



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr Adam Dóring

**Własności użytkowe wieloskładnikowych złączy lutowanych
do zastosowania w regeneracji alternatorów samochodowych**

Functional properties of multicellular soldered joints for use
in automotive alternator regeneration

Promotor:

prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn prof. zw.

Promotor pomocniczy:

dr inż. Adam Jurek

Spis treści

1. WPROWADZENIE.	5
1.1. Stan zagadnienia.	5
1.2. Materiały stosowane w budowie alternatorów.	11
1.2.1. Stal elektrotechniczna w budowie alternatorów.	11
1.2.2. Miedź stosowana w budowie alternatorów.	12
1.2.3. Stale niestopowe w budowie alternatorów.	14
1.2.4. Magnez trwały w budowie alternatorów.	14
1.2.5. Izolatory w budowie alternatorów.	16
1.2.6. Stopy aluminium w budowie alternatorów.	16
1.3. Uszkodzenia alternatorów.	17
2. LUTOWANIE.	24
2.1. Parametry lutowania.	26
2.2. Zjawiska zachodzące na styku spoiwo-podłoże.	26
2.2.1. Zwilżalność.	27
2.2.2. Wicking.	32
2.2.3. Rzadkoplątność.	35
2.2.4. Dyfuzja.	36
2.3. Budowa i właściwości lutowanego złącza.	39
2.4. Lutowanie twarde.	42
2.4. Lutowanie miękkie.	42
2.5. Pasty lutownicze i topniki.	43
2.5.1. Topniki.	43
2.5.2. Pasty lutownicze.	46
2.6. Rola najważniejszych pierwiastków stopowych w lutach cynowych.	49
2.6.1. Stop lutowniczy Sn-Pb.	49
2.6.2. Stop lutowniczy Sn-Cu.	52
2.6.3. Stop lutowniczy Sn-Ag.	53
2.6.4. Stop lutowniczy Sn-Al.	54
2.6.5. Stop lutowniczy Sn-Ag-Cu (SAC).	55
3. PODSUMOWANIE LITERATURY.	57

4. BADANIA ROZPOZNAWCZE.....	59
4.1. Cel i zakres badań rozpoznawczych.....	59
4.2. Przygotowanie próbek do badań rozpoznawczych	62
4.3. Badania wizualne VT	68
4.3.1. Wyniki badań wizualnych makroskopowych	70
4.3.2. Analiza wyników badań wizualnych i ustalenie parametrów procesu lutowania	73
4.4. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego lutowin – wyniki i analiza	76
4.5. Doraźna wytrzymałość na rozciąganie złączy lutowanych	84
4.5.1. Przygotowanie stanowiska do badań	86
4.5.2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy lutowanych	86
4.5.3. Analiza wyników badań doraźnej wytrzymałości złączy na rozciąganie ...	92
4.6. Badania radiograficzne złączy lutowanych.....	98
4.6.1. Wyniki i analiza badań radiograficznych.....	98
4.7. Badania mikrostruktury złączy lutowanych.....	103
4.7.1. Wyniki badań mikrostrukturalnych nowooprocowanego złącza i ich analiza.....	103
4.8. Podsumowanie badan rozpoznawczych.....	105
4.9. Wnioski do badan rozpoznawczych.....	105
5. PROBLEM BADAWCZY I TEZA	106
5.1. Problem badawczy	106
5.2. Teza	107
6. BADANIA ZASADNICZE	109
6.1. Możliwość regeneracji alternatora z wykorzystaniem tulejki miedzianej, ocynowanej	109
6.2. Badanie rzadkości wypełnienia tulejki	110
6.2.1 Wykonanie próbek do badań rzadkości	111
6.2.2. Ocena radiograficzna próbek do badań rzadkości	112
6.3. Badania mikrostrukturalne wybranych próbek	115
6.3.1. Analiza wyników i opracowanie modelu formowania faz międzymetalicznych w lutowni nowooprocowanego złącza	116
6.4. Wytrzymałość a struktura nowooprocowanej lutownicy	122

6.5. Testowanie złączy lutowanych na obiekcie rzeczywistym.....	126
6.6. Badania elektryczne wybranych złączy lutowanych	130
6.6.1. Test alternatora fabrycznie nowego	130
6.6.2. Test alternatorów zregenerowanych z zastosowaniem wybranych lutów	134
6.6.3. Analiza wyników testów zregenerowanych alternatorów	136
7. ANALIZA WPŁYWU AUTORSKIEJ METODY LutowANIA NA JAKOŚĆ REGENEROWANYCH ALTERNATORÓW SAMOCHODOWYCH NA PODSTAWIE RAPORTU REKLAMACJI OD MOMENTU ZAKOŃCZENIA BADAŃ	138
7.1. Wnioski z analizy wpływu autorskiej metody lutowania na jakość regenerowanych alternatorów samochodowych.....	139
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	140
8.1. WNIOSKI	144
LITERATURA.....	149
SPIS RYSUNKÓW	159
SPIS TABLIC	162
STRESZCZENIE PRACY	163
SUMMARY	166

1. WPROWADZENIE

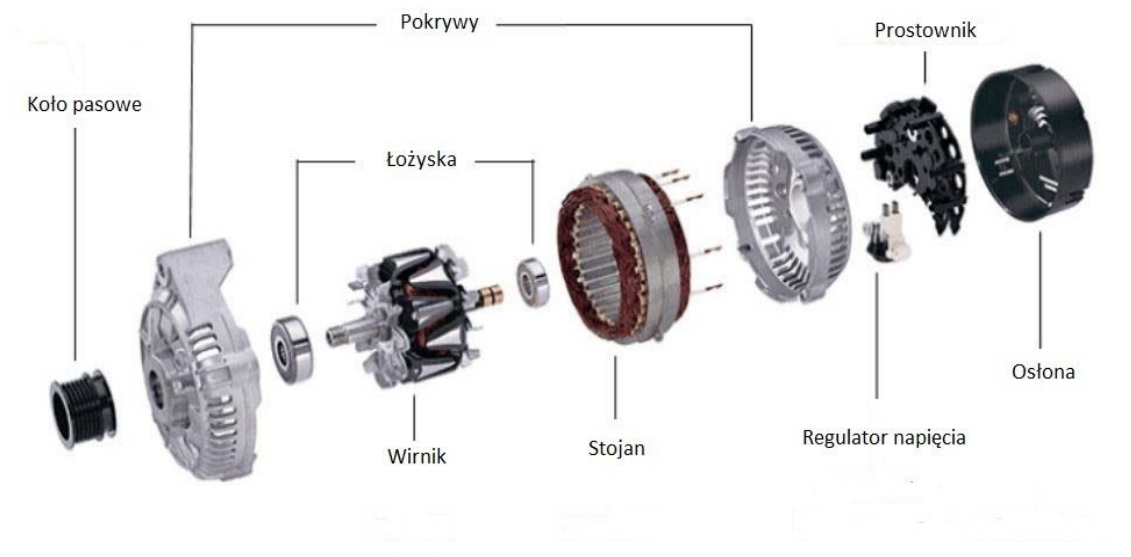
1.1. Stan zagadnienia

Alternator odpowiedzialny jest za ciągłą dostawę prądu w pojazdach mechanicznych. To prądnica prądu zmiennego służąca do zmiany energii mechanicznej w prąd przemienny (rys. 1.). Prąd w alternatorze jest wytwarzany w nieruchomych uzwojeniach stojana za pomocą wirującego pola magnetycznego wirnika.



Rys. 1. Alternator samochodowy [opracowanie własne]

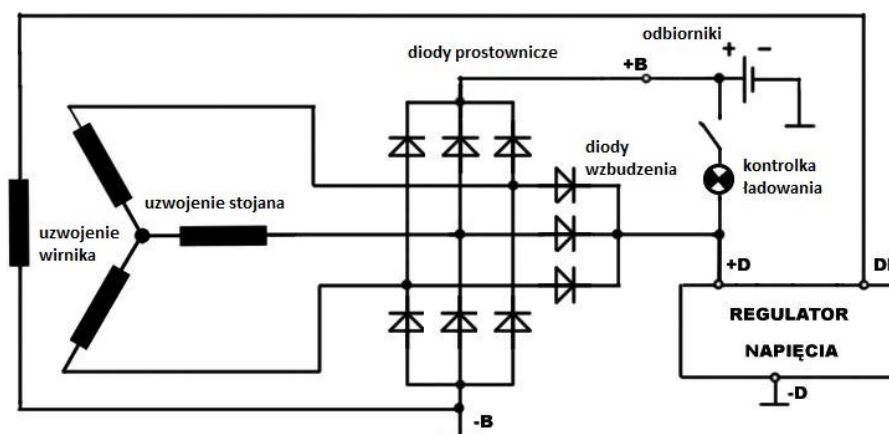
Alternator składa się m.in. z: koła pasowego, pokrywy przedniej, łożyska przedniego oraz jego blokady, wirnika, łożyska tylnego, uzwojenia, pokrywy tylnej, prostownika, regulatora napięcia oraz osłony alternatora (rys. 2).



Rys. 2. Budowa alternatora [122]

Zadaniem alternatora jest współpraca z akumulatorem, wymagającym podczas ładowania prądu stałego. W celu przekształcenia napięcia przemiennego w stałe, uzwojenia stojana, które generują prąd zmienny pod wpływem pola magnetycznego wirnika, połączone są z układem prostowniczym. Układ prostowania prądu alternatora (rys.3) najczęściej posiada diody (6 szt.) do prostowania prądu głównego oraz odrębne trzy diody do prostowania prądu użytkowego służącego do wzbudzenia alternatora (diody wzbudzenia).

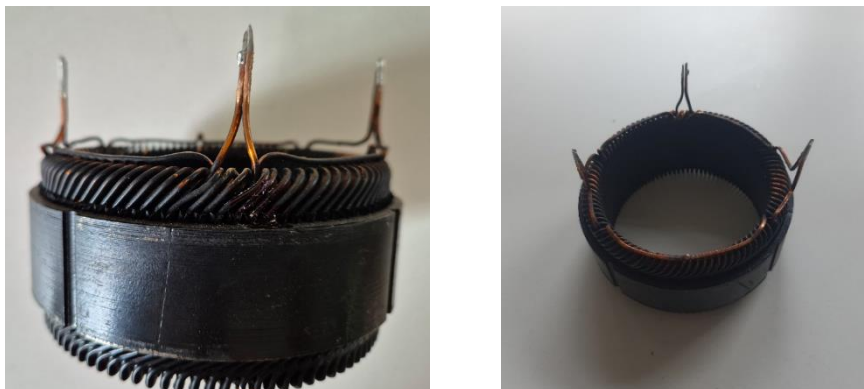
Podstawowy układ prostowniczy składa się sześciu diod prostowniczych w układzie mostka, przy czym trzy diody jednej połówki mostka są połączone ze wspólnym radiatorem i zaciskiem dodatnim, a trzy diody drugiej połówki mostka z drugim radiatorem i zaciskiem ujemnym. Stosowane w alternatorach samochodowych diody półprzewodnikowe są wyłącznie elementami krzemowymi [1,2]. W celu uzyskania wysokiej sprawności alternatora oraz zmniejszenia strat energii wykorzystuje się diody Schottky'ego [2].



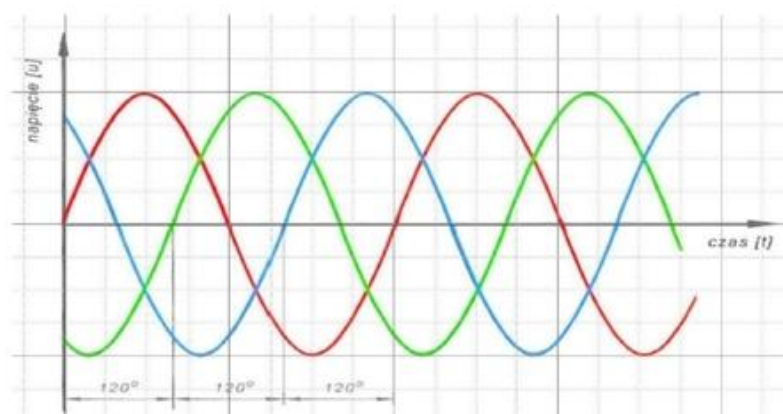
Rys. 3. Układ prostowania prądu alternatora [1]

Podczas wykorzystania diod wzbudzenia, wirnik alternatora nie jest magnesowany i nie pobiera prądu z akumulatora podczas małych prędkości obrotowych silnika. Należy zaznaczyć, że liczba diod (i ich parametry) zależy od liczby wyprowadzeń uzwojenia stojana oraz wydajności prądowej alternatora. We współczesnych pojazdach samochodowych zarówno układ prostowania, jak i regulator napięcia zainstalowany jest wewnątrz alternatora. Regulatory napięcia mają za zadanie ochronę odbiorników elektrycznych przed uszkodzeniem podczas zmiany wartości napięcia, które zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika. Zapobiega on zarówno przeładowaniu, jak i niedoładowaniu akumulatora, co mogłoby prowadzić do jego uszkodzenia lub niesprawności systemów elektrycznych. [1,3]. Jego głównym zadaniem jest utrzymanie stabilnego napięcia ładowania akumulatora oraz zasilania układów elektrycznych pojazdu. Utrzymuje napięcie wyjściowe na stałym poziomie (zwykle 13,8–14,5 V).

Kluczowym elementem alternatora jest nieruchomy stojan zbudowany z izolowanej ramki z trzema uzwojeniami, które są rozłożone co 120° na obwodzie stojana (rys.4). Generuje prąd zmienny pod wpływem pola magnetycznego wirnika. Wirnik alternatora to elektromagnes zasilany pierścieniami ślizgowymi oraz szczotkami. W chwili, gdy wirnik wytwarza pole magnetyczne, indukowany jest jednocześnie prąd o przebiegu sinusoidalnym. Powstałe napięcia w uzwojeniach twornika (stojana) są przemienne i przesunięte względem siebie w fazie o 120° (rys.5). Aby alternator mógł współpracować z akumulatorem i innymi urządzeniami niezbędne było zastosowanie mostkowego układu prostowniczego. Wśród alternatorów występują dwa rodzaje układów wzbudzenia, różnią się one ilością zastosowanych diod prostowniczych. Prądnica z układem sześciu diod jest nazywana obcowzbudną, zaś, gdy konstrukcja alternatora ma dziewięć diod (dodatkowe trzy diody wzbudzenia) to taki generator prądu przemiennego nazywa się samowzbudnym (rys. 3).

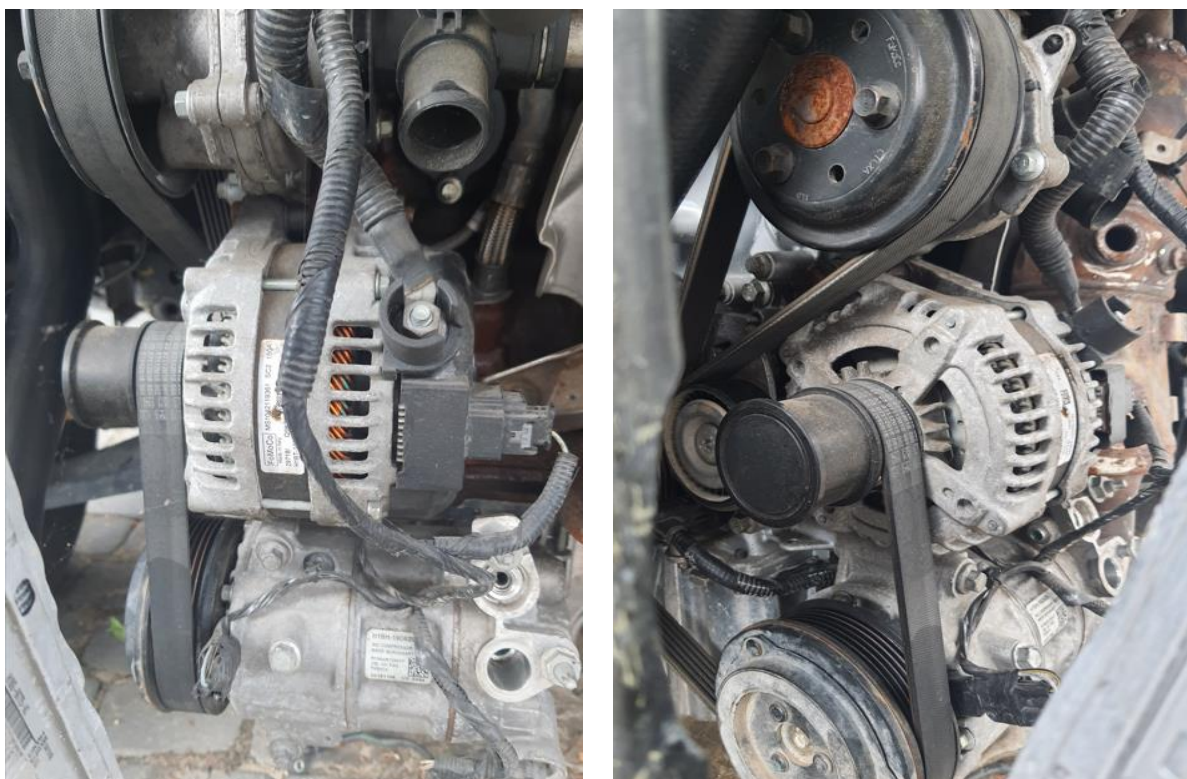


Rys. 4. Stojan alternatora [opracowanie własne]



Rys. 5. Napięcia powstałe w uzwojeniach twornika (stojana)[3]

Alternator montowany jest do jednostki napędowej, a z wałem korbowym, który go napędza, jest połączony za pomocą paska wielorowkowego lub klinowego (rys.6).



Rys. 6. Alternator zamontowany do jednostki napędowej [opracowanie własne]

Współczesne alternatory sterowane są sygnałami cyfrowymi, dlatego ich kontrola jakości wymaga zastosowania najnowocześniejszych maszyn. Najczęściej wykorzystuje się alternatory kompaktowe, które charakteryzują się małymi rozmiarami oraz lekkością. Współczesne alternatory to znacznie bardziej zaawansowane technologicznie urządzenia niż ich starsze odpowiedniki np. alternatory sterowane przez ECU (inteligentne zarządzanie energią), zastosowanie w alternatorach systemu Start-Stop wymuszają zdolność do szybkiego ładowania akumulatora po każdym rozruchu silnika czy systemy rekuperacji energii (odzyskiwania energii kinetycznej podczas hamowania), co odciąża silnik i redukuje emisję CO₂. Dzięki inteligentnemu sterowaniu, wysokiej sprawności i integracji z systemami zarządzania energią pozwalają na bardziej efektywne wykorzystanie zasobów pojazdu, zmniejszając zużycie paliwa i poprawiając ekologię eksploatacji.

Alternatory często ulegają awariom eklektycznym i mechanicznym. Obecnie współczesne alternatory poddaje się regeneracji. Regeneracja alternatora to proces przywracania jego pełnej sprawności poprzez wymianę zużytych lub uszkodzonych komponentów. Jest to często korzystniejsza opcja niż zakup nowego alternatora.

Istnieje wiele powodów aby alternatory samochodowe poddawać procesom regeneracji:

- niższy koszt w porównaniu do nowego alternatora. Regeneracja jest znacznie tańsza niż zakup fabrycznie nowego alternatora, zwłaszcza w przypadku oryginalnych części producenta (OEM).

- dłuższa żywotność pojazdu i oszczędność na naprawach. Po profesjonalnej regeneracji alternator może działać równie długo jak nowy. Regularna konserwacja i regeneracja zapobiega poważniejszym awariom, które mogłyby wpłynąć na inne elementy układu elektrycznego (np. akumulator).

- ekologia i zrównoważony rozwój. Regeneracja alternatora zmniejsza ilość odpadów elektronicznych i ogranicza konieczność produkcji nowych części. Proces ten redukuje emisję CO₂, ponieważ produkcja nowego alternatora wymaga większej ilości energii i surowców niż jego naprawa.

- oryginalna jakość za niższą cenę. Podczas regeneracji często wykorzystuje się oryginalne komponenty, co zapewnia niezawodność porównywalną z nowym alternatorem. W przeciwieństwie do tanich zamienników, regenerowany alternator zazwyczaj ma lepszą jakość i wyższą trwałość.

- szybsza dostępność i wygoda. Regeneracja może być wykonana lokalnie w warsztacie, bez konieczności oczekiwania na dostawę nowej części. W niektórych przypadkach (w firmach zajmujących się regeneracją na skalę przemysłową) można otrzymać regenerowany alternator od ręki, co skraca czas naprawy pojazdu.

- możliwość unikania problemów z kompatybilnością. Nowe alternatory samochodowe (zwłaszcza zamienniki) mogą nie być idealnie dopasowane do systemu elektrycznego pojazdu. Regeneracja oryginalnego alternatora eliminuje ryzyko problemów ze zgodnością z ECU (Engine Control Unit - odnosi się do kompatybilności komponentów elektronicznych i mechanicznych pojazdu z jednostką sterującą silnika i systemem zarządzania energią) [123,124]. Jeśli nowy lub regenerowany alternator nie jest w pełni kompatybilny z ECU pojazdu, mogą wystąpić różne problemy, np.:

- błędy i komunikaty ostrzegawcze na desce rozdzielczej (np. "awaria układu ładowania"),
- nieprawidłowe ładowanie akumulatora – zbyt niskie lub zbyt wysokie napięcie,
- zwiększone zużycie paliwa – jeśli alternator działa nieoptymalnie, silnik może zużywać więcej paliwa,
- brak wsparcia dla systemu Start-Stop – jeśli ECU nie wykrywa zgodnego alternatora, funkcja może zostać wyłączona,
- niemożność sterowania przez magistralę LIN/CAN – jeśli alternator nie obsługuje cyfrowej komunikacji, ECU może go nie rozpoznawać lub sterować nim w ograniczony sposób.

Do napraw regeneracyjnych alternatorów samochodowych jak i innych podzespołów występujących w pojazdach samochodowych (np. chłodnice, układy elektryczne) można stosować różne techniki spajania, z których ważną rolę odgrywa lutowanie [7]. Lutowanie jest jedną z najważniejszych technik stosowanych w regeneracji alternatorów i innych elementów układów elektrycznych pojazdu. Wykorzystanie tej metody przynosi wiele korzyści, które wpływają na jakość, trwałość i niezawodność naprawianego podzespołu. Pozwala również na przywrócenie sprawności wielu podzespołów w pojazdach samochodowych bez konieczności ich całkowitej, kosztownej wymiany [123].

1.2. Materiały stosowane w budowie alternatorów

Alternatory, jako urządzenia przekształcające energię mechaniczną na elektryczną, składają się z wielu elementów, z których każdy wymaga specyficznych materiałów w celu osiągnięcia odpowiednich właściwości. Poniżej przedstawiono bardziej szczegółowy opis niektórych kluczowych materiałów używanych w konstrukcji alternatorów.

1.2.1. Stal elektrotechniczna w budowie alternatorów

W konstrukcji rdzeni wirnika i stojana alternatora często używa się stali elektrotechnicznej. Istnieją różne rodzaje, takie jak [1,3]:

- stal krzemianowa Fe-Si, której dodatek krzemu zmniejsza straty energii magnetycznej. To specjalny rodzaj stali stosowany specjalnie do produkcji sprzętu elektroenergetycznego.

Jedną z najważniejszych cech stali krzemianowej jest orientacja ziaren. Podczas walcowania ziarno będzie zorientowane w określonym kierunku, dzięki czemu przepuszczalność w określonym kierunku będzie maksymalna. Działa jako stabilizator struktury krystalicznej, co zmniejsza straty energii magnetycznej w wyniku zmiany magnetyzacji. Zawartość krzemu w stali krzemowej jest stosunkowo wysoka, zwykle od 3,2% do 4,8%. Działa to również na korzyść lepszej przewodności magnetycznej stali, co jest kluczowe w przypadku elementów magnetycznych używanych w transformatorach i alternatorach.

Stal krzemianowa cechuje się wysoką indukcyjnością magnetyczną oraz niskimi stratami energii w postaci cieplnej, co sprawia, że jest doskonałym materiałem do budowy rdzeni transformatorów i stojanów alternatorów. W praktyce, konkretny skład chemiczny i parametry stali elektrotechnicznej mogą się różnić w zależności od producenta i specyficznych wymagań danego zastosowania [4].

- stal amorficzna Fe-Si-B, to specjalna odmiana stali, charakteryzująca się brakiem regularnej struktury krystalicznej, co odróżnia ją od tradycyjnych stali o krystalicznej strukturze [26]. W przeciwieństwie do klasycznych stali, które posiadają uporządkowane struktury krystaliczne, stal amorficzna ma strukturę bezpostaciową, co sprawia, że atomy nie są ułożone w regularny sposób. Wzór chemiczny dla ogólnego przypadku stali amorficznej jest trudny do określenia ze względu na jej chaotyczną strukturę. Jednak ogólnie można mówić o stalach amorficznych zawierających głównie dodatki takie jak krzem, bor czy fosfor [3].

Stal amorficzna uzyskuje swoją nietypową strukturę w wyniku procesu chłodzenia z bardzo wysokich temperatur w sposób, który nie pozwala na regularne ułożenie atomów. To sprawia, że stal ta charakteryzuje się szeregiem unikalnych właściwości:

1. Brak granic ziaren: W odróżnieniu od konwencjonalnych stali, stal amorficzna nie posiada granic ziaren, co przyczynia się do jej wyjątkowej wytrzymałości mechanicznej.

2. Niskie straty energii: Struktura amorficzna zmniejsza straty energii w wyniku magnetyzacji i demagnetyzacji, co jest korzystne w zastosowaniach magnetycznych, takich jak transformatory i generatory.
3. Wysoka twardość: Stale amorficzne są znacznie twardsze niż ich krystaliczne odpowiedniki, co sprawia, że są odporne na zużycie i korozję.
4. Elastyczność: Dzięki brakowi granic ziaren, stal amorficzna może być bardziej elastyczna niż konwencjonalne stopy żelaza.

Stal amorficzna znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach, głównie tam, gdzie istnieje potrzeba minimalizacji strat energii magnetycznej, takich jak w produkcji transformatorów, stojanów alternatorów czy w magnetykach.

Stal elektrotechniczna została zaprojektowana z myślą o optymalnych właściwościach magnetycznych, aby minimalizować straty energii podczas pracy alternatora [26, 41].

1.2.2. Miedź stosowana w budowie alternatorów

Miedź jest jednym z najważniejszych metali przemysłowych o szczególnych właściwościach elektrycznych i mechanicznych. Jej zastosowania obejmują szeroki zakres dziedzin, od elektroniki po przemysł chemiczny, dzięki czemu jest jednym z najbardziej wszechstronnych metali.

W alternatorach ze względu na swoją doskonałą przewodność elektryczną miedź jest wykorzystywana do produkcji uzwojeń w wirniku i stojanie [6].

- Uzwojenia wirnika:

W wirniku alternatora, gdzie zachodzi ruch obrotowy, stosuje się miedź do konstrukcji uzwojeń. Miedź oferuje doskonałą przewodność elektryczną, co pozwala na skuteczne przewodzenie prądu indukowanego w wyniku ruchu obrotowego (rys. 7).



Rys. 7. Uzwojenie wirnika [2]

- Uzwojenia stojana:

Miedź jest również wykorzystywana do budowy uzwojeń stojana alternatora. Uzwojenia te generują pole magnetyczne, które wchodzi w interakcję z wirnikiem, co skutkuje indukcją prądu elektrycznego (rys. 8).



Rys. 8. Uzwojenie stojana [opracowanie własne]

Istotne cechy miedzi wykorzystywane w budowie alternatorów:

– Właściwości przewodzenia:

Wysoka przewodność miedzi jest kluczowa dla efektywnego przewodzenia prądu elektrycznego w uzwojeniach. To pozwala na minimalizację strat energii w postaci ciepła, co jest istotne dla wydajności energetycznej alternatora.

– Odporność na deformację:

Miedź charakteryzuje się dobrą plastycznością i odpornością na deformację, co ułatwia procesy formowania i montażu uzwojeń w konstrukcji alternatora.

– Odporność na korozję:

Miedź jest stosunkowo odporna na korozję, co jest ważne w przypadku alternatorów, które mogą być eksploatowane w różnych warunkach środowiskowych.

– Skuteczność energetyczna:

Zastosowanie miedzi w uzwojeniach przyczynia się do zwiększenia efektywności energetycznej alternatora poprzez minimalizację strat prądowych i ciepłych [5,6].

1.2.3. Stale niestopowe w budowie alternatorów

W konstrukcji alternatorów, dobór konkretnego rodzaju żelaza i stopów zależy od projektu, parametrów pracy oraz wymagań dotyczących wydajności, trwałości i kosztów produkcji. Stal niestopowa i jej stopy są kluczowymi materiałami, które umożliwiają efektywne funkcjonowanie alternatorów w różnych zastosowaniach.

Stale niestopowe są powszechnie stosowane jako materiał do budowy rdzenia stojana i wirnika alternatora. Rdzeń pełni kluczową rolę w przenoszeniu i kształtowaniu pola magnetycznego, co jest istotne dla procesu indukcji elektromagnetycznej. Żelazo charakteryzuje się doskonałymi właściwościami magnetycznymi, co sprawia, że jest idealnym materiałem dla rdzeni magnetycznych w alternatorach. Posiada wysoką permeancję magnetyczną (przewodność magnetyczną), co umożliwia skuteczne przenoszenie pola magnetycznego [26].

Stale niestopowe, są szeroko stosowane w konstrukcji alternatorów. Dodatki do żelaza, takie jak węgiel, chrom, nikiel czy krzem, pozwalają na uzyskanie stopów o różnych właściwościach mechanicznych i magnetycznych. Żelazo i jego stopy są wybierane także ze względu na ich dobre właściwości mechaniczne. Odporność na deformację, wytrzymałość mechaniczna i plastyczność sprawiają, że są one odpowiednie do kształtowania i montażu różnych elementów konstrukcyjnych. W niektórych przypadkach, gdzie wymagana jest odporność na korozję, mogą być stosowane stale nierdzewne [2,3].

Stale niestopowe są również używane w konstrukcji cewek elektromagnetycznych w alternatorach. Elektromagnes generuje pole magnetyczne, które jest niezbędne do indukcji prądu elektrycznego w uzwojeniach. Te materiały są istotne dla skutecznego przenoszenia pola magnetycznego, co jest kluczowe dla generowania energii elektrycznej [41].

1.2.4. Magnesy trwałe w budowie alternatorów

Magnesy trwałe są kluczowym elementem w współczesnych alternatorach z funkcją start-stop. Alternatory Start-Stop z magnesami stałymi to rodzaj alternatorów, które wykorzystują magnesy trwałe do generowania pola magnetycznego zamiast tradycyjnych elektromagnesów zasilanych prądem. Wykorzystanie magnesów stałych w alternatorach może mieć korzystny wpływ na ich efektywność i wydajność. Magnesy stałe umożliwiają alternatorowi szybki rozruch, co jest istotne w systemach Start-Stop. Ponadto, brak konieczności zasilania prądem elektromagnesów oznacza niższe obciążenie silnika, co przekłada się na oszczędność paliwa. Alternatory start-stop z magnesami stałymi mogą charakteryzować się niższymi stratami energetycznymi w porównaniu do tradycyjnych alternatorów. Magnesy trwałe pozwalają na uzyskanie silnego pola magnetycznego przy mniejszym zużyciu energii. Ich właściwości magnetyczne, kształt i moc są starannie dobierane w zależności od konkretnych wymagań projektu alternatora

oraz zastosowania. Zastosowanie wysokiej jakości magnesów trwałych wpływa bezpośrednio na wydajność alternatora, zwiększając jego zdolność do efektywnej konwersji energii mechanicznej na elektryczną. Magnesy trwałe są zamontowane w wirniku alternatora, tworząc stałe pole magnetyczne. To pole przenosi się do uzwojeń stojana, co indukuje w nich prąd elektryczny zgodnie z zasadą elektromagnetycznego prawa indukcji Faradaya. Magnesy mogą mieć różne kształty, takie jak prostokątne, cylindryczne, pierścieniowe czy inne, w zależności od projektu wirnika i wymagań zastosowania [4,7].

Typy magnesów trwałych stosowanych w produkcji alternatorów [4]:

- Neodymowe magnesy trwałe (NdFeB) na rys. 9 to magnesy, składające się głównie z neodymu, żelaza i boru, charakteryzują się bardzo wysoką indukcyjnością magnetyczną. Są silne i trwałe. Wzór chemiczny dla magnesów neodymowych może być ogólnie zapisany jako $\text{Nd}_x\text{Fe}_{(1-x)}\text{B}$, gdzie x to ilość neodymu w stali.



Rys. 9. Magnesy neodymowe łukowe [4]

- Magnesy ferrytowe przedstawiono na rys.10. Tlenek żelaza $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ jest podstawowym składnikiem magnesów ferrytowych. Magnesy ferrytowe, mają niższą indukcyjność magnetyczną w porównaniu do magnesów neodymowych, ale są stosunkowo tańsze.



Rys. 10. Magnesy ferrytowe łukowe [4]

1.2.5. Izolatory w budowie alternatorów

W alternatorach, gdzie występują silne pola elektromagnetyczne, stosuje się izolatory wykonane z tworzyw sztucznych. Te izolatory mają za zadanie odgradzać elektrycznie i izolować elementy przewodzące od siebie nawzajem, pomagając w unikaniu zwarć. Izolatory są niezbędne dla zapewnienia bezpiecznego funkcjonowania alternatora, chroniąc przed niepożądanym przepływem prądu. W celu zabezpieczenia przed zwarciami i utrzymania izolacji elektrycznej stosuje się różne materiały izolacyjne, takie jak tworzywa sztuczne np. gumy, poliamidy, polichlorek winylu (PCV) czy ceramika [26].

W konstrukcji alternatora mogą być stosowane tworzywa sztuczne do izolacji mechanicznych elementów, takich jak dystanse, podkładki czy pierścienie uszczelniające. Izolacyjne właściwości tworzyw pomagają w zapobieganiu również korozji. Tworzywa sztuczne są stosowane w produkcji łopatek wentylatorów chłodzących alternatory. Wysoka wytrzymałość mechaniczna i odporność na warunki atmosferyczne są kluczowe w tym zastosowaniu [7,41].

1.2.6. Stopy aluminium w budowie alternatorów

Stopy aluminium są materiałem szeroko stosowanym w konstrukcji alternatorów, zarówno do elementów strukturalnych, jak i do innych komponentów.

Stopy aluminium, ze względu na swoje właściwości, są często używane do produkcji korpusów i obudów alternatorów. Ich niska masa, odporność na korozję oraz dobra przewodność cieplna sprawiają, że są atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym. Ponadto, są stosunkowo łatwe do formowania, co ułatwia produkcję obudów o różnych kształtach. Stopy aluminium mogą być stosowane do produkcji ram i mocowań wewnętrznych w alternatorze. Ich wytrzymałość i niska gęstość są korzystne w przypadku konstrukcji, gdzie masa odgrywa istotną rolę.

Oprócz korpusów, obudów i mocowań stopy aluminium występują w podzespołach alternatora jako [3,4]:

- elementy chłodzące, takie jak łopatki wentylatora, które pomagają w utrzymaniu optymalnej temperatury w alternatorze. Stopy aluminium są skutecznymi materiałami do przewodzenia ciepła, co wpływa na efektywność chłodzenia,
- elementy konstrukcyjne, takie jak łożyska, mogą być wykonane z aluminium lub jego stopów, zwłaszcza jeśli konstrukcja wymaga lekkich, a jednocześnie wytrzymałych komponentów,
- elementy stosowane do mocowania uzwojeń, zwłaszcza w przypadku uzwojeń stojana alternatora. Stopy aluminium są stosunkowo łatwe do obróbki, co ułatwia formowanie i montaż,
- elementy wirnika, takie jak pierścienie łożyskowe, mogą być również wykonane z aluminium, zwłaszcza w alternatorach o mniejszych rozmiarach,

Stopy aluminium, takie jak stop 6061 (stop Al-Mg-Si), lub stop 7075 (stop Al-Zn), mogą być stosowane, aby uzyskać specyficzne kombinacje wytrzymałości i lekkości w zależności od wymagań projektowych.

Ważne jest, aby wybór aluminium w konstrukcji alternatora był dokładnie dostosowany do konkretnych wymagań projektowych, takich jak masa, wytrzymałość, odporność na korozję i inne. Dla alternatorów o mniejszej mocy, gdzie masa jest kluczowym czynnikiem, stopy aluminium są często preferowanym materiałem. Jednak dla alternatorów o większej mocy, gdzie wymagane są wyższe wytrzymałości mechaniczne, może być stosowane inne materiały, takie jak stal czy żeliwo [5,6,26].

1.3. Uszkodzenia alternatorów

Alternator to kluczowy element układu elektrycznego pojazdu, który odpowiada za ładowanie akumulatora i zasilanie wszystkich odbiorników prądu. Z biegiem czasu może ulec awarii z różnych powodów. Uszkodzenia mogą mieć charakter mechaniczny, elektryczny lub eksploatacyjny.

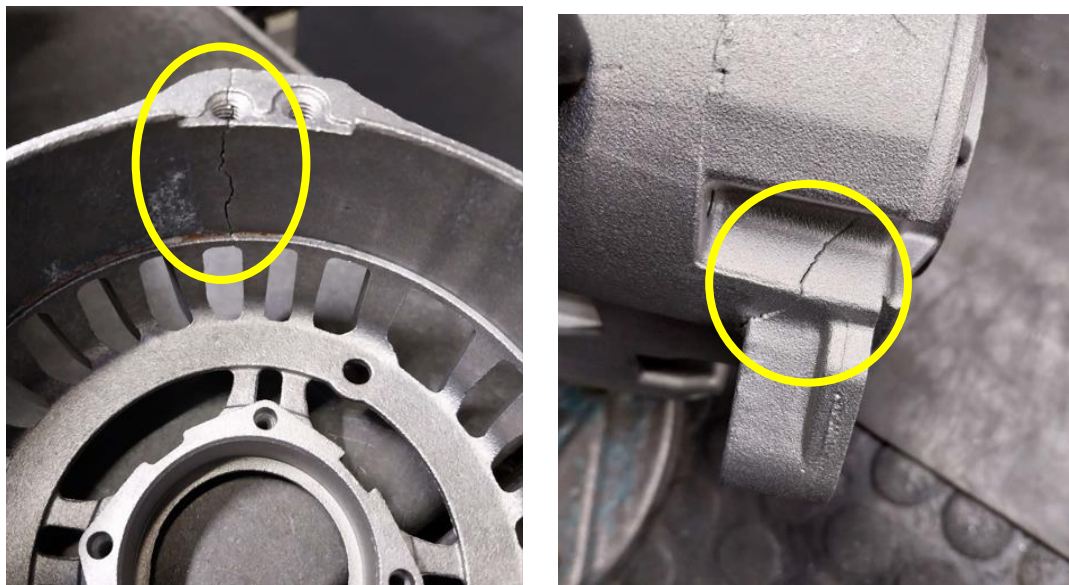
Do najczęściej spotykanych uszkodzeń alternatora można zaliczyć [3,4,7]:

- uszkodzone łożyska. Wewnętrzne łożyska alternatora mogą ulec zużyciu lub uszkodzeniu, co prowadzi do nadmiernego hałasu lub drgań. Jeśli alternator emituje dziwne dźwięki, może to być spowodowane uszkodzonymi łożyskami,
- uszkodzenie koła pasowego sprzęgłowego (rys.11). W nowoczesnych alternatorach stosuje się sprzęgło jednokierunkowe, które redukuje obciążenie paska i tłumi wibracje. Jeśli ulegnie uszkodzeniu mogą pojawić się następujące objawy: hałas podczas pracy alternatora, pasek wieloklinowy może ślizgać się lub nierówno pracować, alternator nie będzie prawidłowo ładował akumulatora,



Rys. 11. Uszkodzenie koła pasowego sprzęgłowego alternatora [opracowanie własne]

- uszkodzenie obudowy alternatora (rys.12). Najczęstszą przyczyną uszkodzenia obudowy alternatora są uderzenia i wstrząsy mechaniczne. Alternator znajduje się w silniku, gdzie jest narażony na różne wstrząsy i drgania związane z pracą pojazdu. Uderzenia w wyniku np. wypadnięcia pojazdu w dziury, wstrząsy związane z nieprawidłowo zamocowanym alternatorem lub uszkodzenie osłon mogą prowadzić do pęknięć lub odkształceń obudowy.



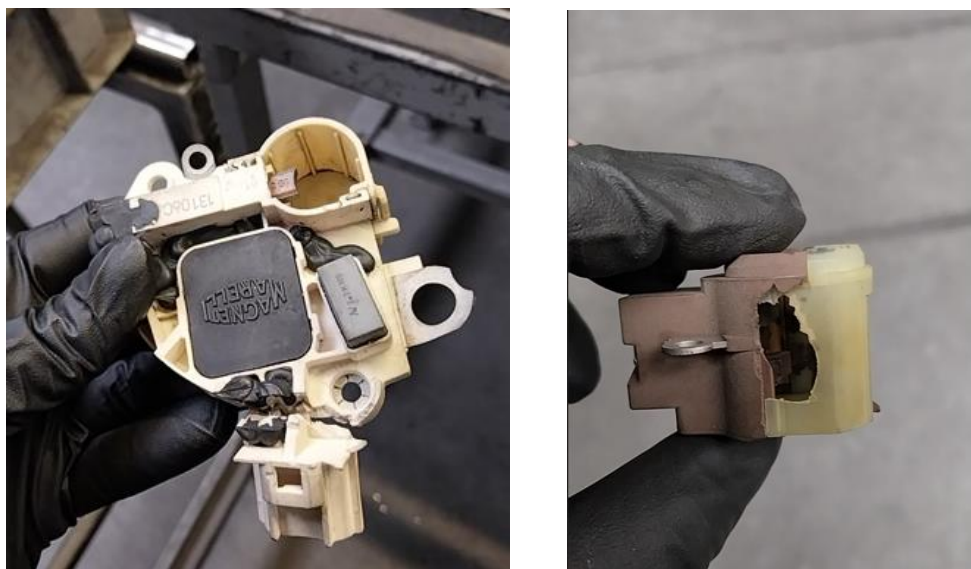
Rys. 12. Uszkodzenie obudowy alternatora [opracowanie własne]

- uszkodzone diody (rys.13). Uszkodzenie diod może prowadzić do niestabilnego ładowania baterii samochodowej lub całkowitego braku ładowania akumulatora samochodowego,



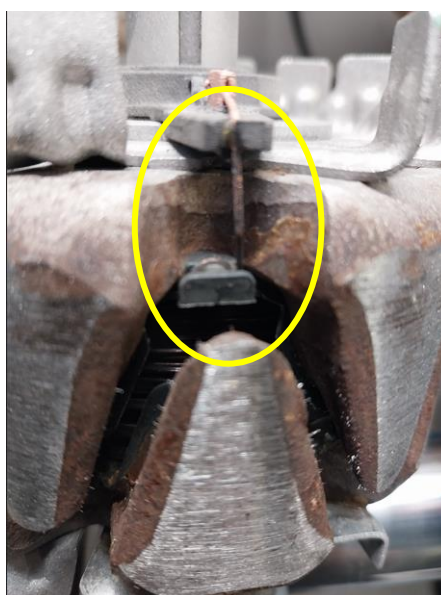
Rys. 13. Uszkodzone diody [opracowanie własne]

- problem z regulatorem napięcia, uszkodzony regulator (rys.14). Regulator napięcia kontroluje napięcie produkowane przez alternator zapewniając stabilne napięcie ładowania dla akumulatora samochodowego (13,8-14,6V). Jeśli regulator napięcia ulegnie awarii, może to prowadzić do nadmiernego (przeładowania) lub niewystarczającego ładowania (nie doładowania) akumulatora powodując jego uszkodzenie i innych podzespołów,



Rys. 14. Uszkodzony regulator napięcia [opracowanie własne]

- uszkodzony wirnik (rys.15) lub stojan. Wirnik i stojan są kluczowymi elementami alternatora. Jeśli którykolwiek z tych elementów ulegnie uszkodzeniu, może to spowodować niewłaściwą produkcję prądu i prowadzić do awarii alternatora.



Rys. 15. Uszkodzony wirnik alternatora [opracowanie własne]

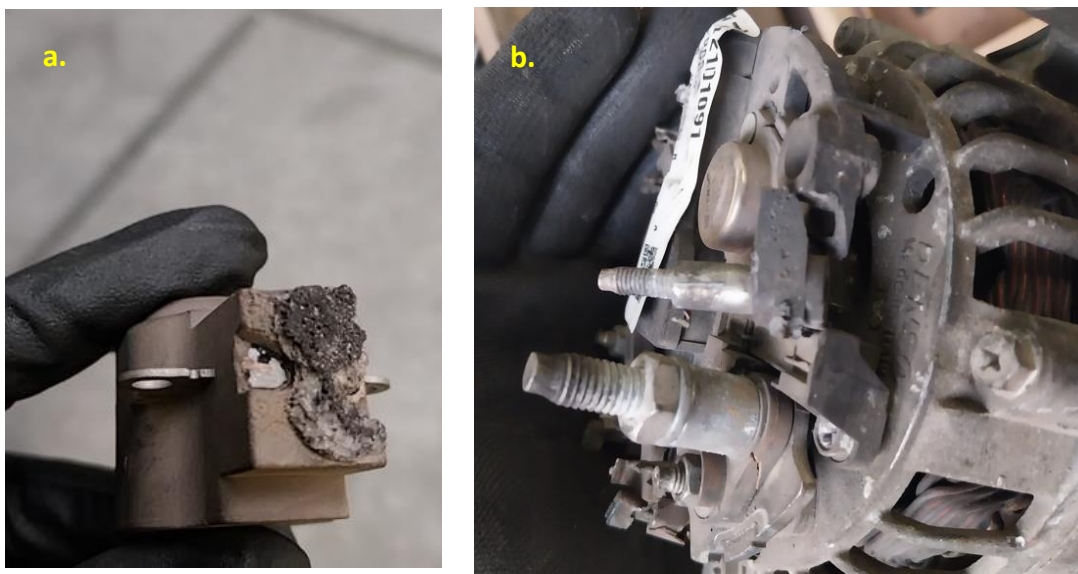
- przerwane połączenia elektryczne (rys.16). Uszkodzenia połączeń elektrycznych w alternatorze mogą prowadzić do przerwania przepływu prądu i całkowitej awarii. Przecięte kable, luźne połączenia lub korozja mogą powodować problemy z ładowaniem.



Rys. 16. Przerwane połączenia elektryczne [opracowanie własne]

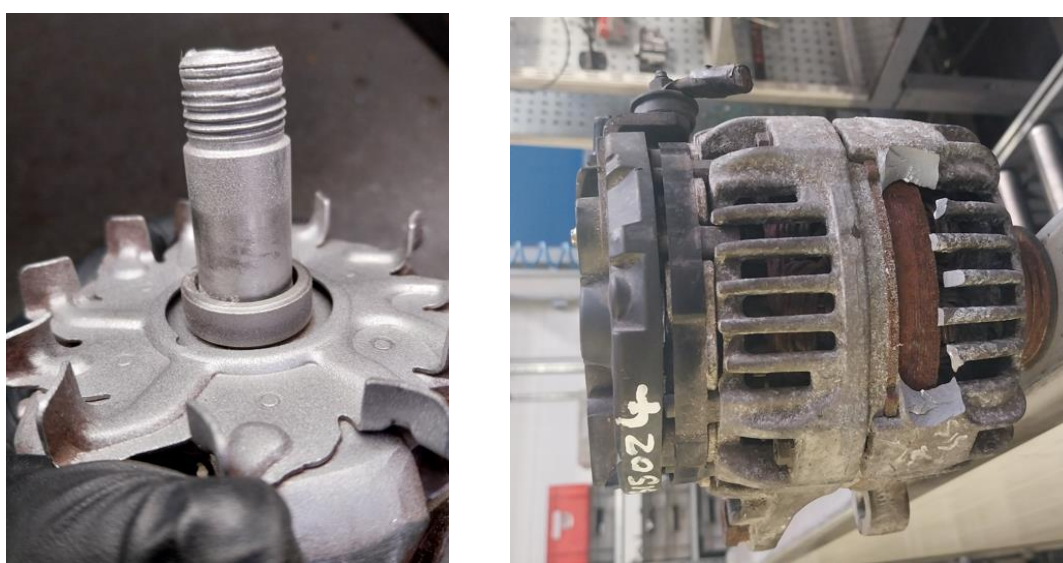
Uszkodzenia alternatora mogą wystąpić z różnych przyczyn. Do najczęstszych powodów awarii alternatora zalicza się przeciążenie alternatora oraz zużycie eksploatacyjne.

Przeciążenie alternatora jest częstą przyczyną uszkodzeń alternatora samochodowego (rys.17). Współczesne pojazdy są wyposażone w wiele urządzeń, które zużywają dużą ilość energii elektrycznej, takich jak klimatyzacja, systemy multimedialne, podgrzewane fotele czy systemy wspomagania kierowcy. W wyniku przeciążenia alternator nie jest w stanie zapewnić wystarczającej mocy generowanej przez alternator, aby zaspokoić te potrzeby, może się przegrzewać i szybciej ulegać zużyciu. W takich przypadkach alternator może również przegrzać się, co negatywnie wpływa na działanie jego podzespołów. Skutki przeciążenia alternatora mogą obejmować zarówno uszkodzenia mechaniczne (np. zużycie łożysk), jak i elektryczne (uszkodzenia diod prostowniczych, uzwojeń oraz regulatora napięcia).



Rys. 17. Uszkodzenie alternatora z przyczyn przeciążenia: a. elektryczne,
b. mechaniczne [opracowanie własne]

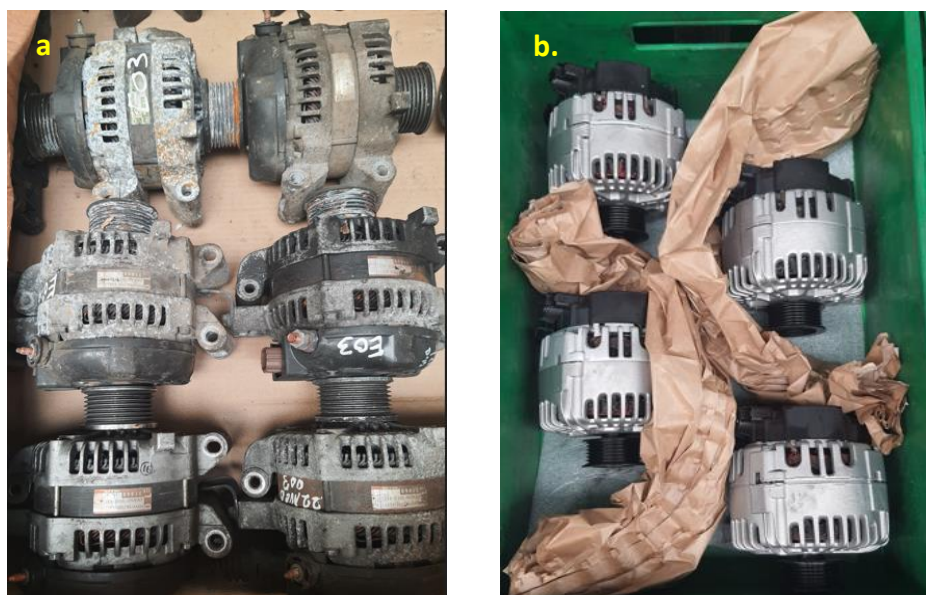
Kolejną przyczyną uszkodzeń alternatora samochodowego jest zużycie eksploatacyjne (rys.18) mające wpływ na spadek wydajności pracy alternatora. Alternator nie jest w stanie dostarczyć odpowiedniej ilości prądu do ładowania akumulatora, co może prowadzić do jego niedoładowania. Efektem jest stopniowe rozładowywanie akumulatora, a w skrajnych przypadkach brak możliwości uruchomienia silnika. Z biegiem czasu, w wyniku ciągłego użytkowania, alternator zaczyna wytwarzać więcej ciepła, szczególnie w wyniku zużycia łożysk, co prowadzi do ich oporu i dalszego przeciążenia. Przegrzanie może prowadzić do uszkodzenia uzwojeń stojana i wirnika, a także innych podzespołów elektronicznych. W efekcie alternator przestaje prawidłowo działać, a napięcie ładowania staje się niestabilne lub zbyt niskie, co wpływa na prawidłowe funkcjonowanie systemu elektrycznego pojazdu.



