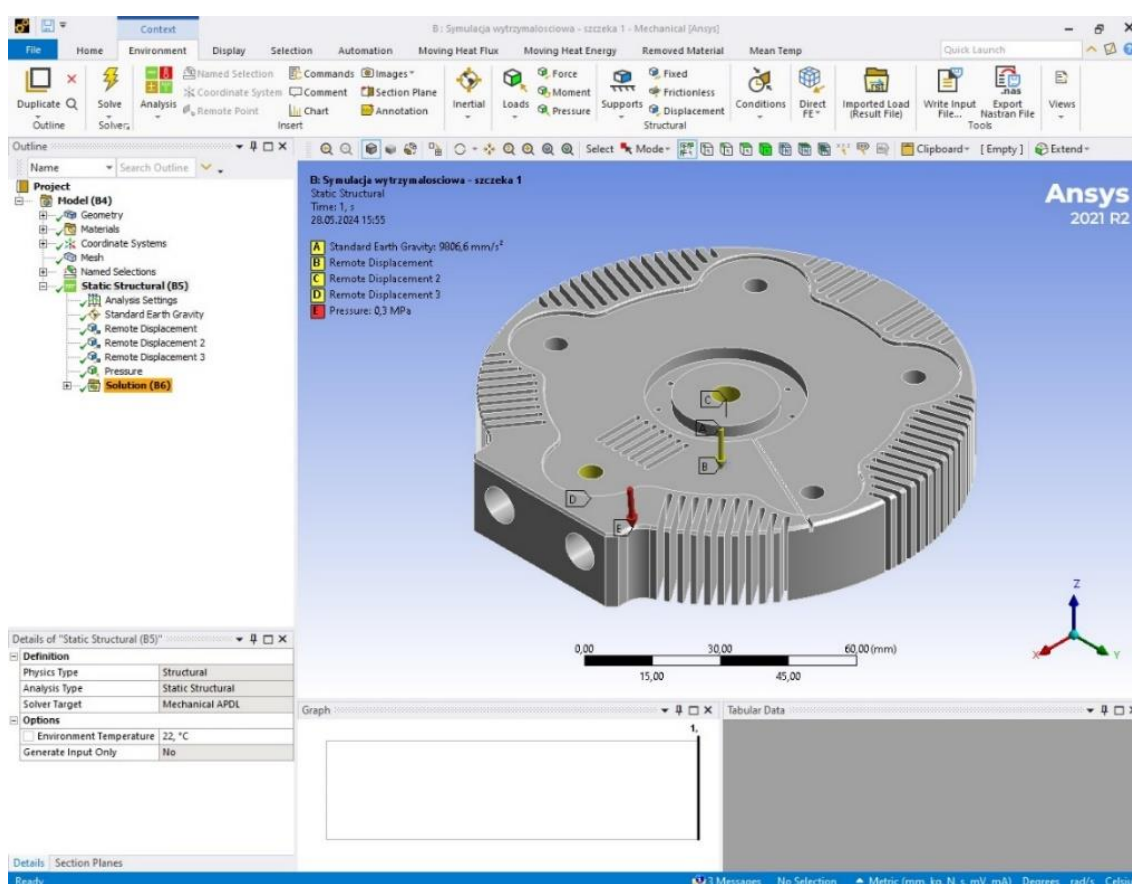
Biorąc pod uwagę te wyniki, można stwierdzić, że chłodzenie cieczą jest ok 10 razy szybsze niż chłodzenie powietrzem. W praktyce oznacza to, że chłodzenie wodą zapewnia znacznie

efektywniejsze i szybsze rozpraszanie ciepła, szczególnie w krytycznych momentach, gdzie szybkie obniżenie temperatury ma kluczowe znaczenie.

Dzięki chłodzeniu wodnemu możliwe jest osiągnięcie niższych i bardziej stabilnych temperatur w znacznie krótszym czasie, co czyni tę metodę wysoce efektywną w porównaniu do chłodzenia powietrzem.

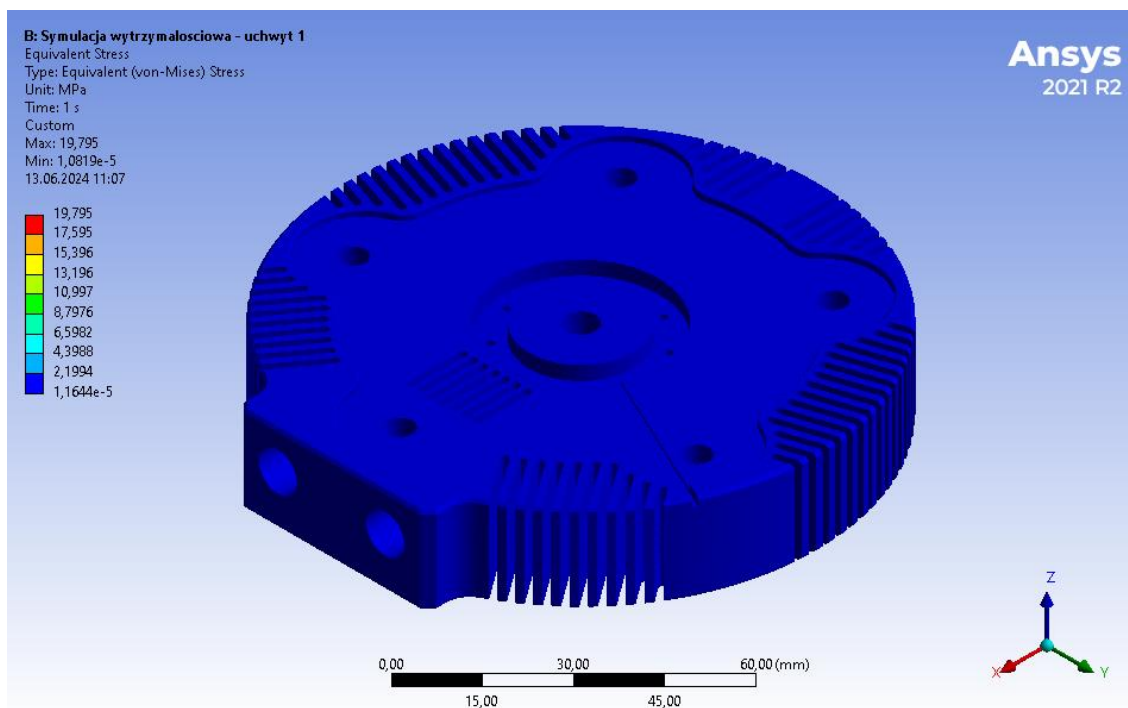
## 5.2.2. Symulacja wytrzymałościowa

Symulacje zostały przeprowadzone dla trzech uchwytów o różnych strukturach wewnętrznych, poddanych maksymalnemu ciśnieniu 0,3MPa, które odpowiada maksymalnemu obciążeniu generowanemu przez chłodnicę (rys. 5.30).

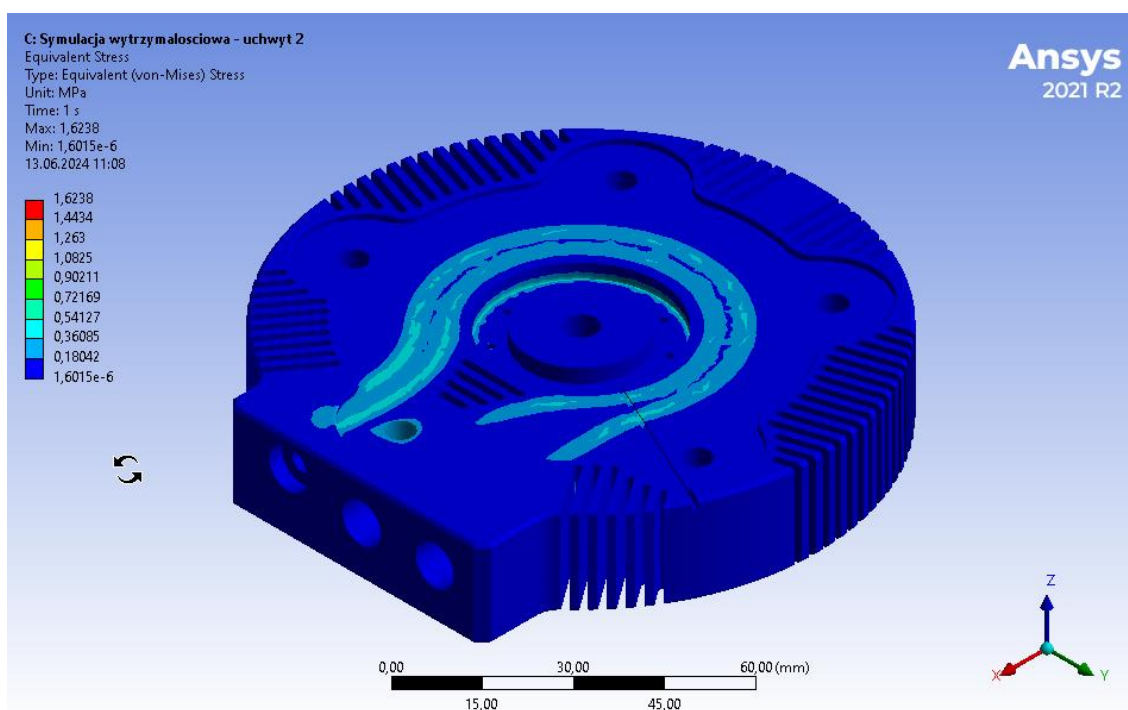


Rys. 5.30. Widok środowiska Static Structural w programie ANSYS

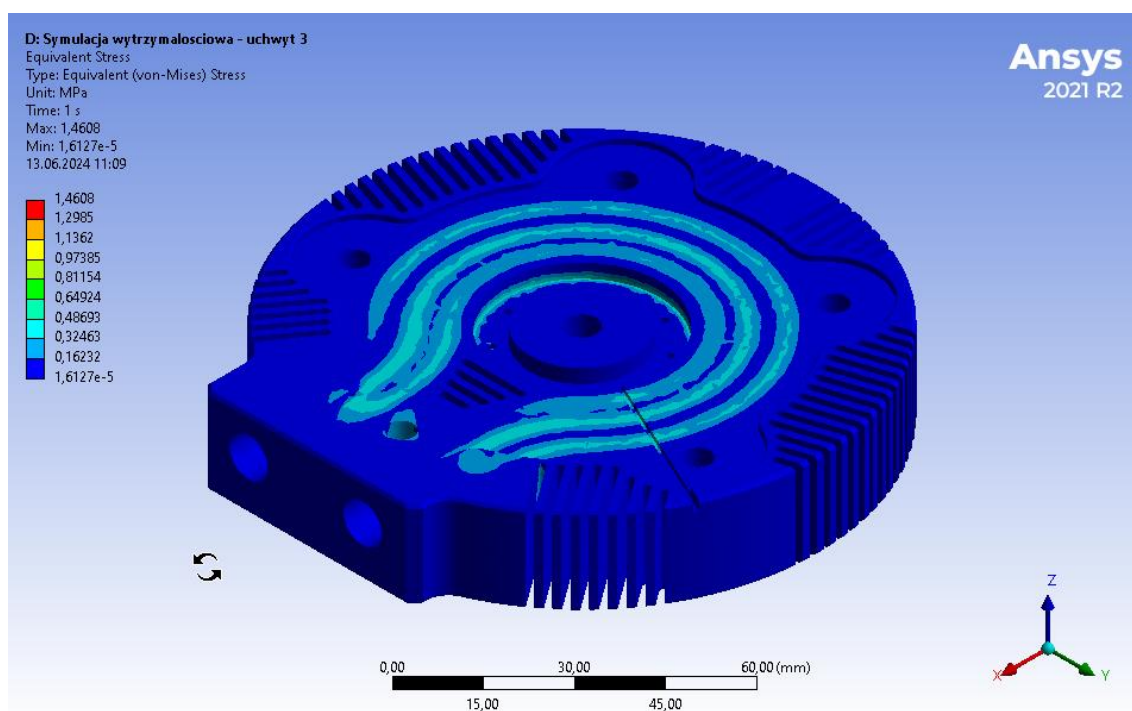
Graficzne przedstawienie wyników badań zaprezentowano na rysunkach 5.31 – 5.33.



Rys. 5.31. Rozkład naprężeń w uchwycie w wersji 1



Rys. 5.32. Rozkład naprężeń w uchwycie w wersji 2



Rys. 5.33. Rozkład naprężeń w uchwycie w wersji 3

Wyniki analizy naprężeń maksymalnych przedstawiają się następująco: maksymalne naprężenia w uchwycie w wersji 1 wyniosło 19,795 MPa (rys. 5.31), w uchwycie w wersji 2 wyniosło 1,6238 MPa (rys. 5.32), natomiast w uchwycie w wersji 3 wyniosło 1,4608 MPa (rys. 5.33). Warto w tym miejscu wspomnieć, że wysokie naprężenia powstałe w uchwycie w wersji 1 mogą być artefaktami powstałymi w wyniku przecięcia się kanałków podczas modelowania prowadząc do powstania ostrych krawędzi, które spiętrzają naprężenia.

