

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY
KATEDRA SPAWALNICTWA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania
multimetalowych drutów o strukturze multiwłóknistej do zastosowań
w spawalnictwie i procesach przyrostowych.

mgr inż. Jarosław Kalabis

Promotor: dr hab. inż. Santina Topolska, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy: mgr inż. Witold Malec

Gliwice 2024



Spis treści

Streszczenie	3
Abstract	6
Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	9
1. Wstęp.....	11
2. Znaczenie i rozwój nowych materiałów do druku 3D – stan zagadnienia	15
3. Wytwarzanie przyrostowe – druk 3D.....	20
3.1. Wytłaczanie materiału (Material Extrusion – MEX)	21
3.2. Polimeryzacja Vat (Vat Photopolymerization – VPP)	23
3.3. Stاپanie w złożu proszkowym (Powder Bed Fusion – PBF).....	25
3.4. Natryskiwanie materiału (<i>Material Jetting, MJT</i>).....	27
3.5. Binder Jetting (BJT)	29
3.6. Directed Energy Deposition (DED)	30
3.7. Laminowanie arkuszy (Sheet Lamination – SHL)	31
4. Rozwój technologii druku 3D	33
5. Teza, cel i zakres pracy	47
6. Materiał i metodyka badań.....	50
7. Wytwarzanie drutów multiwłóknistych	53
8. Badanie składu chemicznego	57
9. Testy spawalnicze metodą TIG	58
10. Testy druku 3D WAAM.....	60
11. Badania mikroskopowe – mikroskopia świetlna.....	63
12. Badania mikroskopowe – skaningowa mikroskopia elektronowa	75
13. Badanie twardości metodą Vickersa	114
14. Badanie wytrzymałości na ściskanie.....	117
15. Badanie tribologiczne metodą „pin od disc”	120
16. Badanie korozyjne w komorze solnej.....	128
17. Analiza fazowa XRD.....	132
18. Dyskusja wyników	139
19. Wnioski	144
BIBLIOGRAFIA.....	147



Streszczenie

W niniejszej pracy podjęto działania mające na celu opracowanie nowatorskiej technologii wytwarzania materiałów spawalniczych, których nie można uzyskać przy użyciu klasycznych metod, takich jak odlewanie ciągle. Wpływ wybranych pierwiastków stopowych na właściwości odlewnicze jest na tyle istotny, że niekiedy uniemożliwia uzyskanie pełnowartościowego materiału o podwyższonej zawartości pierwiastków stopowych. Przedmiotem badań były głównie materiały na bazie miedzi, zawierające w swoim składzie powyżej 10% masowych aluminium. Dodatkowo przeprowadzono próby otrzymania materiałów wzbogaconych o nikiel. Opracowana technologia opiera się na pakietowaniu czystych metali – aluminium oraz aluminium z niklem – w rurę miedzianą, a następnie poddawaniu tego zestawu operacjom przeróbki plastycznej w celu uzyskania materiału o odpowiedniej średnicy, umożliwiającej jego wykorzystanie w technologii druku 3D metodą spawalniczego przyrostowego wytwarzania metodą łukową (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing).

Dokonano szczegółowego przeglądu literatury, na podstawie którego opisano aktualny stan zagadnienia. Przedstawiono dotychczas stosowane materiały spawalnicze, metody druku 3D, a także materiały wytwarzane niestandardowymi technikami. W pracy uwzględniono podział technik druku 3D w metalach oraz z wykorzystaniem tworzyw sztucznych, opisując zasady działania poszczególnych metod. Szczególną uwagę poświęcono technologii druku 3D metodą WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), jej zasadzie działania oraz zastosowaniu w produkcji elementów maszyn. Omówiono również perspektywy wykorzystania tej technologii w inżynierii materiałowej i architekturze. W pracy przedstawiono rozwój technologii druku 3D na podstawie opracowań oraz raportów foresightowych, które wskazują na jej dynamiczny postęp. Wskazano, że rozwój technologii druku 3D wymaga równoczesnego postępu w dziedzinie materiałów, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na korozję oraz odpornością udarową. Zwrócono również uwagę na znaczenie rozwoju technologii wojskowej, w której druk 3D oraz nowoczesne materiały znajdują coraz szersze zastosowanie w innowacyjnych projektach.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników uzyskanych w ramach prac poprzedzających projekt doktorski zaproponowano tezę pracy, zakładającą opracowanie technologii wytwarzania multiwłóknistych drutów spawalniczych. Technologia ta ma na celu uzyskanie konkurencyjnych rozwiązań materiałowych, które będą charakteryzować się wyższymi właściwościami mechanicznymi, jednorodnością strukturalną, izotropowością



mechaniczną oraz liniową sprężystością w określonym zakresie wytrzymałości. Opracowany materiał, dzięki tym właściwościom, ma stać się konkurencyjny wobec rozwiązań dostępnych na rynku.

Na podstawie badań własnych opracowano szczegółowy przebieg działań mających na celu otrzymanie nowych materiałów o ulepszonych właściwościach użytkowych. Do badań wybrano materiały, takie jak rura miedziana Cu ETP, druty aluminiowe oraz druty nikłowe, które pakietowano w różnych wariantach, uzyskując materiały o budowie multiwłóknistej: CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10. Po przeróbce plastycznej materiały te uzyskano w postaci drutów o średnicy 2,15 mm i poddano wstępnym testom spawalniczym metodą TIG na blasze stalowej, tworząc obiekty przestrzenne (model ścianki). Opracowano parametry prądowo-napięciowe, w których materiały te wykazywały odpowiednie właściwości spawalnicze, umożliwiające ich dalsze badania. Przeprowadzono również analizę składu chemicznego otrzymanych drutów multiwłóknistych w celu zweryfikowania ich zgodności ze składem założonym w procesie wytwarzania.

Równolegle przeprowadzono próby wytworzenia materiałów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 o średnicy 1,00 mm, z przeznaczeniem do zastosowania w drukarce WAAM będącej na wyposażeniu Laboratorium Wytwarzania i Aplikacji w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych. Przeprowadzone próby druku 3D zakończyły się sukcesem, uzyskując materiały, mogący być poddany dalszym badaniom.

Otrzymane materiały poddano badaniom makroskopowym z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego oraz badaniom mikroskopowym z zastosowaniem mikroskopii świetlnej. Kolejnym etapem były badania z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Przeprowadzono analizy punktowe w trzech obszarach: górnej części próbki (strefa lica napoiny), środkowej oraz dolnej części próbki (grań napoiny), a także określono zawartość poszczególnych pierwiastków w punktach pomiarowych. Wykonano mapy rozmieszczenia pierwiastków oraz obrazy uzyskane z elektronów wtórnych (SE).

Następnie przeprowadzono badania twardości metodą Vickersa, z zastosowaniem diamentowego ostrosłupa czworobocznego o kącie wierzchołkowym 136° i obciążeniu 98,07 N. Wykonano także próbę ściskania przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Do badań przygotowano po trzy próbki w kształcie walca z każdego rodzaju materiału, o stosunku średnicy do wysokości wynoszącym 1:1, przy czym wymiary próbek różniły się w zależności od grubości napoiny. Wyznaczono umowną granicę plastyczności, procentowe

skrócenie oraz naprężenie ściskające odpowiadające pierwszym trwałym deformacjom próbek (kształt „beczki” lub pojawienie się rys na powierzchni próbki).

W kolejnym etapie badań wykonano test zużycia ślizgowego typu „pin on disc”, który określa zużycie ślizgowe par trących w układzie próbka–przeciwpróbka (najczęściej kulka stalowa lub Al_2O_3). Przebadano materiały CuAl8 MigWeld (materiał komercyjny), CuAl8, CuAl12, CuAl10Ni10 po spawaniu metodą TIG oraz warianty materiałów CuAl12 i CuAl10Ni10 po druku metodą WAAM.

Przeprowadzono również badania korozyjne w mgłę solnej NSS zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06, analizując próbki wykonane z multidrutów oraz drutu komercyjnego. Próbki badano przez 14-dniowy cykl, po którym, zgodnie z założeniami normy, określano ich masę. Przed każdym ważeniem próbki były dokładnie myte, suszone, a następnie ponownie poddawane procesowi mgły solnej, aby kontynuować badania.

Następnie wykonano analizę fazową przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego XRD7 firmy Seifert-FPM, wykorzystując promieniowanie Cu $K\alpha$ oraz filtr Ni. Pomiar przeprowadzono w geometrii Bragga-Brentano, w zakresie kątów 2Θ od 10° do 100° , co odpowiadało odległościom międzypłaszczyznowym d_{hkl} od 0,8838 do 0,10064 nm. Analizę fazową próbek CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM wykonano w trzech obszarach: lico napoiny, środek i dół. Interpretacja wyników oparta była na oprogramowaniu Seifert i Match!, oraz bazie danych ICDD PDF-4+ z 2023 roku.

Abstract

In this study, efforts were made to develop a novel technology for the production of welding materials that cannot be obtained using classical methods such as continuous casting. The influence of selected alloying elements on casting properties is very important as it sometimes makes it impossible to obtain a full-quality material with an increased content of alloying elements. In this study mainly copper-based materials containing more than 10 wt.% of aluminum in their composition were examined. Additionally, attempts were made to obtain materials enriched with nickel. The developed technology is based on the bundling of pure metals - aluminum and aluminum with nickel - into a copper tube, and then subjecting this bundle to plastic processing operations in order to obtain a material of suitable diameter to enable its use in 3D printing technology by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

A detailed literature review was conducted, based on which the current state of the issue was described. Currently used welding materials, 3D printing methods and materials produced by non-standard techniques are presented and discussed in this study. The paper includes a breakdown of 3D printing techniques in metals and using plastics, describing in detail the principles of each method. Special attention was paid to 3D printing technology using the WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) method, its principle of operation and its application in the production of machine components. The prospects of using this technology in materials engineering and architecture are also discussed. The paper presents the development of 3D printing technology on the basis of studies and foresight reports, which indicate its dynamic progress. It was pointed out that the development of 3D printing technology requires simultaneous progress in the field of materials with high mechanical strength, corrosion resistance and impact resistance. The importance of the development of military technology, in which 3D printing and modern materials are increasingly used in innovative projects, was also noted.

Based on the analysis of the literature and the results obtained in the work preceding the doctoral project, the thesis of the work assuming the development of a technology for manufacturing multifilament welding wires was proposed. The technology is aimed at obtaining competitive material solutions that will be characterized by higher mechanical properties, structural homogeneity, mechanical isotropy and linear elasticity within a certain strength range. The developed material, thanks to these features, is expected to become competitive with solutions available on the market.

On the basis of own research, a detailed course of action was developed to obtain new materials with improved performance properties. For the study, materials such as Cu-ETP copper tube, aluminum wires and nickel wires were selected and bundled in different variations to obtain multifilament materials: CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 and CuAl10Ni10. After plastic processing, these materials were obtained in the form of wires with a diameter of 2.15 mm and were subjected to preliminary TIG welding tests on steel sheet, creating spatial objects (wall model). Current-voltage parameters were developed at which the materials showed suitable welding properties for further testing. An analysis of the chemical composition of the obtained multifilament wires was also carried out to verify their compatibility with the composition assumed in the manufacturing process.

Simultaneously, attempts were made to produce CuAl12 and CuAl10Ni10 materials with a diameter of 1.00 mm, for use in the WAAM printer equipped in the Manufacturing and Application Laboratory at the Łukasiewicz Research Network – Institute of Non-Ferrous Metals. The 3D printing trials carried out were successful, yielding materials that can be subjected to further research.

The obtained materials were subjected to macroscopic studies using a digital microscope and microscopic studies using light microscopy. The next step was research using scanning electron microscopy (SEM). Spot analyses were carried out in three areas: the upper part of the sample (the face of the padding weld), the middle part of the sample and the lower part of the sample (the root of the padding weld), and the content of individual elements at the measuring points was determined. Maps of element distribution and images obtained from secondary electrons (SE) were made.

This was followed by Vickers hardness test, using a diamond quadrilateral pyramid with a vertical angle of 136° and a load of 98.07 N. A compression test was also performed using a universal testing machine. Three cylindrical specimens of each type of material were prepared for the test, with a diameter to height ratio of 1:1, with the dimensions of the specimens varying according to the thickness of the padding weld. The yield strength, percentage shortening and compressive stress corresponding to the first permanent deformation of the specimens (the “barrel” shape or the appearance of cracks on the specimen surface) were determined.

In the next stage of the research, a pin-on-disc sliding wear test was performed, which determines the sliding wear of friction pairs in the sample-countersample system (most

frequently a steel ball or Al₂O₃). CuAl₈ MigWeld (commercial material), CuAl₈, CuAl₁₂, CuAl₁₀Ni₁₀ materials were tested after TIG welding, as well as variants of CuAl₁₂ and CuAl₁₀Ni₁₀ materials after WAAM printing.

NSS neutral salt spray corrosion tests were also conducted in accordance with PN-EN ISO 9227:2017-06, analyzing samples made from multiwire and commercial wire. The samples were tested for a 14-day cycle, after which their weight was determined, according to the standard. Prior to each weighing, the samples were thoroughly washed, dried, and then re-treated with salt spray to continue testing.

Phase analysis was then performed with a Seifert-FPM XRD7 X-ray diffractometer, using Cu K α radiation and a Ni filter. Measurements were carried out in Bragg-Brentano geometry, with angles of 2 Θ ranging from 10° to 100°, corresponding to interplane distances d_{hkl} from 0.8838 to 0.10064 nm. Phase analysis of CuAl₁₂ WAAM and CuAl₁₀Ni₁₀ WAAM samples was performed in three areas: the face of the padding weld, its center and the bottom. Interpretation of the results was based on Seifert and Match! software, and the 2023 ICDD PDF-4+ database.

The aim of the paper was achieved, and the thesis set forth was confirmed.



Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

AM –	Additive Manufacturing, produkcja addytywna,
CAD –	Computer Aided Design, projektowanie wspomagane komputerowo,
MIG –	Metal Inert Gas, spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych,
MAG –	Metal Active Gas, spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych,
Druk 3D –	Proces wytwarzania fizycznych trójwymiarowych obiektów,
CMT –	Cold Metal Transfer, metoda spawania poprzez transfer zimnego metalu,
IACS –	International Annealed Copper Standard, empirycznie wyprowadzona wartość standardowa dla przewodności elektrycznej w miedzi,
MEX –	Metal Extrusion, metoda dozowania filamentu przez gorącą dyszę,
FDM –	Fused Deposition Modeling, modelowanie tworzywa na podłożu,
VPP –	VAT Photopolymerization, proces fotopolimeryzacji,
SLA –	Stereolitografia, proces utwardzania płynnej żywicy za pomocą wiązki lasera,
UV –	Ultrafiolet, promieniowanie ultrafioletowe,
3D DLP –	Druk 3D Digital Light Processing, proces druku, utwardzanie materiałów światłoczułych za pomocą projektora,
PBF –	Power Bed Fusion, spiekanie materiału proszkowego za pomocą lasera,
SLM –	Selective Laser Melting, selektywne topienie laserowe,
DMLS –	Direct Metal Laser Sintering, selektywny przetop proszków metalicznych,
EBM –	Electron Beam Melting, topienie proszku metalu wiązką elektronów,
MJT –	Metal Jetting, natryskiwanie materiału,
PCB –	Printed Circuit Board, płytka obwodu drukowanego,
BJT –	Binder Jetting, spajanie proszkowego materiału płynnym spoiwem,
DED –	Directing Energy Deposition, podawanie materiału bezpośrednio do jeziora stopionego metalu,
CNC –	Computer Numerical Control, układ komputerowego sterowania numerycznego,
SHL –	Sheet Lamination, laminowanie arkuszy,
ESA –	European Space Agency, Europejska Agencja Kosmiczna,
NASA –	National Aeronautics and Space Administration, Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej,
FAA –	Federal Aviation Administration, Federalna Administracja Lotnictwa,



- TIG – Tungsten Inert Gas, spawanie elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego,
- SEM/EDS – Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy, skaningowa mikroskopia elektronowa, spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii,
- XRD – X-ray Diffraction, dyfrakcja rentgenowska.



1. Wstęp

W dzisiejszych czasach innowacje stanowią rdzeń rozwoju gospodarki. Postęp cywilizacyjny jest związany z dostosowywaniem rzeczywistości do zamierzeń i potrzeb, zarówno konsumentów, jak i dystrybutorów. Wprowadzanie nowych produktów na rynek wiąże się z koniecznością spełnienia określonych wymagań dotyczących specyfikacji produktu, co obejmuje m.in. dobór odpowiednich technologii wytwarzania. Innowacyjne technologie wytwarzania, takie jak techniki przyrostowe (ang. Additive Manufacturing, AM), zyskują na znaczeniu i dynamicznie się rozwijają w ostatnich latach. Technologia ta pozwala na rewolucyjne zmiany w podejściu do projektowania i wytwarzania elementów, znacząco różniąc się od tradycyjnych metod, które opierały się na procesach ubytkowych. Dotychczasowe techniki, takie jak obróbka skrawaniem, erozyjna czy ścierna, polegają na usuwaniu nadmiaru materiału z półfabrykatu w celu uzyskania pożądanego kształtu elementu. Pomimo szerokiego zastosowania tych metod, charakteryzują się one istotnymi ograniczeniami. Jednym z głównych problemów obróbki skrawaniem jest generowanie dużej ilości odpadów w postaci wiórów, co wpływa na wydajność materiałową procesu oraz jego ekonomię. Dodatkowo, technologia ta ogranicza możliwości projektowania geometrycznych kształtów, co wynika z konieczności stosowania narzędzi o określonej geometrii. Na przykład toczenie umożliwia obróbkę wyłącznie brył obrotowych, co znacząco zawęża zakres możliwych aplikacji. W przypadku odlewania, konieczność przygotowania formy zwiększa czas realizacji procesu i generuje wysokie koszty, zwłaszcza w przypadku produkcji małoseryjnej lub jednostkowej, gdzie nieefektywne są techniki wymagające dużego nakładu czasu i środków. Technologie przyrostowe eliminują wiele z tych ograniczeń. W procesie tym trójwymiarowe elementy są wytwarzane przez stopniowe nakładanie kolejnych warstw materiału o precyzyjnie określonej grubości. Każda warstwa jest aplikowana bezpośrednio zgodnie z wirtualnym modelem CAD (ang. Computer-Aided Design), co pozwala na znacznie większą swobodę projektową. W przeciwieństwie do metod ubytkowych, technologie przyrostowe umożliwiają produkcję złożonych geometrii, które są trudne lub niemożliwe do wykonania przy użyciu tradycyjnych metod. Dodatkowo, minimalizowane jest powstawanie odpadów, ponieważ materiał wykorzystywany jest tylko tam, gdzie jest to konieczne do utworzenia finalnego elementu. Techniki te mają szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, takich jak lotnictwo, medycyna czy motoryzacja, gdzie wymagana jest wysoka precyzja, lekkość konstrukcji oraz możliwość personalizacji produktów. Warto również



zauważyć, że technologie przyrostowe pozwalają na integrację nowych materiałów, w tym metali, polimerów oraz materiałów kompozytowych, co poszerza zakres ich zastosowań. W miarę dalszego rozwoju technik przyrostowych, można spodziewać się dalszego wzrostu ich efektywności, precyzji oraz zróżnicowania materiałowego, co czyni je kluczowym elementem przyszłości przemysłu wytwórczego. Technologie przyrostowe umożliwiają wytwarzanie obiektów o złożonej geometrii i strukturze, które dzięki optymalizacji parametrów procesowych mogą charakteryzować się lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi w porównaniu do elementów wytwarzanych tradycyjnymi metodami. Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych z wykorzystaniem materiałów metalowych, zwłaszcza drutów o zaawansowanych właściwościach, wymusza konieczność opracowania nowej grupy materiałów wsadowych, dedykowanych tym technologiom. Obecnie stosowane materiały, takie jak konwencjonalne druty wykorzystywane w technikach spawania i napawania metodami MIG/MAG, stanowią istotne ograniczenie w zakresie projektowania składu chemicznego wyrobów drukowanych, co bezpośrednio przekłada się na ich właściwości użytkowe. Technologie przyrostowe, a w szczególności druk 3D z wykorzystaniem metali, są postrzegane jako metody o wysokim potencjale aplikacyjnym w różnych gałęziach przemysłu, takich jak lotnictwo, motoryzacja, energetyka czy medycyna. Choć technologie druku 3D z metali były dotychczas bardziej kojarzone z metodami spiekania proszków, to te techniki często okazują się mało wydajne i generują znaczne straty materiałowe. W związku z tym, techniki przyrostowe wykorzystujące metale i ich stopy w postaci drutu oferują bardziej efektywne rozwiązania, pozwalając na zmniejszenie strat materiałowych i poprawę wydajności procesów produkcyjnych. Obecne ograniczenia związane z dostępnością odpowiednich materiałów wsadowych, które spełniałyby wymagania technologii druku 3D z drutu, stymulują intensywne badania w tym zakresie. Poszukiwanie nowych stopów i drutów o dostosowanych właściwościach chemicznych i mechanicznych stało się kluczowym zadaniem dla wielu zespołów badawczych, dążących do rozwinięcia potencjału technologii przyrostowych w aplikacjach przemysłowych. Dalszy postęp w tym obszarze może przyczynić się do opracowania bardziej zaawansowanych materiałów wsadowych, które zwiększą efektywność i zakres zastosowania tych innowacyjnych technologii. Analizując rynek dostępnych materiałów do spawania i napawania wykorzystuje się materiały podzielone na trzy rodzaje: druty do spawania stali węglowych, druty do spawania metali nieżelaznych i stali niskowęglowych oraz druty do zastosowań uniwersalnych. Technologie druku 3D mają sens stosowania w przypadku, kiedy można w kilku krokach zastąpić złożony proces produkcyjny, który ostatecznie generuje duże ilości



strat materiału w postaci wiórów czy zniszczonych narzędzi. Względy ekologiczne i niwelacja strat czasowych są kryterium determinującym do wyboru technologii przyrostowych, jako jednym z kierunków badań o charakterze długofalowym. Całość prac związana z opracowaniem nowych materiałów o budowie drutów multimetalowych jest ściśle powiązana z sygnałami płynącymi ze środowisk przemysłowych, gdzie pojawiają się pomysły i koncepcje nad opracowywaniem nowych materiałów.

Analizując dostępną literaturę oraz prace badawczo-rozwojowe, w aspekcie opracowania nowych rozwiązań materiałowych w postaci drutów, narodził się pomysł na realizację niniejszej pracy z wykorzystaniem dostępnych zasobów Łukasiewicz – IMN oraz Politechniki Śląskiej.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie badań mających na celu opracowanie wysokojakościowego drutu przeznaczonego do zastosowań materiałowych w technologii druku 3D, wykorzystującej metodę spawania łukowego CMT (Cold Metal Transfer). W kontekście naukowym, innowacyjna budowa multiwłóknista tego drutu ulega przetopieniu jedynie w obszarze ciekłego jeziora spawalniczego pod wpływem działania łuku elektrycznego, co może prowadzić do znacznych usprawnień w procesie druku oraz jakości finalnych produktów. Metodyka badań obejmuje wykorzystanie dostępnych na rynku metali i stopów nieżelaznych w postaci drutów, które będą zastosowane do stworzenia multimetalowego pakietu. Pakiet ten zostanie następnie poddany obróbce plastycznej poprzez ciągnięcie do wymaganej średnicy końcowej, z uwzględnieniem międzyoperacyjnej obróbki cieplnej, co ma na celu uzyskanie optymalnych właściwości mechanicznych i strukturalnych. Tak przygotowane druty zostaną poddane szczegółowym badaniom i testom, które pozwolą na ocenę ich właściwości użytkowych oraz zastosowania w zaawansowanych procesach technologicznych, w tym w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, gdzie wymagane są materiały o wysokiej wydajności i niezawodności.

Kolejnym etapem badawczym będzie ocena właściwości spawalniczych przy zastosowaniu różnych parametrów procesu spawania, mająca na celu uzyskanie napoiny o wysokiej jakości. Zostaną przeprowadzone również badania metalograficzne otrzymanych napoin pod kątem jednorodności składu chemicznego oraz analizy stopnia wytworzenia zaplanowanego stopu w całej objętości napoiny. Przewiduje się, że opracowane multimetalowe druty staną się istotnym uzupełnieniem grupy materiałów wsadowych stosowanych w technologiach przyrostowych.

Dotychczasowe badania i prace prowadzone w Centrum Zaawansowanych Technologii Materiałowych dostarczyły pracownikom niezbędnej wiedzy z zakresu planowania procesów



produkcyjnych prętów i drutów, które mogą znaleźć zastosowanie w technikach spawalniczych. Druk 3D stanowi jedną z najszybciej rozwijających się technologii wytwórczych, a dotychczas dominującą metodą w tym obszarze jest drukowanie proszkowe.

Mimo że druk z drutów litych i proszkowych, bądź ich kombinacji, nie jest jeszcze w pełni rozwinięty na skalę przemysłową, to przy stale postępującej ewolucji technologicznej zastosowanie drutów do produkcji modeli 3D staje się rzeczywistością.

Rozwój technologii przyrostowych koncentruje się na dwóch kluczowych aspektach: szybkim prototypowaniu oraz seryjnej produkcji wyrobów. Techniki szybkiego prototypowania i wytwarzania (Rapid Prototyping – Rapid Manufacturing) opierają się na procesach, które nie wymagają specjalnych narzędzi czy przyrządów technologicznych, a ich realizacja odbywa się na podstawie modeli 3D generowanych w systemach CAD. Produkty wytworzone w ten sposób poddawane są ocenie, co pozwala na podjęcie decyzji dotyczącej wdrożenia ich do produkcji seryjnej, co znacząco redukuje koszty inwestycyjne. Dodatkowo, odpowiednia optymalizacja parametrów wytwarzania prowadzi do zmniejszenia zużycia materiału, co jest szczególnie istotne w przypadku drogich surowców.

Jednym z kluczowych atutów technologii przyrostowych jest możliwość nanoszenia materiału na dowolnym etapie cyklu życia produktu, co umożliwia modyfikację lub regenerację już istniejących części, które uległy zużyciu lub uszkodzeniu. Z tego względu technologie te znajdują coraz szersze zastosowanie w takich dziedzinach jak architektura, inżynieria maszyn, projektowanie przemysłowe, budownictwo, inżynieria lądowa, lotnictwo, motoryzacja, medycyna, stomatologia i wiele innych.

2. Znaczenie i rozwój nowych materiałów do druku 3D – stan zagadnienia

Wiele z materiałów na rynku technologii przyrostowych zostało zaprojektowanych specjalnie dla procesów odlewania metali. Dwa główne rodzaje tych procesów to odlewanie z modelu wytapianego oraz odlewanie w formach piaskowych.

Elementy wytwarzane za pomocą technologii przyrostowych mogą stanowić alternatywę dla tradycyjnych modeli woskowych stosowanych w procesie odlewania metodą wytapiania. Jednakże, materiały stosowane w technologiach addytywnych muszą wykazywać właściwości zbliżone do wosków odlewniczych, a zatem muszą ulegać całkowitemu wypaleniu z powłoki ceramicznej, nie pozostawiając znacznych ilości pozostałości, takich jak popiół. Ponadto, materiał ten nie może nadmiernie rozszerzać się podczas procesu wypalania, ponieważ mogłoby to doprowadzić do uszkodzenia delikatnej ceramicznej powłoki formy, której zadaniem jest utrzymywanie ciekłego metalu. Z uwagi na te wyzwania technologiczne, niektóre odlewnie wykazują ostrożność wobec wprowadzania nowych procesów związanych z zastosowaniem nieznanymi materiałami. Znane są odpowiednie rozwiązania materiałowe stosowane w modelach do odlewania biżuterii, gdzie tworzywa termoplastyczne funkcjonują jako wosk do odlewu wytapianego. W procesie odlewania do form piaskowych kluczowymi elementami są skrzynka formierska górna i dolna oraz rdzeń, które są używane jednokrotnie, ponieważ ulegają zniszczeniu podczas wydobywania odlewu. Technologia przyrostowa (AM) znajduje szerokie zastosowanie w wytwarzaniu tych komponentów, zwłaszcza rdzeni, ze względu na ich skomplikowaną geometrię. Co więcej, możliwe jest również wytwarzanie całych form przy użyciu systemów do druku 3D. Ostateczny wybór technologii wytwarzania zależy od rozmiaru, ilości oraz złożoności elementów, które determinują, czy druk 3D jest optymalnym rozwiązaniem produkcyjnym. Na rynku funkcjonuje wiele firm zajmujących się produkcją materiałów dedykowanych technologiom przyrostowym. Część z tych przedsiębiorstw sprzedaje swoje materiały bezpośrednio producentom systemów druku 3D, którzy następnie oferują je pod własną marką, końcowym użytkownikom. Inni producenci materiałów dystrybuują je bezpośrednio do właścicieli urządzeń drukujących, zapewniając bezpośredni dostęp do materiałów eksploatacyjnych dla użytkowników technologii AM. Do niedawna grupa producentów zewnętrznych była dość nieliczna, jednak w ostatnich latach znacznie się rozrosła, zwłaszcza w sektorze proszków metali. Dla producentów urządzeń wykorzystujących technologie przyrostowe, sprzedaż materiałów eksploatacyjnych stanowi istotne źródło regularnych przychodów, dlatego niechętnie podchodzą oni do możliwości



utruty tego segmentu rynku. Producenci urządzeń do technologii przyrostowych często stosują fizyczne, elektroniczne oraz programowe blokady, które uniemożliwiają wykorzystanie "nieautoryzowanych" materiałów eksploatacyjnych. Część z nich opatentowała lub objęła tajemnicą przemysłową swoje materiały, aby wymusić ich stosowanie wyłącznie w połączeniu z ich systemami. W ramach zabezpieczenia swojego modelu biznesowego, firmy te często zastrzegają sobie prawo do unieważnienia gwarancji lub odmowy realizacji umów serwisowych w przypadku użycia materiałów pochodzących od innych dostawców. Na początkowym etapie rozwoju technologii przyrostowych producenci systemów zmuszeni byli przeprowadzać prawie wszystkie prace rozwojowe we własnych firmach. Były to prace naukowo-badawcze dotyczące materiałów, konstrukcji urządzeń oraz rozwijanie oprogramowania. Dla producentów urządzeń wykorzystujących technologie przyrostowe, sprzedaż materiałów eksploatacyjnych stanowi istotne źródło regularnych przychodów, dlatego niechętnie podchodzą oni do możliwości utraty tego segmentu rynku. Producenci urządzeń do technologii przyrostowych często stosują fizyczne, elektroniczne oraz programowe blokady, które uniemożliwiają wykorzystanie "nieautoryzowanych" materiałów eksploatacyjnych. Część z nich opatentowała lub objęła tajemnicą przemysłową swoje materiały, aby wymusić ich stosowanie wyłącznie w połączeniu z ich systemami. W ramach zabezpieczenia swojego modelu biznesowego, firmy te często zastrzegają sobie prawo do unieważnienia gwarancji lub odmowy realizacji umów serwisowych w przypadku użycia materiałów pochodzących od innych dostawców [1]. Materiały dodatkowe stosowane w procesach spawania można podzielić na kilka głównych grup: gazy osłonowe, topniki spawalnicze oraz spoiwa. Spoiwa są to materiały, które w trakcie spawania lub napawania ulegają stopieniu i po krzepnięciu tworzą spoinę lub napoinę. Produkt powstały w wyniku stopienia spoiwa w określonych warunkach spawania lub napawania, przy wyeliminowaniu wpływu materiału podstawowego, nazywany jest stopiwem. Ze względu na procesy metalurgiczne zachodzące podczas spawania lub napawania, skład chemiczny stopiwa często różni się od składu wyjściowego spoiwa. Spoiwo jest wykorzystywane niemal we wszystkich metodach spawania i napawania, a jego forma występuje w pięciu podstawowych postaciach: elektrody otulone, druty, pręty, taśmy oraz proszki. Ten ogólny podział można dalej uszczegółowić, wyróżniając m.in. druty i pręty pełne (lite), druty i pręty proszkowe, a także taśmy pełne, spiekane i proszkowe. Każdy z tych rodzajów spoiw znajduje zastosowanie w zależności od specyfiki procesu spawania oraz wymagań technicznych stawianych gotowemu połączeniu. [1, 2]. Materiały dodatkowe w postaci litych topliwych drutów ciągłych stosuje się do spawania i napawania łukowego w osłonie gazów (MIG/MAG).



W tych metodach drut elektrodowy podawany z bębna jest przewodnikiem prądu, który stapia jego koniec [2].

Druty lite, wykorzystywane w procesach spawania, są produkowane w średnicach od 0,6 mm do 6 mm. Na przykład w metodach spawania MIG/MAG najczęściej stosuje się druty o średnicach od 0,6 mm do 1,2 mm, natomiast druty o większych średnicach, od 1,5 mm do 6 mm, są wykorzystywane w metodzie spawania łukiem krytym. Aby zapobiec korozji, druty podatne na działanie środowiska korozyjnego są pokrywane warstwą miedzi lub niklu. Jest to istotne, ponieważ skorodowane druty mogą prowadzić do powstawania porowatości w spoinach oraz zakłóceń w procesie podawania drutu podczas spawania, co wpływa negatywnie na jakość spawania [2].

Druty elektrodowe z rdzeniem proszkowym, nazywane powszechnie drutami proszkowymi lub rdzeniowymi, są wykonane z rurki o przekroju okrągłym wypełnionej proszkiem – topnikowym lub metalicznym. Spoiwa te stosuje się głównie do spawania i napawania łukowego w osłonie gazowej, lub bez osłony gazowej. Druga metoda dotyczy drutów które zawierają proszki charakteryzujące się zjawiskiem samo osłonowym w momencie działania łuku elektrycznego. Możliwości stosowania drutów proszkowych są podobne do możliwości stosowania drutów litych [1, 2]. Druty proszkowe produkowane są w zakresie średnic od 0,9 mm do 3,2 mm i stosowane do spawania różnych rodzajów stali, w tym stali niestopowych, niskostopowych o wysokiej wytrzymałości (do 700 MPa), stali odpornych na niskie temperatury, oraz stali wysokostopowych ferrytycznych i austenitycznych. Kluczową cechą drutów proszkowych jest rodzaj i skład chemiczny proszku wypełniającego, który podobnie jak otulina w elektrodach, wpływa na właściwości spawalnicze. Druty proszkowe oferują liczne zalety w porównaniu z drutami litymi, takie jak możliwość łatwego wprowadzania składników stopowych do stopiwa. Charakteryzują się również lepszymi właściwościami spawalniczymi, w tym mniejszym rozpryskiem oraz wyższą wydajnością stapiania. Druty proszkowe samoosłonowe umożliwiają ponadto spawanie w warunkach terenowych, gdzie występuje niewielki wiatr, eliminując potrzebę stosowania zewnętrznych gazów osłonowych z butli. Te i inne zalety drutów proszkowych przyczyniają się do uproszczenia procesu spawania, poprzez zmniejszenie konieczności wykonywania dodatkowych operacji, takich jak czyszczenie i naprawa połączeń spawanych. [2, 3].

W artykułach [4-12] autorzy poruszają tematykę wytwarzania różnych materiałów kompozytowych również na bazie Cu i Al o wysokich własnościach wytrzymałościowych

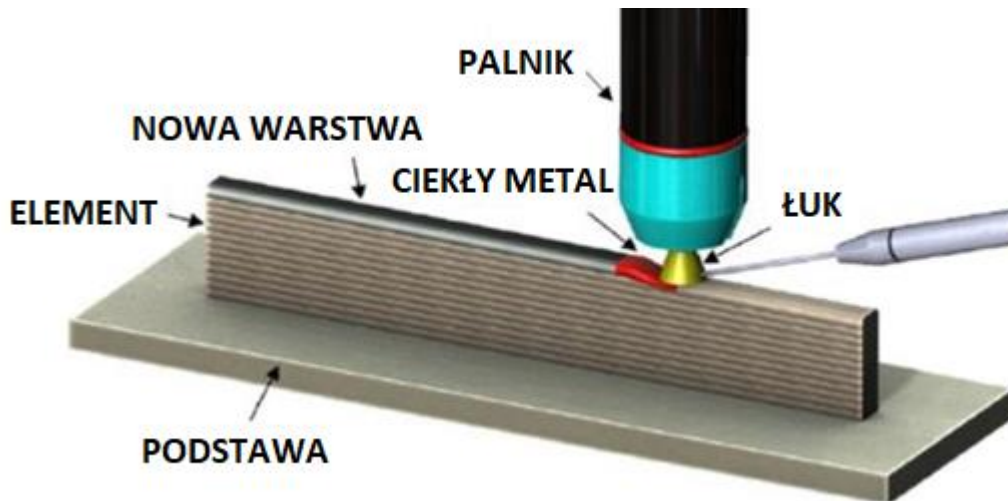


oraz dobrej przewodności elektrycznej. Uzyskanie tego typu materiału możliwe było przy zastosowaniu wymuszonych zmian naprężeń, uzyskano drobnoziarniste stopy Cu i Al. Zbadano szerokie spektrum stopów pod kątem zastosowania przemysłowego na rynku elektronicznym i elektrycznym. Autorzy stwierdzają, że zrównoważone połączenie doboru pierwiastków do stopów i metoda ich przetwarzania może zapewnić wysoką wytrzymałość przy zachowaniu odpowiednio wysokiej przewodności elektrycznej. W pracy [9] autor przedstawia nowe materiały o budowie drutu multiwłóknistego jednak materiały te nie zostały poddane spawaniu. Skupiono się na właściwościach przewodnictwa elektrycznego, właściwościach mechanicznych oraz powstawaniu faz międzymetalicznych po obróbce cieplnej. Materiał stanowiły rury miedziane z 61 pakietowanymi drutami aluminiowymi o przekroju sześciokąta. Autor badał możliwości uzyskania na drodze przeróbki plastycznej (ciągnięcie) materiałów CuAl oraz badania ich podatności do obróbki cieplnej podwyższającej własności plastyczne kompozytu. Materiały CuAl mają być alternatywą do materiałów AlCu jako innowacyjną alternatywę umożliwiającą przepływanie prądu w szerszym zakresie częstotliwości. Autorzy książki [13] w szczególny sposób podkreślają znaczący rozwój materiałów w przemyśle elektronicznym i elektrotechnicznym. Wytwarzanie materiałów bimetalowych zwanych płaszczowymi składających się z rdzenia (Fe, Ni, Al) pokrytego w odpowiedniej proporcji warstwą czystej miedzi. Najczęściej uzyskiwane druty płaszczowe [14-17] wykonuje się przez spawanie wzdłużne cienkiej taśmy uformowanej na materiale rdzenia. Spawane krawędzie poddaje się procesowi ciągnięcia na zimno, żarzeniu oraz dalszemu ciągnięciu. Uzyskanie dobrego połączenia miedzi z rdzeniem stalowym, niklowym lub aluminiowym realizowane wg tego sposobu pozwala otrzymać szeroką gamę drutów bimetalowych, cechujących się własnościami fizykochemicznymi takimi których nie spełnia drut z czystej miedzi lub stali. W opracowaniach F. Dupouy'a [18] oraz [19-22] szczególną uwagę poświęcono wysokiej przewodności elektrycznej oraz właściwościom mechanicznym nano-kompozytowych drutów CuNb. Druty te były wytwarzane z zastosowaniem metody pakietowania kompozytu płaszczowego, w której poszczególne pasma niobu były separowane warstwami miedzi. Proces ciągnięcia na zimno pozwalał na uzyskanie pożądaných właściwości, zarówno pod względem przewodności elektrycznej, jak i wytrzymałości mechanicznej, co jest kluczowe dla materiałów stosowanych w elektrotechnice, zwłaszcza w kontekście dalekiego przesyłu energii. Metoda ta umożliwia efektywne połączenie korzystnych właściwości obu metali, co czyni ją istotnym rozwiązaniem dla aplikacji wymagających jednocześnie wysokiej wytrzymałości i doskonałej przewodności.[18] Z. Rdzawski wraz ze współautorami [23] również zajmowali się drutami



plaszczowymi oraz kompozytami nano włóknowymi CuNb oraz CuAg dedykowanymi do przemysłu elektrotechnicznego. W ramach pracy wytworzono drut składający się z ponad 820000 włókien niobowych o średnicy od 100 do 200 nm które układały się w sposób równomierny w osnowie miedzi. Autorzy [23] zaznaczają znaczenie rozwoju materiałów nano kompozytowych które charakteryzują się wysokimi własnościami mechanicznymi (wytrzymałość na rozciąganie 1350MPa) oraz znakomitą przewodnością elektryczną (65% IACS). Prace związane z przetwarzaniem materiałów nano kompozytowych [23-32] skupiają się na opisie i badaniu złożonych zjawisk zachodzących podczas procesów przeróbki plastycznej. W pracy [23] przedstawiono przebieg badań metalograficznych dla obydwu wariantów kompozytów CuAg15 oraz CuNb15 z wykorzystaniem świetlnego mikroskopu, skaningowego mikroskopu elektronowego oraz transmisyjnego mikroskopu elektronowego. W publikacji [23] autorzy opisują wyniki badań struktury oraz własności mechanicznych i odporności korozyjnej stopów CuAlNi. Badane stopy zostały poddane obróbce cieplnej, w wyniku której podczas wydzieleni fazowych zaobserwowano wzrost własności mechanicznych, badania dowiodły, że stopy CuAlNi są interesującymi tworzywami ze względu na dużą plastyczność, wysokie własności wytrzymałościowe po obróbce cieplnej oraz dużą odporność na korozję [23].

Kolejni badacze [33] omawiają rozwój materiałów wykorzystywanych w inżynierii materiałowej, jednocześnie podkreślając, że postęp w tej dziedzinie wymaga również rozwoju technologii prototypowania. W publikacjach [33-49] opisano zalety druku 3D, zwracając szczególną uwagę na możliwość tworzenia obiektów o kształtach bliskich finalnym produktom bez potrzeby kosztownej i złożonej obróbki powierzchni. Druk 3D, znany także jako wytwarzanie przyrostowe (Additive mManufacturing – AM), skraca czas realizacji zadań oraz ogranicza straty materiałowe, co pozytywnie wpływa na jakość i koszty produkcji. Autorzy [33] tej publikacji koncentrują się na technologii WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), przedstawionej na rysunku 1.



Rysunek 1. Schematyczny diagram procesu WAAM [33]

3. Wytwarzanie przyrostowe – druk 3D

Wytwarzanie przyrostowe (Additive Manufacturing) jest określeniem stosowanym do technologii, które pozwalają na budowanie trójwymiarowych obiektów 3D poprzez dodawanie warstwa po warstwie materiału, niezależnie od tego, czy jest to plastik, metal, beton czy pewnego dnia także ludzka tkanka. Często stosuje się skrót angielskiej nazwy – AM lub mówi się o technologiach addytywnych, technologiach przyrostowych oraz po prostu o druku 3D. Wszystkie te określenia są traktowane jako synonimy. Wspólne dla technologii AM jest użycie komputera, oprogramowania do modelowania 3D (Computer Aided Design lub CAD), sprzętu maszynowego i materiału warstwowego / wsadowego. Po utworzeniu szkicu CAD, sprzęt AM odczytuje dane z pliku CAD i nakłada lub dodaje kolejne warstwy cieczy, proszku, materiału arkuszowego lub innego, warstwa po warstwie, aby wytworzyć trójwymiarowy obiekt. Zastosowania technologii AM są nieograniczone. Wczesne wykorzystanie tych technologii w formie Rapid Prototyping skupiało się na modelach wizualizacji przedprodukcyjnej. Obecnie stosuje się je do wytwarzania produktów końcowych np. w samolotach, uzupełnieniach dentystycznych, implantach medycznych, samochodach, a nawet ubraniach i akcesoriach sportowych. Chociaż technologia wytwarzania warstwa po warstwie jest prosta, to istnieje wiele zastosowań technologii AM o różnym stopniu zaawansowania dopasowanym do różnych potrzeb i wymagań, dla wielu gałęzi przemysłu [38-49].

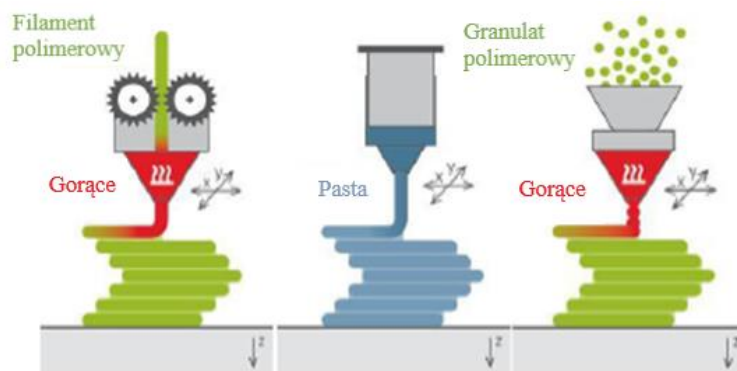
Systemy do technologii przyrostowych mają ze sobą wiele wspólnego. Ogólnie metody przyrostowe podzielone zostały na siedem odrębnych procesów.

W roku 2012 Komitet F42 organizacji ASTM International (największej na świecie międzynarodowej instytucji opracowującej standardy) opublikował listę kategorii procesów druku addytywnego oraz ich definicje jako część specyfikacji „Standardowa Terminologia dla Technologii Przyrostowych” (ang. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*). W wyniku współpracy ISO i ASTM opracowano standard dotyczący terminologii, ISO/ASTM 52900, który został wydany w roku 2015, zastępując wcześniejszy standard ASTM [51].

Poniżej zaprezentowano procesy oraz ich definicje według standardu ISO/ASTM 52900 punkty od 3.1 do 3.7.

3.1. Wytłaczanie materiału (Material Extrusion – MEX)

Jest to proces, w którym materiał jest selektywnie dozowany przez dyszę lub otwór. W urządzeniach MEX półpłynny materiał zostaje wypychany przez dyszę, podczas gdy głowica drukująca lub platforma robocza przemieszcza się w płaszczyznach x-y. Po ukończeniu warstwy, platforma robocza zostaje opuszczona lub głowica podnosi się, umożliwiając wytłaczanie kolejnej warstwy, która łączy się z uprzednio naniesioną. Typowym materiałem wsadowym w tym procesie jest termoplastyczny filament o strukturze przypominającej drut, nawinięty na szpulę, który po podgrzaniu zostaje wytłaczany przez dyszę (rys. 2). W przypadku struktur zwisających, konieczne jest stosowanie struktur wsparciowych bądź podpór, które po zakończeniu procesu są usuwane wraz z odcięciem elementu od platformy roboczej [52].



Rysunek 2. Schemat technologii MEX z wykorzystaniem filamentu (po lewej), pasty (w środku), granulatu (po prawej) [52]

Materiał wsadowy w technologii MEX nie ogranicza się wyłącznie do tworzyw termoplastycznych. Proces ten umożliwia również wytłaczanie lepkich cieczy, żeli, mas plastycznych, często bez konieczności podgrzewania. Do stosowanych materiałów należą ceramiki, materiały kompozytowe, gliny wypełnione metalem, beton, czekolada, produkty spożywcze, a także żywe komórki osadzone w hydrożelu. Istnieje również możliwość wykorzystania standardowych peletów termoplastycznych, które są nawet dziesięciokrotnie tańsze niż filamenty.

Zalety procesu MEX:

- niższe koszty w porównaniu do innych technologii addytywnych,
- stosunkowo proste projektowanie i łatwość obsługi,
- nieskomplikowana produkcja i obsługa,
- wysoka jakość wykończenia powierzchni,
- szeroka gama dostępnych kolorów,
- możliwość druku z różnych materiałów.

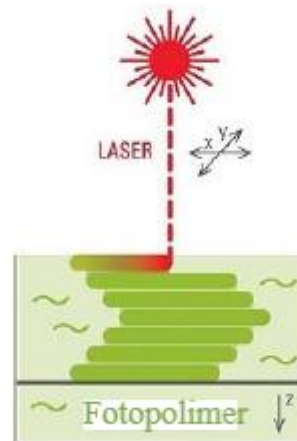
Urządzenia oparte na technologii MEX (rys. 3) stanowią najliczniejszą grupę maszyn wykorzystywanych w technologii addytywnej (AM). Proces ten został zapoczątkowany przez firmę Stratasys, która wprowadziła technologię na rynek w 1991 roku, opatentowując ją pod nazwą Fused Deposition Modelling (FDM).



Rysunek 3. Drukarka firmy BCN3D z dwoma ekstruderami [52]

3.2. Polimeryzacja Vat (Vat Photopolymerization – VPP)

Stereolitografia (SLA) to jedna z najbardziej precyzyjnych metod wytwarzania addytywnego (AM), polegająca na selektywnym utwardzaniu ciekłego fotopolimeru za pomocą światła ultrafioletowego (UV). Proces ten odbywa się w kadzi wypełnionej żywicą, która pod wpływem naświetlania laserem ulega polimeryzacji, tworząc kolejne warstwy modelu (rys. 4). W technologii SLA wykorzystywane są lasery UV o wysokiej precyzji, a także dwa galwanometry – lustra osadzone na osiach x i y – które kontrolują kierunek wiązki laserowej, skanując powierzchnię ciekłego fotopolimeru. Tam, gdzie laser trafia w żywicę, dochodzi do fotopolimeryzacji, czyli utwardzania materiału, co prowadzi do utworzenia cienkiej warstwy stałego polimeru. Proces ten powtarza się, aż do zbudowania całego obiektu, warstwa po warstwie [52].



Rysunek 4. Schemat technologii druku 3D VPP [52]

Stereolitografia charakteryzuje się bardzo wysoką dokładnością wymiarową oraz gładkością powierzchni, co czyni ją idealną do wytwarzania prototypów o skomplikowanych kształtach, które wymagają precyzyjnego wykończenia. Metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, medycznym (np. w tworzeniu modeli anatomicznych), a także w jubilerstwie oraz przy produkcji form wtryskowych [52].

Zalety procesu SLA:

- wysoka precyzja drukowanych geometrii, stereolitografia pozwala na uzyskiwanie wyjątkowo dokładnych detali, co czyni ją jedną z najprecyzyjniejszych technologii druku 3D.



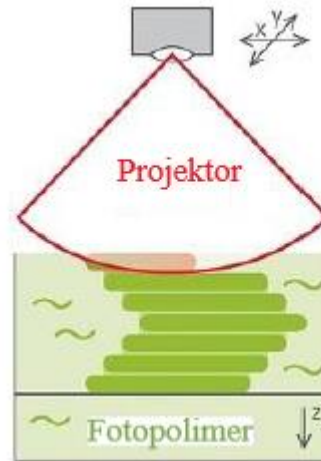
- możliwość budowania bardzo cienkich ścianek, proces SLA umożliwia wytwarzanie warstw o grubości nawet 10 μm , co pozwala na tworzenie bardzo cienkich i szczegółowych struktur.
- szeroka gama materiałów, dostępność materiałów fotopolimerowych imitujących właściwości termoplastów pozwala na tworzenie części o różnorodnych parametrach mechanicznych, optycznych i chemicznych, zbliżonych do tych wytwarzanych z tworzyw sztucznych.
- druk elementów przezroczystych i półprzezroczystych, SLA umożliwia tworzenie elementów o różnych poziomach przezroczystości, co jest istotne w zastosowaniach wymagających wysokiej jakości wizualnej lub funkcjonalnej, takich jak prototypy optyczne czy modele medyczne.

Poza olbrzymią ilością zalet proces SLA posiada również wady, między innymi takie jak:

- koszty materiałów, fotopolimery są relatywnie drogie w porównaniu do materiałów używanych w innych technikach druku 3D.
- kruche elementy, utwardzone fotopolimery mogą być kruche i podatne na pękanie, co ogranicza zastosowania w produkcji elementów funkcjonalnych.
- ograniczenia dotyczące wielkości, wielkość drukowanych modeli jest ograniczona rozmiarami kadzi, w której przeprowadza się proces.

Stereolitografia została po raz pierwszy opatentowana i skomercjalizowana przez firmę 3D Systems w 1988 roku, co uczyniło ją pionierem w technologii addytywnej. To właśnie ten proces zapoczątkował rozwój szerokiej gamy technologii druku 3D, które zrewolucjonizowały wiele branż przemysłowych [52].

Nowsze urządzenia wykorzystujące technologię przetwarzania fotopolimerów (Vat Photopolymerization, VPP) stosują lampy lub diody LED jako źródła energii w połączeniu z cyfrowym przetwarzaniem światła (*Digital Light Processing, DLP*). Technologia DLP opiera się na użyciu cyfrowego projektora światła, który utwardza całą warstwę fotopolimeru jednocześnie (rys. 5), w przeciwieństwie do punktowego naświetlania, co znacznie przyspiesza proces drukowania w porównaniu z selektywnym przetapianiem laserowym (SLA).



Rysunek 5. Technologia technologii druku 3D DLP [52]

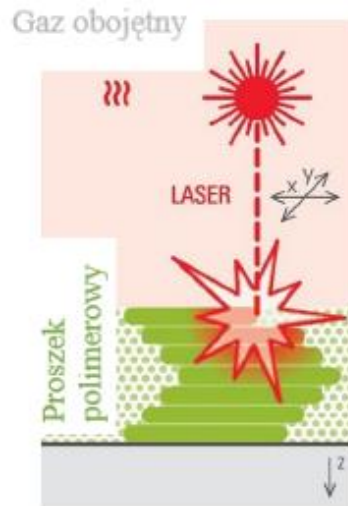
W technologii DLP światło jest zwykle emitowane od spodu kadzi, a materiał utwardzany jest przez przejrzyste dno, nazywane oknem optycznym. Ta metoda pozwala na użycie mniejszej ilości cieczy fotopolimerowej w kadzi, w przeciwieństwie do klasycznych urządzeń SLA, które utwardzają materiał od góry. Dzięki temu technologia DLP może zapewniać szybsze czasy produkcji oraz bardziej efektywne zużycie materiału [51, 52].

3.3. Stاپanie w złożu proszkowym (Powder Bed Fusion – PBF)

Jest to proces technologii addytywnej, w którym energia cieplna selektywnie indukuje fuzję pomiędzy cząstkami proszku w obszarze roboczym. W wyniku działania energii, proszek ulega stopieniu, a po schłodzeniu przechodzi w fazę stałą, tworząc kolejne warstwy modelu. Termin spiekanie laserowe (Laser Sintering, LS) odnosi się do procesów stapiania w złożu proszkowym (PBF) z wykorzystaniem polimerów, w których selektywne stapianie proszku jest realizowane za pomocą wiązki laserowej (rys. 6). W przypadku metali wyróżnia się różne odmiany tej technologii, takie jak: Selektywne Spiekanie Wiązką Lasera (*Selective Laser Melting, SLM*), Bezpośrednie Spiekanie Laserowe Metali (*Direct Metal Laser Sintering, DMLS*), Topienie za Pomocą Wiązki Elektronów (*Electron Beam Melting, EBM*). [51, 52]

Technologia PBF charakteryzuje się szeroką gamą dostępnych materiałów, zarówno polimerowych, jak i metalicznych. W przypadku polimerów, niestopiony proszek pełni funkcję podpory dla drukowanego obiektu, stabilizując jego struktury podczas budowy. Jednakże, proszek otaczający model ulega częściowej degradacji podczas procesu, co

wymaga jego okresowego "odświeżania" nowym, nieużywanym materiałem. W niektórych przypadkach konieczne jest dodanie nawet 30-50% nowego proszku, aby zapewnić odpowiednią jakość wydruku [52].



Rysunek 6. Technologia PBF technologii druku 3D [52]

W przypadku druku z metali konieczne jest stosowanie struktur kotwiczących, które stabilizują elementy na płycie roboczej. W komorze roboczej występują znaczne gradienty termiczne, co może prowadzić do powstawania naprężeń i zniekształceń, jeśli kotwy nie są używane. Gruba płyta robocza pełni rolę ujścia ciepła, chroniąc części przed deformacjami w trakcie procesu produkcji. Źródłem energii w procesach z użyciem metali jest zazwyczaj laser lub wiązka elektronowa. Laserowe stapianie w złożu proszkowym (PBF) z wykorzystaniem metali pozwala na uzyskanie lepszego wykończenia powierzchni oraz detali o większej precyzji w porównaniu do systemów korzystających z wiązki elektronów. Urządzenia te są jednak droższe, ale umożliwiają szybsze procesy wytwarzania. Dodatkowo, systemy wykorzystujące wiązkę elektronów generują mniejsze naprężenia szcztkowe w elementach, co przekłada się na mniejsze zniekształcenia oraz mniejsze zapotrzebowanie na kotwy i struktury podtrzymujące. Z powodu wysokich temperatur część luźnego proszku może ulegać częściowemu spiekaniu, co utrudnia usuwanie nadmiaru proszku z otworów oraz kanałów wewnętrznych elementu, szczególnie w przypadku małych i głębokich struktur. Systemy PBF (*Powder Bed Fusion*) są stosunkowo skomplikowane oraz kosztowne w porównaniu do większości procesów technologii addytywnej (AM), szczególnie w kontekście urządzeń wykorzystujących metale. Wysokie są również koszty operacyjne, wynikające z wymagań dotyczących utrzymania próżni oraz zapewnienia bezpieczeństwa.



Dodatkowo, materiały używane w tych procesach są relatywnie drogie, a w przypadku polimerów pojawiają się problemy związane z ich recyklingiem. Prowadzone są badania mające na celu redukcję czasu oraz kosztów transportu materiałów oraz obróbki końcowej. Elementy wytwarzane tą metodą często wykorzystywane są jako części finalne ze względu na ich wysoką jakość i korzystne właściwości mechaniczne [52].

Większość systemów AM z wykorzystaniem metali stosuje proces PBF, jednak firmy często stosują swoje własne nazwy na ten proces. I tak, np. EOS nazywa swój proces DMLS, Renishaw – laser melting, GE Additive Laser Cusing. A japońskie firmy Matsuura i Sodick oferują systemy hybrydowe, które łączą technologię PBF metali z frezowaniem CNC [51, 52].