Rys. 18. Uszkodzenie alternatora z przyczyn eksploatacyjnych [opracowanie własne]

Regeneracja alternatorów jest procesem polegającym na naprawie uszkodzonych elementów renowacji lub przywracania sprawności alternatora (rys.19) lub innych urządzeń generujących prąd stały. Postęp w motoryzacji tworzony jest z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów i rodzajów łączenia również w podzespołach będących składnikami systemu motoryzacyjnego. W zależności od rodzaju uszkodzenia, proces regeneracji może obejmować kilka kroków [3]:

- diagnoza uszkodzenia. Pierwszym krokiem jest dokładna diagnoza, aby określić przyczynę problemów z alternatorem. Może to obejmować testowanie napięcia ładowania, sprawdzenie stanu baterii, badanie przewodów i połączeń, a także sprawdzenie diod prostujących i regulatora napięcia. Jeśli uszkodzenie jest zbyt poważne lub nie do naprawienia, konieczna może być wymiana całego alternatora,
- demontaż alternatora. Jeśli uszkodzenie można naprawić, alternator musi zostać zdemonstrowany. Oznacza to odłączenie przewodów elektrycznych, pasków napędowych i usunięcie alternatora z samochodu,
- naprawa uszkodzonych części. Uszkodzone części alternatora, takie jak diody, regulator napięcia, łożyska czy wirnik, mogą zostać naprawione lub wymienione.
- czyszczenie i czyszczenie alternatora. Podczas regeneracji alternatora ważne jest dokładne wyczyszczenie wszystkich części, usuwanie zanieczyszczeń, kurzu i osadów. Mogą być stosowane specjalne środki czyszczące do usuwania oleju, tłuszczu i brudu,
- montaż i testowanie. Po naprawie i czyszczeniu wszystkich części alternatora, następuje proces ponownego montażu. Alternator jest instalowany z powrotem w samochodzie, a wszystkie przewody elektryczne i paski napędowe są podłączane zgodnie z wymaganiami producenta. Po zainstalowaniu alternatora wykonuje się testy, aby sprawdzić jego działanie, w tym napięcie ładowania i prawidłową pracę regulatora napięcia.



Rys. 19. Alternatory: a) przed regeneracją, b) po regeneracji [opracowanie własne]

Problemy z alternatorem mogą prowadzić do różnych zagrożeń związanych z niezawodnością i funkcjonowaniem pojazdu, a tym samym wpływać na bezpieczeństwo na drodze. Jednym z głównych zagrożeń jest awaria układu elektrycznego, która może skutkować brakiem zasilania dla istotnych systemów pojazdu, takich jak światła, wycieraczki, systemy wspomagania kierowcy czy systemy bezpieczeństwa. Jeśli alternator przestaje ładować akumulator, może to doprowadzić do niedoładowania akumulatora, a w efekcie do utraty zasilania dla oświetlenia pojazdu. W ciemności lub w warunkach złej widoczności, brak oświetlenia lub migające światła może stanowić poważne zagrożenie zarówno dla kierowcy, jak i innych uczestników ruchu drogowego. Kolejnym zagrożeniem jest utrata zasilania dla systemów wspomagania, takich jak wspomaganie kierownicy czy układ hamulcowy. W nowoczesnych pojazdach, te systemy są zasilane elektrycznie, a ich awaria może prowadzić do trudności w manewrowaniu pojazdem lub zmniejszenia efektywności hamulców. Nagła utrata działania takich systemów w trakcie jazdy może znacząco pogorszyć kontrolę nad pojazdem i zwiększyć ryzyko wypadku.

Całkowite uszkodzenie alternatora w trakcie jazdy, zwłaszcza na długich trasach, może doprowadzić do nagłego zatrzymania silnika lub braku możliwości jego uruchomienia, co stwarza sytuację awaryjną na drodze, zwłaszcza w miejscach o dużym natężeniu ruchu.

Podsumowując, uszkodzenia alternatora mogą wpłynąć na bezpieczeństwo jazdy poprzez awarie systemów elektrycznych, które są kluczowe dla prawidłowego funkcjonowania pojazdu, a także wprowadzić potencjalne zagrożenia związane z utratą kontroli nad pojazdem czy niewłaściwym oświetleniem.

2. Lutowanie

Łączenie różnych materiałów oznacza, że dwa różne materiały zostają połączone ze sobą za pomocą określonych procesów, tworząc kompletną strukturę o określonych właściwościach. Łączona struktura różnych materiałów ma doskonałe właściwości dwóch rodzajów materiałów. Ponieważ właściwości fizyczne i chemiczne różnych materiałów są bardzo różne, wymagania dotyczące łączenia są bardzo rygorystyczne. Dlatego proces łączenia jest kluczem do uzyskania wspólnej struktury różnych materiałów o różnorodnych parametrach.

Lutowanie jest procesem polegającym na łączeniu metali i ich stopów, tworzyw ceramicznych i kompozytów o osnowie metalicznej lub ceramicznej za pomocą dodatkowego, roztopionego metalu, zwanego spoiwem bądź lutem, którego temperatura topnienia jest znacznie niższa od temperatury topnienia metali łączonych oraz wypełnienie szczelin między nimi [9].

Lutowanie w kontekście naukowym stanowi interdyscyplinarny obszar badań, zogniskowany wokół termodynamiki, metalurgii, chemii i inżynierii materiałowej. Proces ten jest esencją łączenia metalicznych powierzchni za pośrednictwem stopu lutowniczego, a jego skuteczność i trwałość zależą od dogłębnej wiedzy nad mikroskopową strukturą stopów, reakcjami chemicznymi oraz właściwościami materiałów w kontekście specyficznych stopów lutowniczych o charakterystycznych właściwościach [8].

W kontekście termodynamiki, analizuje się diagramy fazowe, ukazujące zależności między składem chemicznym a temperaturą, ze szczególnym uwzględnieniem obszarów eutektycznych. W obszarze termodynamiki, istotny jest również wybór stopu lutowniczego, którego punkt topnienia powinien być niższy niż temperatura topnienia materiałów, które są łączone. Badania termodynamiczne mogą obejmować także analizę cykli cieplnych, entalpii i entropii w trakcie procesu lutowania. Na rys.20 przedstawiono przykład równowagowego Sn-Pb z przemianą eutektyczną. Najniższa temperatura topnienia to 182° C [8,10].

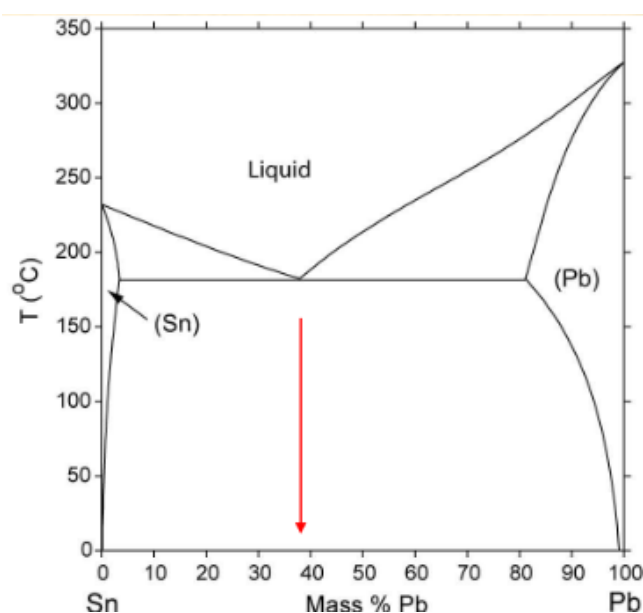
W obszarze metalurgii należy koncentrować się na badaniach struktury mikroskopowej, zwracając uwagę na unikalną strukturę eutektyczną, w której składniki stopu krzepną jednocześnie. W analizie metalurgicznej należy uwzględnić: skład chemiczny, ziarnistość oraz ewolucję mikrostruktury podczas lutowania, identyfikując kluczowe czynniki wpływające na trwałość i wytrzymałość połączeń.

W obszarze chemii, występuje nacisk na analizę reakcji eutektycznych, które zachodzą podczas procesu lutowania, analizując równania chemiczne reakcji między składnikami stopu lutowniczego. W badaniach interakcji między lutem a powierzchnią materiałów bazowych należy zwrócić uwagę na procesy utleniania i redukcji, identyfikując związki chemiczne powstające w trakcie reakcji. Ponadto, zastosowane fluksy, pasty lutownicze mogą być przedmiotem szczegółowych analiz, ze względu na ich rosnące znaczenie w redukcji tlenków i zapewnieniu czystości powierzchni lutowanych elementów.

W zastosowaniach lutowania na potrzeby motoryzacji kładzie się nacisk na optymalizacji składu chemicznego stopów lutowniczych, aby uzyskać korzyści termodynamiczne, a jednocześnie zachować pożądane właściwości fizyczne i mechaniczne [10].

Właściwości złączy, takie jak twardość, wytrzymałość czy przewodność cieplna, są szczegółowo badane w celu dostosowania procesów lutowania do konkretnych zastosowań, w tym w branży transportowej.

Badania nad lutowaniem z uwzględnieniem przemian eutektycznych koncentrują się na zrozumieniu procesu i wykorzystaniu ich do zoptymalizowania kosztów produkcji, jakości oraz trwałości połączeń metalicznych.



Rys. 20. Przykład wykresu równowagowego lutowia Sn-Pb [9]

Z wykresu wynika, że najniższa temperatura topnienia stopu jest podczas przemiany eutektycznej o zawartości 38% Pb. Lutowanie w temperaturze eutektycznej jest ekonomiczne, jest jednym kryteriów poszukujących skład chemiczny stopu lutowniczego, ale nie zawsze punkt eutektyczny gwarantuje najlepsze własności lutownicze stopu (wytrzymałość na rozciąganie, zwilżalność, twardość, wydłużenie względne, przewodnictwo cieplne, elektryczne itd.) [9,15].

2.1. Parametry lutowania

Proces lutowania obejmuje kilka etapów: przygotowania powierzchni łączonych, nagrzania ich do temperatury zbliżonej do temperatury topliwości spoiwa, nałożenia topnika, roztopienia lutu i wprowadzenia go pomiędzy łączone powierzchnie, wzajemnej dyfuzji łączonych materiałów i ciekłego lutu oraz ochłodzenia i krzepnięcia lutowiny. Podstawowym warunkiem otrzymania prawidłowego połączenia lutowanego dwóch metali lub metalu z ceramiką jest przede wszystkim właściwy dobór spoiwa [18,19].

Ogólne wymagania stawiane lutom są następujące [14,15]:

- temperatura topnienia spoiwa musi być niższa od temperatury lutowanych metali,
- lut powinien dobrze zwilżać powierzchnie łączonych elementów,
- właściwości fizyko-chemiczne spoiwa w stosunku do metali łączonych powinny zapewnić tworzenie się na granicy styku roztworów stałych i faz międzymetalicznych,
- spoiwo w stanie roztopionym powinno wykazywać dobrą lejność,
- zakres temperatury krystalizacji nie powinien być zbyt duży,
- spoiwo powinno odznaczać się dostateczną wytrzymałością mechaniczną i plastycznością,
- współczynniki rozszerzalności cieplnej spoiwa i materiałów łączonych powinny być zbliżone do siebie,
- spoiwa i materiały łączone powinny wykazywać podobną odporność na korozję,
- w stanie ciekłym spoiwo powinno być odporne na utlenianie.

W zależności od przeznaczenia lutowanych elementów spoiwa powinny odznaczać się dobrą przewodnością elektryczną i skrawalnością, odpornością na działanie różnych substancji chemicznych, nie mogą zawierać składników szkodliwych dla zdrowia lub tworzących szkodliwe związki, barwa spoiwa powinna być zbliżona do barwy metali łączonych [9,22].

2.2. Zjawiska zachodzące na styku spoiwo-podłoże

Struktura złącza wytworzonego za pomocą lutowania jest wynikiem procesów fizykochemicznych zachodzących między materiałem podstawowym a spoiwem i składa się z [12,13]:

- materiału podstawowego,
- zwilżenie łączonych powierzchni,
- wnikania lutu w nierówności łączonych metali,
- strefy dyfuzyjnej, w której podczas lutowania zachodzą procesy wymiany składników stopowych materiału podstawowego i spoiwa,

- powstawania związków międzymetalicznych (łączony metal-lut),
- lutowiny przetopionego i skrzystalizowanego spoiwa.

2.2.1. Zwilżalność

Trwałość połączenia lutowanego w dużym stopniu zależy od przylegania lutu do łączonych powierzchni. Związane jest to z właściwościami zwilżającymi lutu, czyli zdolnością do pokrywania powierzchni łączonych elementów cienką, równomierną i ciągłą powłoką [9,11]. Przy założeniu, że powierzchnia metalu przeznaczona do lutowania jest dobrze oczyszczona i że nie zachodzi jej wtórne utlenienie, można przyjąć, że w procesie lutowania biorą udział trzy elementy: lut (metal), podłoże (metal bazowy) i topnik lub atmosfera, w której proces się odbywa (powietrze, pary topnika). W temperaturze lutowania metal bazowy, który charakteryzuje się relatywnie wysoką temperaturą topnienia jest ciałem stałym, roztopiony lut – cieczą, a topnik, który w normalnych warunkach jest ciekły, w temperaturze lutowania jest gazem.

Warunkiem zwilżania jest by siły przyciągania między cząsteczkami ciekłego spoiwa, a cząsteczkami lutowanych materiałów (zwanymi siłami adhezji) były większe od sił spójności pomiędzy cząsteczkami ciekłego spoiwa (zwanymi siłami kohezji) [12]. Siły spójności działające między cząsteczkami cieczy ujawniają się jedynie na powierzchni jej styku z otaczającymi gazami, ponieważ tylko tam siły, jakimi na daną cząsteczkę cieczy działają cząsteczki sąsiednie, nie równoważą się wzajemnie. Siły spójności składają się na wypadkową, powodując ciśnienie warstwy powierzchniowej na leżące pod nią warstwy wewnętrzne tak, że przeniesienie cząsteczki cieczy z wewnątrz na jej powierzchnię wymaga wykonania pewnej pracy [17].

Znajdujące się w warstwie powierzchniowej cieczy cząsteczki mają określony zasób energii potencjalnej, zwaną energią powierzchniową, której miarą na jednostkę powierzchni jest tzw. Napięcie powierzchniowe. Warstwa powierzchniowa jest w równowadze, gdy jej energia powierzchniowa posiada wartość możliwie najmniejszą [10,17].

Powierzchnia styku ciała stałego z cieczą jest również źródłem pewnej energii powierzchniowej, podobnie jak powierzchnia styku ciała stałego z gazem lub powierzchnia styku ciała stałego z gazem. W związku z tym mówi się o napięciu powierzchniowym cieczy w zetknięciu z gazem, ciała stałego z cieczą itd. Z tego wynika, że napięcie powierzchniowe zależy od stanu dwóch ciał stykających się ze sobą.

Jeżeli fazę gazową oznaczyć wskaźnikiem a, fazę ciekłą wskaźnikiem b, fazę stałą wskaźnikiem c, to warunek równowagi cieczy graniczącej z ciałem stałym w atmosferze gazowej (upraszczając wpływ siły ciężkości) wyrazić wzorem 1: [9,18]:

$$\sigma_{ac} - \sigma_{bc} - \sigma_{ab} \cos \theta = 0 \quad (1)$$

gdzie:

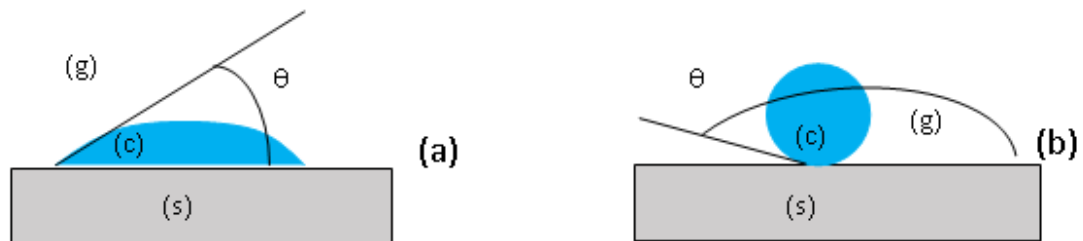
σ_{ac} – napięcie powierzchniowe na granicy ciała stałego i gazu,

σ_{bc} – napięcie powierzchniowe na granicy ciała stałego i cieczy,

σ_{ab} – napięcie powierzchniowe na granicy cieczy i gazu,

θ – kąt zwilżania.

Kąt zetknięcia θ jest kątem, pod którym w stanie równowagi swobodna powierzchnia cieczy styka się z powierzchnią ciała stałego. Gdy kąt θ jest zawarty w granicach 0 do 90°, uważa się, że ciecz dobrze zwilża ciało stałe, przy czym im kąt θ jest mniejszy uważa się, że zwilżalność jest lepsza. Gdy kąt θ jest zawarty od 90° do 180°, uważa się, że ciecz nie zwilża ciała stałego. Na rys. 21 przedstawiono rozkład napięć powierzchniowych w przypadku cieczy zwilżającej oraz niezwilżającej [17, 20].



Rys. 21. Rozkład napięć powierzchniowych w przypadku: a) cieczy zwilżającej, b) cieczy niezwilżającej [17]

Kąt zwilżania zależy od napięcia powierzchniowego występującego na granicy faz: ciało stałe (s) / ciecz (c), ciało stałe (s) / gaz (g) i ciecz (c) / gaz (g) zgodnie z wzorem 2.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{gs} - \sigma_{cs}}{\sigma_{gc}} \quad (2)$$

gdzie:

σ_{gs} - oznacza napięcie powierzchniowe na granicy gaz/ciało stałe,

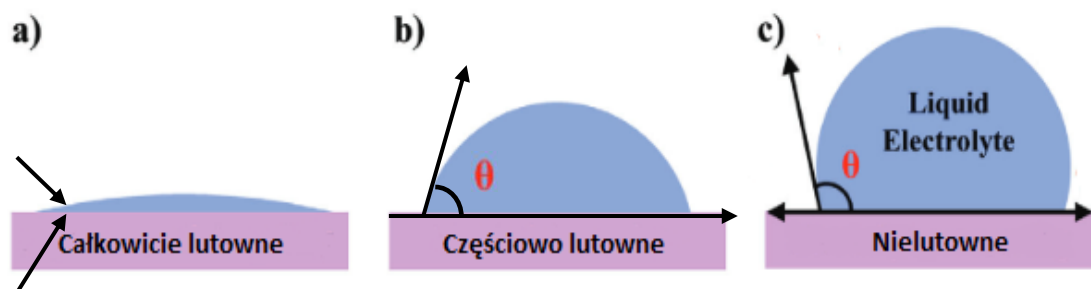
σ_{cs} – napięcie powierzchniowe na granicy ciecz/ciało stałe,

σ_{gc} – napięcie powierzchniowe na granicy gaz/ciecz.

Jeśli $\cos\theta$ jest równy jeden, to ciecz zwilża powierzchnię ciała stałego, jeśli $\cos\theta$ jest równy minus jeden, to ciecz nie zwilża powierzchni ciała stałego. Wartość $\cos\theta$ jest nazywana współczynnikiem zwilżalności.

Praktycznie w procesie lutowania na wielkość kąta zetknięcia, a tym samym na zwilżalność, wpływa się przez odpowiedni dobór gatunku spoiwa, które powinno w stanie ciekłym wykazać możliwie małe napięcie powierzchniowe. Siły spójności działające między cząsteczkami ciekłego lutu ujawniają się na powierzchni styku z otaczającymi gazami i/lub podłożem. Tylko tam siły te nie równoważą się wzajemnie. Energia swobodna powierzchni ciała stałego jest zatem większa niż energia wewnątrz z powodu przerwanych połączeń na powierzchni.

W warunkach równowagi termodynamicznej kropla lutu leżąca na poziomej, metalicznej powierzchni w atmosferze topnika, stanowi układ trzech faz: stała (element lutowany – metal bazowy), ciekła (ciekły lut), gazowa (powietrze atmosferyczne lub topnik) (rys. 22).



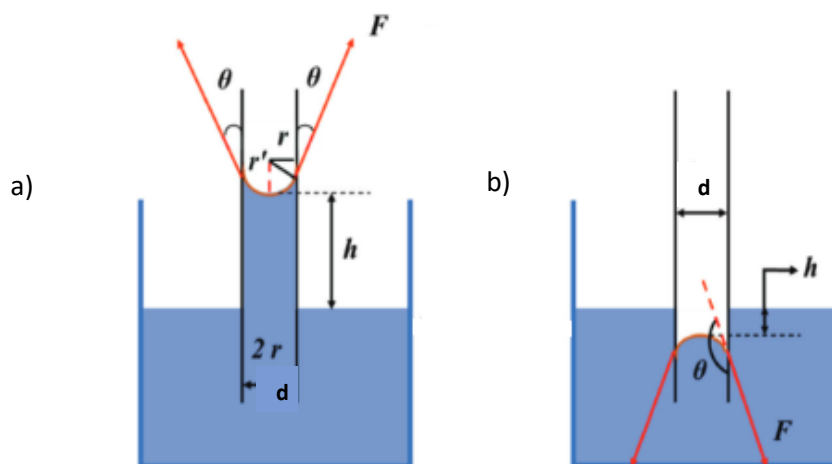
Rys. 22. Zależność między kątem zwilżania a stopniem zwilżenia [17]

Warunki skutecznego zwilżania w lutowaniu w zależności od kąta θ :

- jeżeli kąt θ wynosi powyżej 90° , a lutowane elementy zostały ochłodzone po osiągnięciu równowagi termodynamicznej, to warunek $\theta > 90^\circ$ wskazuje na brak powinowactwa do zwilżania między powierzchnią cieczy a powierzchnią ciała stałego, czyli nie nastąpi zwilżenie (rys. 22c);
- jeżeli kąt θ wynosi powyżej 90° , a lutowane elementy zostały ochłodzone przed osiągnięciem równowagi termodynamicznej, to warunek $\theta > 90^\circ$ wskazuje na proces zwany odwilżaniem. Powierzchnia najpierw ulega zwilżeniu, a następnie (z powodu napięcia międzyfazowego ciało stałe/ciecz lub fizycznego ochłodzenia) lut cofa się ze zwilżonej powierzchni i odsłania częściowo metal bazowy;
- gdy kąt θ zawarty jest w granicach od 90° do 75° , wskazuje on na częściowe zwilżenie. Ten typ zwilżenia nie jest akceptowany w praktyce (rys. 22b);
- gdy kąt θ jest mniejszy od 75° , wskazuje on na dobre zwilżenie. Kiedy wymagana jest wysoka jakość połączenia lutowanego, kąt θ powinien być mniejszy niż 55° ;
- najlepsze zwilżanie osiąga się, gdy kąt θ jest zawarty między 0 a 25° (rys. 22a).

Trwałość połączenia lutowanego w dużym stopniu zależy od przylegania lutu do łączonych powierzchni. Związane jest to z właściwościami zwilżającymi lutu, czyli zdolnością do pokrywania powierzchni łączonych elementów cienką, równomierną i ciągłą powłoką.

Ze zjawiskiem zwilżania ściśle łączy się zjawisko tzw. włoskowatości, najwyraźniej występujące w wąskich rurkach, zwanych rurkami włoskowatymi oraz w szczelinach (rys. 23). Zjawisko to polega na tym, że ciecz dobrze zwilżająca materiał rurki podnosi się w niej na pewną wysokość (w stosunku do poziomu cieczy w naczyniu) i tworzy menisk wklęsły, ciecz niezwilżająca opada poniżej poziomu i tworzy menisk wypukły [20].



Rys. 23. Zjawisko włoskowatości w warunkach: a) lutu zwilżającego, b) lutu niezwilżającego ścianek kapilary [17]

Wysokość podnoszenia się cieczy w okrągłych rurkach włoskowatych określa wzór 3:

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{d\gamma g} \quad (3)$$

gdzie:

h - wysokość podnoszenia się cieczy,

σ - napięcie powierzchniowe cieczy,

θ - kąt zetknięcia,

d - średnica rurki,

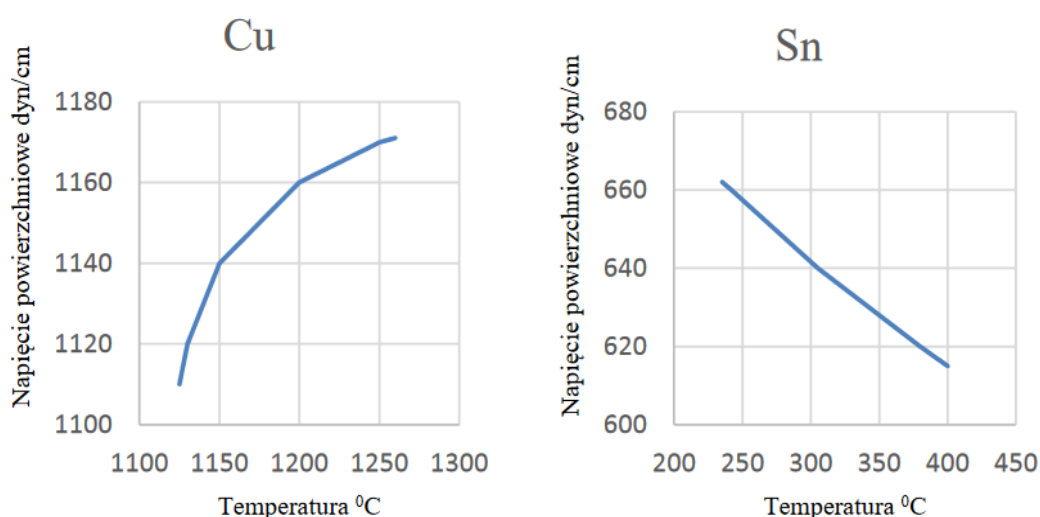
γ - gęstość cieczy,

g - przyspieszenie ziemskie.

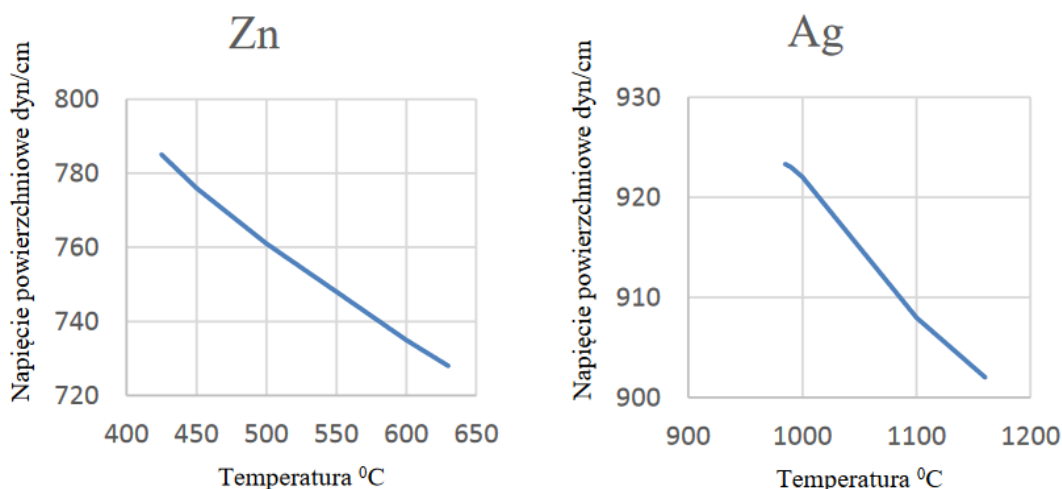
Z powyższego wzoru wynika, że wysokość podnoszenia się cieczy jest tym większa, im mniejsza jest średnica rurki lub odległość między ściankami, im mniejsza jest gęstość cieczy i im mniejszy jest kąt zetknięcia, czyli im łatwiej zachodzi zwilżanie [9]. Wynika stąd warunek, że przy konstruowaniu połączeń lutowanych i przy ich montażu, należy zawsze dążyć do otrzymania możliwie najmniejszych szczelin między łączonymi powierzchniami, gdyż tylko wtedy zapewnione jest szczelne wypełnienie lutem [17]. Drugi warunek wynika z gęstości ciekłego lutu. Im temperatura lutowania jest wyższa tym gęstość lutu jest mniejsza, a wysokość wzniesienia włoskowatego większa. Tym samym uzyskanie dobrego połączenia jest łatwiejsze [20].

Wysokość wzniosu ciekłego lutu (h) jest tym większa, im mniejsze są: średnica otworu (d), gęstość lutu oraz im mniejszy jest kąt zwilżania ($\cos\theta$), czyli im łatwiej zachodzi zwilżanie. Ta prawidłowość dobrze się sprawdzała przy lutowaniu otworów stopem SnPb, w którym stwierdzono liniową zależność wysokości wzniosu lutu w kapilarze od zmniejszania średnicy kapilary (rys. 23). Nieco inaczej zachowują się luty bezołowiowe, które nie wykazują tak dużej zależności wysokości wzniosu od geometrii kapilary, jak na przykład lut SnCu.

Zwilżalność zależy też od parametrów procesu lutowania (temperatury i czasu), czystości i chropowatości łączonych powierzchni oraz wielkości szczeliny między nimi. Można ją zwiększyć przez wprowadzenie do lutu dodatkowych składników. Roztopione metale i stopy charakteryzują się różnymi wartościami napięcia powierzchniowego, przy czym w dużej mierze zależy ono od temperatury (rys. 24, 25) [9].



Rys. 24. Zależność napięcia powierzchniowego od temperatury:
dla cyny i dla miedzi [9]



Rys. 25. Zależność napięcia powierzchniowego od temperatury: dla cynku i srebra [9]

Zazwyczaj jako spoiwa stosuje się stopy metali, zawierające mniejszą lub większą ilość dodatkowych pierwiastków. Metale nie rozpuszczające się wzajemnie i nie tworzące faz międzymetalicznych nie zwilżają jedne drugich [17]. Zwilżalność w dużym stopniu zależy również od czystości powierzchni łączonych części. Zanieczyszczenia tlenkami lub tłuszczem, nawet gdy grubość ich jest niewielka, mogą wywołać znaczne zwiększenie kąta zetknięcia, a tym samym pogorszenie zwilżalności. Usuwanie tlenków drogą mechanicznego lub chemicznego oczyszczania powierzchni polepsza zwilżanie, jednakże nie jest to całkowicie skuteczne, gdyż w czasie lutowania powstają nowe tlenki. W związku z tym najczęściej stosuje się dodatkowo rozpuszczanie tlenków za pomocą tzw. topników. Rozpuszczone tlenki w postaci żużla wypływają na powierzchnię ciekłego spoiwa, skąd po skończonym procesie lutowania usuwa się je mechanicznie [18, 22]. Z tego powodu spoiwa w stanie ciekłym nie powinny wykazywać podatności na utlenianie, a co najwyżej tworzyć tlenki łatwo rozpuszczalne lub ulegające redukcji przez topniki.

2.2.2. Wicking

Zdolność zwilżania i wypełniania szczelin zależy nie tylko od fizycznych właściwości lutu i metali łączonych, ale także od stopnia gładkości powierzchni tych metali. Najlepsze wyniki uzyskuje się, jeśli lutowane powierzchnie wykazują pewną chropowatość, w wyniku np. zgrubionego szlifowania lub toczenia, trawienia itd.

Istniejące wtedy na powierzchni drobne nierówności, ryski i zadrapania, tworząc pewnego rodzaju siatkę naczyń włoskowatych, ułatwiają rozplýwanie się ciekłego lutu i sprzyjają szybkiemu wypełnieniu się szczelin między łączonymi powierzchniami.

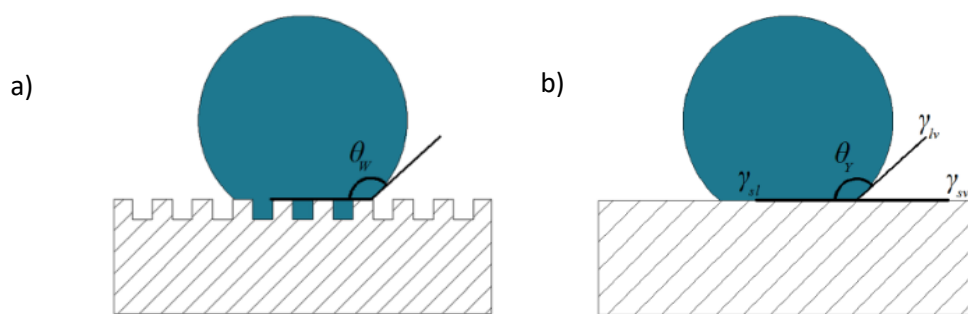
Szczególne znaczenie ma to w przypadku, gdy materiały łączone i lut wykazują małe powinowactwo chemiczne względem siebie. Jeśli powinowactwo chemiczne między nimi jest duże, chropowatość powierzchni nie odgrywa większej roli, ponieważ ciekły lut rozpuszcza przede wszystkim wierzchołki nierówności, niszcząc w ten sposób siatkę naczyń włoskowatych [20]. Zachodzi tak zwane zjawisko wickingu. Zjawisko wickingu jest napędzane przez siły kapilarne, które występują, gdy siły adhezji między lutem a powierzchnią są większe niż siły kohezji w samym lucie. To prowadzi do przepływu lutu w wąskie przestrzenie, gdzie powierzchnia styku z lutem jest zwiększona. Zjawisko wickingu jest istotne do rozważenia podczas projektowania procesów lutowania, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z elementami o wąskich szczelinach lub delikatnych strukturach, które mogą być podatne na kapilarne wnikanie lutu. Zrozumienie i kontrola wickingu mogą pomóc w zapewnieniu wysokiej jakości i niezawodności połączeń lutowanych. Zjawisko wickingu jest ściśle powiązane z teorią kapilarną, związana z działaniem sił kapilarnych (opisanych w podrozdziale zwilżalność). Główne czynniki wpływające na wicking to napięcie powierzchniowe, kąt zwilżania, oraz geometria szczeliny [21].

Aby kontrolować zjawisko wickingu w procesie lutowania, należy podjąć następujące kroki:

- optymalizacja składu lutu. Dobór lutu z odpowiednim napięciem powierzchniowym i składem chemicznym;
- kontrola warunków lutowania. Ustawienie właściwych temperatur i czasów lutowania, aby zmniejszyć ryzyko niekontrolowanego wnikanie lutu;
- projektowanie geometrii: Projektowanie komponentów i PCB z odpowiednimi odstępami, aby zminimalizować możliwość wystąpienia wickingu;
- stosowanie topników. Używanie odpowiednich topników, które pomagają kontrolować rozplływ lutu.

Aby zrozumieć, jak chropowatość powierzchni wpływa na zjawisko wickingu i zwilżalność w kontekście lutowania należy posłużyć się modelem Wenzela. Uwzględniając ten model, można optymalizować procesy lutowania, poprawiać jakość połączeń oraz kontrolować kapilarne wnikanie lutu, co ma istotne znaczenie w produkcji elektronicznej [23].

Model Wenzela opisuje, jak ciecz zachowuje się na chropowatej powierzchni w porównaniu do gładkiej powierzchni. W tym modelu zakłada się, że ciecz całkowicie wypełnia wszystkie nierówności powierzchni, co prowadzi do modyfikacji efektywnego kąta zwilżania. Na rysunku 26 przedstawiono zachowanie się kropli na chropowatej powierzchni z uwzględnieniem modelu Wenzela w porównaniu z zachowaniem się kropli na gładkiej powierzchni.



Rys. 26. Zachowanie się kropli na: a) chropowatej powierzchni w porównaniu do b) gładkiej powierzchni [23]

Efektywny kąt zwilżania θ_w na chropowatej powierzchni według modelu Wenzela jest opisany wzorem 4:

$$\cos(\theta_w) = r \cos(\theta) \quad (4)$$

gdzie:

- θ_w - efektywny kąt zwilżania na chropowatej powierzchni,
- r - współczynnik chropowatości powierzchni, definiowany jako stosunek rzeczywistej powierzchni do powierzchni rzutowanej,
- θ - kąt zwilżania na idealnie gładkiej powierzchni.

Z powyższych obliczeń wynika że jeśli $r > 1$ i $\cos(\theta) > 0$ (kąt zwilżania jest mniejszy niż 90°), powierzchnia staje się bardziej zwilżalna (efektywny kąt zwilżania maleje). Oznacza to, że lut lepiej zwilża chropowatą powierzchnię.

Jeśli $\cos(\theta) < 0$ (kąt zwilżania jest większy niż 90°), powierzchnia staje się mniej zwilżalna (efektywny kąt zwilżania rośnie). Oznacza to, że ciecz mniej skutecznie zwilża chropowatą powierzchnię.

W praktyce oznacza to że, jeśli chropowatość r jest duża, a kąt zwilżania na gładkiej powierzchni θ jest mały, efektywny kąt zwilżania θ_w będzie jeszcze mniejszy. To prowadzi do lepszego rozplýwu lutu, co jest pożądané w procesie lutowania.

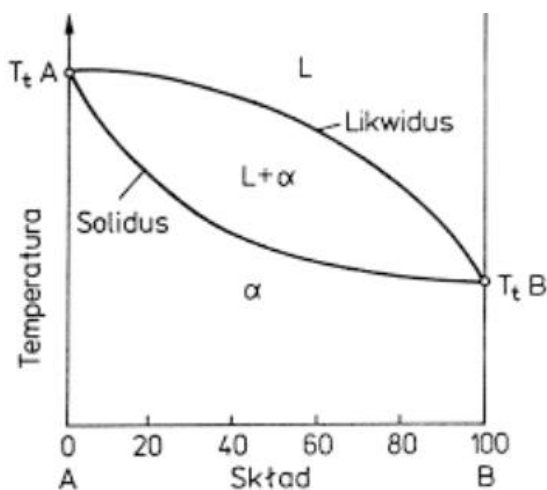
Zrozumienie wpływu chropowatości na zwilżalność pozwala inżynierom lepiej projektować powierzchnie i dobierać materiały do procesu lutowania. W przypadku lutowania, właściwy dobór parametrów powierzchni i procesów może prowadzić do bardziej niezawodnych i trwałych połączeń [21,23].

2.2.3. Rzadkość

Osobnym zagadnieniem, mającym bardzo istotne znaczenie w procesie lutowania, jest zagadnienie rzadkości (znana również jako lejność lutów), to właściwość materiałów (najczęściej stopów lutowniczych) opisująca zdolność do swobodnego przepływu i rozprzeczania się po powierzchni. oraz zdolności do wypełniania szczelin pod działaniem siły ciężkości. Rzadkość to odwrotność lepkości. Oznacza to, że im większa rzadkość, tym mniejsza lepkość materiału, co przekłada się na łatwiejszy przepływ [15, 31]. Dzięki rzadkości stop lutowniczy może wykorzystać zjawisko kapilarne, wnikając w wąskie przestrzenie między elementami, np. w przypadku lutowania szczelinowego. Ciecz o niskiej lepkości łatwiej przylega do powierzchni lutowanych, co wzmacnia wiązanie mechaniczne i elektryczne. Rzadkość spoiwo dobrze zwilża metal, tworząc trwałe połączenie [17].

Rzadkość ciekłego metalu zależy przede wszystkim od jego zakresu krystalizacji (krzepnięcia), tzn. od wielkości różnicy między krzywymi likwidus i solidus.

W przypadku gdy różnica pomiędzy krzywymi solidus i likwidus jest większa, to rzadkość materiałowa jest gorsza (rys.27). Również kształt tworzących się w procesie krzepnięcia kryształów w poważnym stopniu wpływa na lejność. W przypadku kryształów o kształtach zaokrąglonych (globularnych) rzadkość jest lepsza, niż w przypadku kryształów dendrytycznych. Dlatego też luty powinny odznaczać się możliwie małym zakresem temperatury krzepnięcia (mały odstęp pomiędzy krzywą likwidus i solidus (rys. 27), [11, 15].



Rys. 27. Wpływ temperatur likwidus i solidus na rzadkość materiałową [15]

Rzadkość materiałowa w lutowaniu jest kluczowym parametrem, który wpływa na jakość, trwałość i niezawodność połączeń lutowniczych. Optymalizacja rzadkości wymaga zrozumienia właściwości stopów lutowniczych, kontroli temperatury procesu oraz odpowiedniego doboru topników i dodatków chemicznych.

Dzięki temu można uzyskać połączenia o wysokiej jakości, które spełniają wymagania różnych zastosowaniach w procesach regeneracyjnych [31].

2.2.4. Dyfuzja

Istotną rolę w procesie łączenia metali lutowaniem odgrywa zjawisko dyfuzji występujące między ciekłym lutem i metalem, to proces, w którym atomy, jony lub cząsteczki przemieszczają się z obszarów o wyższym stężeniu do obszarów o niższym stężeniu. Jest to podstawowy mechanizm transportu masy w ciałach stałych, cieczach i gazach [25, 26]. W procesie lutowania, dyfuzja odnosi się do migracji atomów między lutem a materiałem bazowym, co prowadzi do powstania wzajemnego oddziaływania i tworzenia wiązań.

Przemieszczenie to uwarunkowane jest następującymi czynnikami:

- wzajemną rozpuszczalnością metali łączonych i lutu,
- dążeniem układu do wyrównania składu chemicznego w całej objętości,
- ruchami cieplnymi atomów.

Szybkość przemieszczenia się atomów, czyli szybkość dyfuzji w dużej mierze zależy od temperatury i wzrasta z jej podwyższeniem. W zależności od przebiegu dyfuzji rozróżnia się dyfuzję atomową i dyfuzję reakcyjną. Pierwsza polega na przemieszczeniu się atomów jednego pierwiastka do sieci elementarnej drugiego, przy czym powstaje roztwór stały o sieci elementarnej pierwiastka rozpuszczającego. Tworzenie się nowych faz o budowie różnej od budowy pierwiastka rozpuszczającego jest niemożliwe i maksymalne stężenie pierwiastka dyfundującego nie przekracza granicznej rozpuszczalności w temperaturze dyfuzji. Widać więc, że przy dyfuzji atomowej zachodzi jedynie zmiana stężenia składnika rozpuszczanego w sieci elementarnej składnika rozpuszczającego, tworzącego w wyniku tego roztwór stały. Zmiana ta powoduje duże różnice we właściwościach warstwy powierzchniowej metalu rozpuszczającego, czemu towarzyszy zazwyczaj zmiana mikrostruktury. Zdarzają się jednak przypadki, że mikrostruktura powstałego roztworu stałego nie różni się wyraźnie od mikrostruktury metalu rozpuszczającego i ujawnienie granicy między nimi jest trudne [25, 26].

Mechanizm dyfuzji jest następujący: temperatura określa wielkość układu, która rozdzielona jest między poszczególne atomy nierównomiernie. W związku z tym w sieci elementarnej znajduje się pewna ilość atomów, których energia jest znacznie większa niż atomów pozostałych. Energia ta przejawia się w drganiach i atom mający taką zwiększoną ilość energii wychodzi ze swego normalnego położenia w węźle sieci elementarnej, zajmując położenie międzywęzłowe. W sieci elementarnej pojawia się puste miejsce (wakans). Tego rodzaju przemieszczenie nazywa się dysocjacją atomów [25].

Istnienie wolnych miejsc w sieci elementarnej umożliwia powstawanie na drodze dyfuzji tzw. roztworów stałych różnowęzłowych (substytucyjnych), tzn. roztworów, w których część atomów w węzłach sieci metalu rozpuszczającego jest zastąpiona atomami metalu rozpuszczanego.

Inaczej przebiega proces powstawania na drodze dyfuzji roztworów stałych międzywęzłowych (addycyjnych). W tym przypadku atomy metalu rozpuszczanego wnikają w przestrzenie międzywęzłowe sieci elementarnej metalu rozpuszczającego [25].

Energię, która jest konieczna dla wywołania przesunięcia atomu z jednego położenia w sieci elementarnej w drugie, nazywa się energią aktywacji. Energia ta podczas tworzenia się stałych roztworów międzywęzłowych jest znacznie mniejsza niż podczas tworzenia się roztworów różnowęzłowych, gdyż w pierwszym przypadku odpada konieczność usuwania atomów metalu rozpuszczającego z węzłów sieci w położenie międzywęzłowe.

Drugim rodzajem dyfuzji jest dyfuzja reakcyjna, której wynikiem jest powstanie nowej fazy międzymetalicznej, zgodnie z wykresem równowagi między metalem rozpuszczanym i rozpuszczającym. Proces dyfuzji reakcyjnej można podzielić na dwa etapy [26]:

1. Powstanie nowej fazy na powierzchni metalu na skutek zachodzącej reakcji chemicznej.
2. Rozrost nowej fazy na skutek zachodzącej dyfuzji.

Wielkością charakterystyczną dla procesów dyfuzyjnych jest tzw. współczynnik dyfuzji, który określa ilość metalu w gramach jaka przedyfunduje w czasie jednej sekundy przez jeden cm^2 powierzchni. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od temperatury i wzrasta wraz z jej wzrostem (powiększa się ilość wolnych miejsc w węzłach sieci). Nadmierne podwyższenie temperatury może spowodować nadtopienie krawędzi lutowanych części oraz silne utlenianie się ciekłego lutu. Dlatego dla każdego gatunku spoiwa określona jest optymalna temperatura lutowania, w której szybkość jest odpowiednia, a niekorzystne zjawiska uboczne jeszcze nie zachodzą [26].

Grubość warstwy dyfuzyjnej w zależności od czasu (przy ustaleniu pozostałych parametrów procesu, jak temperatura, ciśnienie itd.) określa wzór 5:

$$y^2 = k\tau \quad (5)$$

gdzie:

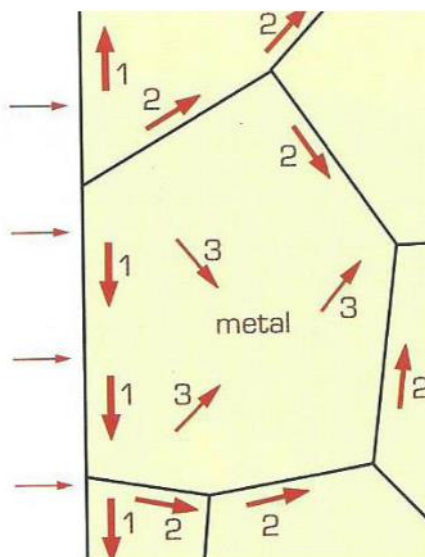
y- grubość warstwy dyfuzyjnej,

k- stałą zależną od współczynnika dyfuzji,

τ - czas procesu.

Z równania wynika, że poważną rolę w procesie lutowania odgrywa prędkość chłodzenia złącza. Przy zbyt dużych prędkościach chłodzenia, proces dyfuzji jest przedwcześnie zahamowany i połączenie jest mniej trwałe. Dlatego z reguły przedmioty połączone w procesie lutowania należy chłodzić powoli, szczególnie gdy lut jest jeszcze w stanie ciekłym.

Dyfuzja w metalach może zachodzić równoległe do powierzchni, lub w głąb ziarn bądź też wzdłuż ich granicy (rys. 28) [26].



Rys. 28. Schemat przebiegu dyfuzji w metalu: 1 – wzdłuż powierzchni, 2 – po granicach ziarn, 3 – przez ziarno [26]

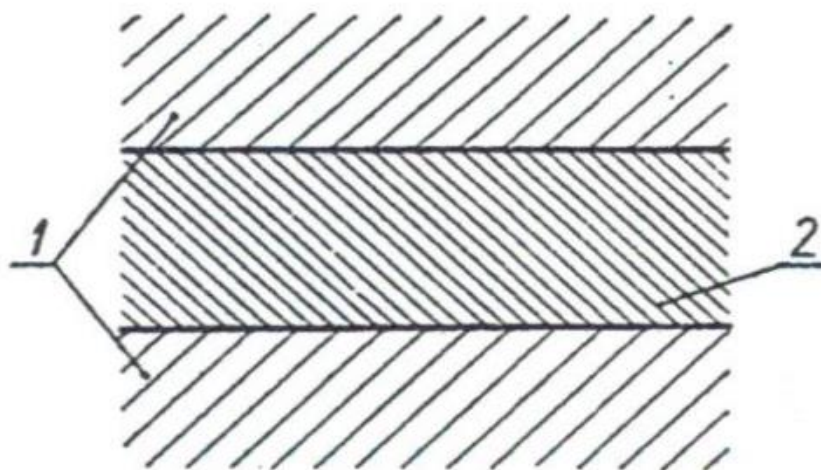
Na podstawie doświadczeń [26] ustalono, że największą wartość ma współczynnik dyfuzji na powierzchni metalu, mniejszą na granicy ziarn a najmniejszą w samych ziarnach. Ustalono także, że szybkość dyfuzji w metalach o elementarnej sieci sześcienniej (aluminium, nikiel, kobalt, miedź itd.) praktycznie nie zależy od kierunku osi krystalograficznych. Natomiast metale o innych sieciach wykazują pewną anizotropowość dyfuzji. Stwierdzono również, że dyfuzja przebiega szybciej w materiale odkształconym niż w materiale wyżarzonym. Duże znaczenie dla przebiegu dyfuzji ma przewodność cieplna lutowanych metali. W metalach o gorszej przewodności cieplnej dyfuzja zachodzi w mniejszym stopniu czyli współczynnik dyfuzji w tym przypadku jest mniejszy [25, 26].

2.3. Budowa i właściwości lutowanego złącza

Budowa lutowanego złącza zależy przede wszystkim od rodzaju wzajemnego oddziaływania na siebie lutowanego metalu i spoiwa, a więc od ich składu chemicznego i właściwości. Duży wpływ wywierają również takie czynniki, jak: temperatura procesu, wielkość szczeliny między łączonymi powierzchniami, sposób ochrony złącza przed utlenianiem (topniki, atmosfery ochronne), czystość łączonych powierzchni, metoda lutowania itd. W zależności od rodzaju wzajemnego oddziaływania lutowanego materiału i spoiwa, rozróżnia się następujące przypadki [10]:

- ciekłe spoiwo nie oddziałuje na materiał i połączenie ma charakter zwykłego przylegania spowodowanego adsorpcją,
- ciekłe spoiwo rozpuszcza w sobie materiał lub jego składniki,
- ciekłe spoiwo lub jego składniki dyfundują w materiał,
- ciekłe spoiwo i materiał tworzą na powierzchni granicznej fazy międzymetaliczne.

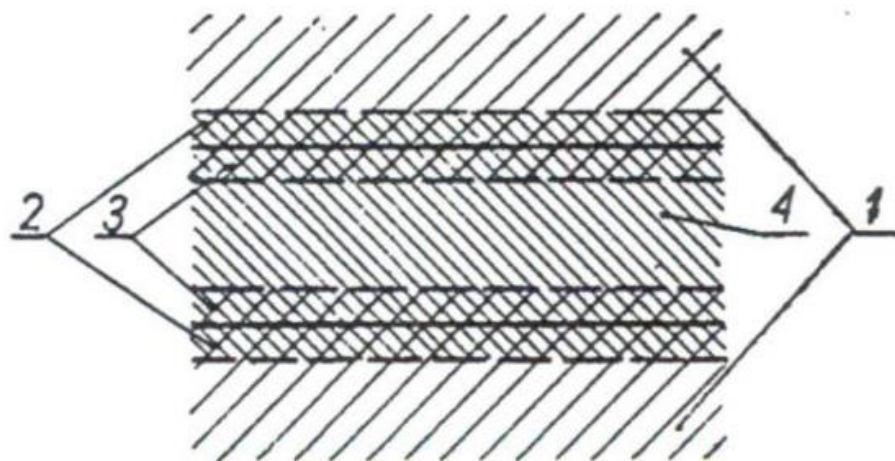
Warto dodać że trzy ostatnie przypadki mogą występować jednocześnie. Jeżeli ciekłe spoiwo nie oddziałuje na materiał, granica między nimi jest ostro uwidocznioma bez jakichkolwiek oznak dyfuzji (rys. 29) [9, 10].