Analiza wytrzymałościowa wykazała, że wszystkie trzy uchwyty charakteryzują się naprężeniami znacznie poniżej granicy plastyczności, która dla przyjętego materiału (AlSi10Mg) wynosi 251 MPa. Uchwyt w wersji 1, pomimo najwyższych zmierzonych naprężeń, nadal posiada akceptowalny współczynnik bezpieczeństwa (12,68), choć może być on zaniżony przez błędy modelu.

## 5.3. Badania laboratoryjne

### 5.3.1. Opis badań laboratoryjnych

Kolejny etap badawczy skoncentrowany był na empirycznej weryfikacji wyników uzyskanych w symulacji.

Cele tego etapu badań były zróżnicowane i obejmowały trzy kluczowe aspekty. Pierwszym z nich było potwierdzenie wyników symulacji w warunkach laboratoryjnych, aby upewnić się, że dane uzyskane w symulacjach komputerowych są zbliżone lub zgodne z rzeczywistością.

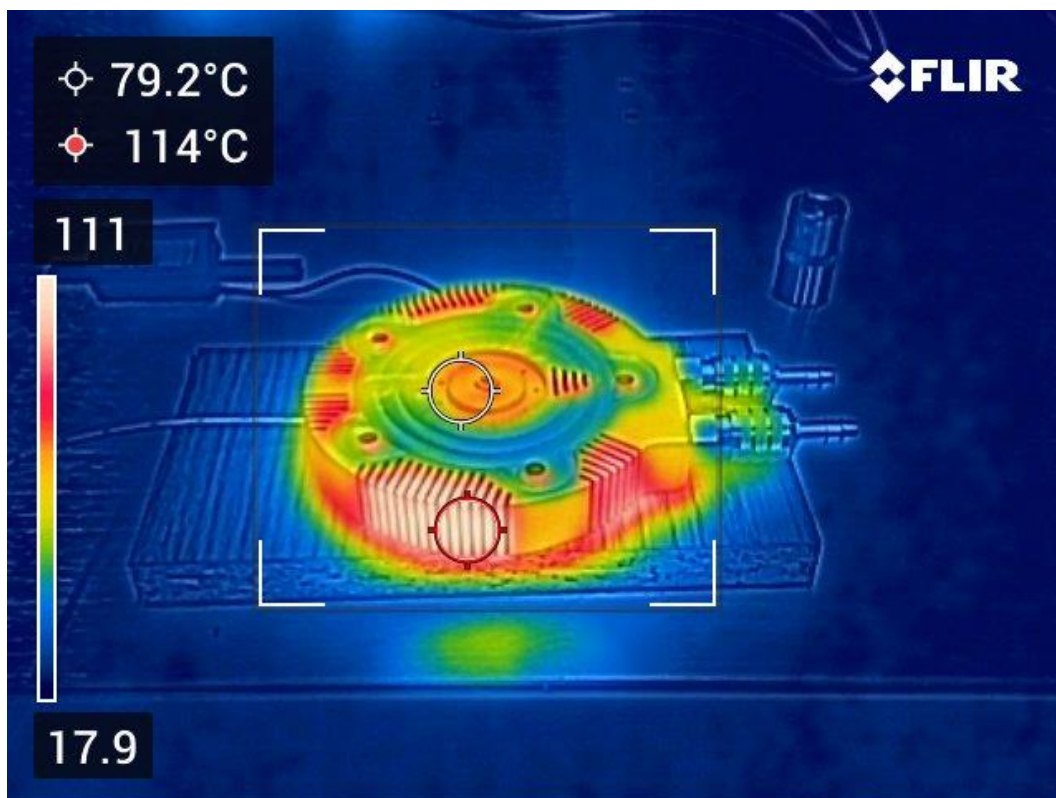
Drugim celem było dokładne zbadanie tempa chłodzenia fizycznego uchwytu oraz odpowiedź na wprowadzenie wymuszonego obiegu wody wewnątrz uchwytu. Trzecim celem było ewentualne zidentyfikowanie problemów technologicznych, które mogły pojawić się w praktyce, a które nie były do wykrycia na etapie modelowania w programach 3D-CAD. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym opisanym w rozdziale 3 (rys. 5.34)



Rys. 5.34. Przeprowadzanie badań laboratoryjnych

Cały proces był dodatkowo kontrolowany poprzez kamerę termowizyjną FLIR C5 (rys. 5.35).





Rys. 5.35. Zdjęcie termowizyjne uchwytu podczas badania laboratoryjnego

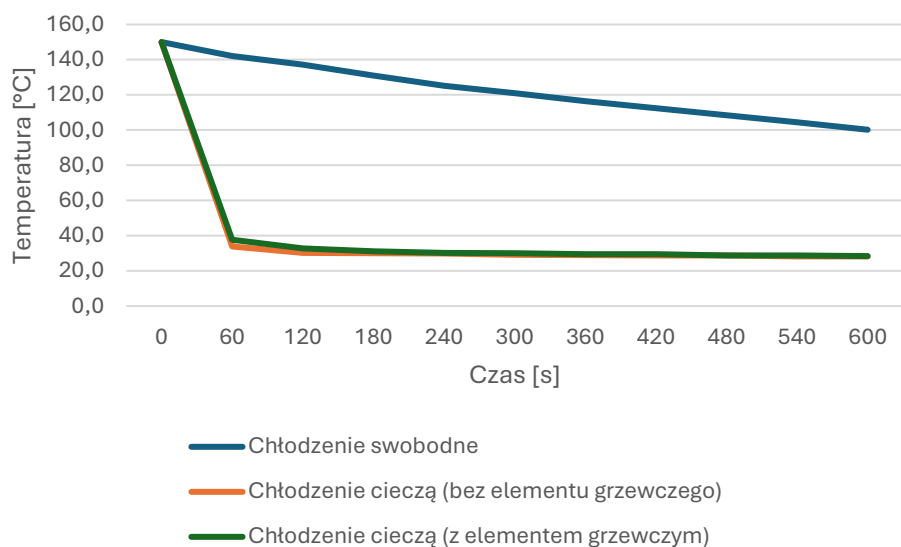
Pomiarów tempa chłodzenia dokonywano w dwóch różnych warunkach: na wolnym powietrzu oraz przy zastosowaniu wymuszonego obiegu cieczy. Dzięki temu możliwe było porównanie efektywności chłodzenia dla różnych jego wariantów.

### 5.3.2. Analiza wyników badań laboratoryjnych

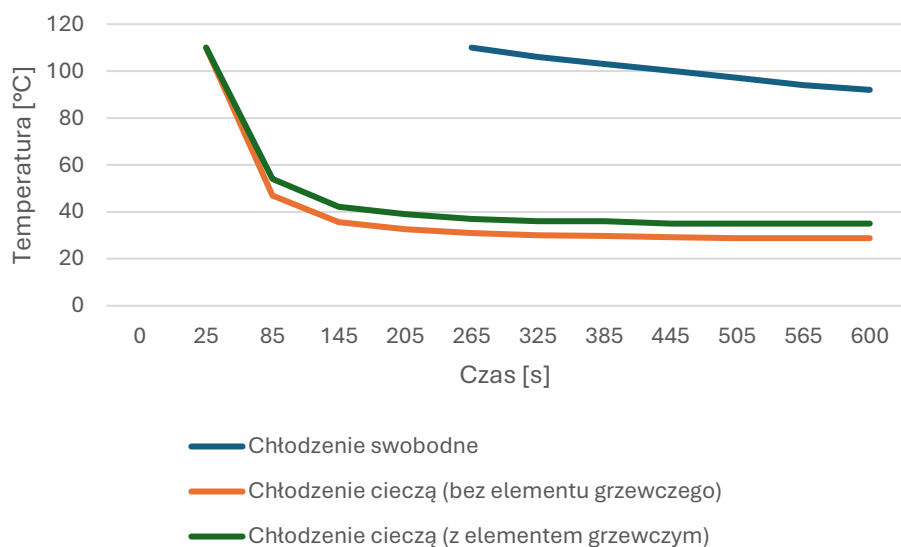
Badania podzielono na 3 etapy w celu oceny różnych scenariuszy chłodzenia uchwytów:

- Etap 1 – swobodne chłodzenie uchwytu po nagraniu do temperatury 150°C,
- Etap 2 – chłodzenie uchwytu poprzez wewnętrzny obieg chłodziwa z pozostawionym elementem grzewczym,
- Etap 3 – chłodzenie uchwytu z aktywnym obiegiem cieczy, bez elementu grzewczego.

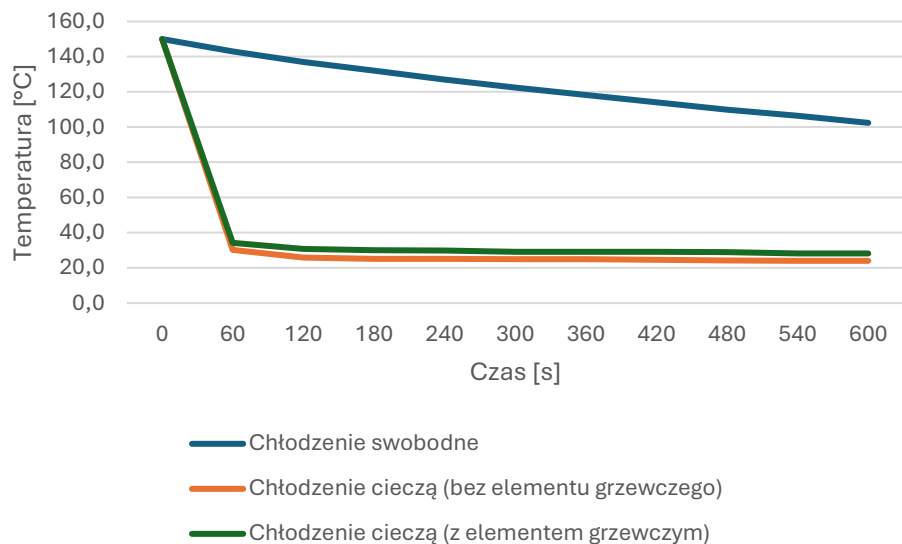
Dla każdego z trzech uchwytów i dla każdego etapu przeprowadzono po pięć pomiarów. Uśrednione wyniki zaprezentowano na rysunkach 5.36 – 5.41.



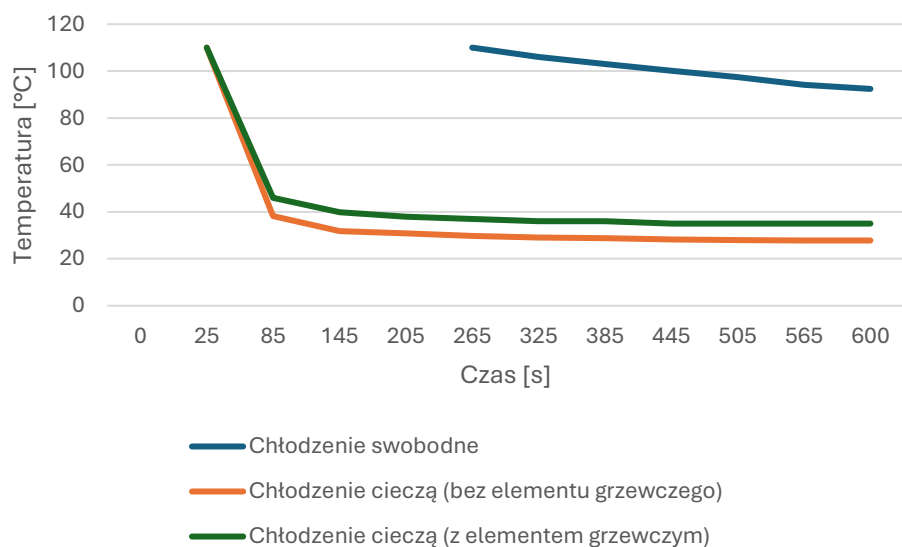
Rys. 5.36. Wykres chłodzenia uchwytu w wersji 1 dla 3 etapów badań zarejetrowanych przez czujnik umiejscowiony w kanale argonowym