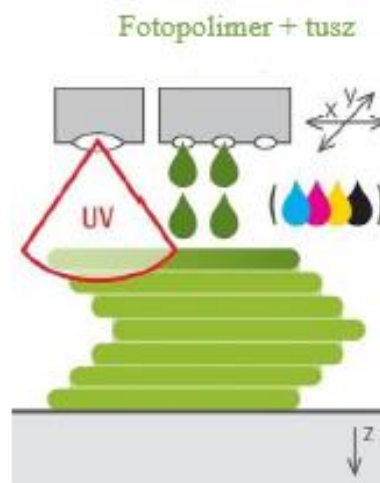
Zalety technologii Laser Powder Bed Fusion:

- możliwość wytwarzania elementów o skomplikowanej i złożonej geometrii,
- zachowanie wysokich parametrów wytrzymałościowych części przy jednoczesnej redukcji ich masy, co pozwala na optymalizację topologii,
- łatwe usuwanie niespieczonego proszku, co zwiększa efektywność procesu,
- wysoka jakość powierzchni drukowanych elementów, co przekłada się na estetykę oraz funkcjonalność,
- możliwość wytwarzania elementów z drobnymi szczegółami, co jest istotne w wielu zastosowaniach inżynierskich,
- tworzenie detali o wysokiej gęstości, co poprawia ich właściwości mechaniczne,
- proces umożliwia wykorzystanie różnych materiałów, w tym:
 - stali nierdzewnej: 316L, 304, 15-5PH, 17-4PH,
 - stopów niklu: Inconel 625, Inconel 718, Hastelloy X,
 - stopów tytanu: Ti6Al4V ELI,
 - stopów kobaltowo-chromowych, (Co – Cr),
 - stopów aluminium,
 - stopów miedzi.

3.4. Natryskiwanie materiału (*Material Jetting, MJT*)

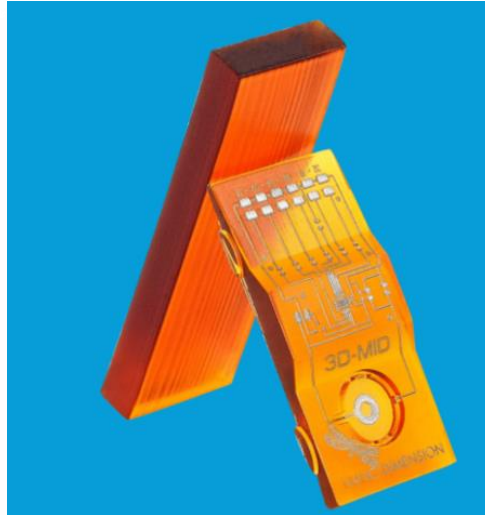
Proces technologii addytywnej, w którym kropelki materiału są selektywnie osadzane na powierzchni modelu. Proces ten wykorzystuje głowice podobne do tych stosowanych

w drukarkach atramentowych, które umożliwiają precyzyjne osadzanie kropelek materiału w obszarze roboczym. Najczęściej stosowanymi materiałami w tym procesie są fotopolimery oraz substancje przypominające wosk, które mogą służyć jako wzory do odlewów z modeli wytapianych. Systemy MJT (rys. 7) są często wyposażone w głowice z wieloma dyszami, co przyspiesza prędkość budowy elementów oraz umożliwia drukowanie z różnych materiałów. Przykładem są technologie Connex3 oraz J-series PolyJet, opracowane przez firmę Stratasys, które pozwalają na tworzenie tzw. „materiałów cyfrowych” poprzez jednoczesne natryskiwanie trzech różnych rodzajów materiałów. Stosowanie różnych proporcji każdego z materiałów umożliwia uzyskanie elementów o różnych kolorach lub różnorodnych właściwościach materiałowych. W procesie tym wykorzystywane są fotopolimery, które ulegają utwardzeniu pod wpływem światła UV podczas osadzania, co pozwala na osiągnięcie wysokiej precyzji i jakości powierzchni drukowanych elementów [52].



Rysunek 7. Schemat technologii druku 3D MJT [52]

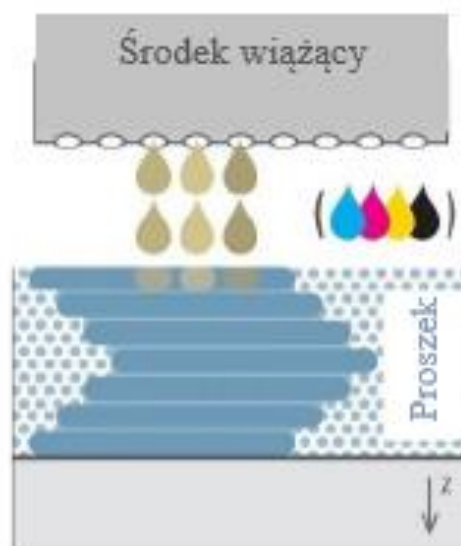
Na rynku znany jest proces zwany „multijet printing”, który wykorzystuje materiały gradientowe. System Dragonfly firmy Nano Dimension natrykuje materiały w połączeniu z przewodzącymi tuszami, co umożliwia produkcję funkcjonalnych płytek drukowanych (PCB) – rys. 8. [52]



Rysunek 8. Płytki PCB wykonane na systemie Dragonfly firmy Nano Dimension [52]

3.5 Binder Jetting (BJT)

Proces technologii addytywnej, w którym ciekły środek wiążący jest наносzony selektywnie przez dyszę drukarki atramentowej w celu związania obszarów złoża proszku. Techniki BJT i Material Jetting (MJT) są podobne, ponieważ obie wykorzystują dysze do nanoszenia materiału. Kluczową różnicą jest jednak to, że w BJT głównym składnikiem nie jest materiał budowlany, lecz ciecz, która łączy cząsteczki oraz warstwy proszku, tworząc pożądaną kształt [52].



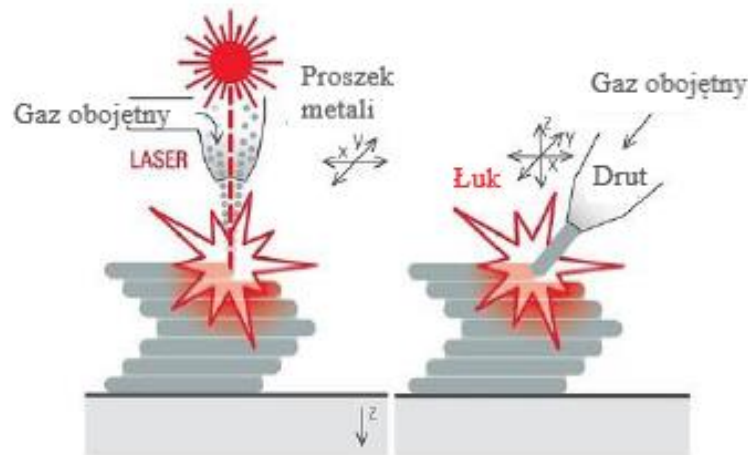
Rysunek 9. Schemat technologii druku 3D BJT [51]

Systemy BJT, takie jak te opracowane przez firmę ExOne, natryskują płynny środek wiążący na powierzchnię proszków metalowych lub piasku. Metalowe części produkowane za pomocą tej techniki wymagają dodatkowych procesów wypalania spoiwa oraz spiekania, aby uzyskać odpowiednie właściwości mechaniczne. Należy zauważyć, że elementy wytwarzane tą metodą doświadczają znacznego kurczenia, które może wynosić nawet do 20%, co ogranicza maksymalne wymiary wytwarzanych komponentów. W celu zredukowania tego kurczenia i uzyskania elementów o pełnej gęstości, stal nierdzewna często musi być nasycana innym metalem, na przykład brązem, co pozwala na osiągnięcie pożądanych właściwości fizycznych i mechanicznych [52].

3.6. Directed Energy Deposition (DED)

Kolejny proces technologii addytywnej, w którym skupiona energia cieplna jest wykorzystywana do łączenia materiałów poprzez ich topnienie podczas odkładania. Jako źródło energii najczęściej stosowane są lasery lub wiązki elektronów, a materiałem wsadowym może być zarówno proszek metalowy, jak i drut. Proces DED umożliwia wytwarzanie elementów o kształcie zbliżonym do produktu końcowego, choć zazwyczaj wymagają one dalszej obróbki [52].

DED oferuje unikalne możliwości, w tym możliwość jednoczesnego drukowania z dwóch różnych materiałów. Większość systemów DED wykorzystuje 4- lub 5-osiowy system ruchu, co pozwala na elastyczne ustawienie głowicy drukującej. Dzięki temu proces wytwarzania nie jest ograniczony do poziomych warstw, co otwiera nowe możliwości w zakresie projektowania i produkcji. Umożliwia to dodawanie materiału do wcześniej wyprodukowanych elementów, co jest szczególnie istotne w kontekście naprawy zużytych komponentów oraz regeneracji części [52].



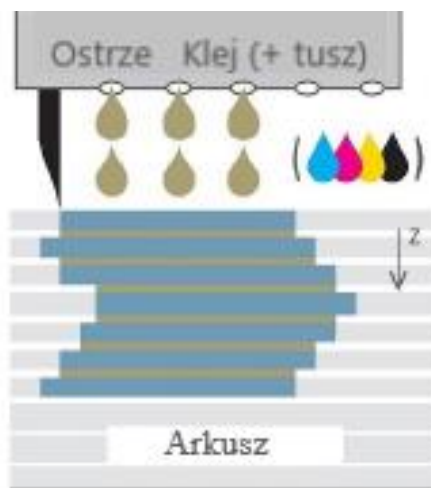
Rysunek 10. Technologia DED z wykorzystaniem proszków metali (po lewej) i z drutem jako materiałem wsadowym (po prawej) [52]

Dodatkowo, istnieje wiele systemów hybrydowych, które łączą DED z tradycyjnym frezowaniem CNC. Takie podejście pozwala na połączenie zalet obu technologii, zwiększając precyzję oraz jakość końcowych produktów. Proces DED znajduje zastosowanie w różnych branżach, takich jak przemysł lotniczy, motoryzacyjny oraz medycyna, gdzie wymagana jest wysoka wydajność i precyzja w wytwarzaniu komponentów [52].

3.7. Laminowanie arkuszy (Sheet Lamination – SHL)

Laminowanie arkuszy (Sheet Lamination, SHL) to proces technologii addytywnej, w którym arkusze materiału są łączone w celu budowy elementu. Materiałami stosowanymi w tym procesie mogą być arkusze papieru pokryte klejem, co po laminacji pozwala na uzyskanie elementów o właściwościach zbliżonych do sklejki. W technologii SHL materiał jest pokrywany warstwą kleju (polimeru) oraz czasami tuszem, po czym rozgrzana rolka laminuje kolejne warstwy (rys. 11). Profil 2D drukowanego elementu jest następnie wycinany w każdej warstwie za pomocą ostrza lub lasera. Dla produkcji elementów metalowych wykorzystuje się również metalowe taśmy i folie. Wśród innych materiałów stosowanych w procesie laminowania można wymienić papier, włókno węglowe, włókno szklane oraz różnorodne materiały kompozytowe. Technologia Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), która integruje spawanie ultradźwiękowe do łączenia taśm i folii metalowych, również wpisuje się w kategorię laminowania arkuszy. UAM oferuje systemy, które łączą tę technologię z obróbką CNC, co pozwala na osadzenie elektroniki w produkowanych

elementach. Ta innowacyjna technologia otwiera nowe możliwości w zakresie projektowania i wytwarzania zaawansowanych komponentów, łącząc procesy addytywne z tradycyjnymi metodami obróbko-wytwórczymi [52].



Rysunek 11. Schemat technologii druku 3D SHL [52]

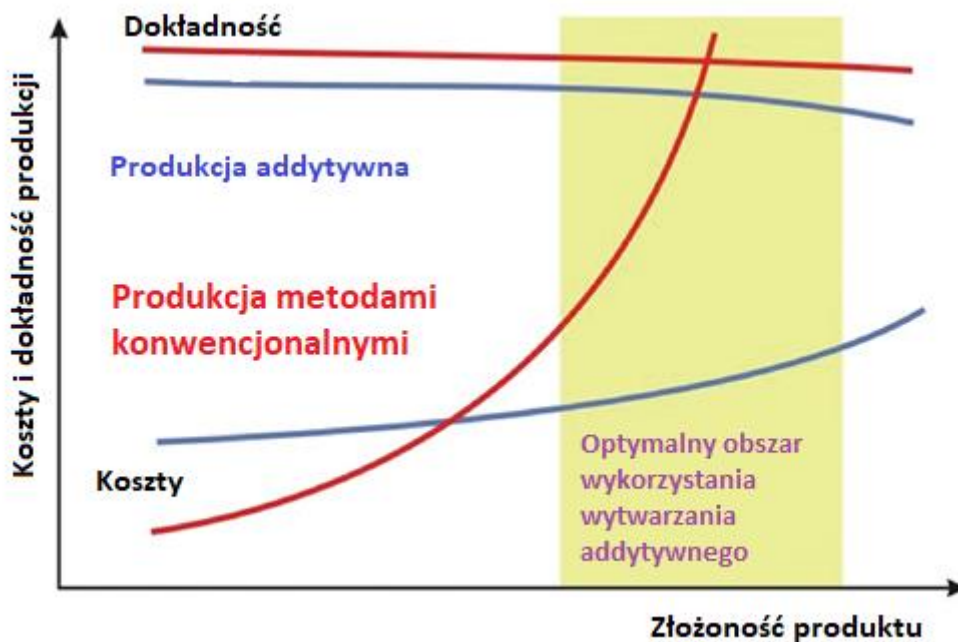
Jako innowację w zakresie wytwarzania nowych wyrobów napawanych/drukowanych metodą Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), autor [53] zaproponował zastosowanie dwóch osobnych podajników do dostarczania materiałów (miedzi oraz aluminium) do ciekłego jeziora. Aby zapewnić jednorodność składu chemicznego planowanego wydruku, autor zredukował tempo procesu napawania, co pozwoliło na osiągnięcie optymalnych warunków napawania oraz ujednoczenie struktury uzyskiwanego produktu. Po każdym etapie napawania przeprowadzano operację szlifowania w celu przygotowania lica napoiny do aplikacji kolejnej warstwy. Mimo zastosowania przedmuchu argonem, lico napoiny wymagało mechanicznego czyszczenia. W wyniku przeprowadzonego procesu druku 3D uzyskano ściankę składającą się z 15 warstw. W artykule omówiono również wyzwania związane z realizacją procesu drukowania, wynikające z konieczności wykorzystania dwóch odrębnych układów podawania drutu do ciekłego jeziora. Głównymi zaletami procesu WAAM są niższe koszty zakupu surowców; technologia ta, oparta na drucie spawalniczym, jest bardziej opłacalna w porównaniu do technologii proszkowych, w szczególności w kontekście kosztów materiałów tytanowych, które są znacznie droższe w zakupie [33]. W przypadku produkcji skomplikowanych elementów silników, współczynnik opłacalności procesu WAAM jest szczególnie wysoki, ze względu na szybkość realizacji napawania. Całość zmiennych procesu może być starannie optymalizowana poprzez dobór odpowiednich



parametrów, takich jak prędkość podawania drutu, prędkość posuwu manipulatora, szybkość odprowadzania ciepła oraz temperatura między ściegami. Warto jednak podkreślić, że każda zmiana któregoś z tych parametrów wpływa na rezultaty uzyskanego wydruku. Zwiększona prędkość podawania drutu oraz podwyższenie temperatury między ściegami mają bezpośredni wpływ na chropowatość powierzchni detalu. W sytuacjach, gdy chropowatość powierzchni jest kluczowym czynnikiem, należy unikać gwałtownych zmian parametrów [52, 53].

4. Rozwój technologii druku 3D

W publikacjach [53-99] omówiono różnorodne elementy konstrukcyjne wytwarzane techniką Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) oraz metody badawcze materiałów uzyskanych tą techniką. W artykułach tych przedstawiono, jak technika AM wykorzystująca drut spawalniczy pozwoliła na wytwarzanie elementów silnika, fragmentów ramienia koparki oraz elementów mostów. Wskazano także na możliwości rozwoju techniki WAAM, która może być wprowadzona do produkcji seryjnej. Do najważniejszych zalet tej technologii należą szybkość produkcji oraz elastyczność wprowadzania zmian na każdym etapie testowania linii produkcyjnej wykorzystującej druk 3D. Analizując koszty oraz dokładność produkcji jako punkt odniesienia, można stwierdzić, że istnieje optymalny obszar zastosowania wytwarzania przyrostowego. W szczególności, wraz ze wzrostem złożoności geometrycznej i funkcjonalnej przyszłego produktu, koszty produkcji przy konwencjonalnych metodach rosną wykładniczo. Najbardziej wymagające kształty geometryczne mogą być realizowane w procesach produkcji addytywnej bez znaczącego zwiększania kosztów produkcji. Można zatem uznać, że uzasadnienie dla stosowania procesów wytwarzania przyrostowego wzrasta wraz ze złożonością produktu. W związku z tym każde wdrożenie takich metod produkcji będzie weryfikowane w kontekście przewag i ograniczeń w porównaniu z metodami konwencjonalnymi. W ujęciu skali oraz powtarzalności detali w zastosowaniach przemysłowych wykorzystanie techniki WAAM znajduje swoje merytoryczne uzasadnienie. Na rysunku 12 przedstawiono kwestię opłacalności zastosowania druku 3D, co dodatkowo podkreśla znaczenie tej technologii w kontekście nowoczesnych procesów produkcyjnych. [85-87]



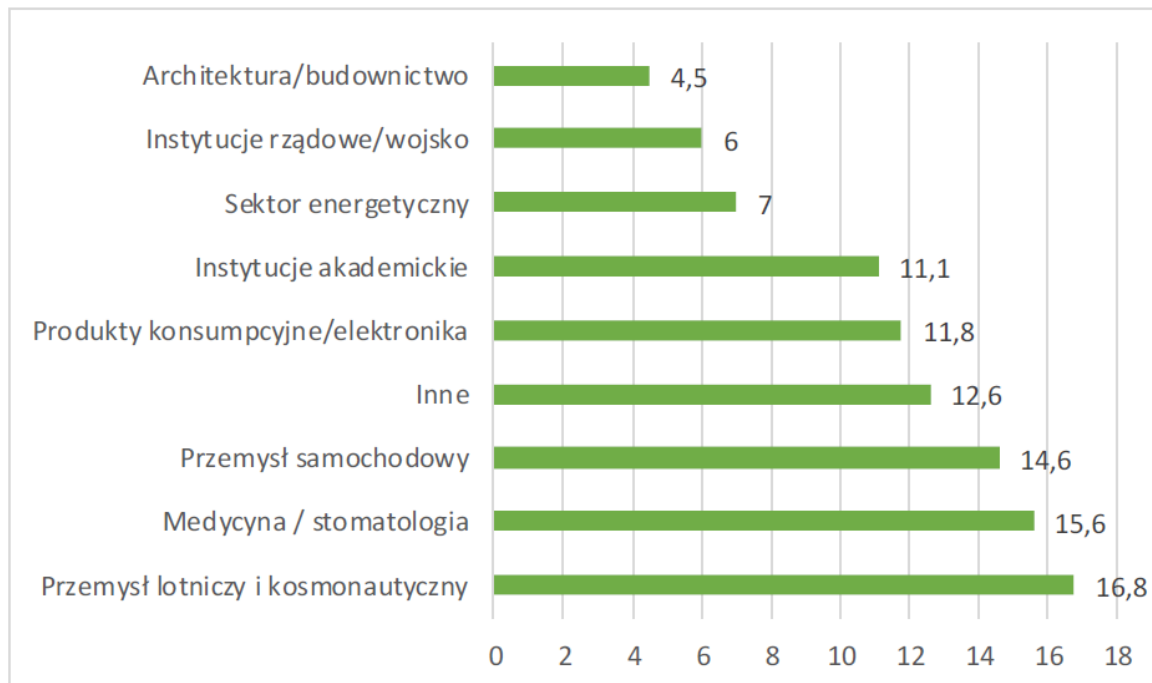
Rysunek 12. Uzasadnienie zastosowania wytwarzania addytywnego [87]

Jako przykład branży, w której technika Additive Manufacturing (AM) oraz druk 3D metodą Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) zyskują na znaczeniu, wskazuje się sektor wojskowy, obejmujący produkcję elementów broni oraz części maszyn. W aktualnym opracowaniu z 2023 roku, zatytułowanym „Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges” [100], zauważono, że integracja technologii wytwarzania przyrostowego (AM) w zastosowaniach wojskowych otwiera wiele obiecujących możliwości. Zdolność do szybkiego wytwarzania skomplikowanych, dostosowanych komponentów na żądanie może znacząco zwiększyć gotowość operacyjną, zmniejszyć obciążenia logistyczne oraz poprawić ogólną wydajność systemów wojskowych. Jednym z kluczowych wyzwań związanych z wprowadzeniem technologii AM w sektorze wojskowym są postępy oraz innowacyjne rozwiązania, które oferują ogromny potencjał, zarówno pod względem różnorodności, jak i jakości materiałów uzyskanych metodami przyrostowymi. W związku z tym przedsiębiorcy dostrzegają zasadność wykorzystania AM w produkcji na równi z technikami standardowymi, tj. konwencjonalnymi. Warunkiem komercjalizacji produktów wytworzonych metodami przyrostowymi jest utrzymanie kosztów wytworzenia na poziomie nieprzekraczającym koszt całkowity dla produkcji metodami konwencjonalnymi. W tym przypadku można założyć akceptowalne przekroczenie kosztu wytworzenia o około 15% w sytuacji, gdy brane pod uwagę są trudnodostępne na rynku materiały specjalistyczne. Ograniczona dostępność tych



materiałów u producentów, w kontekście oczekiwanego terminu, ceny i rozmiaru półfabrykatu, ma istotny wpływ na realizację projektów. Koszt obróbki półfabrykatów uzyskanych z druku 3D może być zredukowany poprzez optymalizację kształtu półfabrykatu oraz opracowanie specjalistycznego oprzyrządowania do produkcji seryjnej, co z pewnością skróciłoby czasy obróbcze poszczególnych wyrobów. Należy podkreślić, że każdorazowe przejście z tradycyjnych metod produkcji (CNC) na technologie druku 3D/technik przyrostowych, wymaga indywidualnej oceny całego procesu. Tylko przy uwzględnieniu skali produkcji, złożoności detalu, ostatecznego przeznaczenia oraz rodzaju materiału i wymagań certyfikacyjnych można ustalić zasadność zastosowania technologii addytywnych [43, 48]. W kontekście kosztów, warto przytoczyć przykłady z publikacji [39], gdzie wskazano, że dla detalu wykonanego z Ti-6Al-4V, stosowanego w przemyśle lotniczym, cena materiału wynosi około 90 euro/kg, a koszty uzyskania komponentu przy użyciu procesu WAAM wyniosą około 497 euro za sztukę, w porównaniu do 1657 euro za sztukę przy zastosowaniu alternatywnych metod produkcyjnych. Takie dane sugerują dużą przestrzeń do optymalizacji kosztów z wykorzystaniem technologii WAAM oraz odpowiednio opracowanych materiałów. W ciągu ostatniej dekady branża produkcji addytywnej była świadkiem eksplozji innowacji technologicznych, które przekształciły technologię druku 3D z futurystycznej abstrakcji w ekonomicznie opłacalną rzeczywistość. Pomimo tego, że rozwinęła się w dynamiczną branżę wartą wiele miliardów dolarów, nadal istnieje szereg wyzwań, przed którymi stoją producenci drukarek 3D, deweloperzy oraz użytkownicy końcowi w kontekście procesów produkcji przemysłowej. Mimo, że potencjał technologii AM stał się szeroko omawiany na forach naukowych i technologicznych, wciąż istnieją powszechne błędne przekonania dotyczące zasadności i efektywności jej stosowania. Na podstawie analizy literatury dotyczącej techniki druku 3D oraz materiałów stosowanych w badaniach związanych z techniką AM, można stwierdzić, że rozwój druku 3D oraz jego pozytywny aspekt ekonomiczny w kontekście wdrażania tej technologii w przemyśle są bardzo wyraźne. Współczesny druk 3D nie zagraża produkcji masowej; nowe technologie znajdują zastosowanie głównie w przypadku produkcji na mniejszą skalę. Materiały wykorzystywane przy prototypowaniu to najczęściej tańsze i łatwiejsze w obróbce tworzywa sztuczne. Decyzja o przejściu na druk 3D z użyciem metalu zapada dopiero po udanej sesji prototypowania z wykorzystaniem tworzyw sztucznych. Redakcja strony [38] zwraca uwagę na rosnący trend zastosowania technologii druku 3D, jednak trudno jednoznacznie określić, który sektor przemysłu jest bardziej otwarty na jej implementację. Większość ośrodków badawczych współpracujących z przemysłem dysponuje drukarkami 3D. Przekrój podmiotów

stosujących technikę AM jest szeroki, obejmujący firmy z branży meblarskiej, elektrotechnicznej, motoryzacyjnej, lotniczej oraz medycznej. Na rysunku 13 przedstawiono branże, w których technologie przyrostowe są najczęściej stosowane [48, 50].



Rysunek 13. Gałęzie przemysłu, gdzie najpowszechniej stosuje się technologie przyrostowe [48]

Technologie przyrostowe, w tym druk 3D, stanowią kluczowy element rewolucji w produkcji przemysłowej, przyczyniając się do istotnych zmian w procesach projektowania i wytwarzania w różnych sektorach gospodarki. Wśród głównych branż korzystających z technologii addytywnych wyróżniają się przemysł motoryzacyjny oraz lotniczy, które od lat stosują AM zarówno w fazie prototypowania, jak i przy produkcji komponentów. Kategoria „Inne” zawiera górnictwo, przemysł chemiczny, uzdatnianie wody, drewno / papiernictwo i pozostałe trudne do skategoryzowania branże. Branża motoryzacja, będąca jednym z pionierów we wdrażaniu tych rozwiązań, wykorzystuje technologie przyrostowe głównie do tworzenia prototypów, weryfikacji dopasowania elementów, walidacji projektów oraz w produkcji narzędzi. W ostatnich latach obserwuje się coraz częstsze zastosowanie AM w produkcji małoseryjnej elementów końcowych, co znalazło zastosowanie w takich firmach jak BMW, Bugatti czy General Motors. Mimo, iż proces implementacji w produkcji końcowej rozwija się wolniej niż w fazie prototypowania, możliwości technologii AM



umożliwiają elastyczne dostosowanie produktów do wymagań rynku, a także tworzenie skomplikowanych struktur, trudnych do uzyskania przy użyciu konwencjonalnych metod.

Technologie addytywne zostały szybko zaadaptowane także przez branżę lotniczą, szczególnie od połowy lat 90. XX wieku, kiedy to Boeing oraz Bell Helicopter rozpoczęli stosowanie polimerowych części niekonstrukcyjnych, wyprodukowanych z wykorzystaniem metod przyrostowych. Przykładem szerokiego zastosowania druku 3D w przemyśle lotniczym są działania takich gigantów jak Airbus, Honeywell Aerospace, Lockheed Martin oraz Northrop Grumman, które intensywnie wdrażają technologie przyrostowe w produkcji komponentów zarówno polimerowych, jak i metalowych. Zastosowanie technologii AM w lotnictwie niesie ze sobą istotne korzyści, przede wszystkim w postaci redukcji masy komponentów, co bezpośrednio przekłada się na oszczędności paliwowe i zmniejszenie kosztów operacyjnych. Boeing, będący jednym z pionierów technologii druku 3D w branży lotniczej, ma w swoich samolotach ponad 70 tysięcy części wykonanych technikami przyrostowymi. W 2017 roku firma ta uzyskała certyfikat Federalnej Administracji Lotnictwa (FAA) na pierwszy tytanowy element konstrukcyjny wyprodukowany z wykorzystaniem druku 3D, co otworzyło nowy rozdział w komercjalizacji technologii addytywnych w lotnictwie. Kluczowym przykładem innowacyjności Boeinga było wytworzenie metalowej anteny satelitarnej do komunikacji lotniczej, której produkcja z zastosowaniem druku 3D pozwoliła na zmniejszenie liczby elementów składowych o 57% oraz redukcję kosztów produkcji o 90%. Antena ta została zainstalowana na satelicie AMOS-17, wystrzelonym w 2019 roku na orbitę przez raketę Falcon 9 firmy SpaceX. Zastosowanie technologii przyrostowych przez NASA, Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) oraz SpaceX do produkcji kluczowych komponentów, takich jak zapalniki, wtryskiwacze oraz komory spalania silników raketowych, potwierdza strategiczną rolę druku 3D w innowacjach kosmicznych [48]. Drukowane części umożliwiają nie tylko zwiększenie efektywności produkcji, ale również optymalizację strukturalną i funkcjonalną, co ma szczególne znaczenie w kontekście eksploracji kosmosu, gdzie każdy gram masy oraz wytrzymałość komponentów odgrywają kluczową rolę w sukcesie misji. W rezultacie, technologie przyrostowe w lotnictwie i przemyśle kosmicznym odgrywają coraz większą rolę w obniżaniu kosztów, zwiększaniu efektywności produkcji oraz wprowadzaniu innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych. Połączenie możliwości AM z zaawansowanymi materiałami, takimi jak tytan, sprawia, że druk 3D staje się nieodzownym narzędziem w produkcji zarówno komponentów prototypowych, jak i finalnych, wnosząc tym samym istotne zmiany w całej branży [48]. Przykładowo firma Relativity Space w 95 % wydrukowała silnik raketowy



zmniejszając tym sposobem liczbę elementów z prawie 100 tysięcy do niecałych 100. Innym przykładem redukcji wagi dzięki technice druku 3D (o 95 %), rozmiaru (o 80 %) oraz ilości komponentów (ze 100 do 1) jest aluminiowa mikroantena firmy Optisys. Technologie addytywne (AM) znalazły szerokie zastosowanie w szpitalach oraz w przemyśle urządzeń medycznych. Wykorzystuje się je do tworzenia trójwymiarowych modeli anatomicznych, implantów, szablonów chirurgicznych oraz do wielu innych, wysoko wyspecjalizowanych zastosowań. Główną zaletą tych technologii jest możliwość produkcji spersonalizowanych, skomplikowanych elementów, które byłyby trudne lub niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami. Dzięki możliwości wytwarzania struktur o wysokiej złożoności, technologie przyrostowe pozwalają na znaczną personalizację produktów medycznych, co przekłada się na lepsze dopasowanie do indywidualnych potrzeb pacjentów. Jednym z pierwszych sektorów medycznych, które przyjęły technologie AM, była chirurgia. W tej dziedzinie, naprawa kości oraz wymiana stawów wymagają zastosowania skomplikowanych, anatomicznie dokładnych struktur, które trudno jest wytworzyć tradycyjnymi metodami. Dzięki zastosowaniu technologii addytywnych możliwe stało się wytwarzanie modeli anatomicznych w skali 1:1, co umożliwiłoby chirurgom dokładne zaplanowanie zabiegów, a także wspiera ich podczas operacji. Modele te są szczególnie użyteczne w złożonych przypadkach klinicznych, w których precyzyjne odzwierciedlenie struktury pacjenta jest kluczowe dla powodzenia procedury [48, 50]. Drukowane implanty znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach medycyny, w tym w chirurgii neurologicznej, rekonstrukcyjnej, plastycznej, szczękowo-twarzowej oraz w ortopedii. Przykładem może być produkcja implantów kranioplastyki, które są indywidualnie dopasowane do potrzeb pacjenta, co pozwala na szybsze i bardziej precyzyjne leczenie [50]. Dodatkowo, technologie addytywne umożliwiają wytwarzanie szablonów chirurgicznych, które pomagają w precyzyjnym prowadzeniu narzędzi podczas operacji, zwiększając tym samym skuteczność i bezpieczeństwo zabiegów. Jednym z kluczowych sektorów, w którym technologie AM odgrywają znaczącą rolę, jest stomatologia [50]. Branża ta cechuje się wysokim zapotrzebowaniem na małe, złożone, a jednocześnie kosztowne produkty, co sprawia, że druk 3D idealnie wpasowuje się w potrzeby tego rynku. Ważnym aspektem zastosowania technologii addytywnych w stomatologii jest możliwość generowania danych 3D na podstawie skanowania form dentystycznych, wewnętrznych skanów jamy ustnej oraz radiologicznych obrazów anatomii szczęki pacjenta. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne wytwarzanie protez, koron, mostków, jak również innych specjalistycznych elementów dentystycznych. Metale, takie jak kobalt-chrom, odgrywają kluczową rolę w produkcji



stomatologicznej za pomocą technologii AM. Kobalt-chrom jest preferowanym materiałem ze względu na swoją wytrzymałość, odporność na korozję oraz biokompatybilność. Jest on szeroko stosowany w produkcji koron, mostków i innych protez stomatologicznych. Z kolei tytan, dzięki swojej lekkości i biokompatybilności, znajduje zastosowanie w wytwarzaniu implantów stomatologicznych oraz struktur wspierających rekonstrukcje szczękowo-twarzowe. W ostatnich latach obserwuje się rosnący trend zastępowania metali ceramicznymi materiałami, które są wykorzystywane do produkcji koron. Ceramika oferuje wyższą estetykę i biokompatybilność, jednak nadal jest droższym rozwiązaniem w porównaniu do metali. Oprócz kobalt-chromu i tytanu, w stomatologii stosuje się również inne materiały, takie jak cyrkonie, fosforan trójwapniowy, hydroksyapatyt, woski, żywice oraz wiele nowych materiałów dedykowanych tej branży. Wielość tych materiałów daje dentystom i technikom stomatologicznym większą elastyczność i precyzję w procesie produkcji. Większość urządzeń addytywnych stosowanych w stomatologii znajduje się w dużych laboratoriach dentystycznych lub centrach usługowych, które realizują zlecenia dla praktyk stomatologicznych. Warto podkreślić, że jednym z największych sukcesów technologii AM w stomatologii jest produkcja nakładek ortodontycznych. Są one wytwarzane poprzez termoformowanie cienkich plastikowych arkuszy na wcześniej wydrukowanych wzorach 3D, co pozwala na precyzyjne dopasowanie do potrzeb pacjenta i znacząco obniża koszty leczenia. Przemysł energetyczny, obejmujący wytwarzanie i przesył energii z naturalnych źródeł, takich jak ropa naftowa, gaz ziemny, wiatr, słońce oraz inne odnawialne i nieodnawialne zasoby, coraz intensywniej wdraża technologie przyrostowe (AM). Technologie te umożliwiają produkcję złożonych i wysoce wyspecjalizowanych komponentów, które są kluczowe dla optymalizacji procesów w tej branży [48–50]. Przykładem może być duńska firma Vestas, lider w produkcji turbin wiatrowych, która wykorzystuje technologie addytywne do wytwarzania łopatek o długości do 67 metrów. Wprowadzenie AM w przemyśle wiatrowym pozwala na tworzenie lżejszych, a jednocześnie bardziej wytrzymałych komponentów, co bezpośrednio wpływa na wydajność i żywotność turbin wiatrowych. W sektorze naftowo-gazowym technologie addytywne są stosowane głównie w produkcji tańszych części zamiennych o dłuższej trwałości, co skraca czas konserwacji oraz napraw, a także zmniejsza koszty operacyjne. Zastosowanie AM w tej branży nie ogranicza się wyłącznie do wytwarzania nowych części, ale obejmuje także regenerację i naprawę już istniejących komponentów. Dzięki możliwości produkcji małoseryjnej oraz tworzenia części dostosowanych do indywidualnych potrzeb klienta, technologie przyrostowe przyczyniają się do poprawy elastyczności i wydajności procesów

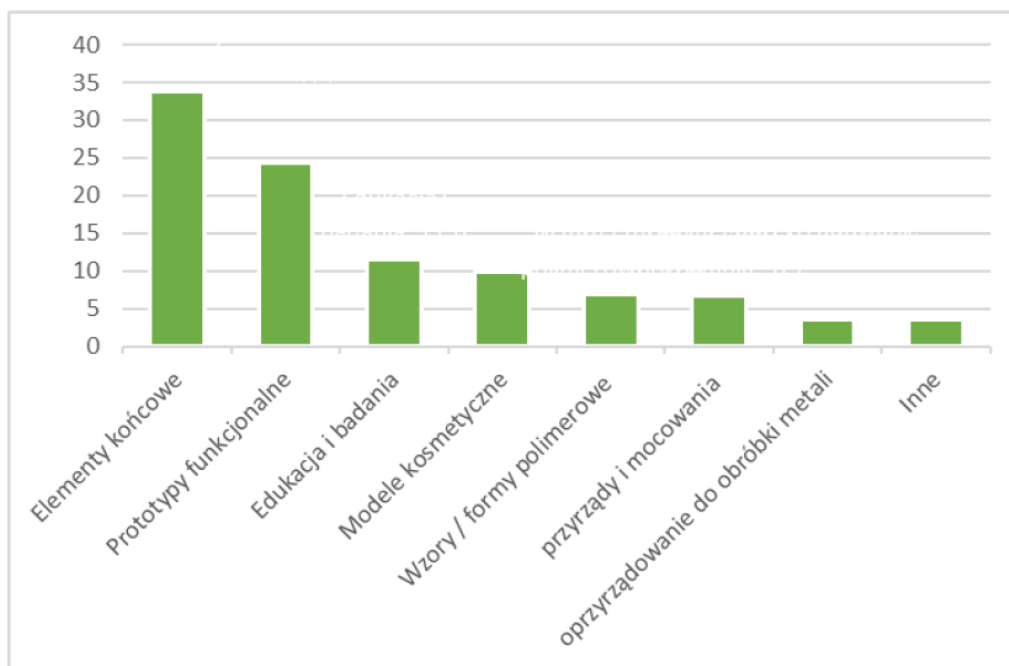


produkcyjnych w całym sektorze energetycznym. Rządy na całym świecie, a także jednostki wojskowe, aktywnie inwestują w badania, edukację i infrastrukturę związaną z rozwojem technologii AM [56-62]. W sektorze wojskowym technologia przyrostowa jest wykorzystywana do produkcji kluczowych komponentów, takich jak elementy myśliwców czy tłumiki do broni. AM pozwala również na tworzenie zaawansowanych struktur, jak np. osłony do ukrywania pojazdów wojskowych, które zostały wydrukowane przez armię amerykańską. Dzięki tym innowacjom wojsko zyskuje możliwość szybkiego dostosowywania się do zmieniających się wymogów pola walki, a także obniżenia kosztów produkcji i utrzymania sprzętu. Jednym z głównych atutów technologii przyrostowych jest eliminacja konieczności stosowania drogich narzędzi, takich jak formy i matryce, co znacząco obniża koszty produkcji. Ponadto AM umożliwia produkcję wysoce złożonych elementów, które wytwarzane metodami tradycyjnymi wymagałyby skomplikowanych procesów montażowych [62,63]. Technologie te pozwalają na skonsolidowanie wielu części w jeden komponent, co dodatkowo zmniejsza złożoność procesu produkcyjnego i upraszcza łańcuch dostaw. W przypadku produkcji elementów końcowych, technologie addytywne oferują możliwość produkcji małych serii komponentów o wysokiej wartości, takich jak elementy lotnicze, części do maszyn medycznych, implanty, oraz elementy dla przemysłu motoryzacyjnego. Metale stosowane w druku 3D, takie jak tytan czy stopy aluminium, coraz częściej zastępują tradycyjne metody produkcji, takie jak odlewanie, ponieważ oferują porównywalne, a nawet lepsze właściwości mechaniczne i fizyczne. AM przynosi również korzyści ekologiczne, ponieważ pozwala na redukcję ilości zużywanego materiału, a tym samym zmniejszenie ilości odpadów produkcyjnych. Zastosowanie technologii addytywnych szczególnie dobrze sprawdza się w produkcji małoseryjnej, gdzie istotne są precyzja, personalizacja i złożoność projektów. To czyni je idealnym rozwiązaniem dla przemysłu lotniczego, medycznego, energetycznego oraz motoryzacyjnego, gdzie wydajność i precyzja są kluczowe dla sukcesu produkcji. W miarę jak technologia druku 3D będzie się rozwijać, można oczekiwać, że stanie się ona powszechniejszym narzędziem produkcji seryjnej, a jej rola w zmniejszaniu kosztów oraz upraszczaniu procesów produkcyjnych będzie rosła [62-78].

Technologie przyrostowe (AM) znajdują szerokie zastosowanie w produkcji produktów końcowych w różnych sektorach konsumenckich. Przykłady takich zastosowań obejmują produkcję biżuterii, dzieł sztuki, oświetlenia, okularów, obuwia, a także wyposażenia domowego i biurowego oraz innych akcesoriów osobistych. Rosnące zainteresowanie tymi technologiami wynika z możliwości tworzenia wysoce spersonalizowanych, unikalnych produktów o skomplikowanych strukturach, które trudno osiągnąć za pomocą tradycyjnych



metod produkcji. Personalizacja oraz złożoność, jaką oferuje druk 3D, stają się kluczowymi czynnikami wpływającymi na rozwój rynku produktów konsumenckich w sektorze AM. Prognozy rynkowe wskazują, że segment druku 3D z zastosowaniem metali będzie notował umiarkowany do wysokiego wzrost w średnioterminowej przyszłości. Oczekuje się, że rozwój ten będzie napędzany głównie przez rosnące wykorzystanie technologii addytywnych w krajach rozwijających się, które dostrzegają potencjał druku 3D do zwiększenia efektywności produkcji i poprawy jakości produktów. Jednocześnie postęp technologiczny i wprowadzenie nowych materiałów oraz produktów na rynek stanowią istotne czynniki wspierające wzrost sektora. Warto zauważyć, że technologie AM, zwłaszcza w zakresie druku z metali, umożliwiają produkcję komponentów o wysokiej wytrzymałości i precyzji, co sprawia, że znajdują one zastosowanie w wielu branżach przemysłowych [79-80]. Ich rosnąca popularność na rynkach konsumenckich jest również związana z możliwością szybkiej adaptacji do indywidualnych potrzeb klientów, co staje się coraz ważniejsze w zglobalizowanej gospodarce [81-86]. Na rysunku 14, według raportu Wohlers [43], przedstawiono najczęściej stosowane formy wykorzystania technologii druku 3D. Raport ten pokazuje, że druk 3D jest szczególnie popularny w obszarach takich jak produkcja prototypów, narzędzi i części zamiennych, co podkreśla jego znaczenie w elastyczności i szybkości dostosowywania produkcji do zmieniających się wymagań rynkowych [81-90]. Oczekuje się, że dalsze badania i rozwój technologii addytywnych w nadchodzących latach będą wspierać ich szersze zastosowanie zarówno w sektorze konsumenckim, jak i przemysłowym, przyczyniając się do bardziej zrównoważonej i innowacyjnej produkcji [43-49].



Rysunek 14. Najczęstsze zastosowanie produktów wytwarzanych technikami druku 3D [43]

Rynek technologii przyrostowych (AM) rozwija się dynamicznie, głównie ze względu na zdolność do znaczącej redukcji kosztów, które są w dużej mierze zależne od czasu poświęconego na prototypowanie oraz fazę testów i badań. Przykładem może być proces wytwarzania form wtryskowych, które są kluczowe w produkcji małoseryjnej. Tradycyjne metody tworzenia takich form mogą zająć nawet kilka miesięcy, a sam proces wymaga zastosowania zaawansowanych maszyn, takich jak obrabiarki sterowane numerycznie (CNC), oraz wysoko wykwalifikowanej kadry inżynierskiej. Technologie przyrostowe, zwłaszcza druk 3D, oferują znaczne usprawnienia w tym zakresie, umożliwiając skrócenie czasu produkcji formy i eliminację problemów związanych z jej skomplikowaną geometrią. Dzięki drukowi 3D, forma może zostać wytworzona w znacznie krótszym czasie, a półprodukt uzyskany z drukarki 3D może mieć kształt bardzo zbliżony do końcowego wyrobu, co dodatkowo przyspiesza proces produkcji. W rezultacie, technologia ta umożliwia oszczędność czasu oraz redukcję kosztów związanych z wprowadzeniem nowych produktów na rynek. Co więcej, technologia ta oferuje elastyczność w projektowaniu form o skomplikowanej budowie, co jest często wyzwaniem dla tradycyjnych metod wytwarzania. Eliminacja konieczności stosowania kosztownych narzędzi, takich jak formy i matryce, stanowi dodatkową zaletę technologii AM. Tym samym, druk 3D znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle, gdzie szybkość wprowadzania innowacji oraz efektywność kosztowa mają kluczowe znaczenie [43-50].



Przyszłość branży technologii przyrostowych (AM) będzie kształtowana przez szereg kluczowych czynników, takich jak wzrost produkcji seryjnej, personalizację produktów, automatyzację procesów, optymalizację cyklu pracy oraz rozwój kompleksowych rozwiązań. Systemy druku 3D będą się rozwijać, ponieważ coraz więcej przedsiębiorstw oraz sektorów przemysłu przyjmuje technologie przyrostowe do realizacji małych i średnich serii produkcyjnych. Sektory, które najwięcej przyczynią się do tego wzrostu, obejmują przemysł lotniczy, opiekę zdrowotną, produkcję na indywidualne zamówienie, branżę motoryzacyjną oraz energetykę. Firmy zwiększą swoją produkcję z zastosowaniem technologii AM, w miarę poprawy dostępności urządzeń, materiałów oraz oprogramowania. Dodatkowo, decydenci oraz kadra zarządzająca w przedsiębiorstwach odgrywają kluczową rolę w promowaniu i wdrażaniu technologii przyrostowych. Wśród interesariuszy rośnie świadomość oraz zrozumienie zalet i ograniczeń związanych z tymi technologiami. Wiele firm dostrzega wartość, jaką niesie ze sobą produkcja spersonalizowanych wyrobów oraz produktów wytwarzanych na indywidualne zamówienie. W miarę jak technologia AM staje się coraz bardziej powszechna, jej integracja w procesach produkcyjnych może prowadzić do znacznych innowacji i konkurencyjności na rynku. Klienci wykazują gotowość do poniesienia wyższych kosztów za produkty dostosowane specjalnie do ich potrzeb, nawet w przypadku subtelnych różnic w personalizacji. Przykłady takich produktów obejmują okulary, obuwie, aparaty słuchowe oraz biżuterię, które posiadają zbliżoną formę, a różnice wynikają z indywidualnych preferencji klientów. Rosnący katalog produktów dostępnych na zamówienie indywidualne potwierdza obiecujący potencjał technologii przyrostowych. W kontekście wzrostu i dojrzałości technologii AM, standardy przemysłowe odgrywają kluczową rolę, stając się coraz bardziej istotne. Organizacje, takie jak ASTM International, podejmują działania na rzecz tworzenia standardów i wytycznych w różnych obszarach, obejmujących materiały, procesy, testowanie, projektowanie, dane, zastosowania, terminologię oraz aspekty środowiskowe, zdrowotne i bezpieczeństwa. Przez ostatnie 100 lat, wprowadzenie standardów miało pozytywny wpływ na różnorodne gałęzie przemysłu. Opracowanie i wdrażanie standardów dla technologii przyrostowych może przynieść podobne korzyści, umożliwiając ich rozwój na wyższych poziomach [51, 52].

W nadchodzących latach, zastosowania technologii AM obejmujące produkcję elektroniki, żywności, leków, żywej tkanki oraz budynków będą zyskiwać na znaczeniu. Jednocześnie, stosowanie AM w modelowaniu koncepcyjnym, prototypowaniu oraz wytwarzaniu oprzyrządowania – które stanowi fundament przemysłu AM – będzie nadal



ewoluować. Kluczowym elementem przygotowania przyszłych pokoleń będzie edukacja oraz szkolenia zawodowe, które umożliwią młodym ludziom i obecnym pracownikom dostosowanie się do nadchodzących zmian. Taka edukacja pozwoli na podejmowanie świadomych decyzji oraz wykorzystanie nabytych umiejętności w różnych organizacjach na całym świecie [43].

W przeszłości ograniczona dostępność materiałów wsadowych stanowiła istotną wadę technologii przyrostowych. Obecnie sytuacja ta uległa znaczącej poprawie, głównie dzięki rozwojowi innowacyjnych materiałów, w tym polimerów oraz surowców budowlanych. Zwiększona różnorodność materiałów umożliwia szersze zastosowanie technologii przyrostowych przez firmy w wielu dziedzinach. Na przykład, firma Sartomer, będąca częścią Arkema, nawiązała współpracę z firmą SIRRUS w celu rozwoju polimerów szybko utwardzalnych. Henkel współpracuje z Carbon nad wprowadzeniem na rynek fotopolimerów, w tym materiału pod nazwą własną Loctite. Ponadto, HP zaprezentowało proszek polipropylenowy wielokrotnego użytku od BASF oraz poliamid termoplastyczny od Evonik. Hexcel wprowadził przewodzący kompozyt termoplastyczny z włóknem węglowym oparty na PEKK, który charakteryzuje się wysoką wytrzymałością i właściwościami elektromagnetycznymi, co czyni go idealnym materiałem do zastosowań w przemyśle lotniczym i obronnym. Zainteresowanie technologiami przyrostowymi rośnie także w sektorze budowlanym. Korpus Piechoty Morskiej USA zaprezentował szybkie budownictwo schronów przy użyciu szybkoschnącego betonu. Thinking Huts, organizacja non-profit, rozpoczęła pilotażowy program budowy szkół na Madagaskarze. Quikrete dostarcza zaawansowany beton jako materiał wsadowy dla firmy Contour Crafting Corp. Uniwersytet w Nanjing w Chinach, gdzie prowadzone są badania nad nowymi materiałami budowlanymi, które umożliwią zwiększenie wydajności i niezawodności zastosowań w druku 3D. W dziedzinie metali, Equispheres opracowuje specjalistyczne proszki do procesów PBF i BJT, a firma Alloyed współpracuje z Taniobis, aby rozwijać proszki tytanowe oraz metale ogniotrwałe [87-95]. Desktop Metal prowadzi prace nad węglkami metali bez kobaltu, z wykorzystaniem węgla wolframu, co zwiększa sztywność i gęstość części produkowanych technologią AM. Zastosowanie technologii druku 3D z wieloma materiałami stwarza nowe możliwości. Na przykład, belgijski start-up Aerosint zaprezentował druk ze stali nierdzewnej 316L połączonej ze stopem miedź-chrom-cyrkon. Uznawane jest to za przełomowy moment w przemyśle technologii przyrostowych, który otwiera nowe kierunki dla zastosowań materiałowych i procesów produkcyjnych. Współprace między firmami, takimi jak Orbital



Composites i Państwowym Laboratorium Oak Ridge, mają na celu opracowanie rozwiązań technologicznych w dziedzinie robotyki oraz druku 3D z kompozytów z włóknem ciągłym, co ma na celu produkcję dużych elementów o wysokich właściwościach wytrzymałościowych dla przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego i energetycznego. W sektorze motoryzacyjnym i lotniczym technologie przyrostowe zyskały na znaczeniu, a ich zastosowanie w produkcji modeli, prototypów i części mniej istotnych, takich jak systemy wentylacyjne, ewoluowało w kierunku produkcji części konstrukcyjnych. W 2020 roku General Motors otworzył centrum technologiczne w Warren w Michigan, o powierzchni 1394 m² dedykowane technologiom AM, a pierwszymi wyprodukowanymi tam częściami były uchwyty wiązki elektrycznej oraz kanały HVAC dla modeli Cadillaca CT4-V i CT5-V Blackwing. GM (największy producent samochodów w USA), planuje wprowadzenie 30 nowych pojazdów elektrycznych do 2025 roku oraz zakończenie produkcji silników spalinowych do 2035 roku. Porsche produkuje fotele kubełkowe do wyścigowych wersji swoich samochodów oraz testuje aluminiowe tłoki produkowane technologią przyrostową (AM) dla modeli 911 GT2 RS. Zastosowanie tej technologii pozwala na zmniejszenie wagi o 10% i zwiększenie mocy silnika. Wysoka cena oraz ograniczona produkcja samochodów luksusowych wspierają wdrażanie technologii przyrostowych. Współpraca Porsche z firmami Mahle, Trumpf i Zeiss przy produkcji tłoków aluminiowych stanowi przykład integracji technologii przyrostowych w zaawansowanych rozwiązaniach motoryzacyjnych. Ponadto, APWorks produkuje tytanowe rury wydechowe dla Bugatti Chiron Pur Sport, a Lamborghini korzysta z drukarek 3D firmy Carbon do produkcji desek rozdzielczych do modelu Sian Roadster. Wysoka cena oraz ograniczona liczba produkowanych samochodów luksusowych sprzyjają wdrażaniu technologii przyrostowych w branży motoryzacyjnej. Niemiecki Minister Edukacji i Badań Naukowych zainicjował projekt Polyline, o wartości 11,6 miliona dolarów, mający na celu stworzenie linii produkcyjnej, która wykorzysta druk 3D w motoryzacji. W skład konsorcjum projektowego wchodzi 15 niemieckich partnerów z branży technologii przyrostowych, którzy pracują nad opracowaniem standardów oraz poprawą automatyzacji procesów produkcyjnych. Silnik GE9X, opracowany przez GE Aviation, uzyskał certyfikat Federalnej Administracji Lotnictwa w październiku 2020 roku. Kluczowe elementy tego silnika są produkowane z wykorzystaniem systemów PBF (Powder Bed Fusion) do druku metali, firmy GE. Części te, takie jak pokrywy, osłony i uchwyty, znajdują zastosowanie w samolotach pasażerskich, a ich zmniejszona masa może znacząco wpłynąć na koszty eksploatacji w trakcie całego cyklu życia samolotu. Zastosowanie technologii AM (Additive Manufacturing) w produkcji łodzi morskich oraz oceanicznych było przedmiotem rozważań przez wiele lat, a ostatnio wzrosło



zainteresowanie tym obszarem. W Hamburgu, Niemcy, utworzono MN3D Sieć Druku 3D dla Przemysłu Morskiego, która skupia wiele firm prywatnych, centrów badawczo-rozwojowych oraz uczelni, a jej celem jest rozwój technologii AM poprzez badania i rozwój. Thyssenkrupp zrealizowało wspólne przedsięwzięcie z Wilhelmsen, głównym dostawcą części zamiennych oraz usług dla sektora morskiego. Wartość rynku części zamiennych w tym sektorze wynosi 13 miliardów dolarów, przy czym 50% statków eksploatowanych na rynku ma ponad 15 lat, co generuje znaczące zapotrzebowanie na części zamienne. Firma Naval Group, europejski lider w dziedzinie obrony morskiej, otrzymała certyfikację od Bureau Veritas, francuskiej firmy zajmującej się testowaniem i certyfikowaniem produktów, dla wyprodukowanej przez siebie śruby napędowej. Śruba ta, składająca się z pięciu łopatek, waży 200 kg i ma rozpiętość 2,5 m, co czyni ją największą śrubą kiedykolwiek wyprodukowaną z zastosowaniem technologii AM z wykorzystaniem metalu. W lutym 2021 roku śruba ta została zainstalowana na statku wojskowym [96-101].



5. Teza, cel i zakres pracy

Już teraz dostępne druty proszkowe, w porównaniu do drutów litych o tym samym składzie chemicznym, umożliwiają nieznaczne zmniejszenie parametrów prądowych w procesie spawania. Dzięki temu można uzyskać lepsze wykończenie powierzchni spoin, pozbawione typowych wad i defektów, takich jak porowatość czy niejednorodność strukturalna. Niemniej jednak produkcja drutów proszkowych wiąże się z istotnymi ograniczeniami, z których najważniejsza jest higroskopijność proszków metalicznych. Wchłanianie wilgoci przez materiały proszkowe prowadzi do ich aglomeracji, co negatywnie wpływa na właściwości spawalnicze oraz może skutkować obniżeniem jakości uzyskiwanych spoin.

W kontekście pracy doktorskiej, postawiony cel wprowadzenia innowacyjnych drutów multiwłóknistych stanowi istotny krok naprzód w porównaniu do tradycyjnych drutów proszkowych. Druty te, charakteryzujące się złożoną budową multimetalową, mają potencjał do oferowania znacząco lepszych właściwości. Oczekuje się, że druty multiwłókniste będą wykazywały wyższą wydajność procesu spawania, szybsze stapianie oraz znacznie łatwiejszą kontrolę nad parametrami spawania. Takie właściwości mogą zredukować czas potrzebny na przetwarzanie materiałów, co jest kluczowe w kontekście zwiększania efektywności produkcji.

Dodatkowo, dzięki zróżnicowanej budowie włóknistej, możliwe jest optymalizowanie składu chemicznego poszczególnych włókien, co pozwoli na uzyskanie pożądaných właściwości mechanicznych i fizykalnych. Takie podejście może otworzyć nowe możliwości zastosowań drutów w skomplikowanych procesach spawania, zapewniając jednocześnie wyższą jakość i trwałość uzyskiwanych spoin. Prace badawcze w tym zakresie mają na celu nie tylko poprawę parametrów spawalniczych, ale również zwiększenie uniwersalności zastosowań drutów w różnych dziedzinach przemysłu, takich jak motoryzacja, lotnictwo czy budownictwo.

Opracowana technologia wytwarzania multiwłóknistych drutów spawalniczych ma na celu uzyskanie materiałów o właściwościach przewyższających te dostępne w obecnych rozwiązaniach komercyjnych. Przede wszystkim, druty te będą charakteryzować się wyższymi własnościami mechanicznymi, co jest wynikiem zastosowania innowacyjnych metod produkcji oraz złożonej budowie multimetalowej.



Kluczowym aspektem tej technologii jest zapewnienie jednorodności materiału oraz jego izotropowości mechanicznej. Dzięki równomiernemu rozkładowi składników w budowie multiwłóknistej, druty będą wykazywać stabilne właściwości niezależnie od kierunku obciążenia. Dodatkowo, optymalizacja liniowej sprężystości w określonym zakresie wytrzymałości pozwoli na zastosowanie tych drutów w bardziej wymagających warunkach operacyjnych, co zwiększy ich użyteczność w różnych sektorach przemysłu.

W efekcie, nowopowstały materiał uzyska potencjał, aby stać się konkurencyjny wobec tradycyjnych rozwiązań spawalniczych, w tym drutów litych i proszkowych. Jego zastosowanie w procesach spawania może przyczynić się do poprawy efektywności produkcji, jakości uzyskiwanych spoin oraz zmniejszenia kosztów związanych z obróbką materiałów. W związku z tym, prace nad opracowaniem i wdrożeniem tej technologii mają istotne znaczenie nie tylko dla rozwoju naukowego, ale również dla przemysłu, w którym innowacyjne materiały odgrywają kluczową rolę w podnoszeniu standardów jakości i wydajności produkcji.