Rys. 29. Schemat budowy lutowanego złącza w przypadku, gdy ciekłe spoiwo nie oddziałuje na metal rodzimy: 1 – metal rodzimy, 2 – lut [9]

Takie połączenie może zapewniać dostateczną szczelność lub przewodność elektryczną, wytrzymałość jego z reguły jest niewielka. Inaczej dzieje się jeśli ciekły lut rozpuszcza w sobie materiał, dyfunduje w niego lub tworzy z nim fazy międzymetaliczne. Wówczas w złączu można wyróżnić warstwy pokazane na (rys. 30):

1. Materiał o nie zmienionym składzie chemicznym, lecz z ewentualnymi zmianami strukturalnymi, spowodowanymi np. rekrytalizacją,
2. Strefę dyfuzji bogatszą w metal lutowany, a powstałą wskutek przenikania ciekłego spoiwa w głąb materiału,
3. Strefę dyfuzji bogatszą w spoiwo, a powstałą wskutek przenikania materiału lub jego składników do spoiwa,
4. Spoiwo o niezmienionym składzie chemicznym.



Rys. 30. Schemat budowy lutowanego złącza w przypadku wzajemnego oddziaływania na siebie ciekłego spoiwa i metalu rodzimego: 1 - metal rodzimy, 2 - strefa dyfuzji bogatsza w metal lutowany, 3 - strefa dyfuzji bogatsza w spoiwo 4 - spoiwo [9]

Nie wszystkie cztery warstwy muszą się znajdować w każdym złączu lutowanym. W przypadku złącz bardzo wąskich proces dyfuzji obejmuje całą lutownię i warstwa czwarta praktycznie nie istnieje. Poza tym warstwa druga stosunkowo rzadko jest wyraźnie widoczna i łatwa do obserwacji mikroskopowej. Podobnie warstwa trzecia w wielu przypadkach jest nieuchwytna wymiarowo nawet przy dużych powiększeniach.

Jeśli wzajemna rozpuszczalność lutowanego metalu i spoiwa jest nieograniczona, warstwy druga i trzecia nie są wyraźnie od siebie oddzielone i tworzą strefę przejściową złożoną z warstewek o nieprzerwanie zmiennym składzie. Przy ograniczonej wzajemnej rozpuszczalności, gdy tylko niewielka ilość spoiwa dyfunduje w metal lutowany i równie niewielka ilość materiału rozpuszcza się w ciekłym lucie,

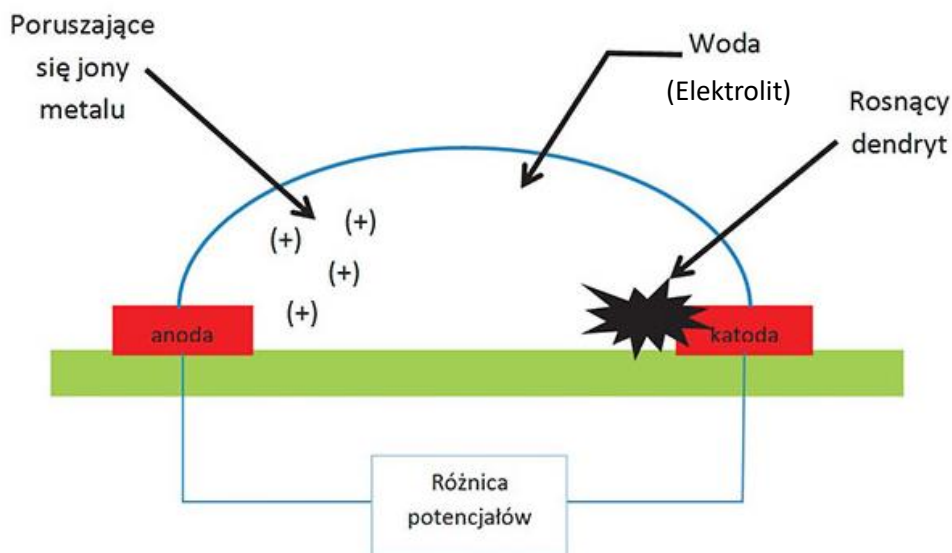
powierzchnia podziału między lutowanym metalem, a spoiwem nie zanika i warstwa druga i trzecia są ostro rozgraniczone [9].

Charakterystycznym zjawiskiem dla lutowania jest wydzielanie się dendrytów materiału lutowanego w lutowninie, na skutek zmniejszenia się jego rozpuszczalności w lucie podczas obniżania temperatury [9, 10].

Dendryty tworzą się na skutek migracji elektrochemicznej, czyli ruchu jonów pomiędzy metalowymi częściami, które mają różny potencjał elektryczny przy obecności elektrolitu (np. wody). Ich rozwojowi sprzyja obecność jonów występujących w zanieczyszczeniach pozostałych na płytce po wcześniejszych procesach, np. topnikach (fluxach), resztkach past lutowniczych, czy odciskach palców. Jony pewnych metali migrują łatwo, np. srebra, cyny i miedzi, innych natomiast nie migrują (złoto, platyna). Szybkość migracji wzrasta wraz z temperaturą. Jest również wprost proporcjonalna do odległości pomiędzy elektrodami. W zależności od warunków, uszkodzenie (zwarcie) może nastąpić nawet w czasie krótszym niż 30 min, lub też może nastąpić po kilku miesiącach, czy nawet latach [41].

Ażeby powstał dendryt, by jony migrowały muszą wystąpić 3 czynniki, jednocześnie (rys. 31):

- metal, którego jony migrują,
- różnica potencjałów,
- elektrolit (np. woda, dowolny płyn).



Rys. 31. Czynniki wpływające na powstanie dendrytów [121]

Ostatnio popularne stało używanie past lutowniczych zawierających stopy cyny i srebra i dla masowej produkcji nie ma alternatywnych rozwiązań. Dyrektywa RoHS, która weszła w życie 1 lipca 2006 roku i zakazała używania past zawierających ołów [27].

2.4. Lutowanie twarde

O tej metodzie lutowania mówi się wtedy, gdy temperatura topienia spoiwa wynosi więcej niż 450°C . Jako luty twarde stosowane są luty srebrne, luty fosforowe lub luty miedziane. Luty twarde stanowią połączenia, przeważnie w postaci roztworów stałych i faz międzymetalicznych, dzięki czemu wytrzymałość tych połączeń jest duża. Niektóre z tych spoiw zachowują dobrą wytrzymałość w temperaturach podwyższonych, co umożliwia lutowanie nimi stali oraz stopów żarowytrzymałych. Lutowanie twarde wykonuje się za pomocą lutownic indukcyjnych, palników acetylenowo – tlenowych, lamp lutowniczych lub też palników na propan butan. W ten właśnie sposób wykonuje się lutowanie stali węglowych, miedzi, złota, srebra, mosiądzu, brązu, stali chromowych i niklowych czy też węglików spiekanych.

Lutowanie twarde jest metodą stosowaną często podczas tworzenia lub konserwacji instalacji grzewczych chłodniczych i klimatyzacyjnych. Luty twarde zapewniają bowiem dużą trwałość. Nie są bowiem podatne na działanie temperatur sięgających 100°C . Są też odporne na rozciąganie i uszkodzenia mechaniczne. Należy jednak pamiętać, że lutowanie twarde powinno być stosowane wyłącznie w pomieszczeniach o dobrej wentylacji, gdyż w trakcie obróbki dochodzi do wydzielania się szkodliwych gazów [10, 12].

2.4. Lutowanie miękkie

Cechą charakterystyczną lutów miękkich jest niska temperatura towarzysząca spajaniu materiałów, która wynosi mniej niż 450°C . Spoiwo zaś stanowią luty cynowo - miedziane, bądź też cynowo – ołowiowe w postaci drutu, lub też specjalnych pałeczek.

Dużą zaletą tych spoiw jest ich zdolność do zwilżania powierzchni większości metali, w tym także żelaza, miedzi i ich stopów. Niska twardość i wysoka plastyczność spoiw miękkich ułatwiają przenoszenie przez lutowanie połączenia obciążeń dynamicznych, ze względu na niewielką ich wytrzymałość, obciążenia te nie mogą być zbyt duże [10, 12].

Z racji tego, że świetnie przewodzą one prąd elektryczny, a także ze względu na stosunkowo niskie temperatury w jakich odbywa się spawanie miękkie, jest ono stosowane w elektronice. Lutowanie miękkie bywa też brane pod uwagę podczas prac przy instalacjach wodnych i innych, których temperatura pracy nie przekracza 110°C [14].

2.5. Pasty lutownicze i topniki

W procesie lutowania układów elektrycznych i elektronicznych fundamentalną rolę odgrywają pasty lutownicze i topniki, umożliwiając tworzenie niezawodnych połączeń. To substancje, które używane podczas procesu lutowania, spełniają wiele istotnych funkcji takich jak przyczepność, przewodność czy trwałość.

2.5.1. Topniki

Topnik to chemiczny środek czyszczący stosowany przed i w trakcie procesu lutowania elementów elektronicznych na płytkach drukowanych. Jest używany zarówno w ręcznym lutowaniu, jak i w różnych zautomatyzowanych procesach stosowanych przez producentów. Głównym celem topnika jest przygotowanie powierzchni metalowych do lutowania poprzez oczyszczenie i usunięcie wszelkich tlenków i zanieczyszczeń [25, 27].

Funkcja topników w procesie produkcji i regeneracji [27, 28]:

1. Redukcja tlenków. Podczas lutowania, szczególnie w przypadku lutowania metali, tlenki mogą powstać na powierzchni metalu. Topnik działa jako reduktor tlenków, usuwając je z powierzchni lutowanych elementów. Dzięki temu zapewnia czyste i skuteczne połączenia między metalami.
2. Poprawa przewodności cieplnej. Topniki zwykle mają dobrą przewodność cieplną. Nakładając topnik na połączone powierzchnie, umożliwia się równomierne rozprawdzenie ciepła podczas procesu lutowania, co pomaga w tworzeniu trwałych połączeń.
3. Poprawa przyczepności lutowiny. Topnik może również poprawić przyczepność lutowiny do powierzchni lutowanych elementów. Zapewnia to lepsze rozprawdzenie lutowiny oraz zapobiega powstawaniu pęcherzyków powietrza między lutowanymi elementami.
4. Ochrona przed korozją. Niektóre topniki zawierają składniki zapobiegające korozji. Nakładając topnik na połączone powierzchnie, można zapobiec powstawaniu korozji na obszarach narażonych na działanie wilgoci lub innych czynników środowiskowych.

Topnik składa się z materiału bazowego i aktywatora, który jest substancją chemiczną sprzyjającą lepszemu zwilżaniu lutu poprzez usuwanie tlenków z metalu. Zawiera on również inne rozpuszczalniki i dodatki, które pomagają w procesie lutowania, a także hamują korozję. Może mieć postać stałą, pasty lub płynną w zależności od tego, jak i gdzie będzie używany. W przypadku lutowania ręcznego topnik może być nakładany za pomocą pióra topnikowego lub zwykle znajduje się w rdzeniu drutu lutowniczego, którego używa większość techników [29].

Topniki są podzielone na różne klasy w zależności od ich składu chemicznego i zastosowań. Oto kilka głównych klas topników oraz ich właściwości:

- Topniki kwasowe:

Ich skład chemiczny to: kwasy nieorganiczne lub organiczne, takie jak kwas solny lub kwas szczawiowy.

Właściwości:

Wysoka aktywność chemiczna: Topniki kwasowe są silnymi reduktorami, które usuwają warstwy tlenków z powierzchni metalu poprzez reakcję chemiczną.

Silna korozyjność: Ze względu na ich aktywność chemiczną, mogą one być korozyjne dla niektórych materiałów, szczególnie jeśli pozostaną na powierzchni po zakończeniu procesu lutowania [27, 28, 71].

Zastosowanie: Szeroko stosowane w przemyśle mechanicznym do lutowania metali o różnych stopniach czystości.

- Topniki na bazie żywic:

Ich skład chemiczny: syntetyczne lub naturalne żywice jako podstawowy składnik.

Właściwości:

Dobra przyczepność: Topniki te zapewniają stabilne połączenia lutowane i mają dobrą zdolność do zwilżania.

Niska korozyjność: Charakteryzują się niższym stopniem korozyjności w porównaniu z topnikami kwasowymi.

Zastosowanie: Powszechnie stosowane w przemyśle elektronicznym oraz w produkcji sprzętu mechanicznego.

- Topniki na bazie wody:

Ich skład chemiczny to: wodne roztwory substancji czynnej, takie jak kwas borowy, w połączeniu z dodatkami, na przykład gliceryną lub etanolem.

Właściwości:

Niska toksyczność: Topniki na bazie wody są bezpieczne w użytkowaniu i łatwo usuwalne

Zdolność do redukcji tlenków: Zapewniają stabilne i trwałe połączenia lutowane.

Zastosowanie: Często stosowane w lutowaniu miękkich metali oraz w lutowaniu elementów elektronicznych.

- Topniki na bazie żywicy rosinowej:

Ich skład chemiczny to: głównie żywica rosinowa.

Właściwości:

Dobra przyczepność: Zapewniają stabilne połączenia lutowane i mają dobrą zdolność do redukcji tlenków.

Odporność na korozję: Charakteryzują się niską korozyjnością.

Zastosowanie: Powszechnie stosowane w przemyśle elektronicznym do lutowania elementów montażowych na płytach drukowanych.

Dokładny wybór topnika zależy od wymagań aplikacyjnych, rodzaju lutowanych materiałów oraz preferencji producenta. Właściwe zastosowanie topnika jest kluczowe dla uzyskania trwałych i niezawodnych połączeń lutowanych [27, 71].

W procesie regeneracji używa się topników, należących do klasy R, NC, RMA, RA oraz WS:

- topniki klasy R są oparte na kalafonii, otrzymywanej z żywicy drzew iglastych. Charakteryzują się umiarkowaną aktywnością chemiczną. Stanowią najbardziej tradycyjną grupę topników – dawniej były zresztą podstawowym specyfikiem tego typu, stosowanym nawet w masowej produkcji elektroniki (chyba każdy, kto miał okazję serwisować leciwe, polskie urządzenia PRL-owskiej Unitry zwrócił uwagę na przyjemny, żywiczny zapach, wydobywający się z lutów podczas ich podgrzewania). Dziś topniki kalafoniowe są powszechnie używane m.in. do lutowania ręcznego większych elementów (np. złączy czy przewodów), intensywnie korzystają z nich także amatorzy – w sieci i literaturze dla elektroników można znaleźć liczne opisy stosowania „lakieru” z pokruszonej i rozpuszczonej w spirytusie kalafonii do zabezpieczania powierzchni samodzielnie wykonywanych płytek drukowanych.
- topniki klasy NC (od anglojęzycznego No Clean) zostały opracowane przede wszystkim z myślą o montażu seryjnym (automatycznym) w celu minimalizacji pozostałości topnika po lutowaniu. Charakteryzują się zwykle dość niską aktywnością chemiczną i są zaprojektowane tak, aby nie wymagały czyszczenia po zakończeniu procesu lutowania (co oznacza, że nie pozostawiają na łączonych elementach zanieczyszczeń, które z czasem prowadziłyby do korozji ścieżek i końcówek elementów).
- topniki klasy RMA (kalafoniowe średnio aktywowane) to swego rodzaju rozszerzenie klasycznych topników klasy R. Charakteryzują się umiarkowaną aktywnością chemiczną, dlatego nadają się do montażu łatwych do lutowania powierzchni (tj. o dobrej jakości, nie pokrytych zbyt dużą ilością tlenków lub zanieczyszczeń).
- topniki klasy RA charakteryzują się wyraźnie wyższą aktywnością chemiczną niż topniki klasy R, a to za sprawą znacznie większej domieszki aktywatorów. Należy pamiętać, że pozostałości topnika mogą być żrące, przez co należy je usunąć jak najszybciej po zakończeniu procesu montażu.
- topniki klasy WS są – w odróżnieniu od opisanych wcześniej czterech klas – rozpuszczalne w wodzie, co ułatwia proces czyszczenia po zakończeniu lutowania (w przypadku innych rodzajów topników, zwłaszcza kalafoniowych, konieczne jest

zastosowanie alkoholu – np. izopropylowego, IPA – bądź specjalnie do tego celu przeznaczonego środka chemicznego do czyszczenia PCB). Topniki WS charakteryzują się bardzo zróżnicowaną aktywnością chemiczną [29, 71].

2.5.2. Pasty lutownicze

Pasta lutownicza, znana również pod obiegowym określeniem flux lutowniczy, to specjalny materiał stosowany podczas procesu lutowania. Jej głównym celem jest ułatwienie przepływu lutu, który jest stopem metalu używanym do łączenia elementów elektrycznych, elektronicznych, przewodów na płytkach drukowanych, drutach i innych powierzchniach.

Pasty są zazwyczaj stopami ołowiu i cyny, a także mogą zawierać inne dodatki, takie jak fluorek cyny, które pomagają w procesie lutowania poprzez zmniejszenie napięcia powierzchniowego i zapobieganie tworzeniu się tlenków na powierzchniach lutowanych. Są one aplikowane za pomocą specjalnych narzędzi, takich jak pędzelki lub pistolety do pasty lutowniczej. Ich właściwości różnią się w zależności od rodzaju lutowania i wymagań aplikacji [29, 33].

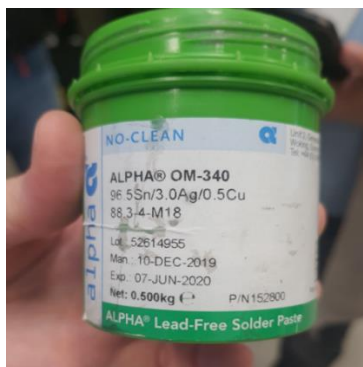
Skład past lutowniczych jest starannie dobrany, aby zapewnić odpowiednie właściwości reologiczne, chemiczne i fizyczne. Poniżej przedstawiono najważniejsze cechy past lutowniczych [28, 33]:

- skład chemiczny. Pasty lutownicze składają się głównie z metalicznych proszków, zwykle stopów ołowiu i cyny, chociaż coraz częściej stosuje się pasty bez ołowiu z uwagi na ograniczenia regulacyjne. Dodatkowo mogą zawierać fluorek cyny, który obniża napięcie powierzchniowe, ułatwiając przepływ i adhezję pasty,
- reologia pasty. Właściwości przepływu pasty, jest kluczowa dla procesu lutowania. Pasty lutownicze muszą być wystarczająco lepkie, aby pozostać na powierzchni elementów, ale również elastyczne, aby umożliwić dokładne ułożenie i równomierne pokrycie obszarów lutowanych. Kontrolowane reologiczne właściwości zapewniają również stabilność kształtu pasty po nałożeniu, co jest istotne dla precyzyjnych procesów montażu,
- temperatura topnienia. Temperatura topnienia pasty lutowniczej musi być odpowiednio dostosowana do procesu lutowania i materiałów, które łączymy. W zastosowaniach elektronicznych, gdzie istnieje wiele czułych na temperaturę komponentów, istotne jest, aby temperatura topnienia pasty była możliwie jak najniższa, aby uniknąć uszkodzeń,
- czystość chemiczna. Pasty lutownicze muszą być wolne od zanieczyszczeń, które mogą wpłynąć na jakość połączenia lutowanego lub prowadzić do korozji w przyszłości. Dlatego składniki pasty muszą być czyste i odpowiednio przetworzone,
- właściwości po lutowaniu. Po zakończeniu procesu lutowania, pasta powinna utwardzić się w sposób, który zapewni trwałe, elektrycznie i mechanicznie stabilne

połączenie. Unikanie porowatości, pęcherzyków powietrza czy innych defektów po lutowaniu jest kluczowe dla niezawodności i trwałości złącza.

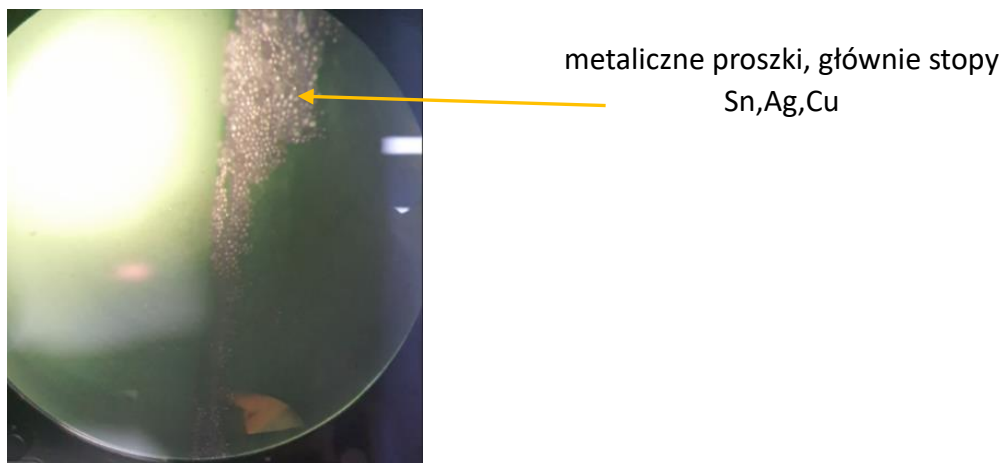
Skład pasty lutowniczej może się różnić w zależności od jej przeznaczenia, zastosowania i specyfikacji producenta (rys. 32). Jednakże, ogólnie skład pasty lutowniczej może zawierać następujące składniki [27, 90]:

- metaliczne proszki. Głównym składnikiem pasty lutowniczej są metaliczne proszki, które są zwykle stopami cyny z alternatywnymi stopami bezołowiowymi, takimi jak stopy cyny z dodatkiem innych metali jak srebrem, miedzią, czy bizmutem. Stop ten odpowiada za właściwości lutowania, w tym temperaturę topnienia, wytrzymałość mechaniczną połączenia, i przewodność elektryczną (rys. 33),
- fluorek cyny (SnF_2). Związek jest powszechnie stosowanym dodatkiem do past lutowniczych. Jego obecność zmniejsza napięcie powierzchniowe płynącej pasty, co ułatwia jej rozprowadzanie się i adhezję do powierzchni lutowanych,
- środki smarujące. Niektóre pasty lutownicze zawierają środki smarujące, które mogą składać się z organicznych lub nieorganicznych związków chemicznych. Ich rola polega na zapobieganiu utlenianiu się stopu podczas procesu lutowania i ułatwianiu rozprowadzania pasty po powierzchni lutowanych elementów,
- topniki. Niektóre pasty lutownicze mogą zawierać dodatkowe topniki. Topniki te pełnią rolę usuwania tlenków z powierzchni lutowanych materiałów, co zapewnia czyste, trwałe połączenia. Typowo stosowane w pastach lutowniczych topniki to związki halogenków, takie jak chlorki, fluorki, czy bromki, które reagują z tlenkami metali, tworząc łatwo usuwalne produkty reakcji,
- rozpuszczalniki. Pasty lutownicze mogą zawierać również rozpuszczalniki, które pełnią rolę ułatwiającą proces aplikacji pasty, poprawiając jej reologiczne właściwości i zapewniając równomierne pokrycie powierzchni lutowanych elementów. Rozpuszczalniki mogą być organicznymi lub nieorganicznymi związkami chemicznymi, takimi jak alkohole, ketony, lub estry,
- inne dodatki. W zależności od specyfikacji pasty lutowniczej, mogą być dodawane inne składniki, takie jak stabilizatory chemiczne, środki antyutleniające, czy dodatki poprawiające przyczepność pasty do różnych powierzchni.



Rys. 32. Skład pasty lutowniczej stosowanej podczas regeneracji alternatorów

[opracowanie własne]



Rys. 33. Morfologia pasty lutowniczej [opracowanie własne]

Podczas procesu lutowania za pomocą pasty lutowniczej zachodzą różne reakcje chemiczne, które są kluczowe dla utworzenia trwałego połączenia między elementami [33, 90]:

- topnienie stopu metalicznego: podczas procesu lutowania, pasta lutownicza zawierająca stop metaliczny (głównie cyny i miedzi lub ich alternatywne wersje) jest podgrzewana do temperatury topnienia, co prowadzi do stopienia pasty i stopu. Ten proces jest termicznie aktywowaną reakcją fazową, gdzie cząsteczki stałe stopu przechodzą w fazę ciekłą;
- usuwanie tlenków: topnik zawarty w pastach lutowniczych reaguje z tlenkami obecnymi na powierzchniach lutowanych materiałów. W wyniku reakcji chemicznych, topnik redukuje tlenki do formy łatwo usuwalnej, usuwając je z powierzchni i ułatwiając kontakt między stopem pasty a powierzchnią lutowanego materiału;
- adhezja i zwilżalność: fluorek cyny obecny w pastach lutowniczych zmniejsza napięcie powierzchniowe płynnej pasty, co prowadzi do jej lepszego rozprowadzania się i adhezji do powierzchni lutowanych elementów. Ten proces jest kluczowy dla tworzenia trwałego połączenia między pastą a materiałami lutowanymi i nazywany jest "zwilżalnością";
- interakcje między metalami: po rozprowadzeniu pasty na powierzchniach lutowanych, zachodzą reakcje między stopem pasty a powierzchnią materiałów lutowanych. Te reakcje mogą prowadzić do tworzenia się intermetalicznych faz, co przyczynia się do trwałego połączenia między materiałami;
- krystalizacja i utwardzanie: po zakończeniu procesu lutowania, stopiona pasta lutownicza chłodzi się i krystalizuje, tworząc trwałe połączenie między elementami. W miarę utwardzania, pasty lutownicze mogą przechodzić różne przemiany fazowe, co wpływa na strukturę i właściwości połączenia;

Te procesy są kluczowe dla skutecznego i trwałego lutowania za pomocą pasty lutowniczej, zapewniając nie tylko fizyczne połączenie między elementami, ale również minimalizując potencjalne uszkodzenia oraz zapewniając niezawodność połączenia przez cały okres eksploatacji [90].

2.6. Rola najważniejszych pierwiastków stopowych w lutach cynowych

Pierwiastki stopowe w lutach cynowych pełnią różne role, poprawiając ich właściwości mechaniczne, elektryczne, termiczne i technologiczne. Dodanie odpowiednich pierwiastków do lutów cynowych wpływa na zachowanie lutów podczas procesu lutowania oraz na jakość połączeń. Wybór odpowiedniego składu jest kompromisem między łatwością procesu, trwałością połączeń, kosztami oraz wymaganiami środowiskowymi. Dalszy rozwój materiałów lutowniczych koncentruje się na poszukiwaniu nowych, wydajniejszych i bardziej ekologicznych rozwiązań.

2.6.1. Stop lutowniczy Sn-Pb

Lut Sn-Pb jest od wielu lat standardem w lutowaniu komponentów elektronicznych oraz metalowych, głównie ze względu na swoje korzystne właściwości mechaniczne, elektryczne i termiczne.

Głównym składnikiem jest cyna, zapewniająca lutowność i dobrą zwilżalność podłoża. Drugim składnikiem stopowym jest ołów, który wprowadza plastyczność, obniża temperaturę topnienia do 183 °C (typowe stopy Sn-Pb np. Sn63 Pb37), która jest znacznie niższa niż w przypadku bezołowiowych alternatyw. Lutowanie w niższych temperaturach, ogranicza ryzyko uszkodzenia lutowanych komponentów oraz poprawia wytrzymałość na zmęczenie mechaniczne i termiczne. Ołów nadaje połączeniom lutowanym zdolność do absorbowania naprężeń mechanicznych, takich jak wibracje, drgania czy rozszerzalność cieplna. Dzięki temu połączenia są mniej podatne na pękanie i kruszenie, szczególnie w warunkach cyklicznych obciążeń. Ołów działa również jako stabilizator chemiczny, zapobiegając utlenianiu złącza i tworzeniu się tlenków podczas procesu lutowania dzięki czemu zwiększona trwałość połączeń w standardowych warunkach środowiskowych [31, 33].

Jednym z najczęściej stosowanych stopów cynowych stosowanych do połączeń lutowanych jest stop cyny z ołowiem w proporcji 63% Sn i 37% Pb (rys. 20). Jest to stop eutektyczny, co oznacza, że topi się i krzepnie w stałej temperaturze (w tym przypadku wynoszącej

183° C). Cyna w składzie stopu zapewnia doskonałą zwilżalność oraz wysoką przewodność elektryczną, co czyni go idealnym do zastosowań elektronicznych, takich jak lutowanie elementów elektrycznych czy łączenie przewodów. Ołów z kolei obniża

temperaturę topnienia i poprawia płynność stopu, co ułatwia pracę z nim, zwłaszcza przy ręcznym lutowaniu.

Stop tworzy trwałe i mechanicznie wytrzymałe połączenia, jednocześnie cechując się dobrą przewodnością cieplną, co pozwala na równomierne rozprowadzanie ciepła [91].

Właściwości lutów Sn-Pb [91, 92]

Luty SnPb charakteryzują się wieloma właściwościami istotnymi podczas wykonywania połączeń elektrycznych takimi jak:

- niska temperatura topnienia, co ogranicza ryzyko uszkodzenia lutowanych komponentów,
- dobra zwilżalność. Luty SnPb łatwo zwilżają powierzchnie lutowane, co zapewnia dobre wypełnienie szczelin i tworzenie mocnych, niezawodnych połączeń,
- przewodność elektryczna. Pozwala na efektywne wykorzystanie tych lutów w połączeniach elektronicznych,
- dobra przewodność cieplna umożliwia szybkie rozprowadzanie ciepła, co zmniejsza ryzyko uszkodzenia wrażliwych podzespołów podczas procesu lutowania,
- plastyczność. Ołów obecny w stopie nadaje mu dodatkową plastyczność, co pozwala na lepsze absorbowanie naprężeń termicznych i mechanicznych, zapewniając długą trwałość połączeń,
- wytrzymałość mechaniczna. Połączenia lutowane wykonane z tych stopów cechują się odpowiednią trwałością i odpornością na naprężenia mechaniczne,
- doskonała rozpląwność. Umożliwia łatwe formowanie równomiernych, szczelnych połączeń.

Dyrektywa RoHS (Restriction of Hazardous Substances) wprowadzona w 2006 r. ograniczyła stosowanie ołowiu w sprzęcie elektronicznym sprzedawanym w Unii Europejskiej. Powodem było szkodliwy wpływ ołowiu dla zdrowia podczas produkcji elektroniki (np. przy wdychaniu oparów) i środowiska.

Ze względu na wycofywanie ołowiu, przemysł przeszedł na luty bezołowiowe, takie jak SAC305 (Sn96.5Ag3Cu0.5). Popularny zamiennik o wyższej temperaturze topnienia (~217–221°C) lub SnCu jako tańsze rozwiązanie do prostych zastosowań.

Jednakże luty bezołowiowe charakteryzują się wyższą temperaturę topnienia (większe ryzyko uszkodzenia komponentów) oraz posiadają gorszą rozpląwność w porównaniu do Sn-Pb (tabl.1).

Tabl. 1. Porównanie z lutami bezołowiowymi

Cecha	Luty SnPb	Luty bezołowiowe (np. SnAgCu)
Temperatura topnienia	Niższa (183 °C)	Wyższa (220 °C)
Rozpląwność	Bardzo dobra	Dostateczna
Trwałość mechaniczna	Bardzo dobra	Zależy od składu
Koszt	Niski	Wyższy (np. srebro w SAC305)
Ekologia	Niekorzystna	Przyjazna środowisku

Luty Sn-Pb, szczególnie w proporcji Sn63 Pb37, pozostają ważnym elementem w przemyśle ze względu na swoją niezawodność, łatwość użycia i wyjątkowe właściwości. Niektóre sprzęty mają wyłączenia z RoHS ze względu na wymóg wysokiej niezawodności.

Dziedziny, w których stosuje się luty cynowo - ołowiowe to [10]:

- produkcja oświetlenia i energetyki w łączeniu elementów w lampach i urządzeniach o wysokiej niezawodności,
- przemysł lotniczy i kosmiczny podczas lutowania elementów odpornych na ekstremalne warunki środowiskowe,
- urządzenia medyczne w połączeniach o wysokiej niezawodności,
- przemysł transportowy w połączeniach o dużej wytrzymałości mechanicznej oraz odporności na korozję.

2.6.2. Stop lutowniczy Sn-Cu

Po wprowadzeniu ograniczeń stosowania ołowiu w lutach cynowych jako dodatek stopowy zaczęto stosować miedź [32, 34].

Miedź w lutach cynowych pełni istotną rolę, zarówno jako składnik stopu lutowniczego, jak i jako materiał podłoża lutowanego. Jej obecność wpływa na właściwości mechaniczne, elektryczne oraz termiczne złącza lutowanego i w pewnym stopniu zastępuje ołów. Właściwości miedzi w lutach Sn-Cu [99]:

- **mechaniczne**

Miedź wprowadzona w pewnym zakresie do stopu cynowego (np. w lutach typu Sn Cu lub SAC) poprawia wytrzymałość mechaniczną złącza poprzez tworzenie twardych faz międzymetalicznych. W wyniku czego połączenia lutowane są bardziej odporne na naprężenia mechaniczne i zmęczenie materiału.

- **odporność na pełzanie:**

Dodatek miedzi ogranicza pełzanie złącza (powolną deformację materiału pod wpływem długotrwałego obciążenia w wysokiej temperaturze). Lut jest bardziej stabilny w długim czasie, szczególnie w zastosowaniu przemysłowym o wysokiej temperaturze pracy.

- **termiczne**

Dodatek miedzi zwiększa odporność stopu na cykliczne zmiany temperatury, ograniczając pękanie połączeń lutowanych. Wyższa trwałość złącza w warunkach dynamicznych zmian temperatury, np. w elektronice automotive. Miedź jako materiał o wysokiej przewodności cieplnej pomaga w efektywnym rozpraszaniu ciepła i zmniejsza ryzyko lokalnego przegrzania w strefie lutowania.

- **elektryczne**

Miedź w stopie poprawia przewodność elektryczną złącza, co jest kluczowe w aplikacjach o wysokiej precyzji sygnału w konsekwencji powodując mniejsze straty energii i lepszą niezawodność połączeń.

Podczas lutowania miedź reaguje z cyną, tworząc fazy międzymetaliczne, głównie Cu_6Sn_5 (określonych jako η) lub rzadziej ze względu na dużą zawartość miedzi Cu_3Sn (ϵ), które mają bezpośredni wpływ na właściwości złącza.

Faza Cu_6Sn_5 powstaje na granicy między stopem lutowniczym a miedzią podczas lutowania i w efekcie zmniejsza ryzyko pęknięcia. Faza Cu_3Sn powstaje pomiędzy fazą Cu_6Sn_5 a podłożem miedzianym w miarę postępu reakcji jest ona bardziej krucha niż Cu_6Sn_5 .

Faza Cu_3Sn w lutach Sn-Cu zaczyna powstawać, gdy zawartość miedzi w stopie osiąga wystarczająco wysoki poziom, a warunki termiczne (temperatura i czas) sprzyjają jej formowaniu.

Przy niższych zawartościach miedzi, dominującą fazą międzymetaliczną jest Cu_6Sn_5 . W praktyce faza Cu_3Sn powstaje rzadko jako kolejna warstwa pod istniejącą warstwą dominującej fazy Cu_6Sn_5 , gdy zasoby miedzi są wystarczające i zachodzi dalsza dyfuzja cyny do podłoża miedzianego [76, 77, 93].

Wyższe temperatury i dłuższy czas lutowania przyspieszają tworzenie i wzrost warstw międzymetalicznych. Zbyt gruba warstwa fazy międzymetalicznej może spowodować kruchość oraz osłabienie mechaniczne złącza. Nadmierny rozwój tej fazy może osłabić złącze [111].

Kolejnym problemem podczas lutowania materiału z miedzi lutem Sn-Cu jest zjawisko rozpuszczania miedzi z podłoża może w stopie lutowniczym. Proces ten jest intensywniejszy w wysokich temperaturach, co może prowadzić do ubytku materiału podłoża miedzianego a tym samym (w skutek osiągnięcia wyższej temperatury) do nadmiernego wzrostu faz międzymetalicznych w złączu. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie lutów z kontrolowaną zawartością miedzi (np. Sn-Cu 0,7%), które ograniczają rozpuszczanie miedzi oraz zastosowanie do lutu Sn-Cu dodatku srebra. Obecność srebra w stopie zmniejsza szybkość wzrostu warstw międzymetalicznych, co ogranicza ich grubość i poprawia trwałość połączenia lutowanego [99].

Miedź w lutach cynowych ma kluczowy wpływ na interakcje międzymetaliczne, które determinują trwałość i niezawodność złącza lutowanego. Efektywne zarządzanie interakcjami międzymetalicznymi pozwala na tworzenie trwałych i niezawodnych połączeń w regeneracji alternatorów [94].

2.6.3. Stop lutowniczy Sn-Ag

Srebro w lutach cynowych, szczególnie w nowoczesnych stopach bezołowiowych (np. Sn-Ag-Cu), pełni ważną rolę w poprawie właściwości mechanicznych, termicznych i elektrycznych połączeń lutowanych. Dodanie srebra do lutów cynowych wpływa na trwałość, wytrzymałość oraz stabilność złącza lutowanego w trudnych warunkach pracy. Srebro posiada podobne niektóre właściwości jak w przypadku użycia miedzi w stopach cynowych takie jak zwiększenie wytrzymałości mechanicznej złącza, zwiększenie odporności na zmiany temperatury, zmniejszenie skłonności do pełzania złącza czy też poprawę przewodności elektrycznej [84, 86].

Ważną cechą srebra jest istotny wpływ na interakcje międzymetaliczne (IMC) w złączach lutowanych, a tym samym na ich trwałość, wytrzymałość i stabilność. Interakcje te dotyczą głównie reakcji pomiędzy cyną a miedzią, które prowadzą do powstawania faz międzymetalicznych na granicy między lutem a podłożem. Srebro, choć w mniejszych ilościach, wpływa na te procesy w znaczący sposób.

Srebro działa jako inhibitor wzrostu faz międzymetalicznych (IMC), szczególnie takich jak Cu_6Sn_5 i Cu_3Sn , które powstają podczas lutowania miedzi z cyną. Fazy te są bardzo twarde i kruche. Obecność srebra w stopie zmniejsza czas rozrastania się warstw międzymetalicznych, co ogranicza ich grubość i poprawia trwałość połączenia lutowanego. W rezultacie złącze lutowane staje się mniej podatne na pęknięcia i uszkodzenia mechaniczne [105].

Srebro w połączeniu z cyną może tworzyć fazy międzymetaliczne, takie jak Ag_3Sn , które mają wpływ na strukturę lutu. Faza ta jest mniej krucha niż fazy Cu-Sn i może przyczynić się do poprawy mechanicznych właściwości lutu. Dzięki dodatkom srebra, fazy międzymetaliczne stają się bardziej stabilne w zmieniających się warunkach termicznych. Lut staje się bardziej odporny na cykliczne zmiany temperatury, co jest kluczowe w zastosowaniach wymagających niezawodności w trudnych warunkach pracy, np. w elektronice motoryzacyjnej (w lutach Sn-Cu przy podwyższaniu i długotrwałym działaniu temperatury następuje nagły rozrost IMC). Srebro przyczynia się do spowolnienia wzrostu Cu_6Sn_5 , zmniejszając jego negatywny wpływ na trwałość połączenia lutowanego [84, 95].

2.6.4. Stop lutowniczy Sn-Al

Aluminium w lutach cynowych ma specyficzny wpływ na właściwości złączy lutowanych, zwłaszcza w kontekście połączeń lutowanych z wykorzystaniem cynowych stopów ołowiowych (Sn-Pb) lub bezołowiowych. Chociaż aluminium nie jest często stosowane bezpośrednio jako składnik stopu lutowniczego, jego obecność w podłożu może wpłynąć na proces lutowania i charakterystykę złącza lutowanego.

Aluminium, w połączeniu z cyną w stopach lutowniczych, może wpływać na twardość i wytrzymałość mechaniczną złącza lutowanego, szczególnie w stopach zawierających niewielką ilość aluminium. Jego niewielki dodatek może podnieść twardość materiału lutowanego, co wpływa na odporność połączenia na obciążenia mechaniczne, takie jak nacisk czy wibracje [112].

Dodanie niewielkiej ilości aluminium poprawia płynność stopu lutowniczego, co znacznie ułatwia proces lutowania i poprawia wypełnianie szczelin oraz jakości połączenia [112, 113].

Aluminium może poprawić odporność połączeń lutowanych na zmęczenie materiału, czyli na pęknięcia, które mogą wystąpić w wyniku cyklicznych obciążeń mechanicznych i termicznych.

W przemyśle elektroniki konsumenckiej, gdzie koszty materiałów są ważnym czynnikiem, stosowanie aluminium redukując tym samym udział miedzi lub srebra może zmniejszyć koszty przy zachowaniu odpowiednich właściwości połączeń.

Aluminium jest materiałem bardziej przyjaznym środowisku w porównaniu do ołowiu, który jest szkodliwy i coraz bardziej ograniczany w stosowaniu. Lutowanie z aluminium zmniejsza negatywny wpływ na środowisko, zwłaszcza w kontekście

rosnących regulacji środowiskowych oraz stanowi alternatywę dla tradycyjnych lutów ołowiowych [114, 115].

2.6.5. Stop lutowniczy Sn-Ag-Cu (SAC)

Stop lutowniczy Sn-Ag-Cu jest powszechnie stosowany jako zamiennik lutów ołowiowych (Sn-Pb) w zastosowaniu połączeń układów elektrycznych, zgodnie z wymogami dyrektywy RoHS. Jest to wszechstronny stop, który łączy dobre właściwości mechaniczne z odpornością na zmęczenie termiczne i odpowiednią stabilnością mikrostruktury.

Luty o składzie chemicznym Sn-Ag-Cu należą do grupy bezołowiowych stopów lutowniczych, które są szeroko stosowane w elektronice potocznie określane skrótem SAC, pochodzącym od pierwszych liter symboli pierwiastków wchodzących w skład stopu.

Popularne warianty lutów SAC to m.in. SAC305 (Sn-3.0% Ag-0.5% Cu) oraz SAC387 (Sn-3.8% Ag-0.7% Cu). Głównym składnikiem jest cyna, która stanowi podstawę stopu. Srebro i miedź dodawane są w małych ilościach, aby poprawić właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturalne [39, 45].

Temperatury topnienia lutów SAC wynoszą od około 217° C do 227° C, w zależności od dokładnego składu stopu. W porównaniu do Sn-Pb (topnienie ~183° C).

Ważnym zjawiskiem lutów SAC jest występowanie fazy zwanej osnową cynową, w której osadzone są drobne cząstki Ag_3Sn i Cu_6Sn_5 . W czasie lutowania stop Sn-Cu-Ag reaguje z podłożami (np. miedzianymi), tworząc fazy międzymetaliczne [51]:

- Cu_6Sn_5 tworzy warstwę na granicy lut-podłoże, odpowiedzialną za dobrą adhezję.
- Ag_3Sn rozproszona w osnowie Sn, poprawia właściwości mechaniczne poprzez wzmocnienie osnowy.
- Cu_3Sn może pojawić się w długim czasie eksploatacji w podwyższonej temperaturze. Jej nadmierny wzrost może powodować kruchość.

Dodatek srebra wpływa na wielkość ziaren osnowy, ograniczając ich wzrost, co zwiększa wytrzymałość złącza.

Wady lutów SAC [54]:

- wyższe temperatury lutowania wymagają bardziej zaawansowanych urządzeń lutowniczych i odpowiednich topników. Większe ryzyko uszkodzenia termicznego komponentów elektronicznych.
- pękanie w niskich temperaturach - luty SAC mogą wykazywać mniejszą odporność na naprężenia mechaniczne niż luty Sn-Pb.
- obecność srebra znacznie podnosi koszt lutów SAC w porównaniu do tradycyjnych lutów.
- luty SAC mogą być podatniejsze na korozję w środowiskach o wysokiej wilgotności lub w obecności agresywnych chemikaliów.

3. PODSUMOWANIE LITERATURY

Alternatory, kluczowe elementy układu elektrycznego pojazdów, wymagają solidnych i trwałych połączeń elektrycznych oraz mechanicznych. Alternatory pracują w trudnych warunkach, narażone są na wysokie temperatury generowane przez tarcie i prąd, wibracje i naprężenia mechaniczne w czasie jazdy oraz korozję spowodowaną wilgocią i solą drogową. Z przeglądu literatury wynika, że znaczną ilość uszkodzeń alternatorów można naprawić metodą lutowania. Zastosowanie odpowiednich stopów lutowniczych ma istotny wpływ na efektywność regeneracji tych urządzeń.

Regeneracja obejmuje naprawę styków elektrycznych, uzwojeń, mostków prostowniczych oraz innych połączeń. Połączenia lutowane są kluczowe dla zapewnienia trwałości i funkcjonalności urządzenia.

Dostępna literatura nie zawiera wystarczającej ilości informacji na temat parametrów stopów lutowniczych na bazie cyny, które sprostałyby takim wymaganiom, jakie powinien spełniać zregenerowany alternator. Standardowe luty dostępne na rynku nie dają oczekiwanych rezultatów. **Brak jest literatury naukowej, która skupia się na regeneracji alternatorów z wykorzystaniem nowoczesnych stopów lutowniczych.** Uzupełnienie tej luki wiedzy może znacząco poprawić procesy regeneracyjne. Nowoczesne, wieloskładnikowe stopy cynowe mogą wnieść na wyższy poziom proces regeneracji alternatorów jak również podobnych systemów pracujących w trudnych warunkach wykazując większą niezawodności, efektywności i zgodności z normami środowiskowymi, co czyni je kluczowym elementem w rozwoju technologii regeneracji w branży transportowej.

Analizując dostępną literaturę nasuwają się wnioski, które potwierdzają przypuszczenia, że wykorzystanie wielu, odpowiednich pierwiastków w lutach cynowych może poprawić:

1. Wytrzymałość złącza. Poprzez dodanie srebra tworzy się faza międzymetaliczna Ag_3Sn , które wzmacnia lut. Dodatek miedzi tworzy fazę międzymetaliczną Cu_6Sn_5 , poprawiając odporność na pęknięcia oraz stabilność mechaniczną. Zmniejsza również ryzyko odkształceń w połączeniach,
2. Odporność termiczną. Wieloskładnikowy charakter lutu podwyższa temperaturę topnienia w porównaniu do tradycyjnych lutów Sn-Pb, co zwiększa stabilność połączeń w środowiskach o wysokiej temperaturze, np. w pobliżu silników. Dodanie aluminium stabilizuje mikrostrukturę w wyższych temperaturach i ogranicza dyfuzję cyny, która może prowadzić do degradacji połączeń,
3. Odporność na korozję. Dodatek aluminium do stopu cynowego poprawia odporność lutu na działanie wilgoci i soli, co jest kluczowe w środowisku eksploatacji pojazdów.
4. Lepszą przewodność elektryczną. Główny składnik stopu cynowa, zapewnia dobrą przewodność elektryczną, co jest kluczowe dla połączeń w regenerowanych

alternatorach. Ponadto obecność miedzi i srebra ogranicza degradację przewodności

oraz zapewnia:

- zgodność z regulacjami środowiskowymi. Użycie niewielkiej ilości ołowiu (3%) zapewnia połączenia o odpowiedniej plastyczności, zachowując jednocześnie zgodność z przepisami ekologicznymi (np. RoHS) w zastosowaniach specjalistycznych,
- niższy koszt produkcji. W porównaniu do popularnych stopów SAC, takich jak Sn-3% Ag-0,5% Cu, zmniejszenie zawartości srebra do 1% obniża koszty produkcji, przy zachowaniu kluczowych właściwości mechanicznych i termicznych,
- zoptymalizowana mikrostruktura. Dodanie każdego ze składników w zbliżonych proporcjach sprzyja równomiernemu rozkładowi faz międzymetalicznych, co zwiększa stabilność i trwałość połączeń,
- synergia składników. Połączenie wielu składników w stopie lutowniczym pozwala na wzajemne uzupełnianie się ich właściwości, co prowadzi do uzyskania lutu o zrównoważonych parametrach mechanicznych, termicznych i chemicznych.

Wszystko powyższe w znacznym stopniu zmniejsza ryzyko awarii w trudnych warunkach środowiskowych oraz pozwalają na wydłużenie żywotności regenerowanych alternatorów.

4. BADANIA ROZPOZNAWCZE

Badania rozpoznawcze połączeń lutowanych mają na celu ocenę jakości tych połączeń pod kątem możliwości ich zastosowania do regeneracji alternatorów samochodowych. Jakość połączeń jest kluczowym czynnikiem zapewniającym niezawodność i trwałość regenerowanych elementów. Wyniki badań mają wpływ na wybór materiałów oraz parametrów technologii lutowania, które gwarantują długą i bezawaryjną eksploatację urządzenia w różnych warunkach. Alternatory są kluczowymi elementami w układach elektrycznych pojazdów, ponieważ odpowiadają za generowanie prądu i ładowanie akumulatora. Wysoka jakość połączeń lutowanych podczas regeneracji alternatorów ma bezpośredni wpływ na ich wydajność i długi czas pracy.

4.1. Cel i zakres badań rozpoznawczych

Do głównych celów badań rozpoznawczych zawartych w rozprawie można zaliczyć:

1. Ocenę jakości połączeń lutowanych
 - wykrywanie wad po regeneracji. Identyfikacja niedoskonałości, takich jak porowatość, pęknięcia, przebarwienia, które mogą powstać podczas procesu lutowania,
 - kontrola spójności lutu. Upewnienie się, że materiał lutowniczy jest prawidłowo rozprowadzony i utwardzony, co zapewnia odpowiednie własności elektryczne i mechaniczne.
2. Sprawdzenie czy zaproponowane rozwiązanie mogłoby zapewnić niezawodność i trwałość podczas regeneracji alternatora:
 - zminimalizowanie ryzyka awarii. Wczesne wykrycie wad lutowania pozwala na zapobieżenie awariom, które mogą prowadzić do uszkodzenia całego alternatora lub innych elementów układu elektrycznego,
 - optymalizacja wydajności. Dobrze wykonane połączenia lutowane minimalizują straty energetyczne i zapewniają optymalną wydajność alternatora.

W tym celu przygotowano materiały w postaci lutu o złożonych składach chemicznych oraz wykonano połączenia lutowane przy różnych parametrach procesu lutowania. Zakres parametrów lutowania dobrano na podstawie informacji literaturowych. Zgodnie z nimi temperaturę grota [°C] ustalono kolejno na 290, 380 i 415 °C, a czas styku lutowanych elementów odpowiednio do temperatury grota na poziomie 7 s., 5 s. i 3 s. Po procesie lutowania przeprowadzono testy wizualne w celu oceny jakości połączenia lutowanego. Oględziny (VT) połączeń lutowniczych wykonano przy użyciu lupy elektronicznej Reflecta USB200 (rys.34), podłączonej do komputera w powiększeniu 10×. Badania zostały przeprowadzone zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 17638 oraz

kryteriami oceny wg normy EN ISO 5817. Niezgodności analizowano wg normy PN-EN ISO 18279 Lutowanie. Niezgodności. Szczegóły badania opisano rozdziale 4.3.



Rys. 34. Lupa elektroniczna USB200 firmy Reflecta [opracowanie własne]

Wykonano badanie radiograficzne zgodnie z normą EN 17636-1. Do badań wykorzystano połączenia lutowane dwóch drutów miedzianych o średnicy 1,5 mm, połączonych na odcinku 15 mm. Wcześniej druty zostały oczyszczone mechanicznie i zwilżone topnikiem FLUX-TKP-101. Druty miedziane zostały umieszczone w specjalnym uchwycie, który zapewniał ich stabilne położenie na odległość 10 cm podczas badania. Pozycjonowanie było kluczowe dla uzyskania jednolitego obrazu radiologicznego i odpowiedniej jakości wykrywania ewentualnych defektów. Aparatura radiograficzna została następnie skalibrowana, dostosowując parametry ekspozycji do wymagań normy EN-17636. Skonfigurowano ustawienia urządzenia tak, aby generowały obrazy o wysokiej jakości odpowiadającej klasie jakości W18.