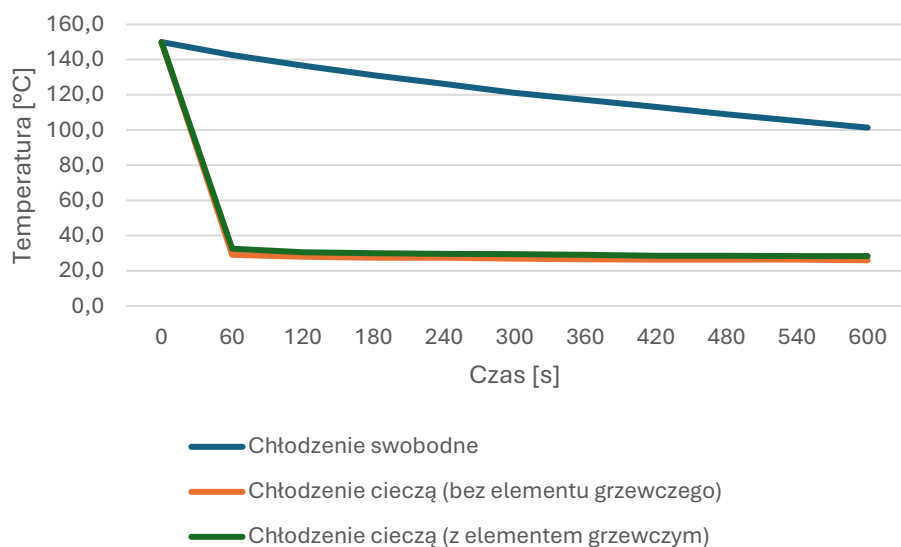
Rys. 5.37. Wykres chłodzenia uchwytu w wersji 1 dla 3 etapów badań zarejetrowanych przez czujnik umiejscowiony wewnątrz uchwytu



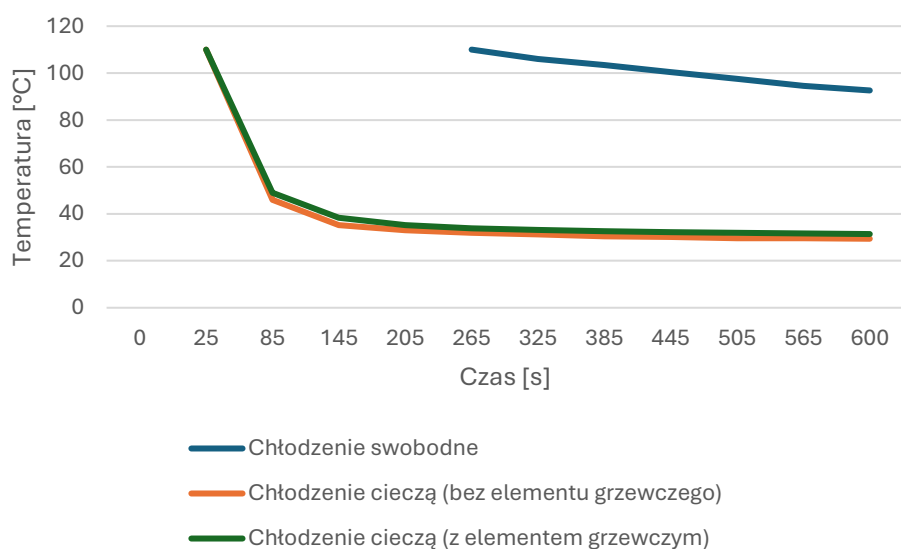
Rys. 5.38. Wykres chłodzenia uchwyty w wersji 2 dla 3 etapów badań zarejetrowanych przez czujnik umiejscowiony w kanale argonowym



Rys. 5.39. Wykres chłodzenia uchwyty w wersji 2 dla 3 etapów badań zarejetrowanych przez czujnik umiejscowiony wewnątrz uchwyty



Rys. 5.40. Wykres chłodzenia uchwyty w wersji 3 dla 3 etapów badań zarejestrowanych przez czujnik umiejscowiony w kanale argonowym



Rys. 5.41. Wykres chłodzenia uchwyty w wersji 3 dla 3 etapów badań zarejestrowanych przez czujnik umiejscowiony wewnątrz uchwyty

Analiza danych zebranych przez czujnik argonowy w uchwycie w wersji 1 (rys. 5.36) pokazuje, że przy chłodzeniu swobodnym, temperatura spada stopniowo ze 150°C do około 100°C w czasie 10 minut. Przy chłodzeniu ciecżą bez grzałki, spadek temperatury jest znacznie szybszy osiągając około 28°C w tym samym czasie. Chłodzenie ciecżą z pozostawioną grzałką również prowadzi do szybkiego spadku temperatury, jednak nieco wolniej niż bez grzałki. Dla czujnika umiejscowionego wewnątrz uchwyty (rys. 5.37), chłodzenie na powietrzu powoduje spadek do temperatury 92°C. Przy chłodzeniu ciecżą bez grzałki temperatura szybko spada do około 28°C, podczas gdy chłodzenie wodą z grzałką kończy się na około 35°C.

Podobny trend można zauważyć w uchwycie w wersji 2 (rys. 5.38), gdzie chłodzenie na powietrzu powoduje spadek ze 150°C do około 102°C, a chłodzenie cieczą bez grzałki prowadzi do szybkiego spadku do temperatury około 24°C. Chłodzenie cieczą z grzałką również kończy się na około 28°, choć proces ten jest nieco wolniejszy. Czujnik wewnętrzny (rys. 5.39) rejestruje spadek temperatury do około 92°C przed chłodzeniem na powietrzu. Chłodzenie cieczą bez grzałki powoduje szybki spadek do temperatury około 27,8°C, a chłodzenie cieczą z grzałką do temperatury około 35°C.

W uchwycie w wersji 3, czujnik umiejscowiony w kanale argonowym (rys. 5.40) rejestruje spadek temperatury ze 150°C do około 101°C przy chłodzeniu swobodnym. Chłodzenie cieczą bez grzałki powoduje spadek do temperatury 26°, podczas gdy chłodzenie z pozostawioną grzałką kończy się na około 28°C. Dane zarejestrowane przez czujnik wewnętrzny (rys. 5.41) w uchwycie w wersji 3 pokazują spadek do temperatury około 92,6°C podczas swobodnego stygnięcia, podczas gdy chłodzenie cieczą bez grzałki prowadzi do spadku do około 29,4°C. Chłodzenie cieczą z grzałką w czasie 10 minut kończy się na około 31,4°C.

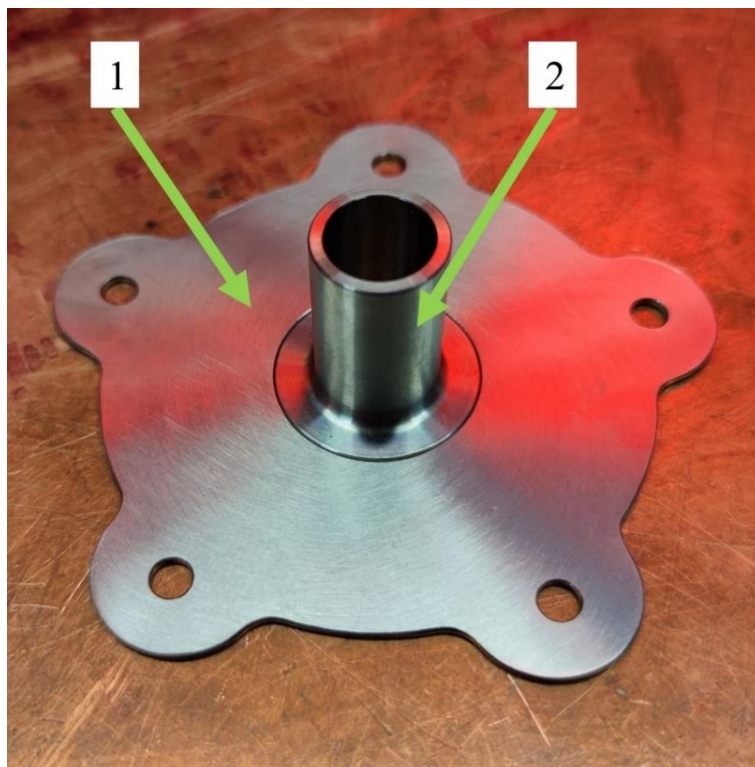
Wnioski z badań laboratoryjnych jednoznacznie wskazują, że chłodzenie cieczą, zarówno z grzałką, jak i bez, jest znacznie szybsze i bardziej efektywne niż chłodzenie swobodne. We wszystkich przypadkach, chłodzenie cieczą pozwalało na obniżenie temperatury do poziomu ok 100°C już po 30-60 sekundach, podczas gdy chłodzenie powietrzem potrzebowało 600 sekund, aby osiągnąć temperaturę w okolicy 100°C. W rezultacie chłodzenie cieczą przyspiesza proces schładzania o blisko 10 razy w porównaniu do chłodzenia swobodnego dla wszystkich analizowanych uchwytów.

## **5.4. Badania na wydziale produkcyjnym**

### **5.4.1. Opis badań na wydziale produkcyjnym**

Ostatni etap badawczy obejmował przeprowadzenie badań w rzeczywistych warunkach produkcyjnych ze szczególnym uwzględnieniem procesów spawania. Celem tego etapu było sprawdzenie efektywności i praktyczności proponowanych rozwiązań. Stanowiło to kluczowy krok w przeniesieniu teoretycznych założeń i wyników badań laboratoryjnych na grunt praktycznych zastosowań.

Badania na wydziale produkcyjnym Pratt & Whitney, podobnie jak poprzednie, zostały przeprowadzone w dwóch krokach. Pierwszym było pospawanie próbek (rys. 5.42). Proces ten został zaprezentowany na rys. 5.43.



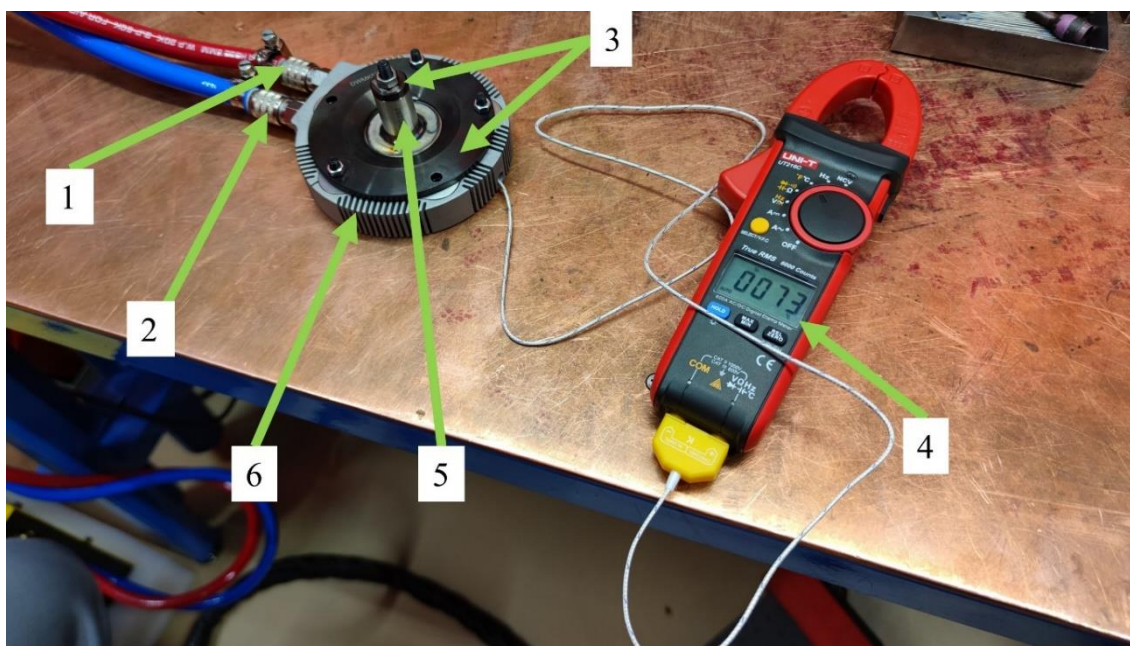
Rys. 5.42. Spawana próbka: (1) kołnierz, (2) rurka



Rys. 5.43. Proces spawania próbek

Drugim etapem było zebranie danych pomiarowych, zarejestrowanych przez czujnik znajdujący się w kanale argonowym, podczas swobodnego stygnięcia uchwytu po spawaniu oraz z wykorzystaniem wewnętrznego obiegu płynu chłodniczego.