Dobór materiałów CuAl, CuNi oraz CuAlNi do badań jest uzasadniony ze względu na ich unikalne właściwości fizykochemiczne i mechaniczne, które czynią je atrakcyjnymi do zastosowań w nowoczesnych technologiach przyrostowych oraz spawalniczych, takich jak Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Stopy te charakteryzują się wysoką odpornością na korozję oraz ścieranie, a także wytrzymałością mechaniczną w trudnych warunkach eksploatacyjnych, co czyni je odpowiednimi do zastosowań w przemyśle energetycznym, morskim i lotniczym.

Stopy miedzi z aluminium (CuAl) i miedzi z niklem (CuNi) są powszechnie stosowane w środowiskach o podwyższonej agresywności chemicznej, gdzie ich zdolność do opierania się korozji stanowi kluczową zaletę. Dodatkowo, połączenie aluminium i niklu w stopach CuAlNi wprowadza korzystne właściwości obu pierwiastków, co skutkuje zwiększoną twardością i stabilnością w wysokich temperaturach. Takie cechy są niezbędne w przypadku elementów poddawanych dużym obciążeniom mechanicznym oraz eksploatacji w ekstremalnych warunkach.

Badania nad tymi materiałami odpowiadają na rosnące potrzeby przemysłu, w którym wymaga się materiałów o długiej żywotności, wysokiej wytrzymałości oraz odporności na niekorzystne warunki środowiskowe. Wybór tych stopów do badań jest więc w pełni uzasadniony, ponieważ pozwala na poszerzenie wiedzy o ich potencjale w nowych

technologiach produkcyjnych, a także na ocenę ich przydatności w aplikacjach, gdzie wysoka jakość napoin oraz stabilność mechaniczna mają kluczowe znaczenie.

Teza pracy doktorskiej:

„Zastosowanie multiwłóknistych drutów spawalniczych CuAl i CuAlNi do łukowego napawania przyrostowego 3D przyczyni się do poprawy właściwości mechanicznych i technologicznych modeli (wyrobów) poprzez zwiększenie stabilności jarzenia łuku elektrycznego, co skutkuje ograniczeniem wad i niezgodności napoin zwiększając ich jakość.”

Głównym celem pracy doktorskiej jest opracowanie technologii wytwarzania nowego typu materiału dodatkowego do spawania w postaci multiwłóknistego drutu spawalniczego.

Autor zakłada, że opanowanie technologii produkcji tego typu drutów przyczyni się do elastycznego doboru składu chemicznego i łatwego wytwarzania drutów do określonych zastosowań. Zastosowanie drutów multiwłóknistych będzie efektywne, jeżeli właściwości napoin wykonanych metodami przyrostowymi 3D będą nie gorsze niż dla obecnie stosowanych drutów litych lub proszkowych. Udowodnienie dobrych właściwości mechanicznych i technologicznych napoin wykonanych drutami multiwłóknistymi jest kolejnym celem podjętych badań.

6. Materiał i metodyka badań

Przyjęta metodyka badawcza obejmowała prace technologiczne przeprowadzone z wykorzystaniem linii technologicznej do produkcji drutów, dostępnej w Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych (IMN). Linia ta składała się z ciągarek ławowych, ciągarek bębnowych, zaostzerek do drutów, zgrzewarek doczołowych oraz urządzeń do czyszczenia i aktywacji powierzchni drutów. W ramach badań wytworzono druty o oznaczeniach: CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10. Dodatkowo analizie poddano materiał komercyjny, dostępny w hurtowni spawalniczej, oznaczony jako CuAl8 MigWeld.

Pierwszy etap badań, po wytworzeniu drutów, obejmował analizę chemiczną z zastosowaniem metody elektrogravimetrycznej, umożliwiającej precyzyjne określenie zawartości poszczególnych pierwiastków w próbkach, wyrażonej jako procent masy (% mas). Metodę elektrogravimetryczną wybrano ze względu na jej wysoką precyzję oraz niezawodność w analizie metali, co było kluczowe w kontekście weryfikacji równomierności rozkładu pierwiastków, takich jak aluminium (Al) i nikiel (Ni), w badanych kompozytach multimetalowych.

Kolejnym etapem badań było poddanie wytworzonych materiałów włóknistych próbom spawalniczym z wykorzystaniem metody TIG. Technika ta umożliwiła zastosowanie pilotażowych ilości nowo opracowanych materiałów, a ręczne podawanie materiału pozwoliło na wykorzystanie krótkich odcinków drutu. Po testach manualnych przeprowadzono serię prób przy użyciu drukarki 3D firmy Gefertec. Opracowano założenia technologiczne procesu napawania w trybie automatycznym, wykorzystując metodę Cold Metal Transfer (CMT). Na blachę stalową gatunku X12Cr13, o składzie chemicznym (C: 0,08–0,15%, Mn: maks. 1,5%, Cr: 11,5–13,5%, Ni: maks. 0,75%), napawano wielowarstwowe ścieżki, nakładane jedna na drugą. Wytworzone napoiny zostały poddane procesom cięcia, szlifowania, polerowania oraz trawienia w celu uwidocznienia ich struktury do obserwacji mikroskopowych. Szlifowanie przeprowadzono przy użyciu papierów wodnych SiC o gradacjach 220, 320, 500, 800, 1500, 2500, a następnie polerowano z wykorzystaniem syntetycznego sukna polerskiego, zwilżonego zawiesiną diamentową o gradacjach 6 μm i 3 μm . Obserwacje makroskopowe oraz mikroskopowe wykonano przy powiększeniach 50x oraz 200x. Kolejnym etapem była analiza z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), połączona z analizami punktowymi oraz mappingiem rozkładu pierwiastków w mikroobszarach.

Następnie przeprowadzono badania twardości na przekroju poprzecznym próbek. Pomiar wykonano na wyszlifowanej powierzchni próbek metodą Vickersa przy zastosowaniu obciążenia 98,07 N. W dalszej części badań poddano próbki, próbie ściskania z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Przygotowano po trzy próbki w kształcie walca z każdego rodzaju materiału, o stosunku średnicy do wysokości (d/h) wynoszącym 1:1. Wymiary próbek różniły się w zależności od grubości uzyskanych napoin. Wyznaczono umowną granicę plastyczności, procentowe skrócenie oraz naprężenie ściskające odpowiadające pierwszym trwałym deformacjom próbek, takim jak formowanie się kształtu „beczki” lub pojawienie się rys na powierzchni.

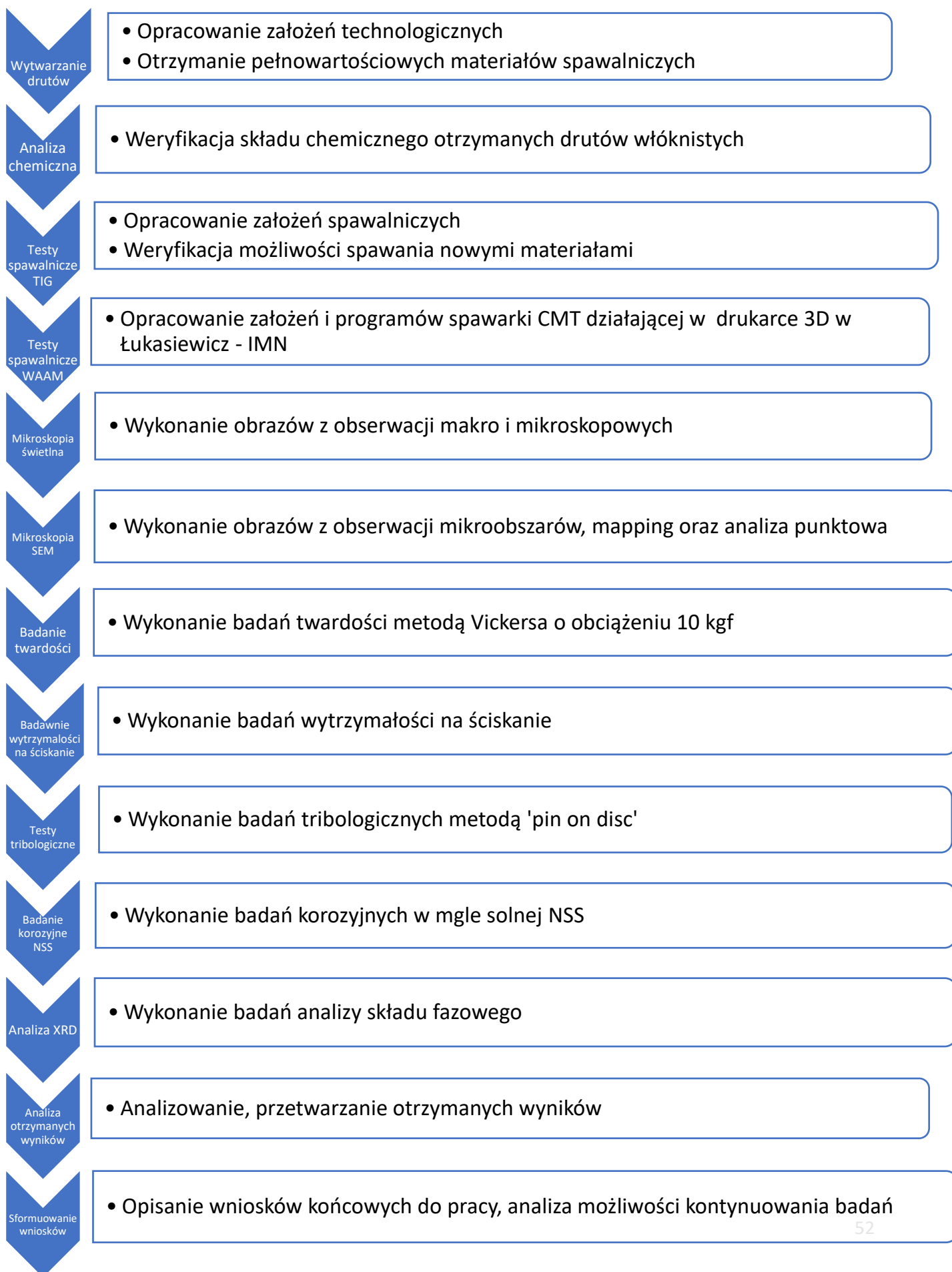
Kolejnym etapem było przygotowanie próbek frezowanych z wytworzonych ścianek metodami TIG oraz WAAM. Na powierzchni bocznej próbek przeprowadzono badania tribologiczne metodą „pin-on-disc”. W ramach testów analizowano materiały CuAl8 MigWeld, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10 po procesie TIG, jak również warianty materiałów CuAl12 i CuAl10Ni10 po druku metodą WAAM.

Na wyciętych fragmentach próbek przeprowadzono badania korozyjne w warunkach mgły solnej (NSS) na próbkach wytworzonych z multidrutów oraz drutu komercyjnego, zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06. Próbki dokładnie ważono przed instalacją w komorze solnej, a po zakończeniu poszczególnych etapów próby wyjmowano je z komory, dokładnie myto, suszono i ponownie ważono w celu określenia ubytku lub przyrostu masy.

Ostatnim etapem badań była analiza rentgenowskiej dyfrakcji proszkowej (XRD), oparta na obrazach dyfrakcyjnych, mająca na celu identyfikację składu fazowego badanych próbek CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM. Próbki zostały podzielone na trzy obszary analizy: lico napoiny, środek oraz spód, podobnie jak w przypadku próbek badanych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Analizę jakościową składu fazowego przeprowadzono na podstawie interpretacji dyfraktogramów uzyskanych przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego XRD7 firmy Seifert-FPM.



Plan badań



7. Wytwarzanie drutów multiwłóknistych

W celu opracowania technologii wytwarzania multimetalowych drutów o budowie multiwłóknistej, spełniających wymagania jakościowe stawiane materiałom spawalniczym, przeprowadzono szereg prób badawczych. Prace te obejmowały próby wytwarzania drutów wielowłóknistych typu CuAl i CuNi, wykorzystując w tym celu druty aluminiowe (Al) oraz druty niklowe (Ni). Proces polegał na przygotowaniu kompozytowych drutów płaszczowych oraz ich kilkukrotnym pakietowaniu w rurach miedzianych (Cu). W przypadku badanych konfiguracji wykonano dwu- i trzykrotne pakietowanie, a finalny kształt multidrutów przeznaczonych do testów spawalniczych uzyskiwano poprzez przeciąganie przygotowanych pakietów do średnicy $\varnothing 2,15$ mm.

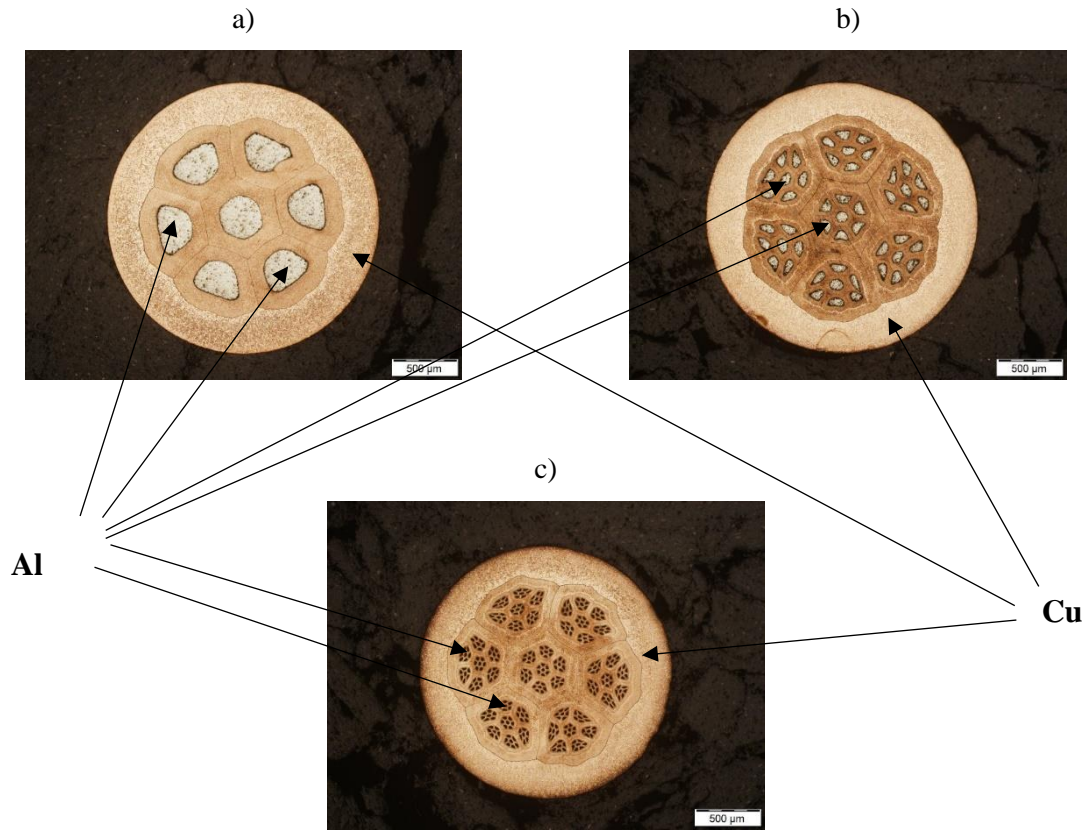
Etap I – przygotowanie drutów płaszczowych. Do rur miedzianych wprowadzano odpowiednio odcinki drutów aluminiowych o średnicy $\varnothing 3,15$ mm lub niklowych o średnicy zewnętrznej $\varnothing 6,0$ mm. Średnica rury miedzianej była uzależniona od zastosowanego materiału rdzenia – dla rdzeni aluminiowych średnica zewnętrzna rury wynosiła $\varnothing 6,9$ mm a grubość ścianki 1,8 mm natomiast dla rdzeni niklowych średnica zewnętrzna wynosiła $\varnothing 12,0$ mm a grubość ścianki 3 mm. Następnie przeprowadzano operację ciągnięcia, wykorzystując w tym celu ciągarke ławową. Ten etap był kluczowy dla uzyskania finalnych wymiarów i jakości drutów multimetalowych.

Etap II badań obejmował podział uzyskanych wcześniej drutów płaszczowych CuAl i CuNi na siedem równych odcinków, które następnie pakietowano do rury miedzianej o średnicy $\varnothing 9,0$ mm i grubości ścianki 1 mm. Tak przygotowane pakiety były poddawane procesowi ciągnięcia, co pozwalało na uzyskanie drutów o średnicy $\varnothing 2,15$ mm.

W etapie III zastosowano analogiczny schemat postępowania jak w etapie II – pakiety CuAl i CuNi podzielono na siedem równych odcinków, które ponownie pakietowano do rury miedzianej o średnicy $\varnothing 9,0$ mm i grubości ścianki 1 mm i poddawano ciągnięciu do średnicy $\varnothing 2,15$ mm.

Etap IV polegał na powtórzeniu działań z etapu III, jednak tym razem do rury miedzianej wprowadzano multidruty podwójnie pakietowane. Na rysunku 15 przedstawiono zdjęcia z poszczególnych etapów procesu pakietowania drutów aluminiowych w rurach miedzianych. Proces wytwarzania drutów z rdzeniem niklowym realizowano według analogicznego schematu technologicznego.

W wyniku przeprowadzonych prób, po trzykrotnym pakietowaniu uzyskano materiały charakteryzujące się zawartością 2% wagowo aluminium oraz 15% wagowo niklu (zawartość pierwiastków sprawdzona metodą elektrogravimetryczną).



Rysunek 15. Przekroje multidrutów po kolejnych pakietowaniach: CuAl

a) po pierwszym pakietowaniu, b) po drugim pakietowaniu

c) po trzecim etapie pakietowania.

Przeprowadzono drugą serię badań, której celem było wytworzenie drutów wielowłóknistych o podwyższonej zawartości aluminium (Al) powyżej 10% mas. w wariacie CuAl gdzie pakietowano pięć drutów aluminiowych o średnicy 2,15 mm do rury miedzianej (Cu) o średnicy $\varnothing 8,0$ mm i grubości ścianki 0,8 mm, z pominięciem etapu tworzenia drutu płaszczowego. Drugi wariant materiału o podwyższonej zawartości aluminium i niklu (Ni) powyżej 10% mas. w wariacie CuAlNi. W tym procesie zastosowano druty aluminiowe w ilości czterech sztuk o średnicy $\varnothing 2,15$ mm oraz drut niklowy w ilości jednej sztuki o średnicy $\varnothing 2,15$ mm, które pakietowano bezpośrednio do cienkościennej rury



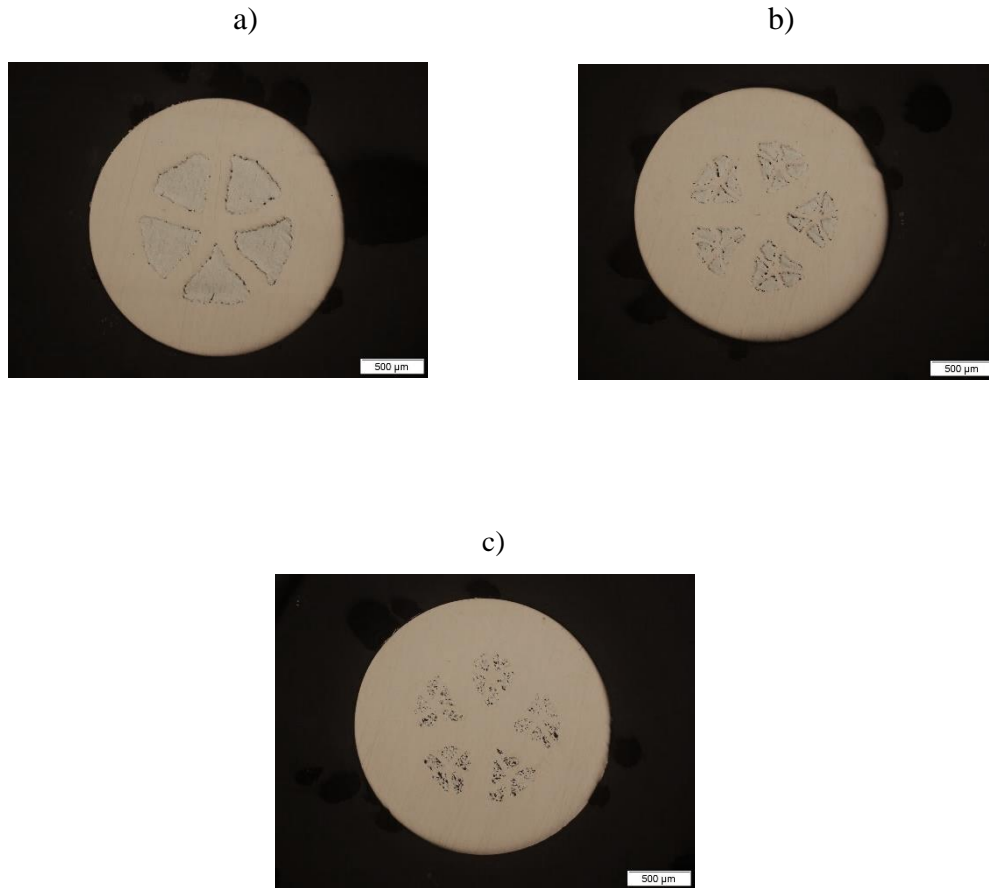
miedzianej (Cu) o średnicy $\varnothing 8,0$ mm i grubości ścianki 0,8 mm, z pominięciem etapu tworzenia drutu płaszczowego.

Tak przygotowane kompozyty poddano procesowi ciągnięcia, uzyskując średnicę $\varnothing 2,15$ mm. Następnie druty te dzielono na pięć równych odcinków, które poddawano kolejnemu pakietowaniu w rurze miedzianej o średnicy $\varnothing 8,0$ mm i grubości ścianki 0,8 mm. Końcową formę drutów multiwłóknistych uzyskano poprzez przeciąganie pakietów do średnicy $\varnothing 2,15$ mm, co pozwoliło na wytworzenie drutu o budowie multiwłóknistej. Otrzymane multidruty po kolejnych etapach pakietowania przedstawiono na rysunku 16.

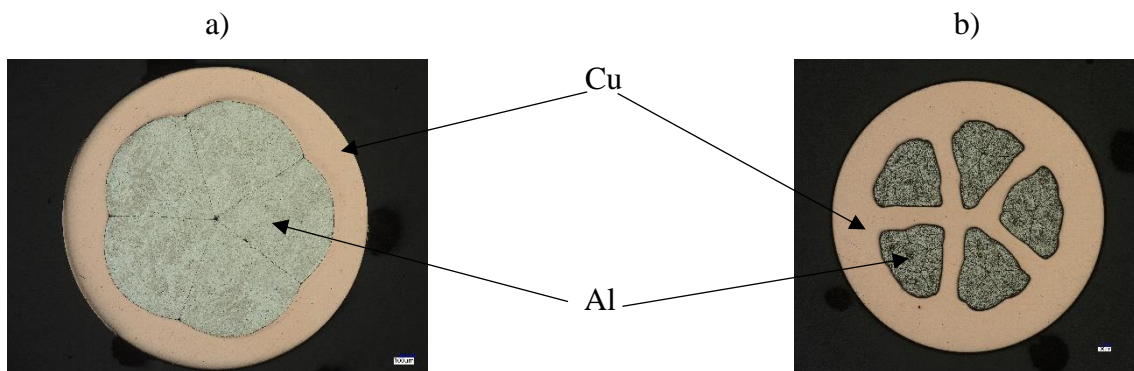
Etap A prac nad wytwarzaniem drutów multimetalowych CuAl oraz CuAlNi polegał na pakietowaniu pięciu odcinków drutów. W przypadku wariantu CuAl zastosowano pięć odcinków drutu aluminiowego (Al) o średnicy $\varnothing 2,15$ mm, natomiast dla wariantu CuAlNi wprowadzono cztery odcinki drutu aluminiowego oraz jeden odcinek drutu niklowego (Ni) o tej samej średnicy. Pakiety te umieszczano w rurze miedzianej o średnicy $\varnothing 8,0$ mm. Następnie przeprowadzano operację ciągnięcia przy użyciu ciągarci ławowej, co pozwalało na uzyskanie wymaganych parametrów finalnych drutów, dla kolejnego etapu.

Etap B obejmował dalsze działania związane z przetwarzaniem uzyskanych w etapie I' drutów kompozytowych CuAl i CuAlNi. Druty te zostały podzielone na pięć równych odcinków, które następnie ponownie pakietowano do rury miedzianej o średnicy $\varnothing 8,0$ mm. W tak przygotowanych pakietach druty poddawano operacji ciągnięcia, uzyskując średnicę $\varnothing 2,15$ mm umożliwiając tym samym przeprowadzenie prób spawalniczych metodą TIG.

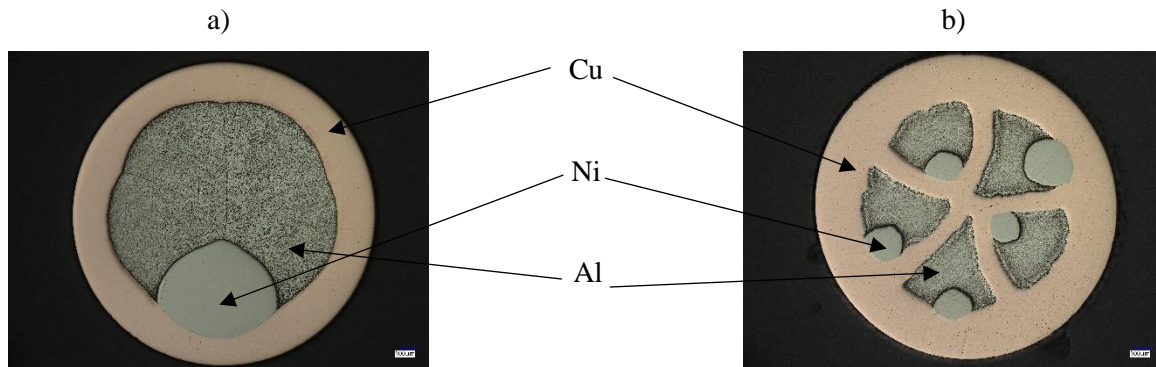
Jako kontynuacja etapu B wykonano również warianty multidrutów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 o docelowej średnicy $\varnothing 1,00$ mm. Te warianty były zaprojektowane z myślą o przeprowadzeniu prób druku 3D z zastosowaniem technologii WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), aby sprawdzić materiały o podwyższonych zawartościach aluminium oraz aluminium i niklu dodatkowo metoda ta wymaga specyficznych parametrów średnicy drutu. Proces ten, w odróżnieniu od wcześniejszych etapów, odbywał się z pominięciem tworzenia drutów płaszczowych, co uprościło cały cykl produkcji i skróciło czas wytwarzania. Otrzymane multidruty po kolejnych etapach pakietowania i przeciągania, zarówno dla wariantu CuAl, jak i CuAlNi, zostały przedstawione na rysunkach 16–18. Wizualizacje te dokumentują kluczowe etapy procesu, w tym podział, pakietowanie oraz przeciąganie do odpowiednich średnic, umożliwiając pełniejsze zrozumienie postępu prac technologicznych.



Rysunek 16. Przekroje multidrutów po kolejnych pakietowaniach – CuAl;
a) po pierwszym pakietowaniu, b) po drugim pakietowaniu,
c) po trzecim pakietowaniu



Rysunek 17. Przekroje multidrutów z pominięciem wykonania drutów płaszczowych po kolejnych pakietowaniach – CuAl; a) po pierwszym pakietowaniu A, b) po drugim pakietowaniu B.



Rysunek 18. Przekroje multidrutów z pominięciem wykonania drutów płaszczowych po kolejnych pakietowaniach – CuAlNi;

a) po pierwszym pakietowaniu A, b) po drugim pakietowaniu B.

8. Badanie składu chemicznego

Wytworzone multidrutu CuAl, po przeprowadzeniu pierwszego (I), drugiego (II) oraz trzeciego (III) etapu pakietowania, poddano analizie chemicznej w celu określenia ich składu chemicznego. W ramach badania sprawdzono również skład multidrutów CuAl oraz CuAlNi po drugim (B) etapie pakietowania. Do analizy zastosowano metodę elektro-grawimetryczną, która pozwala na precyzyjne określenie zawartości poszczególnych pierwiastków w próbkach, wyrażonej jako procent masowy (% mas). Metoda elektro-grawimetryczna została wybrana ze względu na jej wysoką dokładność i niezawodność w analizie metali, co było kluczowe przy weryfikacji równomierności rozkładu pierwiastków, takich jak aluminium (Al) i nikiel (Ni), w kompozytach multimetalowych. Wyniki analizy chemicznej przedstawiono w Tabeli 1, która obrazuje zmiany w składzie chemicznym w zależności od liczby przeprowadzonych etapów pakietowania. Wyniki te dostarczają cennych informacji na temat skuteczności procesu technologicznego oraz jego wpływu na jednorodność kompozycji wielometalowych drutów, co ma istotne znaczenie w kontekście ich dalszego zastosowania, zwłaszcza w procesach spawalniczych oraz w technologii druku 3D z wykorzystaniem WAAM.

Tabela.1. Wyniki analizy chemicznej drutów po kolejnych etapach pakietowania

	Al [%]	Ni [%]	Cu [%]
CuAl (I) – ozn CuAl8	7,59	-	92,43
CuAl (II) – ozn CuAl3	3,06	-	96,94
CuAl (III) - ozn CuAl1	1,43	-	98,57
CuAl (B) – ozn CuAl12	12,21	-	87,79
CuAlNi (B) – ozn CuAl10Ni10	9,59	10,1	80,31

9. Testy spawalnicze metodą TIG

Kolejnym etapem badań były testy spawalnicze, które przeprowadzono metodą TIG (Tungsten Inert Gas) z użyciem multimetalowych drutów o budowie multiwłóknistej.

Do badań wybrano materiały multiwłókniste CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10. Wybór tych materiałów podyktowany był koniecznością weryfikacji wpływu zawartości aluminium na kształtowanie właściwości mechanicznych oraz struktury materiałów po procesach spawania i druku 3D z wykorzystaniem technologii WAAM. Wytworzone multidrutu CuAl oraz CuAlNi zastosowano w procesie napawania na powierzchni stalowej gatunku X12Cr13 o grubości 10 mm. W testach wykorzystano pięć rodzajów multidrutów: CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12, CuAl10Ni10 oraz jeden drut komercyjny CuAl8, produkcji MigWeld. Napoiny zostały wykonane za pomocą spawarki Fronius TransTIG 2200 w osłonie argonu 5,0, przy zastosowaniu różnych programów spawarki (AC oraz DC -). Metoda TIG została wybrana ze względu na jej wszechstronność i precyzję, szczególnie istotną w przypadku pracy z materiałami wielometalowymi. Technika TIG umożliwia dokładne sterowanie łukiem spawalniczym oraz minimalizuje ryzyko wprowadzania zanieczyszczeń do obszaru spawania, co jest kluczowe w procesach związanych z badaniem nowych materiałów spawalniczych. Zastosowanie osłony z argonu 5,0 (o czystości 99,999%) dodatkowo zapewnia ochronę stopionego metalu przed utlenianiem, co wpływa na jakość oraz stabilność uzyskanych napoin.

W ramach prób spawalniczych wykonano ścieżki napoin dla każdego z wymienionych rodzajów multidrutów, co pozwoliło na ocenę ich przydatności do procesów spawalniczych oraz możliwości wykorzystania w technologii druku 3D. Testy te miały na celu ustalenie optymalnych parametrów prądowych dla spawania metodą TIG, co ma istotne znaczenie w kontekście dalszych aplikacji, zwłaszcza w zautomatyzowanych procesach produkcji addytywnej, takich jak WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).

Wyniki prób spawalniczych umożliwiły określenie zakresu optymalnych parametrów prądowych dla każdego z testowanych materiałów. W tabeli 2 zestawiono kluczowe parametry spawania, w tym natężenie prądu, typ programu (AC/DC), prędkość podawania drutu oraz prędkość spawania, co pozwala na dokładne porównanie efektywności różnych wariantów multidrutów. Wyniki te dostarczyły cennych informacji dotyczących stabilności łuku spawalniczego, właściwości napoin oraz potencjału do dalszego zastosowania w procesach druku 3D.

Tabela 2. Parametry prądowe wykonanych napoin

L.p.	Drut	Biegunowość	Prąd spawania, [A]	Napięcie spawania, [V]
1	CuAl8	DC-	150	18,5
2	CuAl3	DC-	180	18,5
3	CuAl1	DC-	150	16,9
7	CuAl12	DC-	200	17,5
8		AC	160	17
9	CuAl10Ni10	DC-	160	16
10		AC	170	17,5
11	CuAl 8 MigWeld	DC-	180	18

W wyniku przeprowadzonych prób spawalniczych oraz obserwacji zachowania materiału w trakcie spawania metodą TIG stwierdzono, że materiały multiwłókniste spawane



prądem stałym (DC-) wykazywały trudności w dodawaniu materiału elektrody do ciekłego jeziora. W trakcie działania łuku elektrycznego, materiał charakteryzował się wysoką gęstością, co zaburzało proces wytwarzania kropli metalu i utrudniało kontrolę nad przebiegiem spawania. Te problemy objawiały się w postaci niestabilności procesu oraz trudności w uzyskaniu równomiernej, wysokiej jakości napoiny.

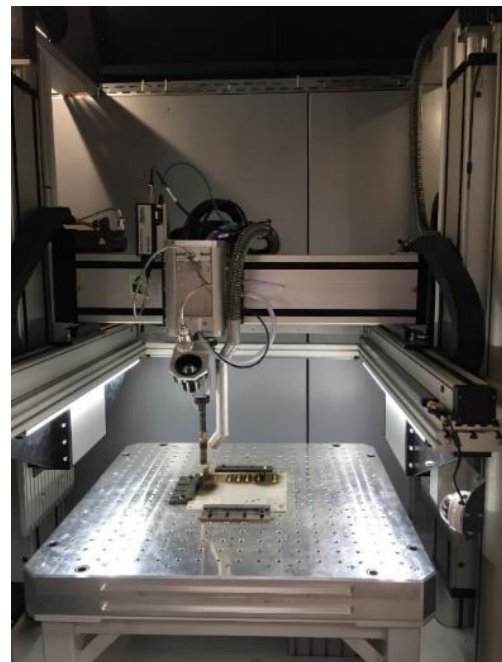
Docelowo ustalono, że optymalną biegunowością prądu jest prąd zmienny (AC), który umożliwia pełną kontrolę nad procesem spawania. Zastosowanie tej metody spawalniczej pozwala na efektywne wytwarzanie ciekłych kropli metalu, które z łatwością można dodawać do jeziora spawalniczego. W efekcie możliwe było tworzenie cienkich napoin o wysokości wynoszącej około 20–23 mm, co odpowiadało wymaganiom dotyczącym jakości i precyzji spawania.

Ustalenie optymalnych parametrów spawalniczych, w tym biegunowości prądu, natężenia, prędkości podawania drutu oraz innych kluczowych zmiennych, pozwoliło na uzyskanie napoin wysokiej jakości. Napoiny te zostały następnie poddane dalszym badaniom, mającym na celu ocenę ich przydatności oraz możliwości zastosowania w procesach spawalniczych i technologii druku 3D. Wyniki tych badań dostarczają wartościowych informacji o potencjale materiałów multiwłóknistych do stosowania w nowoczesnych metodach spawalniczych, zwłaszcza w kontekście technologii WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).

10. Testy druku 3D WAAM

Z punktu widzenia zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych, szczególne znaczenie miały warianty multidrutów CuAl12 oraz CuAl10Ni10. Ze względu na ich obiecujące właściwości mechaniczne i składy chemiczne, te dwa materiały o średnicy $\varnothing 1,00$ mm zostały poddane próbom druku 3D z wykorzystaniem technologii WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Technologia ta umożliwia produkcję metalowych komponentów o złożonej geometrii poprzez stopniowe dodawanie materiału w postaci drutu, co pozwala na oszczędność surowców oraz lepszą kontrolę nad strukturą końcowego elementu. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych, dysponująca zaawansowaną infrastrukturą technologiczną, przeprowadziła próby z wykorzystaniem urządzenia do produkcji addytywnej. Centrum Zaawansowanych Technologii Materiałowych posiada

drukarkę 3D firmy Gefertec, której działanie oparte jest na technologii WAAM. Urządzenie, przedstawione na rysunku 19, jest wyposażone w nowoczesną spawarkę firmy Fronius, z palnikiem zamontowanym w trójosiowym systemie prowadzącym. Proces druku realizowany jest na stoliku roboczym połączonym z jednostką chłodzącą, co zapewnia stabilność temperaturową podczas wytwarzania elementów. Maksymalna wielkość obiektów, jakie można drukować za pomocą tego urządzenia, wynosi $0,72 \text{ m}^3$, a ich masa może sięgać do 200 kg. Cały proces produkcyjny jest nadzorowany przez zaawansowany system numeryczny SINUMERIK firmy Siemens, co umożliwi precyzyjną kontrolę nad każdym etapem wytwarzania.

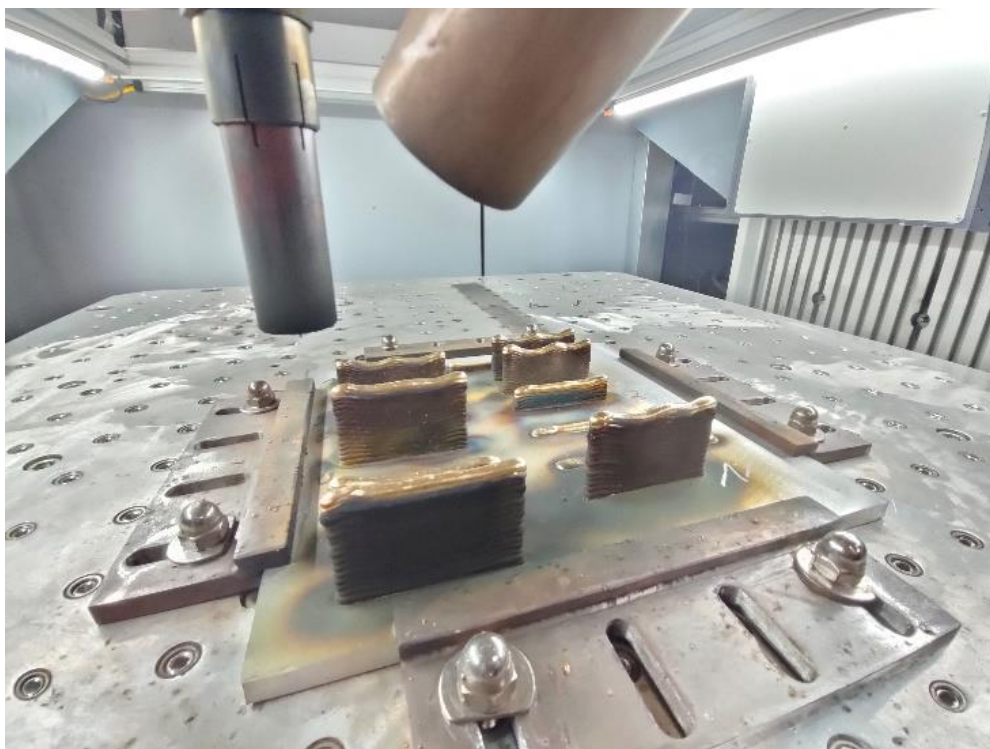


Rysunek 19. Drukarka Gefertec ARC403 będąca wyposażeniem laboratorium

Łukasiewicz – IMN

Materiały CuAl12 oraz CuAl10Ni10 poddano procesowi druku 3D zgodnie z ustalonymi parametrami, które przedstawiono w Tabeli 3. Otrzymane napoiny na blaszce stalowej gatunku X12Cr13 są przedstawione na rysunku 20. Blacha została zamontowana w przestrzeni roboczej uchwytu rabacta torch, który jest wykorzystywany do aplikacji drutu do ciekłego jeziora. Cały proces druku 3D prowadzony jest w osłonie gazu ochronnego ArHe30, co zapewnia optymalne warunki dla wytwarzania napoiny. Stosowanie takiej mieszanki gazów ochronnych gwarantuje nie tylko zachowanie czystego lica, ale także wpływa na poprawę jakości powierzchni bocznej drukowanego obiektu, minimalizując

ryzyko utleniania oraz zanieczyszczenia materiału. Dodatkowo, zastosowanie gazów argonowych i helowych sprzyja stabilności łuku spawalniczego, co jest kluczowe w kontekście precyzyjnego kształtowania struktury metalowej.



Rysunek 20. Wydruki wykonane materiałem CuAl12 oraz CuAl10Ni10

Tabela 3. Parametry procesu druku 3D

Drut	Prąd spawania, [A]	Napięcie spawania, [V]	Prędkość podawania drutu, [m/min]	Przepływ gazu ArHe30 [l/min]
CuAl12	117	17	6,1	17
CuAl10Ni10	119	17,5	6,0	17

W Tabeli 3 zestawiono parametry, przy których uzyskano w pełni przetopiony materiał, wykazujący zjawisko zwilżalności powierzchni, a napoiny charakteryzowały się poprawnym kształtem prostoliniowym oraz wypukłym licem. W trakcie eksperymentów związanych z drukowaniem 3D metodą WAAM przeprowadzono próby zmiany prędkości podawania



drutu w zakresie od 5 do 10 m/min. Niestety, te modyfikacje parametrów spawania prowadziły do wystąpienia istotnych niezgodności, takich jak niedokładne stopienie materiału, przyklejenie końcówki prądowej oraz zwiększoną podatność na tworzenie odprysków. Problemy te miały negatywny wpływ na jakość napoin, co z kolei podkreśla znaczenie precyzyjnego ustawienia parametrów procesu.

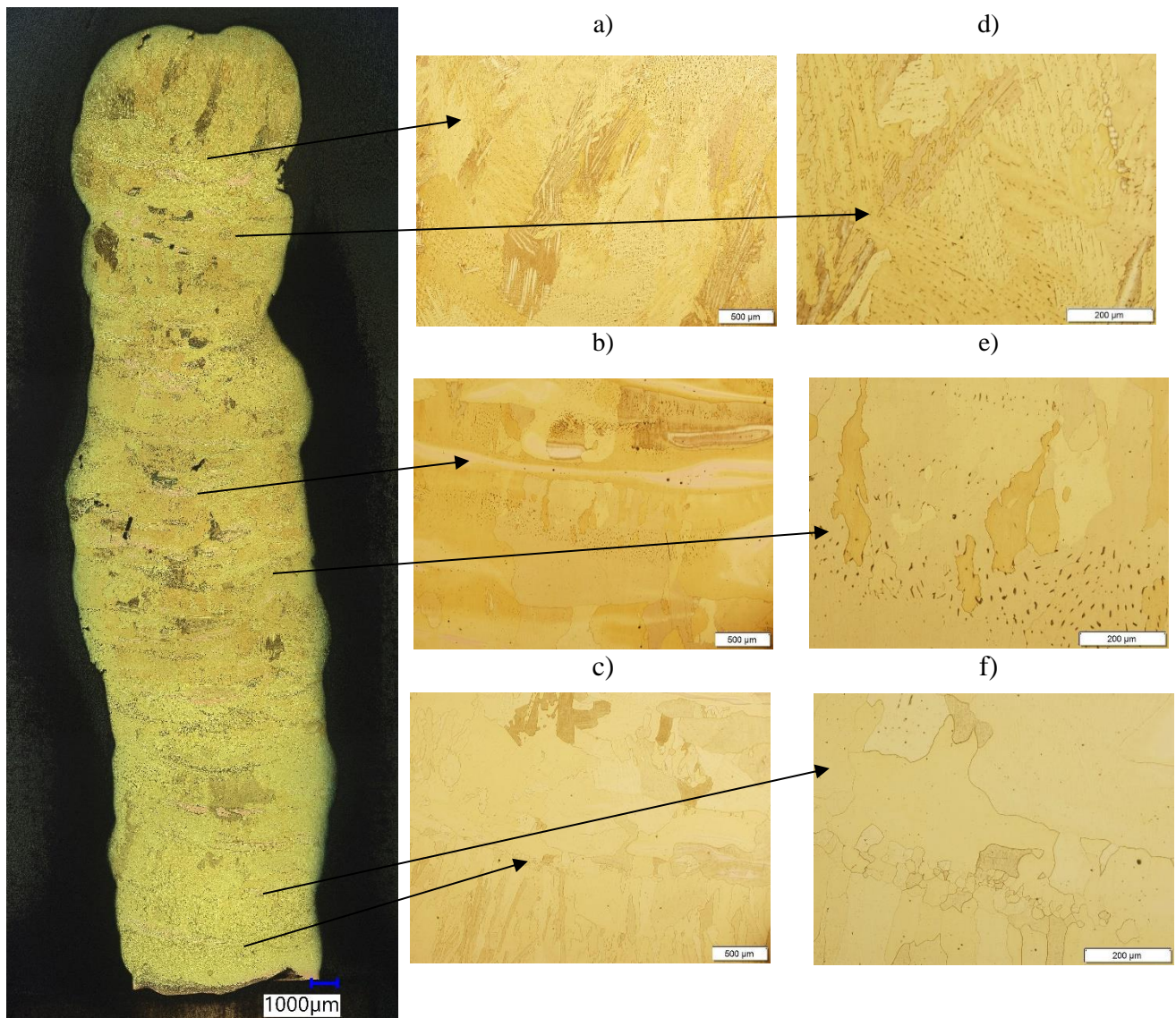
Podczas eksperymentów wprowadzono również zmiany w ustawieniach prądu spawania, mieszczących się w zakresie od 100 do 150 A. Efektem tych zmian było nie tylko przyklejenie materiału drutu spawalniczego do końcówki prądowej, ale także występowanie problemów z zajarzeniem łuku elektrycznego. Te obserwacje sugerują, że precyzyjne dostosowanie zarówno prędkości podawania drutu, jak i prądu spawania jest kluczowe dla stabilności procesu oraz jakości wytwarzanych napoin.

Ostatecznie, ustalenie optymalnych parametrów druku 3D umożliwiło wykonanie poprawnych bloków, które następnie poddano dalszym badaniom. Te badania mają na celu ocenę właściwości mechanicznych oraz technologicznych uzyskanych napoin, co otwiera nowe perspektywy dla ich potencjalnych zastosowań w różnych dziedzinach przemysłu, zwłaszcza w kontekście nowoczesnych technologii wytwarzania. Dalsza analiza wyników pozwoli na lepsze zrozumienie wpływu parametrów procesu na jakość i trwałość finalnych produktów.

11. Badania mikroskopowe – mikroskopia świetlna

W celu przeprowadzenia badań mikroskopowych, z wytworzonych napoin przygotowano zgłady poprzeczne, które poddano procesom szlifowania, polerowania oraz trawienia. Próbki trawiono roztworem dichromianu sodu. Badania metalograficzne wykonano z użyciem mikroskopów świetlnych Olympus GX71 oraz Keyence VHX7000. Na rysunkach 21-28 przedstawiono obrazy mikroskopowe napoin TIG wykonanych z multidrutu CuAl o zróżnicowanej zawartości aluminium oraz z multidrutu CuAl10Ni10. Dla porównania, wykonano również napoiny z użyciem komercyjnego drutu CuAl8 MigWeld. Na rysunkach 29-30 przedstawiono z kolei próbki napoin uzyskanych metodą druku 3D WAAM, wytworzonych z multidrutów CuAl12 oraz CuAl10Ni10.

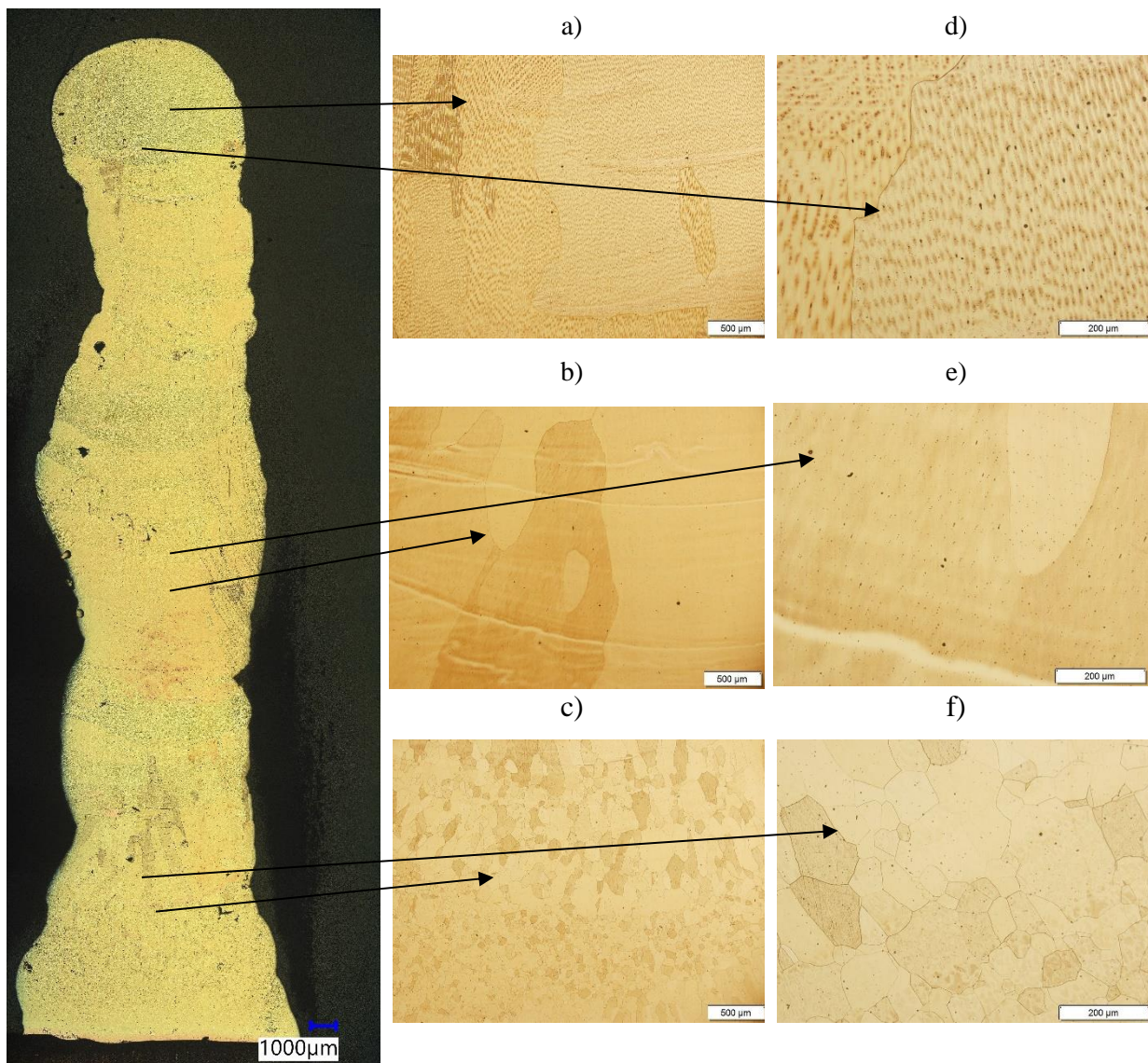
Próbki przeznaczone do obserwacji makroskopowych za pomocą mikroskopu Keyence VHX7000 przygotowano poprzez szlifowanie z użyciem papierów wodnych SiC o gradacjach 220, 320, 500, 800, 1500, 2500, a następnie polerowano je przy użyciu syntetycznego sukna polerskiego zwilżonego roztworem zawiesiny diamentowej o gradacjach 6 μm i 3 μm . W celu przeprowadzenia obserwacji mikroskopowych na mikroskopie Olympus GX71, próbki najpierw poddano obserwacjom makroskopowym, a następnie przecięto i zatopiono w żywicy przewodzącej, konduktomet. Każdą próbkę cięto na trzy strefy do obserwacji: obszar górny obejmujący lico napoiny, obszar środkowy oraz obszar dolny, obejmujący strefę grani. Proces przygotowania próbek do badań mikroskopowych obejmował te same etapy szlifowania i polerowania, co w przypadku próbek makroskopowych.



Rysunek 21. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl8.

Obrazy mikroskopowe CuAl8 (DC-, 150A, 18.5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

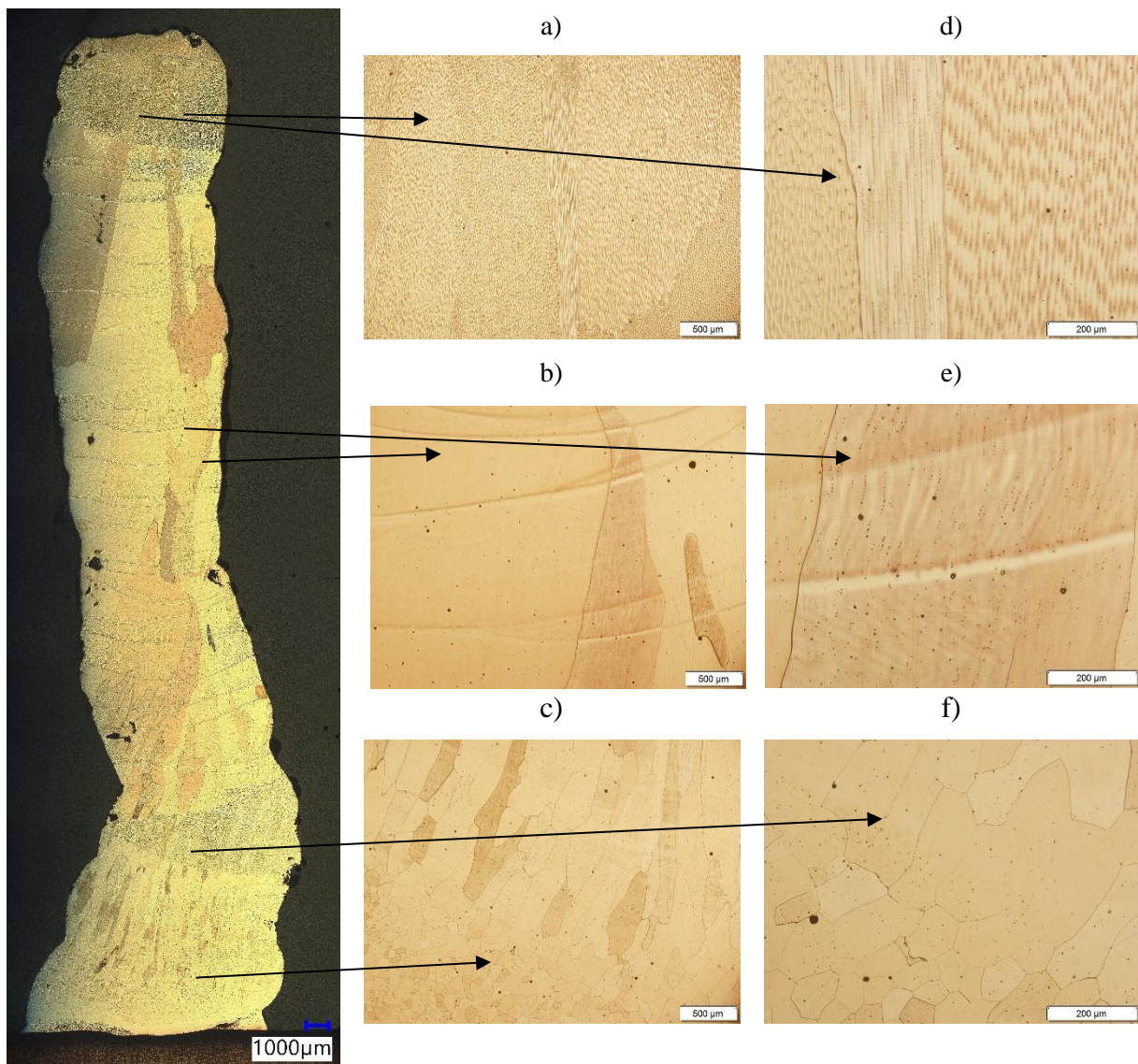
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



Rysunek 22. Obraz makroskopowy napiny wytworzonej z multidrutu CuAl₃.

Obrazy mikroskopowe CuAl₃ (DC-, 180A, 18.5V), trawienie Na₂Cr₂O₇ ;

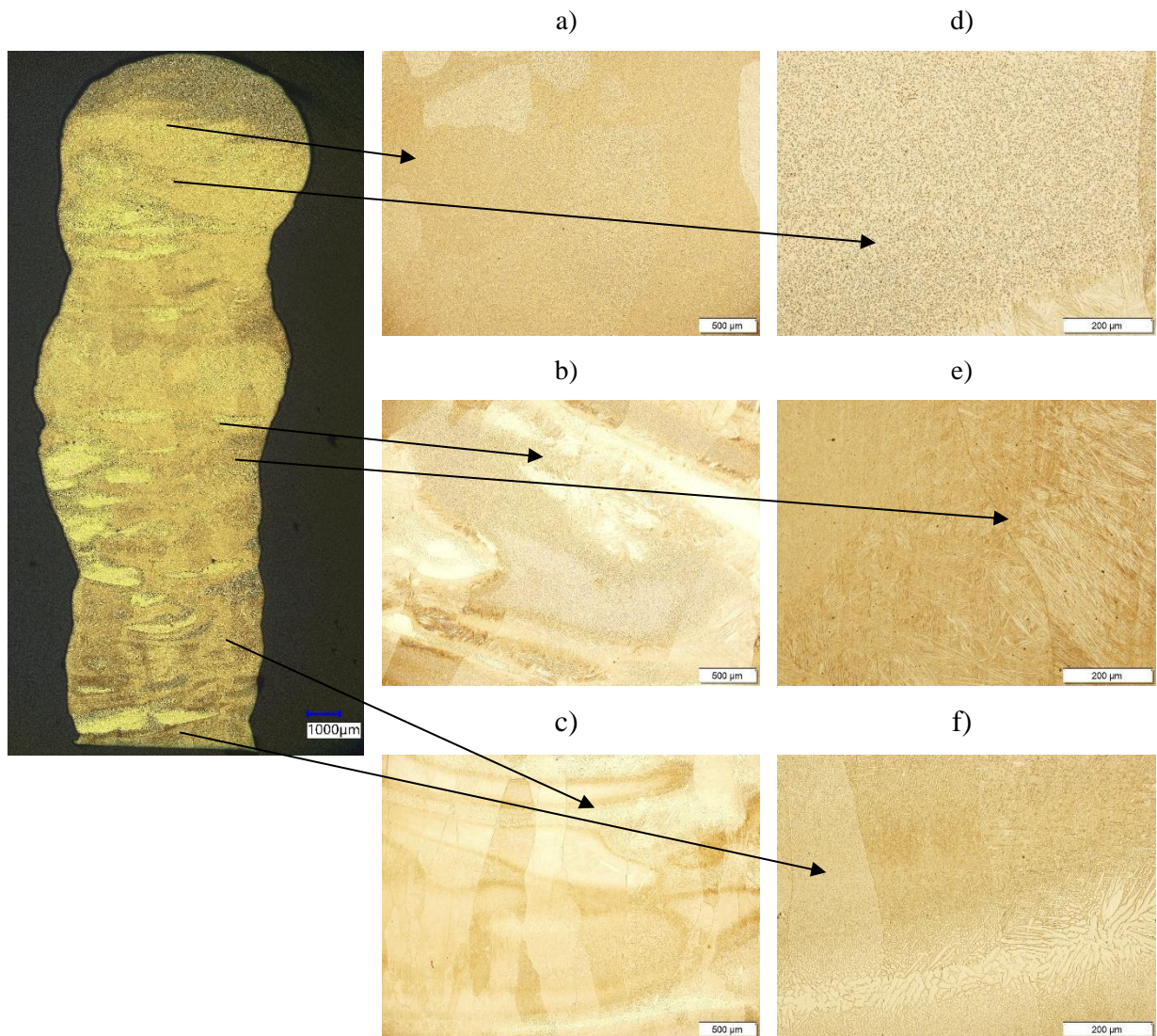
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



Rysunek 23. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl1.