Kolejnym krokiem było sprawdzenie wytrzymałości lutowin. Założono, że wytrzymałość lutowin zależy m.in. od składu chemicznego lutu, dlatego na etapie badań wstępnych zostały przeanalizowane uzyskane wytrzymałości w połączeniu z zastosowaną modyfikacją lutu danymi pierwiastkami. Sprawdzone, czy wytrzymałość złącza wykonanego przy użyciu nowo opracowanego lutu jest wyższa niż tradycyjnych lutów stosowanych w produkcji alternatorów. Niektóre metody produkcji mogą wpływać na właściwości badanego materiału. W związku z tym właściwości lutu określone w testach wytrzymałościowych przed produkcją mogą nie odzwierciedlać zachowania i właściwości wytrzymałościowych złącza pod koniec produkcji, stąd w pracy przeanalizowano wytrzymałość złączy a nie materiału w postaci lutu. Złącze charakteryzuje się specyficzną budową, a podczas badania występuje w nim złożony stan naprężeń, zachodzi współpraca

między materiałem podłoża a lutownią, więc jego wytrzymałość będzie zależała od stosunkowo wielu czynników, np. zwilżalności, adhezji, mikrostruktury i jest to złożony system.

Ze względu na brak wytycznych ASTM dotyczących badania wytrzymałości złączy lutowniczych o bardzo małych przekrojach (średnica łączonych drutów wynosi 1,5 mm), zdecydowano się na przeprowadzenie testu w oparciu o wytyczne ASME Section 198 IX: Welding, luting & fusing qualifications dla połączeń lutowanych, jako połączeń najbardziej zbliżonych do stosowanych w alternatorach. Podejście jest zgodne z danymi literaturowymi [125]. Każda próba rozciągania polegała na stopniowym rozciągnięciu złącza, aż do pęknięcia materiału. Test ma charakter poglądowy i wskazuje, czy badane złącze charakteryzuje się zwiększoną wytrzymałością w stosunku do innych złączy testowanych w tych samych warunkach oraz czy złącze wykonane z nowo opracowanego lutu wykazuje taką samą wytrzymałość dla wszystkich próbek. Test został przeprowadzony przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369.

Jako kolejne badanie przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską lutowni przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego elektronowego SEM Zeiss Supra 35. Analizy składu chemicznego w oczyszczonych alkoholem mikroobszarach zgładów wykonano przy użyciu detektora EDX (Thermo Scientific™, detektor EDX: Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) z oprogramowaniem Pathfinder (ther-mofisher.com)

Celem badania była ogólna, zgrubna obserwacja złącza (próbki nietrawione) oraz potwierdzenie składu chemicznego lutowni.

Zaplanowane badania rozpoznawcze umożliwiają wstępną ocenę jakości złączy lutowanych, wykrycie wad powierzchniowych i wewnętrznych, wybór odpowiednich parametrów procesu lutowania oraz dokonanie wstępnej analizy porównawczej złączy wykonanych dotychczas stosowanych lutów ze złączami otrzymanymi z nowo opracowanych materiałów pod kątem wytrzymałościowym. Wyniki badań dają podstawę do selekcji wybranych materiałów pod kątem ich aplikacji w alternatorach samochodowych. Odrzucenie złączy nieprawidłowych jest istotne niezbędne dla zapewnienia niezawodności i jakości alternatorów samochodowych. Przeprowadzanie badań rozpoznawczych stanowi pierwszy krok w utrzymaniu wysokiego standardu regeneracji alternatorów i minimalizacji ryzyka awarii w trakcie eksploatacji pojazdów samochodowych.

4.2. Przygotowanie próbek do badań rozpoznawczych

W części rozpoznawczej zostaną wykonane próbki i testy pozwalające ustalić najlepsze właściwości złączy lutowanych, z eksperymentalnie dobranych i wykonanych lutów wieloskładnikowych.

W związku z tym, że w alternatorach lutuje się części miedziane, postanowiono zająć się procesem lutowania tych części różnymi lutami wykonanymi laboratoryjnie w tym lutami wykonanymi wg autorskiej koncepcji.

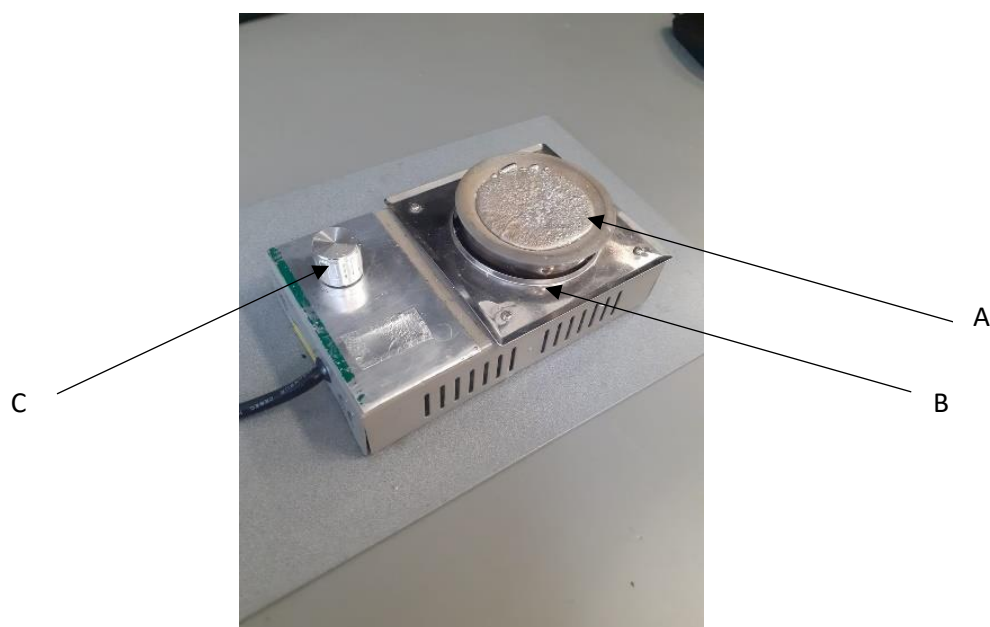
Postanowiono przeanalizować różne luty na bazie cyny zawierające Pb, Ag, Cu, Al. Stosowano luty zawierające tylko jeden składnik stopowy, jak i różne kombinacje pierwiastków stopowych. Każdy z dodatków stopowych ma wpływ na temperaturę topienia lutu i na właściwości mechaniczne złącza, gdyż mogą wydzielać się fazy międzymetaliczne, które umacniają złącze lutowane [123]. W związku z tym, że obecna jest faza międzymetaliczna Cu_6Sn_5 na wykresie równowagowym Sn-Cu oraz w związku z tym, że obecna jest faza międzymetaliczna Ag_3Sn na wykresie równowagowym Sn-Ag postanowiono zadbać o to, by składnikami stopowymi cynowego lutu były Cu i Ag. Z drugiej strony postanowiono dodawać Pb, który obniża temperaturę topienia lutu ze względu na tworzenie niskotemperaturowych eutektyk [124]. Równocześnie postanowiono znacznie obniżyć zawartość Pb do niezbędnego minimum ze względów środowiskowych. Dodatek Al ma za zadanie ograniczać rozrost ziarn fazy Cu_6Sn_5 . Koncepcje lutów do badań w rozprawie zestawiono w tablicy 2.

Tabl. 2. Koncepcja lutów zastosowanych w badaniach

Symbol próbki	Skład chemiczny lutu
Zen-S	100% Sn
Zen-0	Sn - 5% Pb
Zen-1	Sn - 1% Ag
Zen-2	Sn - 2% Ag
Zen-3	Sn - 2% Ag - 2% Pb
Zen-4	Sn - 0,5% Cu
Zen-5	Sn - 0,7% Cu
Zen-6	Sn - 0,7% Cu - 0,7% Al
Zen-7	Sn - 3% Pb - 0,7% Cu
Zen-8	Sn - 5% Ag - 1% Cu
Zen-9	Sn - 2% Ag - 0,8% Al
Zen-10	Sn - 2% Ag - 3% Pb - 0,7% Cu
Zen-11	Sn - 2% Ag - 3% Pb - 0,7% Cu - 0,4% Al

Luty zostały wykonane w warunkach laboratoryjnych zgodnie z koncepcją materiałowo-technologiczną autora rozprawy.

Do wykonania próbek zastosowano 12 ceramicznych tygli lutowniczych (tabl. 2). Tygle lutownicze nazywane są również wannami do lutowania zanurzeniowego. Ich zastosowanie jest bardzo różnorodne, jednak zazwyczaj wykorzystuje się ich funkcje do lutowania i cynowania elementów elektrycznych. Tygiel jest naczyniem, w którym następuje topienie metalu lutowego, w tym przypadku odpowiednie stopy cyny (tabl. 2). Tygiel jest wykonany z materiału, odpornego na wysokie temperatury i nie reaguje z lutowanymi metalami (rys.35).



Rys. 35. Tygiel lutowniczy z roztopioną lutowiną [opracowanie własne]

Tygiel lutowniczy składa się z kilku podstawowych elementów (rys. 35):

- Naczynie (A). Najczęściej wykonane ze stali nierdzewnej, miedzi lub żeliwa, z powłoką antykorozyjną odporną na działanie stopionego lutu i wysoką temperaturę.
- Element grzejny (B). Wbudowany w podstawę lub ścianki tygla, odpowiada za równomierne podgrzewanie metalu do temperatury topnienia. Może być elektryczny (rezystancyjny) lub gazowy.
- Regulator temperatury (C). Pozwala precyzyjnie kontrolować temperaturę stopu, co jest kluczowe dla uniknięcia przegrzania lub degradacji materiału.

Najczęściej stosowane są tygle ceramiczne lub grafitowe.

Odpowiednie laski ze stopu cyny (spoiwo lutownicze) zostały wyprodukowane zgodnie z wymaganiami normy ISO EN 945. Laski o wymiarach 350 mm × 7 mm × 7 mm, zostały umieszczone w tyglu (rys. 36) i podgrzane do temp 380° C (wg norm IPC610), która spowodowała ich przetopienie.



Rys. 36. Laski stopów cyny do rozpuszczenia w tyglach i wannach lutowniczych
[opracowanie własne]

Laski stopów cyny zostały przygotowane przez współpracującą firmę specjalizującą się w produkcji lutów cynowych do różnego rodzaju zastosowań połączeń elektrycznych stosowanych w przemyśle.

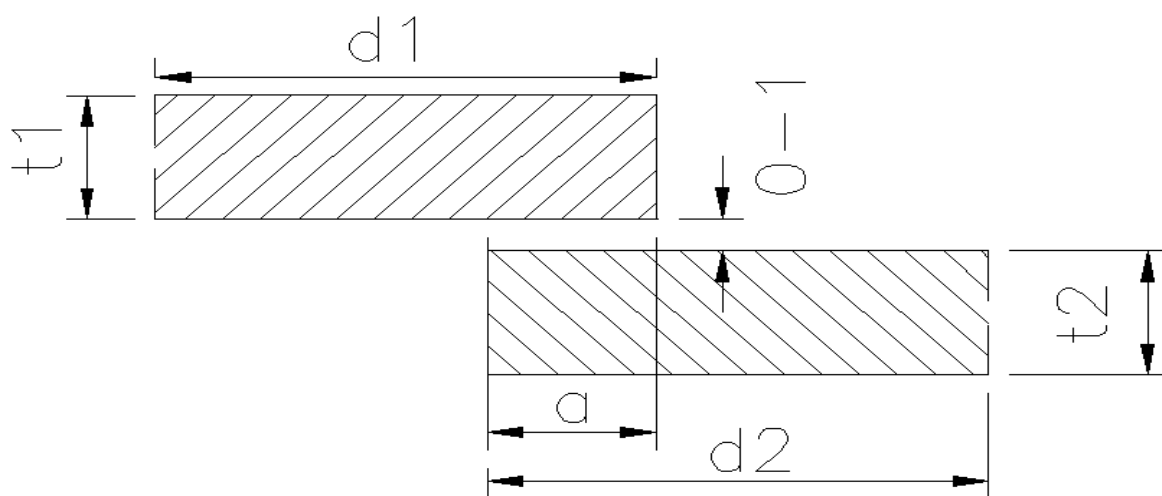
Proces topienia był kontrolowany na wyświetlaczu części podgrzewającej tygiel HAK FX301B i dodatkowo przy pomocy pirometru temperaturowego o symbolu IRThermometr 8889 (rys.37), aby uzyskać płynną masę lutu.



Rys. 37. Pirometr temperaturowy o symbolu IRThermometr [opracowanie własne]

Po stopieniu lutu, zostały zanurzone próbki do badań. Próbki miały postać drutów miedzianych o przekroju $\Phi 1,5$ mm (próbki do badań wytrzymałości na rozciągania oraz VT) oraz płaskowniki miedziane o wymiarach 45 mm × 15 mm × 1 mm (miedź elektrolityczna o wysokiej przewodności elektrycznej M1E (nr 2.0065 Werkstoff) (Próbki

do badań skaningowych). Sposób wykonania próbek z płaskowników przedstawia rys.38. Po takim przygotowaniu uzyskano pobielone próbki do dalszych badań (rys.39).

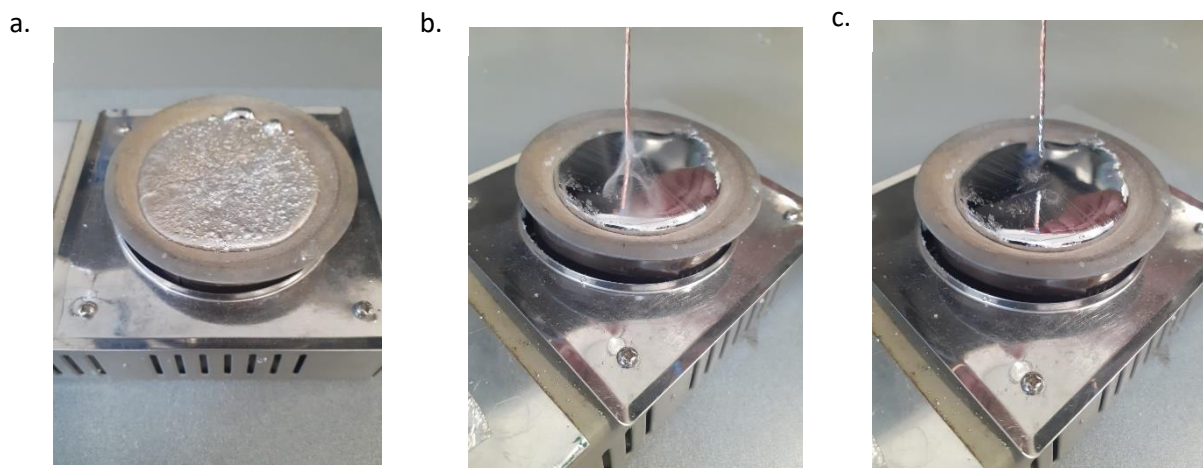


$t_1, t_2 = 15 \text{ mm}$

$d_1, d_2 = 45 \text{ mm}$

$a = 15 \text{ mm}$

Rys. 38. Przygotowanie próbek blach miedzianych

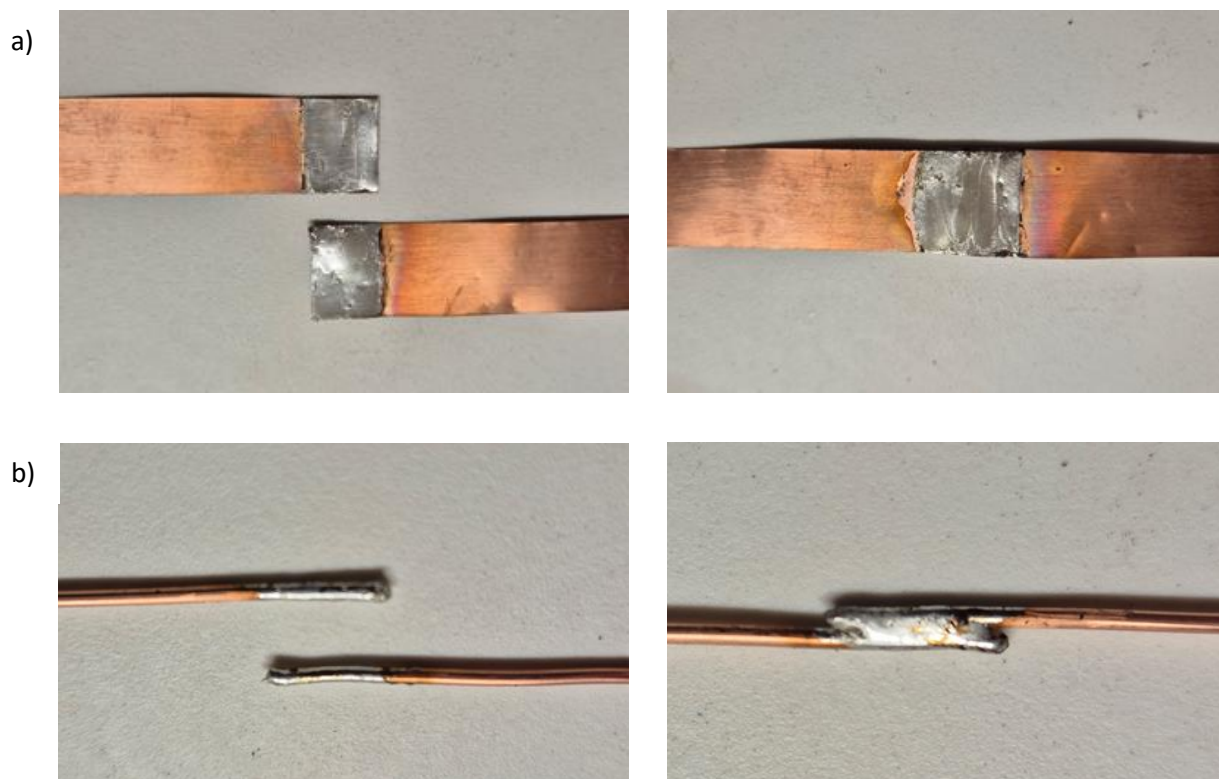


Rys. 39. Przykładowy proces pobielania próbki drutu. Przygotowanie próbki do badań:

a) roztopienie lutownicy, b) zanurzenie drutu, c) pobielona próbka [opracowanie własne]

Analogicznie jak druty pobielono próbki miedziane o kształcie płaskownika.

Pobielone odpowiednim lutem próbki miedziane o kształcie płaskowników (rys. 40a) przeznaczonych do badań skaningowych oraz drutów (rys. 40b) (przeznaczonych do badań wytrzymałości na rozciąganie i VT), połączono grotem lutownicy rozgrzanym do temperatury (odpowiednio dla każdej próbki) 290° C, 380° C, oraz 415° C w celu ustalenia odpowiedniego parametru temperatury grota do dalszych badań [123, 124].



Rys. 40. Pobielone w tyglu i połączone próbki o kształcie: a) płaskowników, b) drutów

[opracowanie własne]

Do lutownicy CD-2BQF firmy JBC podłączono grot lutowniczy w kształcie dłuta $2,4 \times 0,6$ mm firmy JBC (rys. 41). Istotnym elementem jest bardzo dobre rozgrzanie końcówki łączonych elementów, umieszczonych w imadle z jednej strony oraz uchwycie szczypiec bocznych z drugiej. Czas lutowania wynosił od 3 do 7 sekund aż rozgrzane do odpowiedniej temperatury luty uzyskały stan ciekły. Lutowanie przebiegło prawidłowo, przed pobieleniem materiał został oczyszczony. Trwałość połączenia nie wynika bowiem jedynie z przyklejenia lutu (cyny) do powierzchni miedzi. Podczas lutowania końcówek elementów rozgrzany grot lutownicy przyłożono do końcówek elementów (płaskowników) czekając aż lutowie połączy elementy.



Rys. 41. Lutownica i grot firmy JBC [opracowanie własne]

Po wykonaniu każdej próbki, grot został oczyszczony mechanicznie czyścikiem drucianym do grotów firmy JBC (rys.42), który wcześniej mechanicznie oczyszczono z zanieczyszczeń powierzchnie elementów lutowanych.



Rys. 42. Czyścik do grotów firmy JBC [opracowanie własne]

4.3. Badania wizualne VT

Badania wizualne makroskopowe to metoda oceny materiałów, komponentów lub złączy za pomocą obserwacji okiem nieuzbrojonym lub przy użyciu narzędzi powiększających o niskiej rozdzielczości, takich jak lupa. Ten rodzaj badań koncentruje się na ogólnych, widocznych cechach próbki, takich jak wady powierzchniowe, deformacje czy nieciągłości. Jest to jedna z pierwszych metod kontroli jakości stosowana w procesach technologicznych i produkcji [38].

Główne cechy wizualnej oceny makroskopowej połączeń lutowanych:

1. Ciągłość połączenia:
 - Badanie wizualne ciągłości połączenia pozwala ocenić, czy połączenie jest jednolite, czy lut został równomiernie rozprowadzony na powierzchni łączonych elementów. Należy sprawdzić, czy nie ma przerw, pustek ani miejsc, gdzie lut nie przyłgął do materiału bazowego.
2. Wygląd powierzchni połączenia:
 - Lut powinien być gładki, błyszczący i jednorodny. Matowy lub nierówny wygląd może wskazywać na wady procesu lutowania, takie jak przegrzanie, utlenianie, czy nieprawidłowe rozprowadzenie topnika.
3. Obecność nadmiaru lub niedoboru lutowia:
 - Nadmiar lutowia może wskazywać na błędy w procesie lutowania, takie jak zbyt duża ilość lutowia zastosowanego w złączu, co może prowadzić do osłabienia połączenia. Z kolei niedobór lutowia może skutkować słabym połączeniem i łatwym uszkodzeniem w przyszłości.
4. Wady powierzchniowe:
 - Można wykryć takie wady jak porowatość, pęcherze powietrza, mikropęknięcia, wżery lub inne nieciągłości powierzchniowe, które mogą wpływać na wytrzymałość mechaniczną złącza. Pęcherze powietrza lub pory w lutowiu mogą świadczyć o zanieczyszczeniach, niewłaściwym topniku lub zbyt szybkim stygnięciu połączenia.
5. Kształt i rozmiar lutowanego złącza:
 - Złącze powinno mieć odpowiedni kształt, bez ostrych krawędzi lub zbyt dużych wybrzuszeń. Zbyt duża lub zbyt mała ilość lutowia może wpłynąć na wytrzymałość i funkcjonalność połączenia.
6. Odpowiedni przetop:
 - Badanie pozwala ocenić, czy materiał bazowy został odpowiednio przetopiony z lutowiem, co świadczy o dobrej przyczepności i wytrzymałości połączenia. W przypadku zbyt małego przetopu istnieje ryzyko słabego połączenia, co może prowadzić do jego awarii.

Badania makroskopowe połączeń lutowanych są zazwyczaj pierwszym etapem kontroli jakości połączeń. Podczas obserwacji można zaobserwować wady połączeń lutowanych, które mogłyby doprowadzić do słabej jakości regeneracji alternatora samochodowego i dużego wskaźnika reklamacji [38].

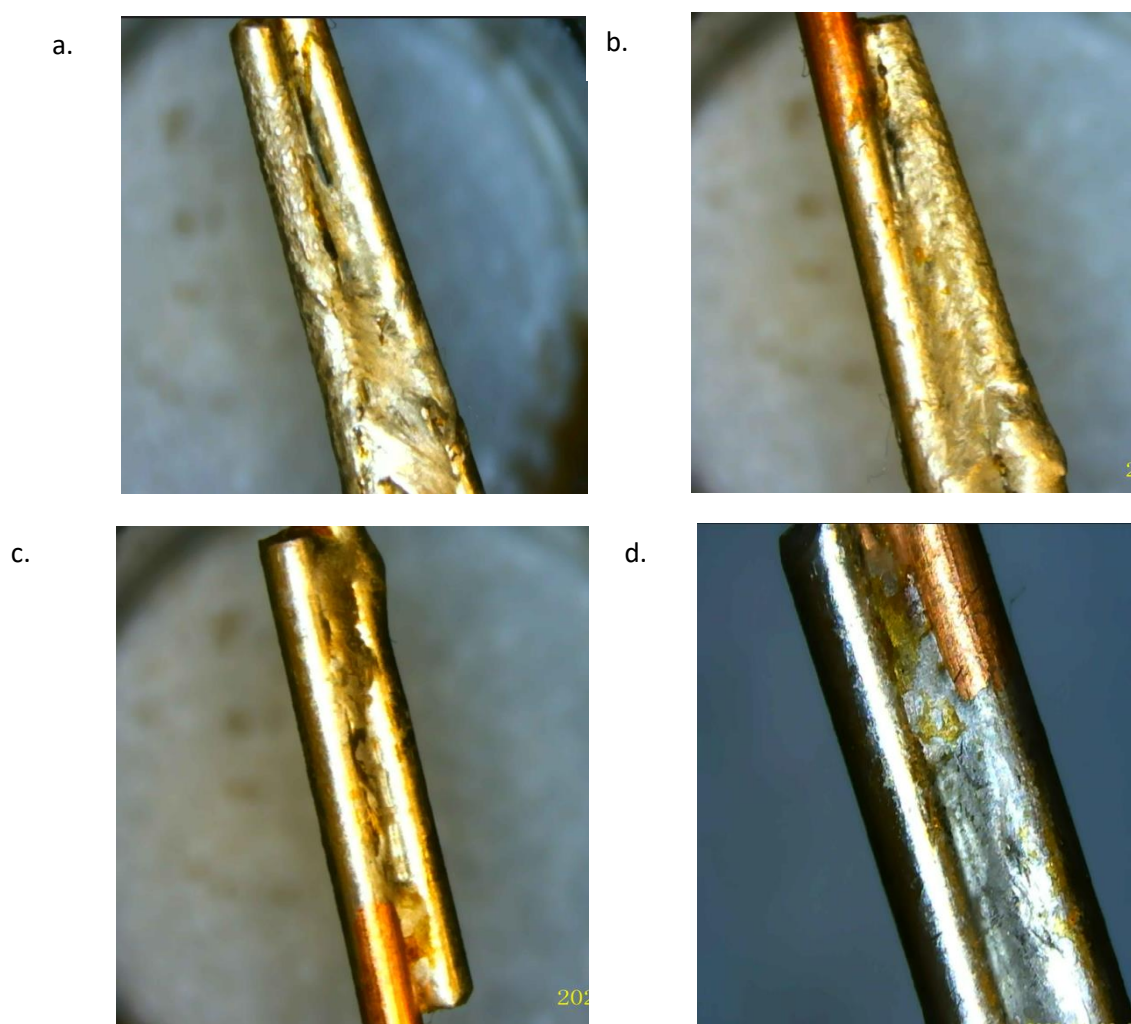
Typowe wady połączeń lutowanych widoczne w badaniach makroskopowych:

- brak przyłgnięcia lutowia.
Widoczna separacja lutowia od materiału bazowego, co wskazuje na słabe lub nieprawidłowe połączenie.
- pęknięcia.
Mogą pojawić się zarówno na powierzchni połączenia, jak i w jego wnętrzu, wskazując na niewłaściwe parametry lutowania lub niską odporność na obciążenia mechaniczne.
- nadmierne nagromadzenie topnika.
Pozostałości topnika, które nie zostały usunięte, mogą wpływać na jakość połączenia i powodować korozję.
- zabrudzenia i wtrącenia.
Cząstki brudu, tlenków lub innych zanieczyszczeń mogą zmniejszać wytrzymałość mechaniczną i odporność na korozję połączenia.
- przegrzanie.
Może prowadzić do degradacji materiału, nadmiernego odkształcenia połączenia oraz osłabienia jego wytrzymałości.
- porowatość.
Obecność pustek gazowych lub ciał obcych w lutowiu, które mogą osłabić wytrzymałość mechaniczną i przewodność połączenia.

Po przygotowaniu próbek odpowiadających parametrom materiałów wykorzystywanych w alternatorach (opisanych w rozdz. 4.2), przeprowadzono badania wizualne w celu oceny jakości złącza lutowanego.

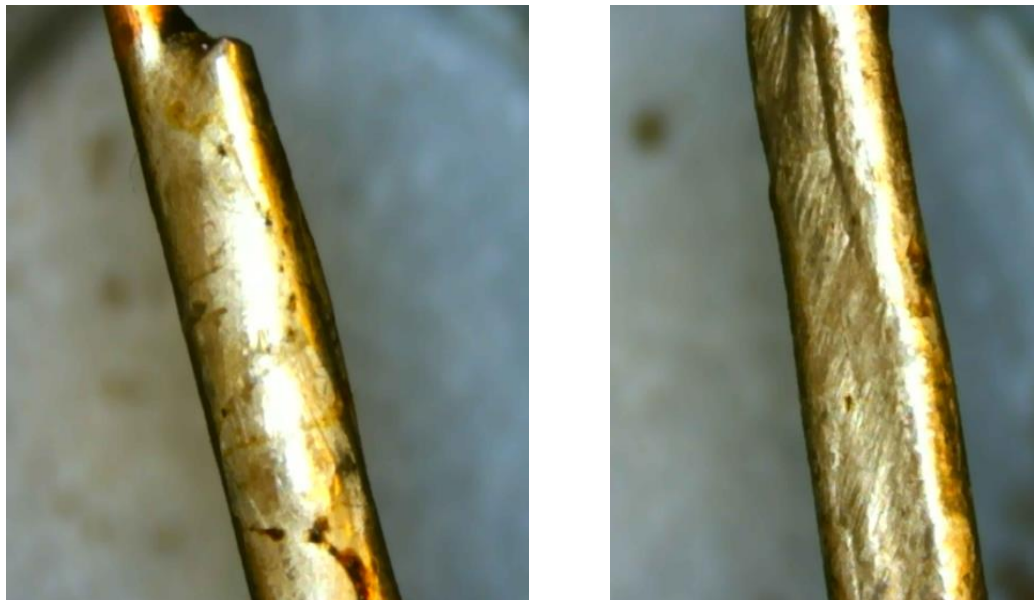
4.3.1. Wyniki badań wizualnych makroskopowych

Po procesie lutowania wykonano badania nieniszczące. Połączenia lutowane oceniano metodą wizualną (wg normy PN-EN 12799:2003+A1:2005) polegającą na ocenie czy w złączu nastąpiło całkowite wypełnienie szczeliny lutem i uzyskanie ciągłego menisku lutowego wewnątrz i na zewnątrz złącza oraz wykrywalności niezgodności powierzchniowych tj. porowatość, brak zwilżenia czy pęknięcia (rys.43a-d). Wyniki badań makroskopowych zostały udokumentowane w postaci fotografii, przykładowe rezultaty przedstawiono na rys. 43 - 45.

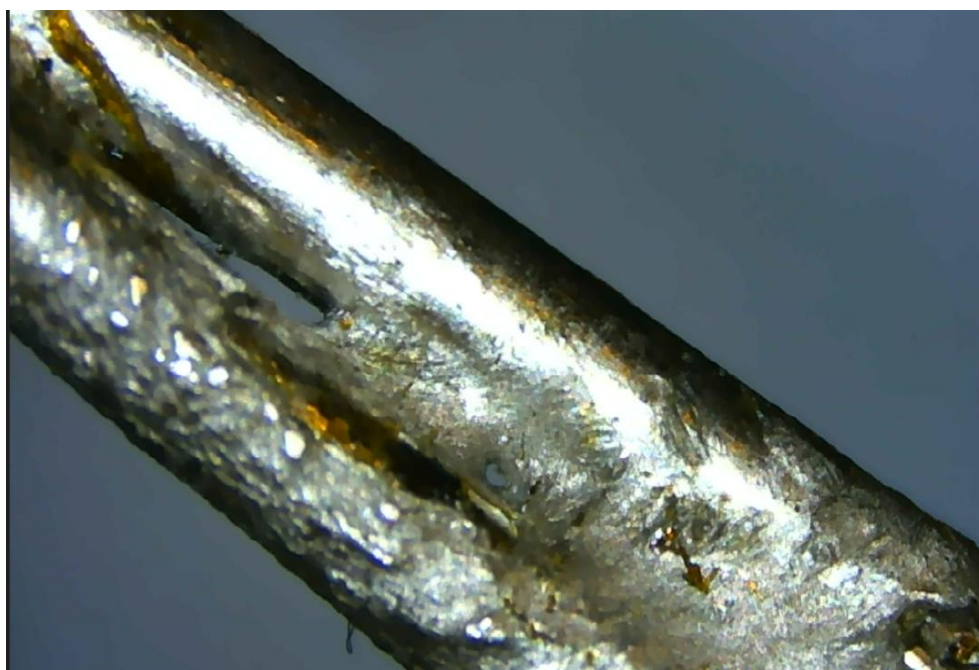


Rys. 43. Ocena połączeń lutowanych: a) porowatość, pęknięcia (Zen-2); przebarwienia, brak wypełnienia (Zen-1); c) nierówność wypełnienia, brak menisku (Zen-6); d) brak zwilżalności, zimny lut (Zen-5) [opracowanie własne]

Przykładowo na rysunku 44 przedstawiono prawidłowo wykonane złącze lutowane lutem Zen-11, a na rys. 45 złącze lutowane Zen-2 wykonane przy takich parametrach lutowania ale zawierające wiele nieprawidłowości (porowatość, brak wypełnienia)



Rys. 44. Złącze lutowane, poprawnie wykonane (lutem Zen-11)
[opracowanie własne]



Rys. 45. Złącze lutowane, wykonane nieprawidłowo (lutem Zen-2) przy temp grota 290 °C i czasie styku 7s. [opracowanie własne]

Ważnym celem badań nieniszczących było dobranie parametrów procesu spajania w celu uzyskania połączeń bez wad i niezgodności lutowniczych, które często objawiają się w postaci tzw. zimnego lutu (zjawisko to polega na częściowym przetopieniu lutowia), pęknięć, rys itp. Szczegółową analizę uzyskanych wyników przedstawiono w kolejnym podrozdziale rozprawy. Ze względu na oszczędności energetyczne postanowiono zoptymalizować warunki technologiczne lutowania zmieniając dwa najważniejsze parametry: czas styku i temperatura grota lutownicy. Zakresy temperatury procesu lutowania i czasu styku grota na połączenie lutowane oszacowano na podstawie analizy literatury [123], natomiast wyniki badań nieniszczących pozwoliły dobrać parametry najbardziej optymalne, pozwalające uzyskać połączenia bez wad i niezgodności lutowniczych.

4.3.2. Analiza wyników badań wizualnych i ustalenie parametrów procesu lutowania

Połączenie na rysunku 44, przedstawia lutowane przewody miedziane (elementy alternatora), który można ocenić jako dobrze wykonane (poprawne parametry procesu lutowania (tablica 3). Lut jest równomiernie rozprowadzony po całej powierzchni styku przewodów, co wskazuje na dobrą mechaniczną stabilność połączenia.

Dobra penetracja lutu oznacza, że lut wniknął w strukturę przewodów, wypełniając przestrzeń między nimi, co sugeruje dobre połączenie elektryczne.

Połączenie nie ma widocznych nadmiarów lutu, co oznacza, że zastosowano odpowiednią jego ilość.

Lut wnika w powierzchnię przewodów miedzianych, co jest oznaką dobrej zwilżalności. Sugeruje to, że lut prawidłowo rozpuścił powierzchniowe tlenki na miedzi, co zapewniło solidne połączenie zarówno pod kątem mechanicznym, jak i elektrycznym.

Połączenie lutowane ma odpowiednią ilość lutu – nie jest nadmiernie wypukłe, ani nie ma jego niedoboru. Nadmiar lutu, który mógłby prowadzić do powstawania tzw. mostków lutowniczych, mógłby być problematyczny, ale tutaj tego nie widać.

Miedź na przewodach wokół połączenia nie wykazuje oznak przegrzania (np. zmiana koloru na ciemnobrązowy lub fioletowy), co wskazuje, że lutowanie było wykonane w kontrolowanej temperaturze.

Na rysunku 45 przedstawiono połączenie lutowane dwóch drutów miedzianych Zen-2 (elementy alternatora) wykonane niewłaściwie dobranymi parametrami (temp. grotu 290 °C, czas styku 7 s, Tablica 3), które wykazuje wiele oznak nieprawidłowości, można je opisać jako wynik nieprawidłowo przeprowadzonego procesu lutowania.

Lut ma wyraźnie nierówną, porowatą powierzchnię, co jest typowym objawem zimnej spoiny. Zimna spoina występuje, gdy lut nie został prawidłowo stopiony lub ochłodził się zbyt szybko przed przylegnięciem do powierzchni. Nierówności i porowatość mogą również wskazywać na obecność zanieczyszczeń, które nie zostały usunięte przed lutowaniem. To może wynikać z braku dokładnego oczyszczenia miedzi przed lutowaniem lub z nieprawidłowo zastosowanego topnika. Zanieczyszczenia mogą znacząco wpłynąć na jakość lutowania, ograniczając przewodność elektryczną oraz powodując słabszą adhezję lutu.

Na zdjęciu widać, że lut nie wniknął w powierzchnię przewodów w sposób równomierny, co sugeruje problemy z przyczepnością. Może to wynikać z braku pełnego zwilżenia, co w konsekwencji prowadzi do słabego połączenia.

Lut wydaje się być nieregularnie stopiony, co sugeruje niewłaściwą kontrolę temperatury podczas lutowania. Widoczne są oznaki zarówno przegrzania (ciemniejsze miejsca wokół przewodów), jak i niedogrzenia (chropowata powierzchnia).

Ze względu na nierówną strukturę, brak jednolitego przylegania lutu do przewodów oraz nadmiar materiału, to połączenie prawdopodobnie nie jest wystarczająco trwałe mechanicznie. Przy nawet niewielkich drganiach lub naprężeniach może dojść do rozluźnienia lub pęknięcia połączenia.

Na podstawie powyższych badań, w większości analizowanych przypadków prawidłowe złącze uzyskano przy następujących parametrach procesu lutowania:

- czas lutowania ~ 5 s;
- temperatura grota ~ 380° C.

Podsumowanie wyników badań przedstawiono w tabl. 3.

Tabl. 3. Wyniki badań nieniszczących połączeń występujących w regenerowanym alternatorze

Symbol próbki	Temperatura grota [°C]; Czas styku lutowanych elementów [s]; uwagi	Temperatura grota [°C]; Czas styku lutowanych elementów [s]; uwagi	Temperatura grota [°C]; Czas styku lutowanych elementów [s]; uwagi
Zen-S	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Przebarwienia złącza	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-0	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Przebarwienia złącza	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-1	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Przebarwienia złącza	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-2	380, 5 Rysy i pęknięcia w złączu	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Zimny lut, porowatości, nierówna powierzchnia
Zen-3	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-4	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-5	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Zimny lut
Zen-6	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Mikro porowatości Poprawny lut
Zen-7	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Prawidłowe złącze

c.d. Tabl.3

Zen-8	380, 5 Porowatości, Nieprawidłowe złącze	415, 3 Niewielkie przebarwienia. Prawidłowe złącze	290, 7 Brak przetopu
Zen-9	380, 5 Niewielki wyciek przetopu lutowiny	415, 3 Wyciek przetopu lutowiny	290, 7 Poprawny lut
Zen-10	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Prawidłowe złącze
Zen-11	380, 5 Prawidłowe złącze	415, 3 Prawidłowe złącze	290, 7 Prawidłowe złącze

Analiza wyników przedstawionych w rozdziale pozwala stwierdzić, że:

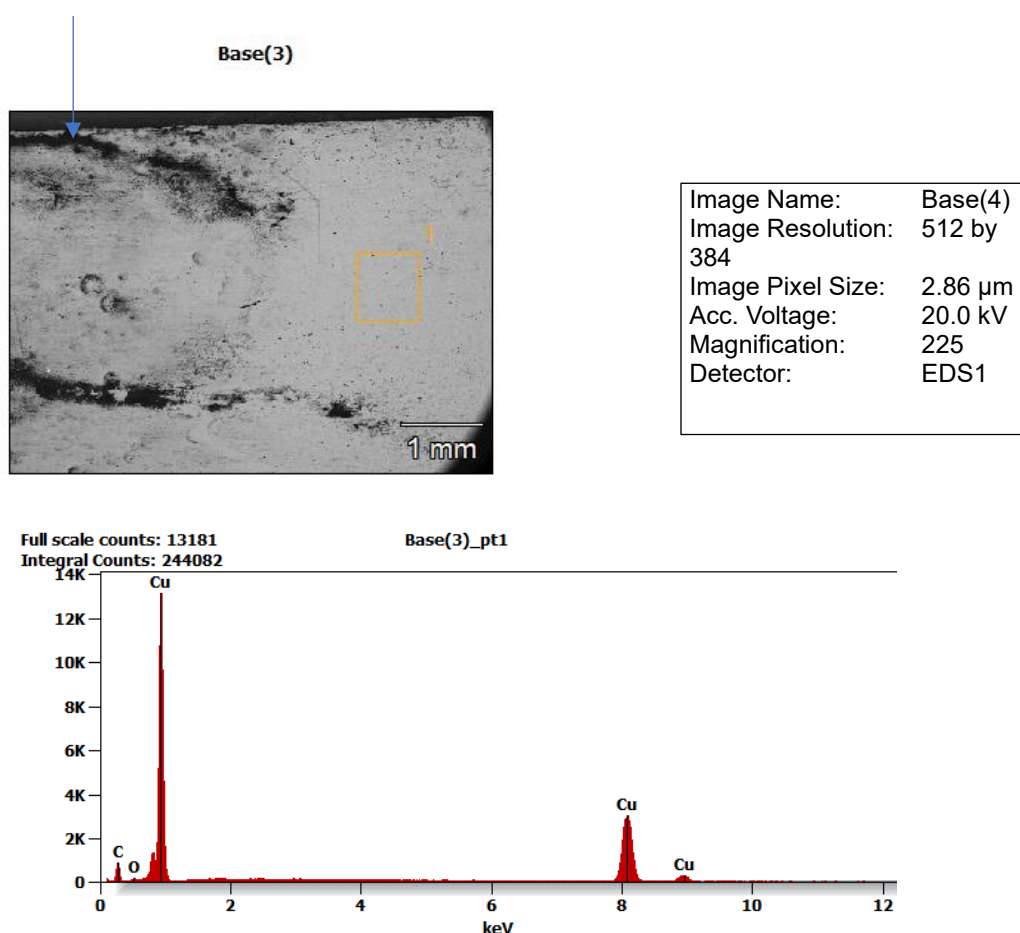
- wykonanie poprawnych połączeń lutowanych, dla większości lutów jest możliwe przy zastosowaniu odpowiednich parametrów lutowania - temp grota 380 °C oraz czas styku lutowanych elementów 5s.,
- przy zastosowaniu wyższej temperatury grota (415 °C) na niektórych lutowanych (Zen-S, Zen-0, Zen-1, Zen-2, Zen-8, Zen-9) złączach pojawiały niezgodności w postaci przebarwień, pęcherzyków powietrza, porowatości czy przetopu lutowiny,
- przy zastosowaniu obniżonej temperatury grota (290 °C) lutowane złącza (Zen-2, Zen-6 oraz Zen-8) oznaczały się niezgodnościami takimi jak: zimny lut, porowatości, nierówna powierzchnia, brak przetopu,
- zakładane parametry lutowania (380 °C) nie sprawdziły się dla materiału Zen-2, w przypadku tej próbki wszystkie połączenia wykazywały niezgodności lutownicze,
- analiza informacji zawartych w tablicy 3 pozwoliła ustalić parametry procesu lutowania.

4.4. Mikroanaliza rentgenowska składu chemicznego lutowin – wyniki i analiza

W pierwszej części badań rozpoznawczych postanowiono sprawdzić poprawność wykonanych próbek głównie przy pomocy badań wizualnych (VT). Następnie przy pomocy mikroskopu skaningowego zbadano próbki w celu zweryfikowania składu chemicznego lutowiny. Do badań mikroskopii skaningowej wytypowano wszystkie próbki o kształcie płaskowników, które uzyskały pozytywne rezultaty badań VT oraz materiał rodzimy.

Na rysunku 46 przedstawiono materiał rodzimy (Cu), oczyszczony miejscowo dla przeprowadzenia analizy składu chemicznego.

Materiał nieoczyszczony, z wyraźnymi śladami zabrudzeń

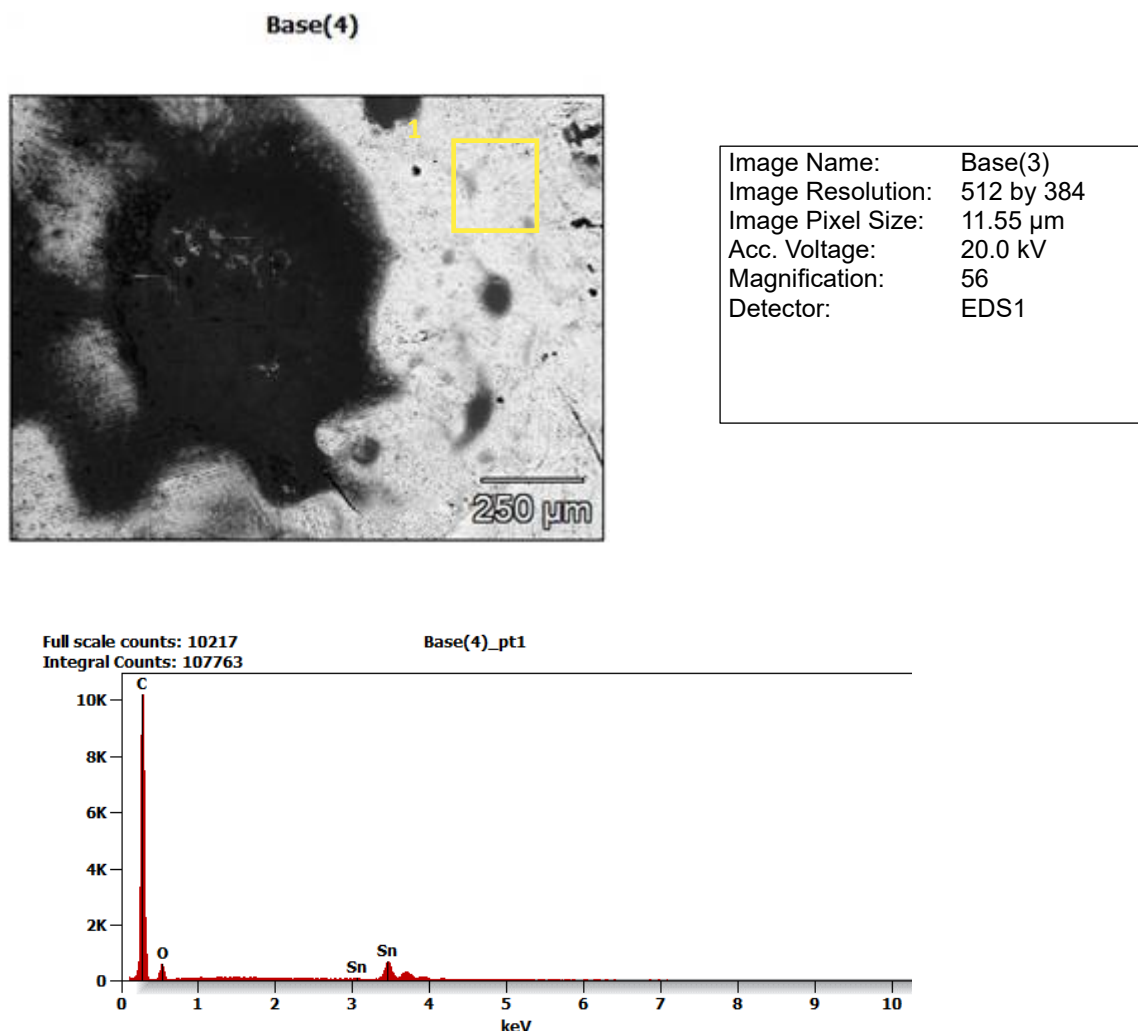


Rys. 46. Mikrostruktura i EDS blach miedzianych przeznaczonych do lutowania

Z analizy rysunku 46 wynika, że przeznaczone do badań blachy są wykonane z miedzi, a nie z jej stopu. Wynik jest zgodny z oczekiwaniami. Blachy stanowiły materiał rodzimy do wykonania złączy lutowanych.

Jako pierwsze złącze przetestowano połączenie uzyskane przy zastosowaniu lutu z cyną (Zen-S) (rys. 47).

Analiza składu chemicznego złącza wskazuje na zawartość w głównej mierze Sn. W dalszej części badań poddano próbki złączy lutowanych zawierające cynę oraz różne dodatki stopowe.



Rys. 47. Złącze lutowane wykonane z użyciem czystej cyny

Obserwacja wyników badań przedstawionych na rysunku 47 potwierdza, że lutowina jest wykonana poprawnie. Zastosowano cynę bez dodatków stopowych (Zen-S). W dalszej kolejności sprawdzano złącza wykonane z lutem na osnowie Sn z zawartością ołowiu na poziomie 5% (Zen-0). Zawartość 5% Pb w stopie gwarantuje niską zawartość stopu eutektycznego, gdyż maksymalna rozpuszczalność ołowiu wynosi 2,5%.

Na rysunku 48 przedstawiono miedziane przykładowe złącze wykonane lutem Sn-5% Pb (Zen-0) obserwowane pod mikroskopem skaningowym.

Base(1)

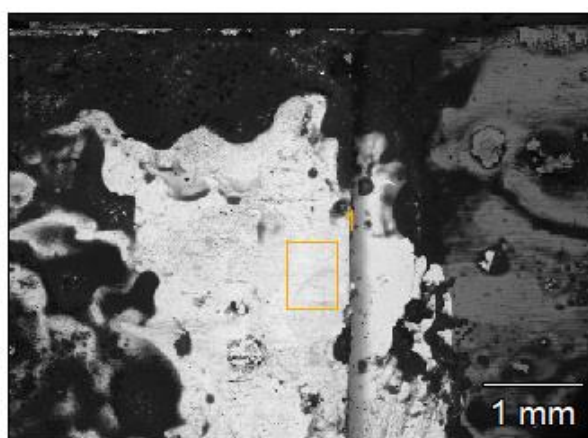
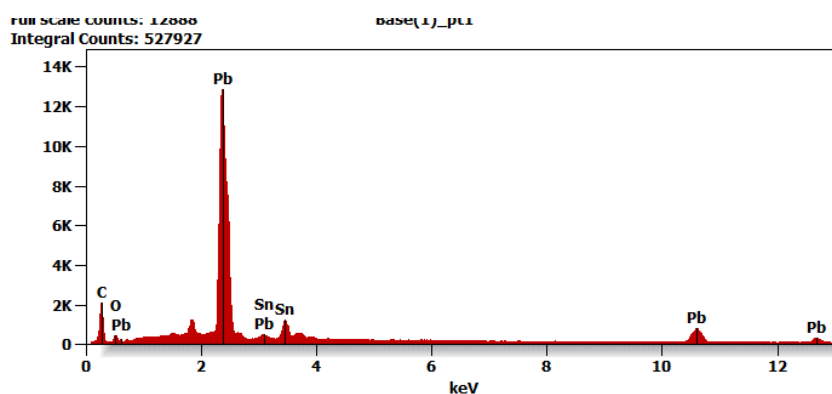


Image Name:	Base(1)
Image Resolution:	512 by 384
Image Pixel Size:	11.55 μm
Acc. Voltage:	20.0 kV
Magnification:	56
Detector:	EDS1



Rys. 48. Lutowanie blach miedzianych za pomocą lutu Sn-5% Pb

Z analizy rysunku 48 wynika, że złącze zostało wykonane poprawnie i została potwierdzona zawartość cyny i ołowiu w lutowiu. Następnie wykonano złącza miedziane z wykorzystaniem lutu zawierającego cynę i różną zawartość miedzi (0,5% Cu, 0,7% Cu). Przykładowe złącze zawierające Sn-0,5% Cu (Zen-4) przedstawiono na rysunku 49.