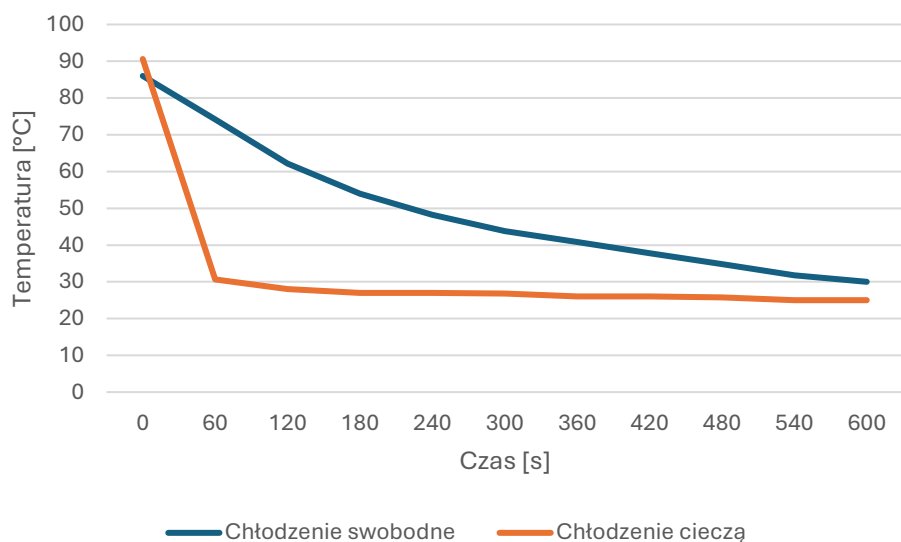
Trzecia część badań skupiła się na spawaniu próbek na wydziale produkcyjnym. Proces ten został podzielony na dwa kroki, aby dokładnie ocenić różne metody chłodzenia. W pierwszej kolejności, próbki zostały zamontowane na uchwycie razem z elementami montażowymi, a następnie poddane spawaniu. Po zakończeniu spawania, cały uchwyt z próbkami chłodzono na powietrzu. W drugim kroku, zaraz po zakończeniu spawania, uruchomiono agregat chłodzący. Dzięki temu możliwe było dokładne zbadanie efektywności procesu chłodzenia w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Celem tego etapu było porównanie wyników chłodzenia swobodnego z chłodzeniem wymuszonym. Etap ten przedstawiono na rys. 5.44.



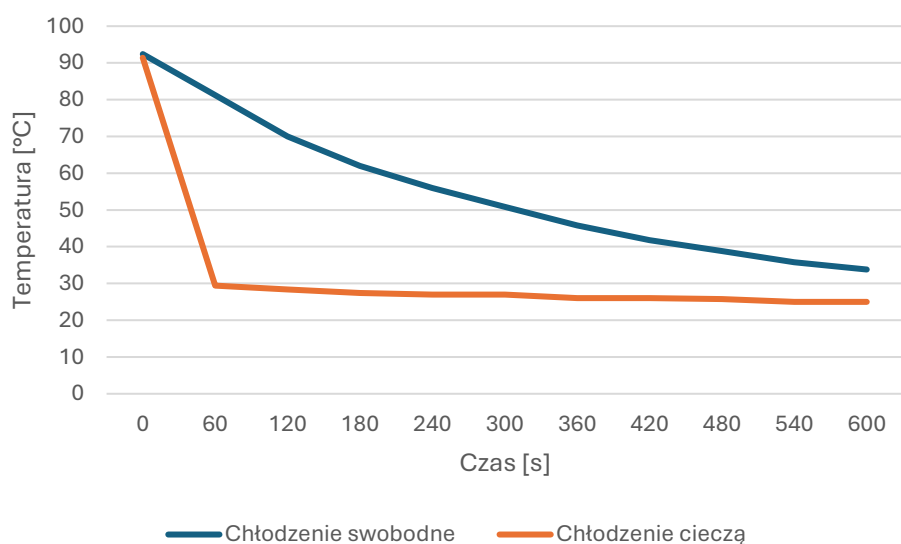
Rys. 5.44. Proces chłodzenia i rejestracji wyników po spawaniu próbek: (1) wyjście cieczy chłodzącej, (2) wejście cieczy chłodzącej, (3) elementy montażowe, (4) rejestrator temperatury, (5) pospawana próbka, (6) uchwyt

#### 5.4.2. Analiza wyników badań w warunkach produkcyjnych

Na rysunkach 5.45 – 5.47 zaprezentowano uśrednione wyniki badań przeprowadzonych w warunkach produkcyjnych.

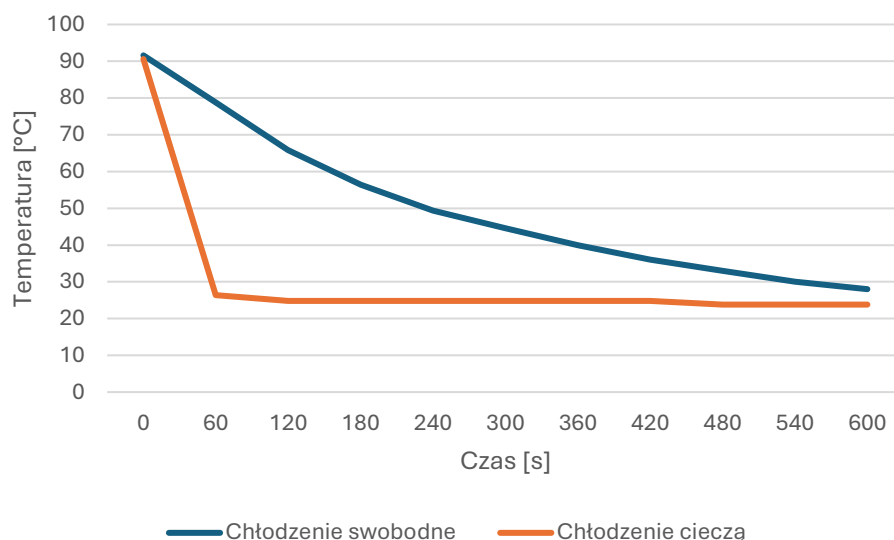


Rys. 5.45. Wykres chłodzenia, swobodnego oraz z wymuszonym obiegiem cieczy, uchwytu w wersji 1 po spawaniu



Rys. 5.46. Wykres chłodzenia, swobodnego oraz z wymuszonym obiegiem cieczy, uchwytu w wersji 2 po spawaniu





Rys. 5.47. Wykres chłodzenia, swobodnego oraz z wymuszonym obiegiem cieczy, uchwytu w wersji 3 po spawaniu

W przypadku uchwytu w wersji 1, chłodzenie na powietrzu początkowo prowadziło do wyższych temperatur, przy średniej temperaturze  $43,8^{\circ}\text{C}$  po 300 sekundach, która spadła do  $30^{\circ}\text{C}$  po 600 sekundach. Natomiast chłodzenie cieczą już po 300 sekundach osiągnęło znacznie niższą średnią temperaturę, wynoszącą  $26,8^{\circ}\text{C}$ , utrzymując się na poziomie  $25^{\circ}\text{C}$  po 600 sekundach (rys. 5.45).

Uchwyt w wersji 2 wykazywał podobne zachowanie, gdzie chłodzenie na powietrzu początkowo skutkowało wyższymi temperaturami, osiągając średnią temperaturę  $50,8^{\circ}\text{C}$  po 300 sekundach, a po 600 sekundach spadając do  $33,8^{\circ}\text{C}$ . Natomiast chłodzenie cieczą skutkowało niższymi temperaturami, ze średnią wynoszącą  $27^{\circ}\text{C}$  po 300 sekundach i stabilizującą się na poziomie  $25^{\circ}\text{C}$  po 600 sekundach (rys. 5.46).

W przypadku uchwytu w wersji 3, chłodzenie na powietrzu osiągnęło początkowo średnią temperaturę  $44,6^{\circ}\text{C}$  po 300 sekundach, spadającą do  $28^{\circ}\text{C}$  po 600 sekundach. Chłodzenie cieczą, z kolei, zapewniało znacznie niższe temperatury, z średnią wynoszącą  $24,8^{\circ}\text{C}$  po 300 sekundach, stabilizującą się na poziomie  $23,8^{\circ}\text{C}$  po 600 sekundach (rys. 5.47).

Chłodzenie cieczą, niezależnie od rodzaju uchwytu, wykazuje znacząco wyższą efektywność termiczną w porównaniu do chłodzenia powietrzem. We wszystkich analizowanych przypadkach chłodzenie cieczą umożliwiło obniżenie temperatury do poziomu  $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$  w krótkim czasie, wynoszącym około 60 sekund. Dla porównania chłodzenie powietrzem wymagało pełnych 600 sekund, aby osiągnąć zbliżone wartości temperaturowe. Można więc stwierdzić, że chłodzenie cieczą jest 10 razy szybsze w redukowaniu temperatury w badanym zakresie czasowym.

Ponadto, chłodzenie cieczą prowadzi do szybkiej stabilizacji temperatury na poziomie 25-27°C, co podkreśla jego przewagę w kontekście skutecznego i szybkiego odprowadzania ciepła. W krótkich przedziałach czasowych chłodzenie cieczą charakteryzuje się znacznie wyższą efektywnością, co czyni je bardziej odpowiednim rozwiązaniem dla procesów, które wymagają szybkiego i efektywnego obniżenia temperatury.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania, koncentrują się na zastosowaniu technologii przyrostowych, w szczególności druku 3D, w konstrukcji uchwytów spawalniczych. Analiza stanu zagadnienia wskazuje na ograniczoną ilość badań, które bezpośrednio zajmują się zastosowaniem nowoczesnych technologii w kontekście oprzyrządowania spawalniczego. Większość dostępnych prac koncentruje się na formach wtryskowych, gdzie implementacja druku 3D przynosi wymierne korzyści. W związku z tym, istnieje wyraźna luka badawcza dotycząca innowacyjnych rozwiązań w obszarze spawalnictwa.

W dynamicznie rozwijającym się przemyśle lotniczym, gdzie procesy spawania odgrywają szczególną rolę w łączeniu złożonych komponentów, wprowadzenie nowatorskich rozwiązań technologicznych może przynieść znaczące korzyści w zakresie efektywności i jakości produkcji. W kontekście przemysłu lotniczego wprowadzenie technologii druku 3D w oprzyrządowaniu spawalniczym ma potencjał przynieść realne korzyści, takie jak poprawa efektywności procesów produkcyjnych oraz jakość końcowych wyrobów.

Głównym celem pracy było opracowanie metodyki projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi stosowanych w przemyśle lotniczym. Przeprowadzone badania skupiały się na usprawnieniu systemów mocowań przyrządów spawalniczych poprzez zastosowanie wewnętrznych kanałów chłodzących, wykonanych w technologii PBF z materiału AlSi10Mg, w celu zmniejszenia temperatury w uchwycie oraz przyspieszenia procesu chłodzenia. Przeprowadzone symulacje komputerowe za pomocą programu ANSYS miały na celu ocenę rozkładu ciepła oraz tempa chłodzenia uchwytów spawalniczych. Wyniki symulacji wykazały, że nowe konstrukcje uchwytów, wyposażone w kanały wewnętrzne i radiatory znacząco przewyższają konwencjonalne rozwiązania, które wykorzystują miedziane wkładki, pod względem efektywności chłodzenia.

Symulacje MES umożliwiły szczegółową analizę termiczną i wytrzymałościową różnych wariantów uchwytów. Badania te obejmowały zarówno chłodzenie swobodne, jak i z wymuszonym obiegiem cieczy chłodzącej. Nowe modele uchwytów wykazały znacznie lepsze właściwości termiczne, co przekłada się na krótszy czas chłodzenia oraz mniejsze zużycie elementów spowodowane wysoką temperaturą. Symulacje wykazały, że chłodzenie wodą jest około 10 razy bardziej efektywne w porównaniu do chłodzenia swobodnego, co pozwala na znacznie szybsze i bardziej stabilne obniżenie temperatury.

Dalsze etapy badań obejmowały eksperymenty laboratoryjne, podczas których zastosowano element grzewczy zastępujący proces spawania. Umożliwiło to precyzyjną kontrolę parametrów grzania i chłodzenia, a także porównanie uzyskanych danych z wynikami symulacji komputerowych. Badania te potwierdziły słuszność teoretycznych założeń i wykazały poprawę efektywności chłodzenia uchwytów z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi. Chłodzenie cieczą przyspieszyło proces schładzania o około 10 razy w porównaniu do chłodzenia powietrzem we wszystkich badanych uchwytach.

Kolejnym krokiem była weryfikacja opracowanych modeli w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Testy przeprowadzone na wydziale produkcyjnym potwierdziły skuteczność nowych rozwiązań technologicznych w praktycznych zastosowaniach przemysłowych. Badania wykazały, że chłodzenie cieczą jest 10 razy szybsze w redukowaniu temperatury w badanym zakresie czasowym.