Obrazy mikroskopowe CuAl1 (DC-, 150A,16,9V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

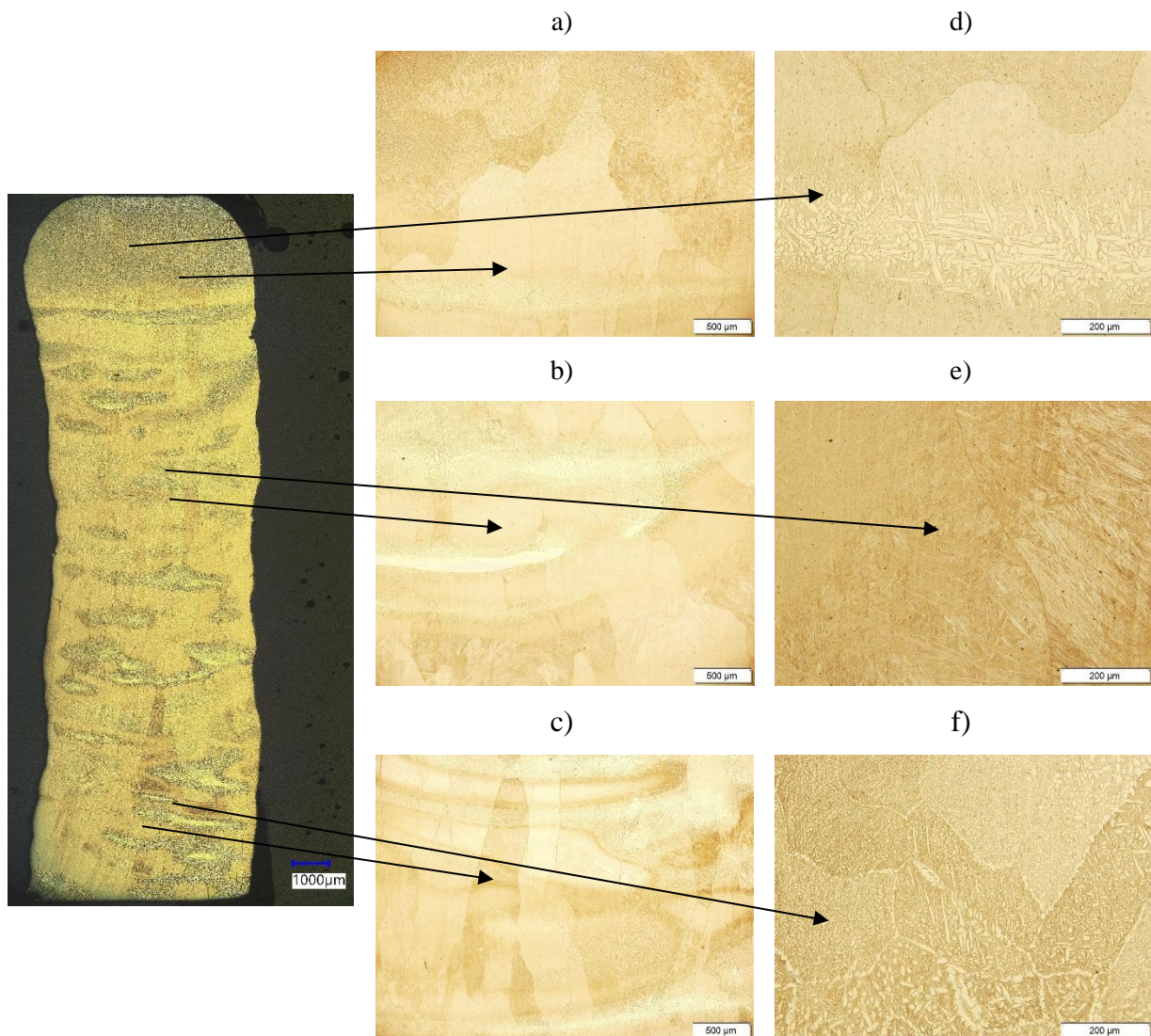
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



Rysunek 24. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl12.

Obrazy mikroskopowe CuAl12 (DC-, 200A, 17,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

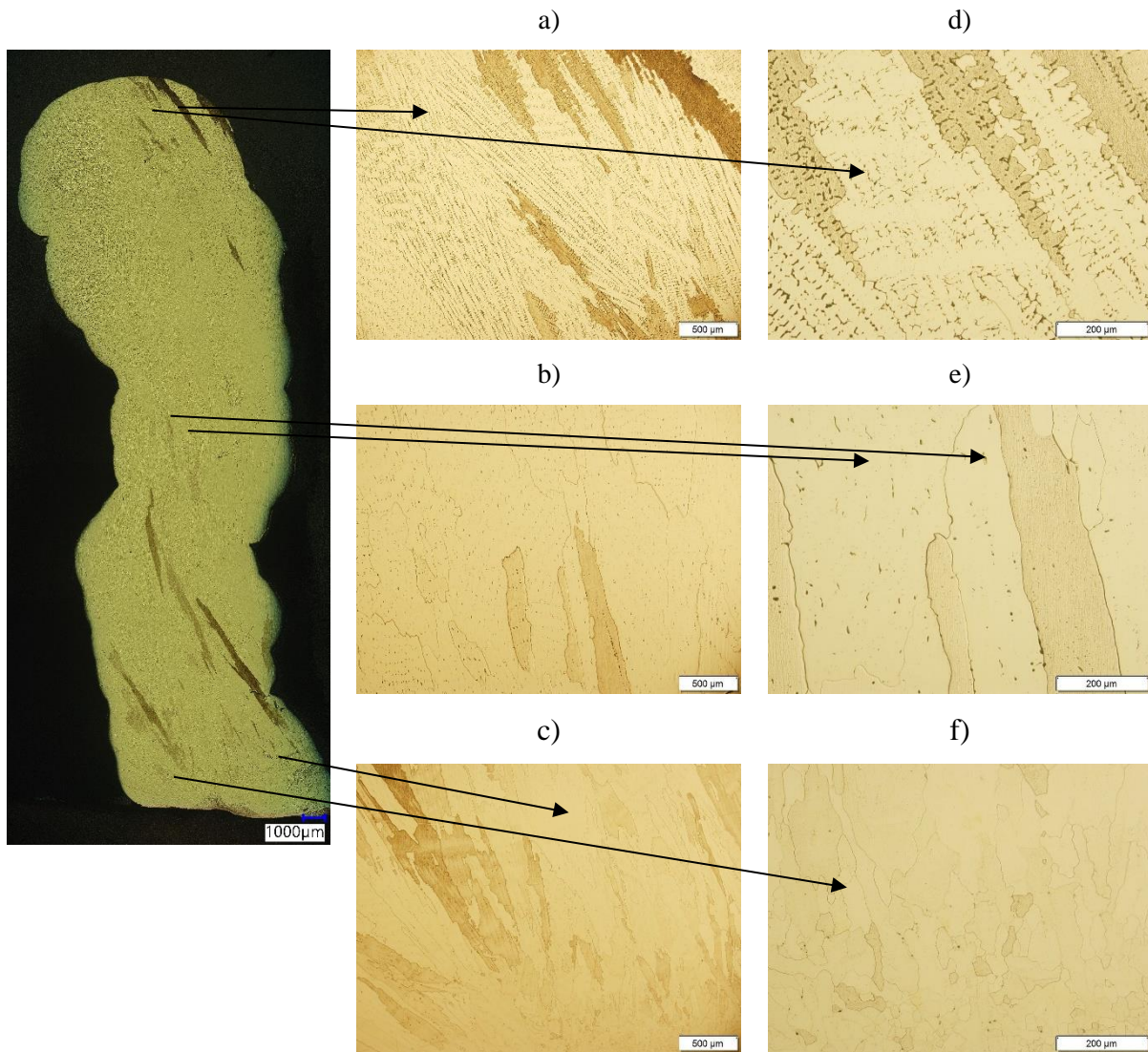
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



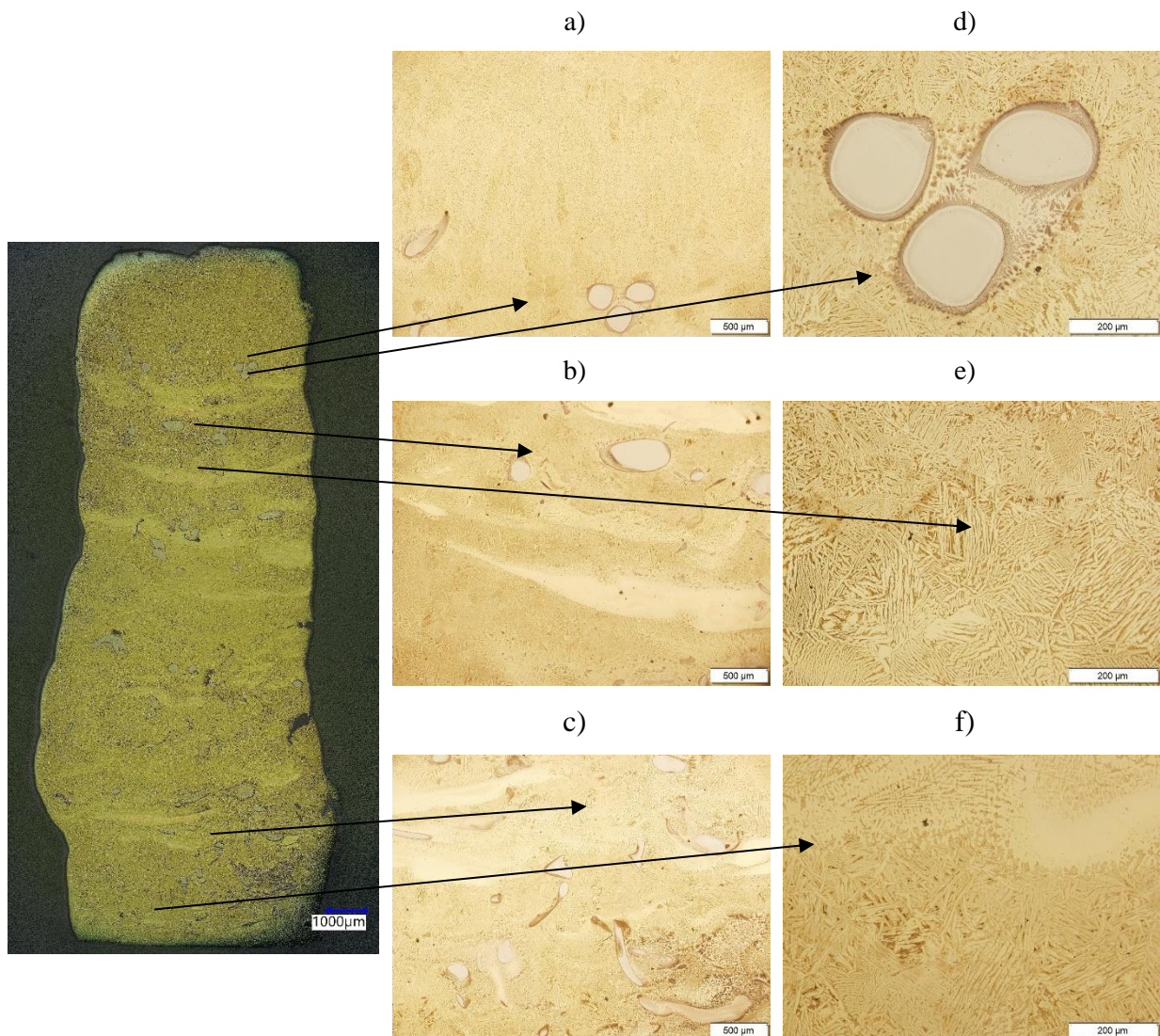
Rysunek 25. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl12.

Obrazy mikroskopowe CuAl12 (AC, 160A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

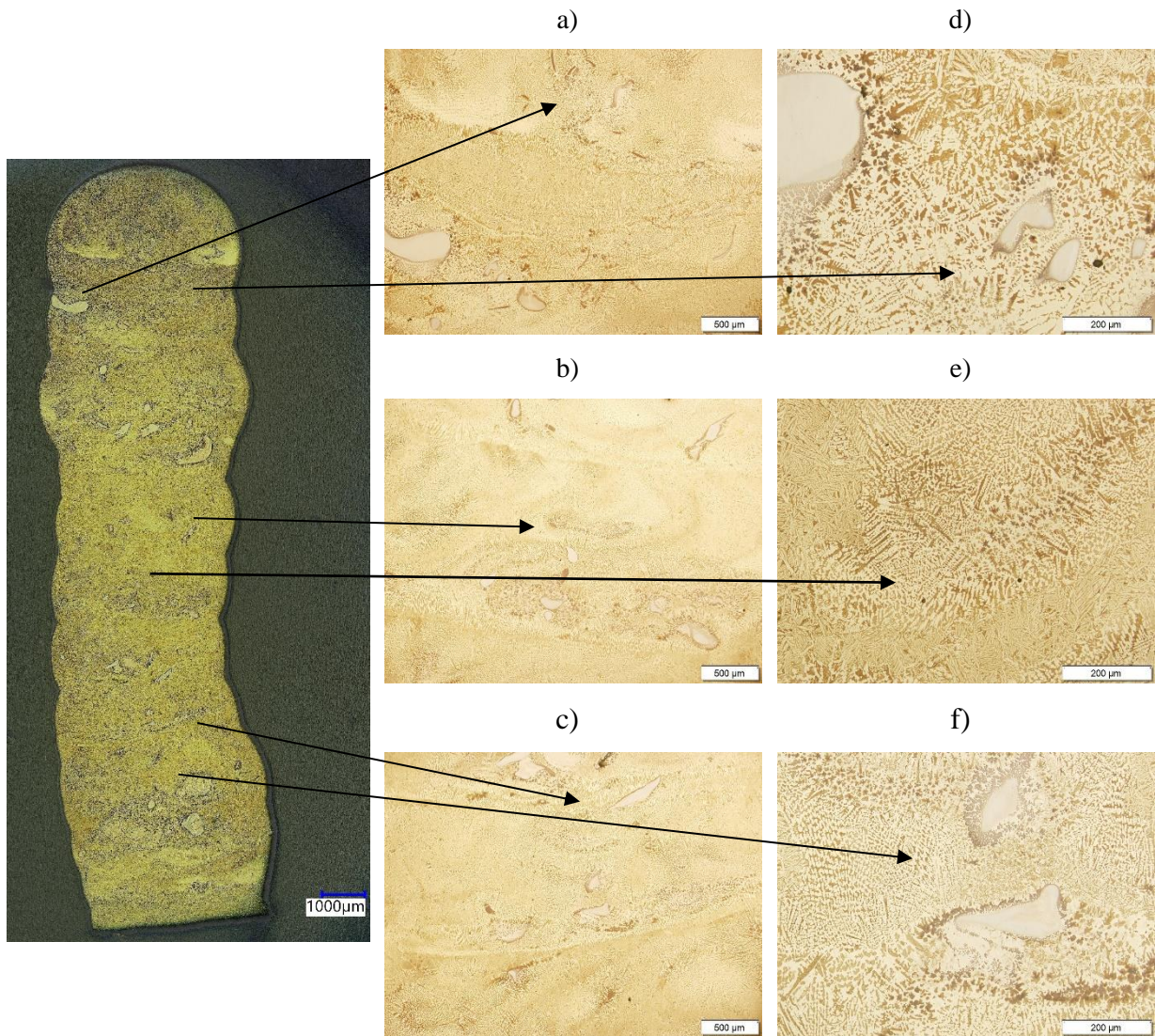
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



Rysunek 26. Obraz makroskopowy napojiny wytworzonej z drutu CuAl8MgWeld. Obrazy mikroskopowe CuAl8MW (AC, 170A, 17,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.

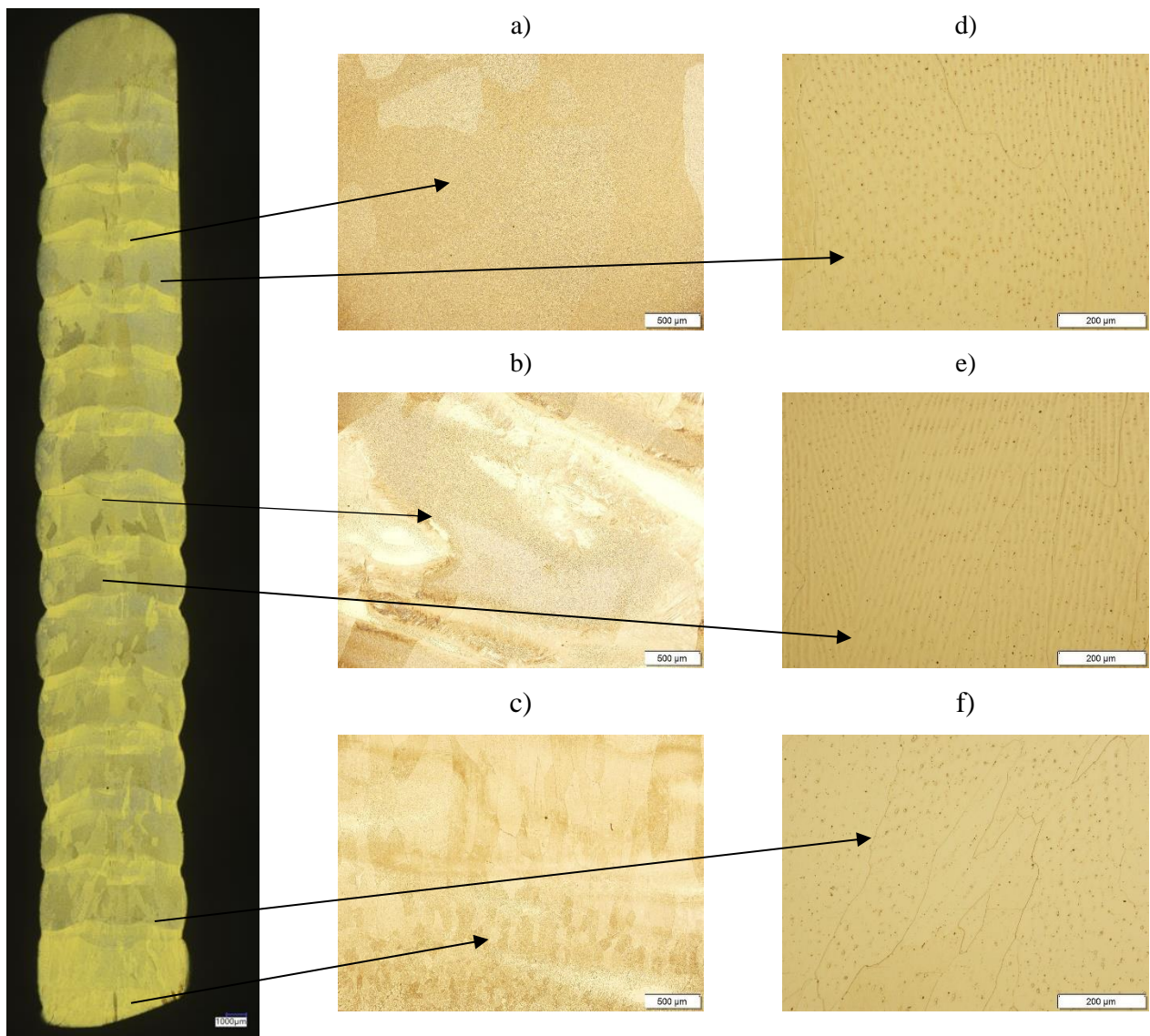


Rysunek 27. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl10Ni10. Obrazy
mikroskopowe CuAl10Ni10 (DC-, 160A, 16V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x.



Rysunek 28. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl10Ni10. Obrazy
mikroskopowe CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

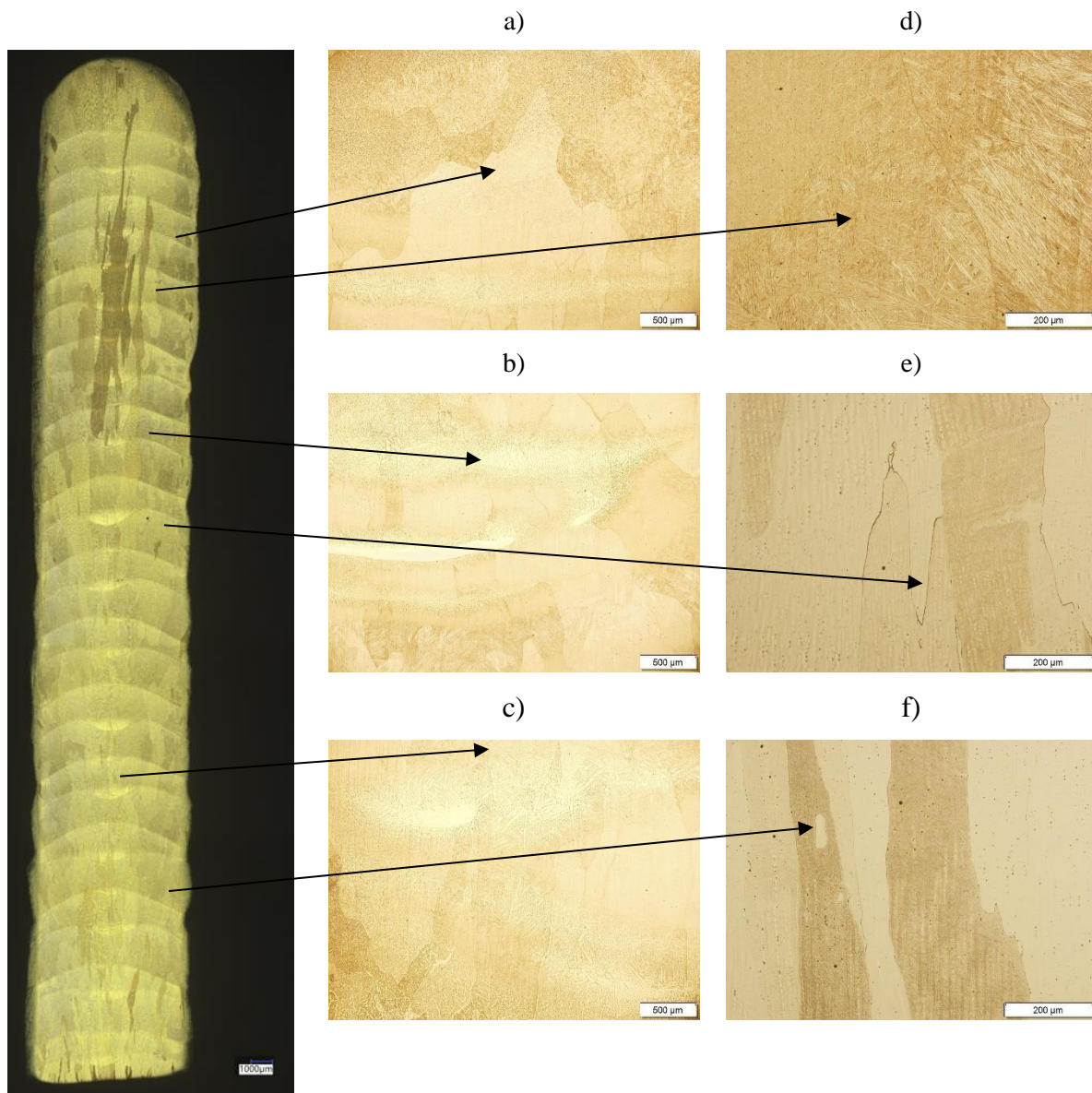
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x



Rysunek 29. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl12 po druku 3D.

Obrazy mikroskopowe CuAl12 (AC, 117A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;

a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x



Rysunek 30. Obraz makroskopowy napoiny wytworzonej z multidrutu CuAl10Ni10 po druku 3D. Obrazy mikroskopowe CuAl10Ni10 (AC, 119A, 17,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;
a), b), c) pow. 50x, d), e), f) pow. 200x

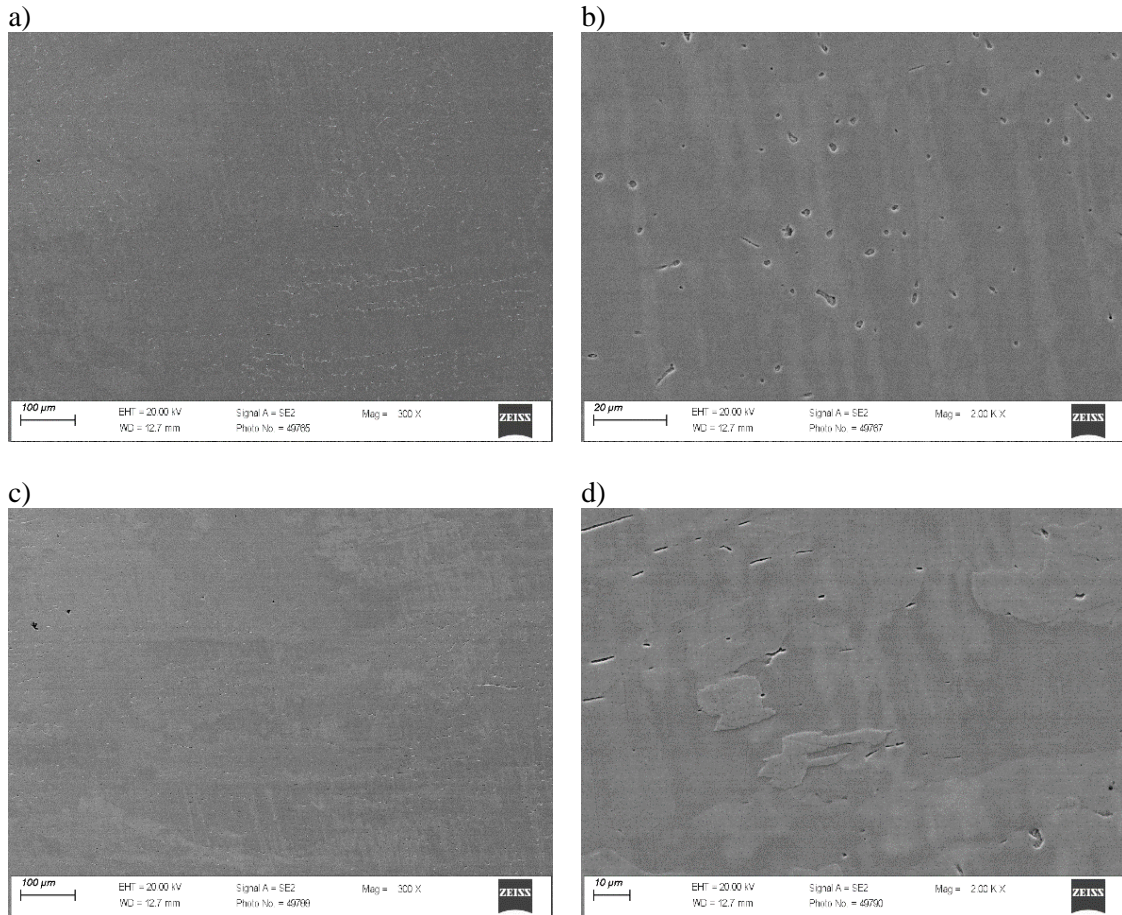
12. Badania mikroskopowe – skaningowa mikroskopia elektronowa

Po zakończeniu badań przy użyciu mikroskopii świetlnej, wytypowane próbki poddano dalszym badaniom z zastosowaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) na mikroskopie ZEISS LEO GEMINI 1525. Do zaawansowanej analizy wybrano próbki przedstawione w Tabeli 4. Wśród wytypowanych znalazły się: próbka komercyjnego drutu CuAl8MigWeld oraz próbki wykonane z multidrutów o podwyższonej zawartości aluminium, takich jak CuAl8 i CuAl12, a także próbki wykonane z multidrutu CuAl10Ni10. Próbki te były poddane zarówno spawaniu metodą TIG, jak i procesowi druku 3D metodą WAAM.

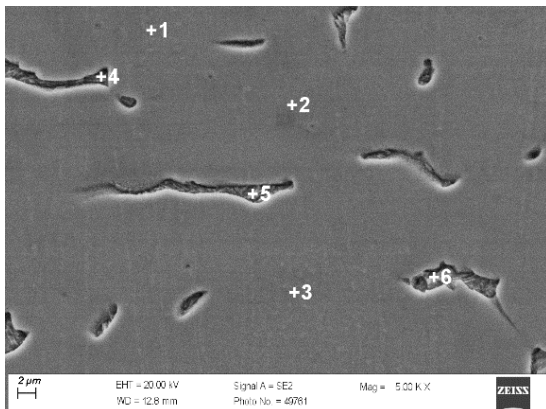
Analiza SEM objęła punktowe badania składu chemicznego próbek, które przeprowadzono w trzech strefach: w górnej części próbki (strefa lica napoiny), w strefie środkowej oraz w strefie dolnej, obejmującej grań napoiny. Wyniki analizy zawartości pierwiastków w poszczególnych punktach pomiarowych zostały szczegółowo omówione i zestawione w formie tabel. Dodatkowo, w celu bardziej precyzyjnego określenia rozkładu pierwiastków w badanych obszarach, wykonano mapy rozmieszczenia pierwiastków. Obrazy uzyskane z użyciem elektronów wtórnych (SE) pozwoliły na wizualizację struktury mikroskali badanych napoin, co umożliwiło dokładne zrozumienie morfologii powierzchni i rozkładu faz w różnych obszarach próbek. Badania z użyciem SEM pozwoliły na identyfikację różnic w mikrostrukturze pomiędzy próbkami wykonanymi metodą TIG a próbkami wytworzonymi przy użyciu druku 3D metodą WAAM, co dostarczyło cennych informacji na temat wpływu tych technologii na strukturę i właściwości materiałów.

Tabela 4. Próbki wytypowane do badań SEM

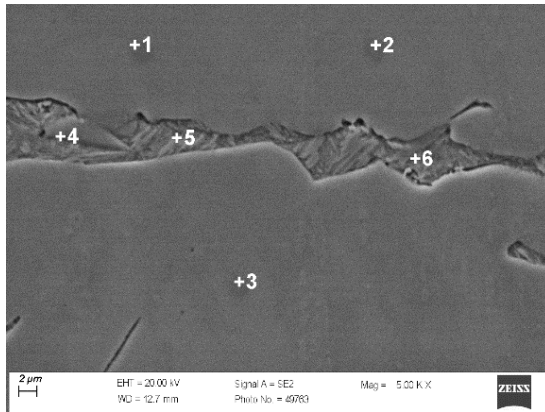
L.p.	Drut	Metoda	Prąd spawania, [A]	Napięcie spawania, [V]
1	CuAl8MigWeld	TIG	180	18,0
2	CuAl8	TIG	150	18,5
3	CuAl12	TIG	160	17,0
4	CuAl10Ni10	TIG	170	17,5
5	CuAl12	WAAM	117	17,0
6	CuAl10Ni10	WAAM	119	17,5



Rysunek 31. Obrazy mikroskopowe CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$;
a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar lica napoiny

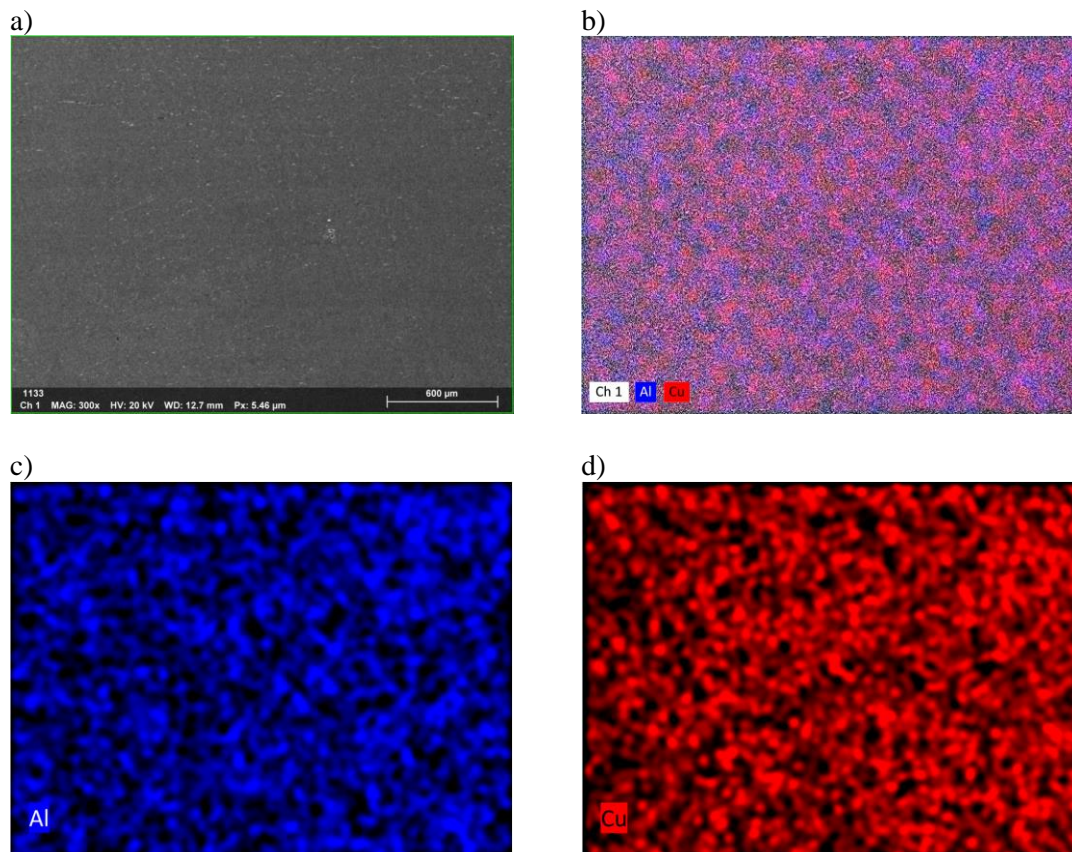


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,5	7,5
2	91,9	8,1
3	92,1	7,9
4	89,8	10,2
5	88,5	11,5
6	92,4	7,6



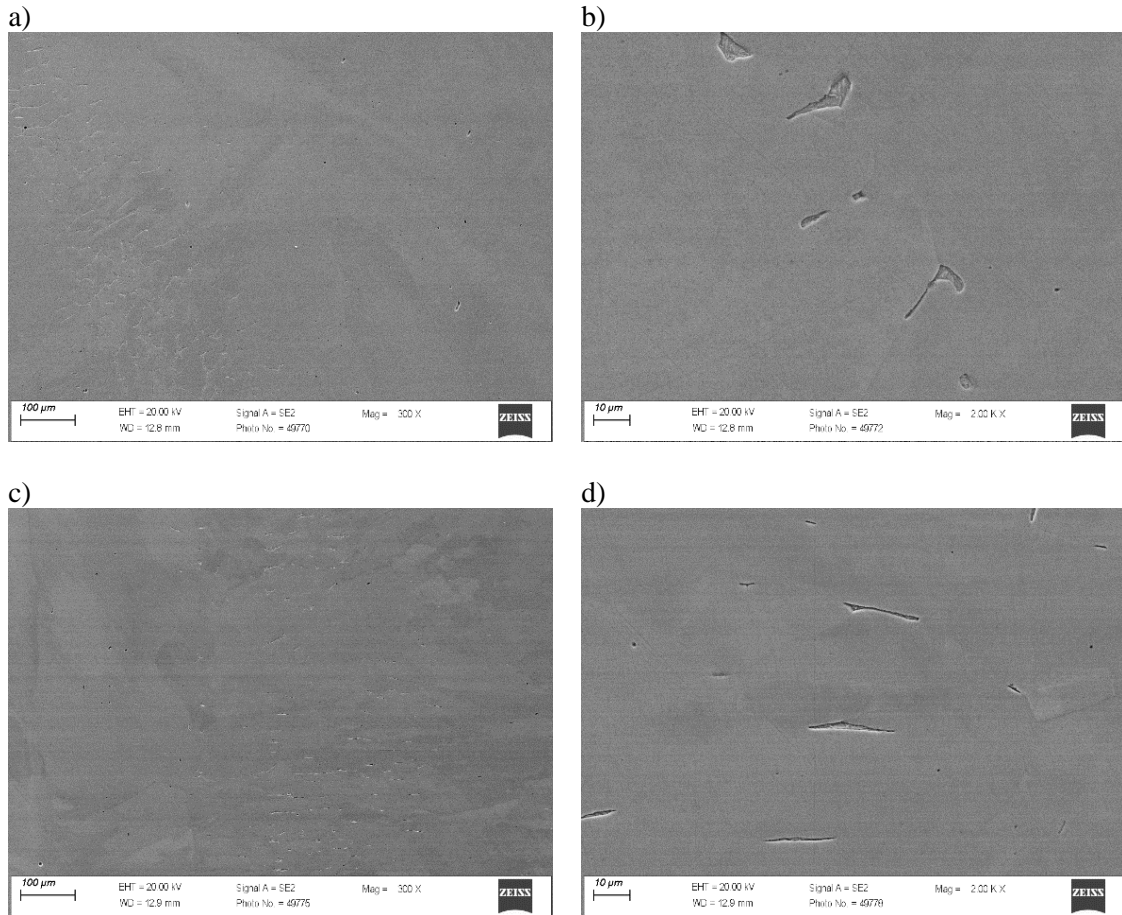
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,4	7,6
2	92,1	7,9
3	92,5	7,5
4	91,2	8,8
5	87,7	12,3
6	87,8	12,2

Rysunek 32. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



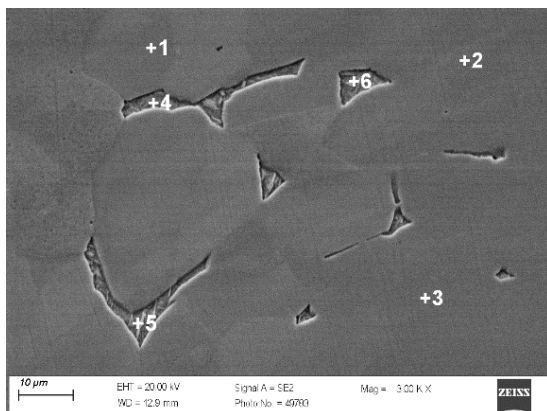
Rysunek 33. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V):

- a) pow. 300x, b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar lica napoiny

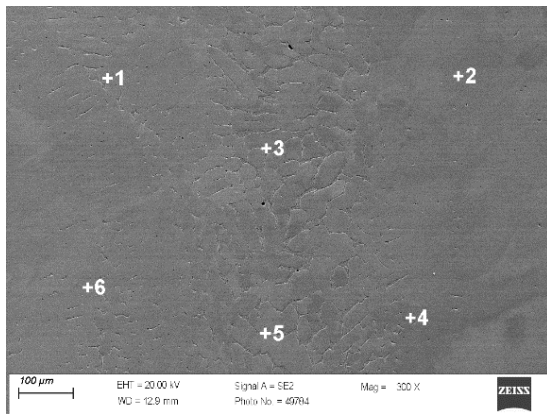


Rysunek 34. Obrazy mikroskopowe CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar środka napoiny

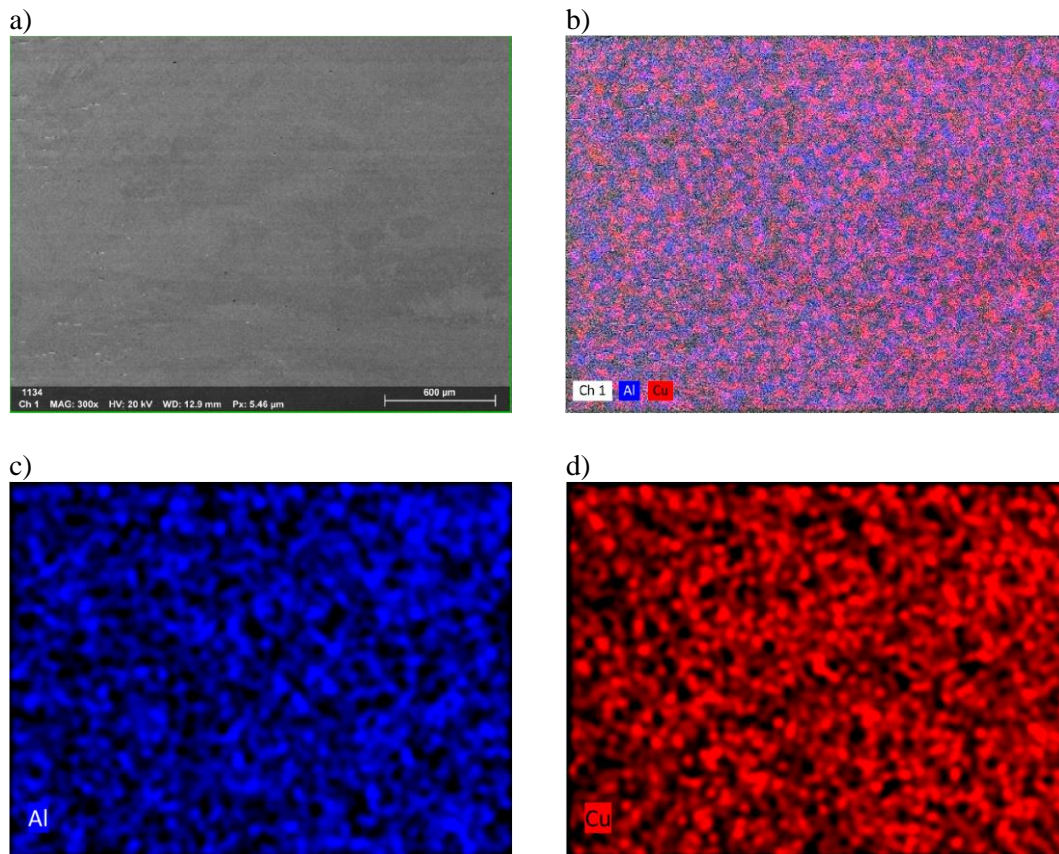


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	91,7	8,3
2	92,0	8,0
3	91,8	8,2
4	87,7	12,3
5	87,8	12,2
6	88,3	11,7



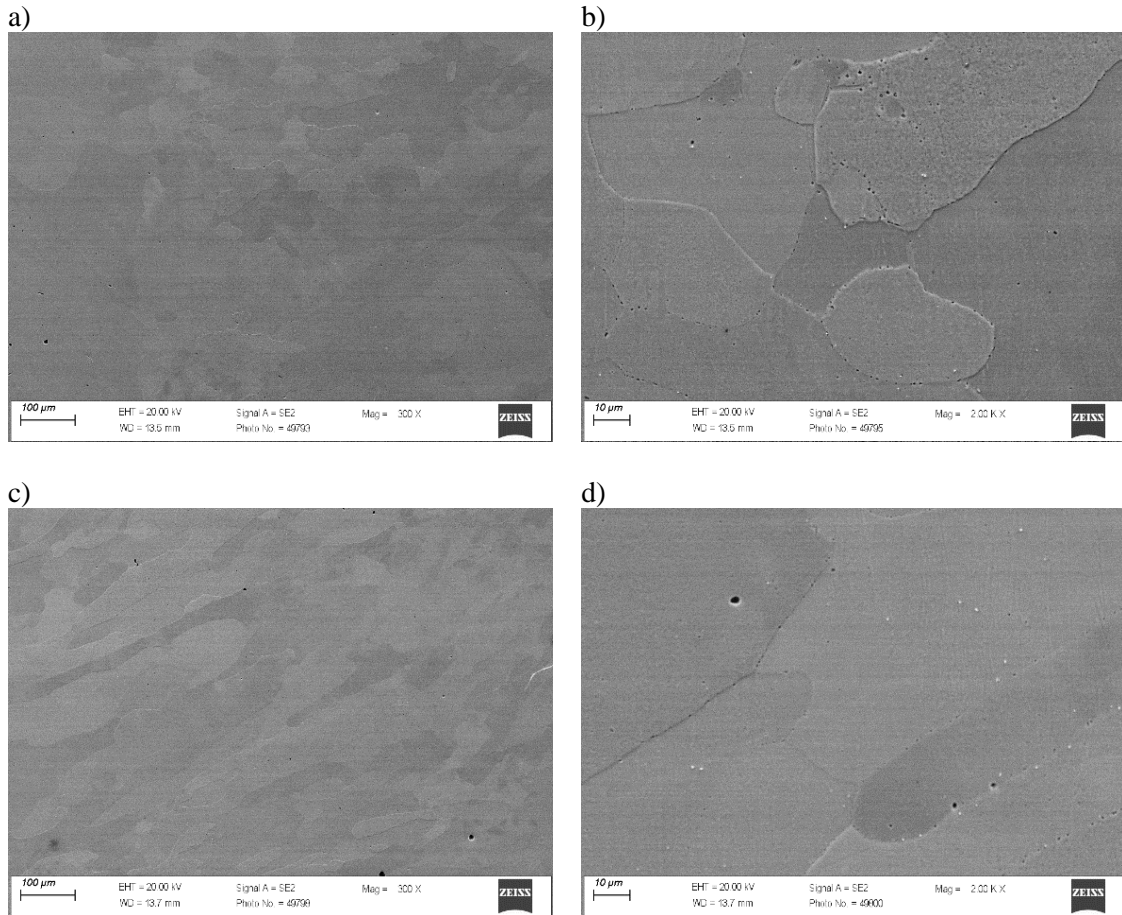
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	91,9	8,1
2	92,3	7,7
3	91,8	8,2
4	92,6	7,4
5	91,4	8,6
6	91,8	8,2

Rysunek 35. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



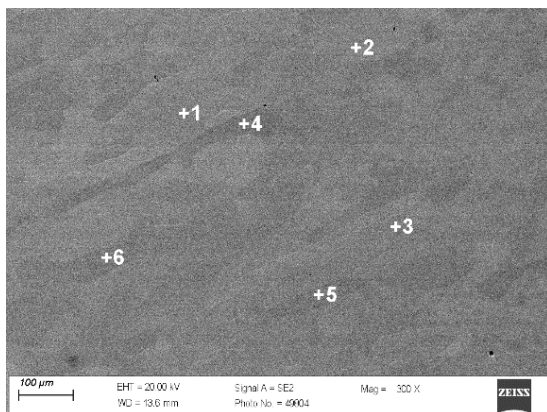
Rysunek 36. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V):

- a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar środka napoiny

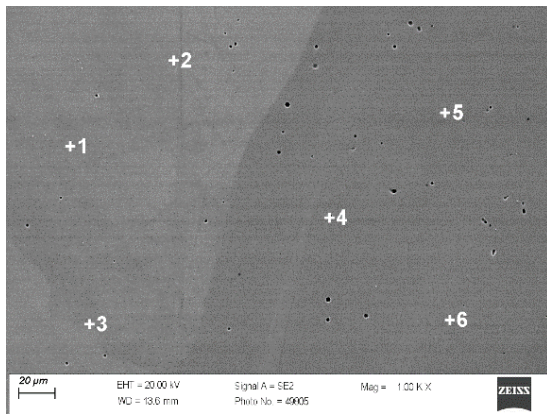


Rysunek 37. Obrazy mikroskopowe CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar grani napoiny

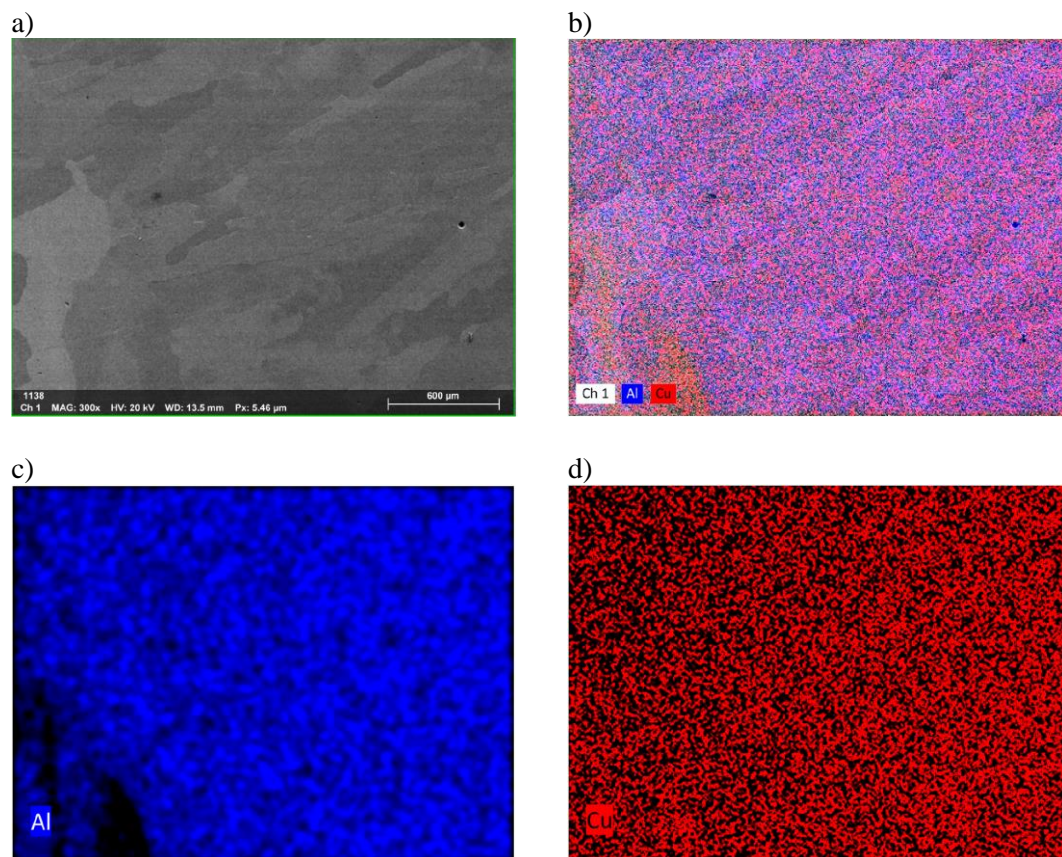


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	90,5	7,8	1,7
2	91,2	7,6	1,2
3	90,2	8,0	1,8
4	90,8	7,7	1,5
5	90,8	7,7	1,5
6	90,6	7,8	1,6



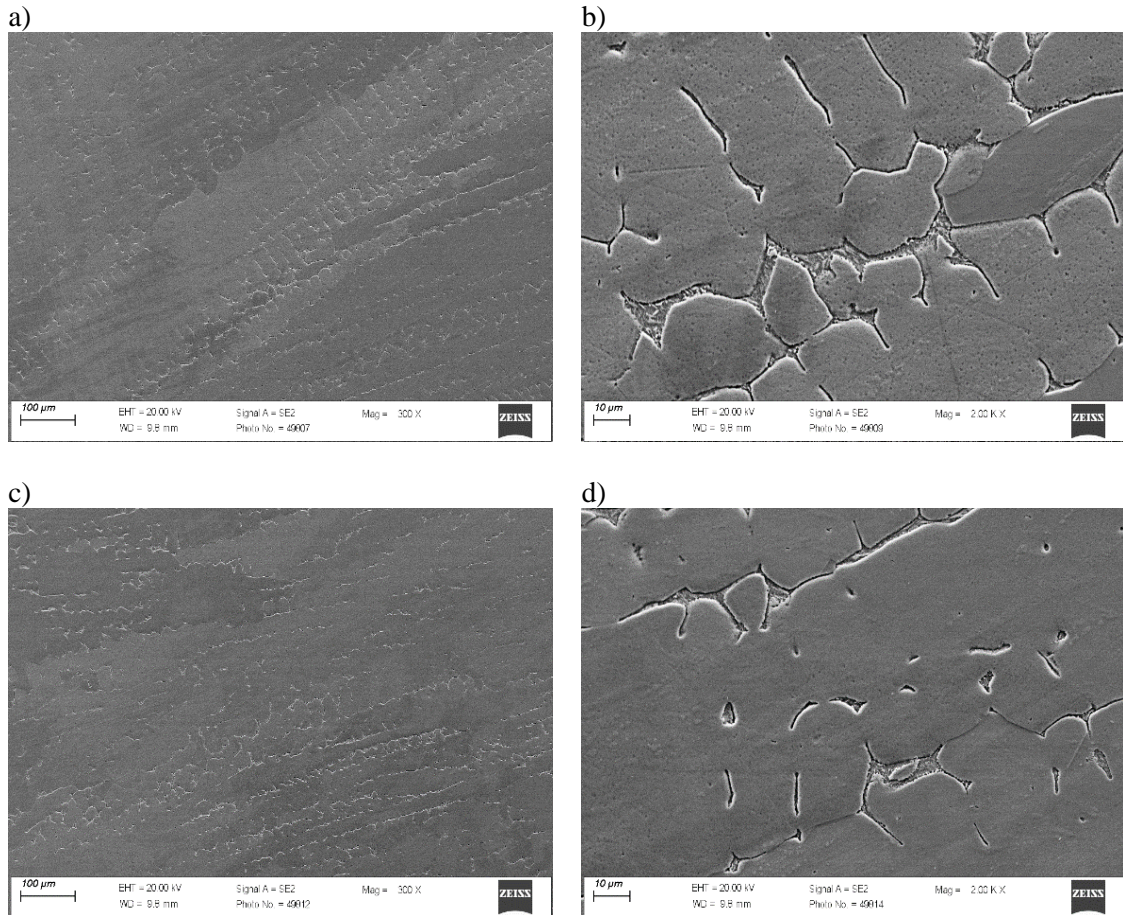
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	92,6	6,5	0,9
2	97,4	2,6	-
3	93,4	6,0	0,6
4	95,2	4,4	0,4
5	93,4	6,6	-
6	93,3	6,7	-

Rysunek 38. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



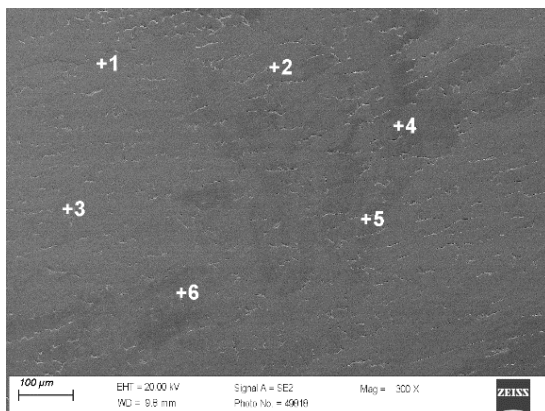
Rysunek 39. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl8MigWeld (DC-, 180A, 18V):

- a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar grani napoiny

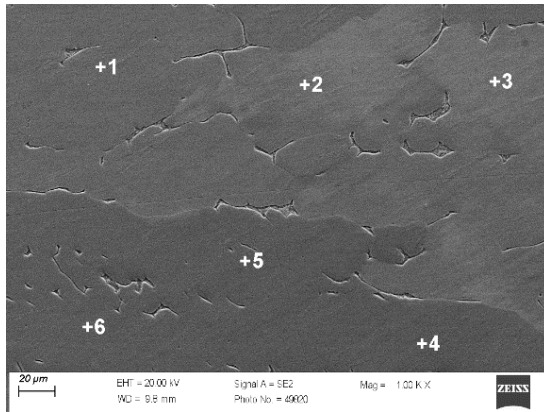


Rysunek 40. Obrazy mikroskopowe CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar lica napoiny