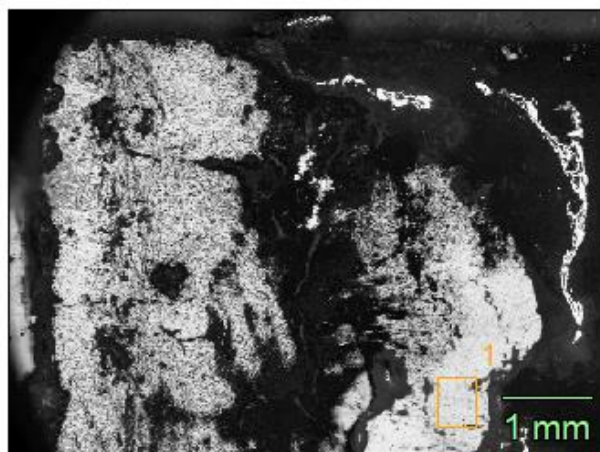
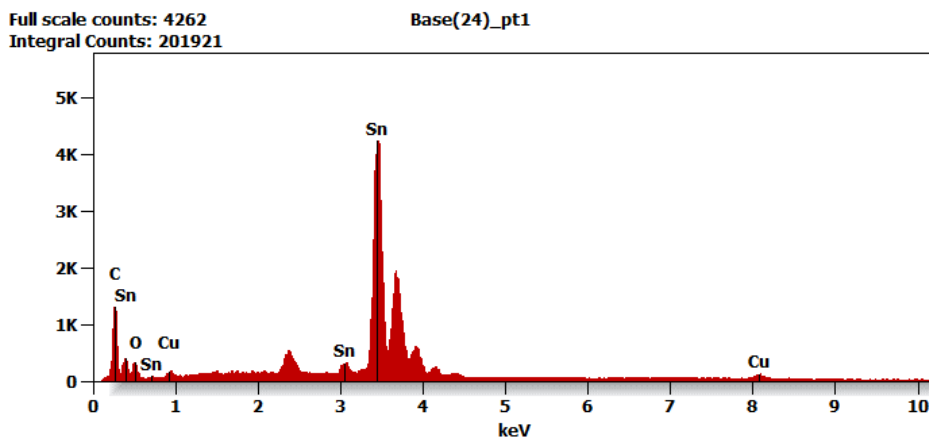


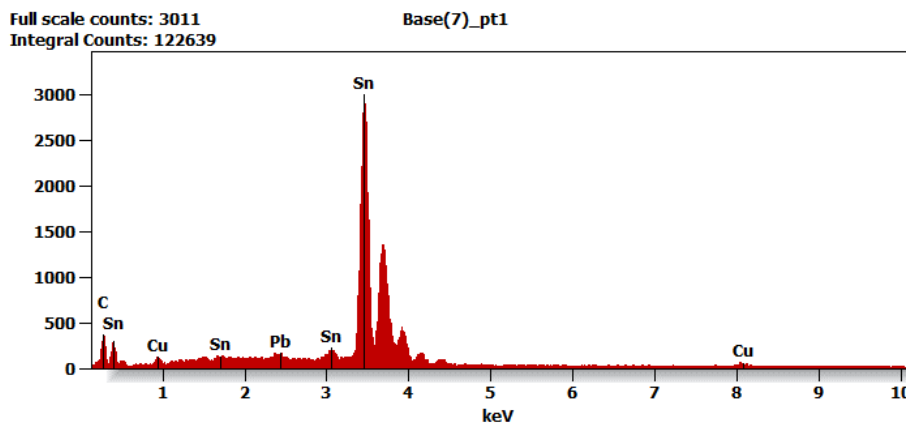
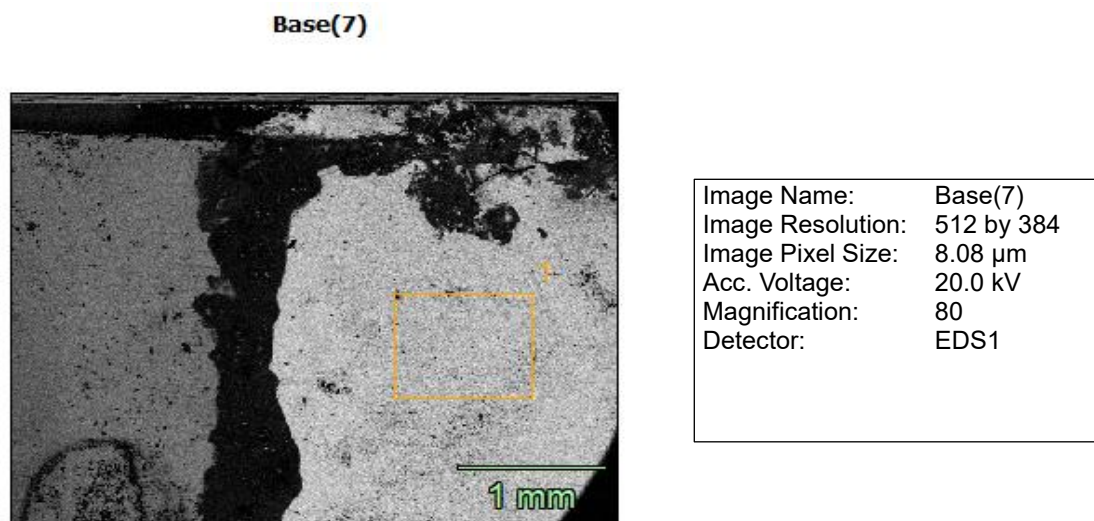
Image Name:	Base(24)
Image Resolution:	512 by 384
Image Pixel Size:	12.93 μm
Acc. Voltage:	20.0 kV
Magnification:	50
Detector:	EDS1



Rys. 49. Analiza składu chemicznego lutownicy Sn-0,5% Cu

Uzyskane wyniki potwierdziły, że złącze zostało wykonane poprawnie. Analizując skład chemiczny (rys. 49) potwierdzono zawartość cyny i miedzi w lutowninie.

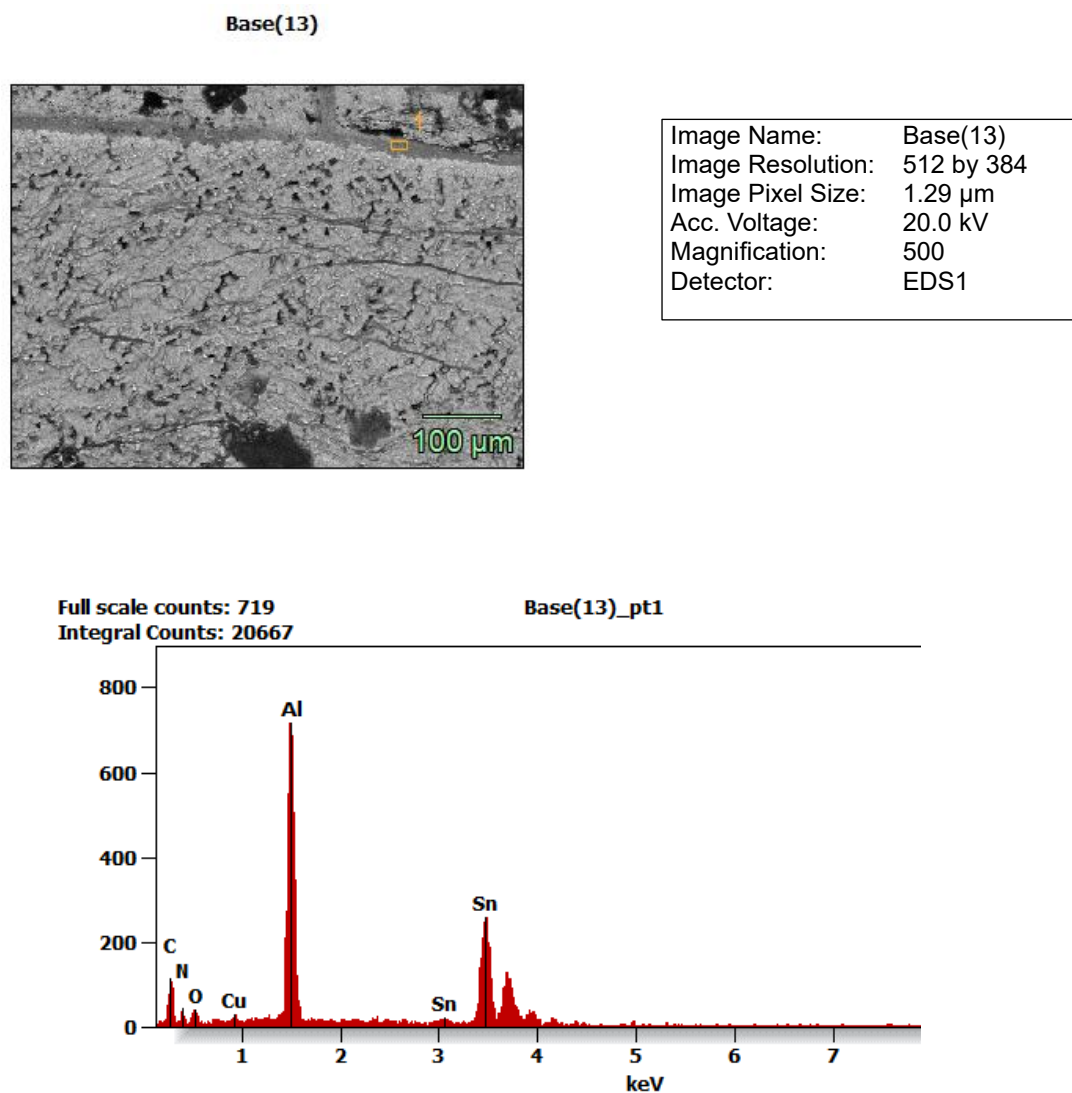
Następnie wykonano złącza miedziane z wykorzystaniem lutu zawierającego Sn-3%Pb-0,7%Cu (Zen-7), rys.50.



Rys. 50. Złącze lutowane wykonane z wykorzystaniem lutu Sn-3% Pb-0,7% Cu

Z widma przedstawionego na rysunku 50 można odczytać, że skład chemiczny lutownicy zawiera Sn, Pb i Cu.

Następnie wykonano złącze (rys.51) z lutem zawierającym Sn-0,7%Cu-0,7%Al (Zen-6).



Rys. 51. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-0,7% Cu-0,7% Al

Z obserwacji rysunku 51 wynika, że złącze zostało wykonane prawidłowo i dobrane parametry lutownicy potwierdzają, że w składzie chemicznym występują: Sn, Cu i Al.

Następnie wykonano złącze z lutem zawierającym Sn-2%Ag-2%Pb (Zen-3). Wyniki obserwacji przedstawiono na rysunku 52.

Base(18)

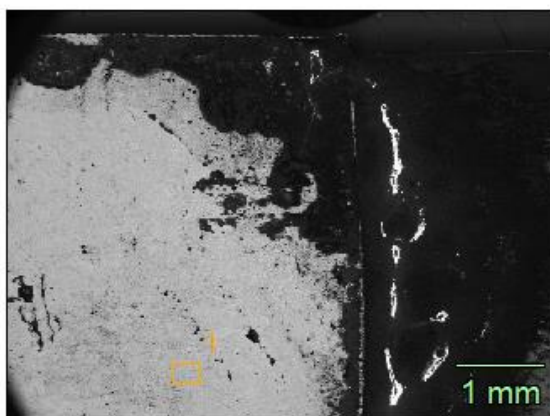
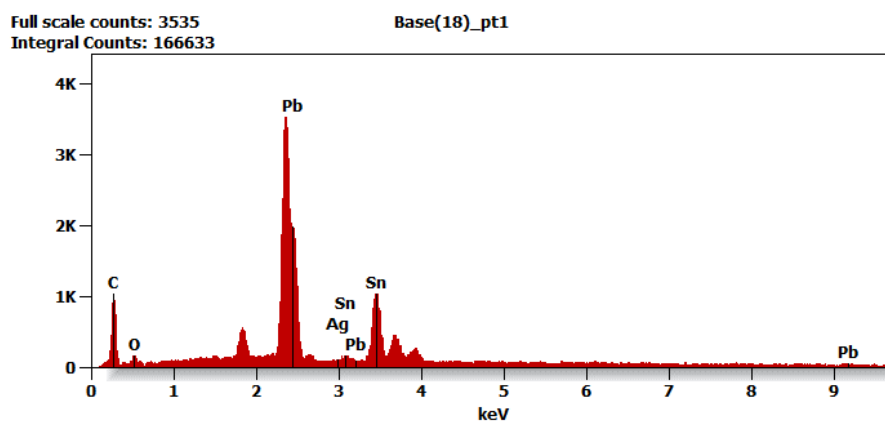


Image Name:	Base(18)
Image Resolution:	512 by 384
Image Pixel Size:	12.20 μm
Acc. Voltage:	20.0 kV
Magnification:	53
Detector:	EDS1



Rys. 52. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-2%Ag-2%Pb

Analizując rysunek 52 stwierdzono, że złącze zostało wykonane prawidłowo, został potwierdzony skład chemiczny lutownicy zawierający Sn, Pb, Ag.

Następnie wykonano złącze z lutem zawierającym Sn-2%Ag-3%Pb-0,7% Cu (Zen-10, rys 53).

Base(21)

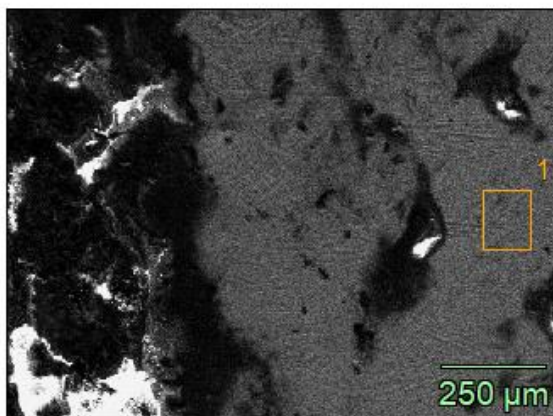
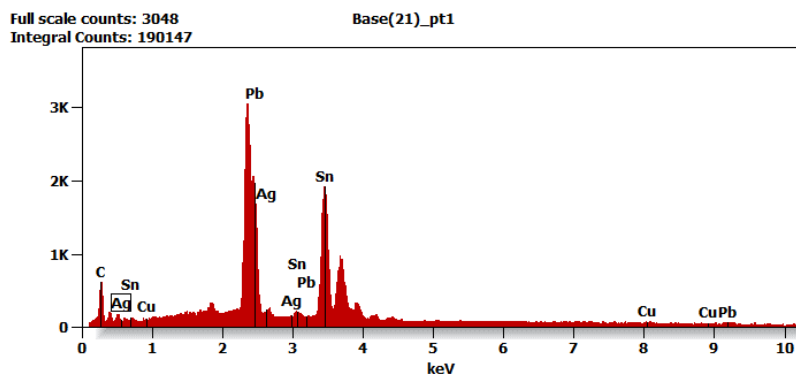


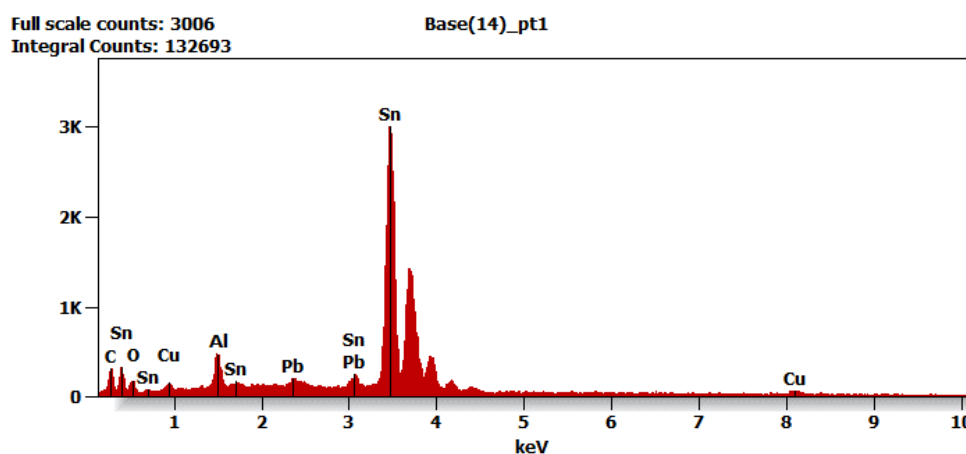
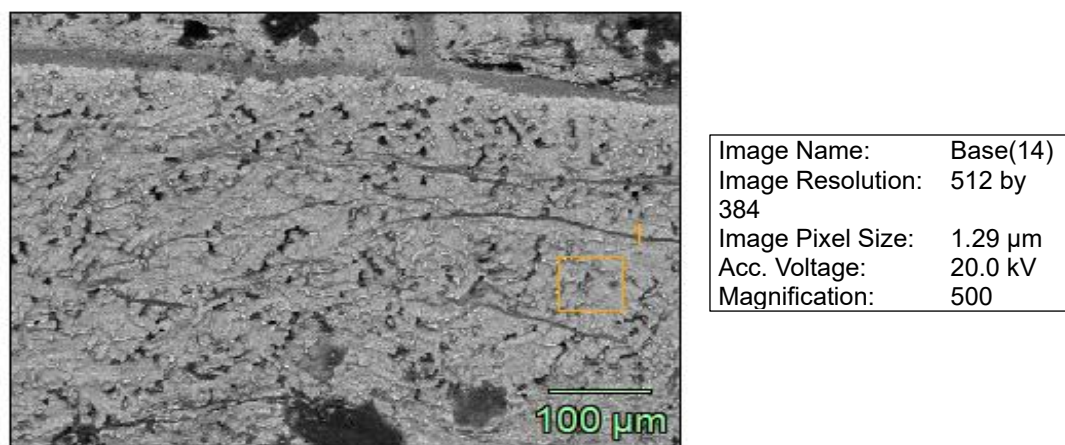
Image Name:	Base(21)
Image Resolution:	512 by 384
Image Pixel Size:	2.59 μm
Acc. Voltage:	20.0 kV
Magnification:	250
Detector:	EDS1



Rys. 53. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu

Z analizy rysunku 53 wynika, że złącze zostało wykonane prawidłowo, został potwierdzony skład chemiczny lutownicy Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu (Zen-10).

Miedziane złącze lutowane z innowacyjnym lutem (autorska propozycja) zawierającym Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al (Zen-11), obserwowane pod mikroskopem skaningowym przedstawiono na rysunku 54.



Rys. 54. Złącze wykonano z zastosowaniem innowacyjnego lutu Sn-2%Ag-3% Pb-0,7% Cu-0,4%Al (autorskie rozwiązanie)

Z obserwacji widma dyfrakcji (rys. 54) wynika, że złącze z wykorzystaniem autorskiego rozwiązania zostało wykonane prawidłowo. W składzie potwierdzono występowanie Sn, Ag, Pb, Cu oraz Al (Zen-11).

Analiza wyników przedstawionych w rozdziale pozwala stwierdzić, że:

- ze wszystkich badanych lutów można wykonać połączenia lutowane, przy dobranych parametrach lutowania,
- lutowiny charakteryzują się składem chemicznym zgodnym ze składem chemicznym użytego lutu w procesie spajania, zatem skład chemiczny lutu użytego w procesie produkcji będzie determinował właściwości użytkowe lutowiny,
- dyfuzja pierwiastków z materiału podłoża jest najprawdopodobniej na poziomie niewykrywalnym dla tego typu badania, stąd w składach chemicznych lutowin niezawierających miedzi, występowania miedzi nie stwierdzono.

4.5. Doraźna wytrzymałość na rozciąganie złączy lutowanych

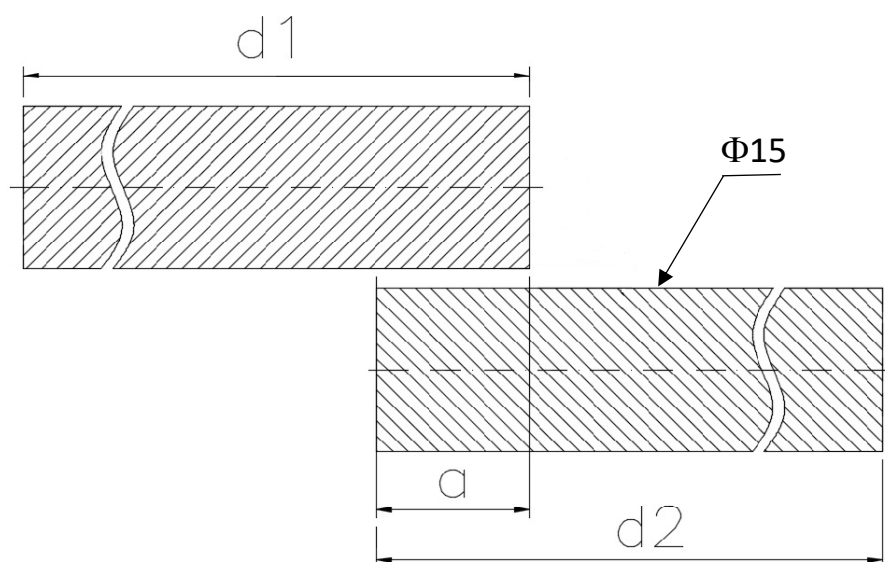
Badanie ma na celu określenie, jaką wytrzymałość na rozciąganie mają złącza lutowane dwóch drutów miedzianych (elementy alternatora) o średnicy 1,5 mm, połączonych ze sobą na odcinku 15 mm lutownią o składzie chemicznym zgodnie z tabl. 2. Wyniki te są istotne dla oceny jakości lutowania i jego potencjalnego zastosowania w regeneracji alternatorów.

Po ocenie złączy badaniami nieniszczącymi oraz z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej postanowiono wykonać badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie lutowanych elementów. Wytrzymałość wykonanych połączeń przetestowana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 (rys. 55).



Rys. 55. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 3369, na której wykonano badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie polutowanych elementów [opracowanie własne]

Do badań wykorzystano próbki mające postać pobielonych drutów miedzianych (skład chemiczny lutów był zgodny z tabl. 2). Przebadano wszystkie rodzaje połączeń lutowanych, aby określić zależność pomiędzy rejestrowaną wytrzymałością a składem chemicznym stosowanych lutów. Dla większości wykonanych złączy zastosowano dobrane parametry lutowania, dla złączy Zen-2, Zen-8 (podniesiono temp. lutowania do 415° C) co wynikało z rezultatów badań przedstawionych w rozdziale 4.3. Sposób przygotowania próbek do wykonania złączy lutowanych przedstawiono na poniższym schemacie (rys. 56).



$d1, d2 = 1000 \text{ mm}$

$a = 15 \text{ mm}$

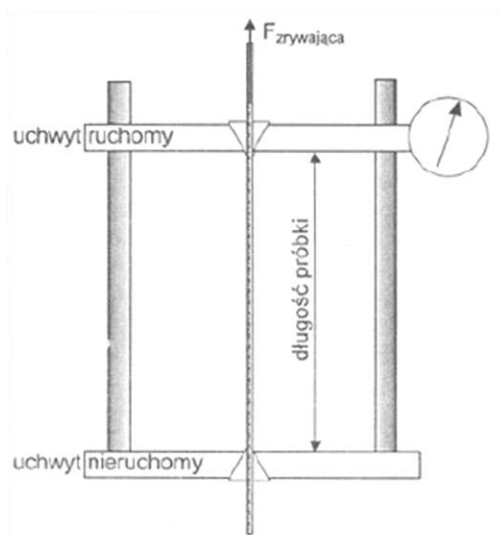
Rys. 56. Wymiary próbek do wykonania złączy lutowanych.

Pobielone (zwilżone stopem cyny) próbki miedziane o kształcie drutów o przekroju 1,5 mm, połączone grottem lutownicy rozgrzanym do możliwie najniższej odpowiedniej temperatury i dobranym czasem styku (tabl. 3 w rozdziale 4.3), zapewniającym wytworzenie poprawnego złącza. Grot był w kształcie dłuta $2,4 \times 0,6 \text{ mm}$ firmy JBC. Szczegółowe parametry lutowania i przygotowania próbek do badań opisano w rozdziale 3.1. Końcówki próbek umieszczono w imadle z jednej strony oraz uchwycie szczypiec bocznych z drugiej strony. Lutowanie przebiegło prawidłowo, gdyż pobielone próbki były czyste i niezaśniedziałe. Podczas lutowania końcówek drutów miedzianych, rozgrzany grot lutownicy przyłożono do końcówek elementów czekając aż lutowie połączy elementy.

Każda próba polegała na stopniowym obciążeniu złącza lutowanego, aż do osiągnięcia maksymalnej siły rozciągającej. Wyniki zostały zarejestrowane i przedstawione w formie wartości wytrzymałości na rozciąganie wyrażonej w MPa (N/mm^2), zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 4.1 na stanowisku zaprezentowanym w rozdziale 4.5.

4.5.1. Przygotowanie stanowiska do badań

Każda próba badania wytrzymałości na rozciąganie polegała na stopniowym zwiększaniu obciążenia, aż do momentu zerwania złącza. Próba wykonana została przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369 wg schemat znajdującego się na rysunku 57.



Rys. 57. Schemat umieszczenia próbki w maszynie wytrzymałościowej [25]

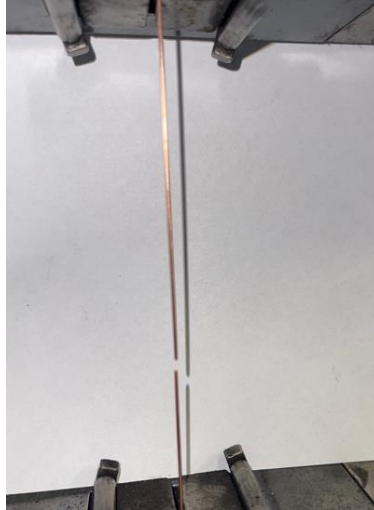
4.5.2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie złączy lutowanych

Na początku zbadano wytrzymałość drutu miedzianego, który został użyty do połączeń lutowanych wykorzystywanych w kolejnych próbach. W badaniu zmierzono średnicę drutu. Narzędziem pomiarowym był mikrometr o dokładności 0,01 mm (rys. 58).



Rys. 58. Pomiar próbki mikrometrem [opracowanie własne]

Kolejną czynnością było zamontowanie drutu w uchwytach maszyny wytrzymałościowej INSTRON 3369, która po uruchomieniu stopniowo zwiększa naprężenia rozciągające w próbce (rys. 59).



Rys. 59. Badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie drutu miedzianego (Zen-S)
[opracowanie własne]

W trakcie trwania pomiaru rejestrowano wartość siły oraz maksymalna wartość odpowiadająca sile zrywającej. Dzięki zmierzonym wartościom (średnicy oraz maksymalnej sile rozciągającej) można obliczyć wytrzymałość próbki na rozciąganie R_m .

Wyniki badań i obliczenia wytrzymałości na rozciąganie drutu z miedzi:

Średnica drutu: $d = 1,52 \text{ mm}$
Siła zrywająca: $F = 441,75 \text{ N}$

Obliczenie wytrzymałości na rozciąganie R_m wykonano wg wzorów 6 i 7.

$$R_m = \frac{F}{A} \quad (6)$$

gdzie:

F – siła

A - przekrój

$$r = \frac{d}{2} = \frac{1,52}{2} = 0,76 \text{ mm} = 0,00076 \text{ m} \quad (7)$$

$$A = \pi r^2 = 1,813 \times 10^{-6}$$

$$R_m = \frac{441,75}{1,813 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 243,6 \text{ [MPa]}$$

Otrzymany wynik porównano do danych tablicowych (tabl.4) z dostępnych źródeł [35], z których wynika że maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wynosi 240 MPa.

Tabl. 4. Fragment tabeli przedstawiającej właściwości wytrzymałościowe niektórych metali [na podstawie 35]

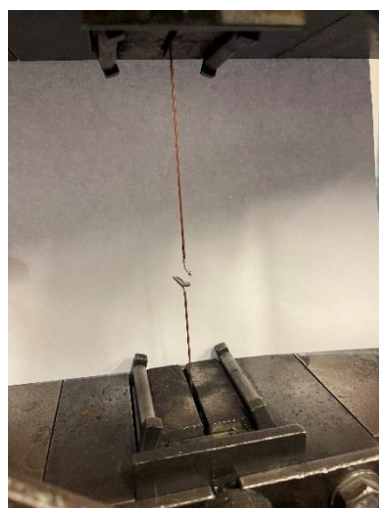
Materiał lub oznaczenie (wg PN)	Skład chemiczny (orientacyjnie) %	Wytrzymałość na rozciąganie (R_m) MPa
Glin	Al	40
Miedź	Cu	210
Cynk (walcowany)	Zn	150
Cyna	Sn	30
Ołów	Pb	15
Nikiel	Ni	450
Mosiądz	60 Cu, 40 Zn	340

Przebieg badań został udokumentowany. Na rysunkach 60-65 pokazano przykładowe próby rozciągania złączy, oraz widok próbek po zerwaniu (Zen-0 do Zen-11), wyniki badań zestawiono w tabl. 5.

Na rysunku 60 przedstawiono kolejne etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych na przykładzie lutu Sn-0,7% Cu-0,7% Al (próbka Zen-6, tabl. 2).



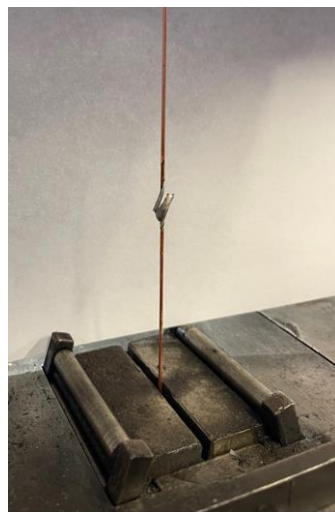
a.



b.

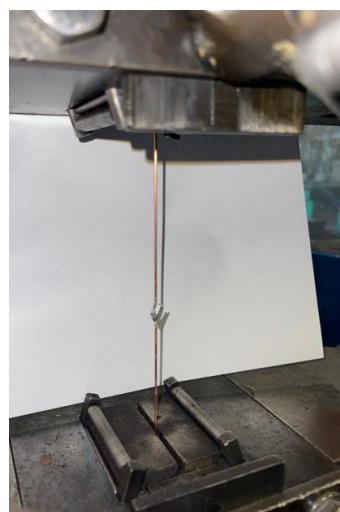
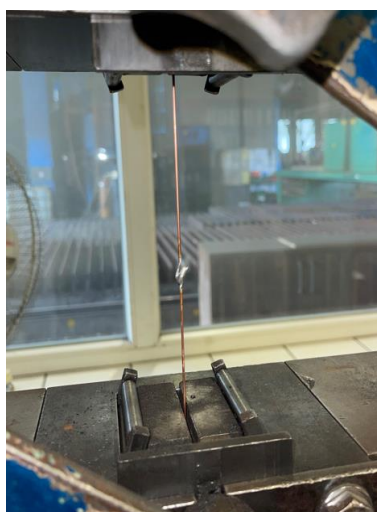
Rys. 60. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-6 a) umocowanie próbki w maszynie wytrzymałościowej, b) wykonanie próby statycznego rozciągania [opracowanie własne]

Na rysunku 61 przedstawiono kolejne etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych na przykładzie lutu Sn-3%Pb-0,7%Cu (próbka Zen-7, tabl.2).



Rys. 61. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-7 [opracowanie własne]

Na rysunku 62 przedstawiono etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych na przykładzie lutu Sn-5%Ag-1%Cu (próbka Zen-8, tabl. 2)



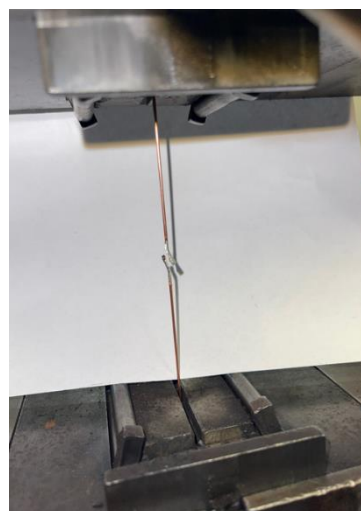
Rys. 62. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-8 [opracowanie własne]

Na rysunku 63 zaprezentowano, w odpowiedniej kolejności, etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych na przykładzie lutu Sn-2%Ag-0,8%Al (próbka Zen-9, tabl. 2).



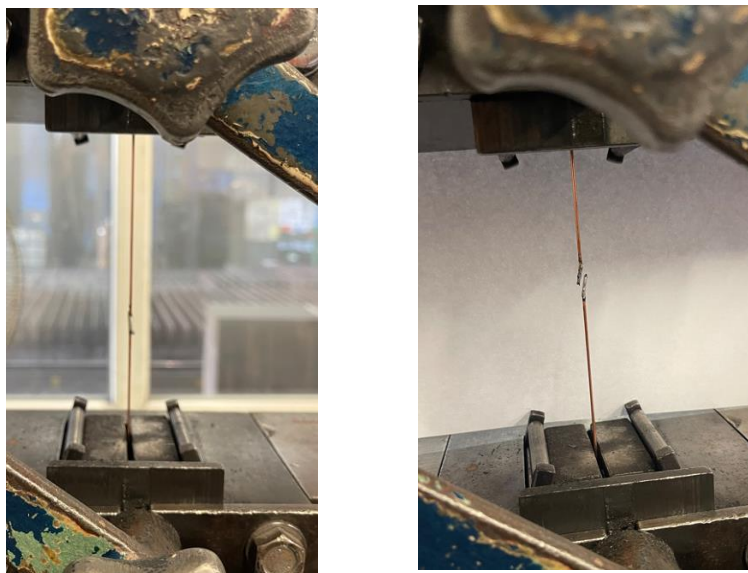
Rys. 63. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-9 [opracowanie własne]

Na rysunku 64 przedstawiono, na poprawnie wykonanych połączeniach, etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych na przykładzie lutu Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu (próbka Zen-10, tabl. 2).



Rys. 64. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-10 [opracowanie własne]

Na rysunku 65 zaprezentowano, etapy procesu rozciągania próbek złączy lutowanych, na poprawnie wykonanych, na przykładzie lutu Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al (próbka Zen-11, tabl. 2).



Rys. 65. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-11 [opracowanie własne]

Wyniki z przeprowadzonych badań doraźnej wytrzymałości złączy na rozciąganie zamieszczono w tabeli 5.

Tabl. 5. Wytrzymałość na rozciąganie złączy lutowanych

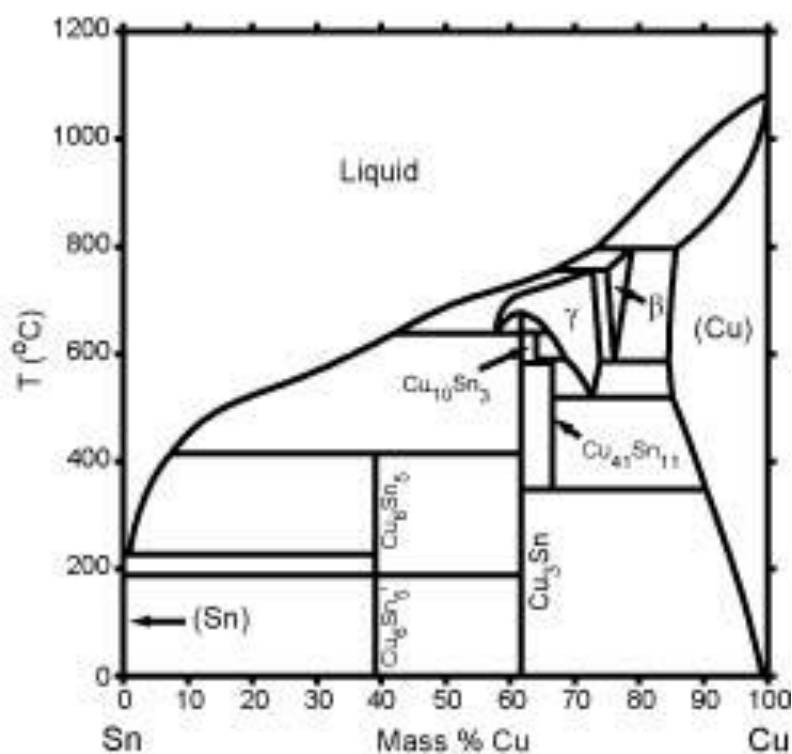
Symbol próbki	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Zen-S	20
Zen-0	30
Zen-1	52
Zen-2	60
Zen-3	53
Zen-4	58
Zen-5	59
Zen-6	63
Zen-7	66
Zen-8	72
Zen-9	73
Zen-10	81
Zen-11	91

Wstępna analiza wyników (tabl. 5) wskazuje, że najlepszą wytrzymałością charakteryzuje się próbka oznaczona Zen-11. Szczegółowa analizę w powiązaniu ze składem chemicznym lutownicy przeprowadzono w kolejnym podrozdziale.

4.5.3. Analiza wyników badań doraźnej wytrzymałości złączy na rozciąganie

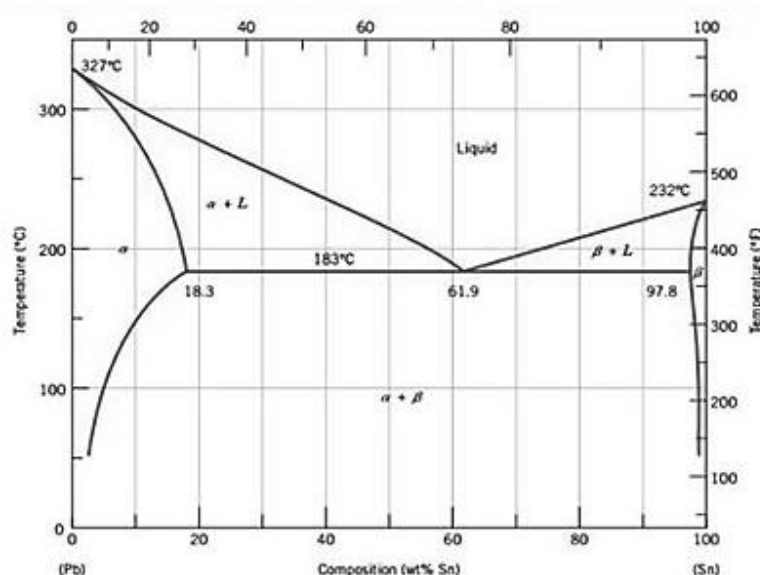
Z analizy informacji zawartych w tablicy 5 wynika, że kolejno dodawane dodatki stopowe podnoszą wytrzymałość złącza na rozciąganie. Dla celów porównawczych wytrzymałość na rozciąganie cyny wynosi 20 MPa (Zen-S), a ołowiu najpopularniejszego dodatku stopowego wynosi zaledwie 17 MPa. Dodanie ołowiu do lutu cynowego nie spowodowało znacząco zwiększenia wytrzymałości lutownicy (Zen-0). Dowodzi to że luty cynowo ołowiowe nie mają wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i są niezalecane ze względów środowiskowych. Ołów poprawia własności plastyczne złącza lutowanego na bazie cyny i równocześnie obniża temperaturę topienia lutu, gdyż zwiększanie zawartości ołowiu do ok. 37% dąży do punktu eutektycznego (rys. 20 rozdział 2 rozprawy). Dodatek ołowiu nie przekłada się na uzyskanie dużej wytrzymałości na rozciąganie i dodatkowo jest toksyczny i niezalecany przez dyrektywy europejskie (RoHS) do stosowania na szeroką skalę [55].

Analiza wykresu równowagowego Sn-Cu pozwala zauważyć, że zastosowanie miedzi w lutach cynowych może być bardzo korzystne, ale tylko w pewnym zakresie stężeniowym. Dodatek Cu sprzyja wydzielaniu się fazy Cu_6Sn_5 stanowiącej produkt przemiany perytektycznej ($\text{L} + \text{Cu}_{10}\text{Sn}_3 \rightarrow \text{Cu}_6\text{Sn}_5$) (rys.66). Zgodnie z informacjami literaturowymi, drobna faza Cu_6Sn_5 może powodować wzrost wytrzymałości na zerwanie połączenia lutowego, ale tylko w początkowym zakresie stężeniowym Cu. Przykładowo złącze wykonane lutami Zen-5 i Zen-6 (0,7% Cu) posiada lepszą wytrzymałość na rozciąganie niż złącze oznaczone symbolem Zen-4 (0,5% Cu), które posiada wytrzymałość wynoszącą 58 MPa. Zgodnie z analizą diagramu oraz informacjami literaturowymi [125], dalsze dodawanie Cu do lutu sprzyja nadmiernemu rozrostowi fazy intermetalicznej, co niekorzystnie wpływa na własności wytrzymałościowe złączy.



Nadmierna obecność twardej i kruchej fazy intermetalicznej Cu_6Sn_5 może prowadzić do pęknięć lutownicy w warunkach eksploatacyjnych. Inny powód ograniczenia stosowania miedzi w stopie Sn-Cu to podnoszenie temperatury topienia materiału. Przykładowo przy stężeniu 20% Cu temperatura topienia wynosi ponad 500 °C (rys.66).

Podobnie z wykresu równowagowego Sn-Pb można znaleźć najkorzystniejsze proporcje pomiędzy zawartością ołowiu i cyny. W starszych zastosowaniach „Old-fashioned solders” stosowano zawartości ołowiu w granicach przemiany eutektycznej (ok 38% Pb), w celu uzyskania lutu o najniższej z możliwych temperatury topienia, która koresponduje z punktem eutektycznym (rys. 67).

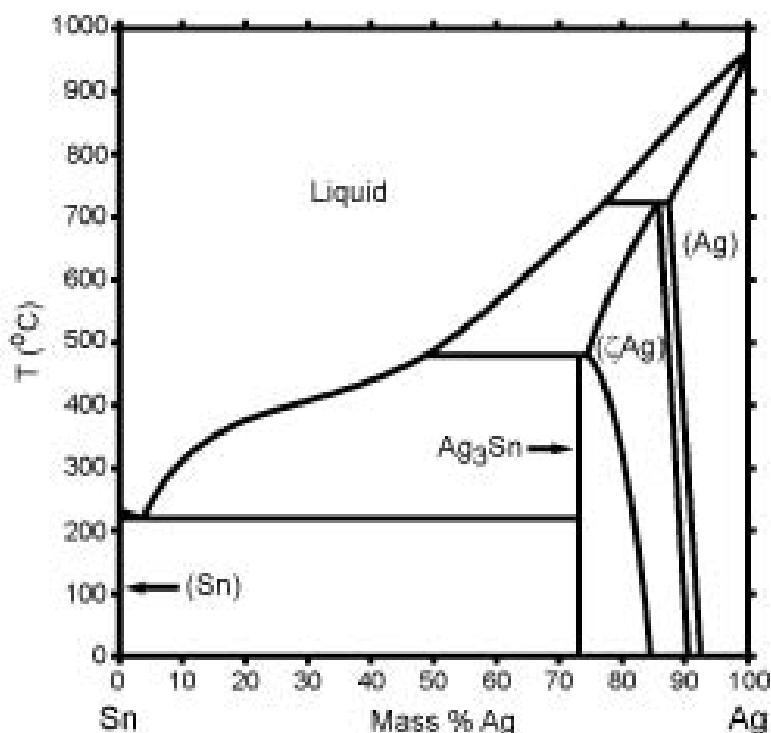


Rys. 67. Wykres równowagowy Sn-Pb z zaznaczoną temperaturą [127]

Z wykresu (rys.67) wynika, że korzystne jest zwiększanie zawartości ołowiu w stopach Sn-Pb ze względu na obniżanie się temperatury topienia. Ze względów zdrowotnych i ekologicznych nie zalecane jest dodawanie ołowiu do lutów cynowych. W branży transportowej dopuszczalne jest stosowanie lutów zawierających maksymalnie 3% Pb.

Przykładowo złącze wykonane lutem Zen-1 (zawierające 1% Ag) posiada gorszą wytrzymałość na rozciąganie niż złącza wykonane lutem Zen-2 i Zen-3 (zawierające 2% Ag). Analiza wyników zawartych w tabeli 5 pozwala zauważyć, że złącze wykonane lutem Zen-3 posiada wytrzymałość wynoszącą 53 MPa, a więc mniejszą niż złącze wykonane lutem Zen-2. Można zatem wnioskować, że modyfikacja lutów Sn-Ag ołowiem nie wpływa na poprawę własności wytrzymałościowych otrzymywanych złączy a jedynie może wpłynąć na obniżenie temperatury procesu lutowania. Wyniki pokrywają się z wynikami przedstawionymi w rozdziale 4.3 i doбором temperatury procesu lutowania.

Na podstawie informacji zawartych na układzie równowagi fazowej (rys. 68) można stwierdzić, że ważnym składnikiem lutu Zen 3 jest srebro.

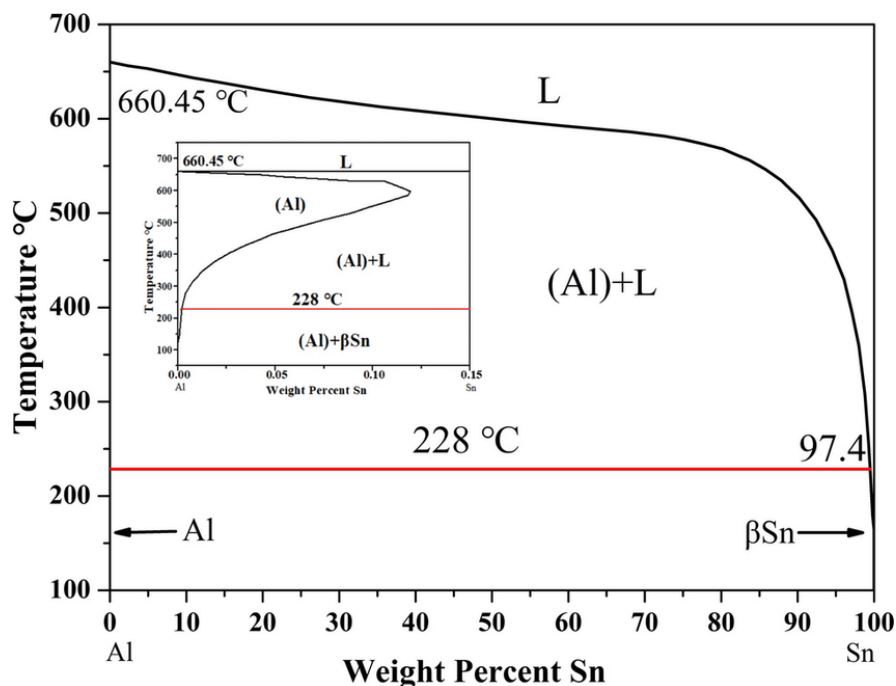


Rys. 68. Wykres równowagowy Sn-Ag [128]

Z diagramu (rys. 68) wynika, że srebro może umacniać złącze ze względu na tworzącą się fazę Ag_3Sn (o sieci hcp) jako produkt przemiany perytektycznej. Przy zbyt dużej zawartości srebra faza Ag_3Sn staje się mniej korzystna (Zen-3).

W dalszej części badań przeanalizowano wpływ dodatku glinu na połączenia lutów na bazie cyny. Układ równowagi fazowej Sn-Al przedstawiono na rys. 69.

Dodatek glinu do cyny dotychczasowo rzadko wykorzystywano ze względu na ograniczoną rozpuszczalność Al w fazie $\beta\text{-Sn}$ (rys. 69). Dodatek aluminium z innymi pierwiastkami stopowymi może umacniać lut i wpływać na tworzenie wieloskładnikowych eutektyk [123]. Aluminium dodawane poniżej 1% ogranicza rozrost ziarn fazy beta, co prowadzi do umocnienia lutu [124].



Rys. 69. Wykres równowagowy Sn-Al [129]

Dokładna analiza wyników badań zestawionych w tablicy 5 pozwala stwierdzić, że w celu zwiększenia wytrzymałości miedzianych złączy lutowanych należy wprowadzać do cynowego lutu więcej pierwiastków stopowych. Złącza wykonywane lutami Zen-8, Zen-9, Zen-10 posiadają wyraźnie wyższą wytrzymałość od złączy z zakresu Zen-1 do Zen-7.

Na podstawie tablicy 5 potwierdzono, że zaproponowane nowatorskie rozwiązanie z 5 pierwiastkami stopowymi (Zen-11), pozwala na uzyskanie wytrzymałości na rozciąganie powyżej 90 MPa, co koresponduje ze zwiększeniem wytrzymałości w stosunku do złącza wykonanego dotychczasową metodą.

Reasumując:

- autorski lut Zen-11 pozwala na wytworzenie złącza charakteryzującego się najwyższą wytrzymałością na rozciąganie spośród wszystkich badanych złączy,
- skład chemiczny lutownicy przełożył się na wyniki badań wytrzymałościowych i dla większości lutów zauważono korelację pomiędzy ilością składników a otrzymanym wynikiem wytrzymałości. Zależności nie zaobserwowano dla dodatku ołowiu do stopów cynowych,
- dodatek ołowiu w powyższych stopach wpływa na obniżenie temperatury topnienia. Dlatego dla badanych lutów zawierających wyższą zawartość ołowiu temperatura

procesu lutowania mogła być obniżona. Ze względów środowiskowych nie zaleca się jego stosowania.

Stop lutowniczy (Zen-11) Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al jest stopem wieloskładnikowym, którego struktura i fazy zależą od składu chemicznego oraz warunków termodynamicznych (temperatury i szybkości chłodzenia) [56, 66]. Analiza układów dwuskładnikowych równowagi fazowej, przeprowadzona w niniejszym rozdziale pozwala przypuszczać, że tak dobre własności mechaniczne połączenia wykonanego z nowoopracowanego lutu wynikają z domieszkowania stopu cynowego dodatkami stopowymi.

4.6. Badania radiograficzne złączy lutowanych

Zgodnie z metodyką przedstawioną z rozdziałem 4 wykonano badania rentgenograficzne złączy lutowanych przy parametrach:

temp. grota 380 °C i czas styku elementów lutowanych 5 s. (zgodnie z tabl. 3).

Badanie miało na celu wnikliwą obserwację i weryfikację złączy lutowanych oraz składu chemicznego lutów (tabl. 2) przy zastosowaniu lutów zgodnie z tabelą 2.

Druty miedziane zostały umieszczone w specjalnym uchwycie, który zapewniał ich stabilne położenie na odcinku 10 cm w trakcie badania. Pozycjonowanie było kluczowe, aby uzyskać jednolity obraz radiograficzny i odpowiednią jakość detekcji ewentualnych defektów. Następnie przeprowadzono kalibrację aparatu radiograficznego, dostosowując parametry ekspozycji do wymagań normy EN 17636-1. Skonfigurowano ustawienia urządzenia, aby uzyskać obrazy wysokiej jakości odpowiadające klasie jakości W18.

4.6.1. Wyniki i analiza badań radiograficznych

Na zdjęciu poniżej, przedstawiono badanie rentgenowskie (rys. 70) próbki połączenia drutów lutem o składzie chemicznym Sn-5% Ag-1% Cu (próbka Zen-8, tabl. 2).