Założona hipoteza mówiąca, iż zastosowanie wewnętrznych kanałów chłodzących w systemach mocowania stosowanych w przyrządach spawalniczych wykorzystując techniki przyrostowe może wpłynąć na skrócenie czasu chłodzenia takiego elementu oraz zmniejszyć jego zużycie powstałe w wyniku podwyższonej temperatury okazała się zgodna z prawdą. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wszystkie opracowane uchwyty z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi nie tylko skracają czas chłodzenia 10-krotnie, ale także mogą zwiększyć trwałość oraz niezawodność oprzyrządowania spawalniczego.

Podsumowując, przeprowadzone badania potwierdziły, że technologie przyrostowe, takie jak druk 3D, mogą stanowić istotny krok naprzód w procesach spawalniczych. Dzięki możliwości tworzenia skomplikowanych geometrii wewnętrznych, pozwalających na efektywne odprowadzenie ciepła, co jest trudne do osiągnięcia przy użyciu tradycyjnych metod produkcyjnych. Wyniki tych badań mogą mieć znaczący wpływ na zwiększenie efektywności i jakości procesów produkcyjnych w przemyśle.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz zebranych wyników opracowano metodykę projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi, składającą się z 11 etapów:

- 1. Opracowanie założeń koncepcyjnych** – zdefiniowanie podstawowych założeń konstrukcyjnych i funkcjonalnych, które będą kluczowe dla dalszych etapów prac.
- 2. Opracowanie modelu CAD** – stworzenie trójwymiarowego modelu komponentu w programie 3D-CAD, która posłuży do dalszych analiz i wytwarzania.

- 3. Opracowanie modelu numerycznego i założeń warunków brzegowych** – zdefiniowanie niezbędnych warunków brzegowych potrzebnych do przeprowadzenia symulacji przepływów i analiz termicznych.
- 4. Wykonanie prototypu wizualnego metodą PolyJet** – szybkie prototypowanie w celu weryfikacji geometrii projektu i oceny jego zgodności z założeniami.
- 5. Wykonanie prototypu technologicznego metodą SLS** – weryfikacja technologiczności uchwytu oraz geometrii kanałów chłodzących.
- 6. Przeprowadzenie analizy numerycznej MES** – ocena wytrzymałości oraz analiza efektywności chłodzenia uchwytu na podstawie symulacji.
- 7. Wykonanie prototypu technicznego metodą PBF** – wytworzenie prototypu technicznego za pomocą technologii spiekania proszków w celu uzyskania wysokiej precyzji wymiarowej i właściwości mechanicznych.
- 8. Przeprowadzenie badań drożności kanałów** - weryfikacja geometrii wewnętrznych kanałów w uchwycie za pomocą testów przepływowych i tomografii komputerowej.
- 9. Obróbka wykańczająca** – precyzyjne wykończenie powierzchni montażowych oraz przyłączeniowych uchwytu.
- 10. Przeprowadzenie prób stanowiskowych** – testowanie prototypu w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, celem oceny wydajności systemu chłodzenia oraz jego zgodności z wymaganiami projektowymi.
- 11. Przeprowadzenie procesu spawania z użyciem uchwytu** – realizacja procesu spawania na wydziale produkcyjnym zgodnie z wymaganiami technologicznymi.

Technologia druku 3D, w szczególności Powder Bed Fusion (PBF), okazała się kluczowa w procesie projektowania i wytwarzania uchwytów spawalniczych. Wprowadzenie technologii przyrostowych umożliwia tworzenie bardziej złożonych geometrii wewnętrznych, które znacząco poprawiają efektywność chłodzenia uchwytów spawalniczych. Wyniki badań wykazały, że uchwyty z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi przewyższają tradycyjne rozwiązania pod względem efektywności chłodzenia.

Badania skoncentrowane na różnych konfiguracjach wewnętrznych kanałów chłodzących pokazały, że zarówno kształt, jak i wielkość kanałów mają istotny wpływ na efektywność chłodzenia. Symulacje komputerowe i badania empiryczne pomogły zidentyfikować najbardziej efektywne układy chłodzenia. Uchwyty, z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi, wykonane za pomocą druku 3D z materiału AlSi10Mg wykazały znacznie lepsze właściwości

termiczne, co skraca 10-krotnie czas ich chłodzenia, a w efekcie może prowadzić do zmniejszenia ich zużycie w wyniku podwyższonych temperatur.

Analiza efektywności chłodzenia wykazała, że uchwyt w wersji 2 sprawdzał się najlepiej spośród badanych wariantów, osiągając najniższą stabilizowaną temperaturę podczas chłodzenia cieczą oraz porównywalnie niską temperaturę podczas chłodzenia powietrzem. Z kolei uchwyt w wersji 1 okazał się najmniej efektywny, osiągając najwyższą stabilizowaną temperaturę w procesie chłodzenia wodą, oraz relatywnie wysoka temperaturę końcową podczas chłodzenia swobodnego. Wyniki jednoznacznie wskazują na lepsze właściwości termiczne uchwytu w wersji 2, który charakteryzował się szybszym i bardziej efektywnym procesem chłodzenia w porównaniu do pozostałych wariantów.

W celu zwiększenia efektywności procesów produkcyjnych oraz jakości wyrobów, zaleca się kontynuację badań nad różnymi konfiguracjami kanałów chłodzących. Analiza mikrostruktury i właściwości mechanicznych spoin, a także eksperymentowanie z nowymi materiałami stosowanymi w technologii PBF, może dostarczyć cennych informacji i prowadzić do dalszych innowacji.

W przemyśle lotniczym, gdzie procesy spawania są kluczowe dla łączenia złożonych komponentów, zastosowanie technologii druku 3D w oprzyrządowaniu spawalniczym ma potencjał przynieść znaczące korzyści. Przeprowadzone badania wykazały, że nowe rozwiązania technologiczne mogą poprawić efektywność procesów produkcyjnych oraz jakość końcowych wyrobów. Optymalizacja chłodzenia uchwytów spawalniczych wpływa na skrócenie czasu chłodzenia i zwiększenie trwałości narzędzi, co jest szczególnie istotne w kontekście produkcji lotniczej.

Rozwój inteligentnych systemów monitorowania, które wykorzystują czujniki do ciągłego śledzenia temperatury, naprężeń i zużycia oprzyrządowania w czasie rzeczywistym, może przyczynić się do dalszej optymalizacji procesów spawalniczych. Analiza danych zbieranych przez te systemy może prowadzić do wdrożenia zaawansowanych algorytmów optymalizacji topologicznej, które automatycznie generują najbardziej efektywne geometrie uchwytów spawalniczych, uwzględniając zarówno parametry termiczne, jak i mechaniczne.

Wprowadzenie technologii przyrostowych w oprzyrządowaniu spawalniczym może również przyczynić się do bardziej zrównoważonego rozwoju przemysłu. Badania nad ekologicznym wpływem zastosowania technologii przyrostowych, wraz z integracją z systemami automatyzacji i robotyki, mogą prowadzić do tworzenia bardziej efektywnych i przyjaznych dla środowiska procesów produkcyjnych. Porównawcza analiza różnych technologii druku 3D oraz zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarowych do

monitorowania jakości i precyzji wytwarzania uchwytów spawalniczych mogą dostarczyć cennych informacji na temat optymalizacji tych procesów.

W tym miejscu warto również zwrócić uwagę na przyszłe kierunki badań, które mogą jeszcze bardziej zoptymalizować procesy produkcyjne i zwiększyć efektywność oraz jakość wyrobów. Kontynuacja badań nad różnymi konfiguracjami wewnętrznych kanałów chłodzących, z uwzględnieniem ich kształtu oraz wielkości, może pomóc w identyfikacji najbardziej efektywnych układów chłodzenia. Analiza wpływu różnych metod chłodzenia podczas spawania na właściwości mechaniczne i termiczne spoin, w tym badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych spoiny wykonanej podczas chłodzenia wewnętrznymi kanałami, jest kluczowa dla dalszego rozwoju tej technologii.

W pierwszej kolejności warto kontynuować badania nad różnymi konfiguracjami wewnętrznych kanałów chłodzących, z uwzględnieniem ich kształtu (przekroju poprzecznego) oraz wielkości. Symulacje komputerowe oraz badania empiryczne mogą pomóc w identyfikacji najbardziej efektywnych układów chłodzenia, które maksymalizują odprowadzanie ciepła i minimalizują deformacje termiczne. Analiza wpływu różnych metod chłodzenia podczas procesu spawania na właściwości mechaniczne i termiczne spoin jest kluczowa, zwłaszcza jeśli chodzi o różne prędkości przepływu cieczy chłodzącej.

Badania nad strukturą materiału spoiny wykonanej podczas chłodzenia wewnętrznymi kanałami powinny obejmować analizę mikrostruktury i właściwości mechanicznych spoiny w odniesieniu do spawania bez zastosowania chłodzenia. Pozwoli to na ocenę wpływu chłodzenia na strukturę krystaliczną, twardość oraz odporność na pękanie materiału spoiny. Eksperymentowanie z różnymi przekrojami poprzecznymi kanałów chłodzących, takimi jak okrągłe, prostokątne, trapezowe, może dostarczyć cennych informacji na temat ich efektywności chłodzenia.

Kolejnym obszarem przyszłych badań może być dokonanie eksperymentów z innymi materiałami stosowanymi w technologii PBF lub też innymi metodami wytwarzania przyrostowego z metali. Badania nad właściwościami tych materiałów oraz ich zachowaniem w warunkach spawania mogą przyczynić się do dalszej poprawy wydajności oprzyrządowania. Długoterminowe badania trwałości i wytrzymałości oprzyrządowania spawalniczego w rzeczywistych warunkach produkcyjnych również są niezbędne. Monitorowanie zużycia oraz ocena wpływu powtarzalnych cykli termicznych na integralność strukturalną może dostarczyć cennych informacji na temat żywotności tych elementów.

Ważnym kierunkiem przyszłych badań jest również rozwój i implementacja inteligentnych systemów monitorowania, które wykorzystują czujniki do ciągłego śledzenia temperatury, naprężeń i zużycia oprzyrządowania w czasie rzeczywistym. Dane zbierane przez te systemy mogą być analizowane w celu optymalizacji procesów spawalniczych. Opracowanie zaawansowanych algorytmów optymalizacji topologicznej, które mogą automatycznie generować najbardziej efektywne geometrie uchwytów spawalniczych, uwzględniając zarówno parametry termiczne, jak i mechaniczne, również zasługuje na uwagę. Wykorzystanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego może przyspieszyć ten proces i prowadzić do bardziej innowacyjnych rozwiązań.

Optymalizacja procesów drukowania 3D, takich jak prędkość drukowania, grubość warstwy i orientacja druku, także może prowadzić do uzyskania lepszych właściwości końcowych uchwytu spawalniczego. Badanie zmian mikrostruktury materiałów uchwytów podczas wielokrotnego użycia cykli spawania pozwoli zrozumieć, jak materiały zmieniają się w czasie i jakie są ich granice użytkowe.

Ostatnią, nie mniej ważną propozycją są badania nad ekologicznym wpływem zastosowania technologii przyrostowych w oprzyrządowaniu spawalniczym oraz integracja z systemami automatyzacji i robotyki, które mogą przyczynić się do tworzenia bardziej efektywnych i zrównoważonych procesów produkcyjnych. Analiza porównawcza różnych technologii druku 3D oraz zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarowych do monitorowania jakości i precyzji wytwarzania uchwytów spawalniczych mogą również dostarczyć cennych informacji na temat optymalizacji tych procesów.