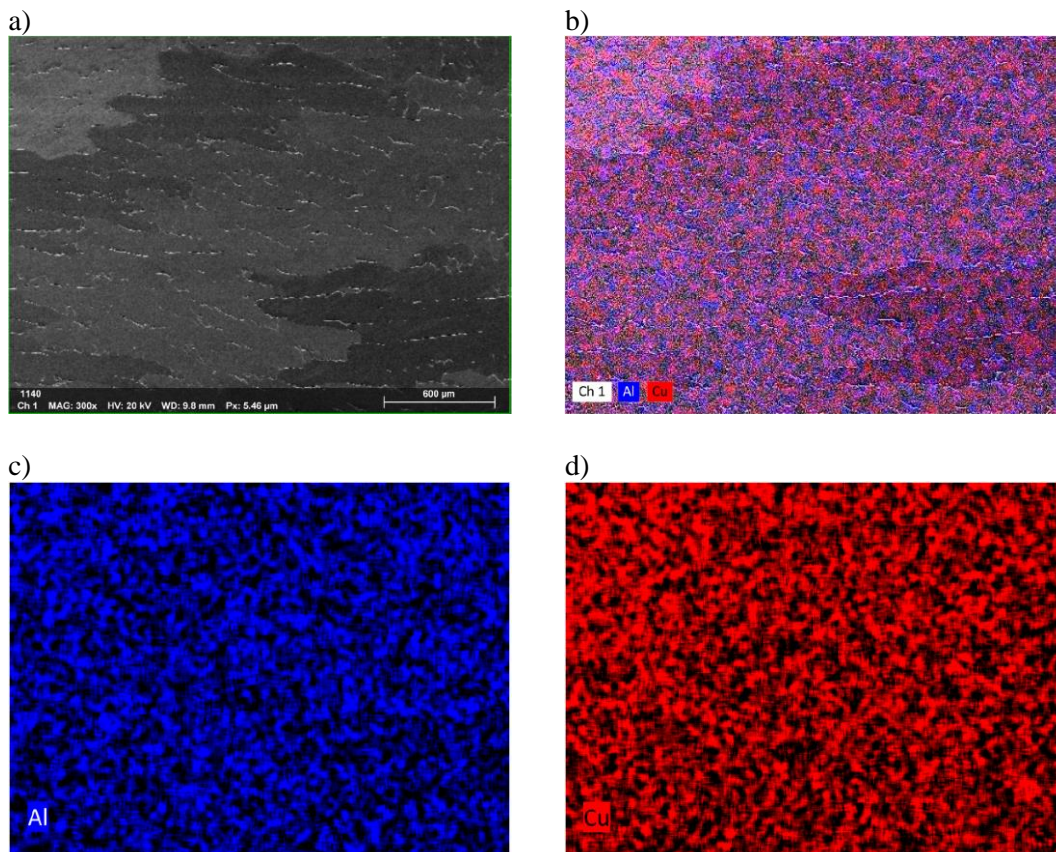


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,5	7,5
2	92,5	7,5
3	92,6	7,4
4	92,1	7,9
5	91,5	8,5
6	91,7	8,3

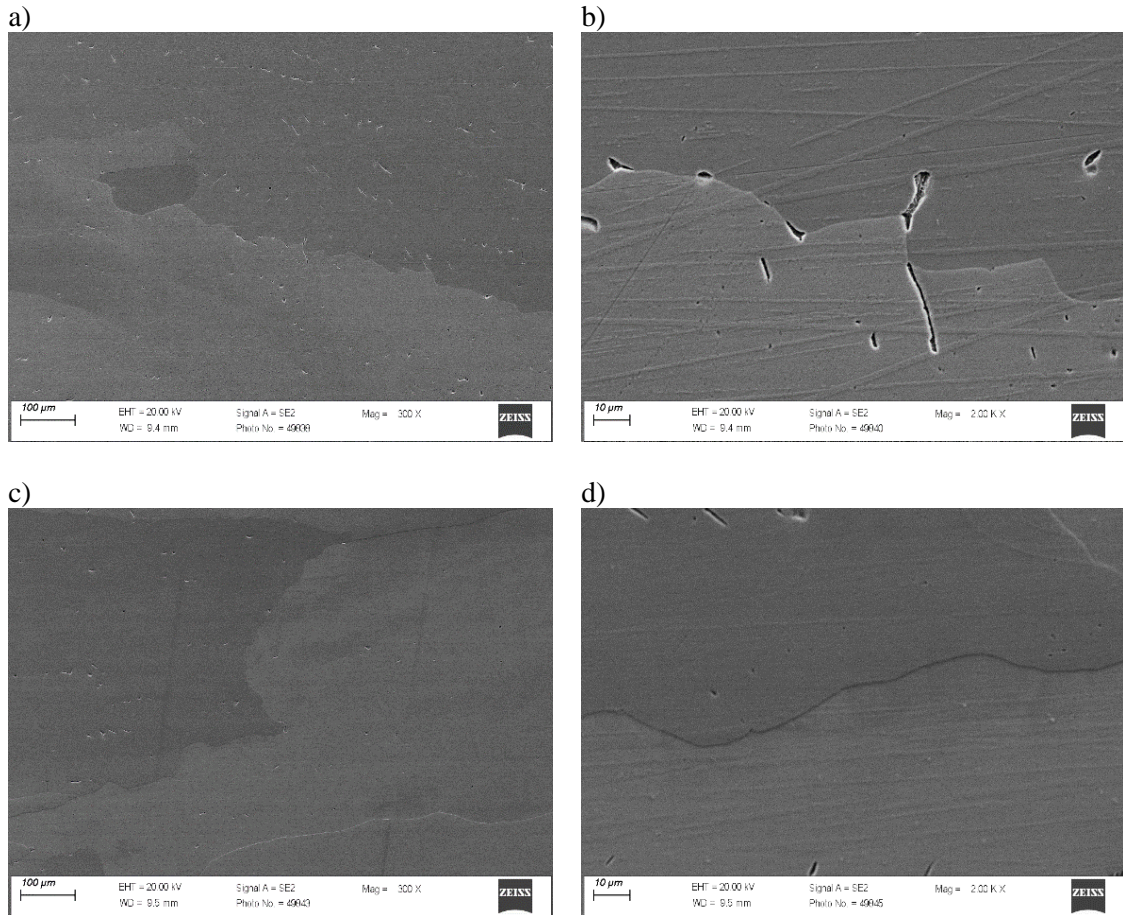


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,6	7,4
2	92,5	7,5
3	92,4	7,6
4	93,0	7,0
5	92,5	7,5
6	92,5	7,5

Rysunek 41. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

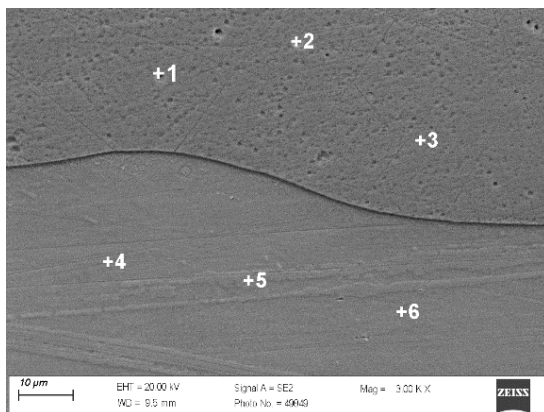


Rysunek 42. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V);
a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar lica napoiny

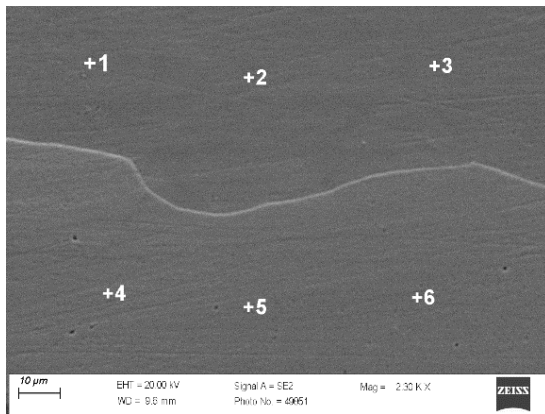


Rysunek 43. Obrazy mikroskopowe CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V), trawienie Na₂Cr₂O₇:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar środka napoiny

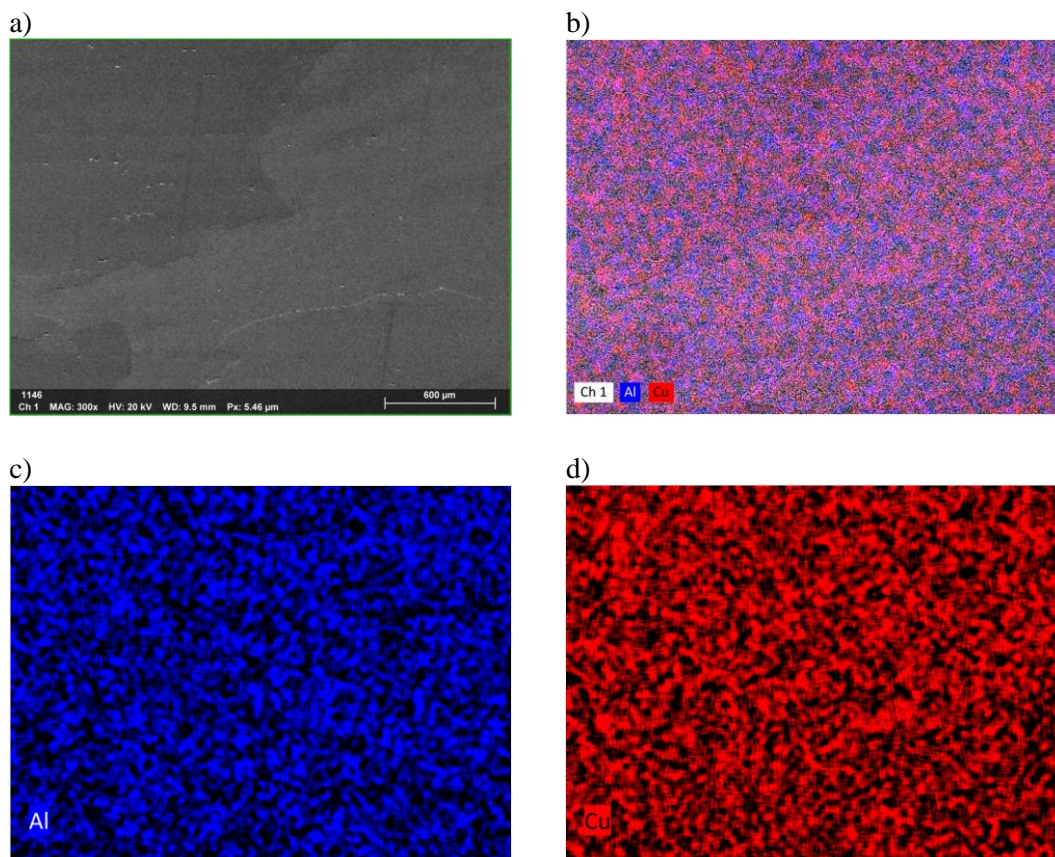


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,4	7,6
2	92,3	7,7
3	92,2	7,8
4	91,9	8,1
5	91,9	8,1
6	92,0	8,0

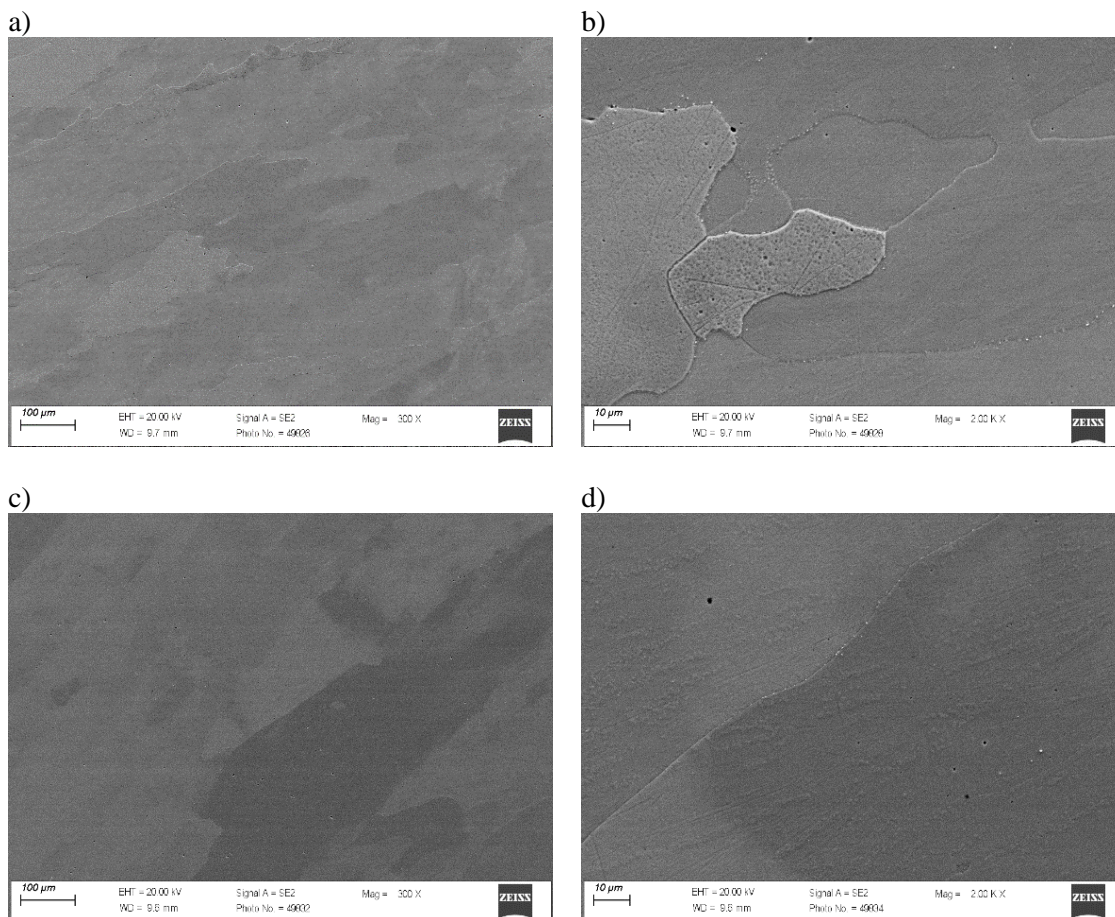


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	92,6	7,4
2	92,4	7,6
3	92,6	7,4
4	91,9	8,1
5	92,3	7,7
6	91,9	8,1

Rysunek 44. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

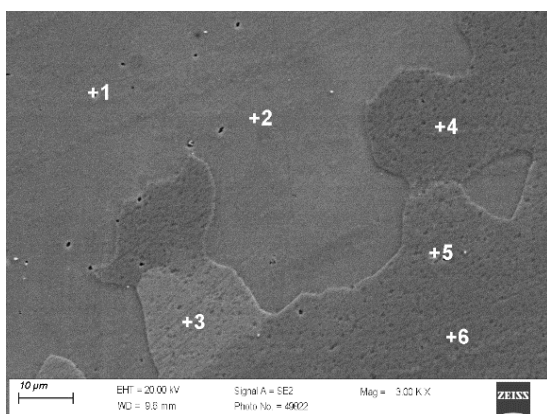


Rysunek 45. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V);
a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar środka napoiny

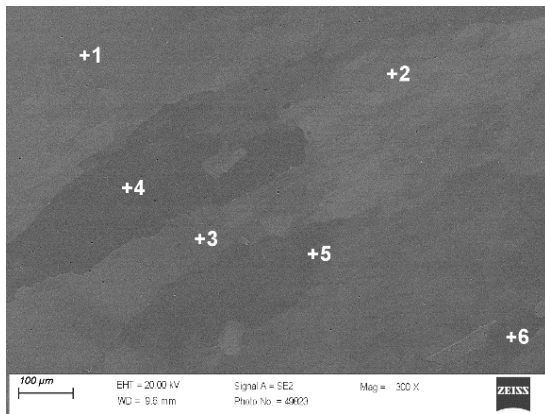


Rysunek 46. Obrazy mikroskopowe CuAl8 (DC-, 150A, 18,5V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar grani napoiny

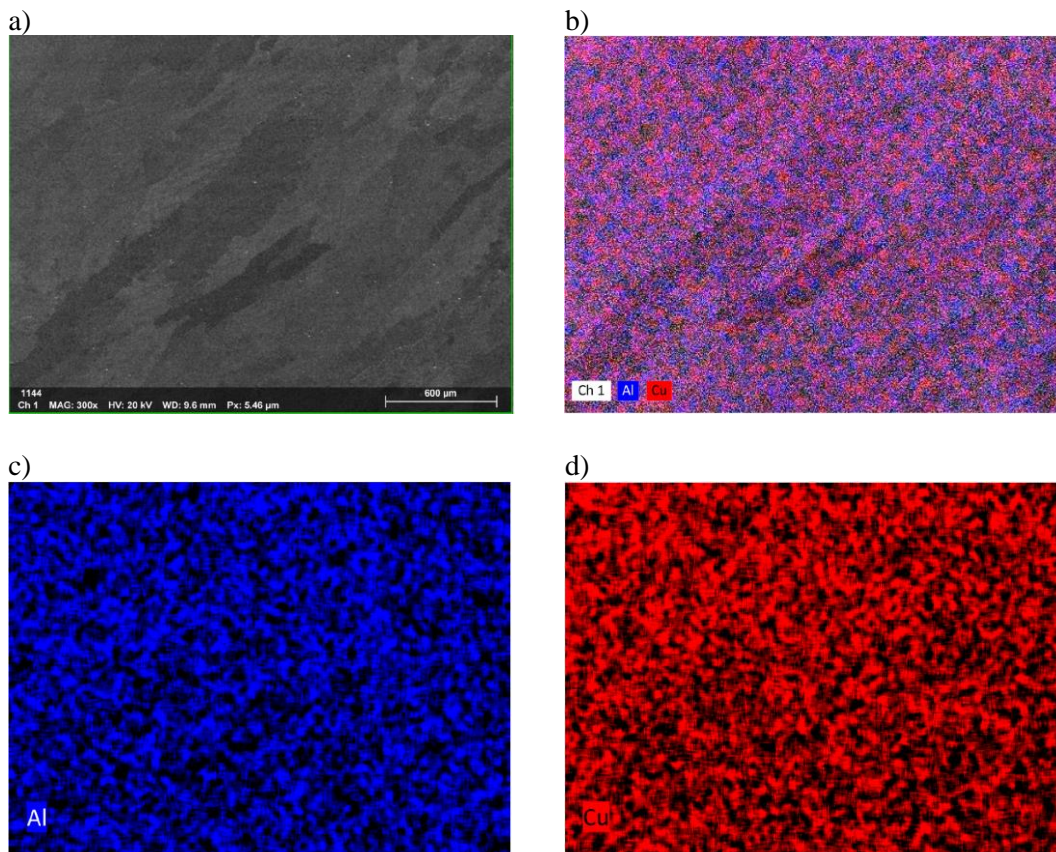


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	91,2	7,9	0,9
2	91,3	7,8	0,9
3	91,0	8,1	0,9
4	91,4	7,8	0,8
5	91,9	7,4	0,7
6	91,7	7,6	0,7

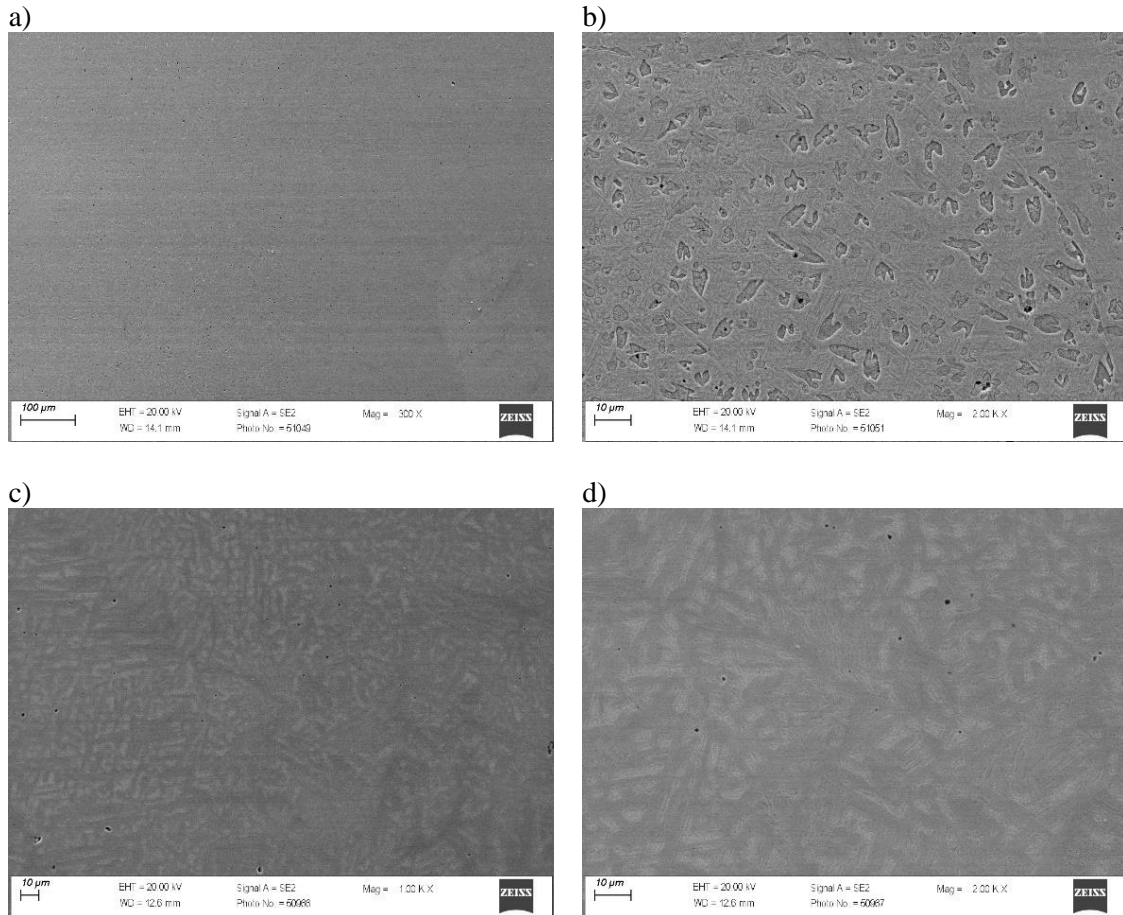


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	91,6	7,8	0,6
2	91,4	7,9	0,7
3	91,1	8,2	0,7
4	91,4	7,8	0,8
5	90,5	8,8	0,7
6	91,8	7,7	0,5

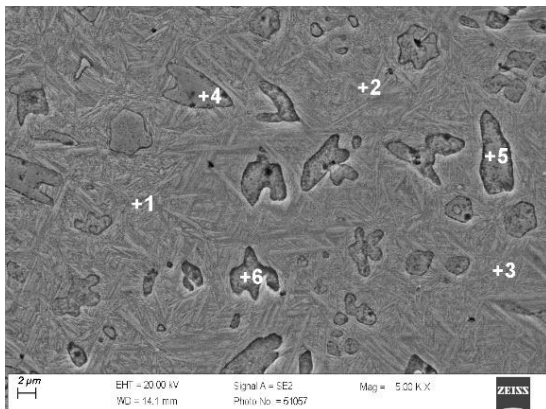
Rysunek 47. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl₁₈ (DC-, 150A, 18,5V) wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



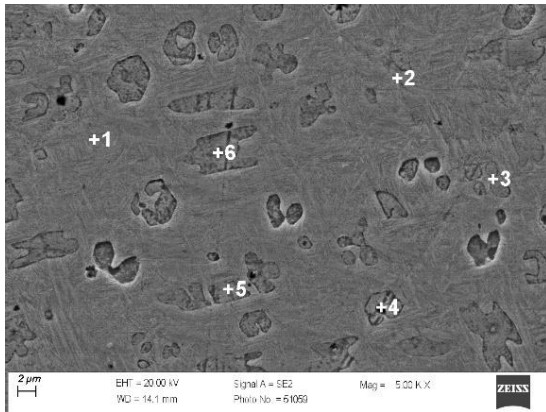
Rysunek 48. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl₁₈ (DC-, 150A, 18,5V),
a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar grani napoiny



Rysunek 49. Obrazy mikroskopowe CuAl12 (AC, 160A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:
a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar lica napoiny

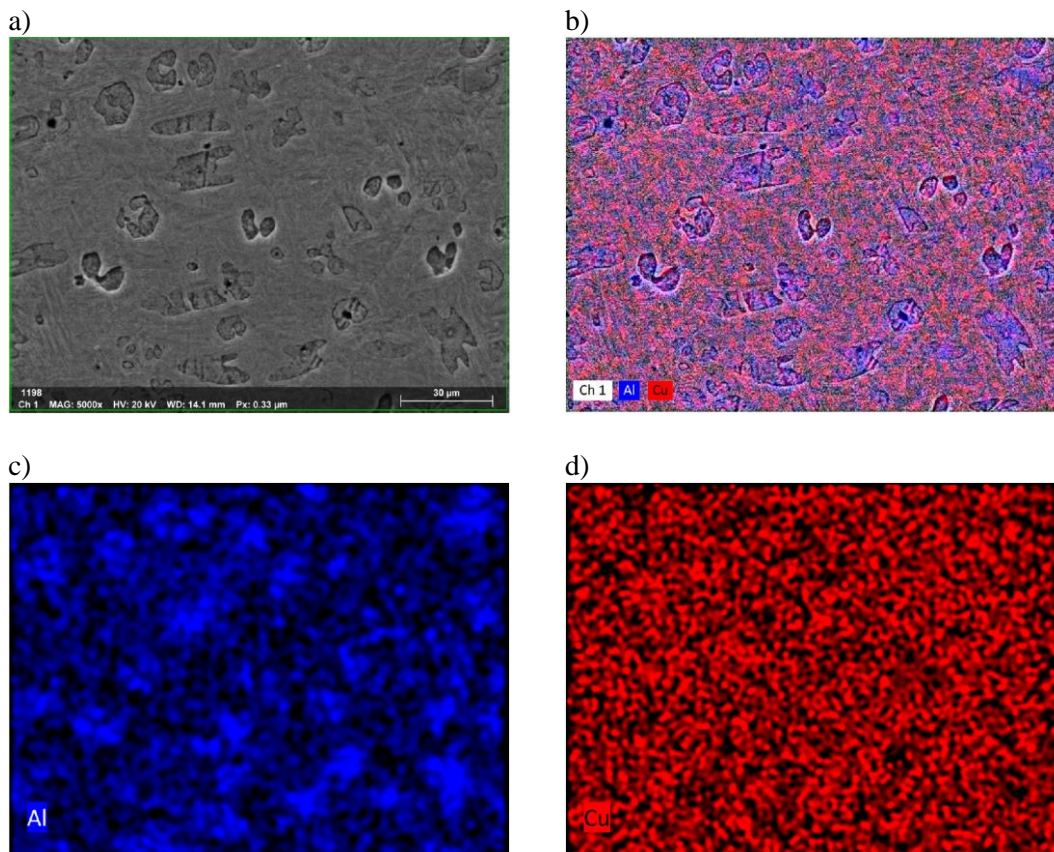


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	89,1	10,9
2	88,7	11,3
3	89,0	11,0
4	83,7	16,3
5	83,9	16,1
6	84,3	15,7



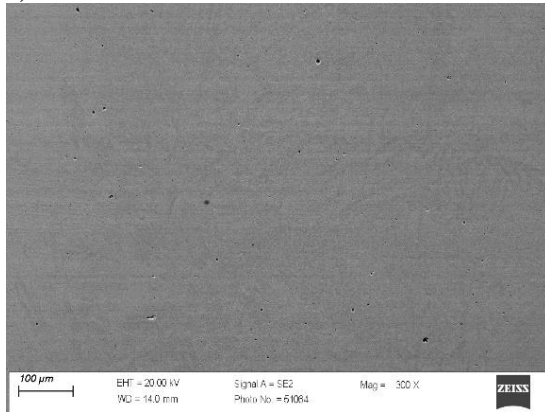
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	88,5	11,5
2	87,6	12,4
3	87,8	12,2
4	83,0	17,0
5	84,5	15,5
6	83,0	17,0

Rysunek 50. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl12 (AC, 160A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

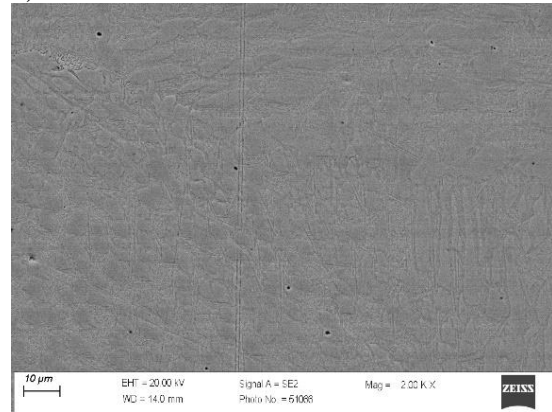


Rysunek 51. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 (AC, 160A, 17V),
a) pow. 5000x, b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar lica napoiny

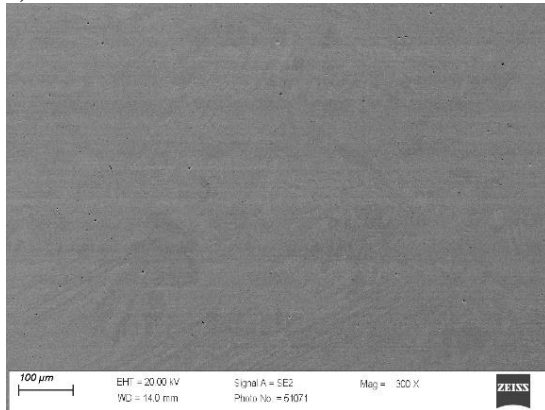
a)



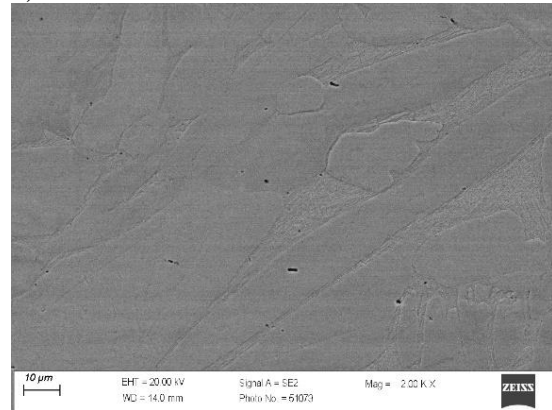
b)



c)

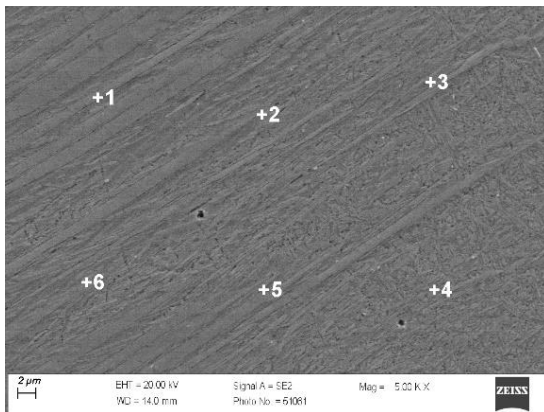


d)

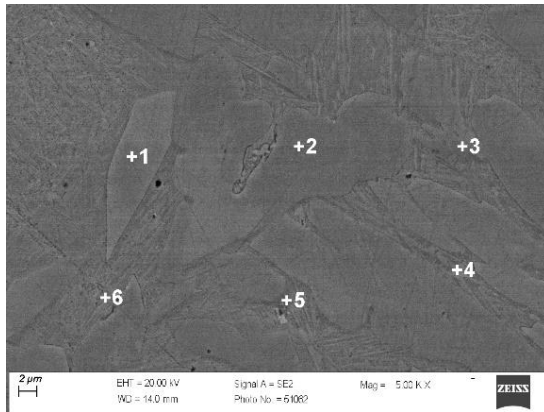


Rysunek 52. Obrazy mikroskopowe CuAl12 (AC, 160A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar środka napoiny

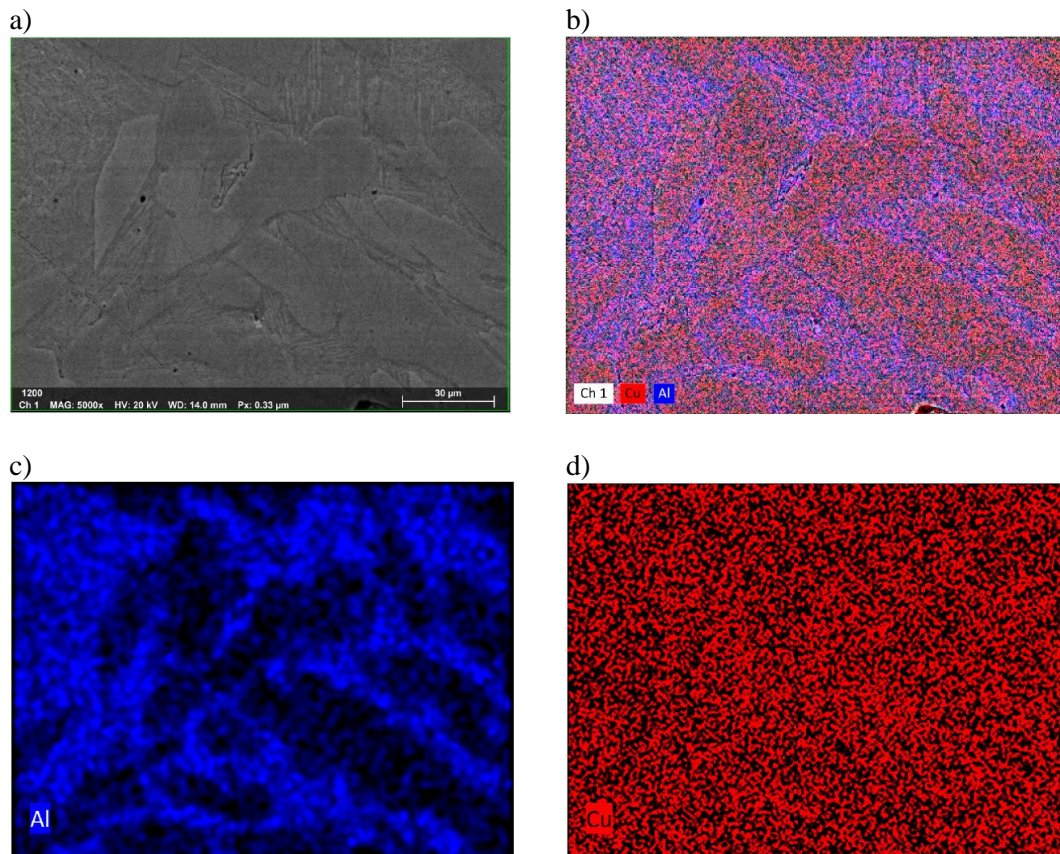


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	88,3	11,7
2	88,0	12,0
3	88,4	11,6
4	88,9	11,1
5	90,2	9,8
6	88,6	11,4

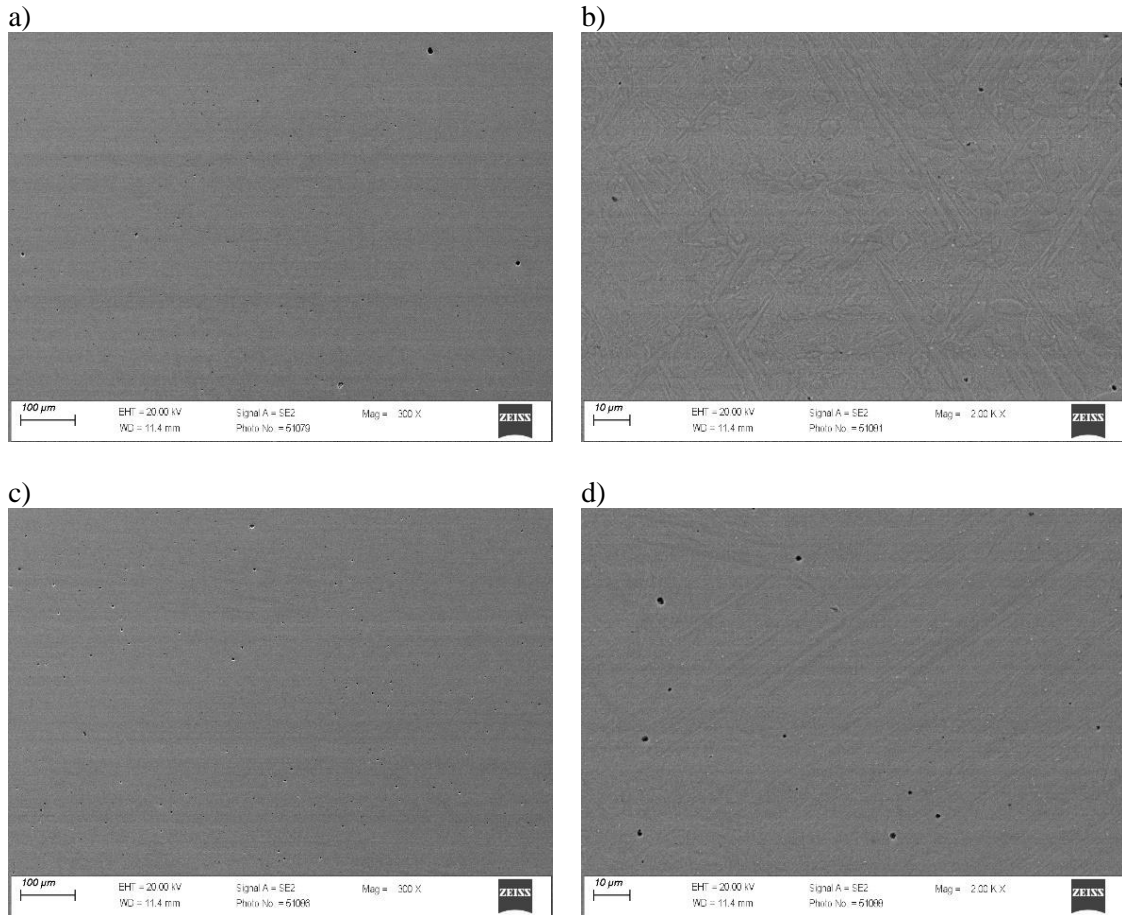


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	90,6	9,4
2	91,5	8,5
3	90,9	9,1
4	88,0	12,0
5	87,7	12,3
6	87,9	12,1

Rysunek 53. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl12 (AC, 160A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

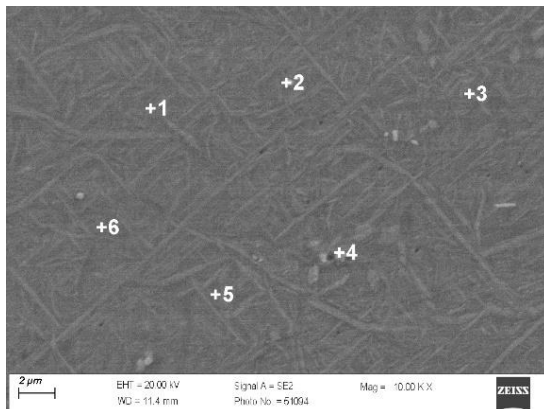


Rysunek 54. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 (AC, 160A, 17V);
a) pow. 5000x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar środka napoiny

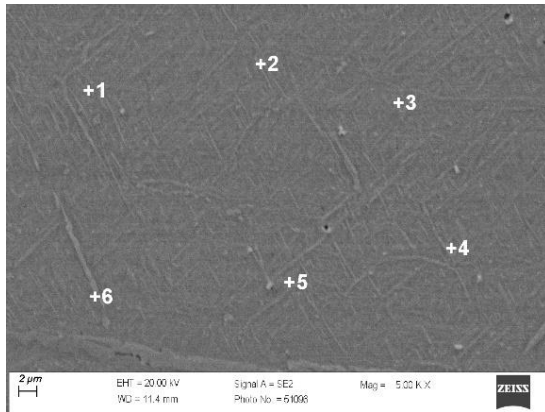


Rysunek 55. Obrazy mikroskopowe CuAl12 (AC, 160A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar grani napoiny

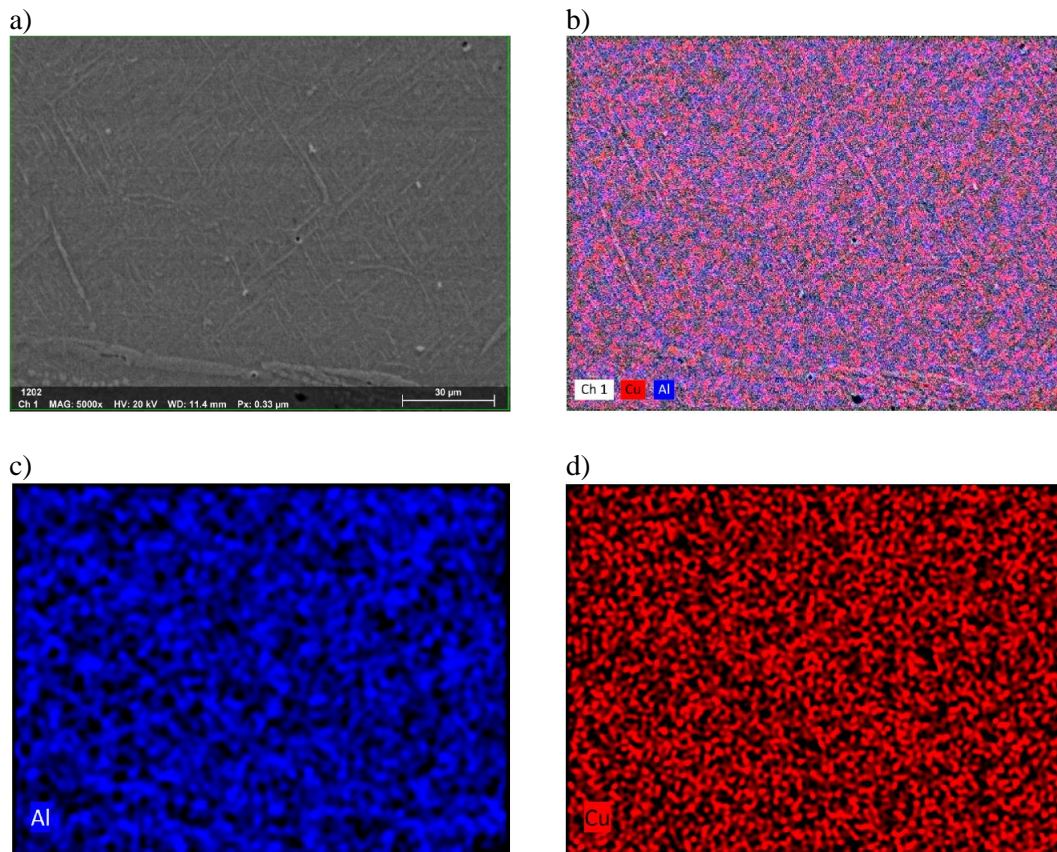


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	87,3	12,2	0,5
2	87,2	12,1	0,7
3	87,9	11,5	0,6
4	87,8	11,6	0,6
5	88,3	11,1	0,6
6	87,7	11,7	0,6

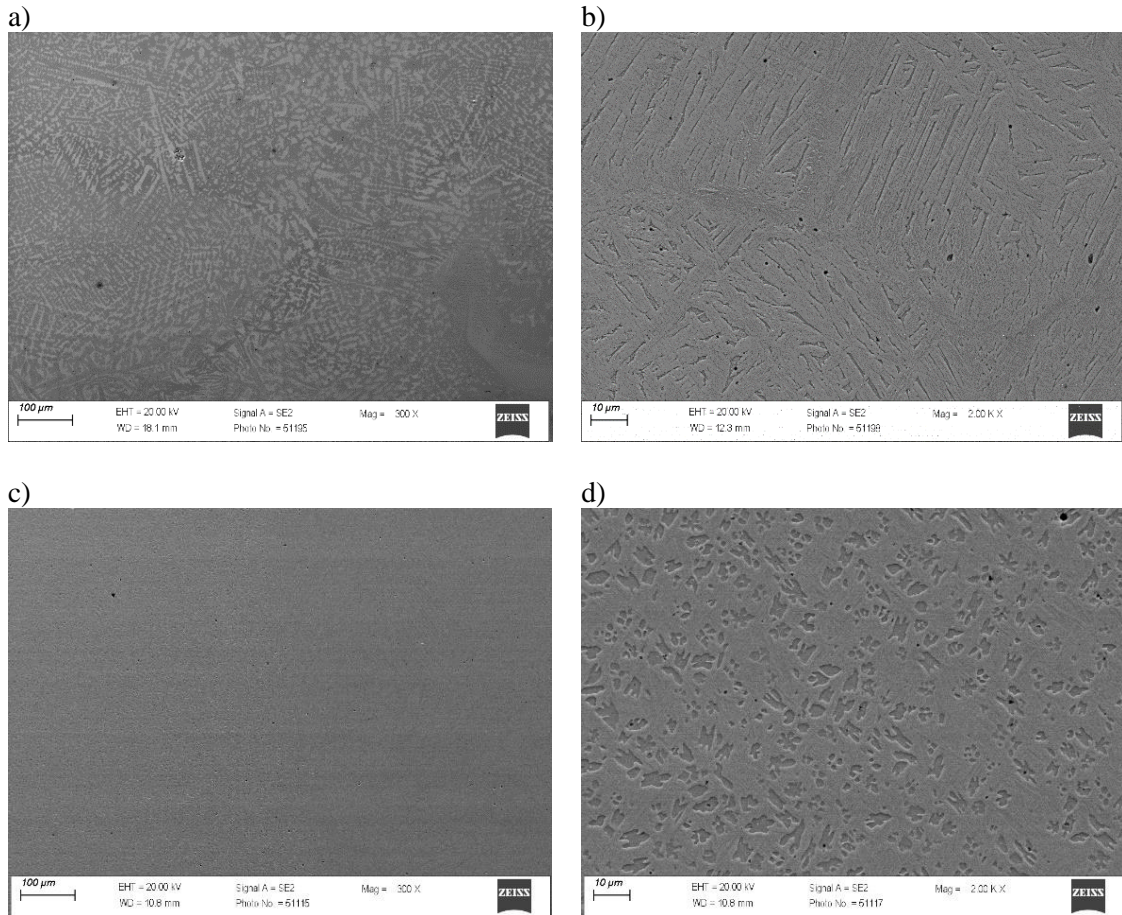


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Fe
1	87,6	11,3	1,1
2	87,6	11,4	0,9
3	88,1	11,2	0,7
4	87,3	11,9	0,8
5	87,5	11,5	1,0
6	88,2	11,0	0,8

Rysunek 56. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl12 (AC, 160A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

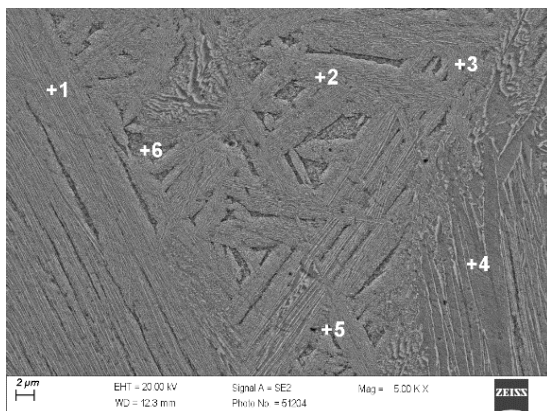


Rysunek 57. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 (AC, 160A, 17V);
a) pow. 5000x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al,
d) koncentracja Cu. Obszar grani napoiny

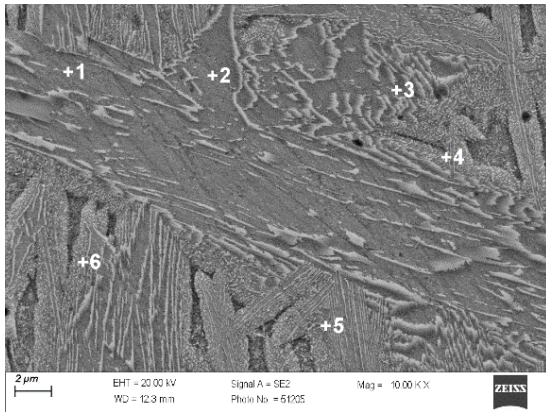


Rysunek 58. Obrazy mikroskopowe CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), trawienie Na₂Cr₂O₇:

a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar lica napoiny

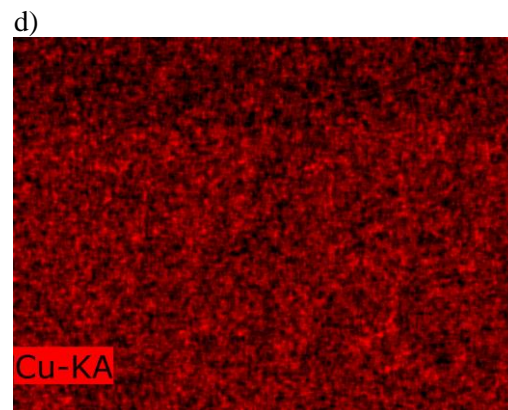
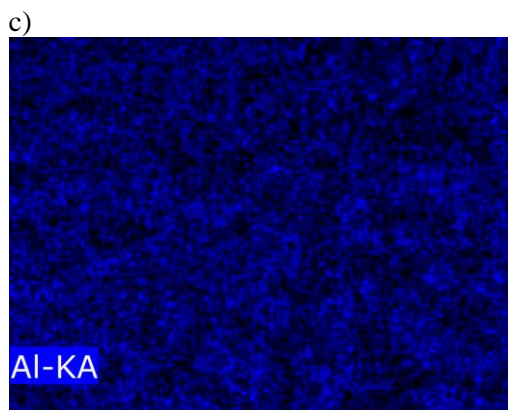
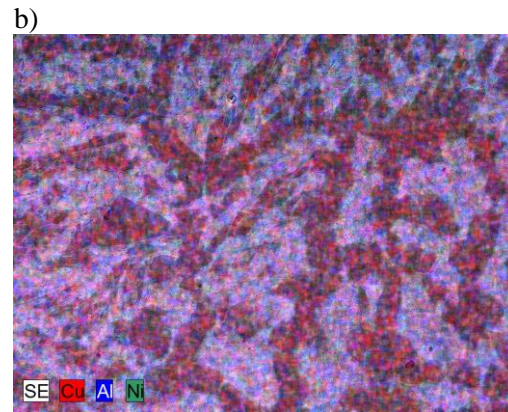
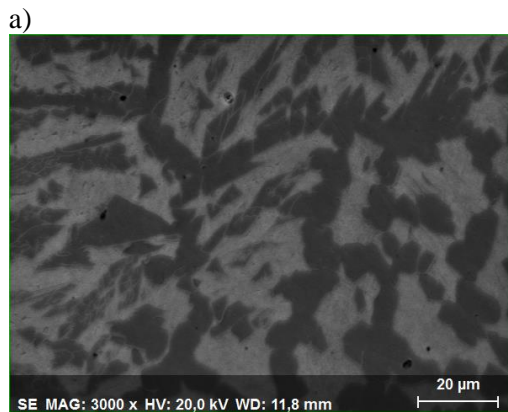


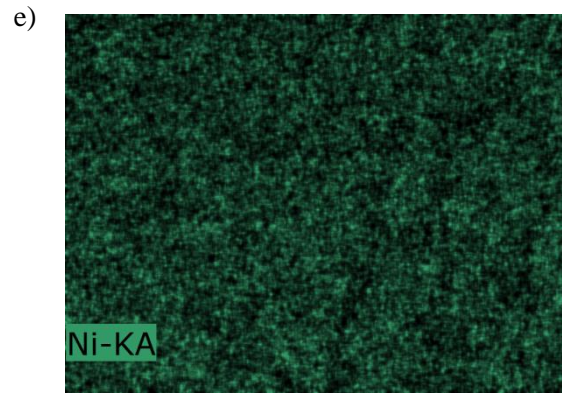
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	86,5	6,9	6,6
2	86,0	7,4	6,6
3	85,9	7,3	6,8
4	82,6	9,5	7,9
5	81,1	10,0	8,9
6	81,9	9,5	8,6



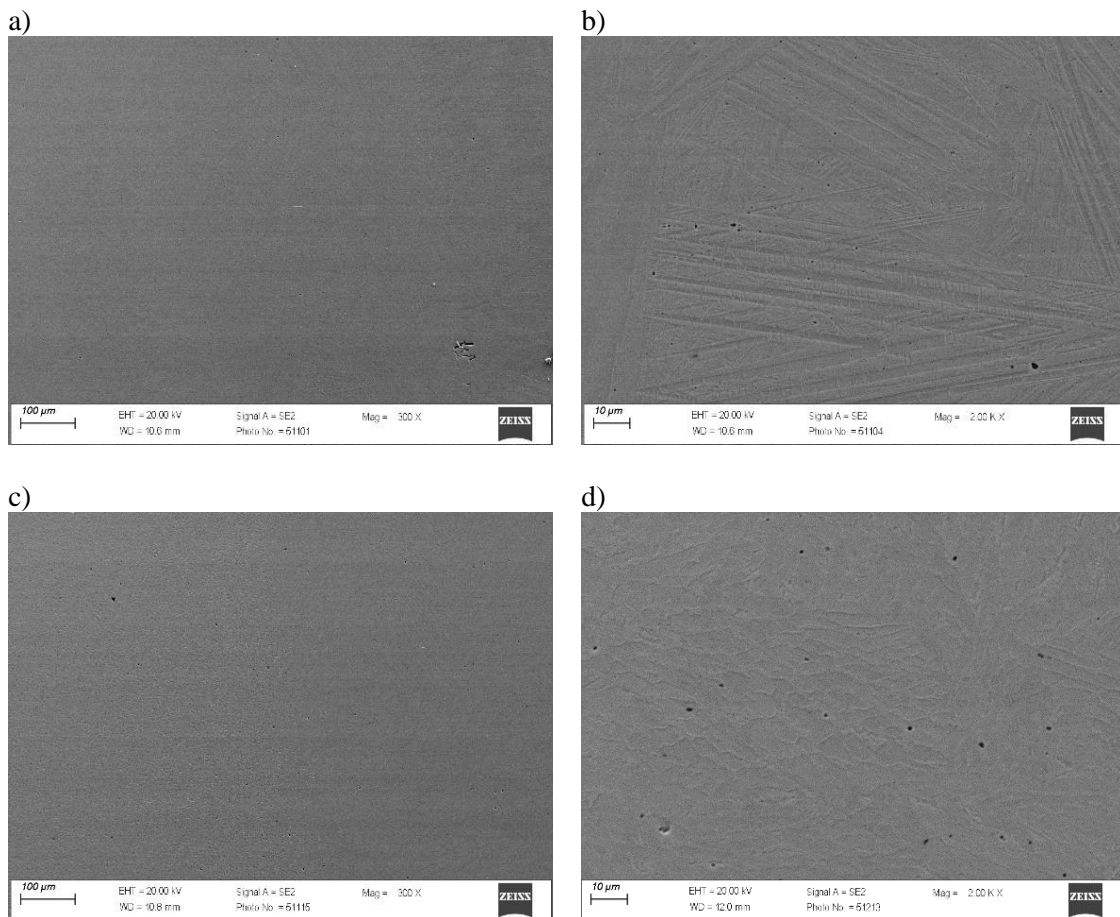
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	87,7	6,5	5,8
2	87,4	6,6	6,0
3	87,5	6,6	5,9
4	80,9	9,5	9,6
5	80,1	9,8	10,1
6	81,6	9,2	9,2

Rysunek 59. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

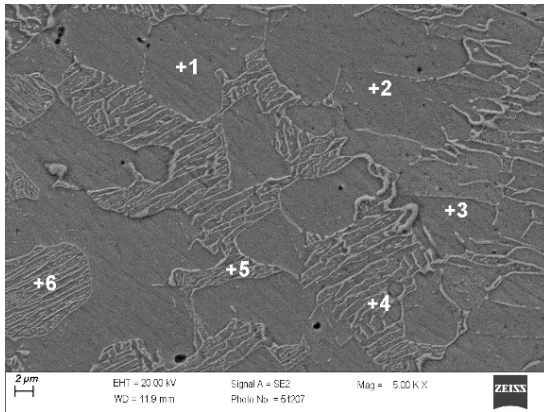




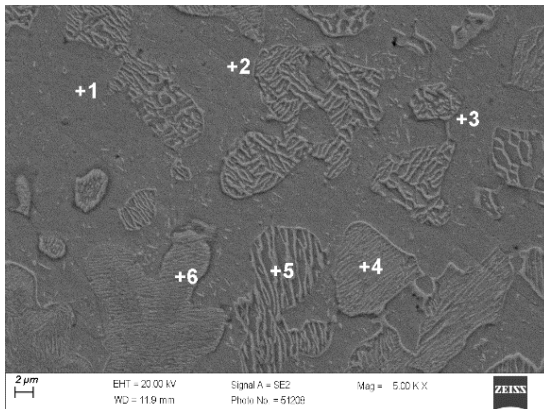
Rysunek 60. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V);
 a) pow. 3000x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,
 e) koncentracja Ni. Obszar lica napoiny



Rysunek 61. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl10Ni10 (AC, 170A,
 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

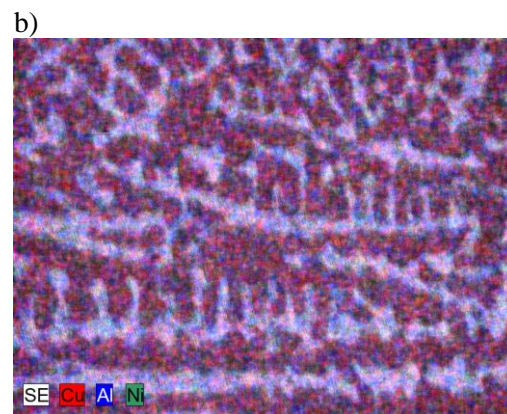
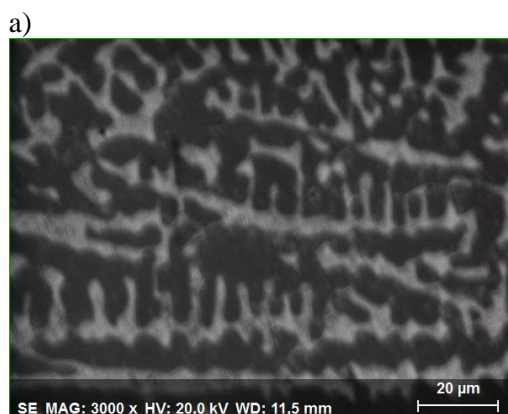