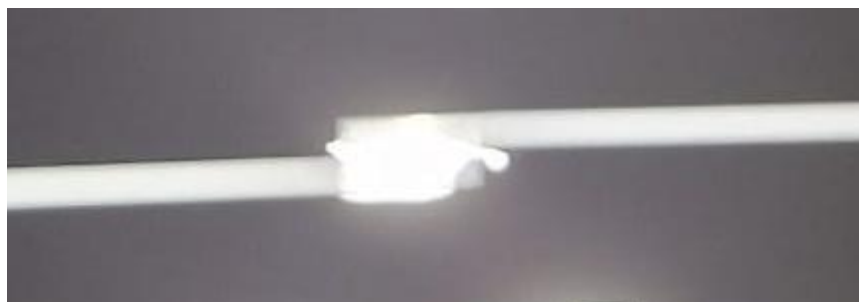
Rys. 70. Zdjęcie radiograficzne z niezgodnościami w postaci braków przetopu lutownicy (próbka Zen-8) [opracowanie własne]

Podczas obserwacji stwierdzono, że połączenie posiada wady w postaci braków przetopu lutownicy w wykonanych złączach. Wynik przeprowadzonego badania jest negatywny. Zgodnie z oceną literaturową wynik negatywny może być skutkiem:

- niewłaściwych parametrów temperaturowo – czasowych,
 - zbyt dużej, zbyt małej lub nierównomiernie rozłożonej warstwie nałożonego topnika,
 - zanieczyszczenia powierzchni lutowanej np. w wyniku niewłaściwego przygotowania materiałów, utlenieniu powierzchniowego łączonych elementów lub niewłaściwego procesu oczyszczenia powierzchni,
- a także różnicy w rozszerzalności cieplnej materiału łączzonego i łączącego.

W związku z tym, że wszystkie złącza wykonano w tych samych warunkach a dla jednych próbek wyszły prawidłowe a w innych wykryto niezgodności, stwierdzono że proces oczyszczenia powierzchni była właściwy i nie stanowił przyczyny zaobserwowanych niezgodności. Stwierdzono, że największy wpływ na zaobserwowane różnice jakości wykonanych złączy mają składy chemiczne użytych w procesie lutów. Składy te determinują własności lutów w tym ich rozszerzalność cieplną, zwilżalność itp. W związku z tym aby uzyskać poprawne połączenia należałoby zmienić w niektórych przypadkach ilość topnika oraz sprawdzić równomierność jego rozłożenia gdyż niektóre luty będą bardziej wrażliwe na nierówności niż inne. Należy również skorygować warunki temperaturowo – czasowe wytwarzanych lutowin. W tym punkcie mogą przydatne mogą być wyniki prezentowane w rozdziale 4.3.2 (tabl. 3), które wskazują na występowanie wad powierzchniowych w złączach lutowanych, zatem determinują pewien zakres poszukiwań najwłaściwszych parametrów procesu

Następnie wykonano badania złącza (rys.71) o składzie chemicznym Sn-2%Ag-0,8%Al (próbka Zen-9, tabl. 2).



Rys. 71. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-9, z niezgodnościami w postaci wycieków przetopu lutowiny [opracowanie własne]

Badając próbkę (rys.71) stwierdzono, że połączenie posiada wady w postaci wycieków przetopu lutowiny. Wynik przeprowadzonego badania jest dopuszczający. Odnosząc się do normy IPC610

Poniżej (rys.72) przedstawiono zdjęcie badania złącza o składzie chemicznym Sn-2% Ag (próbka Zen-2, tabl. 2).



Rys. 72. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-2 z niezgodnościami w postaci występowania pęcherzyków powietrza oraz porowatości [opracowanie własne]

Po przebadaniu próbki (rys.72) stwierdzono, że połączenie posiada wady w postaci pęcherzyków powietrza występujących w przetopie lutownicy oraz porowatości. Wynik badania jest negatywny. Wady lutownicy można tłumaczyć zbyt rozrośniętymi ziarnami fazy Ag_3Sn ze względu na dużą zawartość srebra. Na zdjęciu (rys.73) przedstawiono badanie złącza o składzie chemicznym Sn-0,7% Cu (próbka Zen-5, tabl. 2).



Rys. 73. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-5. Próbką nie posiada wad w przetopie lutownicy [opracowanie własne]

Z obserwacji próbki (rys.73) stwierdzono, że połączenie nie posiada wad przetopu lutownicy w wykonanych złączach. Wynik wskazuje, że nie wytworzyły się pęcherze, nie wykryto pęknięć a lutownina prawidłowo połączyła oba druty (materiał rodzimy). Nie wykazano rozwarstwień, braku przetopu czy wypływania nadmiaru lutownicy. Wynik wskazuje na dobre właściwości zwilżalności i adhezji w wytworzonym złączu. Wynik przeprowadzonego badania jest pozytywny.

Na rysunku 74 przedstawiono wynik badania złącza o składzie chemicznym Sn-2% Ag-3% Pb- 0,7% Cu (próbka Zen-10, tabl. 2).



Rys. 74. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-10. Nie zaobserwowano wad w przetopie lutownicy [opracowanie własne]

Z obserwacji próbki (rys.74) wynika, że to połączenie również nie posiada wad przetopu lutownicy. Lutownina dobrze spełnia swoją rolę. Wynik przeprowadzonego badania jest pozytywny. Na rysunku 75 przedstawiono wynik ostatniego badania radiograficznego, złącza o składzie chemicznym Sn-2% Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al (próbka Zen-11, tabl. 2).



Rys. 75. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen11. Brak widocznych wad przetopu lutowiny w wykonanym złączu [opracowanie własne]

Po przebadaniu ostatniej próbki (rys.75) stwierdzono, że to połączenie również nie posiada wad przetopu lutowiny w wykonanych złączach. Lutowina bardzo dobrze spełnia swoją rolę. Wynik przeprowadzonego badania jest pozytywny.

Reasumując, należy stwierdzić, że w przypadku połączeń Zen-11, Zen-10, Zen-5 połączenie jest prawidłowe, lut został równomiernie rozprowadzony na powierzchni łączonych elementów. W testach nie zidentyfikowano przerw, pustek ani obszarów, w których lut nie przylegał do materiału bazowego. Ocena makroskopowa lutu potwierdziła, że we wszystkich próbkach lut jest gładki, błyszczący i jednorodny, co świadczy o właściwym wykonaniu tych połączeń. Każdorazowo materiał bazowy został odpowiednio przetopiony z lutowiną. Właściwy przetop jest gwarantem dobrej przyczepności i wytrzymałości połączenia w testach mechanicznych. Podczas badań nie wykryto wad powierzchniowych typu porowatość, pęcherze powietrza, mikropęknięcia, wżery lub inne nieciągłości powierzchniowe, które mogą wpływać na wytrzymałość mechaniczną złącza. Badaniem rentgenograficznym nie zidentyfikowano również pęcherzy powietrza lub porów w lutowni mogących świadczyć o zanieczyszczeniach, niewłaściwym topniku lub zbyt szybkim stygnięciu połączenia.

Z wyników przedstawionych w rozdziale 4.3 wynika, że pozytywną ocenę otrzymały próbki: Zen-1, Zen-3, Zen-4, Zen-5, Zen-6, Zen-7, Zen-10 oraz Zen-11. Pozostałe testowane złącza zawierały wiele niezgodności takich jak: brak przetopu, brak wypełnień, wycieki lutowiny, występowanie pęcherzyków powietrza, porowatość. Zidentyfikowane niezgodności i wady wewnętrzne materiałowe złączy mogły wynikać z:

- kąta lutowania,
- nieprawidłowej charakterystyki temperaturowo-czasowej procesu lutowania,
- braku całkowitego zwilżania pól lutowniczych,
- zanieczyszczeń i utlenienia powierzchni lutowanych,
- naprężeń cieplnych w połączeniach,
- zanieczyszczeń w lutcie użytym w procesie lutowania.

Aby uniknąć części wyżej wymienionych wad podczas procesu lutowania można stosować następujące rozwiązania:

- odpowiednią regulację temperatury,
- zwiększenie objętości nałożonej pasty lutowniczej,
- zwiększenie docisku lutowanych powierzchni podczas lutowania,
- dokładniejsze czyszczenie powierzchni lutowanych,
- dobrać odpowiednią końcówkę grota lutowniczego.

4.7. Badania mikrostruktury złączy lutowanych

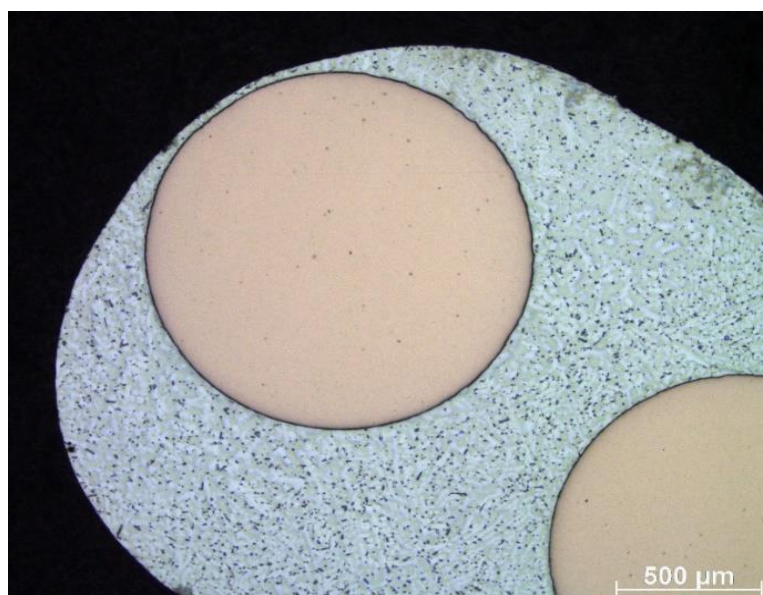
W dalszej części badań rozpoznawczych wykonano badania mikrostruktury złączy lutowanych. Do badań (podobnie jak w przypadku badań radiograficznych) wykorzystano złącza lutowane dwóch drutów miedzianych o średnicy 1,5 mm, połączonych na odcinku 15 mm. Przed wykonaniem połączeń druty zostały mechanicznie oczyszczone i zwilżone topnikiem kalafoniowym o symbolu FLUX-TKP-101. Następnie próbki wytrawiono nitałem (roztwór kwasu azotowego w alkoholu etylowym, powszechnie stosowany do chemicznego trawienia metali żelaznych). Badania przeprowadzono na zglądach poprzecznych wg normy PN-EN ISO 9015 na mikroskopie świetlnym Neophot 32 [81].

Najważniejsze właściwości lutowia wpływające na wytrzymałość złącza lutowniczego w alternatorach wynikają z uformowanej w procesie lutowniczym struktury połączenia. Istotnym elementem struktury determinującym właściwości lutowia są formacje międzymetaliczne oraz mikrostrukturalne powstające w lutowiu. Zarówno ich rozkład, jak i wielkość determinują właściwości wytrzymałościowe połączenia.

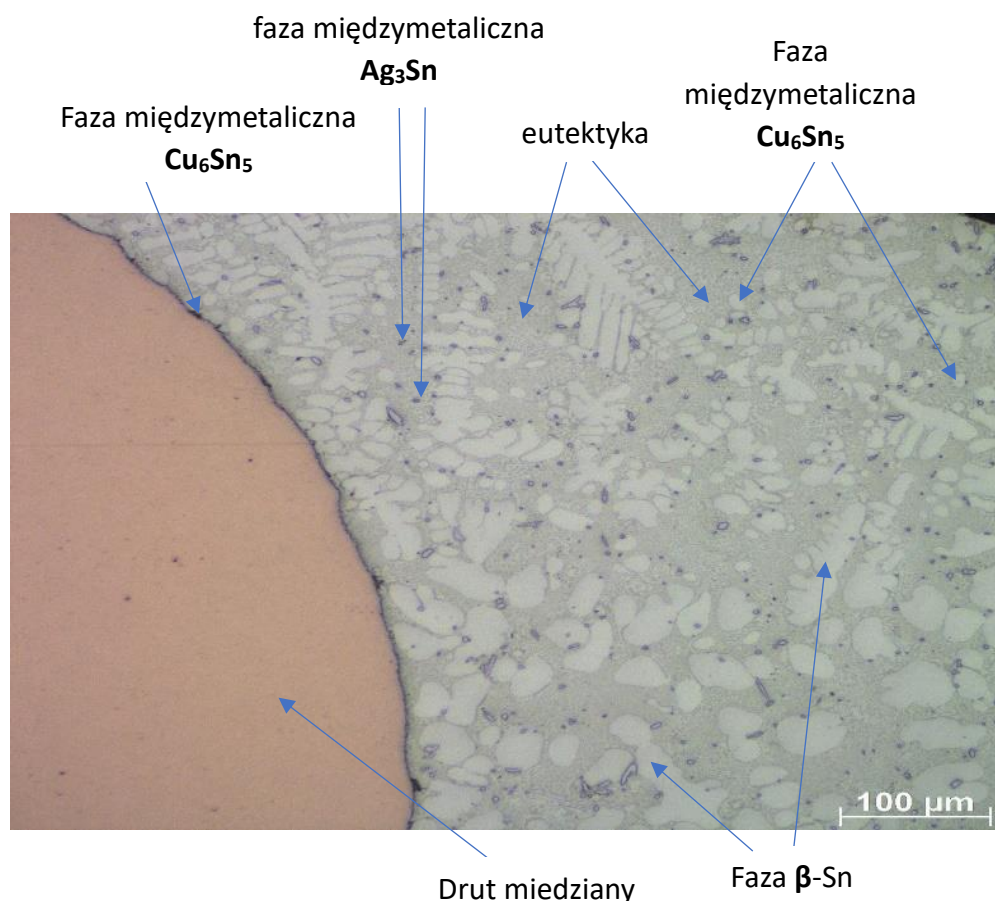
4.7.1. Wyniki badań mikrostrukturalnych nowoopracowanego złącza i ich analiza

Badania miały na celu sprawdzenie mikrostruktury lutowiny pod kątem przyczepności do materiału rodzimego (brak odwarstwień, szczelin i innych wad oraz niezgodności lutowniczych) oraz jednorodności objętościowej mikrostruktury lutowiny.

Na rysunkach 76 i 77 przedstawiono badanie mikrostruktury połączenia lutowanego, uzyskane przy zastosowaniu lutu Zen-11.



Rys. 76. Złącze lutowane Zen-11 [opracowanie własne]



Rys. 77. Złącze lutowane Zen-11, trawione nitałem [opracowanie własne]

Złącze lutowane Zen-11 przedstawione na rys. 76 oraz 77 zostało wykonane prawidłowo. Widoczny jest lutowany drut miedziany (pomarańczowy obszar na rys. 76 i 77), połączone lutem Zen-11 oraz cienka warstwa fazy międzymetalicznej Cu_6Sn_5 na granicy rozdziału. Widoczna jest również szara złożona eutektyka IMCs (ciemno-szary obszar na rys. 77) i faza β -Sn (białe obszary) oraz obszary faz międzymetalicznych (ciemne punkty). Dodatek srebra do stopu lutowniczego powoduje powstanie fazy Ag_3Sn w wyniku wiązania Sn i Ag, natomiast dodatek miedzi powoduje powstawanie fazy Cu_6Sn_5 . Cyna i ołów, oraz cyna i glin posiadają wykresy równowagowe z przemianą eutektyczną i nie tworzą faz międzymetalicznych. Glin i srebro rozpuszczają się wzajemnie w małych zawartościach na podstawie analizy wykresów równowagowych. Obserwowane ciemne punkty stanowią fazy typu Ag_3Sn (sieć hcp) albo fazy Cu_6Sn_5 (sieć fcc).

4.8. Podsumowanie badan rozpoznawczych

Na podstawie przeglądu literatury ustalono, że istnieje możliwość lutowania elementów alternatora. W celu jego regeneracji by osiągnąć jak najlepsze własności lutownicze postanowiono wykonać 12 różnych lutów o zróżnicowanym składzie chemicznym na bazie cyny. W części rozpoznawczej skupiono się na rozwiązaniach materiałowo – technologicznych, opracowano metodę lutowania i parametry procesu. Opracowano luty o kształcie i wymiarach które docelowo będą brane pod uwagę do napraw regeneracyjnych miedzianych elementów alternatora samochodowego.

W badaniach rozpoznawczych przedstawiono sposób wykonania próbek. Ocenie poddano 12 próbek. Wykonano próbki o kształcie płaskowników, które posłużyły do oceny składu chemicznego lutowia oraz próbki o kształcie drutów do badań wytrzymałości na rozciąganie.

4.9. Wnioski do badan rozpoznawczych

W badaniach rozpoznawczych sprawdzono skład chemiczny lutowia korzystając z mikroskopii skaningowej oraz wytrzymałość na rozciąganie 12 badanych złączy o różnym składzie chemicznym. Pierwsza część badań udowodniła że złącza zostały wykonane prawidłowo i lutowie zawiera pożądane pierwiastki stopowe. W drugiej części badań sprawdzono wytrzymałość na rozciąganie wszystkich testowanych 12 złączy i udowodniono że najlepsze własności mechaniczne posiada złącze o symbolu Zen-11 (tabl. 5), które zawiera 5 pierwiastków stopowych. Uzyskano wytrzymałość złącza na poziomie przekraczającym 90 MPa, co może być bardzo istotne w zastosowaniu w branży transportowej.

Analiza wyników badań rozpoznawczych pozwala stwierdzić że:

- najlepszymi lutami są luty zastosowane w próbkach Zen-10 oraz Zen-11 ponieważ są pozbawione wad lutowniczych oraz wykazują największą wytrzymałość na rozciąganie;
- próbki Zen-10 oraz Zen-11 posiadają strukturę gwarantującą dobre własności mechaniczne, na które składa się osnowa eutektyczna (wieloskładnikowa) z licznymi wtrąceniami fazowymi;
- parametry procesu lutowania zapewniające uzyskanie poprawnej struktury złącza to:
 - a) czas styku = 5 s.,
 - b) temperatura grota = 380 °C.

5. PROBLEM BADAWCZY I TEZA

Znaczną poprawę własności użytkowych połączeń alternatorów samochodowych można uzyskać poprzez modyfikację lutów stosowanych w procesie regeneracji.

5.1. Problem badawczy

Alternatory samochodowe są niezbędne dla sprawnego funkcjonowania pojazdu, zarówno starszego typu jak i w najnowszych konstrukcjach pojazdów. Jego głównym zadaniem jest wytwarzanie energii elektrycznej podczas pracy silnika i ładowanie akumulatora, który zasila elektrykę pokładową pojazdu. Uszkodzenie alternatora może prowadzić do poważnych problemów z funkcjonowaniem pojazdu m.in.:

- rozładowania akumulatora,
- wadliwego działania systemów elektrycznych pojazdu,
- problemów z uruchomieniem silnika.

Niewłaściwe działanie alternatora może objawiać się np. zapaleniem się kontrolki akumulatora na desce rozdzielczej lub przygasającymi światłami pojazdu, co szczególnie stwarza zagrożenie w ruchu drogowym

Ważnym elementem konstrukcji alternatorów samochodowych jest układ diod prostowniczych (prostownik) wbudowanych w alternator oraz ich prawidłowe połączenie. Układ ten odpowiada za przekształcenie napięcia prądu przemiennego na napięcie stałe. Zatem odpowiednia regeneracja niesprawnych alternatorów jest bardzo istotna.

W związku z tym, że ilość uszkodzonych alternatorów, które trafiają do jednego zakładu regeneracji szacuje się na poziomie średnio 5000 szt. miesięczne z tego znaczna większość uszkodzeń występuje w układzie prostownika niezbędne jest przeprowadzenie jego regeneracji. Analiza reklamacji związanych z regeneracją alternatorów dotychczasowymi procesami lutowniczymi wskazuje, że liczba zwracanych alternatorów zawiera się w przedziale 7,5-8,3%. Stanowi miesięczną ilość zregenerowanych alternatorów trafiających do sprzedaży. To wysokie koszty napraw pogwarancyjnych, które zakład regeneracyjny musi ponieść. W celu zredukowania liczby reklamacji podjęto działania polegające na przeszkoleniu pracowników pracujących na stanowiskach regeneracji metodami lutowania lecz nie przyniosły one zadowalających efektów. Problemem do tej pory nierozwiązywalnym było opracowanie technologii regeneracji umożliwiającej obniżenie ilości zgłoszonych reklamacji.

Dlatego w pracy podjęto próby rozwiązania problemu badawczego, opracowania nowego rozwiązania regeneracji alternatorów, które umożliwi wytworzenie połączeń lutowanych z wykorzystaniem nowego lutu wieloskładnikowego na bazie cyny.

Postawiono pytania badawcze:

1. Czy zastosowanie nowego, pięcioskładnikowego lutu umożliwi wykonanie poprawnych, wytrzymałych połączeń?
2. Czy lut o składzie chemicznym Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu-0,4% Al zapewni właściwe przewodnictwo elektryczne?
3. Czy opracowaną technologię lutowania z wykorzystaniem lutu pięcioskładnikowego można zastosować podczas regeneracji podzespołów alternatorów pojazdów samochodowych?

5.2. Teza

Na podstawie przeglądu literatury oraz badań rozpoznawczych zaproponowano tezę, która zakłada że:

znaczną poprawę własności użytkowych połączeń podzespołów alternatorów pojazdów samochodowych można uzyskać poprzez odpowiednią modyfikację składu chemicznego lutów i technologii lutowania używanych podczas regeneracji podzespołów tych urządzeń.

W celu udowodnienia tezy zaproponowano następujące badania na dodatkowych próbkach autorskiego opracowania (dla których otrzymano najlepsze rezultaty po badaniach rozpoznawczych), oraz na obiekcie rzeczywistym, który stanowią regenerowane alternatory. Postanowiono przede wszystkim wykonać:

- opracowanie sposobu lutowania elementów alternatora przy pomocy autorskiej metody z wykorzystaniem tulejki ocynowanej tulejki miedzianej,
- badania rzadkośćności testowanych lutów wykorzystując płytkę PCB z otworami o kształcie tulejki w celu ustalenia stopnia wypełnienia próbki tulejkowej (stosując luty Zen-5, Zen-7, Zen-10, Zen-11),
- badania rentgenowskie wypełnionych otworów tulejkowych czterema lutami, które wykazały najlepsze własności mechaniczne spośród 12 lutów stosowanych w części badań rozpoznawczych (stosując luty Zen-5, Zen-7, Zen-10, Zen-11),
- ustalenie prawidłowych parametrów lutowania testowych złączy na obiekcie rzeczywistym (elementy alternatora) stosując luty które pozwoliły na uzyskanie najlepszej wytrzymałości podczas badań w części rozpoznawczej oraz najlepszej rzadkośćności wykazanej w realizowanych badaniach zasadniczych,
- testowe złącza lutowane na obiekcie rzeczywistym (na połączeniach elementów miedzianych alternatora, stojana i prostownika) wykorzystując luty które pozwoliły na uzyskanie najlepszej wytrzymałości podczas badań w części rozpoznawczej oraz prawidłowej rzadkośćności wykazanej w realizowanych badaniach zasadniczych,
- badania elektryczne badanych złączy lutowanych w celu porównania własności zregenerowanego alternatora z fabrycznie nowym,

- porównywanie charakterystyk napięć w regenerowanym alternatorze wg autorskiej metody i porównanie ich z charakterystykami napięć w fabrycznie nowym alternatorze,
- analiza jakości regenerowanych alternatorów autorską metodą na podstawie raportu reklamacji/zwrotów od momentu zakończenia badań w rozprawie doktorskiej (grudzień 2023).

Założenia do pracy:

1. Założono, że:

- cyna (Sn, 94%) – która stanowi główny składnik lutu, odpowiada za niski punkt topnienia,
- srebro (Ag, 2%) – odpowiada za powstanie związku Ag_3Sn , poprawiającego wytrzymałość mechaniczną lutowiny,
- ołów (Pb, 3%) – obniża punkt topnienia stopu, choć jego obecność jest coraz częściej ograniczana w lutach z powodu regulacji środowiskowych (np. dyrektywa RoHS w Unii Europejskiej). Umożliwia dobre rozplýwanie stopu podczas lutowania,
- miedź (Cu, 0,7%) – tworzy stabilne struktury międzymetaliczne i w omawianym zakresie zwiększa wytrzymałość mechaniczną złącza,
- aluminium (Al, 0,4%) nie tworzy z cyną faz międzymetalicznych i intensywnie wpływa na podwyższenie temperatury topnienia.

2. Proces nie może być automatyzowany, ze względu na:

- różnice w budowie alternatorów wynikające z konstrukcji różnych producentów,
- różne miejsca występowania uszkodzeń,
- różne miejsca połączeń podzespołów alternatora wynikające ze sposobu ich demontażu,

3. Regeneracja może być wykonana przy użyciu dostępnych maszyn i urządzeń,

4. Doboru na podstawie badań wstępnych parametrów procesu lutowania:

- czas lutowania ~ 5 s;
- temperatura grota $\sim 380^\circ \text{C}$

umożliwi wykonanie prawidłowych połączeń.

6. BADANIA ZASADNICZE

Badania zasadnicze w obszarze regeneracji alternatorów z wykorzystaniem technik lutowania mają na celu uzyskanie dokładnych, obiektywnych informacji o jakości procesów oraz właściwościach materiałów, które są kluczowe dla poprawy efektywności i niezawodności regenerowanych komponentów. Takie badania pozwalają na ocenę, czy wprowadzone zmiany w metodzie regeneracji przynoszą pozytywne efekty w postaci redukcji reklamacji, zwiększenia trwałości oraz poprawy funkcjonalności alternatorów.

6.1. Możliwość regeneracji alternatora z wykorzystaniem tulejki miedzianej, ocynowanej

Regeneracja alternatorów jest procesem polegającym na naprawie uszkodzonych elementów renowacji lub przywracania sprawności alternatora lub innych urządzeń generujących prąd stały. Postęp w motoryzacji tworzony jest z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów i rodzajów łączenia również w podzespołach będących składnikiem systemu motoryzacyjnego.

Podczas procesu regeneracji alternatorów występuje potrzeba rozłączenia wszystkich elementów alternatora a następnie, po wymianie i czyszczeniu podzespołów potrzeba ich odpowiedniego połączenia.

Do połączeń elektrycznych wykorzystano technologię lutowania. Jest to bardzo dobre rozwiązanie w tego typu połączeniach. Przede wszystkim tanie, szybkie oraz dające dużą swobodę dostępu do łączonych elementów. Łączone elementy są z reguły zbudowane z udziałem miedzi, która ma bardzo dobre właściwości przewodnictwa. Połączenia podczas regeneracji nie są powtarzalne, więc trudno jest zastosować automaty do zgrzewania.

W części rozpoznawczej badań dobierane były najważniejsze parametry lutu do wykonania złączy próbnych wykorzystywanych podczas regeneracji alternatorów samochodowych. Celem przeprowadzonych badań rozpoznawczych był wybór najważniejszych parametrów do połączenia elementów alternatora samochodowego metodą lutowania.

W rozprawie doktorskiej skoncentrowano się na stabilnym połączeniu elementów elektrycznych alternatora podczas regeneracji. Celem badań zasadniczych jest zweryfikowanie dobranych parametrów procesu lutowania podczas regeneracji bez wad i niezgodności lutowniczych, które często objawiają się w postaci tzw. zimnego lutu, pęcherzyków powietrza, porowatości, brakiem wypełnienia szczelin.

Do połączeń elektrycznych w regeneracji alternatorów samochodowych postanowiono wykorzystać tulejki wykonane z miedzi cynowanej galwanicznie (rys.78) o średnicy 8 mm i długości 16 mm, której zadaniem jest połączenie miedzianych elementów uzwojenia alternatora, prostownika oraz regulatora napięcia. Złącze to musi charakteryzować się bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi oraz odpowiednim przewodnictwem elektrycznym. Zastosowanie tulejki w złączu zapobiega

degradacji lutownicy w trakcie przepływu wielkich prądów w alternatorze podczas rozruchu pojazdu samochodowego.



Rys. 78. Tulejka z miedzi cynowanej [130]

6.2. Badanie rzadkoplłynności wypełnienia tulejki

Rzadkoplłynność (ang. fluidity) to zdolność stopu metalicznego do rozplływania się w stanie ciekłym, co jest kluczowe przy lutowaniu, szczególnie w regeneracji urządzeń takich jak alternatory. Badanie to pozwala ocenić, jak dobrze stop wypełnia przestrzeń między łączonymi elementami, a także określić jakość połączenia lutowanego [15, 31].

Badanie rzadkoplłynności wypełnienia tulejki pozwala na optymalizację procesu lutowania, poprawę jakości połączeń oraz zapewnienie niezawodności i trwałości regenerowanych urządzeń. Dzięki takim badaniom można uzyskać wytrzymałe, dobrze przewodzące i odporne na uszkodzenia połączenia, co ma bezpośredni wpływ na wydajność i żywotność regenerowanych podzespołów.

Celem badania rzadkoplłynności podczas wypełnienia tulejki będzie:

- ocena zdolności stopu lutowniczego do wypełniania szczelin i rozlewania się po powierzchni lutowanej,
- sprawdzenie, w jaki sposób skład chemiczny lutu wpływa na plłynność, a w konsekwencji na jakość połączenia,
- ustalenie optymalnych parametrów lutowania, takich jak temperatura topnienia, czas przepływu i lepkość oraz składu chemicznego lutu.

Wypełnienie tulejki lutem o odpowiedniej rzadkoplłynności powinno zapewnić:

- trwałe i odporne na wibracje połączenie mechaniczne,
- stabilność elektryczną, co wpływa na wydajność alternatora,
- brak możliwości redukcji lutu łączącego elementy alternatora pod wpływem przepływu dużych prądów,

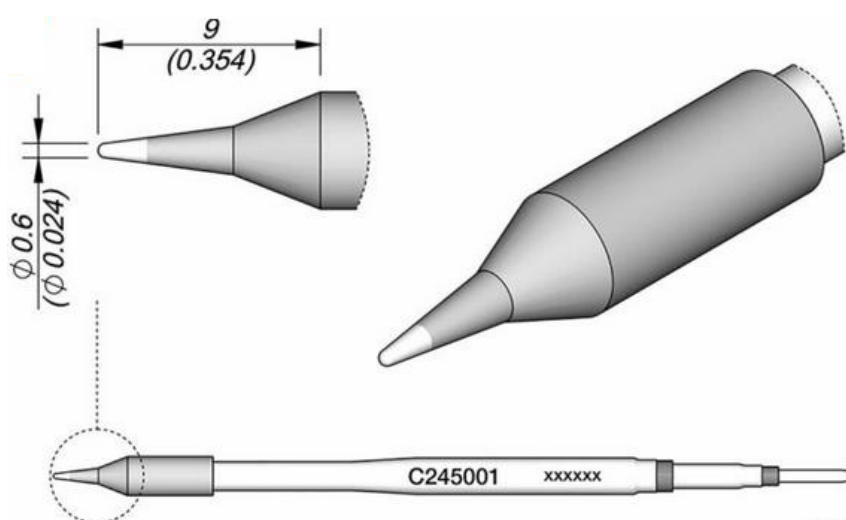
- odporność na zmienne temperatury i warunki środowiskowe, typowe dla pracy alternatorów.

6.2.1 Wykonanie próbek do badań rzadkoplątności

Do badań rzadkoplątności wykorzystano płytkę PCB wykorzystywaną w układach elektronicznych. Płytkę posiada otwory w kształcie tulejki o średnicy 2 mm i głębokości 3 mm, które pokryte są warstwą miedzi co doskonale nadaje się do wypełnienia lutownikiem (tabl. 1).

Do wypełnienia wykorzystano 4 luty o kształcie drutów stopowych wykonanych na bazie cyny według receptury z tabeli 2 i wyników z tabl. 3. Wytypowano 4 luty (Zen-5, Zen-7, Zen-10, Zen-11), które zapewniały najwyższą wytrzymałość na rozciąganie (od 60 MPa) spośród 12 lutów badanych w części rozpoznawczej (tabl. 2). Druty cynowe o przekroju 0,75 mm są nawinięte na szpulę o łącznej masie 500 g. Odpowiednie szpule drutu ze stopu cyny (spoiwo lutownicze) zostały wyprodukowane zgodnie z wymaganiami normy ISO EN 945 i dostarczone przez firmę zewnętrzną. Do badań przeznaczono dwie płytki PCB. Każda płytka posiada 8 otworów tulejkowych, wypełniono po 4 otworki testowanymi lutami, co łącznie daje 4 wyniki badań dla każdego z 4 badanych lutów (rys. 82 i rys. 83).

Do przetopienia lutownicy w celu wypełnienia otworów próbki wykorzystano grot lutowniczy rozgrzany do temperatury 380° C (wg norm IPC 610. Parametry lutowania opisane w rozdziale 3.1). Grot lutowniczy C245001 stożkowy, śr.: 0,6 mm firmy JBC przedstawiono na rysunku 79.



Rys. 79. Grot lutowniczy C245001 stożkowy, ϕ 0,6 mm firmy JBC [130]

W celu ułatwienia procesu wypełnienia otworów tulejkowych lutownikiem, płytkę umieszczono w imadle. Rozgrzany do temperatury 380 °C grot lutownicy przyłożono do otworów tulejkowych płytki PCB jednocześnie kolejno rozgrzewając badane luty (tabl. 2). Wypełnienie każdego z ośmiu otworów tulejkowych (wypełniane były cztery otwory na jeden lut) trwa średnio ok. 2 sekund. Lutowanie przebiegło prawidłowo, gdyż otwory były czyste i pokryte przed wypełnieniem topnikiem 3003 NC firmy TAMURA ELSOLD przy pomocy pisaka topnikowego z nylonowym pędzlem 14 mm × 4,3 mm. (rys.80).



Rys. 80. Pisak topnikowy z nylonowym pędzlem 14 mm × 4,3 mm [130]

6.2.2. Ocena radiograficzna próbek do badań rzadkoptylności

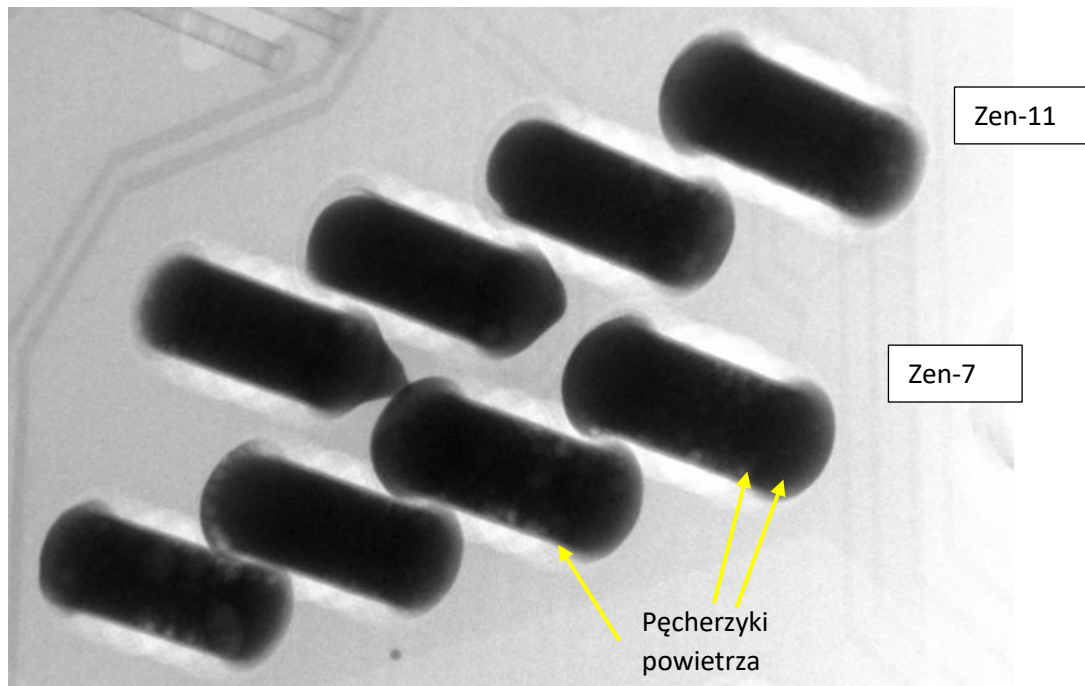
Wypełnione czterema badanymi lutami (tabl. 2) próbki poddano badaniom radiograficznym (RT).

Do badań radiograficznych użyto rentgenowskiej maszyny inspekcyjnej do testowania obwodów PCB wykorzystywanych w elektronice AX9100MAX firmy Unicomp. (rys. 81).



Rys. 81. Rentgenowska maszyna inspekcyjna AX9100MAX firmy Unicomp [131]

Na rysunku 82 pokazano wynik badania wypełnienia próbek Zen-7 (Sn-3%Pb-0,7%Cu) oraz Zen-11 (Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al) (tabl. 2).



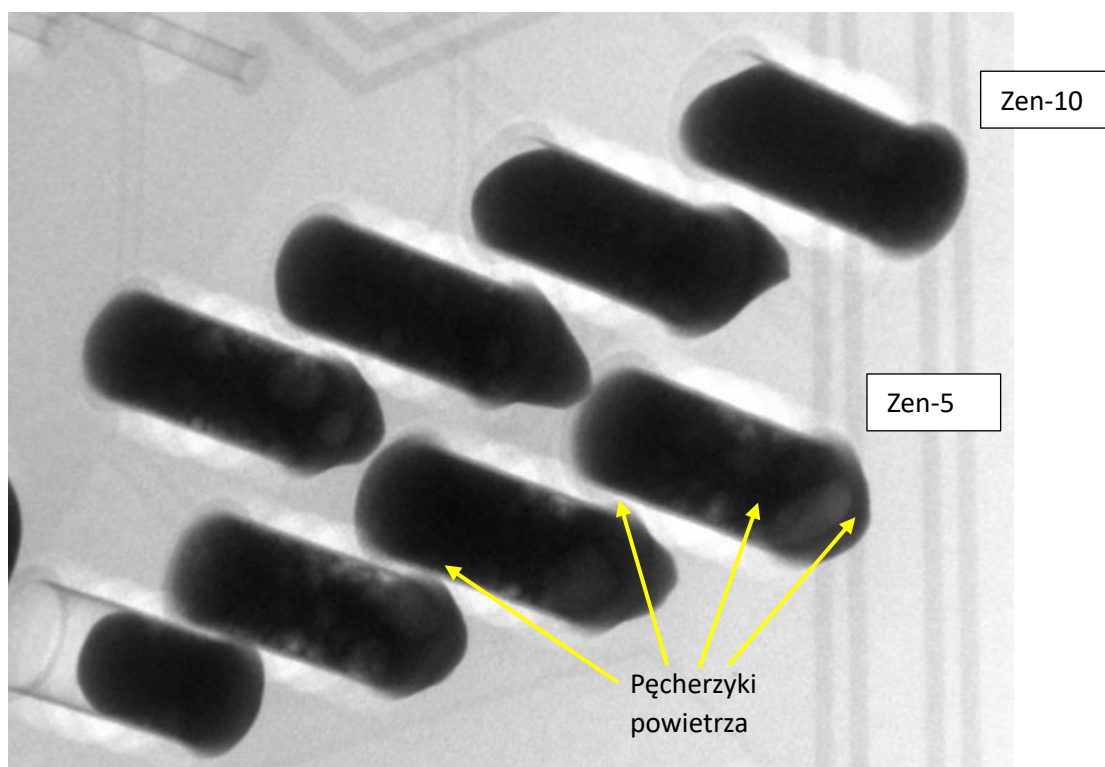
Rys. 82. Zdjęcie rentgenowskie płytki PCB z lutami o symbolu Zen-7 oraz Zen-11
[opracowanie własne]

Podczas obserwacji próbek Zen-7 oraz Zen-11 stwierdzono, że wypełnienia próbek tulejkowych różnią się. W próbce Zen-7 występują liczne pęcherzyki powietrza natomiast w próbce Zen-11 ilość i wielkość pęcherzyków powietrza jest znikoma. Lut w całości wypełnia tulejkę.

Następnie wykonano badania wypełnienia tulejek z próbkami lutu o symbolach Zen-5 (Sn-0,7% Cu) oraz Zen-10 o składzie chemicznym Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu (tabl.2). Wyniki badań zaprezentowano na rysunku 83.

Podczas obserwacji stwierdzono, że wypełnienie próbki Zen-5, w każdym przypadku posiada wady w postaci licznych pęcherzyków powietrza oraz braków wypełnienia próbki przy identycznych parametrach występujących podczas wypełniania próbki Zen-10.

Próbka Zen-10 w jednym przypadku posiada widoczne pojedyncze pęcherzyki powietrza. Pozostałe przypadki oznaczają się dobrymi parametrami.



Rys. 83. Płytki PCB z lutami o symbolu Zen-6 oraz Zen-10

Z powyższych obserwacji można wnioskować, że próbki o symbolach Zen-10 oraz Zen-11 charakteryzują się najlepszymi parametrami rzadkopłynności, ponieważ w tych tulejkach nie stwierdzono występowania pęcherzyków powietrza (w przypadku Zen-10 pojedyncze pęcherzyki) i innych wad.

6.3. Badania mikrostrukturalne wybranych próbek

Badania mikrostrukturalne w procesie lutowania są kluczowym elementem oceny jakości i wytrzymałości złączy lutowanych i mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia właściwości mechanicznych połączeń. Celem takich badań jest ocena zmian strukturalnych, które zachodzą w wyniku procesu lutowania, a także określenie potencjalnych defektów, takich jak:

- porowatość – puste przestrzenie mogą, które osłabić połączenie,
- mikropełnięcia – defekty, które mogą wpływać na wytrzymałość połączeń,
- niedolutowanie – niewłaściwe zwilżenie lutem powierzchni łączonych elementów,
- zanieczyszczenia – obecność niepożądanych materiałów, które mogą wpływać na przewodnictwo elektryczne lub wytrzymałość połączenia.

Wyniki badań mikrostrukturalnych dostarczają danych niezbędnych do optymalizacji parametrów procesu lutowania, takich jak temperatura lutowania, czas zwilżania, czy dobór odpowiednich stopów lutowanych. Dobre zrozumienie mikrostruktury złącza pozwala na minimalizowanie defektów i poprawę trwałości oraz niezawodności połączeń lutowanych w trudnych warunkach eksploatacyjnych [94].

W kolejnym etapie badań postanowiono przeprowadzić obserwację mikroskopową wybranych próbek, które będą miały zastosowanie w regeneracji alternatorów.

Do badań wytypowano cztery próbki połączeń lutowanych (Zen-5, Zen-7, Zen-10, Zen-11 z tabl.2), które zapewniały bardzo dobre parametry złącza oraz dobrą wytrzymałość na rozciąganie spośród 12 lutów badanych w części rozpoznawczej (tabl. 5). Odpowiednio wyczyszczone i zwilżone miedziane druty o średnicy 1,5 mm zlutowano ze stopą na zakładkę. Wykonano dwie próby badania próbek. Pierwsza próba z użyciem próbek nietrawionych, druga poddana trawieniu, za pomocą odczynnika chemicznego nital (mieszanina kwasu azotowego i alkoholu, często używana do trawienia różnych metali i stopów).

Badania przeprowadzono na zglądach poprzecznych wg normy PN-EN ISO 9015 na mikroskopie skaningowym elektronowym SEM Zeiss Supra 35 (Zeiss Supra 35, Producent: Carl Zeiss NTS GmbH, Oberkochen, Niemcy) o napięciu przyspieszającym 20 kV i powiększeniach 70–15000×. Za pomocą przystawek określono skład chemiczny badanych próbek oraz potwierdzono występowanie różnych typów wytrącania się faz międzymetalicznych, równomierność rozkładu tych faz w złożonych obszarach eutektycznych i faz β (Sn). Analizę składu chemicznego w mikroobszarach wykonano przy użyciu detektora EDX (Thermo Scientific™, detektor EDX: Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) z oprogramowaniem Pathfinder.

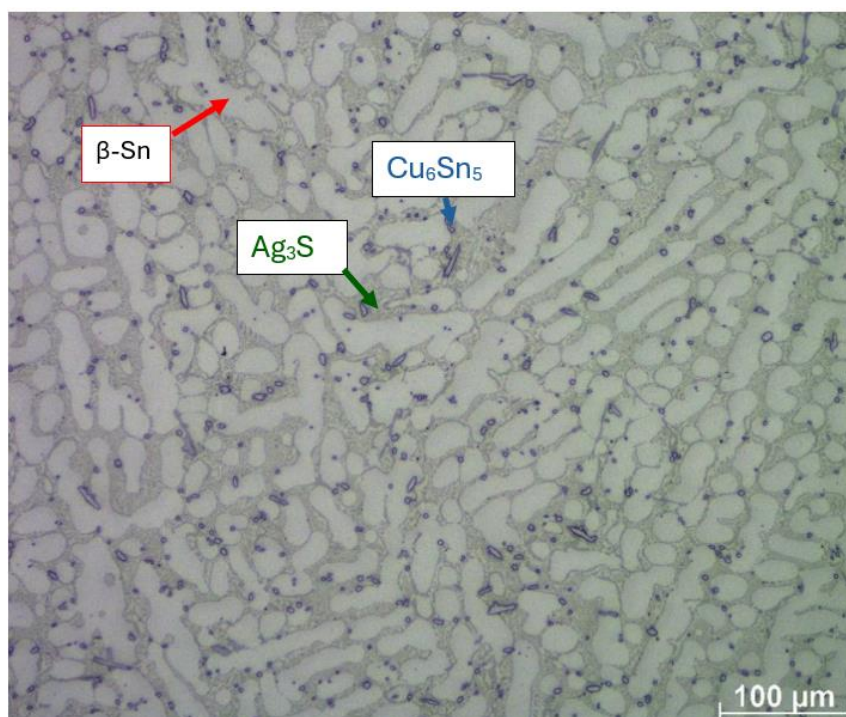
6.3.1. Analiza wyników i opracowanie modelu formowania faz międzymetalicznych w lutowninie nowooprocowanego złącza

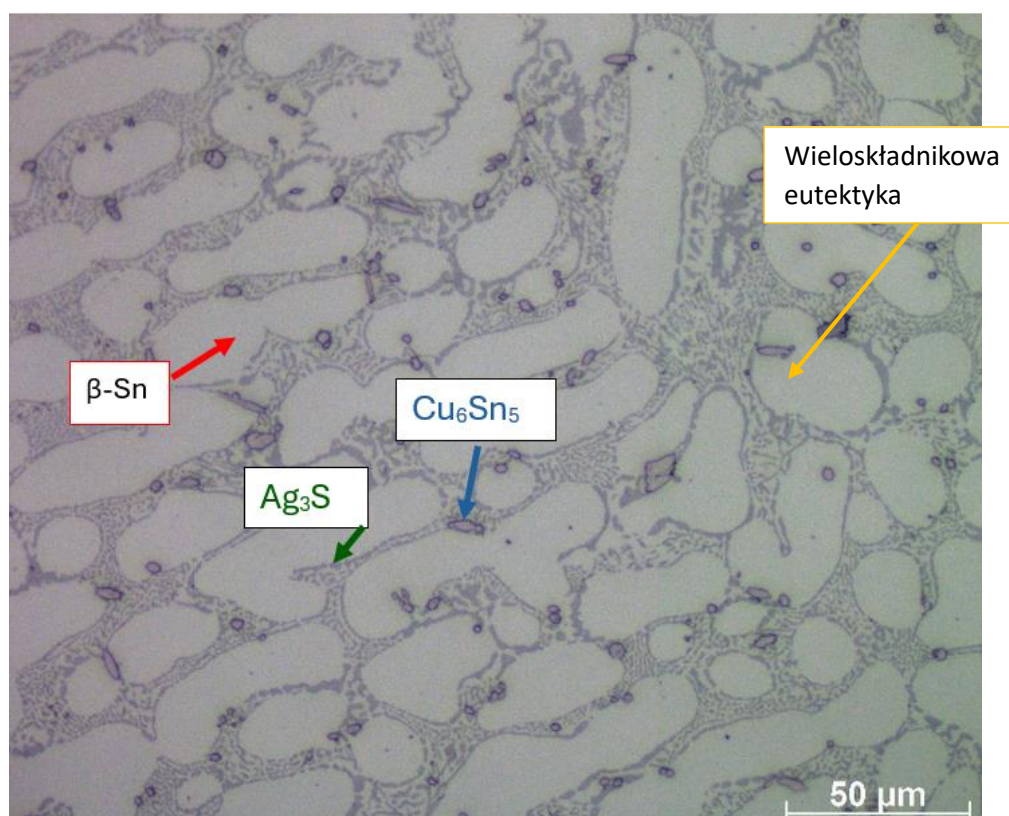
Analiza mikrostruktury połączenia pozwala stwierdzić, że w osnowie eutektycznej formują się fazy międzymetaliczne (punkty na rys. 84). Fazy te mają kluczowe znaczenie dla uzyskiwanych właściwości złącza lutowanego. Obserwacja mikroskopowa (rys. 84) pozwala stwierdzić:

- w miarę równomierny rozkład faz międzymetalicznych w osnowie eutektycznej,
- a także, że obszary faz międzymetalicznych nie wykazują nadmiernego rozrostu.

Taka formacja faz międzymetalicznych w procesie lutowniczym zapewnia uzyskiwanie połączeń charakteryzujących się odpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi, co potwierdzają dane literaturowe [116, 117]. Materiał składający się z osnowy eutektycznej i wzmocniony wydzielającymi się drobnymi fazami międzymetalicznymi ma właściwości kompozytu wzmacnianego cząstkami. Należy podkreślić, że badania i publikacje z tego zakresu stanowią nowość naukową i nie są obszerne. Dostępne informacje literatury naukowej, potwierdzają, iż większość badaczy zauważyła, że drobne twarde fazy wydzielające się w osnowie, lub wprowadzone celowo do lutu, poprawiają właściwości złącza lutowniczego, takie jak zwilżalność i właściwości mechaniczne.

Tworzące się fazy typu Cu_6Sn_5 , Ag_3Sn i wzrost fazy $\beta\text{-Sn}$ ma zatem kluczowe znaczenie dla uzyskiwanej jakości połączeń. Zgodnie z danymi literaturowymi [116, 117] ocena połączeń lutowanych powinna uwzględniać kontrolę formacji międzymetalicznych.





Rys. 84. Obszary występowania faz międzymetalicznych w kompozytowej osnowie w złączu lutowanej tulejki z zastosowaniem lutu Zen-11. Próbką trawiona nitałem

Na rysunku 84 powiększono obszar występowania faz międzymetalicznych w eutektycznej osnowie. Szare obszary na przedstawionych rysunkach 84, stanowi złożona eutektyka typu IMC (intermetallic composite) z drobnymi wydzieleniami fazy Ag_3Sn . Obszary bardzo jasne o wydłużonych, często dendrytycznych kształtach odpowiada fazy β (Sn). Mniejsze obszary z wyraźną ciemną otoczką stanowią fazy Cu_6Sn_5 .

Podobne wyniki zostały zaobserwowane w badaniach wstępnych, przedstawionych w niniejszej dysertacji (badania przy użyciu mikroskopu świetlnego – rozdział 4.7). Uzyskane rezultaty są w znacznym stopniu zgodne z obserwacjami przeprowadzonymi przez A.A. El-Daly [118], który wysunął hipotezę, że wyższe prędkości krzepnięcia $\beta\text{-Sn}$ ograniczają czas wzrostu faz międzymetalicznych Ag_3Sn i Cu_6Sn_5 . Podobny mechanizm został również opisany przez X.D. Liu i wsp. Badacze do stopu lutowniczego Sn-Ag-Cu, dodali grafen. Dodatek grafenu zwiększył opór termodynamiczny wzrostu IMC i tym samym stłumił rozrost faz międzymetalicznych [119]. Naukowcy wykazali, że badana przez nich lutownia bezołowiowa wzmocniona intermetalem ma lepszą wytrzymałość mechaniczną od lutowni ołowiowej.

Wyniki badań przedstawione na rys. 84 potwierdzają, że proces lutowania został wykonany prawidłowo, a dobrane parametry umożliwiły na tyle prędkie schłodzenie lutu, że zadziałały mechanizmy opisane w literaturze, przejawiające się ograniczoną dyfuzją pierwiastków skutkującą:

- tworzeniem się dendrytycznej fazy β -Sn,
- ograniczeniem zarodkowania i wzrostu faz międzymetalicznych.

Taka struktura powinna przełożyć się na dobre własności mechaniczne połączenia, co potwierdzono wynikami zamieszczonymi w rozdziale 3.5 pracy.