Podsumowując, przyszłe badania nad technologiami przyrostowymi w oprzyrządowaniu spawalniczym powinny obejmować szeroki zakres tematów, od optymalizacji kanałów chłodzących i badań nad nowymi materiałami, po analizę ekologicznego wpływu i integrację z systemami automatyzacji. Te kierunki badań mają potencjał do dalszej poprawy jakości i efektywności procesów spawalniczych, a także do wprowadzenia innowacji, które mogą znacząco wpłynąć na przyszłość przemysłu lotniczego i innych sektorów przemysłowych wykorzystujących spawalnictwo.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Budzik G., Woźniak J., Przeszlowski Ł.: *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022
- [2] Wohlers Raport, *3D Printing and Additive Manufacturing Global State of Industry*, Wohlers Associates, 2022
- [3] Budzik G.: *Raport o stanie obszaru szybkiego prototypowania w Polsce*. Stal, Metale & Nowe Technologie 2016, nr 1-2, s. 18-24
- [4] Budzik G., Tomaszewski K., Soboń A.: *Opportunities for the Application of 3D Printing in the Critical Infrastructure System*, ENERGIES 2022, 15, 1656
- [5] Veiga F., Suarez A., Aldalur E., Goenaga I., Amondarian J.: *Wire Arc Additive Manufacturing Process for Topologically Optimized Aeronautical Fixture*, 3D Printing and Additive Manufacturing 2023 10:1, 23-33
- [6] Krznar N., Pilipovic A., Serces M.: *Additive manufacturing of fixture for automated 3D scanning – case study*, International Conferences on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, 6-10.06.2016, Nowy Smokowiec, Słowacja, s. 197-202
- [7] Budzik G., Przytuła M., Paszkiewicz A., Poliński P., Kiełbicki M.: *Analiza rozwiązań zdalnych aplikacji sterowania i monitoringu procesu druku 3D*, Przegląd Mechaniczny, nr 3, s. 36-39, 2021
- [8] Budzik G.: *Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013
- [9] Bitonti F.: *3D Printing Design: additive manufacturing and the materials revolution*. Bloomsbury Visual Arts, 2019
- [10] Chlebus E., Boratyński T., Dybała B., Frankiewicz M., Kolinka P.: *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003
- [11] Thomas P.A., Aahlada P.K., Kiran N.S., Ivvala J., *A Review on Transition in the Manufacturing of Mechanical Components From Conventional Techniques to Rapid Casting Using Rapid Prototyping*. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2), 11990-12002
- [12] Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., Du Plessis A.: *Metal additive manufacturing in aerospace: A review*, Materials & Design, listopad 2021, t. 209

- [13] Hallgren S., Pejryd L., Ekengren J.: *(Re)Design for Additive Manufacturing*, Procedia CIRP, 2016, t. 50, s. 246-251
- [14] Jahan S.A., El-Mounayri H.: *Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding*, Procedia Manufacturing, 2016, t. 5, s. 888-900
- [15] Jahan S.A., El-Mounayri H., *A Thermomechanical Analysis of Conformal Cooling Channels in 3D Printed Plastic Injection Molds*, Applied Sciences, 2018, 8(12):2567
- [16] Jahan S., Wu T., Shin Y., Tovar A., El-Mounayri H.: *Thermo-fluid Topology Optimization and Experimental Study of Conformal Cooling Channels for 3D Printed Plastic Injection Molds*, 47th SME North American Manufacturing Research Conference, Penn State Behrend Erie, Pennsylvania, 2019
- [17] Naing S., Burley G., Odi R., Williamson A., Corbett J.: *Design for Tooling to Enable Jigless Assembly – An Integrated Methodology for Jigless Assembly*, SAE Transactions, t. 109, 2000, s. 299-311
- [18] Materiały własne Pratt & Whitney Rzeszów S. A.
- [19] Sobolewski J., S. Karpiński. *Techniki wytwarzania. Projektowanie oprzyrządowania*. Politechnika Warszawska, 2012
- [20] Jha N.K., Prem R.: *Design and Analysis of Welding Fixture for Elementary Weld Joints*, CVR Journal of Science and Technology, t. 15, 2018, s. 90-95
- [21] Gameros A., Lowth S., Axinte D., Nagy-Sochacki A., Craig O., Siller H.R.: *State-of-the-art. In fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, s. 1-21
- [22] Venkataraman K. *Design of Jigs, Fixtures and Press Tools*, Wiley, 2015
- [23] Hunter Alarcon R., Rios Chueco J., Perez Garcia J.M., Vizan Idoipe A. *Fixture knowledge model development and implementation based on a functional design approach*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, t. 26, 2010, s. 56-66
- [24] Pachbahi S., Raut L., *A review on Design of fixture*, International Journal of Engineering Research and General Science, t. 2, wyd. 2, 2014
- [25] Capanidis D., Kowalewski P., *Przegląd systemów wspomagania procesów konstruowania i wytwarzania*, Wydawnictwo Uczelni Jana Wyżykowskiego, t. 1, s. 25-42, 2012
- [26] CADBlog.pl, *Historia systemów CAD*, <https://www.cadblog.pl/index.php/historia-systemow-cad/> [dostęp: 29.12.2023]
- [27] Boyle I.M., Rong K., Brown D.C.: *CAFixD: A Case-Based Reasoning Fixture Design Method Framework and Indexing Mechanism*, Journal of Computing and Information Science in Engineering – JCISE, 2006

- [28] Siemiński P., G. Budzik.: *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2015
- [29] Budzik G., Woźniak J., Przeszlowski Ł.: *Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022
- [30] Attaran M., *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*, Business Horizons, 2017, vol. 60 (5)
- [31] Behm, J.E., Waite, B.R., Hsieh, S.T, Helmus M. R. *Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research*. BMC Ecology, 2018, 18 (32)
- [32] Curiel D., Veiga, F., Suarez A., Villanueva P., *Advances in Robotic Welding for Metallic Materials: Application of Inspection, Modeling, Monitoring and Automation Techniques*. Metals 2023, vol. 13, p. 711
- [33] IMAO Corporation, *Pullfix-Pull Stud Fixture*, <https://www.imao.com/en/products/pullfix-en.html> [dostęp: 18.06.2024]
- [34] Bi Z.M., Zhang W.: *Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions*, International Journal of Production Research, t. 37, nr 13, s. 2867-2894, 2010
- [35] Nee A.Y.C., Whybrew K., Senthil kumar A.: *Fixture and Flexible Manufacturing Systems*, Advanced Fixture Design for FMS, s. 1-10, 1995
- [36] Asada H., By A.: *Kinematic analysis of workpart fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixture*, IEEE Journal on Robotics and Automation, t. 1, nr 2, s. 86-94, 1985
- [37] Ngoi B.K.A., Tay M.L., Wong C.S.: *Development of an automated fixture set-up system for inspection*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 13, s. 342-349, 1997
- [38] Gandgi M.V., Thompson B.S.: *Phase change fixturing for flexible manufacturing systems*, Journal of Manufacturing Systems, t. 4, r. 1, s. 29-39, 1985
- [39] Liu H., Wang Ch., Li T., Bo Q., Liu K., Wang Y.: *Fixture technology and system for thin-walled parts machining: a review*, Frontiers of Mechanical Engineerings, t. 17, nr 4, 2022
- [40] Habashi F.: *Alloys. Preparations, Properties, Applications*, Wiley-VCH, wyd. 1, Weinheim, Niemcy, 1998
- [41] Lee E., Sarma S.E.: *Reference free part encapsulation: Materials, machines and methods*, Journal of Manufacturing System, t. 26, r. 1, s. 22-36, 2007

- [42] Rong Y., Rongjia T., Xiansheng T.: *Flexible Fixturing with Phase-Change Materials. Part I. Experimental Study on Magnetorheological Fluids*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 16, r. 11, s. 822-829, 2000
- [43] Machinable Wax, <https://machinablewax.com> [dostęp: 18.01.2024]
- [44] Witte Barskamp, *Witte Gefrierspanntechnik – Ice Vice*, <https://www.witte-barskamp.com/presse-zentrum/pressezentrum-vakuum-spanntechnik/witte-gefrierspanntechnik-ice-vice/> [dostęp: 18.01.2024]
- [45] Ahn S.-H., Wright P.K.: *Reference Free Part Encapsulation (RFPE): An investigation of material properties and the role of RFPE in a taxonomy of fixturing systems*, nr 21, s. 101-110, 2002
- [46] Sarma S.E., Wright P.K.: *Reference Free Part Encapsulation: a new universal fixturing concept*, Journal of Manufacturing System, t. 16, r. 1, s. 35-47, 1997
- [47] Thompson D.J., Brian S.G., Mukesh V.D.: *Workpiece-fixture interactions in a compacted fluidized-bed fixture under various loading conditions*, International Journal of Production Research, t. 27, r. 2, s. 229-246, 1989
- [48] Kamarthi S., Bohle N., Zeid A.: *Investigating the design and development of truly agile flexible fixtures based on electrorheological fluids*, International Journal of Rapid Manufacturing, t. 1, nr 1, s. 99-110, 2009
- [49] Tang X., Zhang X., Tao R.: *Flexible Fixturing Device with Magneto-Rheological Fluids*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, t. 10, nr 9, s. 928-940, 1999
- [50] Kaiknuma Y., Aouama T., Anzai H.: *Application of the electro-rheological Gel to fixture devices for micro milling processes*, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, t. 1, nr 3, s. 387-398, 2007
- [51] Ke Y., Liu G.: *Attractive fixture system based on magnetic field and friction force for numerically controlled machining of paper honeycomb core*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, t. 127, nr 4, s. 901-906, 2005
- [52] Matrix Innovations, <https://www.matrix-innovations.com> [dostęp: 24.06.2024]
- [53] Nagurka M.L., Englert R.: *Toward an intelligent machine tool for flexible manufacturing*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, t. 6, nr 3, s. 229-236, 1989
- [54] Al-Habaibeh A., Gindy N., Parkin R.M.: *Experimental design and investigation of a pin-type reconfigurable clamping system for manufacturing aerospace components*, Journal of Engineering Manufacture, t. 217, nr 12, d. 1771-1777, 2003

- [55] Youcef-Toumi K., Buitrago J.H.: *Design and implementation of robot operated adaptable and modular fixture*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, t. 5, nr 4, s. 343-356, 1989
- [56] Gupta S., Bagchi A., Lewis R.: *Sensor based fixturing system*, Recent developments in production research, s. 11-16, 1988
- [57] Hameed R.A., Mannan M.A., Nee A.Y.C.: *The cutting force measurement in a fixturing setup with instrumented locators*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 23, nr 11, s. 783-793, 2004
- [58] De Meter E.C., Hockenberger M.J.: *The application of tool path compensation for the reduction of clamping induced geometric errors*, International Journal of Production Research, t. 35, nr 12, s. 3415-3432, 1997
- [59] Wang Y.F., Fuh J.Y.H., Wong Y.S.: *A model-based online control of optimal fixturing process*, Proceedings of International Conferences on Robotics and Automation, t. 3, s. 2019-2024, 1997
- [60] Nee A.Y.C., Kumar A.S., Tao Z.J.: *An intelligent fixture with a dynamic clamping scheme*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, t. 214, nr 3, s. 183-196, 2000
- [61] Lasi H., Fettke P., Kemper H.G., Feld T., Hoffmann M.: *Industry 4.0*, Business & Information System Engineering, t. 6, s. 239-242, 2014
- [62] Lee J., Kao H.-A., Yang S.: *Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment*, Procedia CIRP, t. 16, s. 3-8, 2014
- [63] Chan K. Ch., Lin C.S.: *Development of a computer numerical control (CNC) modular fixture – Machine design of a standard multifinger module*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 11, nr 1, s. 18-26, 1996
- [64] Ryll M., Papastathis T.N., Ratchev S.: *Towards an intelligent fixturing system with rapid reconfiguration and part positioning*, Journal of Materials Processing Technology, t. 201, nr 1, s. 198-203, 2008
- [65] Zielińska T., Kasprzak W., Zlatanov D.: *Task planning for cooperating self-reconfigurable mobile fixture*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 69, nr 9-12, s. 2555-2568, 2013
- [66] Xiong L., Molfino R.M., Zoppi M.: *Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 66, s. 9-12, 2012
- [67] Molfino R.M., Zoppi M., Zlatanov D.: *Reconfigurable swarm fixture*, IEEE Xplore, Reconfigurable Mechanism and Robots, s. 730-735, 2009

- [68] Golightly D., Sharples S., Patel H., Ratchev S.: *Manufacturing in the cloud: A human factor perspective*, International Journal of Industrial Ergonomics, t. 55, s. 12-22, 2016
- [69] Skawiński P., *Technologia budowy maszyn*, Warszawa 2012
- [70] ProcesTechnologiczny.com.pl, *Ustalenie przedmiotu, cz.2: Bazy obróbkowe*, <https://proces technologiczny.com.pl/ustalenie-przedmiotu-cz-2-bazy-obrobkowe/> [dostęp: 29.12.2023]
- [71] *Instrukcja dotycząca zarządzania programem ergonomii pracy oraz ręcznych prac transportowych*, nr 152, wyd. K/18, materiały własne Pratt & Whitney Rzeszów S. A., dokument wewnętrzny
- [72] Wang J., Huang L., Yao J., Liu M., Du Y., Zhao M., Su Y., Lu D., *Weld Seam Tracking and Detection Robot Based on Artificial Intelligence Technology*. Sensors 2023, vol. 23, p. 6725
- [73] Paszkiewicz A., Budzik G., Bolanowski M., Woźniak J., Przytuła M., Kiełbicki M., Poliński P., Kochmański Ł.: *Incremental processing of polymer materials using the INDUSTRY 4.0 network structure*, Polimery, t. 66, nr 7-8, s. 418-425, 2021
- [74] Aldalur E., Suárez A., Curiel D., Veiga F. Villanueva P., *Intelligent and Adaptive System for Welding Process Automation in T-Shaped Joints.*, Metals, 2023, vol. 13, p. 1532
- [75] Yan J., Zhang M., Xu Y.: *Multi-Objective Considered Process Parameter Optimization of Welding Robots Based on Small Sample Size Dataset*, Sustainability 2023, vol. 15, p. 15051
- [76] Epping K., Zhang H. A., *Sustainable Decision-Making Framework for Transitioning to Robotic Welding for Small and Medium Manufacturers*. Sustainability 2018, vol. 10, p. 3651
- [77] Norma DIN ISO 2768
- [78] Hashemi H., Shaharoun A. M., Sudin I., *A case-based reasoning approach for design of machining fixture*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74, s. 113-124, 2014
- [79] Neumann W., Village J., Annett T., Greig M.: *Ergonomic design-for-fixture guidelines and proces of implementation – A Case Study*, The Association of Canadian Ergonomists Annual Conference, 2012
- [80] Elahe A., *Design of welding fixture for sample parts and user manual for Motoman XRC welding robot*, Mechanical Engineering and Production Technology, 2017
- [81] EBMiA, *Rodzaje aluminium*, <https://www.ebmia.pl/wiedza/kalkulatory/materialy/rodzaje-aluminium/> [dostęp: 29.12.2023]
- [82] Nowak M.: *Twarde anodowe powłoki tlenkowe na aluminium i jego stopach*, Stal, Metale & Nowe Technologie, wyd. ELAMED Media Group, t. 1-2, 2020, s. 136-141