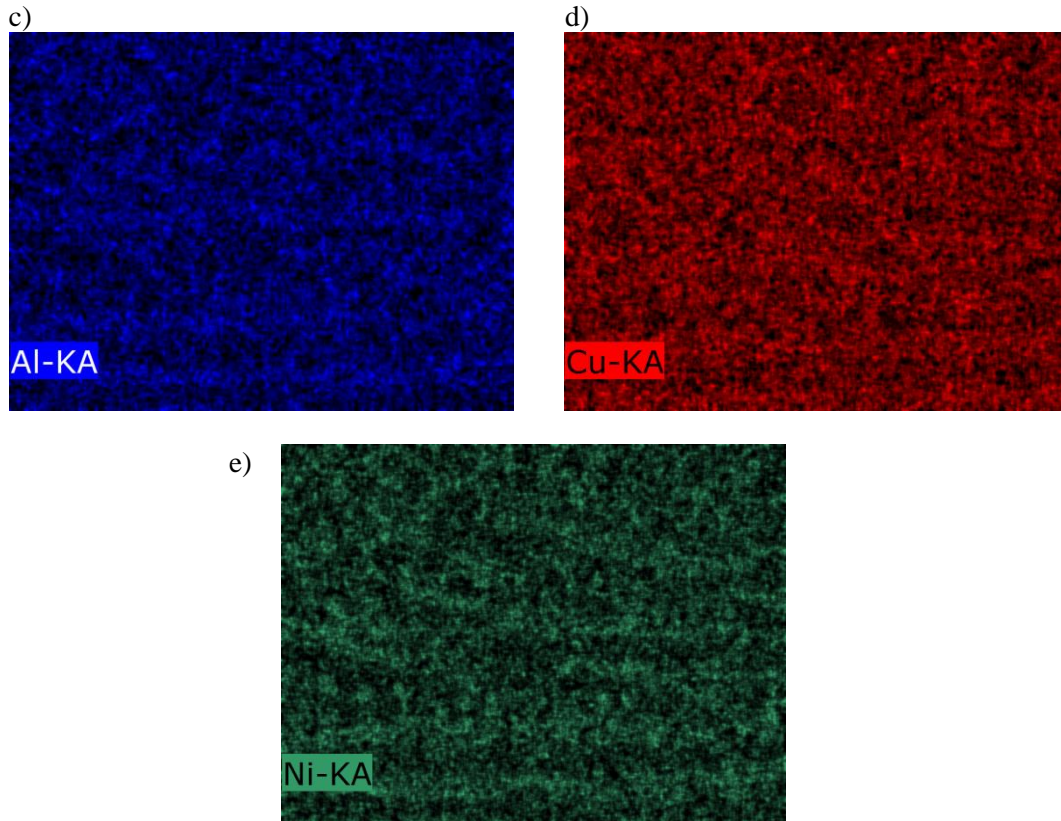
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	87,8	6,6	5,6
2	87,6	6,9	5,5
3	86,4	7,2	6,4
4	81,4	9,4	9,2
5	82,4	8,9	8,7
6	81,4	9,2	9,4



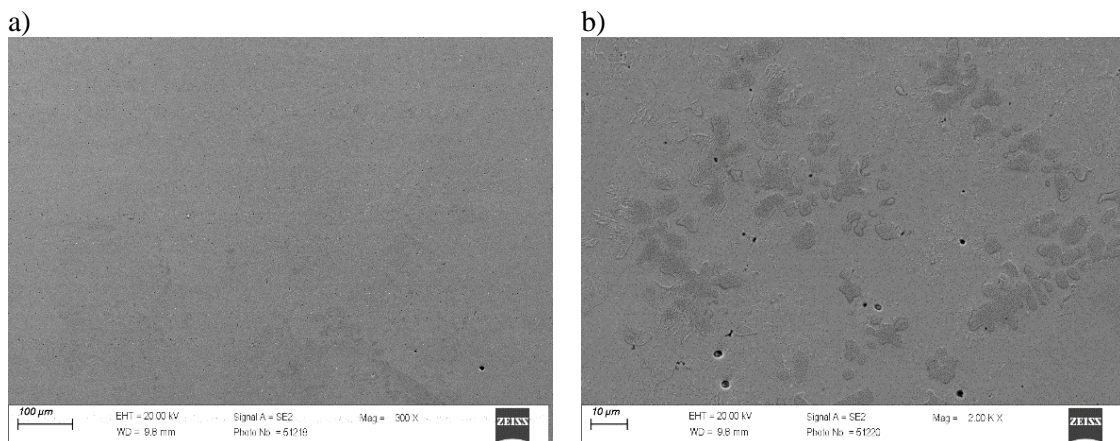
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	85,6	7,8	6,6
2	87,9	6,8	5,3
3	87,5	6,8	5,7
4	85,2	7,9	6,9
5	81,2	9,2	9,6
6	82,2	9,0	8,8

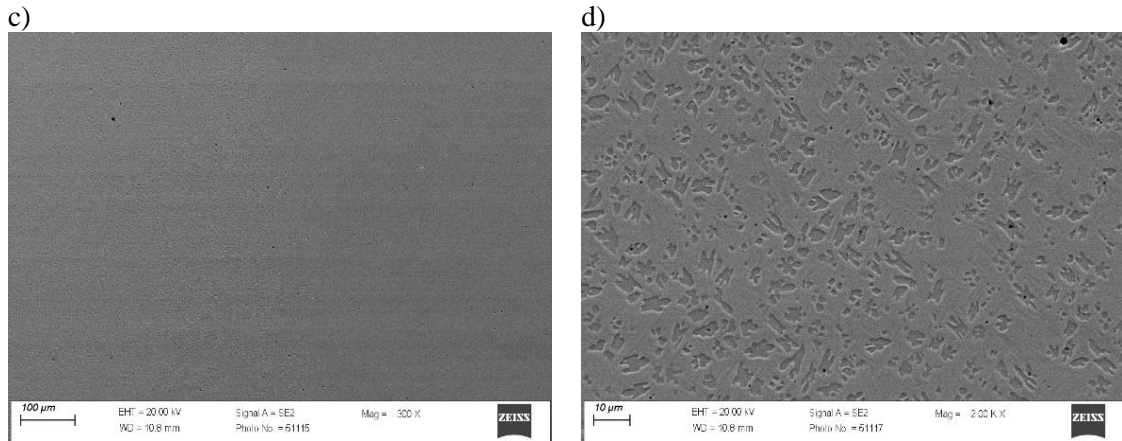
Rysunek 62. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



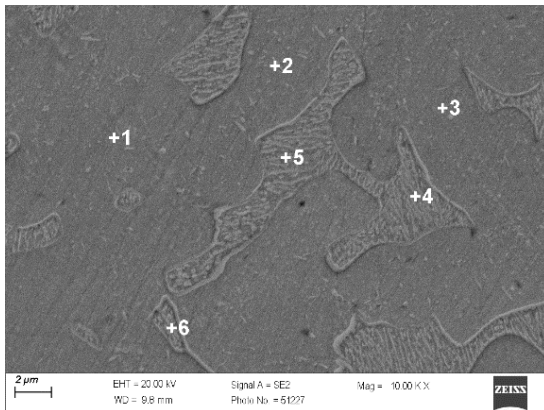


Rysunek 63. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl₁₀Ni₁₀ (AC, 170A, 17,5V);
a) pow. 3000x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,
e) koncentracja Ni. Obszar środka napoiny

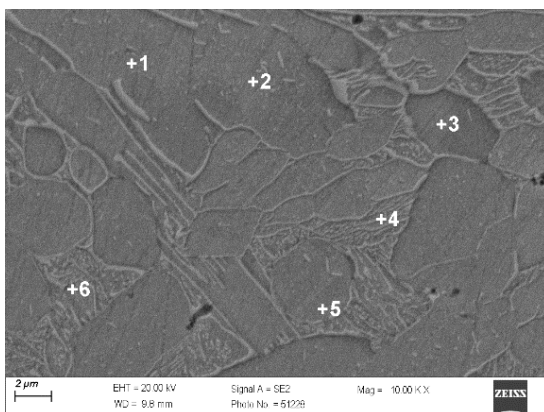




Rysunek 64. Obrazy mikroskopowe CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), trawienie Na₂Cr₂O₇: a), c) pow. 300x, b), d) pow. 2000x. Obszar grani napoiny

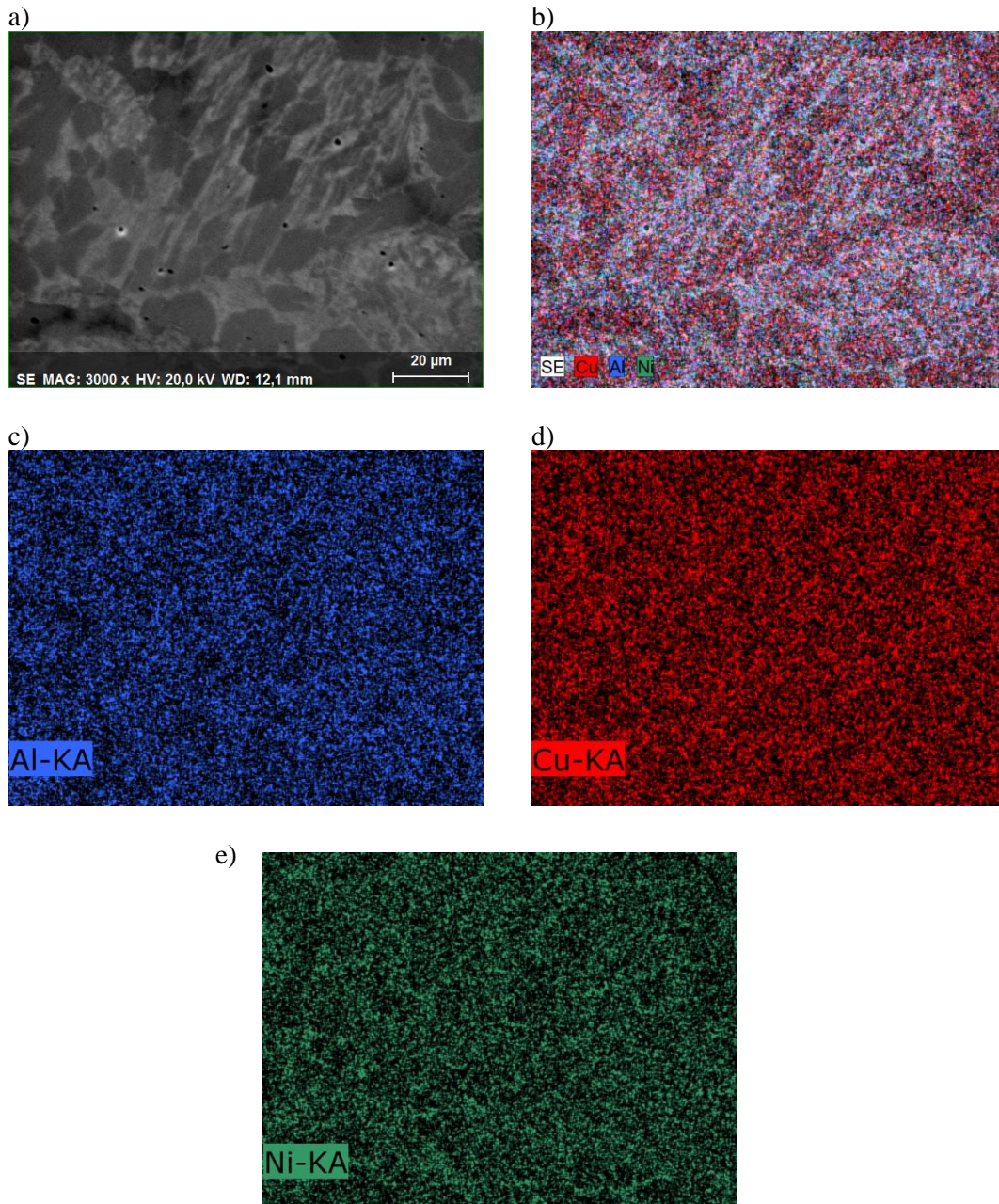


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas			
	Cu	Al	Ni	Fe
1	86,3	6,9	5,2	1,6
2	86,8	6,5	5,0	1,7
3	86,2	6,6	5,4	1,8
4	81,3	8,7	7,9	2,1
5	80,0	9,0	8,9	2,1
6	78,3	9,7	9,8	2,2

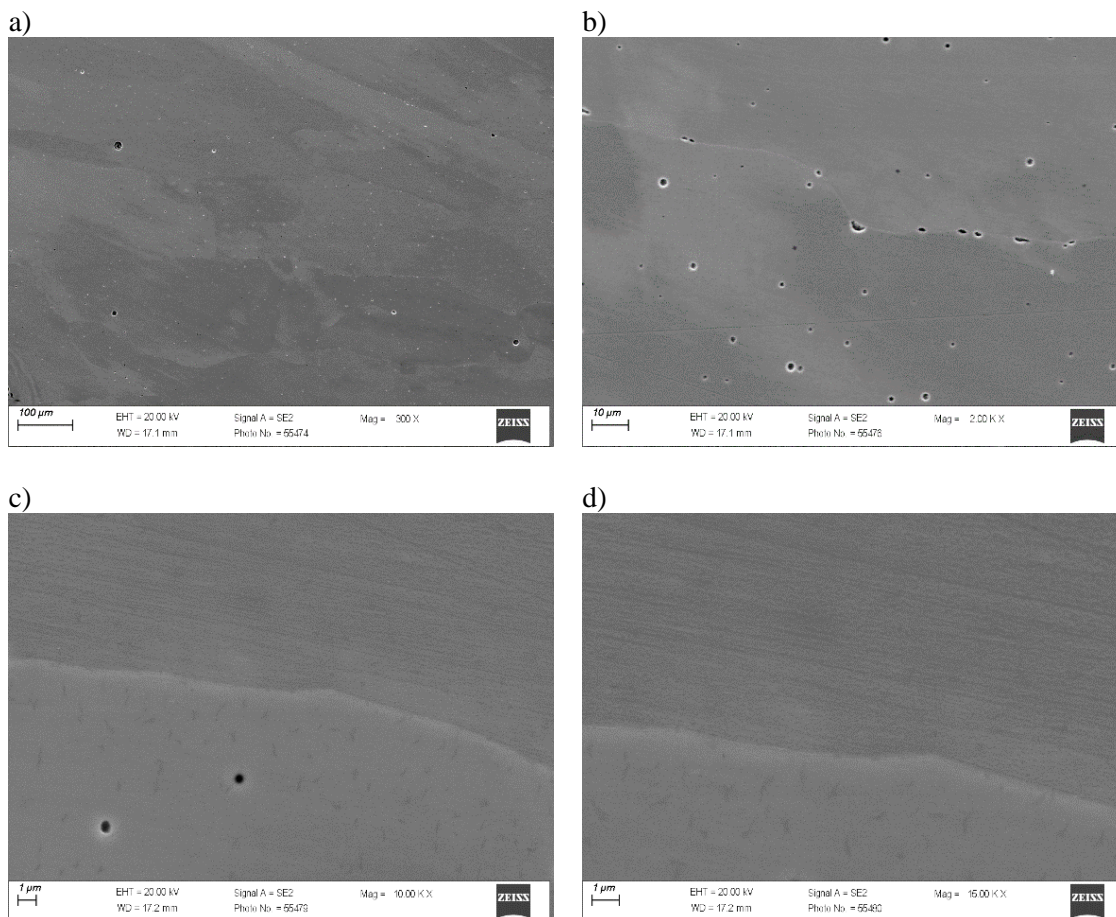


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas			
	Cu	Al	Ni	Fe
1	85,7	6,8	6,3	1,2
2	85,5	6,8	6,6	1,1
3	85,5	6,8	6,5	1,2
4	79,6	9,1	10,2	1,1
5	78,6	9,1	11,1	1,0
6	80,3	8,9	9,6	1,2

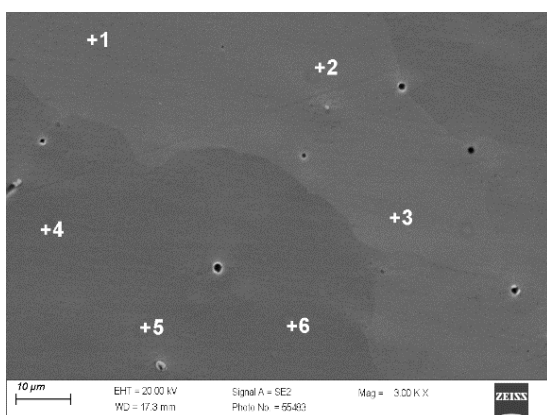
Rysunek 65. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl10Ni10 (AC, 170A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



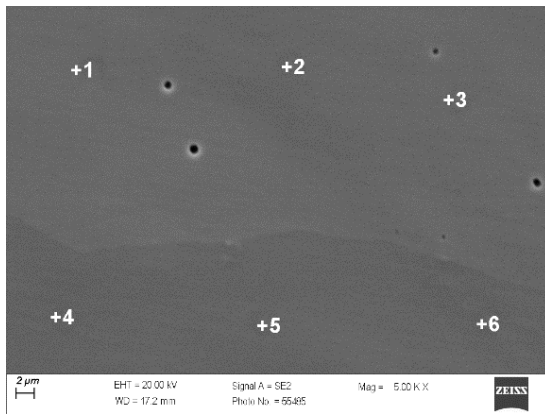
Rysunek 66. Mapa rozkładu pierwiastków $\text{CuAl}_{10}\text{Ni}_{10}$ (AC, 170A, 17,5V);
a) pow. 3000x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,
e) koncentracja Ni. Obszar grani napoiny



Rysunek 67. Obraz mikroskopowy CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:
a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x. Obszar lica napoiny

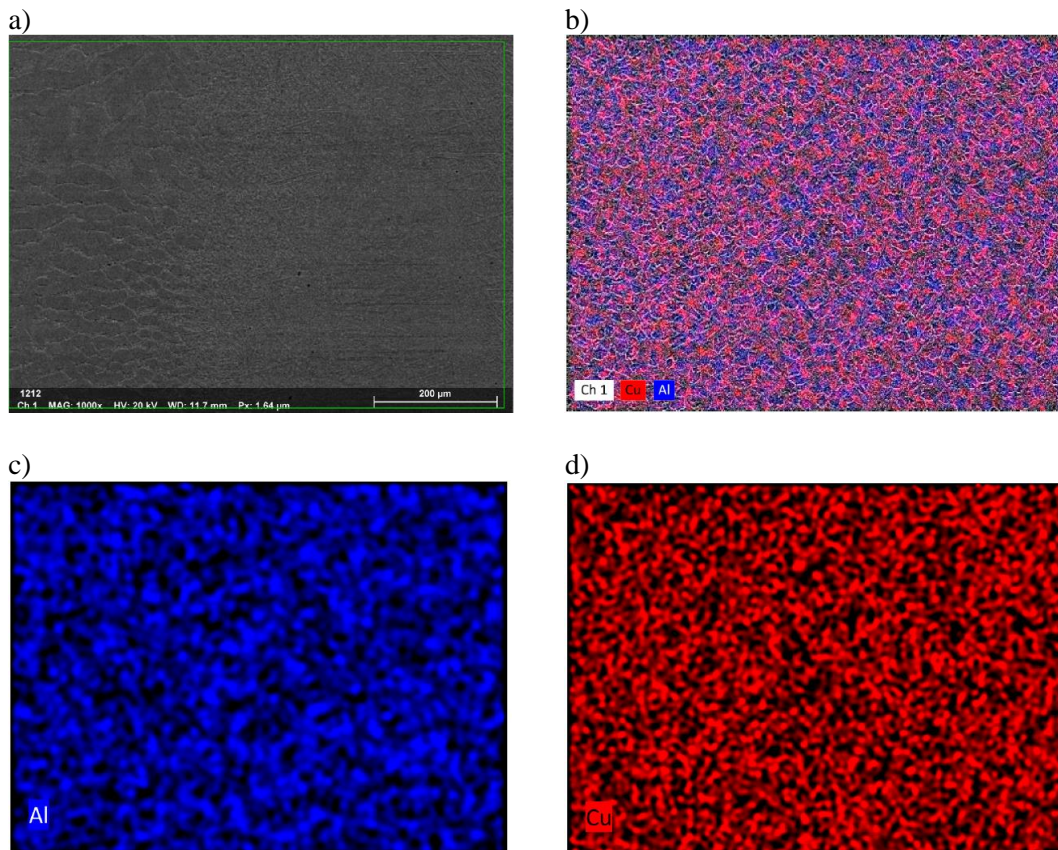


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	94,8	5,2
2	94,9	5,1
3	94,5	5,5
4	95,0	5,0
5	94,6	5,4
6	94,8	5,2



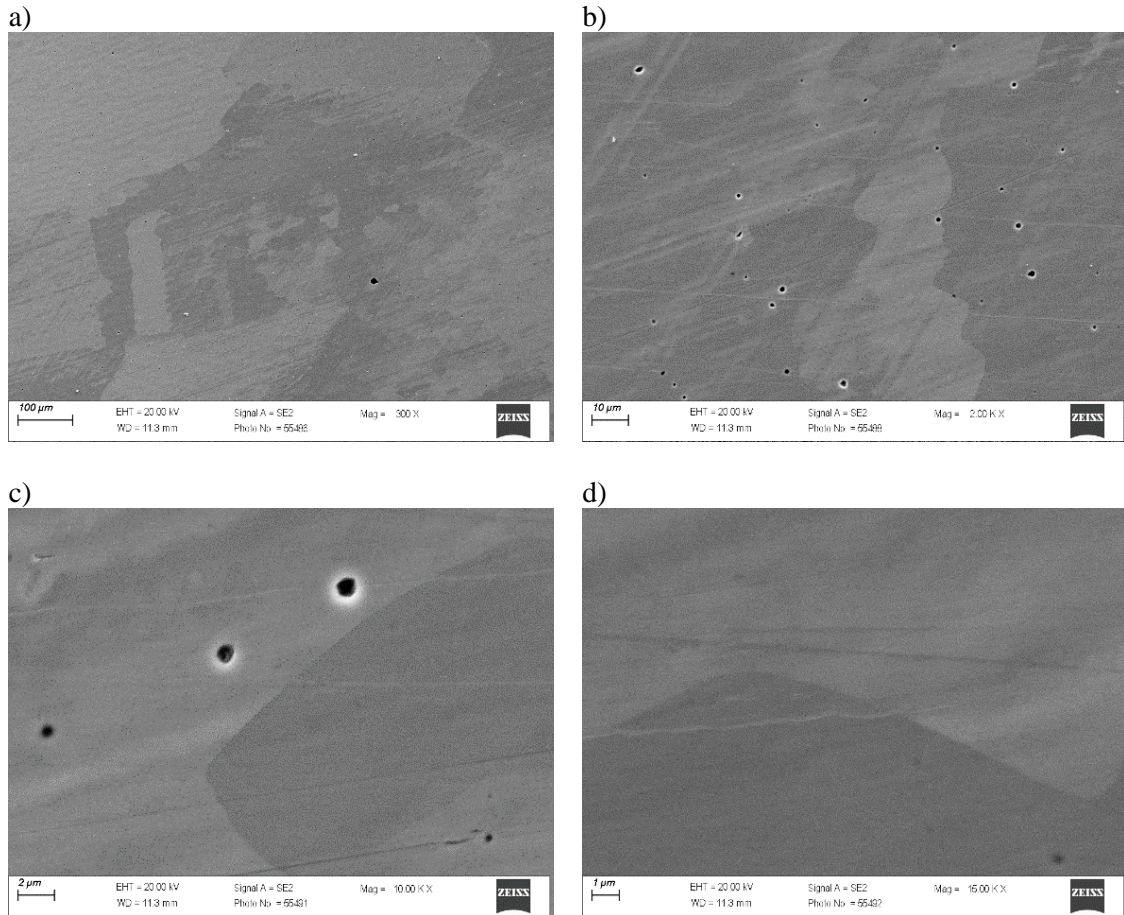
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	95,0	5,0
2	94,8	5,2
3	94,7	5,3
4	94,6	5,4
5	95,0	5,0
6	94,8	5,2

Rysunek 68. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



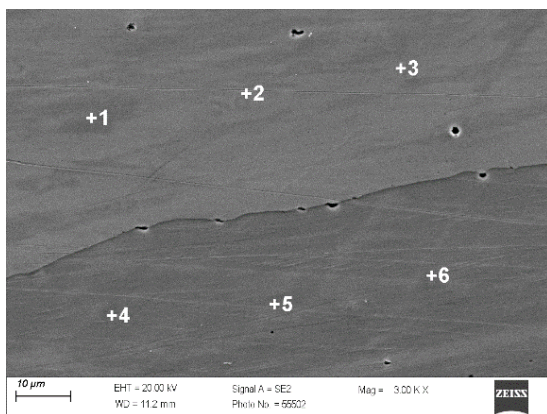
Rysunek 69. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V); a) pow. 1000x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu.

Obszar lica napoiny

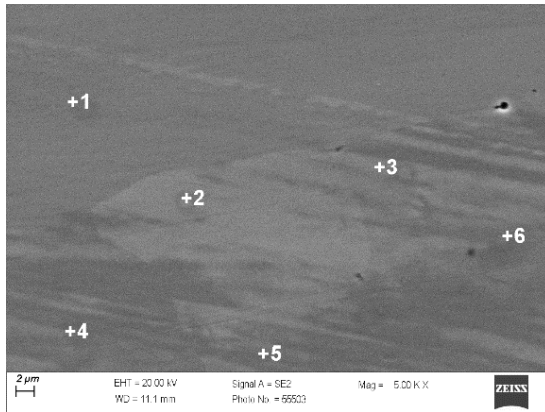


Rysunek 70. Obraz mikroskopowy CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), trawienie Na₂Cr₂O₇:

a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x. Obszar środka napoiwy

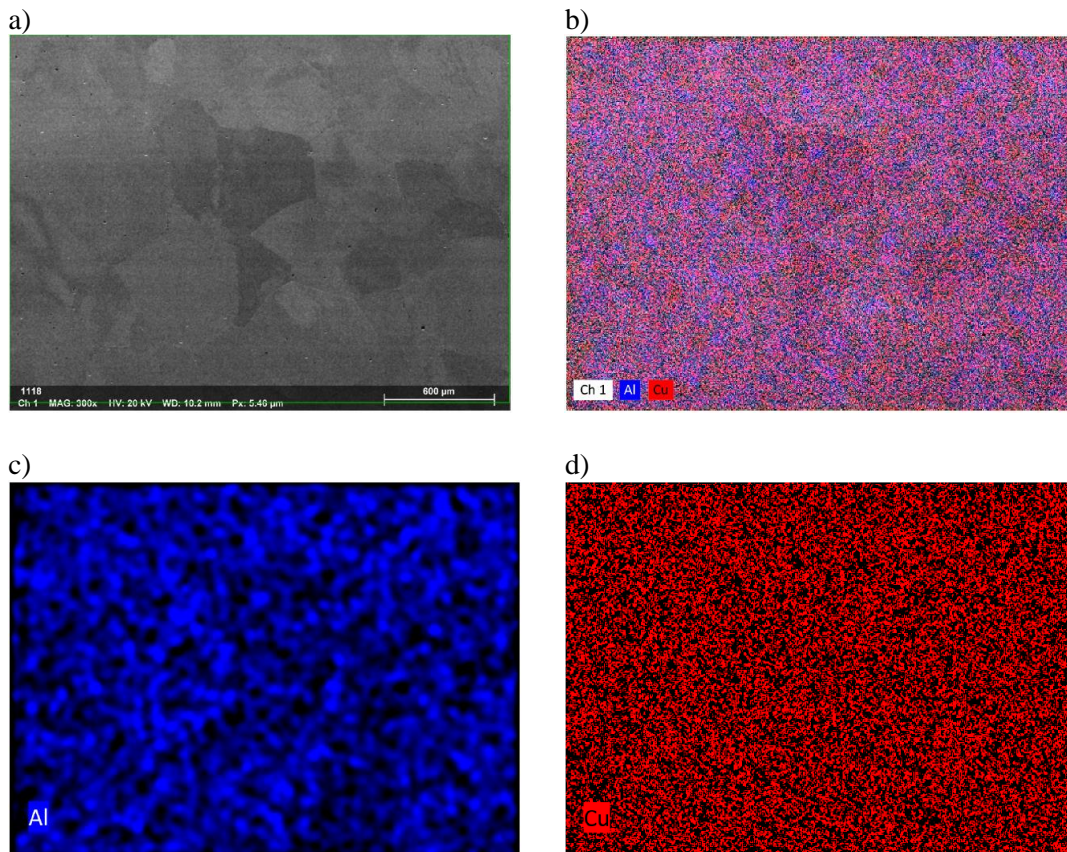


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	95,4	4,6
2	95,4	4,6
3	95,3	4,7
4	95,0	5,0
5	95,4	4,6
6	95,2	4,8



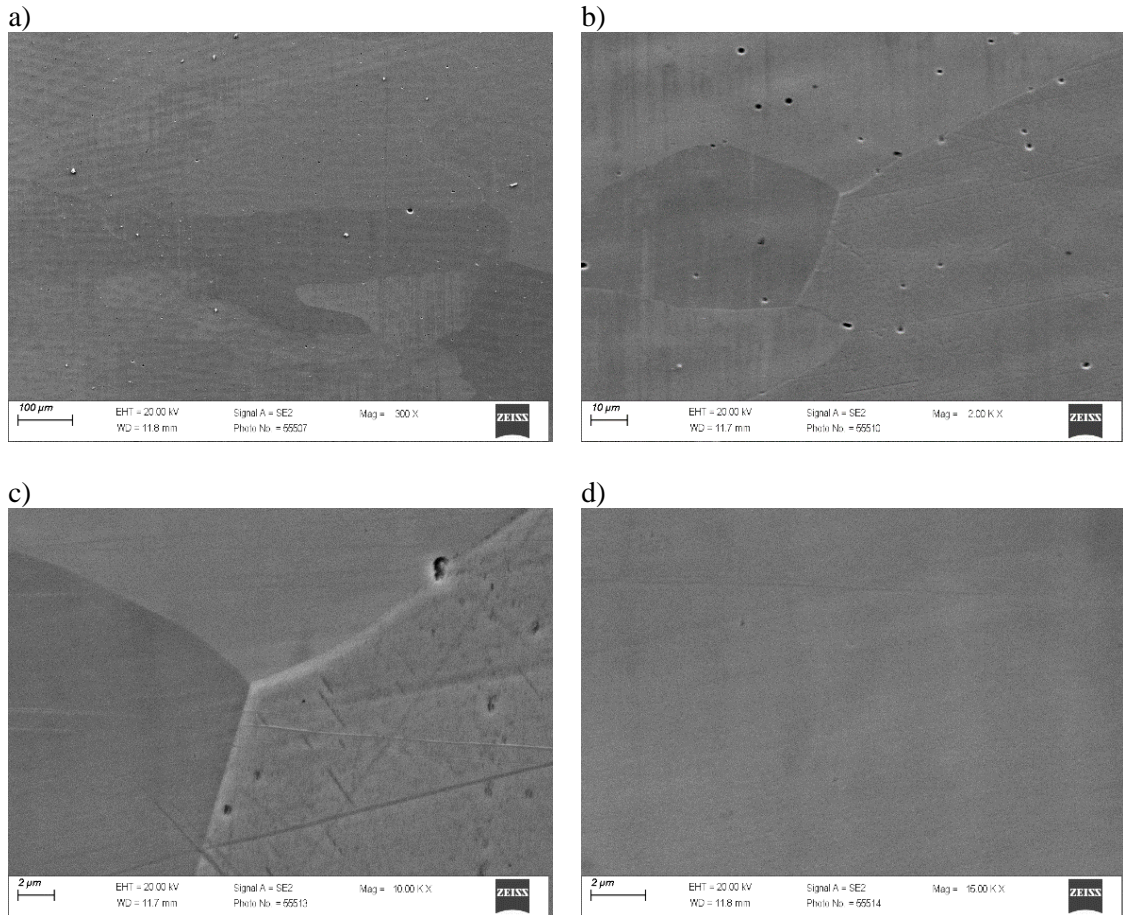
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	95,5	4,5
2	95,7	4,3
3	95,6	4,4
4	95,8	4,2
5	95,7	4,3
6	95,6	4,4

Rysunek 71. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



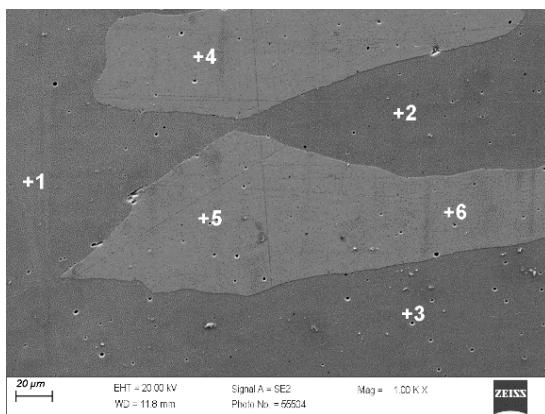
Rysunek 72. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V); a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu.

Obszar środka napoiny

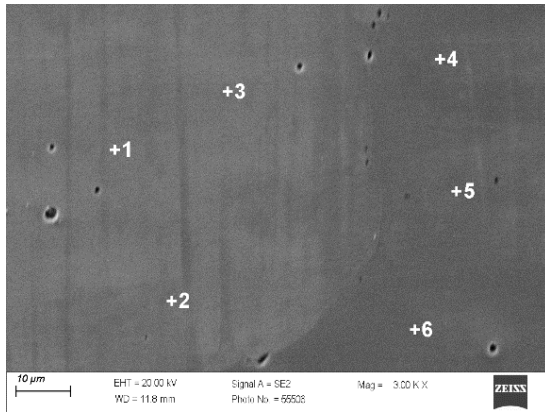


Rysunek 73. Obraz mikroskopowy CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:

a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x. Obszar grani napoiny

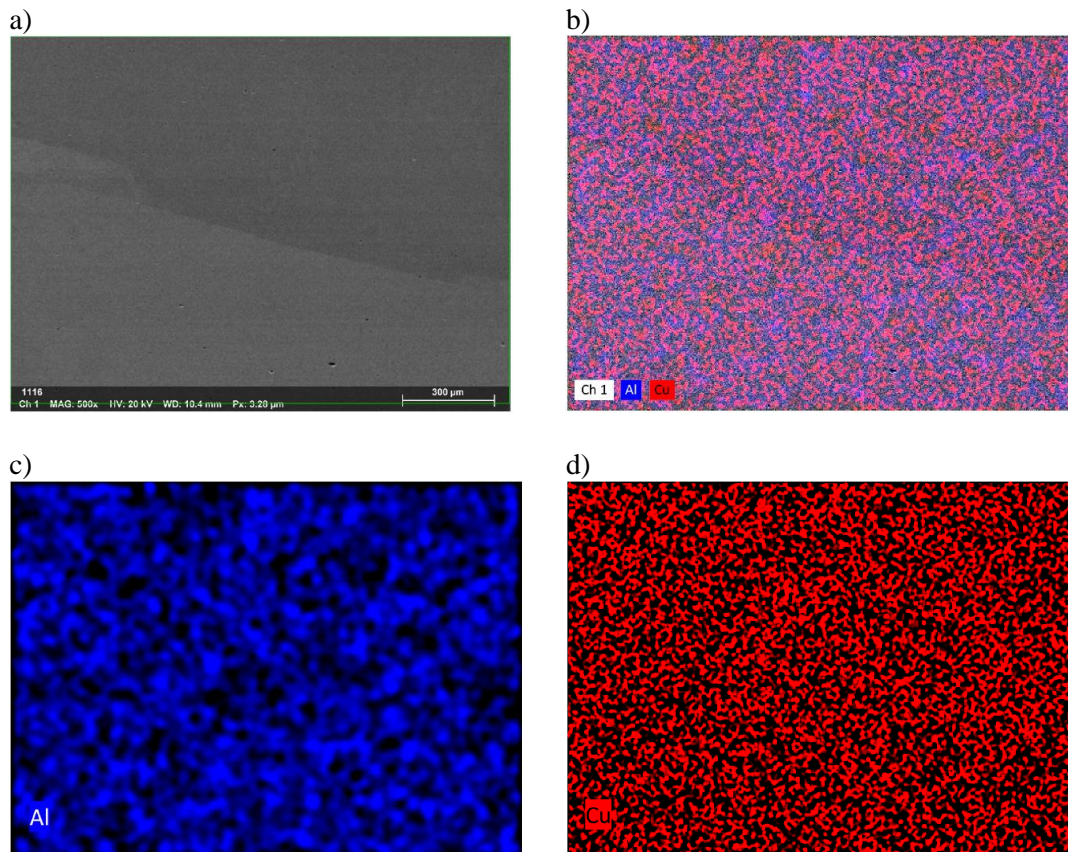


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	95,3	4,7
2	95,2	4,8
3	95,3	4,7
4	95,0	5,0
5	95,2	4,8
6	95,3	4,7



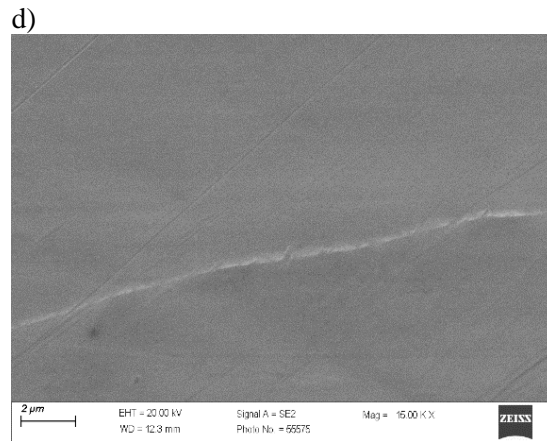
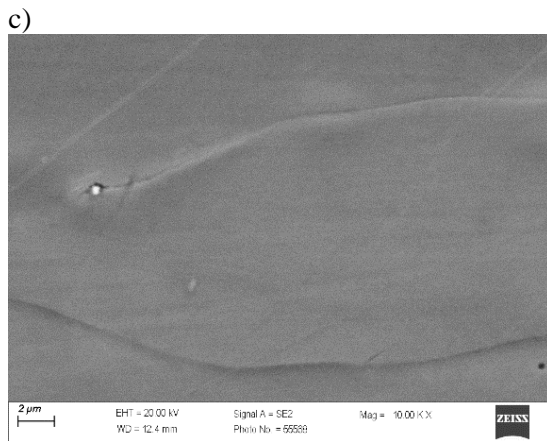
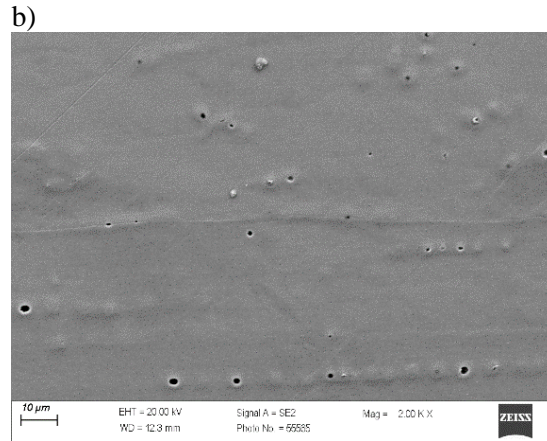
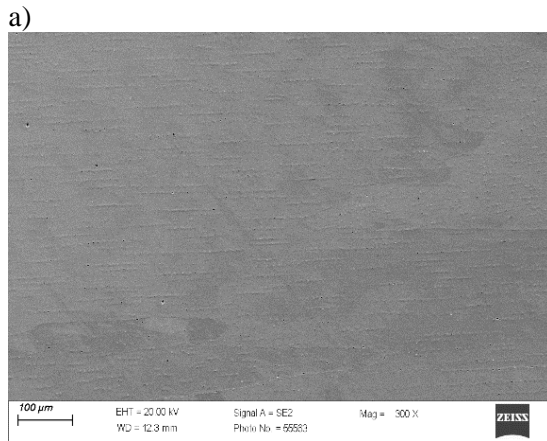
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas	
	Cu	Al
1	95,2	4,8
2	95,3	4,7
3	95,3	4,7
4	95,1	4,9
5	95,1	4,9
6	95,0	5,0

Rysunek 74. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

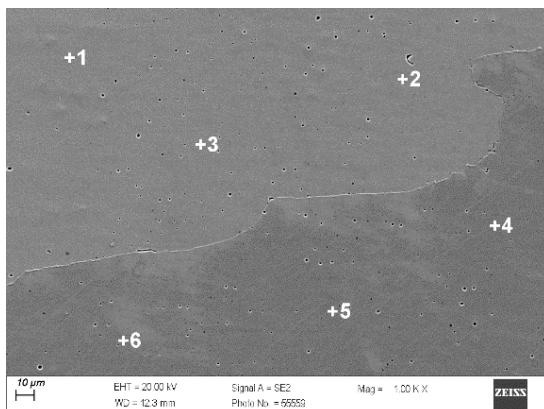


Rysunek 75. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl12 WAAM (AC, 117A, 17V); a) pow. 500x b) mapa rozkładu CuAl, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu.

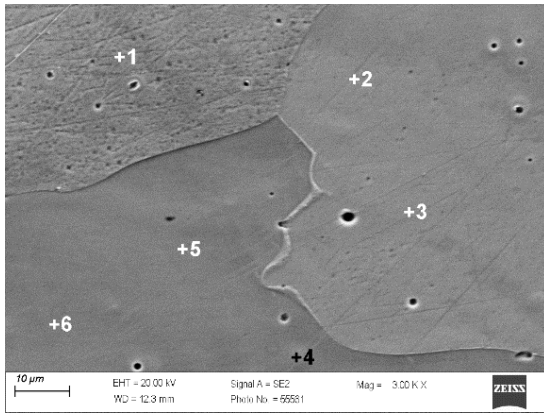
Obszar grani napoiny



Rysunek 76. Obraz mikroskopowy CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V),
trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x.
Obszar lica napoiny

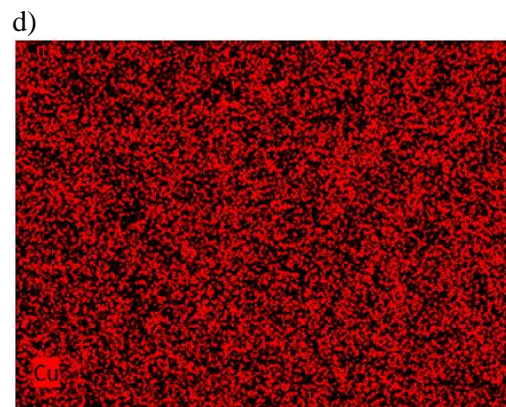
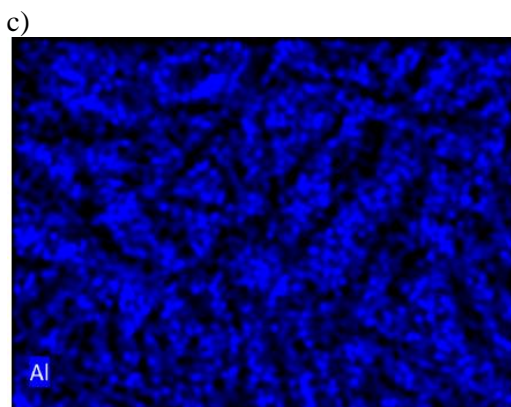
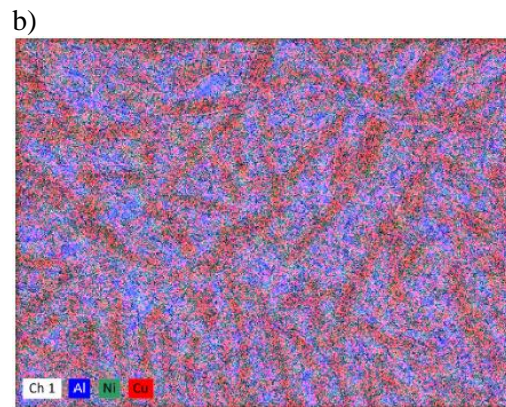
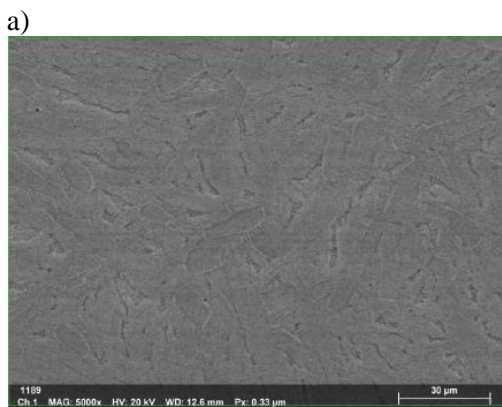


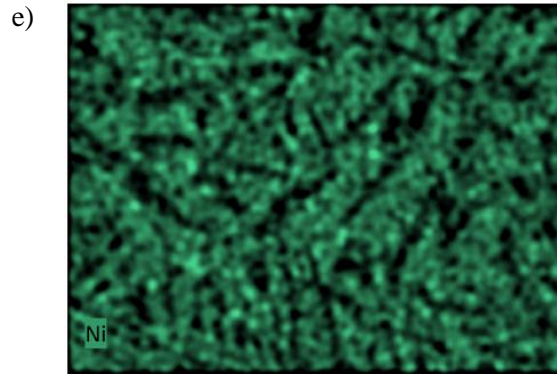
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	89,5	5,2	5,3
2	93,0	3,7	3,3
3	92,5	4,0	3,5
4	93,8	3,3	2,9
5	93,2	3,6	3,2
6	92,7	3,7	3,6



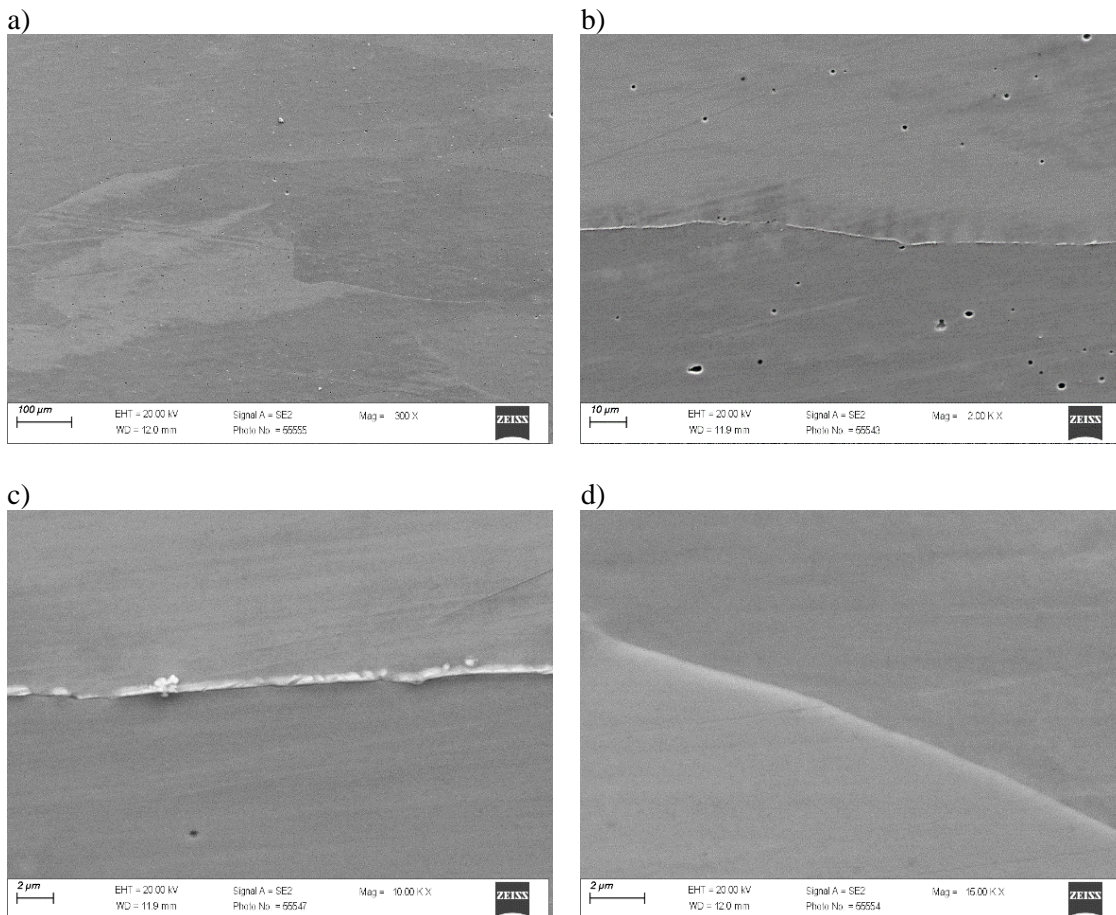
Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	92,8	3,5	3,7
2	92,4	3,7	3,9
3	93,2	3,5	3,2
4	93,2	3,6	3,2
5	92,8	3,6	3,6
6	92,6	3,8	3,6

Rysunek 77. Analizy punktowe wybranych obszarów lica napoiny CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków

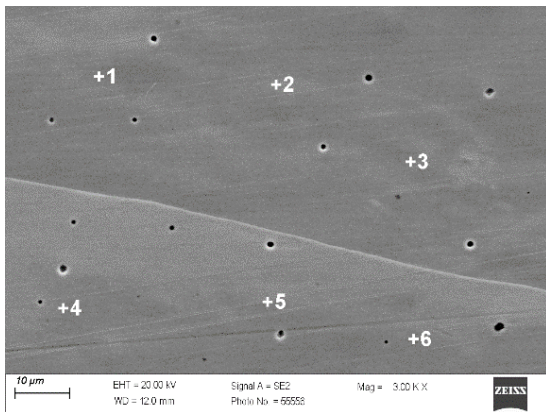




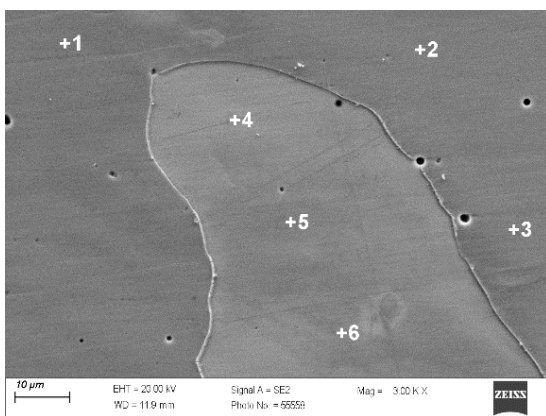
Rysunek 78. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V);
 a) pow. 5000x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,
 e) koncentracja Ni. Obszar lica napoiny



Rysunek 79. Obraz mikroskopowy CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V),
 trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x.
 Obszar środka napoiny

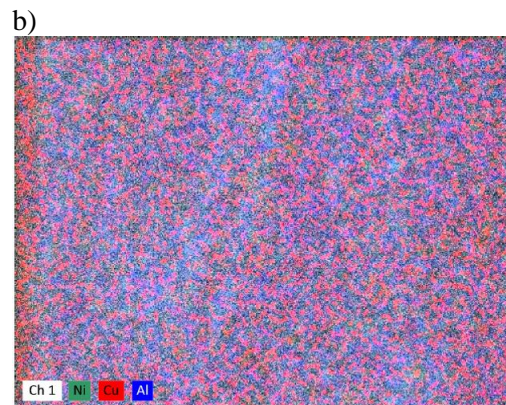
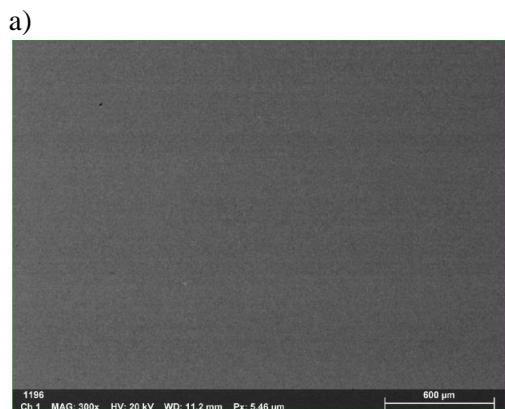


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	93,2	3,6	3,2
2	93,6	3,5	2,9
3	93,7	3,5	2,8
4	93,3	3,5	3,2
5	93,7	3,5	2,8
6	93,4	3,6	3,0

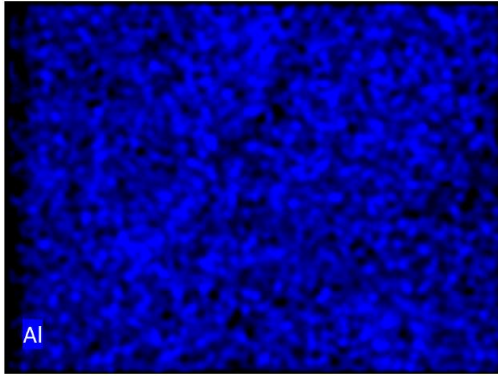


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	92,8	3,4	3,8
2	92,5	3,6	3,9
3	92,8	3,7	3,5
4	93,2	3,7	3,1
5	92,6	3,5	3,9
6	92,5	3,7	3,8

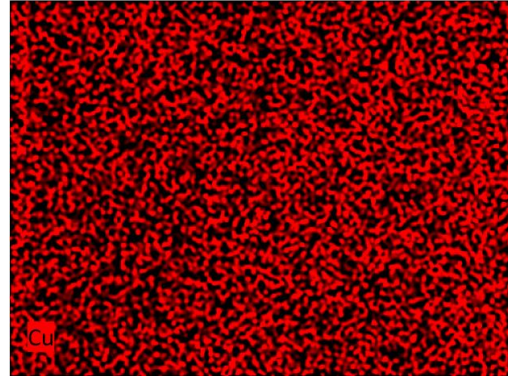
Rysunek 80. Analizy punktowe wybranych obszarów środka napoiny CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



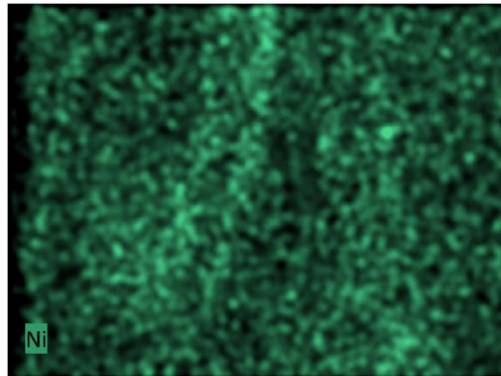
c)



d)



e)

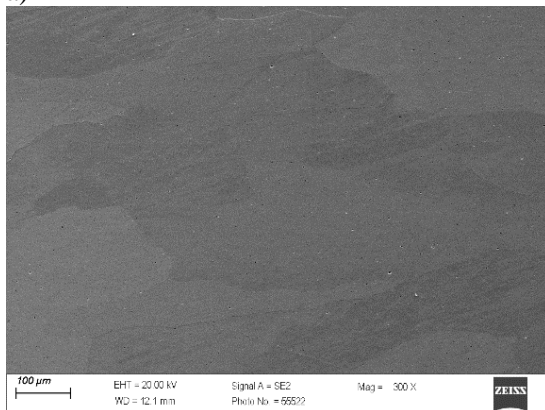


Rysunek 81. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V);

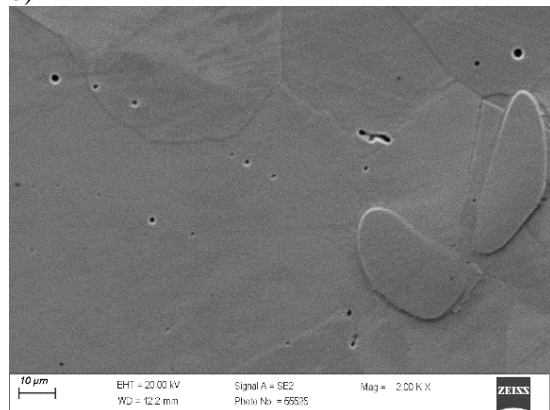
a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,

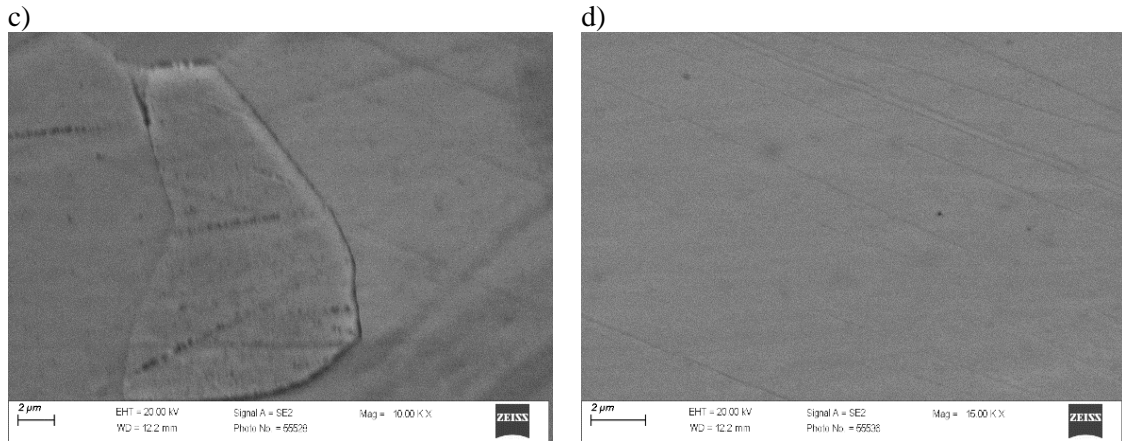
e) koncentracja Ni. Obszar środka napoiny

a)



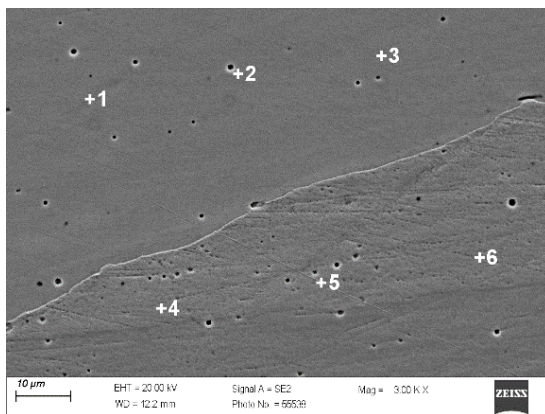
b)



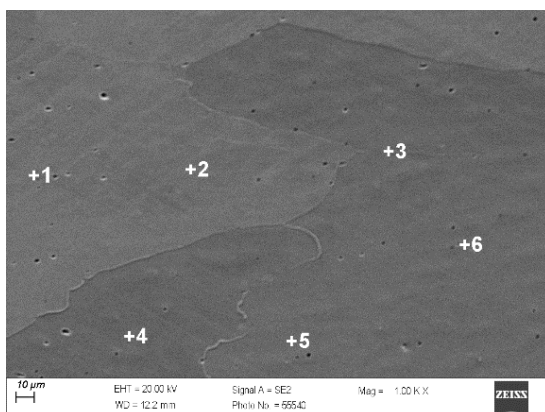


Rysunek 82. Obraz mikroskopowy CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V);
trawienie $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: a) pow. 300x, b) pow. 2000x, c) pow. 10000x, d) pow. 15000x.