Należy jednak podkreślić, że obszar badań nad lutowiną o charakterze kompozytowym intermetalicznym i formacjami międzymetalicznymi stanowi nadal dość znaczącą lukę badawczą. Jak podkreślają autorzy publikacji [120] efekty mechanizmu wzmacniającego, obserwowane przez różnych badaczy nie są silnie udowodnione i dobrze udokumentowane w literaturze naukowej, a zagadnienie stanowi temat aktualnych badań. Wyniki przedstawione w doktoracie wpisują się w tę lukę.

Zgodnie z informacjami zawartymi w literaturze [125] wielkość ziarn Ag_3Sn jest zależna od zawartości wagowej Al, który przy pewnych wartościach hamuje wzrost ziarn Ag_3Sn . Zahamowanie wzrostu fazy międzymetalicznej wpływa na procesy dyfuzji zachodzące wewnątrz eutektyki. Zahamowanie lub znaczne spowolnienie formowania się kruchych, rozrośniętych faz międzymetalicznych jest zjawiskiem pożądanym. Grubość warstwy IMC na styku lutu z podłożem Cu ma kluczowe znaczenie dla niezawodności lutowanych połączeń alternatorów samochodowych. W szczególności grubość warstwy IMC wpływa na niezawodność połączeń podczas długoterminowej eksploatacji, czy przypadkowego upuszczania elementu lutowanego (podczas produkcji, montażu w pojeździe itp.). Dlatego również rozpuszczanie Cu z podłoża miedzanego musi być ściśle kontrolowane w produktach przemysłowych, aby umożliwić utworzenie warstwy IMC o pożądanej grubości na styku. Otrzymana struktura eutektyczna na osnowie Sn z dodatkiem Pb, z nierozrośniętymi obszarami IMC jest zatem pożądana i zgodna z obserwacjami przedstawionymi w literaturze. Przykładowo Lee i in. (2000) stwierdzili, że grubość warstwy IMC na styku lutów Sn–Ag–Cu (lutów nie zawierających dodatku ołowiu) jest drastycznie wyższa niż w przypadku lutu eutektycznego, zawierającego domieszkę ołowiu. Zatem zastosowana kombinacja składu chemicznego lutowia: Sn–2%Ag–3%Pb–0,7%Cu–0,4%Al (Zen-11) w procesie łączenia miedzi jest właściwa. Zapewnia wytworzenie poprawnej struktury złącza z obszarami:

- eutektyki z fazami międzymetalicznymi typu Ag_3Sn , w której eutektyka tworzy barierę dyfuzyjną, zapobiegającą szybkiej reakcji między zastosowanym lutem a podłożem Cu, a cząstki Ag_3Sn ograniczają dyfuzję Sn determinując nadmierny rozrost Cu_6Sn_5 ,
- drobnymi cząstkami formułującej się fazy międzymetalicznej typu Cu_6Sn_5 , która jako druga faza wzmacniająca zachowuje swoje właściwości niezmienione podczas eksploatacji, wzmacniając w ten sposób stopy lutownicze, co potwierdzają dane literaturowe [22],

- obszarów fazy β -Sn.

Można zatem wnioskować, że:

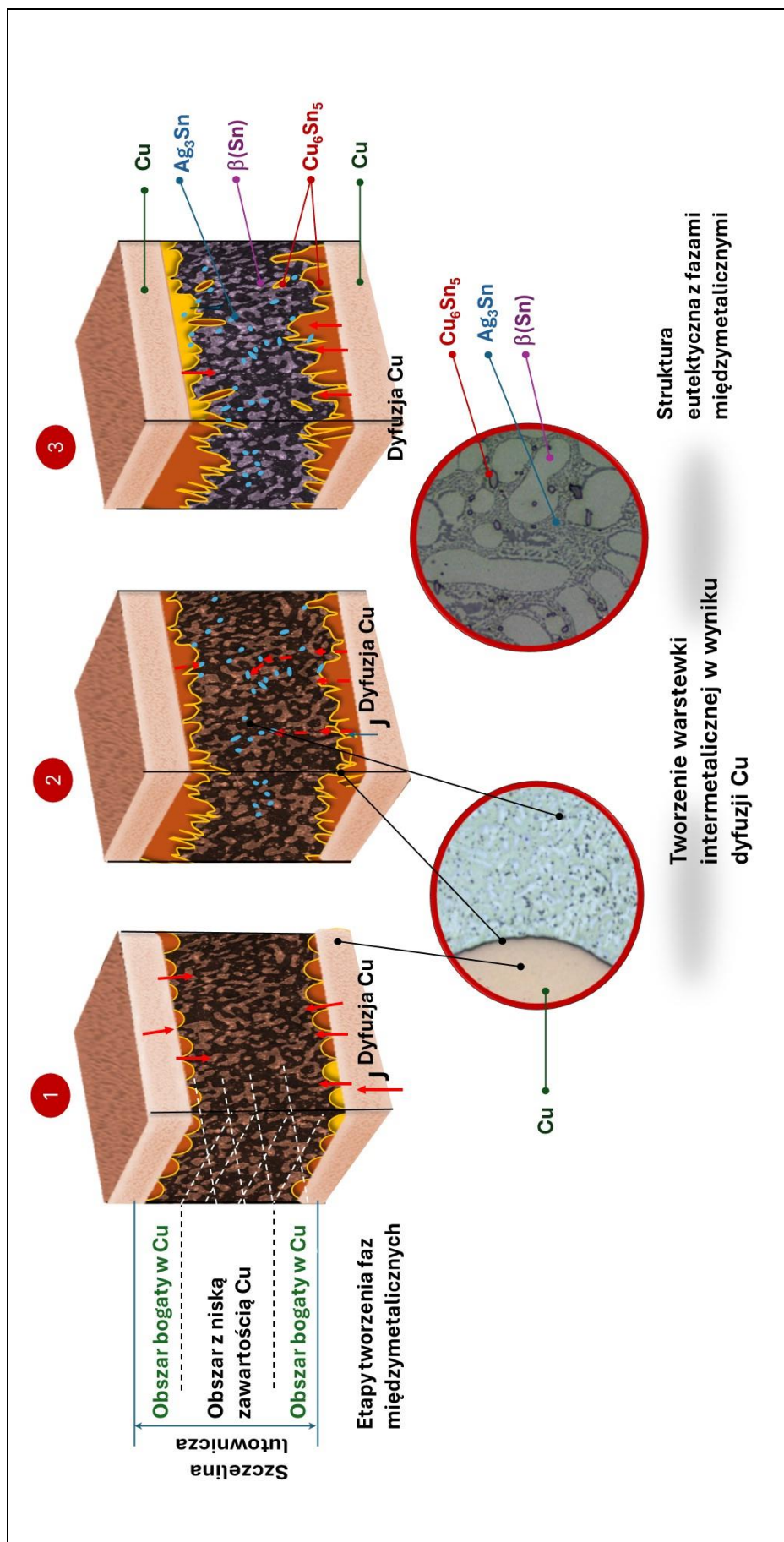
- proces lutowniczy został wykonany prawidłowo, a dobrany skład chemiczny lutu i parametry procesu umożliwiły ograniczenie dyfuzji pierwiastków i nadmierny rozrost faz intermetalicznych (tabl. 6),
- mechanizmy dyfuzyjne sprzyjające tworzeniu się drobnych faz międzymetalicznych typu Ag_3Sn oraz mechanizmy hamujące dyfuzję pierwiastków powodujących nadmierny rozrost faz Cu_6Sn_5 oraz Ag_3Sn są powtarzalne w procesie lutowniczym, wszystkie wykonane złącza oznaczone Zen-11 charakteryzowała ta sama struktura.

Tabl. 6. Skład chemiczny lutowiny a właściwości połączenia Zen-11

Zastosowanie	Skutek
0,4 %Al	Domieszkowanie lutu Al jest zasadne, ponieważ skutecznie przeciwdziała rozrostowi warstwy IMC, przez co pozytywnie wpływa na właściwości mechaniczne połączenia, spowolnia degradację właściwości mechanicznych i zwiększa odporność na uderzenia.
3% Pb	Dodatek ołowiu umożliwia wytworzenie eutektyki stanowiącej skuteczną barierę dyfuzyjną, zapobiegającą szybkiej reakcji między zastosowanym lutem a podłożem Cu. Wynik potwierdzają obserwacje strukturalne obszarów eutektycznych bez wydzielenia Cu oraz drobne wydzielenia Cu rejestrowane na granicach ziarn fazy β -Sn.
2% Ag	Ag łączy się z Sn i wydziela się na powierzchni eutektyki, tworząc pierwszą, twardą fazę międzymetaliczną Ag_3Sn oraz barierę dyfuzyjną dla Sn, przez co następuje ograniczenie nadmiernego rozrostu długiej kruchej i twardej fazy Cu_6Sn_5 .
< 0,7 % Cu (Cu pochodzi z lutowiny i częściowo z podłoża)	Tworzenie fazy międzymetalicznej Cu_6Sn_5 o charakterze wzmacniającym. Przy zadziałaniu mechanizmów ograniczających dyfuzję Sn w procesach metalurgicznych, powstaje nierozróżniona faza Cu_6Sn_5 . Faza tworzy inkluzje o charakterze wzmacniającym, odpowiada za mechanizm wzmocnienia dyfuzyjnego. Wyniki potwierdzają badania strukturalne w połączeniu z testami mechanicznymi.

Wyniki badań pozwalają na zaproponowanie następującego modelu wzrostu faz międzymetalicznych w lutowninie (rys. 85):

- etap 1 – kształtowanie się struktury eutektycznej i początek powstawania warstwy międzymetalicznej;
- etap 2 – reakcje chemiczne w lutowiu, tworzenie bardzo drobnych obszarów fazy Ag_3Sn i blokowanie dyfuzji Cu z podłoża;
- etap 3 – zahamowanie wzrostu warstwy międzymetalicznej na granicy separacji, zagęszczenie liczby drobnych wydzieleni fazy Ag_3Sn w eutektyce, tworzenie drobnych, nieskoagulowanych wydzieleni fazy Cu_6Sn_5 w eutektyce jako drugiej fazy wzmacniającej i zahamowanie wzrostu fazy Ag_3Sn .



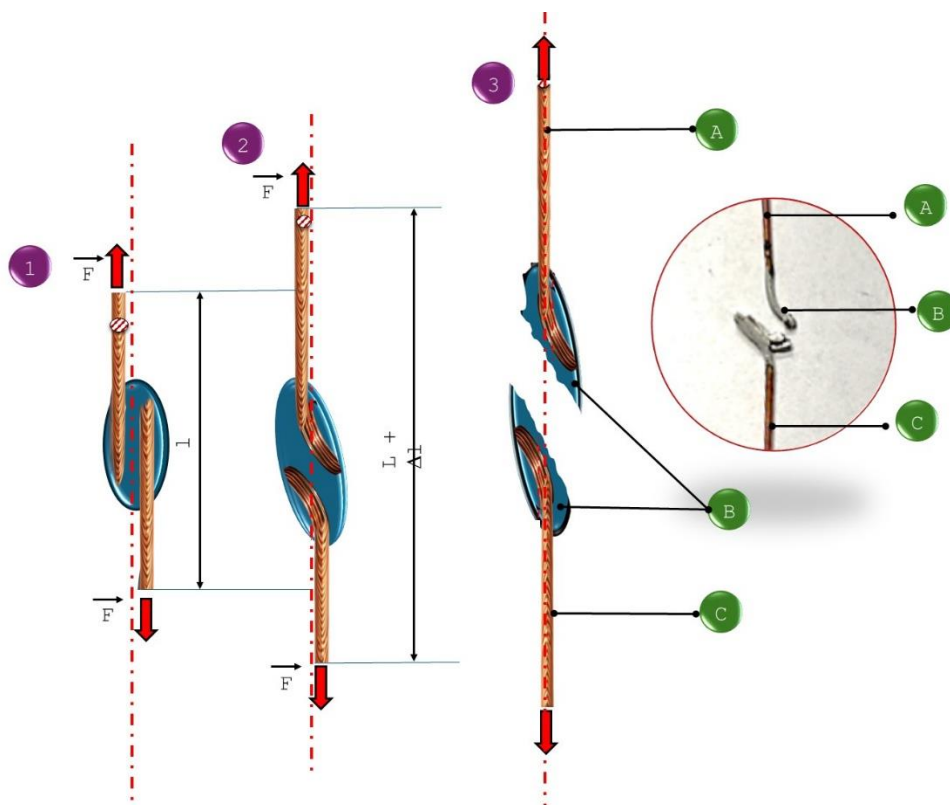
Rys. 85. Model wzrostu faz międzymetalicznych: etap 1) kształtowanie się struktury eutektycznej i początek powstawania warstwy międzymetalicznej; etap 2) reakcje chemiczne w lutowiu, tworzenie bardzo drobnych osadów fazy Ag₃Sn i blokowanie dyfuzji Cu z podłoża; etap 3) zahamowanie wzrostu warstwy międzymetalicznej na granicy separacji, zagęszczenie liczby drobnych wydzieleni fazy Ag₃Sn w eutektyce, tworzenie drobnych, nieskoagulowanych wydzieleni faz Cu₆Sn₅ w eutektyce jako drugiej fazy wzmocniającej i zahamowanie wzrostu fazy Ag₃Sn [125]

Dobre własności mechaniczne połączenia (wyniki przedstawione w rozdziale 4.5 pracy) wykonanego z nowo opracowanego lutu wynikają z otrzymanej struktury lutownicy w procesie łączenia materiałów.

6.4. Wytrzymałość a struktura nowo opracowanej lutownicy

Przy zachowaniu ustalonych warunków brzegowych procesu lutowniczego, można wytworzyć pożądaną strukturę złącza, charakteryzującą się dobrymi własnościami mechanicznymi. W procesie lutowania uzyskano mikrostrukturę charakteryzującą się drobnymi, równomiernie rozłożonymi twardymi fazami międzymetalicznymi w osnowie eutektycznej. Badania wytrzymałości (rozdział 3) potwierdziły lepsze własności złączy wykonanych z nowego lutu w stosunku do złączy obecnie stosowanych.

Połączenia lutowane uzyskane za pomocą nowo opracowanego lutu mają od 1,2 do 1,5 razy wyższą wytrzymałość na rozciąganie niż klasycznie stosowane połączenia ze stopu cyny (od Zen-1 do Zen-6). Na tak dobre właściwości złącza wpływa wiele czynników, głównie związanych ze strukturą otrzymanego lutu, zwilżalnością lutu podczas procesu wytwarzania złącza, szerokością szczeliny lutowniczej, zachowaniem się złącza pod wpływem sił rozciągających i ścinających, siłami kohezyjnymi między lutem a materiałem bazowym, poprawnością wykonanego złącza. Badane próbki wykonane z nowo opracowanych lutów (Zen-10 i Zen-11) podczas badań wytrzymałościowych pękały w złączu, a zarejestrowana siła zrywająca była znacznie wyższa niż siła potrzebna do zerwania klasycznego złącza wykonanego z dotychczas stosowanego lutu cynowo-ołowiowego (Zen-0). Schematycznie mechanizm pękania pokazano na rysunku 86. Zgodnie z wykresem na złącze działają siły rozciągające, powodujące wydłużenie i zwężenie przekroju poprzecznego próbki, a także siły ścinające powodujące charakterystyczne odkształcenie materiału na końcach spawanych drutów. Przy zastosowanych parametrach lutowania, otrzymane złącza pękały po przekątnej w lutownicy zgodnie z działaniem sił ścinających. Pęknięcia te były również związane z jednoczesnym działaniem sił rozciągających i ścinających, które powodowały znaczne odkształcenia materiału podstawowego.



Rys. 86. Model mechanizmu pęknięcia pod wpływem działania sił rozciągających i ścinających A – drut miedziany (pierwszy materiał), B – lut, C – drut miedziany (drugi materiał) [125]

Uzyskane wyniki (rozdział 4.5 pracy) oraz ich analiza w połączeniu z prezentowanymi modelami (rys.85 i 86) pozwalają stwierdzić, że w przypadku wykonanych złączy lutowanych, na właściwości mechaniczne, wytrzymałościowe badanych materiałów oprócz działających sił kohezji pomiędzy materiałem rodzimym i zastosowanym lutem wpływa struktura lutownicy, występowanie i rozkład w niej faz międzymetalicznych. Struktura ta decyduje w głównej mierze o wytrzymałości na ścinanie.

Badania są zgodne z obserwacjami poczynionymi przez naukowców dotyczącymi spoiw lutowniczych o różnych składach chemicznych, odmiennych niż skład autorskiego lutu Zen-11. Na przykład w [123-125] stwierdzono, że w połączeniach ze szczeliną lutowniczą, w mikrostrukturze lutu występuje strefa z niską zawartością Cu. To strefa, w której dyfuzja pierwiastków stopowych może być ograniczona z różnych powodów np. zbyt niską temperaturę i krótki czas lutowania. Jej objętość zwiększa się wraz z szerokością szczeliny i określa jej właściwości wytrzymałości na ścinanie. We wszystkich, analizowanych powyżej publikacjach materiał i struktura lutownicy pełniły decydującą rolę w testach wytrzymałościowych. Zgodnie z informacjami

przedstawionymi w literaturze, wielofazową mikrostrukturę lutu uzyskano jedynie przy zastosowaniu szczeliny o szerokości mniejszej niż 0,05 mm.

W takim materiale najprawdopodobniej decydującą rolę decydującą o własnościach mechanicznych złączy odgrywają mechanizmy związane z adhezją. W publikacji stwierdzono, że w połączeniach ze szczeliną lutowniczą większą niż 0,05 mm stopień wpływu mikrostruktury złącza na jego właściwości wytrzymałościowe wzrasta wraz ze wzrostem szerokości złącza. W takich połączeniach najważniejsze jest odpowiednie dobranie składu chemicznego lutu do procesu.

Ze względu na proces technologiczny wytwarzania alternatora, wzajemne spasowanie łączonych drutów miedzianych, bez odkształceń tych materiałów można uzyskać w zakresie 0,1-0,2 mm, próba uzyskania węższej szczeliny lutowniczej nie była powtarzalna dla nieautomatyzowanego procesu produkcyjnego. W związku z tym analiza uzyskanych wyników badań i porównanie ich z danymi literaturowymi pozwala stwierdzić, że na dobre właściwości wytrzymałościowe uzyskanego złącza istotny wpływ ma odpowiednio dobrany skład chemiczny lutowni, który zapewnił strukturę quasi-kompozytową z międzymetalicznymi fazami typu Cu_6Sn_5 i Ag_3Sn w osnowie złożonych eutektyk pięcioskładnikowych z obecnością proeutektrycznej fazy $\beta - \text{Sn}$, co zostało potwierdzone badaniami strukturalnymi. Analiza wyników badań potwierdza, że fazy międzymetaliczne odgrywają znaczącą rolę w umocnieniu lutowni w połączeniu lutowanym. Jak wykazano w poprzednim rozdziale, warunkiem wstępnym prawidłowego połączenia lutu i metalu nieszlachetnego jest wzajemna dyfuzja atomów łączonych faz, co skutkuje np. powstawaniem faz międzymetalicznych w eutektyce. Fazy międzymetaliczne są bardziej kruche niż czyste metale. Fazy te wykazują cechy materiałów kruchych o małym zakresie sprężystości, a ich obecność w postaci przerośniętych obszarów w złączu lutowniczym może znacznie zmniejszyć jego wytrzymałość zmęczeniową, zwłaszcza gdy faza międzymetaliczna występuje w postaci jednolitej warstwy na granicy faz między dyfundującym metalem a lutem. Jeśli jednak drobne wydzielения faz międzymetalicznych są równomiernie rozłożone w objętości złącza, co zaobserwowano podczas badania mikrostruktury nowo powstałych połączeń lutowanych, wzmacniają one złącze i zwiększają jego wytrzymałość mechaniczną. Właściwości mikrostruktury przekładają się na właściwości wytrzymałościowe złącza. Stąd też odnotowuje się wysoką wytrzymałość połączeń wykonanych z nowo opracowanego lutu w stosunku do złączy wykonanych z wcześniej stosowanych materiałów.

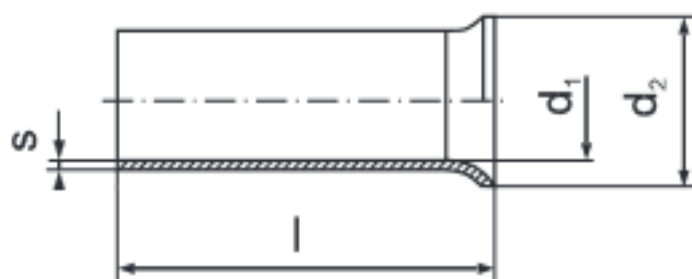
Grubość warstw, kształt i różnorodność faz międzymetalicznych powstających w procesie zależy głównie od składu chemicznego łączonych materiałów, czasu przebywania złącza lutowniczego powyżej temperatury likwidusu oraz szybkości schładzania się złącza bezpośrednio po procesie, a także od składników lutowniczych ograniczających nadmierny wzrost faz kruchych. Na wytrzymałość badanego połączenia lutowniczego ma wpływ kształt, forma i wielkość wtrąceń niemetalicznych, których nadmierny wzrost

został ograniczony przez dodatek Al. Wtrącenia niemetaliczne wzmocniły matrycę, uzyskując efekt podobny do mechanizmu zbrojenia występującego w materiałach kompozytowych. Należy zauważyć, że na wytrzymałość złącza wpływa również dobra zwilżalność i przyczepność lutowni do łączonych elementów miedzianych, które częściowo przyczyniają się do przenoszenia naprężeń rozciągających. Niewielkie różnice w wytrzymałości połączeń wykonanych z tego samego lutu są wynikiem nieco większej szerokości szczeliny lutowniczej (przy czym szerokość zawsze mieściła się w zakresie tolerancji dla procesu regeneracji alternatorów pojazdów samochodowych). Należy również podkreślić, że nie zauważono żadnych oderwań ani pęknięć na styku lutowni i materiału podłoża.

Opracowane nowe złącza lutowane, ze względu na uzyskiwaną powtarzalność wyników badań struktury w połączeniu z wysoką wytrzymałością na rozciąganie spełniają warunki do zastosowań na obiekcie rzeczywistym.

6.5. Testowanie złączy lutowanych na obiekcie rzeczywistym

W wyniku powyższych badań do regeneracji alternatorów samochodowych metodą lutowania wybrano dwie próbki lutów: Zen-10 oraz Zen-11 (tabl.2). W celu dostosowania procesu lutowniczego do warunków produkcyjnych, do połączeń miedzianych elementów alternatora wykorzystano miedzianą, ocynowaną tulejkę, której zadaniem jest zespolenie miedzianych połączeń i skupienie lutownicy we właściwym miejscu i stanie (rys. 87).



Rys. 87. Budowa i wymiary tulejki [opracowanie własne]

W tabl. 7 wypisano parametry zastosowanej tulejki. W skład połączeń regenerowanego alternatora wchodzi: uzwojenie stojana, układ prostowników i regulatora napięcia (rys. 88). Schemat połączenia elementów alternatora przedstawiono na rysunku 89.

Tabl. 7. Parametry tulejki

Materiał	materiał końcówki: Cu (miedź), pokrycie: cynowane galwanicznie
Przekrój	10 mm
Wymiary	s-0,2 mm; d1-8 mm; d2-8,3 mm; l-16 mm



a.



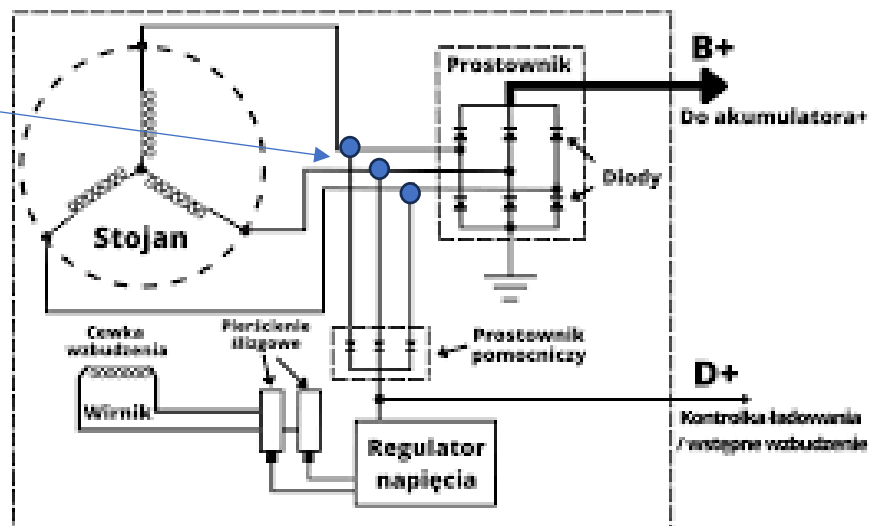
b.



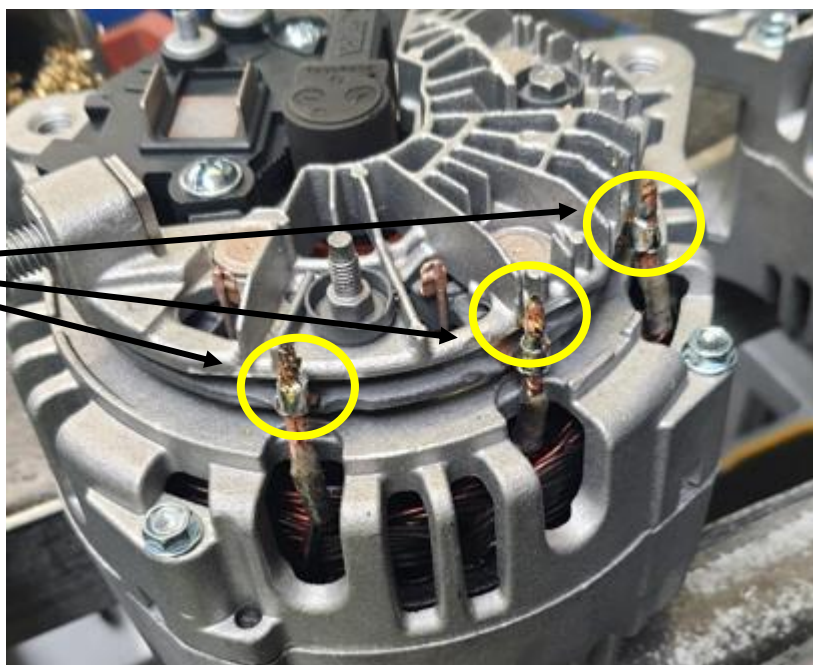
c.

Rys. 88. Elementy lutowane za pomocą tulejki: a) uzwojenie stojana, b) układ prostowników, c) regulator napięcia [opracowanie własne]

Schemat miejsc połączeń
lutowanych
w regenerowanym
alternatorze



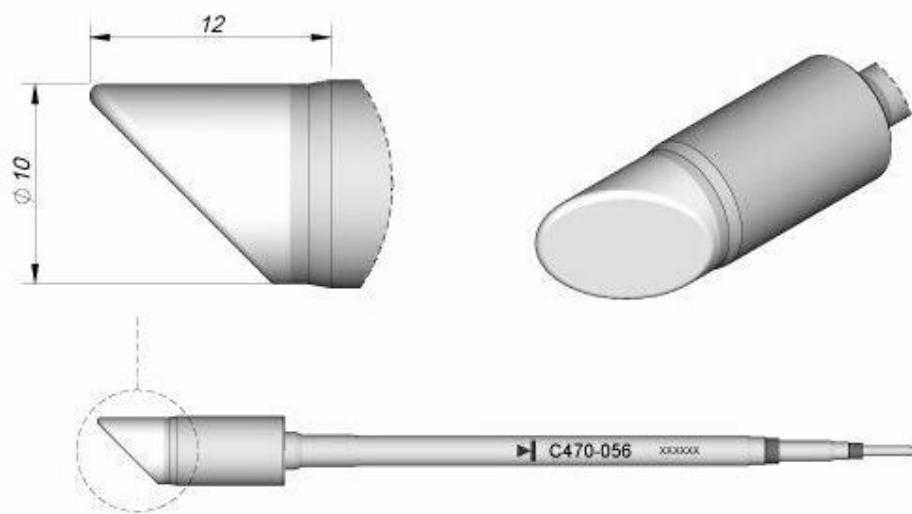
Miejsca połączeń
lutowanych



Rys. 89. Schemat i miejsca połączenia elementów alternatora [opracowanie własne]

Powierzchnie wszystkich badanych złączy w procesie lutowania zostały odpowiednio wyczyszczone mechanicznie i zwilżone topnikiem kalafoniowym o symbolu FLUX-TKP-101.

W celu wykonania połączenia zastosowano lutownicę CD-2BQF firmy JBC z grotem JBC C470, ściętym, o średnicy 10 mm (rys.90) dostarczonym przez firmę zewnętrzną.



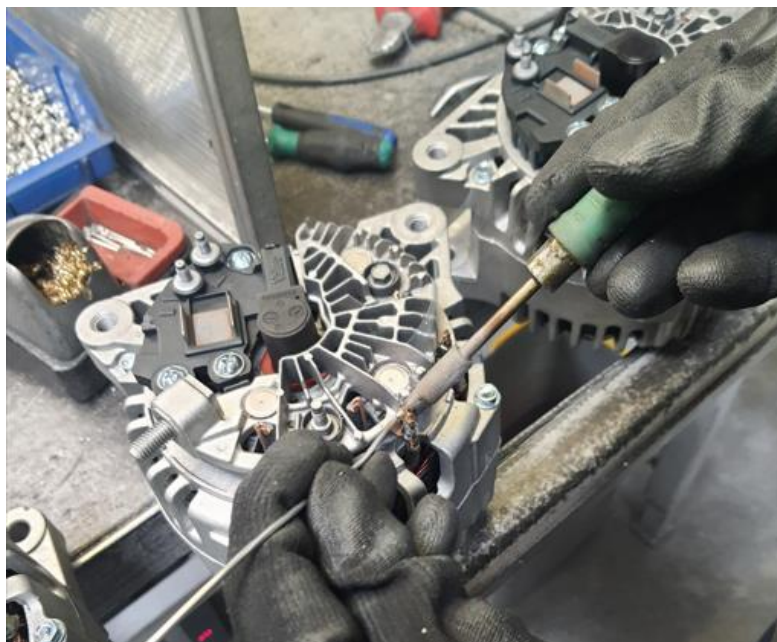
Rys. 90. Budowa i wymiary grotu używanego w regeneracji alternatora samochodowego [130]

Po odpowiednim przygotowaniu i złożeniu wszystkich elementów elektrycznych regenerowanego alternatora samochodowego, wszystkie wspólne punkty połączeń elektrycznych zwilżono topnikiem kalafioniowym o symbolu FLUX-TKP-101 i założono miedzianą, ocynowaną tulejkę (rys. 91).



Rys. 91. Przygotowane połączenia elektryczne regenerowanego alternatora samochodowego [opracowanie własne]

Następnie przystąpiono do procesu lutowania przykładając, rozgrzaną do temperatury 380 °C końcówkę grota do miedzianej, ocynowanej tulejki, obejmującej połączenia elementów elektrycznych alternatora (rys. 92). Wykonano cztery próby testowanych złączy regeneracyjnych, pod dwa dla każdej próbki lutu Zen-10 oraz Zen-11 (tabl. 2).



Rys. 92. Proces lutowania połączeń elektrycznych regenerowanego alternatora samochodowego [opracowanie własne]

6.6. Badania elektryczne wybranych złączy lutowanych

Badania obciążalności prądowej alternatorów koncentrują się na określeniu, jak wiele prądu alternator może dostarczać przy różnych poziomach obciążenia oraz prędkościach obrotowych. Jest to kluczowe zagadnienie, które wpływa na zdolność alternatora do zasilania systemów elektrycznych pojazdu oraz ładowania akumulatora w różnych warunkach pracy silnika. Postanowiono przeprowadzić badania na obiekcie rzeczywistym. W tym celu porównano parametry elektryczne alternatora fabrycznie nowego oraz alternatorów zregenerowanych wg autorskiej metody z wykorzystaniem badanych lutów w pracy (Zen-10 i Zen-11).

6.6.1. Test alternatora fabrycznie nowego

Do testowania poprawności działania alternatorów samochodowych użyto maszyny testującej Starter&Alternator Tester MD-2s (rys.93). To zaawansowane urządzenie przeznaczone do testowania alternatorów oraz rozruszników, używane w laboratoriach diagnostycznych. Maszyna ta umożliwia dokładne sprawdzenie parametrów elektrycznych i mechanicznych, oceniając wydajność, sprawność oraz ewentualne usterki testowanych komponentów. Po przeprowadzeniu testu, maszyna testująca przesyła raport przedstawiający kluczowe parametry alternatora, potwierdzając tym samym sprawność alternatora.

Do wygenerowania raportu przedstawiającego fabryczne dane alternatora samochodowego użyto alternator firmy Valeo o numerze fabrycznym 439674.





Rys. 93. Testy alternatora na maszynie testującej Starter&Alternator Tester MD-2s

Przebieg testu alternatora na maszynie testującej Starter & Alternator Tester MD-2s

Test alternatora samochodowego odbywa się w kilku etapach, które pozwalają dokładnie sprawdzić parametry elektryczne i mechaniczne alternatora. Testowanie alternatora odbywa się w kilku krokach z uwzględnieniem odpowiednich procedur umożliwiających przeprowadzenie dokładnego testu.

- Przygotowanie do testu:

Test alternatora na maszynie Starter & Alternator Tester MD-2s rozpoczyna się od odpowiedniego przygotowania urządzenia. Testowany alternator zostaje zamocowany na stanowisku testowym, a następnie podłącza się przewody testowe. Zacisk prądowy (+) maszyny testującej łączy się z wyjściem alternatora (B+), a masa (-) urządzenia jest podłączona do korpusu urządzenia. W zależności od typu alternatora, podłącza się również sygnały sterujące (np. linie komunikacyjne LIN/BSS), w celu oceny pracy

regulatora napięcia. Pasek napędowy maszyny testującej zostaje napięty i połączony z kołem pasowym alternatora, aby umożliwić symulację pracy silnika.

- Konfiguracja maszyny testującej

Kolejnym etapem jest konfiguracja maszyny testującej, która wymaga ustawienia parametrów takich jak: napięcie nominalne alternatora (12 V lub 24 V), prędkości obrotowej symulowanego silnika oraz poziomu obciążenia elektrycznego. Na panelu sterowania maszyny wybiera się odpowiedni tryb testowania. Tester MD-2s oferuje zarówno tryb automatyczny (w pełni zautomatyzowany test), jak i ręczny (użytkownik sam definiuje, które parametry mają być badane). Operator testu wprowadza informacje o modelu alternatora oraz specyfikacje producenta (napięcie robocze, maksymalny prąd ładowania, oczekiwane wartości napięcia wyjściowego).

- Uruchomienie testu alternatora

Po uruchomieniu maszyny napęd alternatora zostaje aktywowany, co pozwala na rozpoczęcie właściwego testu. W trakcie testu najpierw sprawdza się napięcie wyjściowe alternatora w warunkach pracy jałowej, czyli bez obciążenia, oczekując napięcia w granicach 13,8–14,5V. Następnie przeprowadza się test pod obciążeniem, aby ocenić zdolność alternatora do utrzymania stabilnego napięcia przy różnych poziomach obciążenia. Maszyna zaczyna napędzać wał alternatora, symulując pracę silnika w pojeździe. Prędkość obrotowa alternatora jest regulowana w szerokim zakresie – od niskich obrotów (np. 500 RPM) do wysokich (do 8000 RPM). Podczas testu urządzenie symuluje różne obciążenia elektryczne, jak włączone światła, klimatyzacja, czy inne urządzenia pobierające prąd. To pozwala ocenić, jak alternator zachowuje się przy różnych poziomach obciążenia. W ramach testu weryfikowana jest również praca regulatora napięcia, który musi utrzymywać napięcie w dopuszczalnym zakresie przy różnych prędkościach obrotowych i obciążeniach. Kolejnym krokiem jest sprawdzenie diod prostowniczych, które odpowiadają za przekształcanie prądu przemiennego na stały. Na koniec przeprowadza się test maksymalnej wydajności alternatora, sprawdzając jego zdolność do generowania prądu przy maksymalnym obciążeniu i prędkości obrotowej.

- Raportowanie testu

Wyniki testu są automatycznie rejestrowane przez maszynę i zapisywane w postaci raportu kontrolnego. Wygenerowany raport dostarcza operatorowi szczegółowych informacji na temat parametrów testowych i wyników działania regenerowanego alternatora porównując je z wartościami katalogowymi nowego alternatora.

Testy alternatora podłączonego do maszyny testującej Starter&Alternator Tester MD-2s obejmują:

- napięcie wyjściowe (Voltage Setpoint). Jeśli alternator jest sprawny, napięcie nie powinno być mniejsze niż 13,5 V. Optymalna wartość, w przypadku sprawnego alternatora, powinna oscylować w granicach 13,5-14,9 V.

- prąd obciążenia (Load Current). Parametr informujący czy alternator skutecznie dostarcza prąd przy rosnącym obciążeniu, co świadczy o jego wysokiej sprawności energetycznej i zdolności do pracy pod dużym obciążeniem. W raporcie generowane są charakterystyki przedstawiające obciążalność prądową, której wartość zależy bezpośrednio od prędkości obrotowej wirnika i stopnia obciążenia.

Testy przykładowego nowego alternatora (zał.1) obejmowały różne poziomy obciążenia od 19,9 A do 41,4 A, przy zmiennych prędkościach obrotowych alternatora.

Wyniki pomiaru obciążalności prądowej:

- 19,9 A przy 1600 RPM,
- 27,4 A przy 2000 RPM,
- 32,0 A przy 2400 RPM,
- 35,7 A przy 3000 RPM,
- 38,9 A przy 4000 RPM,
- 41,4 A przy 6000 RPM.

Wyniki te pokazują, że badany alternator jest zdolny do dostarczania wysokiego prądu przy relatywnie niskich prędkościach obrotowych. Przykładowo, przy 2000 RPM generuje ponad 27,4 A, co jest istotne dla zapewnienia zasilania nawet przy umiarkowanych prędkościach silnika.

1. Prąd tętnienia (Ripple Current). Prąd tętnienia jest wynikiem fluktuacji w prądzie wyjściowym alternatora, które wynikają z działania prostownika (konwersja prądu przemiennego na stały). Wysoki prąd tętnienia, może wpływać negatywnie na systemy elektroniczne pojazdu, szczególnie jeśli nie są odpowiednio zabezpieczone. Aby uniknąć negatywnych skutków, układ ładowania powinien być zaprojektowany z uwzględnieniem filtracji tych tętnień, np. za pomocą kondensatorów lub innych elementów wygładzających.
2. Prędkość włączenia (Turn ON Speed) odnosi się do minimalnej prędkości obrotowej wirnika alternatora, przy której alternator zaczyna efektywnie generować prąd i zasilać układ elektryczny pojazdu oraz ładować akumulator. Innymi słowy, jest to prędkość, przy której alternator "włącza się" i zaczyna dostarczać użyteczne napięcie i prąd. Alternator musi osiągnąć prędkość Turn ON Speed, aby skutecznie rozpocząć ładowanie akumulatora. Jeśli prędkość ta jest zbyt wysoka, w warunkach niskich prędkości obrotowych silnika (np. na biegu jałowym), akumulator może nie być odpowiednio ładowany, co może prowadzić do jego rozładowania. Niższa wartość tego parametru jest korzystna, ponieważ zapewnia lepszą wydajność alternatora w warunkach jazdy miejskiej lub na biegu jałowym.
3. Test napięcia wyjściowego alternatora to jedno z podstawowych badań diagnostycznych, mające na celu sprawdzenie, czy alternator prawidłowo utrzymuje napięcie w określonym zakresie podczas pracy w różnych warunkach

obciążenia i prędkości obrotowej. Głównym zadaniem tego testu jest weryfikacja działania regulatora napięcia, który odpowiada za stabilizację napięcia ładowania akumulatora oraz zasilanie odbiorników elektrycznych pojazdu. Podczas testu alternator pracuje najpierw bez obciążenia, a następnie pod różnymi poziomami obciążenia przy ustalonych prędkościach obrotowych. Obserwuje się napięcie wyjściowe, które powinno utrzymywać się w wąskim przedziale – dla instalacji 12-voltowej zazwyczaj między 13,5 V a 14,9 V. Jeżeli napięcie spada poniżej lub przekracza ten zakres, może to świadczyć o niesprawnym regulatorze, uszkodzonych diodach prostownika, problemach z uzwojeniem wzbudzenia lub słabym kontakcie w instalacji.

4. Prąd obciążenia (Load Current) w badaniu alternatorów to próba obciążeniowa, której celem jest sprawdzenie, jaki maksymalny prąd wyjściowy może dostarczyć alternator w warunkach rzeczywistego obciążenia. W trakcie testu alternator jest napędzany silnikiem testowym z ustaloną prędkością obrotową, a do jego wyjścia podłączane jest regulowane sztuczne obciążenie (np. elektroniczne lub rezystancyjne). Obciążenie to jest stopniowo zwiększane, a tester obserwuje, czy alternator jest w stanie utrzymać stabilne napięcie – zazwyczaj w zakresie 13,5–14,5 V – przy jednoczesnym wzroście prądu aż do deklarowanej przez producenta maksymalnej wartości.

Raport (zał.1) zawiera również dodatkowe informacje, takie jak prędkości obrotowe, częstotliwości sygnałów i inne parametry techniczne, które pozwalają ocenić wydajność i niezawodność alternatora w różnych warunkach operacyjnych.

Podsumowując, badania obciążalności prądowej alternatorów mają kluczowe znaczenie dla oceny ich wydajności w warunkach eksploatacyjnych. Wyniki tych testów pozwalają na zrozumienie, w jakich warunkach alternator będzie pracował optymalnie, jak reaguje na zmiany obciążenia oraz jak wpływa na całą instalację elektryczną pojazdu.

6.6.2. Test alternatorów zregenerowanych z zastosowaniem wybranych lutów

Dobór odpowiedniego stopu lutowniczego podczas regeneracji alternatora ma kluczowy wpływ na jego wydajność, trwałość oraz stabilność elektryczną. Alternatory, jako urządzenia elektromechaniczne, składają się z elementów wymagających wysokiej jakości połączeń elektrycznych, takich jak uzwojenia stojana i wirnika, diody prostownicze czy elementy regulatora napięcia. Połączenia te muszą być odporne na zmienne warunki pracy, w tym wysokie temperatury, wibracje i prądy o dużym natężeniu. Oto szczegółowy wpływ doboru stopu lutowniczego na wynik regeneracji alternatora:

Do badań obciążalności prądowej połączeń lutowanych użytych podczas regeneracji alternatorów samochodowych, wybrano dwie próbki lutów: Zen-10 oraz Zen-11 (tabl.2). Każdą próbkę wykorzystano w dwóch różnych zregenerowanych alternatora (dwóch producentów). Cztery zregenerowane alternatory (po dwa na każdą

próbkę lutu) poddano testom podłączając je do maszyny testującej Starter&Alternator Tester MD-2s (rys. 76). Do regeneracji wybrano alternatory dwóch różnych producentów BOSCH (próbkę oznaczono literką B) i VALEO (próbkę oznaczono literką V). Połączenia lutowane w testowanych alternatorach, w każdym przypadku, wykonano z użyciem miedzianej, ocynowanej tulejki wypełniając je odpowiednim lutem Zen-10 w alternatorach oznaczonych symbolem V1 i B1 oraz lutem Zen-11 w alternatorach oznaczonych symbolem V2 i B2.

Na podstawie załączonego testu alternatora fabrycznie nowego stwierdzono że, istotnymi parametrami, które należy brać pod uwagę przy testowaniu lutowanych połączeń, są: napięcie wyjściowe określające stabilność napięcia wyjściowego, prąd tętnienia, który nie właściwie dobrany może powodować negatywne skutki podczas działania układów elektrycznych pojazdu. oraz najważniejszy parametr elektryczny alternatora prąd obciążenia który określa ilość prądu generowanego przez alternator przy danym obciążeniu i prędkości obrotowej. Parametr ten jest istotny, ponieważ pozwala ocenić, jak efektywnie alternator zasila systemy elektryczne pojazdu oraz ładuje akumulator przy różnych warunkach eksploatacyjnych. Wyniki testu przedstawiono w tablicy 8.

Tabl. 8. Wyniki badań parametrów elektrycznych połączeń lutowanych w regenerowanych alternatorach

Symbol próbki	Symbol alternatora	Napięcie wyjściowe (Voltage Setpoint)	Prąd tętnienia (Ripple Current)	Prąd obciążenia (Load Current)
Zen-10	V1	14,18 V	26,4 A	37,4 A przy 1600 RPM 49,0 A przy 1800 RPM 58,9 A przy 2000 RPM 71,3 A przy 2400 RPM 87,6 A przy 3500 RPM 94,2 A przy 5000 RPM 96,3 A przy 6000 RPM
Zen-10	B1	14,29 V	23,7 A	62,6 A przy 1600 RPM 99,0 A przy 2000 RPM 120,2 A przy 2400 RPM 135,7 A przy 3000 RPM 146,1 A przy 4000 RPM 151,0 A przy 5000 RPM 154,3 A przy 6000 RPM

Zen-11	V2	14,76 V	14,6 A	36,1 A przy 1600 RPM 56,8 A przy 1800 RPM 72,7 A przy 2000 RPM 97,5 A przy 2400 RPM 125,0 A przy 3500 RPM 136,3 A przy 5000 RPM 139,4 A przy 6000 RPM
Zen-11	B2	14,88 V	19,8 A	64,8A przy 1600 RPM 106,7A przy 2000 RPM 132,0A przy 2400 RPM 150,6A przy 3000 RPM 163,7 A przy 4000 RPM 169,8 A przy 5000 RPM 173,5 A przy 6000 RPM

Najlepszymi parametrami charakteryzuje się próbka Zen-11, dla której uzyskano najwyższe napięcie wyjściowe i stosunkowo niski prąd tężnienia. Szczegółową analizę wyników przedstawiono w kolejnym rozdziale 6.6.3

6.6.3. Analiza wyników testów zregenerowanych alternatorów

Porównanie wyników testów alternatorów (tabl. 8) V1, V2, B1, B2 pozwala zidentyfikować pewne różnice, które są istotne dla oceny jakości połączeń lutowanych, przy odpowiednim doborze właściwych stopów lutowniczych.

Z zebranych wyników przedstawionych tabeli 8 porównano pomiary czterech alternatorów dwóch różnych producentów (V1, B1, V2, B2) z zastosowaniem połączeń lutowanych z wybranymi stopami luty Zen-10 (alternatory V1 i B1) oraz Zen-11 (alternatory V2 oraz B2) pod kątem trzech kluczowych parametrów: napięcia wyjściowego, prądu tężnienia i prądu obciążenia przy różnych prędkościach obrotowych silnika (RPM). Dokonując analizy uzyskanych wyników wypisano parametry, które zdecydowanie przekładają się na korzyść alternatorów zregenerowanych lutem o składzie próbki Zen-11 (V2 i B2) w porównaniu do Zen-10 (V1 i B1).

Parametry, które brano pod uwagę podczas testowania parametrów elektrycznych zregenerowanych alternatorów to:

- napięcie wyjściowe określające stabilność napięcia wyjściowego,
- prąd tężnienia, który nie właściwie dobrany może powodować negatywne skutki podczas działania układów elektrycznych pojazdu.
- prąd obciążenia który określa ilość prądu generowanego przez alternator przy danym obciążeniu i prędkości obrotowej.

Analiza wyników testów alternatorów (tabl. 8) wskazuje że:

1. Alternatory Zen-11 wykazywał wyższe napięcie wyjściowe (V2: 14,76 V, B2: 14,88 V) w porównaniu do alternatorów Zen-10 (V1: 14,18 V, B1: 14,29 V). Wyższe napięcie pozwala na lepsze ładowanie akumulatora i stabilniejsze zasilanie systemu elektrycznego, zwłaszcza przy większych obciążeniach.
2. Alternatory z grupy Zen-11 (V2: 14,6 A, B2: 19,8 A) oznaczał się znacznie niższym prądem tętnienia w porównaniu do grupy Zen-10 (V1: 26,4 A, B1: 23,7 A). Mniejszy prąd tętnienia oznacza lepszą stabilizację napięcia i mniejsze zakłócenia w systemie elektrycznym, co wpływa pozytywnie na stabilność i żywotność podłączonych urządzeń.
3. Zen-11 B2 dostarczał najwyższy prąd obciążenia ze wszystkich próbek (173,5 A przy 6000 RPM), co czyni go bardziej efektywnym w systemach wymagających dużej mocy. Również Zen-11 V2 zapewnia wyższy prąd obciążenia niż Zen-10 V1, co pokazuje, że alternatory z grupy Zen-11 są lepiej przystosowane do zasilania systemów o większym zapotrzebowaniu na prąd przy wyższych obrotach.

Po analizie powyższych parametrów można zaobserwować również lepszą wydajność ogólną zregenerowanych alternatorów:

Alternatory z grupy Zen-11 wykazują bardziej zrównoważone parametry, łącząc niższy prąd tętnienia, wyższe napięcie i wyższy prąd obciążenia. To czyni je bardziej wydajnymi, stabilnymi i odpowiednimi do zasilania wymagających systemów elektrycznych w porównaniu do grupy Zen-10.

Z powyższych wyników nasuwają się wnioski że alternatory zregenerowane lutem o symbolu Zen-11 mają niższy prąd tętnienia, wyższe napięcie wyjściowe oraz wyższy prąd obciążenia, co czyni je lepszym wyborem do zastosowań wymagających stabilności i mocy przy dużych obciążeniach w szczególności w alternatorach samochodowych.

7. ANALIZA WPŁYWU AUTORSKIEJ METODY LutowANIA NA JAKOŚĆ REGENEROWANYCH ALTERNATORÓW SAMOCHODOWYCH NA PODSTAWIE RAPORTU REKLAMACJI OD MOMENTU ZAKOŃCZENIA BADAŃ

Celem niniejszego raportu jest szczegółowa analiza wpływu zastosowania autorskiej metody lutowania, z wykorzystaniem stopu lutowniczego Zen-11 Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al, na jakość regenerowanych alternatorów samochodowych. Analiza opiera się na danych dotyczących reklamacji i zwrotów związanych z alternatorami regenerowanymi przed i po wdrożeniu tej innowacyjnej metody lutowania w Zakładzie regeneracji alternatorów i rozruszników samochodowych AS-PL w Lubichowie.

Analiza została przeprowadzona w dwóch okresach.

Okres I obejmuje dane po wprowadzeniu szkoleń pracowników ale przed wprowadzeniem autorskiej metody lutowania czyli regeneracji z wykorzystaniem tradycyjnych stopów lutowniczych. Dane dotyczące reklamacji, typów uszkodzeń oraz czasów życia alternatorów przed awarią zostały zebrane z raportów firmy.

Okres II przedstawia dane po wprowadzeniu autorskiej metody lutowania, opartej na stopie lutowniczym Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al (Zen-11).

W badaniu uwzględniono dane o 2000 alternatorach regenerowanych w dwóch okresach. W każdym okresie regeneracji uwzględniono po 1000 jednostek sprzedanych zregenerowanych alternatorów. Dane z poszczególnych okresów zamieszczono w tabeli 9.

Tabl. 9. Dane dotyczące reklamacji przed i po wdrożeniu autorskiego rozwiązania

Okres	Liczba alternatorów regenerowanych	Reklamacje związane z połączeniami lutowanymi	Typ reklamacji
Okres I	1000	74	Elektryczne: 28, Mechaniczne: 12, Lutowanie: 34
Okres II	1000	18	Elektryczne: 5, Mechaniczne: 9, Lutowanie: 4

7.1. Wnioski z analizy wpływu autorskiej metody lutowania na jakość regenerowanych alternatorów samochodowych

Spadek liczby reklamacji i zwrotów o 56 jednostek wskazuje na wyraźną poprawę jakości regeneracji alternatorów w Okresie II. Oznacza to, że wdrożenie nowej metody lutowania miało pozytywny wpływ na niezawodność alternatorów.