- [83] Anual M.T., Sahroni T.R., Akmal S., Nasution F.A.: *Transient Thermal Analysis of Welding Fixture Design*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018, t. 195
- [84] 3D Systems, *Our Story*, <https://www.3dsystems.com/our-story> [dostęp: 29.12.2023]
- [85] Anwajler B., Witek-Krowiak, A., *Three-Dimensional Printing of Multifunctional Composites: Fabrication, Applications, and Biodegradability Assessment.*, Materials, 2023, vol. 16, p. 7531.
- [86] Woźniak J., Budzik G., Przeszlowski Ł., Fudali P., Dziubek T., Paszkiewicz A., *Analysis of the quality of products manufactured with the application of additive manufacturing technologies with the possibility of applying the Industry 4.0 conception*, International Journal for Quality Research, 2022, vol. 16 (3), p. 831-850
- [87] ISO/ASTM DIS 52900. Wytwarzanie przyrostowe – Zasady ogólne – Terminologia
- [88] Budzik G., Dziubek T., Kawalec A., Turek P., Bazan A., Dębski M., Józwick J., Poliński P., Kiełbicki M., Kochmański Ł., Oleksy M., Cebulski J., Paszkiewicz A., Kuric I.: *Geometrical Accuracy of Threaded Elements Manufacture by 3D Printing Process*, Advances in Science and Technology Research Journal, t. 17, nr 1, s. 35-45, 2023
- [89] Mellor S., Hao L., Zhang D.: *Additive manufacturing: A framework for implementation*, International Journal of Production Economics, t. 149, s. 194-201, 2014
- [90] Dziubek T., Budzik G., Kawalec A., Dębski M., Turek P., Oleksy M., Paszkiewicz A., Poliński P., Kochmański Ł., Kiełbicki M., Józwick J., Kuric I., Cebulski J.: *Strength of threaded connections additively produced from polymeric materials*, Polimery, t. 67, nr 6, s. 261-270, 2022
- [91] Lee J. -Y., Jua A., Chee Kai Ch., *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*, Applied Materials Today, t. 7, s. 120-133, 2017
- [92] Knezevic I., Bojic S., Lukic D., Rackov M., Cavic M., Pencic M., Cako S.: *Application of 3D printed fixture for welding*, Journal of Production Engineering, t. 22, nr 1, s. 15-18, 2019
- [93] Lachmayer R., Lippert R.B., *Geschäftsmodelle, Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*, Springer Berlin Heidelberg, s. 129-140, 2020
- [94] Formlabs, *White Paper Konstruktion von Vorrichtungen mit 3D Druck*, <https://3d.formlabs.com/white-paper-konstruktion-von-vorrichtungen-mit-3d-druck/> [dostęp: 29.12.2023]
- [95] Stratasys, *3D Printing Jugs, Fixtures and Manufacturing Tools*, <https://www.stratasys.com/en/resources/whitepapers/3d-printing-jigs-fixtures-manufacturing-tools/> [dostęp: 29.12.2023]

- [96] Stratasys, *FDM Jigs, Fixtures and Manufacturing Tools*, <https://www.stratasys.com/de/resources/resource-guides/fdm-jigs-fixtures-and-manufacturing-tools/> [dostęp: 29.12.2023]
- [97] Markforged, *Welding Fixtures*, <https://markforged.com/de/resources/manufacturing-applications/welding-fixtures> [dostęp: 29.12.2023]
- [98] Chuck A.: *Streamlining Automotive Production with Additive Manufacturing*, *Quality*, t. 57, nr 5, s. 37-39, 2018
- [99] ZMorph, *3D Printed Jigs and Fixtures*, <https://zmorph3d.com/blog/3d-printed-jigs-fixtures/> [dostęp: 26.06.2024]
- [100] Bergweiler G., Triebs J., Hansen J.O., Lichtenthaler K., Leimbrink S.: *Beitrag zur Reduzierung der Vorrichtungskosten im Karosseriebau*, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, t. 114, nr 7-8, s. 460-463, 2019
- [101] Bergweiler G., Heinze F., Lichtenthaler K., Bickendorf P.: *Ressourceneinsparung durch additiv gefertigte Umformwerkzeuge und Schweißvorrichtungen*, *ATZproduktion*, t. 7, s. 44-47, 2020
- [102] Frostmann R., Wagner J., Kreiskother K., Kampker A., Busch D.: *Design for Automation: The Rapid Fixture Approach*, *Procedia Manufacturing*, t. 77, s. 633-640, 2017
- [103] Kampker A., Bergweiler G., Hollah A., Lichtenthaler K., Leimbrink S.: *Design and testing of the different interfaces in a 3D printed welding jig*, *Procedia CIRP*, t. 81, s. 45-50, 2019
- [104] Schuh G., Bergweiler G., Fiedler F., Lichtenthaler K., Leimbrink S.: *Hybrid Welding Jugs with Additive Manufactured Functional Elements*, 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, s. 484-488, 2019
- [105] Schuh G., Bergweiler G., Lichtenthaler K., Fiedler F.: *Topology Optimisation and Metal Based Additive Manufacturing of Welding Jig Elements*, *Procedia CIRP*, t. 93, s. 62-67, 2020
- [106] Lichtenthaler K., Holtgen Ch., Fiedler F., Bergweiler G.: *Automatisierte Konstruktion von Schweißvorrichtungen im Karosseriebau/Automated Design of Welding Jigs for Body Shops*, *Konstruktion*, t. 73, nr 3, s. 63-63, 2021
- [107] Lichtenthaler K.: *Ressourcenschonende additive Fertigung von Schweißvorrichtungen im Karosseriebau*, 1st ed. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2021
- [108] Hillebrecht M., Gaytan M.: *Industrialisierung der Additiven Fertigung – NextGen Spaceframe 2.0: Bionik, Additive Manufacturing und Aluminium für den flexiblen High-End-Leichtbau*, *Karosseriebautage Hamburg 2018*, Springer Vieweg, Wiesbaden, s. 127-145



- [109] Fantoni G., Santochi M., Dini G., Tracht K., Scholz-Reiter B., Fleischer J., Lien T.K., Seliger G., Reinhart G., Franke J., Hansen H.N., Verl A.: *Grasping devices and methods in automated production processes*, CIRP Annals, t. 63, r. 2, s. 679-701, 2014
- [110] Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L.: *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 67, nr 5–8, 2013
- [111] BMW Group, *Eine Million Gedruckte Teile in nur Zehn Jahren: Einsatz von 3D Druck nimmt bei der BMW Group zu*, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/-article/detail/T0286883DE/eine-million-gedruckte-teile-in-nur-zehn-jahren:-einsatz-von-3d-druck-nimmt-bei-der-bmw-group-zu> [dostęp: 03.01.2024]
- [112] Vasco J.C.: *Additive manufacturing for the automotive industry*, Additive Manufacturing, Elsevier, 2021
- [113] BMW Group Landshut, *3D Druck mal Anders*, <https://www.bmwgroup-werke.com/-landshut/de/aktuelles/pressemitteilungen/2020/3d-druck-mal-anders.html> [dostęp: 03.01.2024]
- [114] Chitariu D.-F., Munteanu A.: *Research on 3D printed fixture components*, MATEC Web of Conferences, t. 178, 2018
- [115] Paliwal R., Saini R., Mishra R.K., Tiwari S., Madan A.K.: *3D printed jigs and fixtures Application in manufacturing of suspension arm for ATV*, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, t. 8, r. 3, 2021
- [116] Penny R.W., Hart A.J.: *Precision assembly of additively manufactured components using integral kinematic couplings*, Precision Engineering, t. 60, s. 104-114, 2019
- [117] Grazia Violante M., Iuliano L., Minetola P.: *Design and production of fixtures for free-form components using selective laser sintering*, Rapid Prototyping Journal 2007, t. 13, nr 1
- [118] Krzmar N., Pilipović A., Šercer M., *Additive Manufacturing of Fixture for Automated 3D Scanning – Case Study*, Procedia Engineering, t. 149, 2016
- [119] Minetola P., Iuliano L., *The reverse guillotine tribometer for evaluation of sliding wear of additive manufactured fixtures*, Rapid Prototyping Journal 2014, t. 20, nr 2
- [120] Segal J.I., Campbell R.I.: *A review of research into the effects of rapid tooling on part properties*, Rapid Prototyping Journal, t. 7, nr 2, s. 90-99, 2001
- [121] Radstok E.: *Rapid tooling*, Rapid Prototyping Journal, t. 5, nr 4, s. 164-169, 1999
- [122] Gibbons D.W., Govender P., Van der Merwe, A.F. *Metal powder feedstock evaluation and management for powder bed fusion: a review of literature, standards, and practical guidelines.*, Progress in Additive Manufacturing, 2023,

- [123] Bobbio L.D., Qin S., Dunbar A., Michaleris P., Beese A.M.: *Characterization of the strength of support structures used in powder bed Fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V*, Additive Manufacturing, t. 14, s. 60-68, 2017
- [124] Lee K-H., Yun G.J.: *Design optimization of thermally conductive support structure for laser powder-bed Fusion process with part-scale thermal history*, Additive Manufacturing, t. 51, 2022
- [125] Yao L., Ramesh A., Xiao Z., Chen Y., Zhuang Q., *Multimetal Research in Powder Bed Fusion: A Review*. Materials, 2023, vol. 16, p. 4287.
- [126] 3DS, *Powder Bed Fusion Process Guide*, <https://www.3ds.com/make/guide/-process/powder-bed-fusion> [dostęp: 26.06.2024]
- [127] Bochnia J., Kozior T., Zyz J., *The Mechanical Properties of Direct Metal Laser Sintered Thin-Walled Maraging Steel (MS1) Elements*. Materials, 2023, vol. 16, p. 4699
- [128] Budzik G.: *Raport o stanie obszaru szybkiego prototypowania w Polsce*, Stal, Metale & Nowe Technologie 2016, nr 1-2, s18-24
- [129] Elakkad A.S.: *3D Technology in the Automotive Insustry*, Int. J. Eng. Tech. Res. 2019, 8, s. 248-251
- [130] Yılmaz F., Gürses E., Şahin, M., *Determination of the elastoplastic properties of Ti-6Al-4V alloy manufactured by electron beam melting*, Rapid Prototyping Journal, 2023, vol 29 (10), p. 2149–2163
- [131] Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Medina F.R., Wicker R.B.: *Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies*, J. Mater. Sci. Technol. 28, 2012, s. 1-14
- [132] Friel R.J., Harris R.A.: *Ultrasonic Additive Manufacturing – A Hybrid Production Process for Novel Functional Products*, Procedia CIRP, 2013, t. 6, s. 35-40
- [133] Dapino M.J.: *Smart Structure Integration Through Ultrasonic Additive Manufacturing*, Volume 2: Mechanics and Behavior of Active Materials; Integrated System Design and Implementation; Bioinspired Smart Materials and Systems; Energy Harvesting, Newport, Rhode Island, USA 2014
- [134] Shimizu S. i in., *Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al. Alloy 6061*, Acta Materialia, t. 74, 2014
- [135] TCT Magazine, *Titomic Gilmur Space 3D Print Space Components*, <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/titomic-gilmur-space-3d-print-space-components/> [dostęp: 29.12.2023]