Obszar grani napoiny

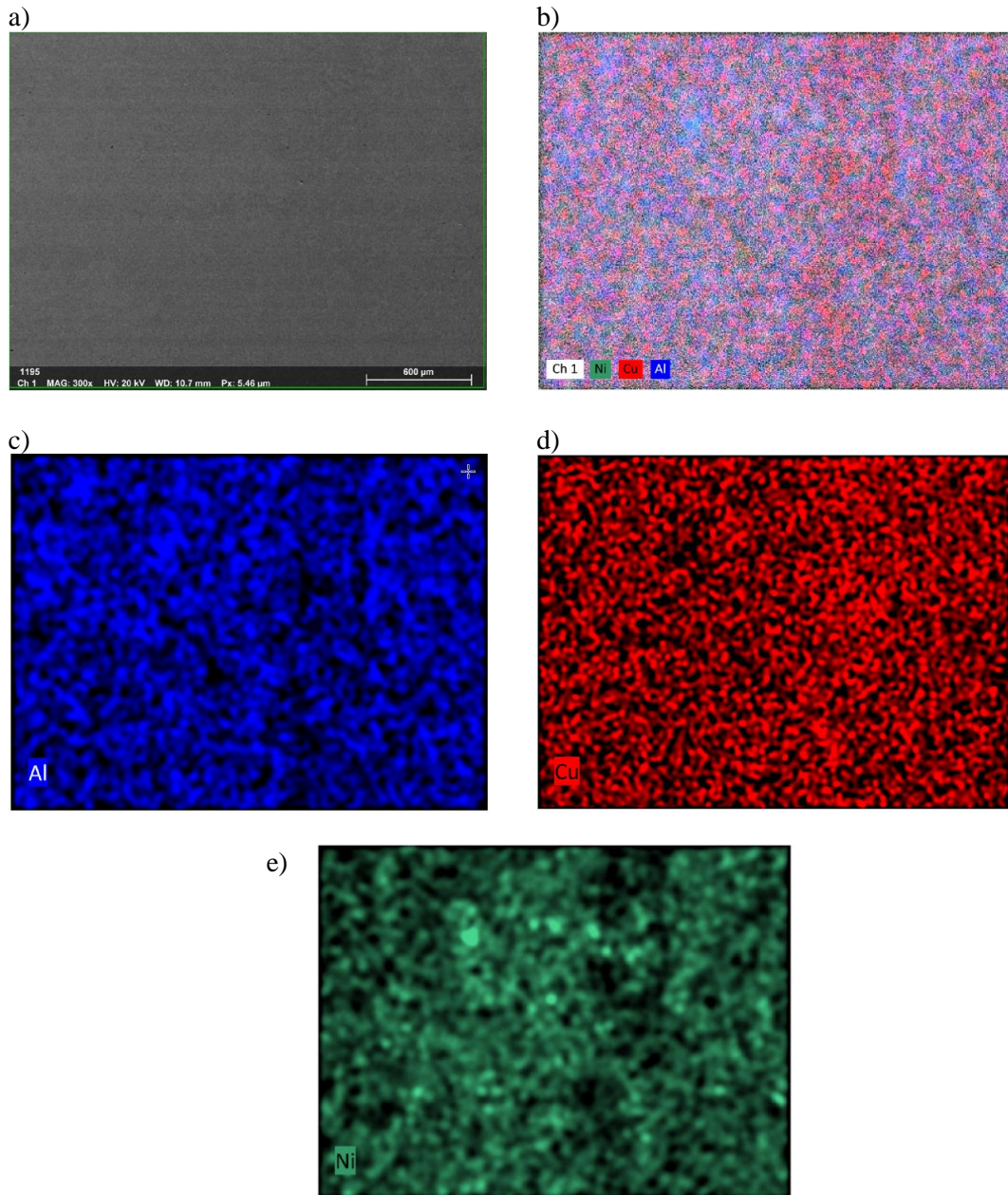


Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	93,6	3,4	3,0
2	93,3	3,6	3,1
3	93,4	3,5	3,1
4	93,9	3,3	2,8
5	93,6	3,3	3,1
6	93,5	3,5	3,0



Punkt	Stężenie pierwiastków, % mas		
	Cu	Al	Ni
1	96,4	3,6	-
2	93,0	3,4	3,6
3	93,6	3,4	3,0
4	89,9	4,8	5,3
5	93,0	3,4	3,6
6	93,5	3,4	3,1

Rysunek 83. Analizy punktowe wybranych obszarów grani napoiny CuAl10Ni10 WAAM (AC, 119A, 17,5V), wraz z tabelami z zawartościami stężenia pierwiastków



Rysunek 84. Mapa rozkładu pierwiastków CuAl₁₀Ni₁₀ WAAM (AC, 119A, 17,5V);
a) pow. 300x b) mapa rozkładu CuAlNi, c) koncentracja Al, d) koncentracja Cu,
e) koncentracja Ni. Obszar grani napoiny

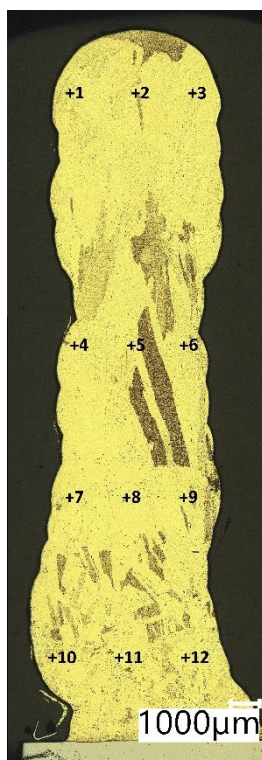
13. Badanie twardości metodą Vickersa

W celu oceny właściwości mechanicznych wytworzonych napoin przeprowadzono serię badań twardości metodą Vickersa (HV10). Do badań wykorzystano czworoboczny foremny ostrosłup diamentowy o kącie wierzchołkowym wynoszącym 136°, przy zastosowaniu zadanego statycznego obciążenia wynoszącego 98,07 N (10 kgf). Procedura pomiaru twardości opierała się na precyzyjnym wykonaniu odcisków na powierzchni próbek, a uzyskane wyniki twardości zostały zestawione w Tabeli 5. Na rysunku 85 przedstawiono schemat rozmieszczenia odcisków pomiarowych na badanych próbkach, co pozwala na wizualizację rozkładu twardości w różnych obszarach napoin. Odciski pomiarowe wykonano na trzech kluczowych obszarach: górnej części napoiny (lica), w strefie środkowej oraz w dolnej części (strefa grani), co pozwoliło na dokładne porównanie twardości w poszczególnych strefach napoiny. Dodatkowo, w analizie wyników uwzględniono wpływ różnych składów chemicznych stopów oraz zastosowanych metod technologicznych, takich jak spawanie TIG oraz druk 3D metodą WAAM, na zmiany twardości. Przeprowadzone badania twardości pozwoliły na ocenę jednorodności napoin oraz ich właściwości mechanicznych, a także dostarczyły istotnych informacji na temat potencjalnych różnic w mikrostrukturze wynikających z zastosowania różnych metod wytwarzania oraz składu materiałowego.

Tabela 5. Wyniki badania twardości metodą Vickersa HV10

ODCISK	CuAl8MigWeld (DC)	CuAl8 (DC)	CuAl12 (AC)	CuAl10Ni10 (AC)	CuAl12 (WAAM)	CuAl10Ni10 (WAAM)
1	84,4	68,5	215,2	211,0	90,7	62,1
2	83,7	73,7	220,5	221,6	88,0	67,5
3	81,2	78,1	230,6	220,5	83,0	65,9
Średnia	83,12	73,5	222,1	217,7	87,2	65,1
Odch. std	1,70	4,78	7,84	5,80	3,90	2,77
4	86,8	84,7	236,5	219,4	71,3	63,9
5	78,8	85,7	221,6	215,1	75,2	64,4
6	76,1	81,7	222,7	209,0	69,9	62,1
Średnia	80,6	84,0	226,9	214,5	72,1	63,4
Odch. std	5,56	2,11	8,32	5,22	2,74	1,20
7	70,1	78,1	212,0	214,13	65,5	61,8
8	70,7	73,9	226,0	213,1	71,9	62,6

9	68,9	71,7	229,4	206,0	70,1	66,4
Średnia	69,9	74,6	222,5	211,1	69,1	63,6
Odch. std	0,88	3,27	9,21	4,39	3,30	2,45
10	95,4	79,5	236,5	215,1	66,4	65,6
11	88,4	76,2	231,7	203,1	71,1	66,9
12	91,9	74,4	227,1	202,2	83,7	73,1
Średnia	91,9	76,7	231,9	206,8	73,7	68,5
Odch. std	3,47	2,61	4,68	7,24	8,94	4,00



Rysunek 85. Schemat wykonania odcisków pomiarowych HV10.

Badania twardości metodą Vickersa (HV10) wykazały zróżnicowane wyniki dla analizowanych próbek napoin w zależności od zastosowanego materiału oraz technologii wytwarzania. Najwyższą średnią twardość stwierdzono dla próbki CuAl12 napawanej metodą TIG. Średnie wartości twardości w poszczególnych obszarach tej próbki wynosiły: 222,1 HV, 226,9 HV, 222,5 HV oraz 231,9 HV, co wskazuje na wysoki poziom jednorodności twardości w całej strukturze napoiny.



W przypadku próbki CuAl10Ni10, również napawanej metodą TIG, średnie wartości twardości były nieco niższe, wynosząc odpowiednio: 217,7 HV, 214,5 HV, 211,1 HV oraz 206,8 HV. Pomimo tych niższych wartości, próbka charakteryzowała się stabilnym rozkładem twardości w różnych strefach napoiny, co może świadczyć o dobrym połączeniu mikrostrukturalnym w całej objętości.

Próbka CuAl8MigWeld, wykonana z komercyjnego drutu MIG, wykazała znacznie niższe wartości twardości, ze średnimi wynikami na poziomie: 83,12 HV, 80,6 HV, 69,6 HV oraz 91,9 HV. Wahania w wynikach pomiarów mogą sugerować większe zróżnicowanie mikrostruktury w porównaniu z napoinami TIG.

Próbka CuAl8, napawana metodą TIG, również charakteryzowała się niższą twardością, osiągając wartości: 73,5 HV, 84,0 HV, 74,6 HV oraz 76,7 HV. Wyniki te były bardziej jednorodne niż w przypadku próbki z komercyjnego drutu CuAl8MG, jednak wciąż znacznie niższe w porównaniu do próbek o wyższej zawartości aluminium.

Próbki wykonane metodą druku 3D WAAM wykazywały zauważalnie niższe wartości twardości. Próbka CuAl12 WAAM charakteryzowała się średnią twardością na poziomie: 87,2 HV, 72,1 HV, 69,1 HV oraz 73,7 HV. Niższa twardość w porównaniu z próbką napawaną metodą TIG może wynikać z różnic w procesie chłodzenia oraz powstawania mikrostruktury podczas druku 3D.

Materiał CuAl10Ni10, również wytworzony metodą WAAM, wykazał jeszcze niższe wartości twardości, wynoszące odpowiednio: 65,1 HV, 63,4 HV, 63,6 HV oraz 68,5 HV. Tak niskie wyniki twardości mogą być związane z wpływem dodatku niklu oraz specyficznych warunków procesu druku 3D, które mogą wpływać na powstawanie bardziej miękkiej mikrostruktury.

Podsumowując, najwyższą twardość osiągnięto dla napoin CuAl12 wykonanych metodą TIG, co wskazuje na przewagę tej technologii w kontekście uzyskiwania bardziej jednorodnych i wytrzymałych struktur. Z kolei próbki wytworzone metodą WAAM wykazywały niższe wartości twardości, co sugeruje, że dla uzyskania lepszych właściwości mechanicznych w tej technologii mogą być konieczne dalsze optymalizacje procesu.

14. Badanie wytrzymałości na ściskanie

W ramach dalszych badań przeprowadzono próbę ściskania z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. W celu dokładnej analizy właściwości mechanicznych przygotowano po trzy próbki w kształcie walca z każdego rodzaju materiału. Próbki te miały proporcje średnicy do wysokości (d/h) wynoszące 1:1. Wymiary próbek różniły się w zależności od grubości napoiny, którą udało się uzyskać w procesie napawania. Podczas próby ściskania wyznaczono kilka kluczowych parametrów mechanicznych, takich jak umowna granica plastyczności, procentowe skrócenie próbki oraz naprężenie ściskające odpowiadające początkowym deformacjom trwałym. Deformacje te obejmowały zarówno tworzenie się charakterystycznego kształtu „beczki” w przypadku ściskania walca, jak i pojawienie się pierwszych rys na powierzchni próbki, które sygnalizowały przekroczenie granicy plastyczności materiału.

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w Tabeli 6, gdzie zestawiono wartości granicy plastyczności, skrócenia procentowego oraz naprężenia ściskającego dla poszczególnych próbek wykonanych z różnych materiałów.

Tabela 6. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie

Oznaczenie próbki	Średnica, [mm]	Wysokość, [mm]	Pp, [mm ²]	Średnica końcowa, [mm]	Wysokość próbki, końcowa [mm]	Siła R _{0,2} , [N]	Granica plastyczności, [MPa]	Skrócenie procentowe, [%]	Siła maksymalna, [N]	Wytrzymałość na ściskanie, [MPa]
CuAl8 MigWeld pr1	6,01	6,00	28,37	7,35	4,20	5114,2	180,3	32,2	23901,7	845,3
CuAl8 MigWeld pr2	6,01	5,97	28,37	7,10	4,17	5589,4	197,0	30,0	20204,0	712,1
CuAl8 MigWeld pr3	6,01	5,97	28,37	7,11	4,18	4603,6	162,3	30,2	21746,7	766,5
Średnia	6,0	6,0	28,4	7,2	4,2	5102,4	179,9	30,8	21950,8	774,6



Odch. std.	0,00	0,02	0,00	0,14	0,02	493,01	17,35	1,22	1857,28	66,97
CuAl8 pr1	6,00	6,01	28,27	7,20	4,29	6238,1	220,6	28,2	20725,9	735,4
CuAl8 pr2	6,00	5,99	28,27	7,35	4,25	6970,8	246,5	28,6	21439,1	758,2
CuAl8 pr3	6,00	5,97	28,27	7,30	4,05	6850,4	233,5	29,0	24952,4	882,5
Średnia	6,0	6,0	28,3	7,3	4,2	6686,4	233,5	28,6	22372,5	792,0
Odch. std.	0,00	0,02	0,00	0,08	0,13	392,91	12,95	0,40	2262,57	79,17
CuAl12 AC pr1	3,01	3,05	7,12	3,33	2,61	7404,6	1040,6	30,0	18730,9	660,2
CuAl12 AC pr2	3,01	3,05	7,12	3,28	2,77	7379,1	1 037,0	14,4	7404,6	1040,4
CuAl12 AC pr3	3,00	3,04	7,07	3,35	2,73	5494,9	777,4	9,2	7474,3	1050,3
Średnia	3,0	3,0	7,1	3,3	2,7	6759,5	909,0	17,9	11203,3	917,0
Odch. std.	0,01	0,01	0,03	0,04	0,08	1095,28	186,11	10,82	6519,21	222,42
CuAl10Ni10 AC pr1	3,00	3,05	7,07	3,61	2,33	6037,2	854,1	14,1	7031,6	994,5
CuAl10Ni10 AC pr2	3,00	3,05	7,07	3,45	2,49	5925,5	838,3	23,6	9578,3	1355,0
CuAl10Ni10 AC pr3	3,00	3,05	7,07	3,22	2,74	5883,1	832,3	18,4	8565,0	1211,6
Średnia	3,0	3,1	7,1	3,4	2,5	5948,6	841,6	18,7	8391,6	1187,0
Odch. std.	0,00	0,00	0,00	0,20	0,21	79,60	11,26	4,76	1282,17	181,50
CuAl12 (WAAM) pr1	5,12	5,17	20,59	7,45	2,40	3114,1	151,3	56,3	29666,6	1680,1
CuAl12 (WAAM) pr2	5,12	5,10	20,59	7,31	2,54	3261,2	158,4	50,2	27060,6	1700,2
CuAl12 (WAAM) pr3	5,12	5,00	20,59	7,45	2,19	2935,9	142,6	56,2	35432,0	1720,9
Średnia	5,12	5,09	20,6	7,4	2,4	3103,8	150,8	54,3	30719,8	1700,4
Odch. std.	0,00	0,08	0,00	0,08	0,18	162,89	7,91	3,50	4283,91	20,40
CuAl10Ni10 (WAAM) pr1	5,20	5,06	21,24	7,90	2,23	3901,6	183,7	55,9	33223,1	1545,1
CuAl10Ni10 (WAAM) pr2	5,20	5,06	21,24	7,91	2,25	3515,7	165,5	55,5	32507,9	1530,7



CuAl10Ni10 (WAAM) pr3	5,20	5,07	21,24	7,95	2,30	3552,6	167,3	54,6	32139,6	1513,4
Średnia	5,2	5,0	21,2	7,9	2,2	3656,6	172,1	55,3	32623,5	1529,7
Odch. std.	0,00	0,05	0,00	0,02	0,03	212,94	10,02	0,66	550,92	15,87

Rozszerzona analiza wyników próby ściskania pozwoliła na ocenę zdolności materiałów do odkształcania plastycznego pod wpływem obciążenia ściskającego. W przypadku niektórych próbek zaobserwowano istotne różnice w ich zachowaniu mechanicznym, co może być wynikiem wpływu zarówno składu chemicznego stopów, jak i zastosowanych technologii wytwarzania (spawanie metodą TIG oraz druk 3D metodą WAAM). Szczególnie interesujące okazały się próbki napoin wykonanych metodą WAAM, które wykazywały zróżnicowaną odpowiedź na obciążenie w porównaniu do próbek napawanych metodą TIG, co sugeruje potencjalne różnice w mikrostrukturze oraz mechanizmach deformacji plastycznej. Przeprowadzone badania umożliwiły pełniejszą charakterystykę mechanicznych właściwości badanych materiałów oraz pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących ich przydatności do zastosowań wymagających odporności na ściskanie.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie, przedstawione w Tabeli 6, ujawniły istotne różnice w zachowaniu badanych materiałów w zależności od zastosowanej technologii wytwarzania. Próbki wykonane z materiału CuAl12 metodą druku 3D WAAM charakteryzowały się wyjątkowo wysoką wytrzymałością na ściskanie, ze średnią wartością parametru R_c wynoszącą 1700,4 MPa. Dla porównania, ten sam materiał napawany metodą TIG osiągnął znacznie niższą średnią wartość wytrzymałości na ściskanie, wynoszącą 917,0 MPa. Tak duża różnica może wynikać z odmiennych procesów krystalizacji i chłodzenia w metodzie WAAM, co skutkuje inną strukturą mikrokrystaliczną oraz rozmieszczeniem faz stopowych. Podobne zależności zaobserwowano dla próbek CuAl10Ni10. Próbki wytworzone metodą WAAM osiągnęły średnią wytrzymałość na ściskanie równą 1529,7 MPa, podczas gdy próbki wykonane metodą TIG wykazały wytrzymałość na poziomie 1187,0 MPa. Wyniki te wskazują, że metoda druku 3D WAAM może prowadzić do uzyskania bardziej wytrzymałych struktur w porównaniu do tradycyjnej metody TIG, co czyni ją szczególnie interesującą w kontekście zastosowań wymagających wysokiej odporności mechanicznej.



Zróżnicowanie wytrzymałości na ściskanie może być związane z różnicami w charakterystyce mikrostruktury napoiny. W przypadku technologii WAAM, proces osadzania kolejnych warstw materiału i specyficzny charakter termiczny procesu mogą prowadzić do formowania bardziej jednorodnej i wytrzymałej mikrostruktury, co tłumaczy wyższe wyniki wytrzymałościowe. Natomiast w metodzie TIG proces termiczny jest bardziej intensywny i skoncentrowany, co może sprzyjać powstawaniu większych ziaren oraz mniej jednorodnej struktury, skutkując obniżeniem wytrzymałości na ściskanie.

Wyniki badań wskazują, że technologia druku 3D metodą WAAM może oferować znaczące korzyści w kontekście optymalizacji właściwości mechanicznych materiałów, zwłaszcza w zastosowaniach, gdzie kluczowa jest wytrzymałość na obciążenia ściskające.

15. Badanie tribologiczne metodą „pin od disc”

Test typu „pin on disc” został zastosowany w celu oceny zużycia ślizgowego badanych materiałów w układzie próbka – przeciwpróbka, gdzie najczęściej jako przeciwpróbkę stosowano kulkę stalową lub wykonaną z Al_2O_3 . Pin jest prętem zakończonym gniazdem, w którym montowana jest kulka, a układ poddawany jest działaniu określonej siły dociskającej próbkę do wirującego dysku. Metoda ta pozwala na precyzyjne określenie zużycia ściernego oraz wyznaczenie współczynnika tarcia dla pracujących par materiałowych. Test „pin on disc” jest szeroko stosowany ze względu na swoją prostotę oraz możliwość uzyskania powtarzalnych wyników. Urządzenie testowe umożliwia inicjowanie różnych wzorców ruchu, takich jak ruch obrotowy jednokierunkowy, ruch obrotowo-nawrotny oraz inne możliwe do zrealizowania wzorce, co pozwala na symulację różnych warunków pracy materiałów. W trakcie trwania testu monitorowane są parametry takie jak siła tarcia, zużycie oraz temperatura, co pozwala na bieżącą ocenę warunków pracy pary trącej.

W ramach przeprowadzonych badań, analizie poddano materiały CuAl8 MigWeld, CuAl8, CuAl12, CuAl10Ni10 po spawaniu metodą TIG, a także warianty materiałów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 po druku 3D metodą WAAM. Próbkami były elementy napawane w postaci ścianek, powierzchnie boczne frezowano i na ich płaszczyźnie wykonano badania tribologiczne sprawdzające odporność na zużycie ściernie w parze z kulką stalową 100Cr6. Parametry testów tribologicznych dla próbek po procesie spawania zostały przedstawione



w Tabeli 7, natomiast parametry testów próbek wytworzonych metodą WAAM zestawiono w Tabeli 8.

Dodatkowo, w celu oceny zużycia masowego, dokonano pomiarów masy próbek oraz przeciwpróbek zarówno przed, jak i po przeprowadzeniu testów. Wyniki pomiarów masowych zamieszczono w Tabeli 9, co pozwoliło na wyznaczenie różnicy masy wynikającej z procesu tarcia oraz określenie stopnia zużycia ślizgowego badanych materiałów.

Analiza wyników uzyskanych z testów tribologicznych pozwoliła na porównanie odporności na zużycie ślizgowe materiałów wytworzonych metodą spawania TIG oraz druku 3D metodą WAAM. Wyniki wykazały, że różnice w mikrostrukturze, wynikające z odmiennych technologii wytwarzania, mają istotny wpływ na właściwości tribologiczne badanych materiałów. Szczególną uwagę zwrócono na materiały o wysokiej zawartości aluminium oraz dodatku niklu, które mogą charakteryzować się odmiennymi mechanizmami zużycia w zależności od procesu technologicznego.

Tabela 7. Parametry badania tribologicznego próbek spawanych TIG

Częstotliwość próbkowania, Hz	60
Obciążenie, N	10
Promień, mm	6
Droga, m	2000
Prędkość liniowa, cm/s	50
Materiał przeciw próbki	100Cr6

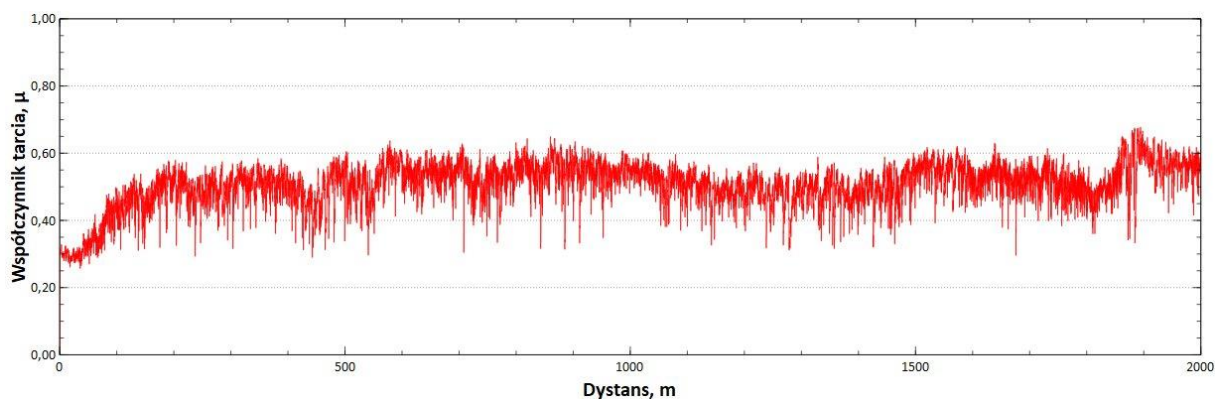
Tabela 8. Parametry badania tribologicznego próbek po druku 3D

Częstotliwość próbkowania, Hz	60
Obciążenie, N	5
Promień, mm	6
Droga, m	2000
Prędkość liniowa, cm/s	1
Materiał przeciw próbki	100Cr6

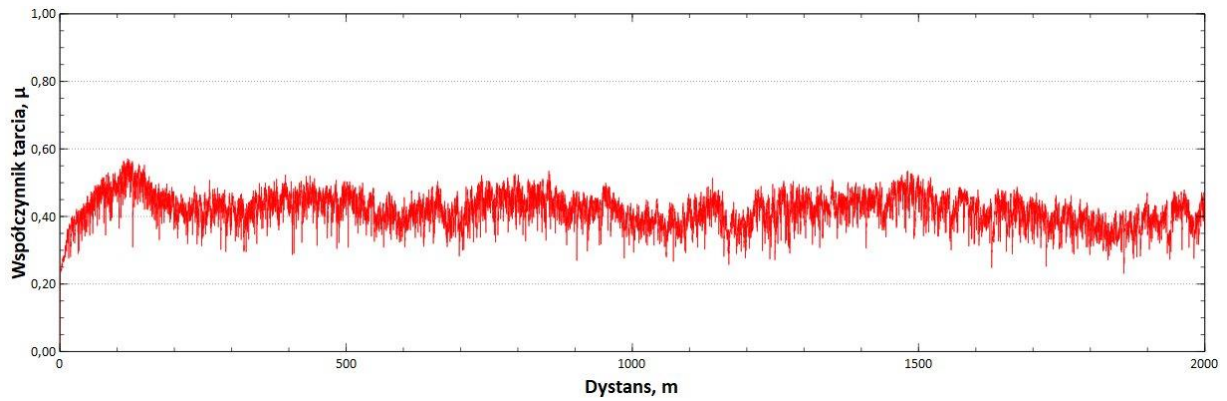
Tabela 9. Bilans masy próbek i przeciw próbek po badaniu tribologicznym

Próbka	Przeciw próbka			Próbka		
	Masa przed procesem, [g]	Masa po procesie, [g]	Ubytek masy, [g]	Masa przed procesem, [g]	Masa po procesie, [g]	Ubytek masy, [g]
CuAl8 MigWeld DC	0,8826	0,8826	0	20,9055	20,8785	0,0270
CuAl8 DC	0,8816	0,8816	0	19,0564	19,0246	0,0318
CuAl12 AC	0,8818	0,8818	0	11,9534	11,9442	0,0092
CuAl10Ni10 AC	0,8833	0,8832	0,0001	7,5506	7,5341	0,0165
CuAl12 WAAM	0,8817	0,8817	0	27,5030	27,4447	0,0583
CuAl10Ni10 WAAM	0,8812	0,8811	0,0001	36,2273	36,1801	0,0472

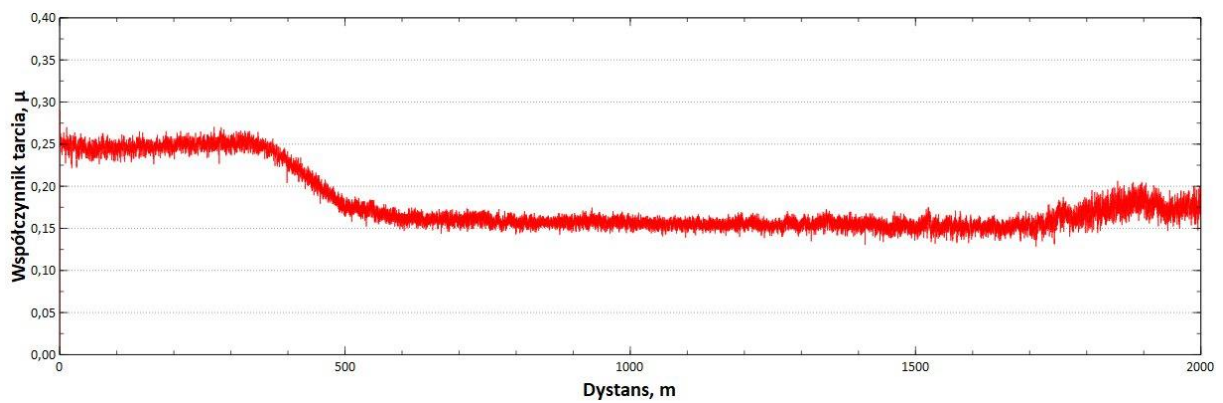
Na rysunkach 86-91 przedstawiono wykresy współczynnika tarcia w funkcji drogi badanych próbek po badaniu tribologicznym



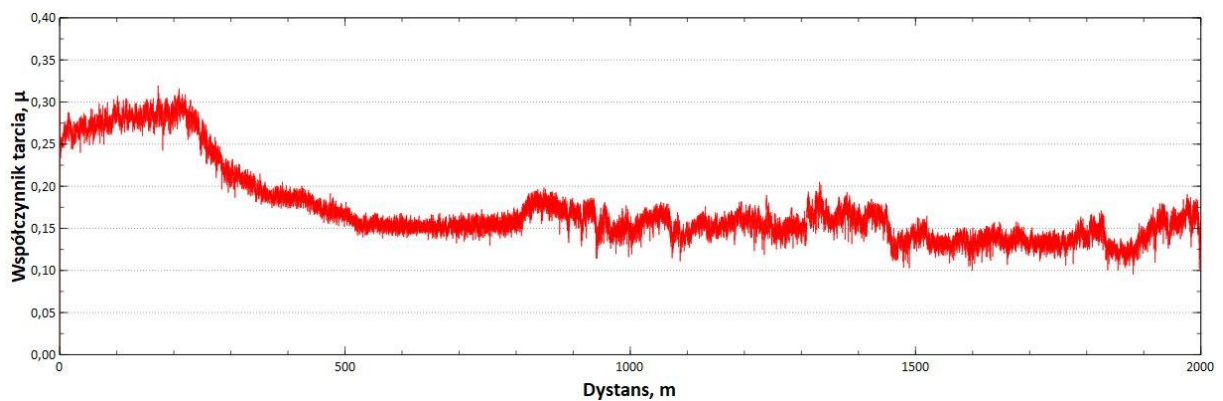
Rysunek 86. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl8 MigWeld DC



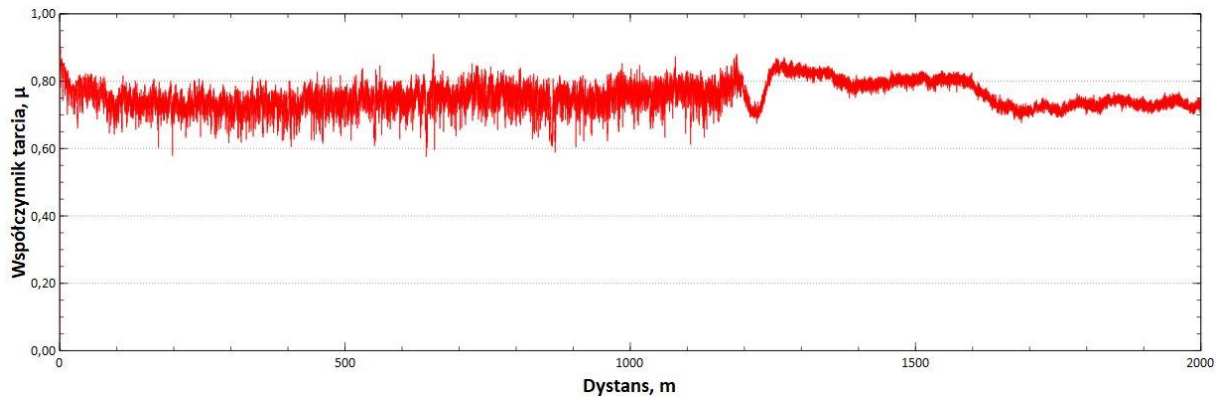
Rysunek 87. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl8 DC



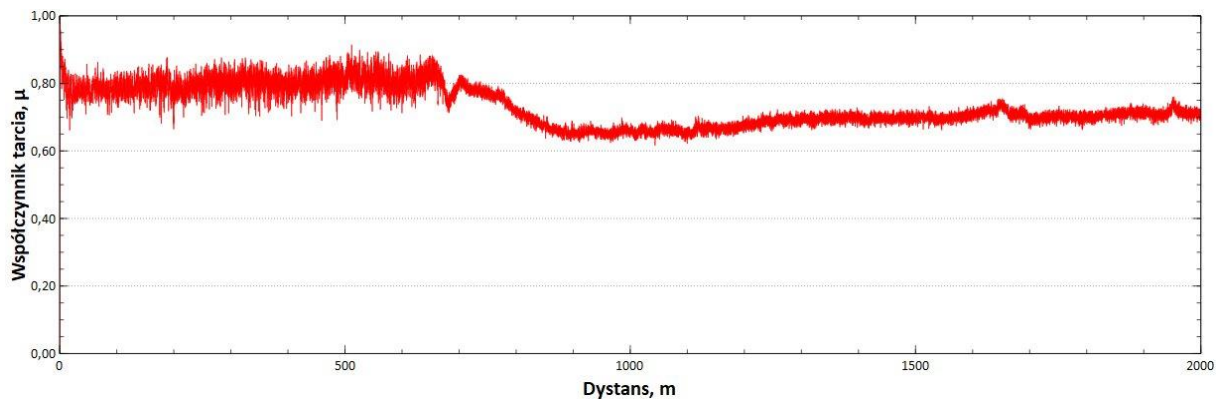
Rysunek 88. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl12 AC



Rysunek 89. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl10Ni10 AC



Rysunek 90. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl2 WAAM



Rysunek 91. Wykres współczynnika tarcia w funkcji drogi – próbka CuAl10Ni10 WAAM

Wyniki pomiarów współczynnika tarcia przedstawione w Tabeli 10 uwzględniają średnie wartości tego parametru dla wszystkich badanych próbek, wraz z odchyleniem standardowym, co pozwala na bardziej precyzyjną ocenę stabilności i jednolitości przebiegu tarcia dla poszczególnych materiałów.

Tabela 10. Zestawienie średnich wyników pomiaru współczynnika tarcia

Próbka	Średni współczynnik tarcia, $\bar{\mu}$	Odchylenie standardowe
CuAl8 MigWeld DC	0,4502	0,0412
CuAl8 DC	0,4125	0,0321
CuAl12 AC	0,1794	0,0450
CuAl10Ni10 AC	0,2187	0,0285
CuAl12 WAAM	0,7558	0,0415
CuAl10Ni10 WAAM	0,7318	0,0596

Analiza zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia, przeprowadzona w temperaturze pokojowej, wykazała zróżnicowany charakter przebiegu testów dla poszczególnych próbek. Na początkowym etapie, dla większości materiałów, wartość współczynnika tarcia narastała, co jest zjawiskiem typowym dla etapu, tzw. dotarcia materiału. W przypadku próbki CuAl8 MigWeld DC, po osiągnięciu dystansu wynoszącego około 200 metrów, współczynnik tarcia zaczął oscylować wokół średniej wartości $\bar{\mu} = 0,4502$. Przebieg ten nie był jednak w pełni liniowy, co można tłumaczyć nieregularnościami powierzchni wynikającymi z procesu napawania. Penetracja przeciwpróbki, wykonanej z materiału 100Cr6, prowadziła do momentów zagłębiania się i unoszenia na powierzchni napoiny, co było związane z lokalną twardością materiału oraz jego geometrią.

Podobne zjawisko zaobserwowano dla próbki CuAl8 DC, w której po pokonaniu dystansu około 100 metrów współczynnik tarcia również wzrastał skokowo, po czym oscylował wokół średniej wartości $\bar{\mu} = 0,4125$. W tym przypadku nieregularności powierzchni oraz zmienność twardości wzdłuż napoiny mogły mieć istotny wpływ na niestabilność przebiegu procesu tarcia.

W przypadku próbki spawanej multidrutem CuAl12 AC, po przejściu dystansu około 400 metrów nastąpiło ustabilizowanie powierzchni trącej, co skutkowało obniżeniem współczynnika tarcia do wartości oscylujących wokół średniej $\bar{\mu} = 0,1794$. Ten spadek może być tłumaczony bardziej jednorodną mikrostrukturą napoiny, co sprzyjało mniejszemu oporowi tarcia w porównaniu z innymi badanymi materiałami.

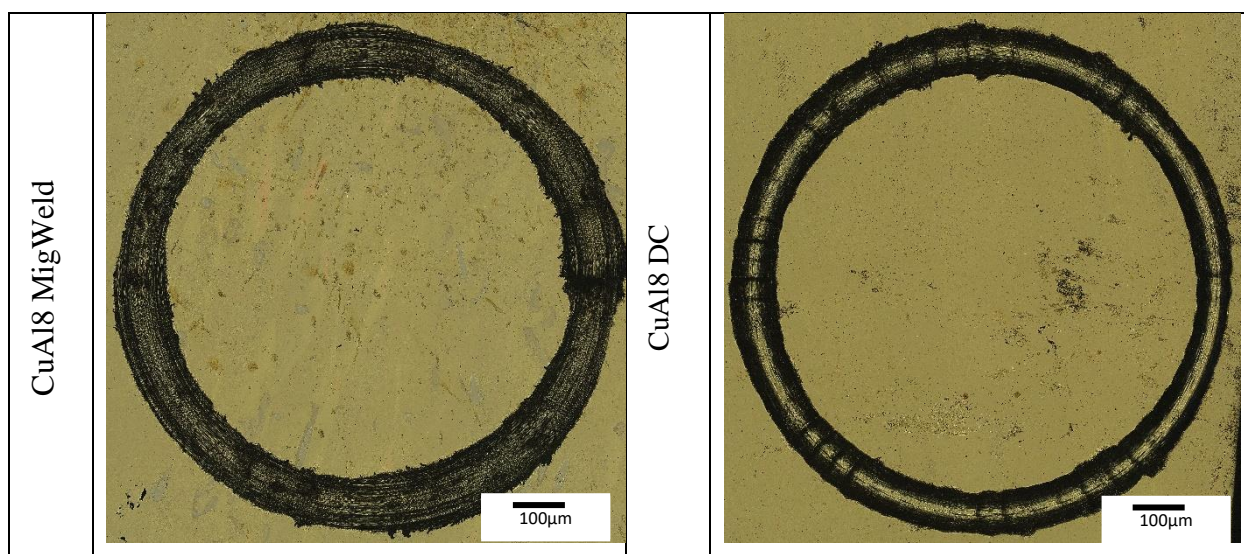
Z kolei dla próbki CuAl10Ni10, po dotarciu powierzchni trącej na dystansie około 200 metrów, współczynnik tarcia spadł, a następnie oscylował wokół wartości średniej $\bar{\mu} = 0,2187$, co sugeruje osiągnięcie stabilnego stanu pracy pary trącej.

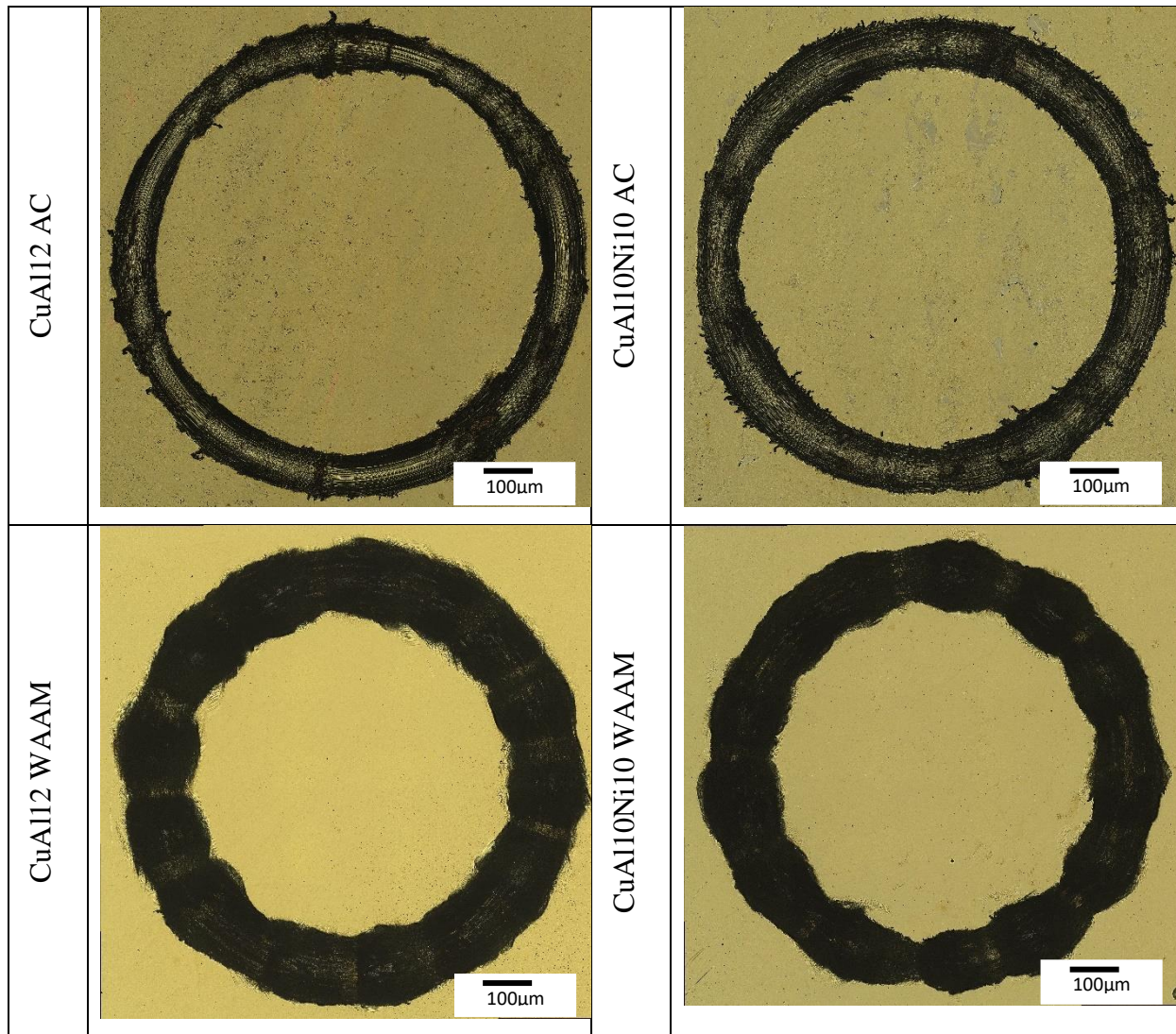
W próbkach wykonanych metodą WAAM, takich jak CuAl12, nie zaobserwowano wyraźnego etapu dotarcia materiału. Wartości współczynnika tarcia oscylowały w sposób nieregularny wokół średniej $\bar{\mu} = 0,7558$, co może wynikać z wyższej twardości materiału oraz specyficznej mikrostruktury powstałej podczas druku 3D. Z uwagi na wysoką twardość próbek oraz skokowy charakter przebiegu testów, a także związane z tym wibracje maszyny, poziom siły nacisku na próbki CuAl12 i CuAl10Ni10 po WAAM zmniejszono do 5 N.

Dla próbki CuAl10Ni10 po WAAM, po pokonaniu około 700 metrów, zaobserwowano zjawisko dotarcia materiału, po którym współczynnik tarcia oscylował wokół wartości średniej $\bar{\mu} = 0,7318$. Stabilizacja wartości współczynnika po tym dystansie może wskazywać na równomierne zużycie powierzchni badanej próbki.

Na rysunku 92 przedstawiono charakterystykę powierzchni próbek po zakończeniu testów. Powierzchnie wszystkich próbek, poddanych działaniu siły tarcia, wykazywały typową dla tego procesu topografię płaskowyzową, z wzniesieniami o ostrych krawędziach. Tego rodzaju morfologia świadczy o wykruszaniu się materiału próbki, co jest wynikiem bezpośredniego kontaktu z przeciwpróbką wykonaną z materiału 100Cr6, który charakteryzuje się wysoką twardością i ścieralnością.

Uzyskane wyniki umożliwiają lepsze zrozumienie mechanizmów zużycia materiałów, a także wskazują na zróżnicowaną odporność na zużycie w zależności od metody wytwarzania oraz składu chemicznego badanych stopów.





Rysunek 92. Powierzchnia próbek po badaniu tribologicznym

Przedstawione obrazy rozwinięcia powierzchni próbek po badaniach tribologicznych, jak również ich topografia, wskazują na niejednorodne zużycie materiału. Tego rodzaju zróżnicowane zużywanie się powierzchni jest wynikiem specyfiki procesów nakładania warstw zarówno w technikach spawalniczych, jak i w technologii druku 3D. W trakcie tych procesów występują różnice w rozkładzie ciepła, które prowadzą do lokalnych zmian strukturalnych oraz niejednorodności mikrostrukturalnych. Skutkuje to powstawaniem mikrozagłębień i wybrzuszeń w torze zużycia próbki, co jest szczególnie widoczne w materiałach o nieregularnej teksturze. Obserwowane deformacje powierzchni wynikają nie tylko z samego procesu tarcia, ale także z różnorodności w składzie chemicznym i rozkładzie pierwiastków na powierzchni próbek. W procesach spawalniczych, takich jak TIG, odprowadzanie ciepła jest nierównomierne, co sprzyja formowaniu się obszarów o różnej



twardości oraz odporności na zużycie. W przypadku techniki WAAM, warstwowe nanoszenie materiału dodatkowo wzmacnia te zjawiska, ponieważ różnice w grubości warstw i ich chłodzeniu mogą prowadzić do tworzenia stref o różnych właściwościach mechanicznych. Ponadto, lokalna koncentracja niektórych pierwiastków, takich jak aluminium czy nikiel, może powodować powstawanie obszarów bardziej podatnych na zużycie mechaniczne. To z kolei prowadzi do zróżnicowanego zachowania powierzchni podczas badania, gdzie mikrostruktury o wyższej twardości mogą wykazywać większą odporność na penetrację przeciwpróbki, podczas gdy obszary o mniejszej twardości ulegają szybszemu zużyciu. W efekcie tor zużycia staje się nieregularny, a powierzchnie wykazują specyficzne dla każdego materiału cechy morfologiczne.

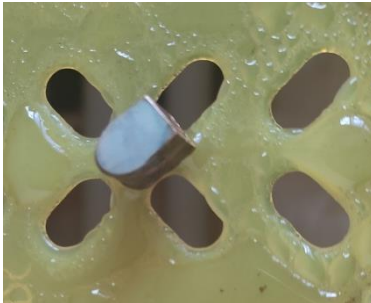
Wyniki te sugerują, że procesy wytwarzania, takie jak spawanie metodą TIG oraz druk 3D metodą WAAM, znacząco wpływają na ostateczną charakterystykę powierzchni próbek. Zastosowanie technik o różnym sposobie rozprowadzania ciepła i nakładania materiału prowadzi do powstawania mikrostruktur o odmiennych właściwościach tribologicznych, co z kolei ma istotne znaczenie w kontekście projektowania i optymalizacji materiałów wykorzystywanych w aplikacjach narażonych na intensywne zużycie ślizgowe.

16. Badanie korozyjne w komorze solnej

Przeprowadzono badania odporności korozyjnej w środowisku mgły solnej metodą neutralnego testu solnego (NSS) na próbkach wykonanych z multidrutów oraz drutu komercyjnego. Badanie zostało zrealizowane zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06, która określa standardowe procedury testowania odporności materiałów na korozję w agresywnym środowisku chlorków. Celem testu było określenie stopnia degradacji próbek w wyniku działania soli, co ma istotne znaczenie w ocenie trwałości materiałów w środowiskach narażonych na korozję, takich jak konstrukcje morskie czy elementy przemysłowe. Wyniki pomiarów mas próbek w różnych odstępach czasowych, po każdym cyklu ekspozycji na mgłę solną (doba zerowa, 48, 96, 168, 240 i 336 godzin), zostały zestawione w Tabeli 11. Procedura badawcza obejmowała cykliczne umieszczanie próbek w komorze solnej, gdzie były one ekspozowane na działanie aerozolu solnego (5% NaCl). Po określonym czasie każda próbka była wyjmowana z komory, starannie myta wodą destylowaną w celu usunięcia resztek soli, osuszana oraz ważona trzykrotnie na wadze

analitycznej, aby wyznaczyć zmiany mas wynikające z postępujących procesów korozji. Proces ten powtarzano w kilku cyklach, aby uzyskać pełniejszy obraz dynamiki korozji, w tym stopnia degradacji materiału na różnych etapach testu. Zmiana mas próbek stanowiła podstawowy wskaźnik postępujących procesów korozyjnych, a wyniki te pozwalają na ocenę odporności badanych materiałów w środowisku zawierającym chlorki. Ponadto, obserwacje wizualne powierzchni próbek po każdym cyklu umożliwiły identyfikację ewentualnych zmian w wyglądzie próbek, takich jak powstawanie nalotów korozyjnych, pęknięć lub lokalnej utraty materiału (rys. 93).

a)



b)



Rysunek 93. Przykład próbki a) CuAl10Ni10 AC i b) CuAl8 DC, widok przed czyszczeniem próbek, widoczne zielonkawe naloty, pochodzące od miedzi

Badanie w mgie solnej stanowi istotny element oceny właściwości antykorozyjnych materiałów, zwłaszcza w kontekście ich zastosowań w warunkach eksploatacyjnych, gdzie są one narażone na działanie agresywnych czynników środowiskowych. Wyniki tych testów mogą być pomocne w dalszej optymalizacji składu stopów i procesów technologicznych, aby zwiększyć odporność korozyjną materiałów wytwarzanych metodami spawania oraz druku 3D.

Tabela 11. Wyniki kontroli masy próbek po próbie korozyjnej NSS zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06

Oznaczenie próbki	Masa próbki, [g]						Δm^* , [g]
	doba 0	doba 2	doba 4	doba 7	doba 10	doba 14	
CuAl8 MIGWELD DC	12,1665	12,1658	12,1657	12,1651	12,1651	12,1647	0,0018
	12,1668	12,1658	12,1658	12,1651	12,1651	12,1647	0,0021
	12,1666	12,1658	12,1657	12,1651	12,1651	12,1646	0,0020
Wartość średnia	12,1666	12,1658	12,1657	12,1651	12,1651	12,1647	0,0020
Odchyl. Stand.	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002
CuAl8 DC	21,2331	21,2322	21,2325	21,2304	21,2288	21,2260	0,0071
	21,2329	21,2324	21,2324	21,2302	21,2288	21,2259	0,0070
	21,2330	21,2324	21,2327	21,2303	21,2288	21,2260	0,0070
Wartość średnia	21,2330	21,2323	21,2325	21,2303	21,2288	21,2260	0,0070
Odchyl. Stand.	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
CuAl12 AC	3,0794	3,0793	3,0805	3,0789	3,0780	3,0750	0,0044
	3,0796	3,0793	3,0807	3,0787	3,0780	3,0750	0,0046
	3,0796	3,0793	3,0805	3,0788	3,0778	3,0750	0,0046
Wartość średnia	3,0795	3,0793	3,0806	3,0788	3,0779	3,0750	0,0045
Odchyl. Stand.	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
CuAl10Ni10 AC	3,1073	3,1075	3,1078	3,1076	3,1075	3,1073	0,0000
	3,1073	3,1075	3,1078	3,1076	3,1074	3,1074	-0,0001
	3,1075	3,1075	3,1078	3,1075	3,1075	3,1073	0,0002
Wartość średnia	3,1074	3,1075	3,1078	3,1076	3,1075	3,1073	0,0000
Odchyl. Stand.	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
CuAl12 WAAM	10,4727	10,4726	10,4715	10,4705	10,4683	10,4660	0,0067
	10,4728	10,4726	10,4716	10,4704	10,4681	10,4658	0,0070
	10,4728	10,4726	10,4715	10,4705	10,4681	10,4658	0,0070
Wartość średnia	10,4728	10,4726	10,4715	10,4705	10,4682	10,4659	0,0069
Odchyl. Stand.	0,0001	0,0000	0,0577	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
CuAl10Ni10 WAAM	6,9026	6,9026	6,9022	6,9015	6,9008	6,8998	0,0028
	6,9028	6,9027	6,9023	6,9015	6,9008	6,8999	0,0029
	6,9028	6,9026	6,9023	6,9015	6,9006	6,8998	0,0030
Wartość średnia	6,9027	6,9026	6,9023	6,9015	6,9007	6,9298	0,0029
Odchyl. Stand.	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001

* Różnica mas pomiędzy początkiem a końcem procesu



Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów masy próbek przeprowadzono analizę odporności na korozję badanych materiałów, ujawniając znaczące różnice w ich zachowaniu. W początkowym okresie badania, w drugiej dobie, większość próbek wykazywała minimalne ubytki masy, rzędu tysięcznych grama, co wskazuje na znikomą reakcję korozyjną. Wyjątkiem była próbka CuAl10Ni10 AC, która odnotowała nieznaczny wzrost masy w stosunku do wartości początkowej, co może wynikać z początkowego tworzenia się produktów korozji na powierzchni próbki.

W czwartej dobie badania większość próbek nadal traciła na masie, choć spadki te były niewielkie. Jednak próbki CuAl12 AC oraz CuAl10Ni10 AC, wytwarzane metodą spawania prądem przemiennym, wykazywały odwrotny trend, tj. wzrost masy, co można tłumaczyć procesem tworzenia się pasywnej warstwy ochronnej na ich powierzchni. Tego rodzaju zjawisko sugeruje, że te materiały mają zdolność do ograniczonego formowania stabilnych produktów korozji, co może wpływać na ich długoterminową odporność na degradację.

W dalszej części eksperymentu, próbka CuAl10Ni10 AC wykazywała niewielkie przyrosty masy przez większość okresu badań, a dopiero pod koniec, w 14 dobie, zaobserwowano spadek masy. Co jednak istotne, finalnie masa próbki wróciła do wartości wyjściowej, co może sugerować wyjątkową stabilność materiału w badanym środowisku korozyjnym. Taki wynik świadczy o wysokiej odporności korozyjnej tego stopu, co czyni go potencjalnie atrakcyjnym do zastosowań w wymagających warunkach eksploatacyjnych.

Z drugiej strony, próbki CuAl8 MigWeld DC, CuAl10Ni10 WAAM i CuAl12 AC wykazywały podobne zmiany masy, wskazując na umiarkowaną odporność na korozję. Straty wagowe tych próbek po 14 dniach badania były relatywnie niskie, co oznacza, że materiały te mogą być odpowiednie do zastosowań w warunkach umiarkowanej agresywności środowiska.

Najmniej korzystne wyniki uzyskano dla próbek CuAl8 DC oraz CuAl12 WAAM. W obu przypadkach zaobserwowano największe spadki masy, sięgające 0,007 g po 14 dniach ekspozycji na środowisko korozyjne, co budzi wątpliwości co do ich zastosowania w trudnych warunkach. Wyniki te mogą wskazywać na konieczność dalszych badań tych materiałów oraz ewentualnej optymalizacji ich składu chemicznego lub procesu wytwarzania, aby poprawić ich odporność na korozję.

Podsumowując, analiza danych dotyczących mas próbek wykazała, że odporność na korozję badanych materiałów jest silnie zależna od ich składu chemicznego oraz zastosowanej metody produkcji. Próbka CuAl10Ni10 AC wyróżnia się wyjątkową stabilnością, natomiast



CuAl₁₈ DC i CuAl₁₂ WAAM mogą wymagać dalszych badań w celu ich poprawy. Dalsze testy, szczególnie w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych, są wskazane, aby w pełni ocenić potencjał tych stopów i lepiej zrozumieć zachodzące mechanizmy korozyjne.

17. Analiza fazowa XRD

Kolejnym etapem badań była analiza fazowa przeprowadzona metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) w celu identyfikacji składu fazowego badanych próbek CuAl₁₂ oraz CuAl₁₀Ni₁₀, wytworzonych metodą druku 3D (WAAM). Analiza została wykonana na trzech obszarach próbek: w obrębie lica napoiny, w środku oraz w strefie grani, analogicznie do podziału zastosowanego przy badaniach mikroskopowych SEM. Badania fazowe dostarczyły istotnych informacji na temat struktury krystalograficznej oraz obecności poszczególnych faz w materiale, co jest kluczowe dla oceny ich właściwości mechanicznych i korozyjnych.

Analizę jakościową składu fazowego próbek zrealizowano na podstawie interpretacji dyfraktogramów uzyskanych za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego XRD7 firmy Seifert-FPM. Badania przeprowadzono z zastosowaniem promieniowania charakterystycznego Cu K α oraz filtra niklowego (Ni), aby zminimalizować wpływ promieniowania wtórnego. Pomiary były realizowane w klasycznej geometrii Bragg-Brentano, która pozwala na precyzyjne określenie rozmieszczenia faz krystalicznych w badanych materiałach. Zakres kątów 2θ , w którym przeprowadzono pomiary, wynosił od 10° do 100° , co odpowiada analizie odległości międzypłaszczyznowych d_{hkl} od 0,8838 do 0,10064 nm. Taki zakres pomiarowy umożliwia identyfikację szerokiego spektrum faz krystalicznych.