- [136] Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M.: *The Role of Additive Manufacturing In the Era of Industry 4.0*, Procedia Manuf., 2017, t. 11, s. 545-554.
- [137] Lee H., Lim C.H.J., Low M. i in. *Lasers in additive manufacturing: A review*, Int. J. of Precis. End. And Manuf. -Green Tech., t. 4, s. 307-322, 2017
- [138] Huw L.: *Laser Consolidation – A Rapid Manufacturing Process for Making Net-Shape Functional Components*, Advances in Laser Materials Processing (Second Edition), Technology, Research and Applications, s. 461-505, 2018
- [139] Selcuk C.: *Joining processes for powder metallurgy parts*, Advances in Powder Metallurgy, s. 380-398, 2013
- [140] Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L., Mazumder J.: *Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition*, Advanced Materials and Processes, 169(5), s. 33-36, 2011
- [141] Anand Kumar S., Prasad R.V.S.: *Basic principales of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies*, Additive Manufacturing, s. 17-35, 2021
- [142] Voestalpine, *Direct Metal Deposition*, <https://www.voestalpine.com/highperformance-metals/international/en/service/direct-metal-deposition/> [dostęp: 26.06.2024]
- [143] Adams R.: *Ion Fusion Formation: An Alternative Additive Manufacturing Approach*, Conference: Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference Exhibition, 09.2008
- [144] Liu R., Wang Z., Sparks T., Liou F., Newkirk J.: *Aerospace applications of laser additive manufacturing*, Laser Additive Manufacturing, s. 351-371, 2017
- [145] Suwanpreecha Ch., Manonukul A.: *A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding*, Metals 2022, t. 12(3), 429
- [146] Cerejo F., Gatoes D., Vieira M.T.: *Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX)*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 115, s. 2449-2464, 2021
- [147] Markforged, *ADAM Technology*, <https://markforged.com/resources/blog/adam> [dostęp: 29.12.2023]
- [148] Meltio3D, *Technologia*, <https://meltio3d.com/pl/technologia/> [dostęp: 26.06.2024]
- [149] MIT News, *Research Demonstrate Rapid 3D Printing of Liquid Metal*, <https://news.mit.edu/2024/researchers-demonstrate-rapid-3d-printing-liquid-metal-0125> [dostęp: 09.03.2024]
- [150] Self-Assembly Lab, *Liquid Printed Metal*, <https://selfassemblylab.mit.edu/liquid-printed-metal> [dostęp: 09.03.2024]
- [151] Mazur M.: *Podstawy spawalnictwa*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1993

- [152] Jeyaprakash N., Haile A., Arunprasath M.: *The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A review*, The International Journal Of Engineering And Science (IJES), t. 4, r. 2, s. 11-20, 2015
- [153] Pilarczyk J.: *Poradnik inżyniera – spawalnictwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2003
- [154] Tasak E.: *Metalurgia spawania*, Kraków, 2008
- [155] Politechnika Lubelska, *Połączenia Spawane*, [https://wm.pollub.pl/fcp/8PREgARcJNSc-XKxEMUA9DAmIvYVUFDFqUVJWazkALV96cypSPhRaWXI0D1ZUShtGPIY7MRk8VhI gXFdYVmsjBzRWKw/\\_global/public/wm/files/65/attachment/3129wyklad-14-polaczenia-spawane.pdf](https://wm.pollub.pl/fcp/8PREgARcJNSc-XKxEMUA9DAmIvYVUFDFqUVJWazkALV96cypSPhRaWXI0D1ZUShtGPIY7MRk8VhI gXFdYVmsjBzRWKw/_global/public/wm/files/65/attachment/3129wyklad-14-polaczenia-spawane.pdf) [dostęp: 13.02.2024]
- [156] Singh A.K., Dwy V., Rai R.N.: *Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review)*, Materials Today: Proceedings, t. 4, r. 2, s. 1252-1259, 2017
- [157] Kumar K., Kumar Ch.S., Masanta M., Pradhan S.: *A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry*, Materials Today: Proceedings, t. 50, s. 999-1004, 2022
- [158] Karafi M.R., Narimani R., Gheybi M.: *Study on automatic control of arc gap in robotic TIG welding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 50, s. 953-960, 2010
- [159] Metcalfe J.C., Guigley M.B.C.: *Heat Transfer in Plasma-Arc Welding*, Welding Research Supplement, s. 99-104, 1975
- [160] Sahoo A., Tripathy S.: *Development in plasma arc welding proces: A review*, Materials Today: Proceedings, t. 41, s. 363-368, 2021
- [161] Liu Z.M., Ciu S., Luo Z., Zhang C., Wang Z., Zhang Y.: *Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling*, Journal of Manufacturing Processes, t. 23, s. 315-327, 2016
- [162] Xiaomeng L., Quanlin D., Pengfei W., He Ch.: *Review of Electron Beam Welding Technology in Space Environment*, Optik, t. 225, 2021
- [163] Patel V., Sali A., Hyder J., Corliss M., Hyder D., Hung W.: *Electron Beam Welding of Inconel 718*, Procedia Manufacturing, t. 48, s. 428-435, 2020
- [164] Slobodyan M.: *Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review*, Nuclear Engineering and Technology, t. 53, r. 4, s. 1049-1078, 2021
- [165] Patterson T., Hochanadel J., Lippold J.: *A review of high Energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications*, Welding in the World, t. 65, s. 1235-1306, 2021

- [166] Chłodzenie Konformalne, <http://chlodzeniekonformalne.com/> [dostęp: 06.01.2024]
- [167] GMSsystem, *Symulacja Zaawansowanych Układów Chłodzenia Form Wtryskowych w Moldex3D*, <https://gmsystem.pl/blog/symulacja-zaawansowanych-ukladow-chlodzenia-form-wtryskowych-w-moldex3d/> [dostęp: 06.01.2024]
- [168] Kirchheim A., Katrodiya Y., Zumofen L., Ehrig F., Wick C.: *Dynamic conformal cooling improves injection molding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 114, 2021, s. 107-116
- [169] Cader M., Osiak M.: *Projektowanie kanału chłodzącego z użyciem natychmiastowych symulacji komputerowych oraz technik addytywnych*, Mechanik, nr 8-9, s. 588-590, 2019
- [170] Muszyński P., Mrozek K., Poszwa P.: *Wybrane metody chłodzenia form wtryskowych*, Mechanik, nr. 8-9, s. 996-1000, 2016
- [171] Feng S., Kamat A.M., Pei Y.: *Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progres updates*, Internationa Journal of Heat and Mass Transfer, nr 171, 2021
- [172] Kanbur B.B., Suping S., Duan F.: *Design and optimization of conformal cooling channels for injestion molding: a review*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 106, s. 3253-3271, 2020
- [173] Xu X., Sachs E., Allen S.: *The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling*, Polymer Engineering & Science, t. 41, s. 1265-1279, 2001
- [174] Norwood A., Dickens P., Soar R., Harris R., Gibbons F., Hansell R.: *Analysis of cooling channels performance*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, t. 17, r. 8, s. 669-678, 2004
- [175] Shinde M.S., Ashtankar K.M.: *Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes*, Advances in Mechanical Engineering, t. 9, nr 5, 2017
- [176] Park H.S., Pham N.H.: *Design of conformal cooling channels for an automotive part*, International Journal of Automotive Technology, nr 10, s. 87-93, 2009
- [177] Dimla D.E., Camilotto M., Miani F.: *Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*, Journal of Materials Processing Technology, t. 164-165, s. 1294-1300, 2005
- [178] Armillotta A., Baraggi R., Fasoli S.: *SLM tooling for die casting with conformal cooling channels*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, t. 71, s. 573-583, 2014

- [179] Przesłowski Ł., Jóźwik J., Niesłony P., Budzik G., Michna M., Kochmański Ł.: *Dimensional and shape analysis of conformal channels on the example of an aircraft engine blade casting mold*, 2023 IRRR 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Milan, Włochy, s. 290-295, 2023
- [180] PWRze, *Zakład Narzędziowy i Utrzymania Ruchu*, <https://pwrze.com/obszary-dzialalnosci/zaklad-narzedziowy-i-utrzymania-ruchu> [dostęp: 31.05.2024]
- [181] PWRze, *Historia*, <https://pwrze.com/firma/historia> [dostęp: 02.07.2024]
- [182] PWRze, *Krótki Opis Działalności Zakładu*, <https://pwrze.com/systemy-zarzadzania/bhp-i-os/przeciwdzialanie-awariom-przemys-lowym/krotki-opis-dzialalnosci-zakladu> [dostęp: 31.05.2024]
- [183] Mayer S., *Optimised Mould Temperature Control Procedure Using DMLS*, EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd., 2005, s. 1-10
- [184] Srivastava A., *Moving Heat Source Version 4*, 2016

**Politechnika Rzeszowska**  
**Im. Ignacego Łukasiewicza**  
**Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa**  
**Katedra Konstrukcji Maszyn**

## **STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**Tytuł:** *Metodyka projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi dla przemysłu lotniczego*

**Autor:** mgr inż. Mateusz Kielbicki

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Joanna Woźniak

Tematyka pracy dotyczy wykorzystania technologii przyrostowych, zwłaszcza druku 3D, w projektowaniu i wytwarzaniu oprzyrządowania spawalniczego. Głównym celem badań było opracowanie nowatorskich uchwytów spawalniczych wyposażonych w wewnętrzne kanały chłodzące, które mogą skrócić czas chłodzenia oraz zmniejszyć zużycie tych elementów wynikające z podwyższonej temperatury.

Analiza stanu zagadnienia wskazała na rosnące znaczenie technologii przyrostowych w przemyśle oraz na lukę badawczą dotyczącą ich zastosowania w oprzyrządowaniu spawalniczym. Większość dostępnych badań koncentruje się na formach wtryskowych, co podkreśla potrzebę dalszych badań nad kanałami chłodzącymi w kontekście spawalnictwa.

Proces badawczy obejmował modelowanie komputerowe 3D-CAD uchwytów, symulacje komputerowe rozkładu ciepła i wytrzymałości uchwytów za pomocą programu ANSYS, wytworzenie prototypów technologicznych metodą PBF z aluminium AlSi10Mg oraz testy laboratoryjne i produkcyjne. Wyniki wykazały, że uchwyty z wewnętrznymi kanałami chłodzącymi przewyższają tradycyjne rozwiązania pod względem efektywności chłodzenia. Nowe konstrukcje znacząco skracają czas chłodzenia oraz zmniejszają zużycie elementów spowodowane wysoką temperaturą, wykazując lepsze właściwości termiczne niż konwencjonalne rozwiązania z miedzianymi wkładkami.

Podsumowanie zawiera syntezę wniosków i spostrzeżeń dotyczących zastosowania technologii przyrostowych w oprzyrządowaniu spawalniczym oraz propozycje przyszłych badań.

Praca może stanowić istotny wkład w rozwój technologii przyrostowych i ich zastosowanie w przemyśle, oferując cenne wnioski oraz rekomendacje dla dalszych badań i wdrożeń, szczególnie w kontekście optymalizacji kanałów chłodzących i zastosowania nowych materiałów oraz technologii.





**Rzeszów University of Technology**  
**Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics**  
**Department of Mechanical Engineering**

## **ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Title:** *Methodology of designing and manufacturing welding fixture systems using additive manufacturing techniques for the aerospace industry*

**Author:** Mateusz Kielbicki, M. Eng.

**Supervisor:** Professor Grzegorz Budzik, Ph.D. with Habilitation of Engineering Sciences

**Co-supervisor:** Joanna Woźniak, Ph.D. of Eng.

The subject of this dissertation concerns the use of additive manufacturing technologies, particularly 3D printing, in the design and production of welding fixtures. The main objective of the research was to develop innovative welding fixtures equipped with internal cooling channels, which can shorten cooling time and reduce wear caused by elevated temperatures.

The analysis of the current state of knowledge highlighted the growing importance of additive manufacturing technologies in the industry and identified a research gap regarding their application in welding fixtures. Most existing studies focus on injection molds, underscoring the need for further research on cooling channels in the context of welding.

The research process included 3D-CAD computer modeling of the fixtures, computer simulations of heat distribution and fixture strength using the ANSYS program, the creation of technological prototypes using the PBF method with AlSi10Mg aluminum, and laboratory and production tests. The results showed that fixtures with internal cooling channels outperform traditional solutions in terms of cooling efficiency. The new designs significantly reduce cooling time and decrease wear caused by high temperatures, demonstrating better thermal properties than conventional solutions with copper inserts.

The summary contains a synthesis of conclusions and observations regarding the application of additive technologies in welding tooling, along with proposals for future research.

The work may represent a significant contribution to the development of additive technologies and their application in the industry, offering valuable insights and recommendations for further research and implementations, particularly in the context of optimizing cooling channels and the use of new materials and technologies.