Do analizy i interpretacji wyników wykorzystano oprogramowanie firmy Seifert oraz Match!, co w połączeniu z bazą danych ICDD PDF-4+ z 2023 roku pozwoliło na identyfikację faz występujących w badanych próbkach. Dzięki temu możliwe było precyzyjne określenie składu fazowego zarówno w strefie wierzchniej, jak i w głębszych warstwach napoin, co dostarczyło cennych informacji o charakterystyce krystalograficznej materiału w różnych obszarach. Pomiary przeprowadzono na wypolerowanych próbkach, aby uzyskać równomierne rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego i zminimalizować błędy



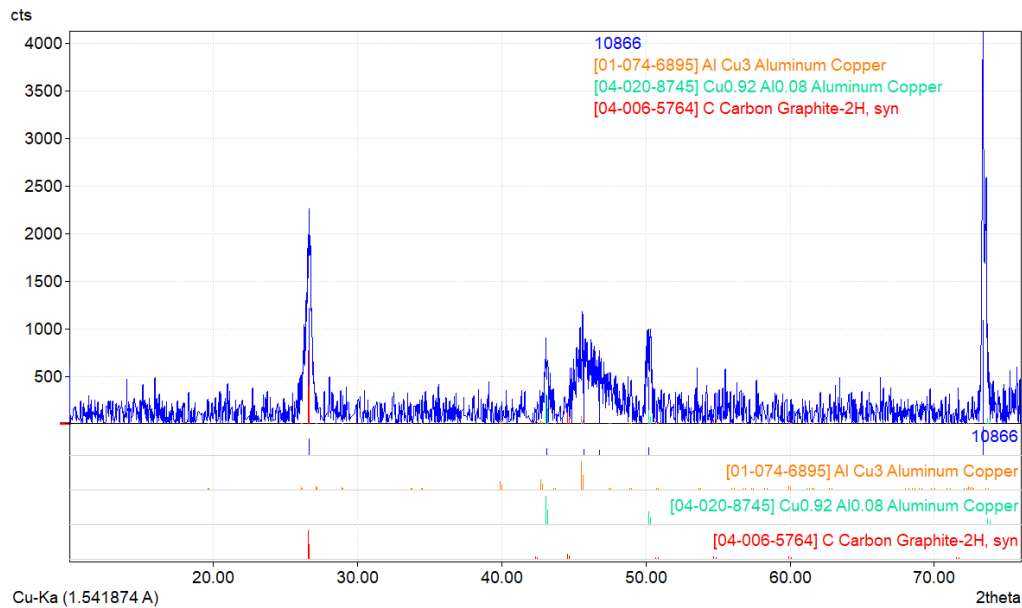
związane z nierównościami powierzchni. Obszar badany promieniowaniem wynosił około 0,5 cm², co pozwalało na objęcie analizy zarówno drobnych struktur krystalicznych, jak i większych stref o zróżnicowanym składzie.

Wyniki analizy fazowej, przedstawione na dyfraktogramach (rysunki 94-99), pozwalają na porównanie różnic w strukturze fazowej materiałów CuAl12 i CuAl10Ni10 w zależności od metody ich wytworzenia oraz położenia w próbce. Tego typu analiza jest niezbędna do oceny stabilności faz, które mogą wpływać na takie parametry jak wytrzymałość na ściskanie, twardość, czy odporność korozyjną, a także na właściwości trybologiczne materiałów. Faza krystaliczna i jej dystrybucja mają bezpośredni wpływ na charakterystykę mechaniczną i użytkową stopów aluminiowych, zwłaszcza w kontekście ich zastosowań przemysłowych, dlatego szczególną uwagę zwrócono na obecność faz międzymetalicznych, które mogą odpowiadać za wzmocnienie lub osłabienie materiału w poszczególnych obszarach próbek.

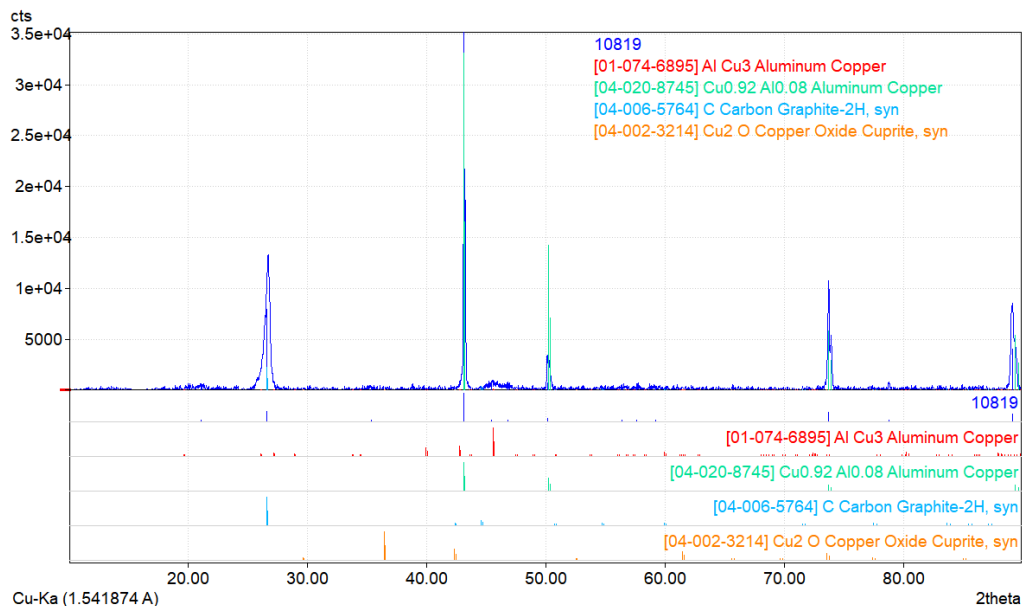
Dyfraktogramy próbek CuAl12 wytworzonych metodą WAAM, przedstawione na rysunkach 94 (obszar lica napoiny) oraz 95 (obszar środkowy napoiny), wykazują podobieństwa w składzie fazowym. W obu przypadkach zidentyfikowano następujące fazy:

- ✓ faza o strukturze regularnej z parametrami komórki zbliżonymi do parametrów stopu Cu_{0.92}Al_{0.08}, przypisana do grupy przestrzennej $Fm\bar{3}m$ (#225). Ta faza odpowiada za stabilizację struktury i poprawę właściwości mechanicznych stopu, charakterystyczna dla miedzi z niewielką domieszką aluminium, tworząca regularną sieć krystaliczną.
- ✓ faza CuAl₃ o strukturze rombowej, należąca do grupy przestrzennej $Pmm2$ (#25). Ta faza jest odpowiedzialna za zwiększoną twardość i wytrzymałość stopu, ponieważ związki międzymetaliczne typu CuAl₃ często działają jako wzmacniacze w stopach miedzi.
- ✓ grafit, którego obecność w strukturze może wskazywać na wytrącanie węgla w trakcie procesu spawania, co ma wpływ na właściwości tribologiczne oraz odporność na zużycie ślizgowe.

Identyfikacja tych faz jest istotna dla zrozumienia wpływu procesu WAAM na mikrostrukturę i właściwości użytkowe stopu CuAl12. Fazowy skład materiału wpływa bezpośrednio na jego wytrzymałość mechaniczną, odporność na korozję oraz inne właściwości eksploatacyjne.



Rysunek 94. Dyfraktogram próbki CuAl12 WAAM z obszaru lica napoiny



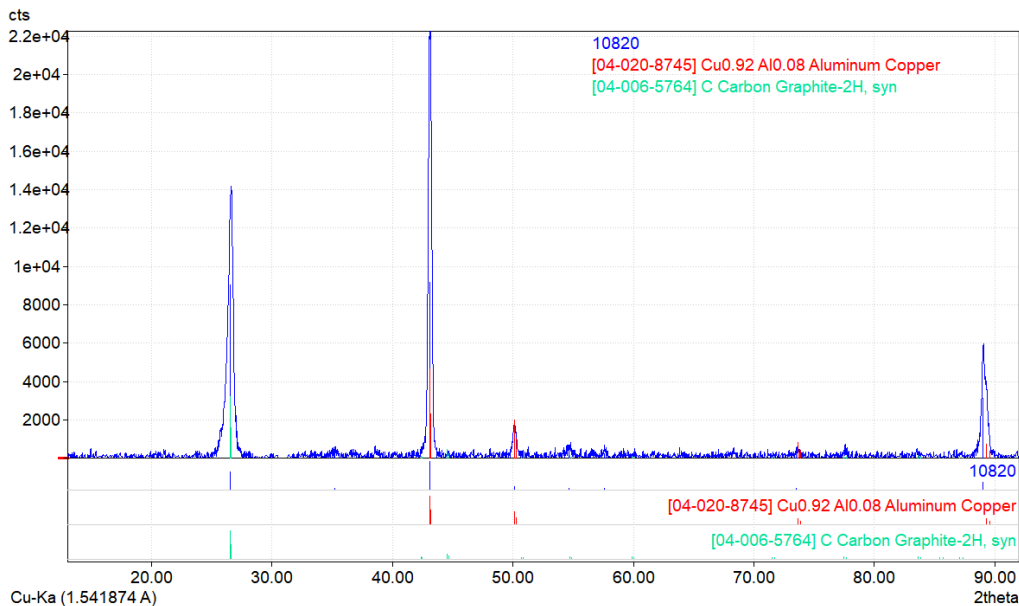
Rysunek 95. Dyfraktogram próbki CuAl12 WAAM z obszaru środka napoiny

Dyfraktogram próbki CuAl12 wytworzonej metodą WAAM, przedstawiający obszar dołu napoiny (rys. 96), ujawnił obecność następujących faz:

- ✓ faza o strukturze regularnej, o parametrach komórki zbliżonych do parametrów stopu $\text{Cu}_{0.92}\text{Al}_{0.08}$, należąca do grupy przestrzennej $Fm\bar{3}m$ (#225). Jest to dominująca faza w dolnej części napoiny, wskazująca na stabilność tego stopu w procesie druku 3D metodą WAAM. Obecność tej fazy odpowiada za dobre właściwości mechaniczne,

takie jak wytrzymałość na ściskanie oraz odporność na zużycie w dolnych partiach napoiny.

- ✓ grafit, którego obecność świadczy o procesach wytrącania węgla, zachodzących w trakcie chłodzenia i krystalizacji materiału. Obecność grafitu w dolnej części napoiny sugeruje, że procesy związane z wytrącaniem faz węglowych mogą być bardziej intensywne w tej strefie, co może wpłynąć na lokalne właściwości materiału, w tym na jego odporność na zużycie i tarcie.



Rysunek 96. Dyfraktogram próbki CuAl12 WAAM z obszaru dołu napoiny

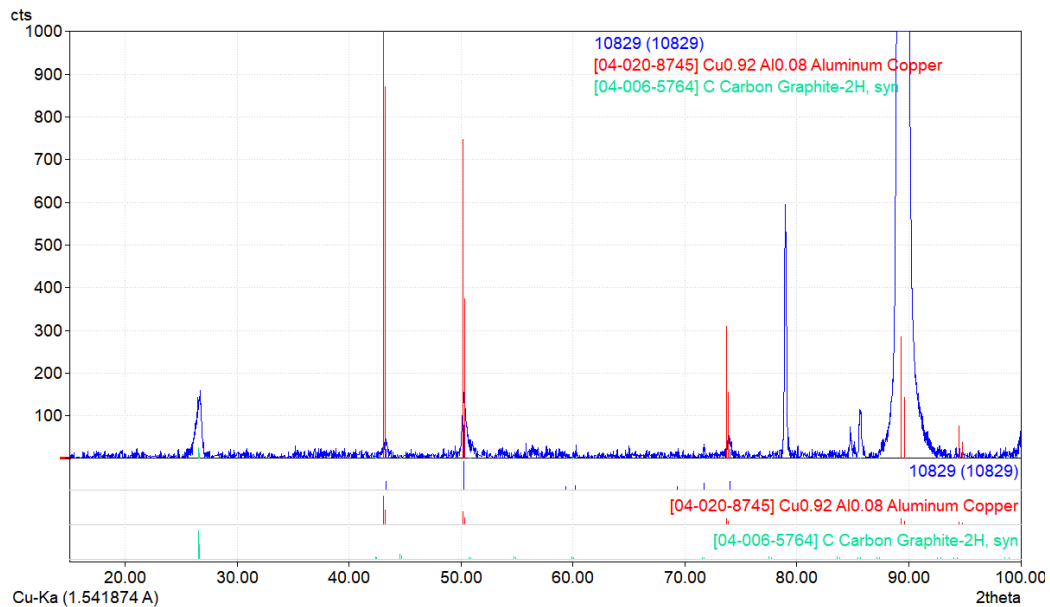
Dyfraktogramy próbek CuAl10Ni10, wytworzonych metodą WAAM, z obszarów lica oraz środka napoiny przedstawiono odpowiednio na rysunkach 97 i 98. Obie próbki wykazały obecność następujących faz:

- ✓ faza o strukturze regularnej, o parametrach komórki zbliżonych do parametrów stopu $\text{Cu}_{0.914}\text{Ni}_{0.063}\text{Al}_{0.023}$, należąca do grupy przestrzennej $Fm\bar{3}m$ (#225). Ta faza dominująca w obu obszarach wskazuje na równomierny rozkład składników stopowych Cu, Ni i Al, co może świadczyć o stabilnym procesie krystalizacji w trakcie drukowania metodą WAAM. Obecność tej fazy sugeruje korzystne właściwości mechaniczne, takie jak wysoka wytrzymałość i odporność na korozję.
- ✓ Grafit, identyfikowany w obu obszarach, wpływa na właściwości tribologiczne materiału, w szczególności na tarcie i odporność na zużycie.

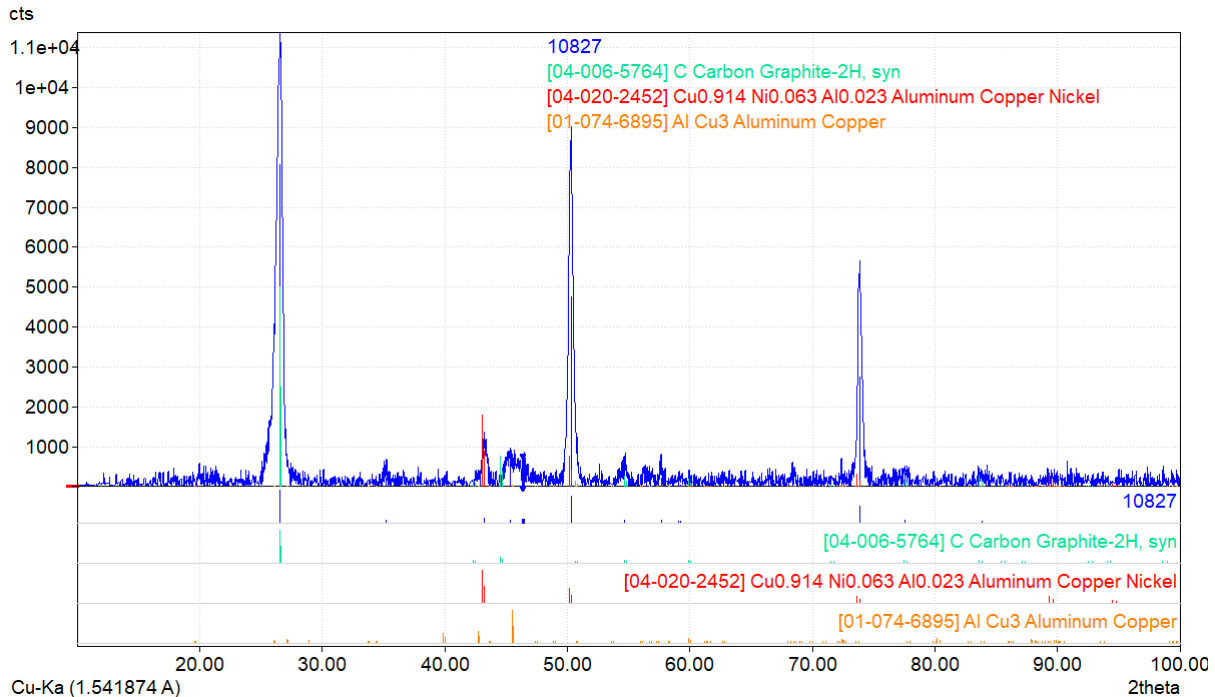
W próbce z obszaru środka napoiny zidentyfikowano dodatkowo:

- ✓ fazę odpowiadającą związkowi CuAl_3 , należącą do układu krystalograficznego rombowego, grupa przestrzenna $Pmm2$ (#25). Obecność tej fazy może wskazywać na lokalne różnice w rozkładzie ciepła oraz dynamice krystalizacji, co wpływa na zróżnicowanie składu fazowego w różnych obszarach napoiny. Związek CuAl_3 przyczynia się do zwiększenia twardości, jednak może również powodować pewne obniżenie plastyczności materiału w tych obszarach.

Różnice w składzie fazowym między górnym a środkowym obszarem napoiny mogą wynikać z niejednorodnych warunków termicznych w trakcie procesu WAAM, które wpływają na kinetykę krystalizacji i formowanie się poszczególnych faz w materiale.

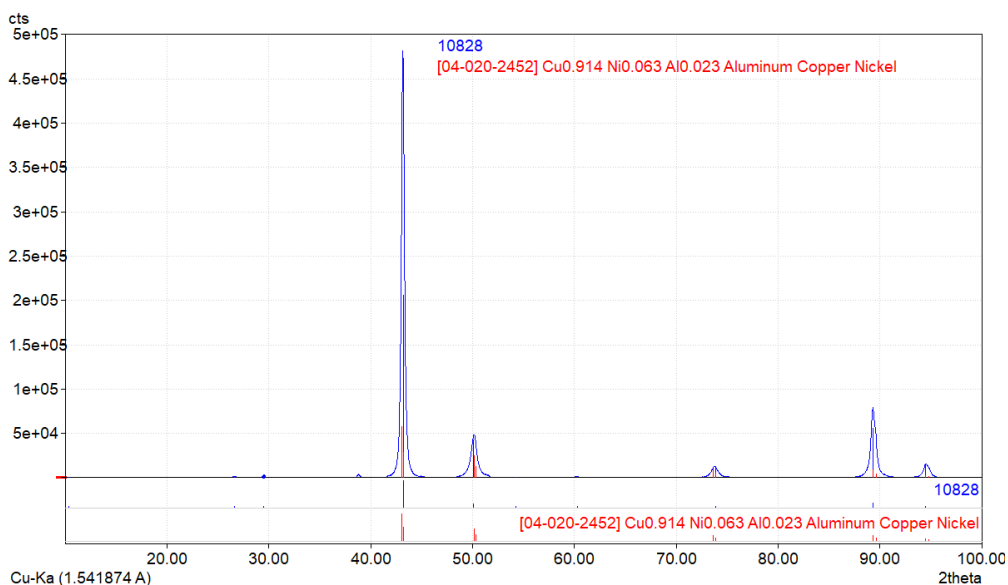


Rysunek 97. Dyfraktogram próbki $\text{CuAl}_{10}\text{Ni}_{10}$ WAAM z obszaru lica napoiny



Rysunek 98. Dyfraktogram próbki CuAl10Ni10 WAAM z obszaru środka napoiny

Dyfraktogram próbki CuAl10Ni10 WAAM z obszaru dołu napoiny, przedstawiony na rysunku 98, ujawnił obecność fazy o strukturze regularnej i parametrach komórki zbliżonych do parametrów stopu $\text{Cu}_{0.914}\text{Ni}_{0.063}\text{Al}_{0.023}$, należącej do grupy przestrzennej $Fm\bar{3}m$ (#225). Obecność tej fazy, podobnie jak w obszarach lica i środka napoiny, świadczy o jednorodności składu stopu w różnych strefach napoiny, co sugeruje stabilność procesu wytwarzania metodą WAAM. Stała obecność tej fazy w całej objętości próbki wpływa korzystnie na wytrzymałość i odporność korozyjną materiału. Dodatkowo, faza ta przyczynia się do optymalnych właściwości mechanicznych, zapewniając spójność strukturalną, co może być kluczowe w aplikacjach wymagających wysokiej trwałości i odporności na obciążenia mechaniczne. Zidentyfikowana faza w dolnym obszarze napoiny jest zgodna z fazami obecnymi w górnych częściach napoiny, co sugeruje, że w procesie WAAM uzyskano spójną i stabilną mikrostrukturę w całej próbce.



Rysunek 99. Dyfraktogram próbki CuAl10Ni10 WAAM z obszaru dołu napoiny

Analiza fazowa przeprowadzona na próbkach CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM wykazała istotne różnice w składzie fazowym pomiędzy poszczególnymi obszarami napoiny. W przypadku próbki CuAl12 WAAM, faza CuAl_3 w układzie krystalograficznym rombowym, należąca do grupy przestrzennej $Pmm2$ (#25), została zidentyfikowana zarówno w obszarze lica, jak i środka napoiny. Faza ta, ze względu na swoją strukturę, może wpływać na zwiększoną twardość oraz odporność na zużycie ściernie, co jest szczególnie istotne w kontekście zastosowań przemysłowych wymagających wysokiej trwałości materiału.

W próbce CuAl12 WAAM we wszystkich badanych obszarach, tj. w licu, środku i dole napoiny, zidentyfikowano fazę o strukturze regularnej i parametrach komórki odpowiadających stopowi $\text{Cu}_{0.92}\text{Al}_{0.08}$. Obecność tej fazy w całej objętości próbki sugeruje, że proces wytwarzania metodą WAAM zapewnił równomierne rozłożenie składników stopu, co ma kluczowe znaczenie dla uzyskania stabilnych i jednorodnych właściwości mechanicznych materiału. Podobne wyniki uzyskano dla próbki CuAl10Ni10 WAAM, gdzie we wszystkich badanych obszarach napoiny wykryto fazę o strukturze regularnej, z parametrami komórki zbliżonymi do stopu $\text{Cu}_{0.914}\text{Ni}_{0.063}\text{Al}_{0.023}$. Obecność tej fazy w licu, środku oraz dole napoiny wskazuje na spójność mikrostrukturalną stopu, co korzystnie wpływa na jego właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość oraz odporność na zużycie i korozję.

Zidentyfikowane fazy w obu próbkach CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM potwierdzają, że procesy spawania i druku 3D metodą WAAM są w stanie zapewnić jednorodność strukturalną materiału, co jest kluczowe dla jego długotrwałej eksploatacji w wymagających warunkach.

18. Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania potwierdziły postawioną tezę pracy, wskazując na potencjał opracowanej technologii wytwarzania multiwłóknistych drutów spawalniczych. Technologia ta umożliwia uzyskanie materiałów o wyższych właściwościach mechanicznych, jednorodności strukturalnej oraz izotropowości mechanicznej, co w efekcie przyczynia się do poprawy liniowej sprężystości w określonym zakresie wytrzymałości. Dzięki tym właściwościom, nowopowstałe materiały mogą stać się konkurencyjne w stosunku do dostępnych na rynku rozwiązań komercyjnych.

W pracy przedstawiono szczegółowo technologię pakietowania drutów aluminiowych oraz kombinacji drutów aluminiowych i niklowych w rurze miedzianej. Proces ten, poprzez zastosowanie odpowiednich metod przeróbki plastycznej, doprowadził do uzyskania materiałów spawalniczych o różnorodnych wariantach, takich jak CuAl11, CuAl13 oraz CuAl18, po wcześniejszym przygotowaniu drutów płaszczowych. Jednakże celem było uzyskanie materiału o wysokiej zawartości aluminium, przekraczającej 8% masowo, w porównaniu do istniejących komercyjnych materiałów spawalniczych.

Materiał CuAl12 został uzyskany poprzez pakietowanie pięciu drutów aluminiowych o średnicy \varnothing 2,15 mm w rurze miedzianej o średnicy \varnothing 8 mm, przy pominięciu etapu wytwarzania drutu płaszczowego CuAl. Następnie uzyskany kompozyt został przeciągnięty do średnicy \varnothing 2,15 mm i ponownie pakietowany do rurki miedzianej. W przypadku materiału CuAl12Ni12, proces pakietowania obejmował cztery druty aluminiowe oraz jeden drut niklowy, przy zastosowaniu analogicznego mechanizmu podwójnego pakietowania.

Druty multiwłókniste uzyskane tą metodą poddano badaniom mikroskopowym, co pozwoliło na obrazowanie ich struktury w przekroju. Przeprowadzono również szereg badań analitycznych, począwszy od analizy chemicznej, która ujawniła procentowy skład masowy poszczególnych metali w drutach multiwłóknistych. Wyniki analizy chemicznej wariantów pakietowania oraz poszczególnych etapów pakietowania przedstawiono w Tabeli 12, co stanowi istotny element oceny efektywności opracowanej technologii.

Dzięki tym badaniom możliwe było uzyskanie pełniejszego obrazu właściwości mechanicznych oraz składu chemicznego nowo powstałych materiałów, co ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju technologii wytwarzania drutów spawalniczych o zwiększonej wydajności i niezawodności.

Tabela 12. Wyniki analizy chemicznej drutów multiwłóknistych

	Al [%]	Ni [%]	Cu [%]
CuAl (I) – ozn. CuAl8	7,59	-	92,43
CuAl (II) – ozn. CuAl3	3,06	-	96,94
CuAl (III) – ozn. CuAl1	1,43	-	98,57
CuAl (B) – ozn. CuAl12	12,21	-	87,79
CuAlNi (B) – ozn. CuAl10Ni10	9,59	10,1	80,31

Wytworzone druty multiwłókniste poddano próbom spawalniczym z wykorzystaniem metody TIG oraz druku 3D WAAM, co zaowocowało uzyskaniem napoin stanowiących docelowy materiał badawczy. Uzyskane napoiny zostały następnie poddane badaniom metalograficznym z użyciem mikroskopu świetlnego, co pozwoliło na szczegółową analizę makro- i mikrostruktury wewnętrznej.

Próbki przeznaczone do obserwacji mikroskopowych zostały odpowiednio przygotowane poprzez wcześniejszą obróbkę. Proces ten obejmował cięcie próbek po przeprowadzeniu obserwacji makroskopowych, a następnie ich zatopienie w żywicy przewodzącej KonductoMet, termoutwardzalnej żywicy fenolowej do ciśnieniowego inkludowania próbek o małej rezystancji. Po przygotowaniu, próbki zostały podzielone na trzy strefy do dalszych badań: górną, obejmującą lico napoiny; środkową; oraz dolną, dotyczącą strefy grani napoiny. Każdy z tych obszarów został następnie poddany szczegółowej obserwacji mikroskopowej za pomocą mikroskopu optycznego Olympus GX71. Kolejny etap badań obejmował analizę przeprowadzoną za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), przy czym zastosowano detektor EDS w celu rejestracji i identyfikacji pierwiastków. W ramach tego etapu wykonano analizę punktową i charakteryzację wierzchniej warstwy próbek, a także mapping rozkładu pierwiastków, co dostarczyło istotnych informacji dotyczących jednorodności materiału oraz rozkładu składu chemicznego. Dodatkowo, przeprowadzono badania twardości napoin przy użyciu metody Vickersa (HV10), stosując czworoboczny foremny ostrosłup diamentowy o kącie wierzchołkowym 136°. Obciążenie statyczne wynosiło $F = 98,07$ N, co umożliwiło uzyskanie precyzyjnych wyników twardości. Wyniki badań twardości dla poszczególnych próbek, podzielonych na obszary: lico, środek górny, środek dolny oraz dół napoiny, zostały przedstawione w Tabeli 13.

Dzięki przeprowadzonym badaniom możliwe było precyzyjne określenie właściwości mechanicznych oraz strukturalnych uzyskanych napoin, co stanowi istotny krok w rozwoju technologii wytwarzania materiałów spawalniczych o zwiększonych parametrach użytkowych. Analiza mikrostruktury, własności mechanicznych, a także odporności na zużycie i korozję, dostarczyła kompleksowych danych, które pozwalają na lepsze zrozumienie potencjału materiałów wytwarzanych metodą WAAM. Uzyskane rezultaty stanowią cenny wkład do dalszych badań nad optymalizacją właściwości drutów multiwłóknistych, szczególnie w kontekście ich zastosowania w zaawansowanych technologiach przemysłowych, takich jak produkcja komponentów o złożonej geometrii i wymagających wytrzymałości na ekstremalne warunki eksploatacyjne. Badania te otwierają nowe perspektywy dla wdrożenia innowacyjnych rozwiązań materiałowych w spawalnictwie oraz druku 3D, co może przyczynić się do podniesienia efektywności procesów produkcyjnych w wielu gałęziach przemysłu.

Tabela 13. Wyniki badania twardości metodą Vickersa HV10

ODCISK	CuAl8MigWeld (DC)	CuAl8 (DC)	CuAl12 (AC)	CuAl10Ni10 (AC)	CuAl12 (WAAM)	CuAl10Ni10 (WAAM)
1	84,4	68,5	215,2	211,0	90,7	62,1
2	83,7	73,7	220,5	221,6	88,0	67,5
3	81,2	78,1	230,6	220,5	83,0	65,9
Średnia	83,12	73,5	222,1	217,7	87,2	65,1
Odch. std	1,70	4,78	7,84	5,80	3,90	2,77
4	86,8	84,7	236,5	219,4	71,3	63,9
5	78,8	85,7	221,6	215,1	75,2	64,4
6	76,1	81,7	222,7	209,0	69,9	62,1
Średnia	80,6	84,0	226,9	214,5	72,1	63,4
Odch. std	5,56	2,11	8,32	5,22	2,74	1,20
7	70,1	78,1	212,0	214,13	65,5	61,8
8	70,7	73,9	226,0	213,1	71,9	62,6
9	68,9	71,7	229,4	206,0	70,1	66,4
Średnia	69,9	74,6	222,5	211,1	69,1	63,6
Odch. std	0,88	3,27	9,21	4,39	3,30	2,45
10	95,4	79,5	236,5	215,1	66,4	65,6
11	88,4	76,2	231,7	203,1	71,1	66,9
12	91,9	74,4	227,1	202,2	83,7	73,1
Średnia	91,9	76,7	231,9	206,8	73,7	68,5
Odch. std	3,47	2,61	4,68	7,24	8,94	4,00



W celu zbadania podstawowych właściwości mechanicznych przeprowadzono próbę ściskania z wykorzystaniem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Badanie wykazało, że próbki CuAl12 wytworzone metodą druku 3D WAAM cechują się wysoką wytrzymałością na ściskanie, przewyższającą właściwości komercyjnych materiałów. Podobnie, próbki CuAl10Ni10, również wyprodukowane metodą WAAM, wykazały wyższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu zarówno do materiałów komercyjnych, jak i próbek wykonanych metodą spawania TIG.

Dodatkowo próbki poddano testom tribologicznym z zastosowaniem metody "pin on disc", która służy do oceny zużycia ślizgowego w parach trących. Układ testowy składał się z badanej próbki i przeciwpróbki w postaci kulki stalowej 100Cr6, zamontowanej w gnieździe pręta (pin). Na pin działała określona siła dociskająca go do powierzchni obracającej się próbki. Wyniki prób tribologicznych pozwoliły na sporządzenie wykresów współczynnika tarcia dla poszczególnych materiałów po procesie druku WAAM, w porównaniu do spawania.

Materiały wytworzone metodą druku 3D WAAM, w wyniku działania siły tarcia, wykazywały charakterystyczną topografię powierzchni, z widocznymi wzniesieniami i zbrociami, które wskazują na proces wykruszania materiału próbki oraz zużycie wynikające z kontaktu z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100Cr6. W analizie tych zjawisk topograficznych stwierdzono, że mechanizmy zużycia są charakterystyczne dla wysokowytrzymałych materiałów, które podlegają intensywnym obciążeniom ściernym, co ma istotne znaczenie w kontekście ich dalszego zastosowania w trudnych warunkach eksploatacyjnych.

Przeprowadzone testy potwierdziły również wysoką odporność na zużycie ślizgowe materiałów wytworzonych metodą WAAM, co czyni je obiecującymi kandydatami do zastosowania w technologiach, gdzie wymagane są materiały o podwyższonych właściwościach tribologicznych. Dalsze badania w tym zakresie pozwolą na optymalizację składu chemicznego i mikrostruktury, a także na lepsze dostosowanie materiałów do specyficznych warunków pracy.

Odporność korozyjna próbek została oceniona zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06, w badaniach prowadzonych w komorze solnej metodą NSS. Wyniki wskazują na istotne różnice w zachowaniu materiałów w środowisku korozyjnym. Najwyższą odporność wykazała próbka CuAl10Ni10 AC, która przez większość okresu badawczego odnotowywała wzrost masy, co sugeruje tworzenie ochronnej warstwy. Wartości strat masy w próbkach CuAl8 MigWeld DC, CuAl10Ni10 WAAM oraz CuAl12 AC były stosunkowo niskie, co



świadczą o ich dobrej odporności na korozję. Z kolei próbki CuAl8 DC i CuAl12 WAAM charakteryzowały się największym spadkiem masy, co może ograniczać ich zastosowanie w wymagających warunkach środowiskowych. W związku z tym dalsze badania są niezbędne, aby lepiej zrozumieć mechanizmy ochrony i degradacji tych materiałów.

Kolejnym etapem badań była analiza fazowa XRD, przeprowadzona na podstawie obrazów dyfrakcyjnych w celu identyfikacji składu fazowego próbek CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM. Próbki podzielono na trzy obszary: lico napoiny, środek oraz dół, analogicznie do próbek analizowanych przy użyciu SEM. Analizę jakościową faz próbek wykonano w oparciu o interpretację dyfraktogramów, uzyskanych za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego XRD7 firmy Seifert-FPM. Stosowano promieniowanie rentgenowskie Cu $K\alpha$ oraz filtr Ni, a pomiary wykonano w geometrii Bragga-Brentano.

19. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowanie nowych materiałów multiwłóknistych do spawalnictwa i technologii druku 3D WAAM – badania wykazały, że opracowana technologia produkcji drutów multiwłóknistych jest efektywna i pozwala na uzyskanie materiałów o wysokiej jakości, przydatnych zarówno w technologii spawania metodą TIG, jak i druku 3D WAAM. Wytworzone materiały spełniają wymagania stawiane współczesnym materiałom inżynierskim w zakresie wytrzymałości mechanicznej i jednorodności struktury.
2. Elastyczność w dostosowaniu materiałów spawalniczych – zaproponowana metoda wytwarzania multiwłóknistych materiałów spawalniczych umożliwia precyzyjne dostosowanie ich składu chemicznego i właściwości mechanicznych do specyficznych wymagań użytkownika. Pozwala to na stworzenie materiałów „pod klienta”, dostosowanych do konkretnych warunków pracy, co stanowi innowacyjne rozwiązanie w inżynierii materiałowej.
3. Właściwości mechaniczne i odporność na zużycie – uzyskane materiały charakteryzują się wyższą twardością i lepszymi wynikami wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do dostępnych komercyjnie materiałów spawalniczych. Wyniki testów tribologicznych wykazały, że materiały po druku 3D metodą WAAM mają zwiększoną odporność na zużycie ściernie, co może wpłynąć na ich długowieczność w warunkach eksploatacyjnych.
4. Odporność na korozję – badania odporności korozyjnej próbek wykazały, że zarówno materiały CuAl10Ni10, jak i CuAl12 mają dobrą odporność na działanie środowisk korozyjnych, co potwierdziły testy w komorze solnej. Te właściwości mogą być kluczowe w zastosowaniach, gdzie materiał narażony jest na działanie agresywnych czynników chemicznych.
5. Kontrola składu chemicznego napoin – proces druku 3D WAAM wiąże się z możliwością wypalania się włókien składowych multiwłóknistych drutów, co prowadzi do zmiany składu chemicznego napoiny. Zastosowanie odpowiednich naddatków materiałowych w trakcie procesu produkcji drutów umożliwia kontrolowanie tych zmian, co pozwala na precyzyjne sterowanie składem chemicznym uzyskanego materiału.



6. Możliwość produkcji materiałów o unikalnym składzie chemicznym – dzięki technologii wytwarzania wieloskładnikowych drutów multiwłóknistych możliwe jest uzyskanie materiałów o unikalnym składzie chemicznym, które nie byłyby możliwe do wykonania przy zastosowaniu tradycyjnych metod, takich jak odlewanie ciągłe. Ta innowacyjna metoda pozwala na rozwój nowych gatunków materiałów spawalniczych o specjalistycznych właściwościach.
7. Równomierność strukturalna i izotropowość mechaniczna – wytworzone materiały multiwłókniste charakteryzują się równomiernością strukturalną i izotropowością mechaniczną, co wpływa na ich stabilność i jednolite własności mechaniczne niezależnie od kierunku obciążenia. Dzięki temu, materiały te mogą być szczególnie użyteczne w aplikacjach, gdzie wymagana jest wysoka precyzja wykonania i niezawodność działania w zmiennych warunkach obciążeń.
8. Możliwość zastosowania w trudnych warunkach eksploatacyjnych – nowe materiały, dzięki swoim właściwościom mechanicznym i odporności na zużycie, mają potencjał do zastosowań w warunkach wysokiego obciążenia oraz w środowiskach o podwyższonej agresywności chemicznej. To otwiera perspektywy dla ich zastosowania w branżach takich jak przemysł lotniczy, motoryzacyjny czy energetyczny.
9. Znaczenie w rozwoju technologii druku 3D WAAM – wyniki badań dowodzą, że materiały multiwłókniste mogą znacząco poprawić efektywność i jakość procesów związanych z technologią druku 3D WAAM. Zwiększona kontrola nad składem chemicznym oraz właściwościami mechanicznymi napoiny stwarza możliwości dla produkcji wyrobów o wyższych parametrach użytkowych.
10. Potencjał rozwojowy technologii wytwarzania multiwłóknistych drutów spawalniczych – uzyskane wyniki wskazują na duży potencjał rozwojowy technologii produkcji drutów multiwłóknistych, zarówno w zakresie spawalnictwa, jak i innych technik wytwórczych. Możliwość projektowania materiałów o unikalnych właściwościach mechanicznych i chemicznych otwiera nowe perspektywy dla zaawansowanych procesów inżynierii materiałowej.

Rozwój tej technologii może przyczynić się do znacznego postępu w dziedzinie materiałoznawstwa i wdrażania innowacyjnych rozwiązań w przemyśle.

W ramach prezentowanej rozprawy doktorskiej:

- zgłoszono jeden patent [103],
- wykonano cztery prace subwencyjne w ramach działalności w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych,
- napisano jeden artykuł naukowy [12],
- napisano dwa artykuły prezentowane w materiałach konferencyjnych [14, 102],
- wyniki prezentowano na trzech konferencjach międzynarodowych i dwóch konferencjach krajowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Poradnik inżyniera, Spawalnictwo 1, pod red., J. Pilarczyka, WNT, Warszawa 2003, ISBN 8320424178 tom 1.
- [2] Spawalnictwo, Ferenc K., PWN, Warszawa 2016, ISBN 9788301190309.
- [3] Spawanie, Wiadomości podstawowe, Mizerski J., REA, Warszawa 2005, ISBN 8371417144.
- [4] Electrical Conductivity of Ultrafine-Grained Cu and Al Alloys: Attaining the Best Compromise with Mechanical Properties, Gonzalez-Hernandez J., Cubero-Sesin J.M., Materials Transactions 64(8), vol.64 No. 8 2023 1754-1768.
- [5] Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultrafine Microstructures, ed by Nastasi, M., Parkin, D.M., Gleiter, H., (Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1993) p.587.
- [6] Influence of Morphology of Intermetallic Particles on the Microstructure and Properties Evolution in Severely Deformed Al-Fe Alloys, Medvedev, A., Murashkin, M., Enikeev, N., Metals 2021, 11(5), 815.
- [7] High-pressure torsion for fabrication of high-strength and high-electrical conductivity Al micro-wires, Cubero-Sesin, J.M., In, H., Arita, M., Iwaoka, H., Horita, Z. Special Section: Ultrafinegrained Materials, 19th ed. Kluwer Academic Publishers: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 6550–6557.
- [8] Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity, Murashkin, M.Y., Sabirov, I., Sauvage, X., Valiev, R.Z, J. Mater. Sci. 2016, 51, 33–49.
- [9] Fabrication of a novel high-strength and high-conductivity copper-clad aluminum composite wire, Amiri, F.S., Hosseinipour, S.J., Aval, H.J., Jamaati, R. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 2023, 41, 144–159.
- [10] Ultrafine-grained Al–5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure, Stolyarov, V.; Lapovok, R.; Brodova, I.; Thomson, P, Mater. Sci. Eng. A 2003, 357, 159–167.
- [11] Influence of the supersaturated silicon solid solution concentration on the effectiveness of severe plastic deformation processing in Al–7 wt.% Si casting alloy, Cepeda-Jiménez, C.M., García-Infanta, J.M., Zhilyaev, A.P., Ruano, O.A., Carreño, F., Materials Science and Engineering: A Volume 528, Issue 27, 15 October 2011, Pages 7938-7947.
- [12] Properties of Padding Welds Made of CuAl₂ Multiwire and CuAl₇ Wire in TIG Process, Kalabis, J., Kowalski, A., Topolska, S., Materials MDPI 16 (18):6199, September 2023.

- [13] Druty miedziane, aluminiowe i bimetalowe, Golis B., Błażejowski Z., Pilarczyk J., Dyja H., Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, ISBN 83-87745-01-4.
- [14] Forming of structure and properties of metal surfacing welds made of CuAl7 and CuAl2 alloys subjected to the hot isostatic pressing process, Kalabis, J., Kulasa, J., Kowalski, A., Kołacz, D., Topolska, S., Bonek, M., (red.): Międzynarodowa konferencja naukowa Material Technologies in Silesia'2022, 12-15 czerwca 2022, Wisła, 2022, Politechnika Śląska, 220 s., ISBN 978-83-65138-32-3.
- [15] Model for the Prediction of Deformations in the Manufacture of Thin-Walled Parts by Wire Arc Additive Manufacturing Technology, Casuso, M., Veiga, F., Suárez, A., Bhujangrao, T., Aldalur, E., Artaza, T., Amondarain, J., Lamikiz, A. Metals 2021, 11, 678.
- [16] Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P., Materials 2019, 12, 1121.
- [17] Asymptotic residual stress distribution induced by multipass welding processes, Ferro, P., Berto, F., James, N., Int. J. Fatigue 2017, 101, 421–429.
- [18] Microstructural characterization of high strength and high conductivity nanocomposite wires, Dupouy, F., Snoeck, E., Casanove, M.J., Roucau, C., Peyrade, J.P., Askenazy, S. Scripta Materialia 1996, 34, 1067–1073.
- [19] Effect of Casting and Additive Manufacturing on the Microstructure and Mechanical Property of Al-Cu Composites, Lei, S., Deng, Y. Q., Li, X. F., Wu, L., Chen, Y. C. In Materials Science Forum (Vol. 993, pp. 718-722). Trans Tech Publications Ltd. (2020).
- [20] Microstructure and Mechanical Properties of TiB₂/Al-Si Composites Fabricated by TIG Wire and Arc Additive Manufacturing. Yang, Q. F., Xia, C. J., Deng, Y. Q. In Materials Science Forum (Vol. 944, pp. 64-72). Trans Tech Publications Ltd (2019).
- [21] Additive manufacturing of metals, Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. Acta Materialia, 117, 371-392 (2016).
- [22] Additive layer manufacturing of Ti-6Al-4V and ScalmalloyRP: fatigue and fracture, D. Greitemeier, D., Schmidtke, K., Holzinger, V., Dalle Donne C., Proc of Fatigue and Fracture, 27th ICAF Symposium, Jerusalem (2013).

- [23] Microstructure and properties of Cu–Nb and Cu–Ag nanofiber composites. Rdzawski, Z., Głuchowski, W., Stobrawa, J., Kempniński, W., Andrzejewski, B., Archives Civil and Mechanical Engineering 2015, 15, 689–697.
- [24] Numerical simulation of metallic wire arc additive manufacturing (WAAM), Graf, M., Pradjadhiana, K.P., Hälsig, A., Manurung, Y.H.P.; Awiszus, B. AIP Conf. Proc. 2018, 1960, 140010.
- [25] High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties, Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., Lamikiz, A., J. Manuf. Process. 2020, 58, 615–626.
- [26] Output characteristic and arc length control of pulsed gas metal arc welding process, Wang, Q., Qi, B., Cong, B., Yang, M, J. Manuf. Process. 2017, 29, 427–437
- [27] Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM), Prado-Cerqueira, J.L., Camacho, A.M., Diéguez, J.L., Rodríguez-Prieto, Á., Aragón, A.M., Lorenzo-Martín, C., Yanguas-Gil, Á., Materials 2018, 11, 1449.
- [28] Strukturalne i mechaniczne skutki wydzielenia ciąglego i nieciąglego w stopach CuNiAl. J., Gryziecki, Z., Sierpiński, A., Łatkowski, VII Ogólnopolska Konferencja Metale Nieżelazne w Przemysle Okrętowym, Szczecin 1996 (63-72).
- [29] Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys, Oyama, K., Diplas, S., M’Hamdi, M., Gunnæs, A.E., Azar, A.S., Addit. Manuf. 2019, 26, 180–192.
- [30] A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement, Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J., J. Manuf. Process 2018, 35, 127–139.
- [31] Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., Oliveira, J.P., Materials 2019, 12, 1121.
- [32] Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing, Cunningham, C., Flynn, J., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S., Addit. Manuf. 2018, 22, 672–686.
- [33] A review of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Composite, Process, Classification, Advantages, Challenges, and Application Athaib N.H, Haleem A., H., Al.-Zudaiby B., 2021 Journal of Physics: Conference Series 1973 012083.

- [34] Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres, Teresa, A., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Taberero, I., Larrañaga, O., Lamikiz, A. J., *Mater. Res. Technol.* 2020, 9, 15454–15466.
- [35] Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests, Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015.
- [36] Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications, Jhavar, S., Jain, N.K., Paul, C.P., *J. Mater. Process. Technol.* 2014, 214, 1102–1110.
- [37] Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling, Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ganguly, S., Eimer, E., Kabra, S., Williams, S., *Addit. Manuf.* 2018, 22, 775–783.
- [38] <https://prosolutions.pl/> (dostęp 14.03.2024).
- [39] Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components, Martina, F., Roy, M.J., Szost, B.A., Terzi, S., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Withers, P.J., Meyer, J., Hofmann, M., *Mater. Sci. Technol.* 2016, 32, 1439–1448.
- [40] Sun, R.; Li, L.; Zhu, Y.; Guo, W.; Peng, P.; Cong, B.; Sun, J.; Che, Z.; Li, B.; Guo, C.; et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening. *J. Alloy. Compd.* 2018, 747, 255–265.
- [41] The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V, Donoghue, J., Antonyamy, A.A., Martina, F., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Prangnell, P.B., *Mater. Charact.* 2016, 114, 103–114.
- [42] Hybrid Additive Manufacture and Deformation Processing for Large Scale Near-Net Shape Manufacture of Titanium Aerospace Components, Donoghue, J.M., University of Manchester: Manchester, UK, 2016.
- [43] Wohlers Report 2022, 3D Printing and Additive Manufacturing. Global State of the Industry 2022.
- [44] Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties, DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W., *Prog. Mater. Sci.* 2018, 92, 112–224.

- [45] Laser Powder Bed Fabrication of Nickel-Base Superalloys: Influence of Parameters: Characterisation, Quantification and Mitigation of Cracking, Carter, L.N., Attallah, M.M., Reed, R.C., Superalloys 2012, 577–586.
- [46] Influence of Shielding Gas Composition on Structure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Inconel 625, Jurić, I., Garašić, I., Bušić, M., Kožuh, Z., JOM Technological Innovations in Metals Engineering (25 September 2018) Volume 71, pages 703–708.
- [47] Laves phase control of Inconel 718 alloy using quasi-continuous-wave laser additive manufacturing, Xiao, H., Li, S., Han, X., Mazumder, J., Song, L. Mater. Des. 2017, 122, 330–339.
- [48] Metal Additive Manufacturing. Market Research and Analysis, 2021 – Trends, Growth Opportunities and Forecast to 2028 – raport.
- [49] Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, Wang, L., Xue, J., Wang, Q. Mater. Sci. Eng. A 2019, 751, 183–190.
- [50] AMPower Report 2021. Metal Additive Manufacturing – raport
- [51] ASTM ISO/ASTM52900-15 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology.
- [52] Kierunki i perspektywy rozwoju technologii przyrostowych, Krystowska M., Kulasa J., Kowalski A., Brudny A., sprawozdanie nr 8151/21 opracowanie własne niepublikowane Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych.
- [53] Fabrication of Copper-Rich Cu-Al Alloy Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process. Dong, B., Pan, Z., Shen, C., Ma, Y., Li, H. Metallurgical and Materials Transactions B 2017, 48, 3143–3151.
- [54] Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire, Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., Akselsen, O.M., J. Mater. Process. Technol. 2018, 259, 68–74.
- [55] Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process, Ortega, A.G., Galvan, L.C., Deschaux-Beaume, F., Mezrag, B., Rouquette, S., Sci. Technol. Weld. Join. 2018, 23, 316–332.
- [56] Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part, Ghaffari,

- M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., Nasiri, A. J., *Miner. Met. Mater. Soc.* 2019, 71, 4215–4224.
- [57] Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties, Ge, J., Lin, J., Chen, Y., Lei, Y., Fu, H. J., *Alloys Compd.* 2018, 748, 911–921.
- [58] The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing—A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size. In *The Minerals*, Henckell, P., Günther, K., Ali, Y., Bergmann, J.P., Scholz, J., Forêt, P., *Metals & Materials Series*, TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings; BSpringer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 147–156.
- [59] CMT-based wire arc additive manufacturing using 316L stainless steel: Effect of heat accumulation on the multi-layer deposits, Lee, S.H., *Metals* 2020, 10, 278.
- [60] Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing. Abe, T., Sasahara, H., *Precis. Eng.* 2016, 45, 387–395.
- [61] Building blocks for a digital twin of additive manufacturing., Knapp, G., Mukherjee, T., Zuback, J., Wei, H., Palmer, T., De, A., DebRoy, T. *Acta Mater.* 2017, 135, 390–399.
- [62] Nowe prace nad wykorzystaniem napawania łukowego MIG/MAG do drukowania 3D, Cegielski, P., Ostrysz, M., Łacisz, W., Panas, M., Kowalski, P., *Przegląd spawalnictwa*, 2018 R 90 nr 1, str 43-47.
- [63] Zrobotyzowane drukowanie 3D części maszyn metodami spawalniczymi, Cegielski, P., Skublewska, A., Gawroński, P., Ostrysz M., *Welding Technology Review*, 2017, 89(1).
- [64] A review of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) and advances in WAAM of aluminium, Derekar, K. S., *Materials Science and Technology*, Vol. 34, no. 8, pp 895-916.
- [65] Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel, Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., Lamikiz, A., *Metals* 2020, 10, 892.
- [66] Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing, Rafieazad, M., Ghaffari, M., Nemani, A.V., Nasiri, *AIInt. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 105, 2121–2134.
- [67] Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. Cunningham, C.R., Wikshåland, S., Xu, F., Kemakolam, N., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., *Procedia Manuf.* 2017, 11, 650–657.

- [68] Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components, Venturini, G., Montevecchi, F., Bandini, F., Scippa, A., Campatelli, G., *Addit. Manuf.* 2018, 22, 643–657.
- [69] Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel, Bekker, A.C.M., Verlinden, J.C., *J. Clean. Prod.* 2018, 177, 438–447.
- [70] Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features, Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., Campatelli, G. *Procedia CIRP* 2016.
- [71] Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing, Taberero, I., Paskual, A., Álvarez, P., Suárez, A. *Procedia CIRP* 2018, 68, 358–362.
- [72] Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding, Pickin, C.G., Williams, S.W., Lunt, M.J. *Mater. Process. Technol.* 2010, 211, 496–502.
- [73] *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Lippold, J.C., Kotecki, D.J., Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [74] Empirical methodology to determine inherent strains in additive manufacturing, Setien, I., Chiumenti, M., van der Veen, S., San Sebastian, M., Garciandía, F., Echeverría, A. *Comput. Math. Appl.* 2019, 78, 2282–2295.
- [75] Computationally Efficient Hybrid Model for Simulating the Additive Manufacturing Process of Metals, Jayanath, S., Achuthan, A., *A Int. J. Mech. Sci.* 2019, 160, 255–269.
- [76] Introduction to the design rules for metal big area additive manufacturing, Greer, C., Nycz, A., Noakes, M., Richardson, B., Post, B., Kurfess, T., & Love, L. (2019). *Additive manufacturing*, 27, 159-166.
- [77] Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding, Xiong, J., Li, R., Lei, Y., Chen, H., *J. Mater. Process. Technol.* 2018, 251, 12–19.
- [78] Rapid prediction of real-time thermal characteristics, solidification parameters and microstructure in laser directed energy deposition (powder-fed additive manufacturing), Huang, Y., Ansari, M., Asgari, H., Farshidianfar, M.H., Sarker, D., Khamesee, M.B., Toyserkani, E. J., *Mater. Process. Technol.* 2019, 274, 116286.
- [79] Microstructural Analyses of ATI 718Plus® Produced by Wire-ARC Additive Manufacturing Process, Asala, G., Khan, A.K., Andersson, J., Ojo, O.A., *Metall. Mater. Trans. A* 2017, 48, 4211–4228.

- [80] Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding, Ge, J., Lin, J., Lei, Y., Fu, H., *Mater. Sci. Eng. A* 2018, 715, 144–153.
- [81] Role of second phases in the stress corrosion cracking of a nickel-aluminium bronze in saline water, Fonlupt, S., Bayle, B., Delafosse, D., Heuze, J. *Corros. Sci.* 2005, 47, 2792–2806.
- [82] Microstructural evolution and mechanical behavior of nickel aluminum bronze Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn fabricated through wire-arc additive manufacturing, Dharmendra, C., Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B.S., Ram, G.D., Mohammadi, M. *Add. Manuf.* 2019, 30, 100872.
- [83] Residual stress, mechanical properties, and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted wire and arc additive manufacturing, Yang, Y., Jin, X., Liu, C., Xiao, M., Lu, J., Fan, H., Ma, S., *Metals* 2018, 8, 934.
- [84] Effect of ultrasonic power on porosity, microstructure, mechanical properties of the aluminum alloy joint by ultrasonic assisted laser–MIG hybrid weldin, Liu, J., Zhu, H., Li, Z., Cui, W., Shi, Y., *Opt. Lasers. Eng.* 2019, 119, 105619.
- [85] Welding: solidification and microstructure, David, S.A., Babu, S.S., Vitek, J.M., *JOM* 2003, 55, 14–20.
- [86] Effect of filler metal on microstructure and mechanical properties of manganese–aluminum bronze repair welds, Rahni, M.R.M., Beidokhti, B., Haddad-sabzevar, M., *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2017, 27, 507–513.
- [87] Additive manufacturing of liquid rocket engine combustion devices: a summary of process developments and hot-fire testing results, Gradl, P. R., Greene, S. E., Protz, C., Bullard, B., Buzzell, J., Garcia, C., Cooper, K. G. (2018) *Joint Propulsion Conference* (p.4625).
- [88] The corrosion of nickel-aluminium bronze in seawater, Wharton, J.A., Barik, R.C., Kear, G., Wood, R.J.K., Stokes, K.R., Walsh, F.C., *Corros. Sci.* 2005, 47, 3336–3367.
- [89] Wire and arc additive manufacturing of aluminum components, Köhler, M., Fiebig, S., Hensel, J., Dilger, K. *Metals* 2019, 9, 608.
- [90] Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing, Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q., Tang, S., Fan, H., Ma, S. *Mater. Manuf. Processes* 2017, 32, 1881–1886.
- [91] Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, Colegrove, P.A., Coules, H.E., Fairman, J., Martina,

- F., Kashoob, T., Mamash, H., Cozzolino, L.DJ. *Mater. Process. Technol.* 2013, 213, 1782–1791.
- [92] Partial Additive Manufacturing: Experiments and Prospects with Regard to Large Series Production., Dröder, K., Heyn, J.K., Gerbers, R., Wonnenberg, B., Dietrich, F., *Procedia CIRP* 2016, 55, 122–127.
- [93] Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing, Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., Durante, M., Boccarusso, L., Minutolo, F.M.C., Squillace, A. *Procedia CIRP* 2017.
- [94] The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry, Thomas-Seale, L.E.J., Kirkman-Brown, J.C., Attallah, M.M., Espino, D.M., Shepherd, D.E.T. *Int. J. Prod. Econ.* 2018, 198, 104–118.
- [94] Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. Buchanan, C., Gardner, L. (2019) *Engineering Structures*, 180, 332-348.
- [95] Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments, Liu, J., Xu, Y., Ge, Y., Hou, Z., Chen, S. (2020). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-50.
- [96] Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture, Mehnen J., Ding J., Lockett H., Kazanas P., *Global Product Development* (2011), 721-727.
- [97] Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. (2015). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1), 465-481.
- [98] Conventional and additive manufacturing with metal matrix composites: A perspective. Behera, M. P., Dougherty, T., & Singamneni, S. (2019). *Procedia Manufacturing*, 30, 159-166.
- [99] Introduction to Additive Manufacturing Godec D., Pilipović A., Breški T., Ureña J., Jordá O., Martínez M., Gonzalez-Gutierrez J., Schuschnigg S., Leoben M., Blasco J., Portoles L., *A Guide to additive Manufacturing* (2022).
- [100] Additive manufacturing in armor and military applications: research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges, Colorado H. A., Cardenas C. A., Gutierrez-Velazquez E. I., Escobedo J. P., Monteiro S. N., *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 27, 2023, Pages 3900-3913, ISSN 2238 7854.

- [101] Optimization of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process for the Production of Mechanical Components Using a CNC Machine, Feier A., Buta I., Florica C., Blaga L., *Materials* 2023, 16, 17.
- [102] Własności mechaniczne napoin z multidrutów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 wytworzonych metodą druku 3D, J., Kalabis, *Interdyscyplinarne Badania Młodych Naukowców* ISBN 978-83-7880-975-3 Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2024.
- [103] Multimetalowe druty do zastosowania w spawalnictwie i sposób ich wytwarzania, J., Kalabis, J., Kulasa, A., Kowalski, K., Marszowski, *Zgłoszenie patentowe, P.446741*.