Znaczny spadek reklamacji związanych z lutowaniem (z 34 do 4) sugeruje, że nowy stop lutowniczy oraz zmodyfikowany proces lutowania poprawił jakość połączeń lutowanych, zmniejszając liczbę uszkodzeń spowodowanych błędami lutowania.

Zmniejszenie reklamacji elektrycznych z 28 do 5 wskazuje na poprawę stabilności połączeń elektrycznych, co może być wynikiem bardziej precyzyjnego lutowania, które redukuje ryzyko zwarc i innych problemów elektrycznych.

Spadek reklamacji mechanicznych z 12 do 9 sugeruje, że poprawa jakości lutowania nie miała większego wpływu na wytrzymałość mechaniczną alternatorów. Spadek może świadczyć o dokładniejszym montażu mechanicznym podczas regeneracji na co zwracano uwagę pracownikom podczas szkoleń.

Wskaźnik reklamacji i zwrotów znacznie spadł z 7.4% w okresie I do 1.8% w okresie II, co potwierdza skuteczność nowej metody lutowania i znaczną poprawę jakości regenerowanych alternatorów.

Wprowadzenie autorskiej metody lutowania, opartych na stopie lutowniczym Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al, przyczyniło się do znaczącej redukcji liczby reklamacji i zwrotów regenerowanych alternatorów. Szczególnie istotną poprawę zauważono w zakresie reklamacji związanych z lutowaniem, które zmniejszyły się o 88%. Te zmiany świadczą o lepszej jakości połączeń lutowanych i większej niezawodności regenerowanych alternatorów, co może przyczynić się do poprawy reputacji firmy oraz zwiększenia jej konkurencyjności na rynku.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Alternator to urządzenie elektryczne stosowane w pojazdach, które przekształca energię mechaniczną w energię elektryczną, aby zasilać układy elektryczne pojazdu i ładować akumulator. Działa na zasadzie indukcji elektromagnetycznej, generując napięcie przemienne. Alternatory są niezbędne w nowoczesnych pojazdach, ponieważ dostarczają energię nie tylko do rozruchu, ale również do zasilania oświetlenia, systemów komfortu, a także do zapewnienia pracy rozmaitych czujników i systemów elektronicznych w pojazdach.

Alternator to kluczowy element w systemie elektrycznym pojazdu, którego zadaniem jest ładowanie akumulatora i dostarczanie energii elektrycznej do różnych podzespołów samochodowych. Z biegiem czasu alternatory mogą ulec uszkodzeniom związanym z normalnym zużyciem, uszkodzeniami mechanicznymi, przepięciami, czy problemami z połączeniami elektrycznymi.

Awaria alternatora może prowadzić do poważnych problemów w funkcjonowaniu pojazdu. Poniżej różne typy uszkodzeń alternatorów, ich przyczyny oraz możliwe skutki:

- uszkodzenia mechaniczne alternatora do których zalicza się m. in. zużycie łożysk czy uszkodzenie wirnika i stojana;
- uszkodzenia elektryczne alternatora. Zalicza się do nich: uszkodzenie uzwojeń alternatora, uszkodzenie diod prostowniczych lub uszkodzenie regulatora napięcia;
- uszkodzenia związane z eksploatacją i niewłaściwym użytkowaniem. W konsekwencji niewłaściwej eksploatacji może wystąpić przegrzanie alternatora, wniknięcie zanieczyszczeń lub wilgoci do wnętrza alternatora co prowadzi do uszkodzeń mechanicznych, korozji lub zwarcia w układzie elektrycznym, niewłaściwe napięcie ładowania akumulatora.

Regeneracja alternatorów jest procesem, który polega na przywróceniu pełnej sprawności urządzenia, które zostało uszkodzone lub zużyte w wyniku intensywnej eksploatacji. W praktyce proces ten wymaga zastosowania różnych technologii, w tym lutowania, naprawy mechanicznych części, a także testowania i oceny jakości w celu zapewnienia niezawodności urządzenia.

Postęp w motoryzacji tworzony jest z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów i rodzajów łączenia również w podzespołach będących składnikiem systemu motoryzacyjnego. Producenci coraz częściej wykorzystują w technologii automotive metody połączeń za pomocą specjalistycznych lutów wieloskładnikowych. Materiałami, które spełniają kryteria jakie stawia dziedzina transportu, są luty wieloskładnikowe trzy, czero lub pięcioskładnikowe, o wysokiej wytrzymałości. Nowoczesne luty charakteryzują się szeregiem właściwości, które różnią je od tradycyjnych lutów.

Głównym celem pracy było opracowanie nowego sposobu regeneracji podzespołów alternatorów samochodowych, który obejmuje dobór lutu do połączeń podzespołów i ustalenie parametrów procesu regeneracji.

Badania rozpoznawcze miały na celu:

- przebadanie dostępnych na rynku stopów lutowniczych;
- ocenić jakości połączeń lutowanych;
- sprawdzenie czy zaproponowane rozwiązanie stopu lutowniczego zapewni niezawodność i trwałość zregenerowanego alternatora;
- spełnienie norm i standardów jakości zaproponowanego rozwiązania;
- poprawę procesów regeneracyjnych;
- przeprowadzenie testów zmęczeniowych. Ocena, jak połączenia lutowane reagują na cykle obciążeniowe i czy mogą prowadzić do awarii w dłuższym okresie użytkowania.

W celu sprawdzenia autorskiego lutu wieloskładnikowego dobrano odpowiednie parametry stopów i wykonano badania sprawdzające przydatność rozwiązania:

- badania wizualne
- analiza próbnych złączy lutowanych pod mikroskopem skaningowym
- badania wytrzymałości na rozciąganie złączy lutowanych
- radiografia przemysłowa

Z badań rozpoznawczych wynikało, że najlepszym materiałem wykorzystanym w połączeniach lutowanych są luty o stopach cynowych wieloskładnikowych takie jak próbki o oznaczeniu Zen-5 (skład: Sn-0,7% Cu), Zen-9 (skład: Sn-2% Ag-0,8% Al), Zen-10 (skład: Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu), Zen-11 (skład: Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu-0,4% Al).

Wycofanie lutów ołowiowych zgodnie z dyrektywami RoHS nie zawsze niesie ze sobą oczekiwane skutki trwałości połączeń lutowanych mimo stosowania lutów bezołowiowych o różnych składach stopowych np. SAC. Dzięki zastosowaniu niewielkiej ilości ołowiu znacząco poprawiają się właściwości połączeń lutowanych takie jak płynność stopu lutowniczego, niższa temperatura topnienia stopu lutowniczego, dzięki czemu lutowanie staje się łatwiejsze i mniej ryzykowne ze względu na możliwość uszkodzenia termicznego komponentów, zwiększenie odporności stopów lutowniczych na pękanie i kruchość. Elastyczność lutu ołowiowego zmniejsza ryzyko pękania połączeń lutowanych w wyniku naprężeń termicznych co wpływa na dłuższą trwałość lutowanych połączeń.

Podczas badań rozpoznawczych stwierdzono, że dodanie niektórych dodatków do stopów lutowniczych taki jak aluminium niesie ze sobą szereg korzyści, które poprawiają właściwości mechaniczne połączeń lutowanych. Choć aluminium jest trudnym materiałem do lutowania ze względu na swoją naturalną warstwę tlenkową, w niewielkich ilościach może znacząco poprawić właściwości stopów lutowniczych. Aluminium zwiększa odporność stopu lutowniczego na utlenianie i korozję, co jest

szczególnie ważne w środowiskach o wysokiej wilgotności lub agresywnych warunkach chemicznych. Dodatek aluminium poprawia wytrzymałość mechaniczną lutów, co sprawia, że połączenia są bardziej odporne na naprężenia mechaniczne. Potwierdzają to badania próbki Zen-11 o składzie Sn-2%Ag-3%Pb-0,7%Cu-0,4%Al gdzie wytrzymałość na rozciąganie osiągnęło 91 MPa.

Dzięki badaniom wytrzymałościowym, radiograficznym, mikrostrukturalnym oraz makroskopowym, udowodniono że dodanie dwóch składników ołowiu oraz glinu do popularnych stopów lutowniczych typu SAC tworzy idealny lut nadający się do połączeń elektrycznych podczas regeneracji alternatorów samochodowych. Późniejsza analiza wykresów równowagi fazowe potwierdziła wyniki badań wstępnych.

Po ustaleniu właściwego składu stopu lutowniczego na bazie cyny przystąpiono do wykorzystania go do regeneracji alternatorów. Przystąpiono do badań zasadniczych. Do połączeń elektrycznych wykorzystano tulejkę miedzianą ocynowaną, którą założono na połączenia elektryczne alternatora, które obejmowały elementy stojana, mostka prostowniczego oraz regulatora napięcia.

Postanowiono zbadać który stop lutowniczny na bazie cyny będzie najbardziej odpowiedni do wypełnienia tulejki. Do badań wytypowano cztery luty, które osiągnęły najlepsze wyniki w badaniach rozpoznawczych. Były to luty następujących symbolach i składzie chemicznym Zen-5 (skład: Sn-0,7% Cu), Zen-9 (skład: Sn-2%Ag-0,8%Al), Zen-10 (skład: Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu), Zen-11 (skład: Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu-0,4% Al). W celu zbadania zjawiska rzadkopłynności połączeń tulejkowych zastosowano płytkę PCB stosowaną w elektronice. W płytce wykorzystano fabrycznie wykonane otwory tulejkowe pokryte powłoką miedziano cynową (taką samą jak w tulejkach wykorzystywanych do połączeń elektrycznych alternatora). Otwory wypełniono odpowiednimi lutami (Zen-5 do Zen-11). Tak przygotowane próbki poddano badaniom radiograficznym przy użyciu rentgenowskiej maszyny inspekcyjnej AX9100MAX firmy Unicomp, której powszechnie używa się w firmach produkujących układy elektroniczne. Podczas obserwacji wyników stwierdzono, że w próbkach wypełnionych lutem o symbolu Zen-5 oraz Zen-09 występują liczne pęcherzyki powietrza. Natomiast w próbkach Zen-10 oraz Zen-11 ilość pęcherzyków jest znikoma.

W kolejnym etapie badań postanowiono przeprowadzić obserwację mikroskopową wybranych próbek, które będą miały zastosowanie w regeneracji alternatorów. Odpowiednio wyczyszczone i zwilżone miedziane druty o średnicy 1,5 mm zlutowano ze stopą na zakładkę (odpowiednik połączeń w alternatorze). Wykonano dwie próby badania próbek. Pierwsza próba z użyciem próbek nietrawionych, druga poddana trawieniu, za pomocą odczynnika nitalowego.

Analiza mikrostruktury połączenia pozwoliła stwierdzić, że w osnowie eutektycznej β -Sn formułują się fazy międzymetaliczne.

Fazy te mają kluczowe znaczenie dla uzyskiwanych właściwości złącza lutowanego. Obserwacja mikroskopowa pozwala stwierdzić w miarę równomierny rozkład faz międzymetalicznych w osnowie eutektycznej, a także, że obszary faz

międzymetalicznych nie wykazują nadmiernego rozrostu. Taka formacja faz międzymetalicznych w procesie lutowniczym zapewnia uzyskiwanie połączeń charakteryzujących się odpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi, co potwierdzają dane literaturowe.

W wyniku powyższych badań i obserwacji do regeneracji alternatorów postanowiono wybrać dwie próbki Zen-10 (skład: Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu) oraz Zen-11 (skład: Sn-2% Ag- 3% Pb-0,7% Cu-0,4% Al).

Wykonano regenerację czterech alternatorów. Do regeneracji wybrano alternatory dwóch różnych producentów BOSCH (próbkę oznaczono literką B) i VALEO (próbkę oznaczono literką V). Połączenia lutowane w testowanych alternatorach, w każdym przypadku, wykonano z użyciem miedzianej, ocynowanej tulejki wypełniając je odpowiednim lutem Zen-10 w alternatorach oznaczonych symbolem V1 i B1 oraz lutem Zen-11 w alternatorach oznaczonych symbolem V2 i B2. Alternatory poddano testom podłączając je do maszyny testującej Starter&Alternator Tester MD-2s.

Na podstawie testu alternatora fabrycznie nowego stwierdzono że, istotnymi parametrami, które należy brać pod uwagę przy testowaniu lutowanych połączeń, są: napięcie wyjściowe, prąd tętnienia, oraz prąd obciążenia. Z zebranych wyników przedstawionych tabeli porównano pomiary czterech alternatorów. Dokonując analizy wyników sporządzono wnioski, które zdecydowanie przekładają się na korzyść alternatorów zregenerowanych lutem o składzie próbki Zen-11 (V2 i B2) w porównaniu do Zen-10 (V1 i B1).

Alternatory zregenerowane lutem Zen-11 są bardziej zaawansowane pod względem technologii i wydajności. Mają niższy prąd tętnienia, wyższe napięcie wyjściowe oraz wyższy prąd obciążenia, co czyni je lepszym wyborem do zastosowań wymagających stabilności i mocy przy dużych obciążeniach.

Opracowany sposób regeneracji został zaakceptowany z zakładzie zajmującym się regeneracją i produkcją alternatorów samochodowych AS-PL w Lubichowie. W czasie trwania procesu regeneracji autorskim rozwiązaniem sporządzono raport przedstawiający odsetek zgłaszanych reklamacji.

Z raportu wynika, że wskaźnik reklamacji znacznie spadł z 7,4% w okresie przed wprowadzeniem zmian w procesie regeneracji do 1,8% po wprowadzeniu zmian, co potwierdza skuteczność nowej metody lutowania i znaczną poprawę jakości regenerowanych alternatorów.

8.1. WNIOSKI

W badaniach rozpoznawczych i zasadniczych sprawdzano dokładnie własności mechaniczne i elektryczne nowo opracowanego, wieloskładnikowego lutu, który doskonale nadaje się do regeneracji elementów alternatorów samochodowych.

Na podstawie badań wysnuto następujące wnioski:

- Regeneracja podzespołów alternatora samochodowego przy pomocy opracowanego rozwiązania (pięcioskładnikowy lut, parametry lutowania, tulejka) zapewnia bardzo dobre własności mechaniczne i elektryczne;
- Dodatki Ag i Cu w lucie powodują wydzielanie się drobnych, nierozrośniętych intermetalicznych faz: Ag_3Sn oraz Cu_6Sn_5 , które są równomiernie rozłożone w lutowninie, powodują jej umocnienie; złącza uzyskały wytrzymałość na rozciąganie na poziomie 90 MPa;
- Pozostałe pierwiastki stopowe mają wpływ na wielkość i postać faz umacniających lutowninę oraz jej własności plastyczne;
- Opracowane złącze lutowane spełnia wysokie wymagania stawiane w przemyśle motoryzacyjnym, gdyż:
 - jest pozbawione wad i niezgodności lutowniczych,
 - własności elektryczne opracowanego złącza w zregenerowanym alternatorze takie jak: napięcie wyjściowe, prąd tętnienia oraz prąd obciążenia przy prędkościach obrotowych silnika wykazywały się lepszymi parametrami niż w alternatorze fabrycznie nowym
- Autorskie złącze nadaje się do regeneracji alternatorów samochodowych, a opracowane rozwiązanie regeneracji alternatorów pojazdów samochodowych przyczynia się do zwiększenia ich bezpieczeństwa użytkowania ponieważ:
 - analiza wytrzymałościowa i strukturalna potwierdziły, że złącze charakteryzuje się właściwościami odpowiednimi dla zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym,
- Wprowadzony sposób modernizacji wpłynął na poprawę jakości połączeń podzespołów alternatorów, gdyż wdrożenie rozwiązania do firmy skutkowało zmniejszeniem ilości rejestrowanych niezgodności tych połączeń
- Wprowadzenie autorskiego rozwiązania do otoczenia gospodarczego przy jednoczesnym zachowaniu wysokich własności użytkowych połączeń alternatorów, redukcji ilości szkodliwego ołowiu oraz ograniczenia emisji CO_2 podczas realizacji procesu regeneracji alternatorów pojazdów samochodowych

wpisuje się w ogólnoświatowy trend rozwoju transportu w zakresie dotyczącym ograniczenia jego szkodliwego oddziaływania na środowisko.

- Opracowanie mechanizmów wyjaśniających wzrost bezpieczeństwa użytkowego nowooproczowanych połączeń podzespołów alternatorów samochodowych, opierających się na związkach przyczynowo-skutkowych pomiędzy doborom parametrów procesu, materiałem, a uzyskiwanymi właściwościami, stanowi istotny wkład naukowy w dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Załącznik 1

Alternators, Starters & Parts

Gdansk, Poland

Test Report
BSG-198

Technical Info

PartNumber	A0004	Voltage	12 V	Rotating Direction	CW
Test Date	11/21/2023	Amp	33 A	Leakage Test Voltage	12.8V

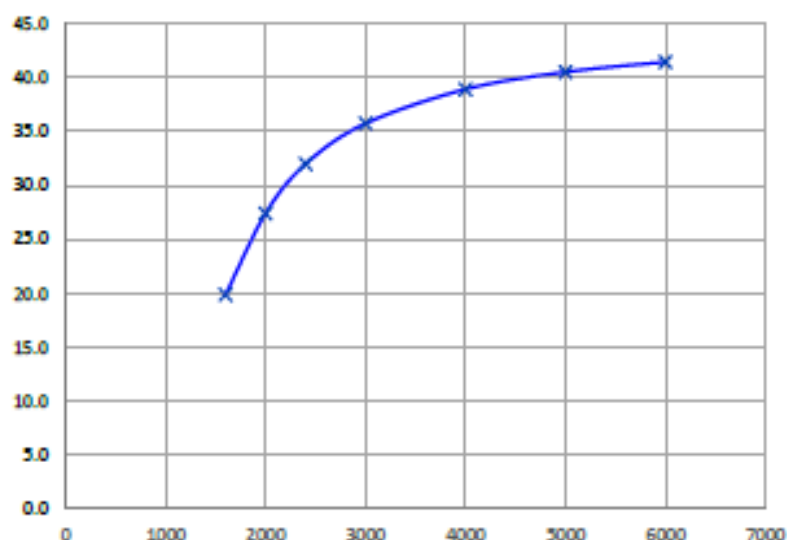
Results

Parameter	Value
Voltage Setpoint [V]	14.31
Voltage Set Point external [V]	N/A
Turn ON Speed [RPM]	1080
Cut In Speed [RPM]	1006
Ripple Current [A]	7.2
Leakage [mA]	0.15
Stator Voltage [V]	6.66
Tacho Frequency [Hz]	291.7
LRC Delay [sec]	N/A
Soft Start Freq. Duty Cycle [%]	N/A
Lamp Status (Operation)	OFF
Lamp Status (Stop)	ON

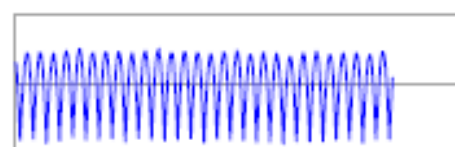
Parameter	Value
LampDriver V drop [V]	1.86
Rectifier Vdrop (+ Side) [V]	0.90
Rectifier Vdrop (- Side) [V]	1.15
Feedback PWM & Full Load [%]	N/A
Feedback PWM & Stop [%]	N/A
Feedback PWM & Operation [%]	N/A
Feedback Frequency[Hz]	N/A
Vset (Control)[V]	N/A
Vset (Reduced)[V]	N/A
PWM (Full Load)[%]	N/A
PWM @ Stop Read[%]	N/A
PWM (Stop)[%]	N/A

LIN/BSS TX Status and Info	Value
Electrical Fault (Operation)	N/A
Mechanical Fault (Operation)	N/A
Mechanical Fault (Stop)	N/A
Over Temperature Fault	N/A
Regulator Manufacturer Read	N/A
Regulator Model Read	N/A

PERFORMANCE @ 13.5 V



RIPPLE CURRENT max=7.2 [A] @ 2500 RPM



TEST DATA

Speed [RPM]	1600	2000	2400	3000	4000	5000	6000		
Load Current [A]	19.9	27.4	32.0	35.7	38.9	40.5	41.4		

Machine SN : 30003858-01	Calibration Certificate number : 20210219SR-01	User:	RSU
--------------------------	--	-------	-----

TÜV SÜD POLSKA Sp. z o.o.
ul. Podwale 17
00-252 WARSZAWA



Zaświadczenie

nr TSP-GES-01170.01.25.

TÜV SÜD Polska Sp. z o.o. niniejszym zaświadcza, że praca doktorska pt.

„Własności użytkowe wieloskładnikowych złączy lutowanych do zastosowania w regeneracji alternatorów samochodowych”

realizowania przez mgr **Adama Döringa** pod opieką Prof. dr hab. inż. **Tomasza Węgrzyna**

Została poddana procesowi weryfikacji, która potwierdziła redukcję emisji CO₂ w procesie regeneracji alternatorów samochodowych procesami lutowania co wpisuje się w działania na rzecz ochrony środowiska, wspierając redukcję śladu węglowego i przyczyniając się do zrównoważonego rozwoju w przemyśle w myśl dyrektywy CSRD.



Warszawa, dnia 14.01.2025 r

Artur Labus
Dyrektor Działu Usług dla Przemysłu

Załącznik 3



WE POWER THE WORLD WITH QUALITY

Zakład Produkcyjny:
AS-PL Sp. z o.o.
ul. Słoneczna 53
83-240 Lubichowo

Zaświadcza się, iż autorskie rozwiązania Pana magistra Adama Dóringa, zawarte w rozprawie doktorskiej pt. „Własności użytkowe wieloskładnikowych złączy lutowanych do zastosowania w regeneracji alternatorów samochodowych”, zostały wdrożone w procesie regeneracji alternatorów samochodowych w Zakładzie Produkcyjnym AS-PL Sp. z o.o., z siedzibą przy ul. Słonecznej 53, 83-240 Lubichowo.

AS-PL Sp. z o.o.
Dyrektor Produkcji
Michał Czarzasty
Dyrektor ds. produkcji
Czarzasty Michał

AS-PL Sp. z o.o.
ul. Michałki 12
80-718 Gdańsk
NIP: 557-109-00-56

KRS: 000056173
Sąd Rejonowy:
Gdańsk-Północ
w Gdańsku VI Wydział Gospodarczy

as-pl.com
tel. (+48) 58 304 12 88
info@as-pl.com



LITERATURA

1. Pacholski K. „Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 1. Wyposażenie elektryczne i elektromechaniczne.” Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011r.
2. Ocioszyński J. „Zespoły elektryczne i elektroniczne w samochodach.” Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2001r.
3. Duer S., Zajkowski K., Duer R.: Diagnostyka w układzie zasilania elektrycznego pojazdu samochodowego. „XV Conference Computer Applications in Electrical Engineering” Poznan University Of Technology, Poznan, April 19-21, 2010
4. Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Yushkova, O. A., Pronin, E. A., & Zhrebtsov, A. A. (2023). Characteristics of the Starter–Alternator with Incorporated Permanent Magnets Made of a Dual-Phase Magnetic Material Rotor. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 52(8). <https://doi.org/10.1134/S1052618823080071>
5. Marpaung, P. P. (2022). Efek kenaikan suhu dapur induksi elektromagnetik alternator terhadap perubahan resistansi lilitan stator. *Jurnal Poli-Teknologi*, 21. <https://doi.org/10.32722/pt.v21i2.4506>
6. Puzakov, A. (2020). Spectral Analysis of Output Voltage of the Automotive Alternator. *Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*. <https://doi.org/10.1109/UralCon49858.2020.9216285>
7. Characteristics of the Starter–Alternator with Incorporated Permanent Magnets Made of a Dual-Phase Magnetic Material
8. Schwartz M.M. „Brazing-Second Edition”, ASM International Materials Park Ohio, 2003r.
9. Radomski T., Ciszewski A. „Lutowanie”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985r.
10. Nowacki J., Chudziński M. Zmitrowicz P. „Lutowanie w budowie maszyn” Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2007r.
11. Roberts P. „Industrial brazing practice” CRC Press, Boca Kotan 2013r.
12. R. Lofting „Brazing and Soldering” Crowood Press Ltd, Ramsbury 2014r.
13. Buckley J.D., Stein B.A. „Joining technologies for the 1990s : Welding, brazing, soldering, mechanical, expolsive, solid-state, adhesive” Imprint Park Ridge, N.J., U.S.A.: Noyes Data Corp., 1986 Proceedings of a symposium held at NASA's Langley Research Center, Hampton, Va., Oct. 1984r.
14. Lancaster J.F. „Metalurgy of welding” Sixth Eidtion Albigon Publishing, Cambridge 1999r.
15. Pritchard D. „Soldering, Brazing and Welding” Crowood Press, 2001r.
16. Jacobson D.M., Humpston G. „Principles of brazing”, ASM International 2005r.
17. Zhao, L., Li, Y., Yu, M., Peng, Y., & Ran, F. (2023). Electrolyte-Wettability Issues and Challenges of Electrode Materials in Electrochemical Energy Storage, Energy Conversion, and Beyond. In *Advanced Science* (Vol. 10, Issue 17). <https://doi.org/10.1002/advs.202300283>

18. Poradnik inżyniera- spawalnictwo. Pod redakcją J. Pilarczyka, tom II, Warszawa, WNT 2005r.
19. Alton L.J. „Manufacturing Processes & Techniques : Plating, Brazing, Soldering & Welding”(Volume 2), CreateSpace Independent Publishing Platform; First Edition 2013r.
20. Rębilas K. „Wyznaczanie współczynnika napięcia powierzchniowego cieczy metodą wznoszenia w kapilarze”, UR, Kraków 2011r
21. Li, B., Bai, J., He, J., Ding, C., Dai, X., Ci, W., Zhu, T., Liao, R., & Yuan, Y. (2023). A Review on Superhydrophobic Surface with Anti-Icing Properties in Overhead Transmission Lines. In *Coatings* (Vol. 13, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/coatings13020301>
22. Abbaschian R., Abbaschian L., Reed-Hill R. E. „Physical Metallurgy Principles” Stamford: Cengage Learning, 2009r.
23. Gu, Y., Zhang, W., Mou, J., Zheng, S., Jiang, L., Sun, Z., & Wang, E. (2017). Research progress of biomimetic superhydrophobic surface characteristics, fabrication, and application. In *Advances in Mechanical Engineering* (Vol. 9, Issue 12). <https://doi.org/10.1177/1687814017746859>
24. Kim, S. H., Choi, J. P., Eom, Y. seong, Nam, Y., Baek, S., & Aranas, C. (2018). A phenomenological study of a Sn–Ag–Al composite solder reinforced with Mg–MWCNT: Improved electrical conductivity and thermo-physical performance. *Materials and Design*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.073>
25. Abbaschian R., Abbaschian L., Reed-Hill R. E. „Physical Metallurgy Principles” Stamford: Cengage Learning, 2009r
26. Dobrzański L.A. „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Gliwice-Warszawa 2002r
27. Wakeel, S., Haseeb, A. S. M. A., Afifi, M. A., Bingol, S., & Hoon, K. L. (2021). Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder. In *Microelectronics Reliability* (Vol. 123). <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114177>
28. Veselý, P., Dušek, K., & Froš, D. (2022). Toward reducing no-clean flux spatter during reflow soldering: Investigating the effect of flux type, solder mask, and solder pad design. *Journal of Manufacturing Processes*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.027>
29. Górecki, K., Ptak, P., & Dziurdzia, B. (2022). Influence of the soldering paste type on optical and thermal parameters of LED modules. *Soldering and Surface Mount Technology*, 34(4). <https://doi.org/10.1108/SSMT-07-2021-0043>
30. Yu, G., Chen, S., Hai, L., Huang, J., & Yang, J. (2019). Low-Temperature High-Frequency Induction Brazing of 5052 Aluminum Alloy to Stainless Steel with Sn-Zn Solder. *JOM*, 71(5). <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3280-7>
31. Wang, H., & Xue, S. bai. (2016). Effect of Ag on the properties of solders and brazing filler metals. In *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (Vol. 27, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3747-z>

32. Lee, L. M., & Mohamad, A. A. (2013). Interfacial reaction of Sn-Ag-Cu lead-free solder alloy on Cu: A review. In *Advances in Materials Science and Engineering* (Vol. 2013). <https://doi.org/10.1155/2013/123697>
33. Li, Y., Chen, C., Yi, R., & Ouyang, Y. (2020). Review: Special brazing and soldering. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 60). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.049>
34. Rettenmayr, M.; Lambecht, P.; Kemp, B.; Graff, M. High melting Pb-free solder alloys for die-attach applications. *Adv. Eng. Mater.* 2005, 7, 965–969. [CrossRef]
35. Niezgodziński M.E.; Niezgodziński T. *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne 1996; 268-269
36. Wang, F.J.; Yu, Z.S.; Qi, K. Intermetallic compound formation at Sn–3.0Ag–0.5Cu–1.0Zn lead-free solder alloy/Cu interface during as-soldered and as-aged conditions. *J. Alloys Compd.* 2007, 438, 110–115. [CrossRef]
37. Gain, A.K.; Chan, Y.C.; Sharif, A.; Wong, N.B.; Yung, W.K.C. Interfacial microstructure and shear strength of Ag nano particle doped Sn-9Zn solder in ball grid array packages. *Microelectron. Reliab.* 2009, 7, 746–753. [CrossRef]
38. Anderson, I.E.; Harring, J.L. Elevated temperature aging of solder joints based on Sn–Ag–Cu: Effects on joint microstructure and shear strength. *J. Electron. Mater.* 2004, 33, 1485–1496. [CrossRef]
39. Islam, M.N.; Chan, Y.C.; Sharif, A.; Rizvi, M.J. Effect of 9 wt.% in addition to Sn_{3.5}Ag_{0.5}Cu solder on the interfacial reaction with the Au/NiP metallization on Cu pads. *J. Alloys Compd.* 2005, 396, 217–223. [CrossRef]
40. Mahmood, O. T., Hasan, W. Z. W., Ismail, L. I., Shafie, S., Azis, N., & Norsahperi, N. M. H. (2022). Optimization Approaches and Techniques for Automotive Alternators: Review Study. In *Machines* (Vol. 10, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/machines10060478>
41. Pangkung, A., Yunus, A. M. S., Mulyadi, M. N., & Illa, P. A. (2021). Rancang Bangun Alternator Mobil Menggunakan Magnet Permanen. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 19(2). <https://doi.org/10.31963/sinergi.v19i2.3021>
42. Gu, X.; Chan, Y.C.; Yang, D.; Wu, B.Y. The shearing behavior and microstructure of Sn–4Ag–0.5Cu solder joints on a Ni–P–carbon nanotubes composite coating. *J. Alloys. Compd.* 2009, 468, 553–557. [CrossRef]
43. Hodulova, E.; Palcut, M.; Lechovič, E.; Šimeková, B.; Ulrich, K. Kinetics of intermetallic phase formation at the interface of Sn–Ag–Cu–X (X= Bi, In) solders with Cu substrate. *J. Alloys Compd.* 2011, 509, 7052–7059. [CrossRef]
44. Yen, Y.W.; Syu, R.S.; Chen, C.M.; Jao, C.C.; Chen, G.D. Interfacial reactions of Sn–58Bi and Sn–0.7Cu lead-free solders with Alloy42 substrate. *Microelectron. Reliab.* 2014, 54, 233–238. [CrossRef]
45. Hu, X.; Li, Y.; Min, Z. Interfacial reaction and IMC growth between Bi-containing Sn_{0.7}Cu solders and Cu substrate during soldering and aging. *J. Alloys Compd.* 2014, 582, 341–347. [CrossRef]

46. Wang, H.; Hu, X.; Jiang, X. Effects of Ni modified MWCNTs on the microstructural evolution and shear strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu composite solder joints. *Mater. Charact.* 2020, 163, 110287. [CrossRef]
47. El-Daly, A.A.; El-Hosainy, H.; Elmosalami, T.A.; Desoky, W.M. Microstructural modifications and properties of low-Ag-content Sn–Ag–Cu solder joints induced by Zn alloying. *J. Alloys Compd.* 2015, 653, 402–410. [CrossRef]
48. Chen, Y.; Meng, Z.C.; Gao, L.Y.; Liu, Z.Q. Effect of Bi addition on the shear strength and failure mechanism of low-Ag lead-free solder joints. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2021, 32, 2172–2186. [CrossRef]
49. El-Daly, A.A.; El-Taher, A.M.; Gouda, S. Development of new multicomponent Sn–Ag–Cu–Bi lead-free solders for low-cost commercial electronic assembly. *J. Alloys Compd.* 2015, 627, 268–275. [CrossRef]
50. Kang, S.K.; Shih, D.Y.; Leonard, D.; Henderson, D.W.; Gosselin, T.; Cho, S.-I.; Yu, J.; Choi, W.K. Controlling Ag₃Sn plate formation in near-ternary-eutectic Sn-Ag-Cu solder by minor Zn alloying. *JOM* 2004, 56, 34–38. [CrossRef]
51. Ali, U.; Khan, H.; Aamir, M.; Giasin, K.; Habib, N.; Owais Awan, M. Analysis of microstructure and mechanical properties of bismuth-doped SAC305 lead-free solder alloy at high temperature. *Metals* 2021, 11, 1077. [CrossRef]
52. Wang, F.; Chen, H.; Huang, Y.; Liu, L.; Zhang, Z. Recent progress on the development of Sn–Bi based low-temperature Pb-free solders. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2019, 30, 3222–3243. [CrossRef]
53. Peng, Y.Z.; Li, C.J.; Yang, J.J.; Zhang, J.T.; Peng, J.B.; Zhou, G.J.; Cun, J.P.; Yi, J.H. Effects of Bismuth on the Microstructure, Properties, and Interfacial Reaction Layers of Sn-9Zn-xBi Solders. *Metals* 2021, 11, 538. [CrossRef]
54. Luo, Z.B.; Zhao, J.F.; Gao, Y.J.; Wang, L. Revisiting mechanisms to inhibit Ag₃Sn plates in Sn–Ag–Cu solders with 1 wt.% Zn addition. *J. Alloys Compd.* 2010, 500, 39–45. [CrossRef]
55. Zhao, J.; Qi, L.; Wang, L. Effect of Bi on the kinetics of intermetallics growth in Sn-3Ag-0.5Cu/Cu solder joint. In *Proceedings of the Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, HDP'06*, Shanghai, China, 27–28 June 2006; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2006; pp. 232–235.
56. Li, G.Y.; Shi, X.Q. Effects of bismuth on growth of intermetallic compounds in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 2006, 16, s739–s743. [CrossRef]
57. Illés, B.; Hurtony, T.; Medgyes, B.; Krammer, O.; Dusek, K.; Busek, D. Sn and Bi whisker growth from SAC0307-Mn07 and SAC0307-Bi1-Mn07 ultra-thin film layers. *Vacuum* 2021, 187, 110121. [CrossRef]
58. Illés, B.; Bátorfi, R.; Hurtony, T.; Krammer, O.; Harsányi, G.; Pietrikova, A.; Skwarek, A.; Witek, K. Whisker Development from SAC0307-Mn07 Solder Alloy. In *Proceedings of the 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Demanovska Valley, Slovakia, 14–15 May 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1–5.
59. Kang, S.K.; Lauro, P.; Shih, D.Y.; Henderson, D.W.; Bartelo,

- J.; Gosselin, T.; Steave, R.C.; Charles., G.; Karl., P.; Choi, W.K. Themicrostructure, thermal fatigue, and failure analysis of near-ternary eutectic Sn-Ag-Cu solder joints.Mater. Trans.2004,45,695–702. [CrossRef]
58. Terashima, S.; Kariya, Y.; Hosoi, T.; Tanaka, M. Effect of silver content on thermal fatigue life of Sn-xAg-0.5Cu flip-chipinterconnects.J. Electron. Mater.2003,32, 1527–1533. [CrossRef]
 59. Kim, K.S.; Huh, S.H.; Suganuma, K. Effects of cooling speed on microstructure and tensile properties of Sn–Ag–Cu alloys.Mater.Sci. Eng. A2002,333, 106–114. [CrossRef]
 60. K. S. Kim, S. H. Huh, and K. Sugauma, “Effects of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead-free soldered joints,” Journal of Alloys and Compounds, vol. 352, no. 1-2, pp. 226–236, 2003.
 61. J.-W. Yoon, S.-W. Kim, and S.-B. Jung, “IMC morphology, interfacial reaction and joint reliability of Pb-free Sn-Ag-Cu solder on electrolytic Ni BGA substrate,” Journal of Alloys and Compounds, vol. 392, no. 1-2, pp. 247–252, 2005.
 62. D. Q. Yu and L. Wang, “The growth and roughness evolution of intermetallic compounds of Sn-Ag-Cu/Cu interface during soldering reaction,” Journal of Alloys and Compounds, vol. 458, no. 1-2, pp. 542–547, 2008.
 63. Lai Zhongmina, Xue Songbaia, Han Xianpenga, Gu Liyongc, Gu Wenhua, „Study on Microstructure and Property of Brazed Joint of AgCuZn-X(Ga, Sn, In, Ni) Brazing Alloy” Rare Metal Materials and Engineering 39, pp. 397–400, March 2010.
 64. Bharath Krupa Teja, M., Sharma, A., Das, S., & Das, K. (2022). A review on nanodispersed lead-free solders in electronics: synthesis, microstructure and intermetallic growth characteristics. In Journal of Materials Science (Vol. 57, Issue 19). <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07187-8>
 65. M. Farooq, S. Ray, A. Sarkhel, and C. Goldsmith, “Evaluation of lead(Pb)-free ceramic ball grid array (CBGA): wettability, microstructure and reliability,” in 51st Electronic Components and Technology Conference, pp. 978–986, usa, June 2001.
 66. S. K. Kang, D. Leonard, D. A. Y. Shih et al., “Interfacial reactions of Sn-Ag-Cu solders modified by minor Zn alloying addition,” Journal of Electronic Materials, vol. 35, no. 3, pp. 479–485, 2006. 10 Advances in Materials Science and Engineering
 67. H. H. Manko, Book Solders and Soldering: Materials, Design, Production, and Analysis for Reliable Bonding, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2001.
 68. C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, and L. Wang, “Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions,” Materials Science and Engineering R, vol. 44, no. 1, pp. 1–44, 2004.
 69. K. N. Subramanian, Book Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Springer, 2007. [9] C. H. Wang and S. W. Chen, “Sn-0.7 wt.%Cu/Ni interfacial reactions at 250° C,” Acta Materialia, vol. 54, no. 1, pp. 247–253, 2006.

70. D. Li, C. Liu, and P. P. Conway, "Characteristics of intermetallics and micromechanical properties during thermal ageing of SnAg-Cu flip-chip solder interconnects," *Materials Science and Engineering A*, vol. 391, no. 1-2, pp. 95–103, 2005.
71. Y. C. Chan and D. Yang, "Failure mechanisms of solder interconnects under current stressing in advanced electronic packages," *Progress in Materials Science*, vol. 55, no. 5, pp. 428–475, 2010.
72. Y. Li-Lei, L. Zonghe, J. Liu, and A. Tholen, "Microstructural coarsening of lead free solder joints during thermal cycling," in *Proceedings of the 50th Electronic Components & Technology Conference*, pp. 134–137, 2000.
73. A. K. Gain, T. Fouzder, Y. C. Chan, A. Sharif, N. B. Wong, and W. K. C. Yung, "The influence of addition of Al nano-particles on the microstructure and shear strength of eutectic Sn-AgCu solder on Au/Ni metallized Cu pads," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 506, no. 1, pp. 216–223, 2010.
74. H. H. Manko, *Book Solder and Soldering*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1979. [15] R. J. K. Wassink, *Book Soldering in Electronics*, Electrochemical Publications, Isle of Man, UK, 1989. [16] M. Abtew and G. Selvaduray, "Lead-free solders in microelectronics," *Materials Science and Engineering R*, vol. 27, no. 5, pp. 95–141, 2000.
75. T. Laurila, V. Vuorinen, and J. K. Kivilahti, "Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials," *Materials Science and Engineering R*, vol. 49, no. 1-2, pp. 1–60, 2005.
76. D. R. Frear, *Book Solder Mechanics: A states of the Art Assessment*, Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, Pa, USA, 1991.
77. L. M. Lee, H. Haliman, and A. A. Mohamad, "Interfacial reaction of a Sn-3.0Ag-0.5Cu thin film during solder reflow," *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 15–23, 2013.
78. M. C. Liew, I. Ahmad, L. M. Lee, M. F. M. Nazeri, H. Haliman, and A. A. Mohamad, "Corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder in potassium hydroxide electrolyte," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, no. 10, pp. 3742–3747, 2012.
79. C. Lea, *Book a Scientific Guide to Surface Mount Technology*, Electrochemical Publications, Ayrshire, Scotland, 1988.
80. S. W. Chen, C. H. Wang, S. K. Lin, and C. N. Chiu, "Phase diagrams of Pb-free solders and their related materials systems," *Journal of Materials Science*, vol. 18, no. 1–3, pp. 19–37, 2007.
81. S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, "Interfacial intermetallic growth and shear strength of lead-free composite solder joints," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 473, no. 1-2, pp. 100–106, 2009. [24] J. K. Kivilahti, "The chemical modeling of electronic materials and interconnections," *JOM*, vol. 54, no. 12, pp. 52–57, 2002.
82. M. J. Rizvi, Y. C. Chan, C. Bailey, H. Lu, and M. N. Islam, "Effect of adding 1 wt% Bi into the Sn-2.8Ag-0.5Cu solder alloy on the intermetallic formations with Cu-

- substrate during soldering and isothermal aging,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 407, no. 1-2, pp. 208–214, 2006.
83. X. Liu, M. Huang, Y. Zhao, C. M. L. Wu, and L. Wang, “The adsorption of Ag₃Sn nano-particles on Cu-Sn intermetallic compounds of Sn-3Ag-0.5Cu/Cu during soldering,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 492, no. 1-2, pp. 433–438, 2010.
 84. F.-J. Wang, Z.-S. Yu, and K. Qi, “Intermetallic compound formation at Sn-3.0Ag-0.5Cu-1.0Zn lead-free solder alloy/Cu interface during as-soldered and as-aged conditions,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 438, no. 1-2, pp. 110–115, 2007.
 85. A. Kar, M. Ghosh, A. K. Ray, and R. N. Ghosh, “Effect of copper addition on the microstructure and mechanical properties of lead free solder alloy,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 459, no. 1-2, pp. 69–74, 2007.
 86. F. Gao, T. Takemoto, and H. Nishikawa, “Effects of Co and Ni addition on reactive diffusion between Sn-3.5Ag solder and Cu during soldering and annealing,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 420, no. 1-2, pp. 39–46, 2006.
 87. J.-W. Yoon, B.-I. Noh, B.-K. Kim, C.-C. Shur, and S.-B. Jung, “Wettability and interfacial reactions of Sn-Ag-Cu/Cu and SnAg-Ni/Cu solder joints,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 486, no. 1-2, pp. 142–147, 2009.
 88. J.-W. Yoon and S.-B. Jung, “Effect of surface finish on interfacial reactions of Cu/Sn-Ag-Cu/Cu(ENIG) sandwich solder joints,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 448, no. 1-2, pp. 177–184, 2008.
 89. R. A. Gagliano and M. E. Fine, “Growth of η phase scallops and whiskers in liquid tin-solid copper reaction couples,” *JOM*, vol. 53, no. 6, pp. 33–38, 2001.
 90. Schenkel, E. A., Mazon, T., Fujimoto, F., Eleutério Filho, S., Oliveira, C. R. M. de, Pimentel, M. B. C., & Biasoli, M. T. (2006). Estudo de adesivos condutivos isotrópicos utilizados para a fixação de componentes eletrônicos. *Matéria* (Rio de Janeiro), 11(4). <https://doi.org/10.1590/s1517-70762006000400008>
 91. M. Reid, J. Punch, M. Collins, and C. Ryan, “Effect of Ag content on the microstructure of Sn-Ag-Cu based solder alloys,” *Soldering and Surface Mount Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 3–8, 2008.
 92. J. M. Song, J. J. Lin, C. F. Huang, and H. Y. Chuang, “Crystallization, morphology and distribution of Ag₃Sn in Sn-Ag-Cu alloys and their influence on the vibration fracture properties,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 466, no. 1-2, pp. 9–17, 2007.
 93. K. Zeng and K. N. Tu, “Six cases of reliability study of Pbfree solder joints in electronic packaging technology,” *Materials Science and Engineering R*, vol. 38, no. 2, pp. 55–105, 2002.
 94. C. T. Sims, N. S. Stoloff, and W. C. Hagel, *Book Superalloys II*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1987. [37] M. Reid, M. J. Pomeroy, and J. S. Robinson, “Microstructural instability in coated single crystal superalloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153-154, no. 1–3, pp. 660–665, 2004.

95. H. K. Kim, H. K. Liou, and K. N. Tu, "Three-dimensional morphology of a very rough interface formed in the soldering reaction between eutectic SnPb and Cu," *Applied Physics Letters*, vol. 66, no. 16, pp. 2337–2339, 1995.
96. H. K. Kim and K. N. Tu, "Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening," *Physical Review B*, vol. 53, no. 23, pp. 16027–16034, 1996. *Advances in Materials Science and Engineering* 11
97. A. A. Liu, H. K. Kim, K. N. Tu, and P. A. Totta, "Spalling of Cu₆Sn₅ spheroids in the soldering reaction of eutectic SnPb on Cr/Cu/Au thin films," *Journal of Applied Physics*, vol. 80, no. 5, pp. 2774–2780, 1996.
98. S. Bader, W. Gust, and H. Hieber, "Rapid formation of intermetallic compounds interdiffusion in the CuSn and NiSn systems," *Acta Metallurgica et Materialia*, vol. 43, no. 1, pp. 329–337, 1995.
99. S. Choi, J. P. Lucas, K. N. Subramanian, and T. R. Bieler, "Formation and growth of interfacial intermetallic layers in eutectic Sn-Ag solder and its composite solder joints," *Journal of Materials Science*, vol. 11, no. 6, pp. 497–502, 2000.
100. P. L. Tu, Y. C. Chan, K. C. Hung, and J. K. L. Lai, "Growth kinetics of intermetallic compounds in chip scale package solder joint," *Scripta Materialia*, vol. 44, no. 2, pp. 317–323, 2001.
101. S. K. Kang, R. S. Rai, and S. Purushothaman, "Interfacial reactions during soldering with lead-tin eutectic and lead (Pb)- free, tin-rich solders," *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, no. 7, pp. 1113–1120, 1996.
102. M. Schaefer, R. A. Fournelle, and J. Liang, "Theory for intermetallic phase growth between Cu and liquid Sn-Pb solder based on grain boundary diffusion control," *Journal of Electronic Materials*, vol. 27, no. 11, pp. 1167–1176, 1998.
103. C. K. Shin, Y. J. Baik, and J. Y. Huh, "Effects of microstructural evolution and intermetallic layer growth on shear strength of ball-grid-array Sn-Cu solder joints," *Journal of Electronic Materials*, vol. 30, no. 10, pp. 1323–1331, 2001.
104. M. N. Islam, Y. C. Chan, M. J. Rizvi, and W. Jillek, "Investigations of interfacial reactions of Sn-Zn based and Sn-Ag-Cu lead-free solder alloys as replacement for Sn-Pb solder," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 400, no. 1-2, pp. 136–144, 2005.
105. B. J. Lee, N. M. Hwang, and H. M. Lee, "Prediction of interface reaction products between Cu and various solder alloys by thermodynamic calculation," *Acta Materialia*, vol. 45, no. 5, pp. 1867–1874, 1997.
106. R. A. Lord and A. Umantsev, "Early stages of soldering reactions," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, no. 6, Article ID 063525, 11 pages, 2005.
107. J. Gorlich, G. Schmitz, and K. N. Tu, "On the mechanism of the " binary Cu/Sn solder reaction," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 5, Article ID 053106, 3 pages, 2005.
108. S. Choi, T. R. Bieler, J. P. Lucas, and K. N. Subramanian, "Characterization of the growth of intermetallic interfacial layers of Sn-Ag and Sn-Pb eutectic solders and

- their composite solders on Cu substrate during isothermal long-term aging,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 28, no. 11, pp. 1209–1215, 1999.
109. W. K. Choi and H. M. Lee, “Effect of soldering and aging time on interfacial microstructure and growth of intermetallic compounds between Sn-3.5Ag solder alloy and Cu substrate,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 29, no. 10, pp. 1207–1213, 2000.
 110. P. T. Vianco, “An overview of surface finishes and their role in printed circuit board solderability and solder joint performance,” *Circuit World*, vol. 25, no. 1, pp. 6–24, 1999. [54] A. J. Sunwoo, J. W. Morris, and G. K. Lucey, “The growth of Cu-Sn intermetallics at a pretinned copper-solder interface,” *Metallurgical Transactions A*, vol. 23, no. 4, pp. 1323–1332, 1992.
 111. H. L. Reynolds and J. W. Morris, “The role of Cu-Sn intermetallics in wettability degradation,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 24, no. 10, pp. 1429–1434, 1995
 112. Alam, M. E., & Gupta, M. (2014). Development of extremely ductile lead-free Sn-Al solders for futuristic electronic packaging applications. *Electronic Materials Letters*, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s13391-013-3087-1>
 113. Son, J., Yu, D. Y., Kim, Y. C., Kim, S. il, Kim, M. S., Byun, D., & Bang, J. (2021). Effect of multiple reflows on the interfacial reactions and mechanical properties of an Sn-0.5Cu-Al(Si) solder and a Cu substrate. *Materials*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092367>
 114. Xian, J. W., Belyakov, S. A., Britton, T. B., & Gourlay, C. M. (2015). Heterogeneous nucleation of Cu₆Sn₅in Sn-Cu-Al solders. *Journal of Alloys and Compounds*, 619. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.251>
 115. Yang, L., Zhang, Y., Du, C., Dai, J., & Zhang, N. (2015). Effect of aluminum concentration on the microstructure and mechanical properties of Sn-Cu-Al solder alloy. *Microelectronics Reliability*, 55(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.12.017>
 116. R.K. Chinnam, C. Fauteux, J. Neuenschwander, J. Janczak-Rusch, *Acta. Materialia*.2011, 59, 1474-1482.
 117. M.A.A. Mohd Salleh, A.M. Mustafa Al Bakri, Flora Somidin, H. Kamarudin, *International Review of Mechanical Engineering*2013, Vol. 7, N.1.
 118. A.A. El-Daly, A. Fawzy, S.F. Mansou, M.J Younis, *Mat. Sci. Eng. A* 2013, 578, 62-71. [59] L.C. Tsao, C.H. Huang, C.H. Chung, R.S. Chen, *Materials Science and Engineering A*2012, 545, 194– 200
 119. X.D. Liu, Y.D. Han, H.Y. Jing, J.Wei, L.Y. Xu, *Mat. Sci. Eng. A* 2013, 562, 25-32. [57] L.C. Tsao, R.W. Wu, Te-Hsien Cheng, Kuo-Huan Fan, R.S. Chen, *Materials and Design*2013, 50, 774-781
 120. Non-Metal Reinforced Lead-Free Composite Solder Fabrication Methods and its Reinforcing Effects to the Suppression of Intermetallic Formation: Short Review, *Applied Mechanics and Materials* 2013, 421p. 260-266, 10.4028/www.scientific.net/AMM.421.260
 121. Materiały firmy AMB Technic <https://amb.pl/>

122. Materiały firmy AS-PL <https://as-pl.com/>
123. A. Dóring, B. Szczucka-Lasota, T. Węgrzyn, R. Antczak-Jarząbska, A. Pereira Silva: Regeneracja alternatorów z wykorzystaniem metod lutowania, W: Transport problems 2023. XV International scientific conference, XII International symposium of young researchers. Proceedings / Sładkowski Aleksander [i in.] (red.), 2023, Politechnika Śląska, ISBN 978-83-959742-6-7, s. 196-202
124. A. Doring, B. Szczucka-Lasota, T. Węgrzyn, K. Wilczyński, T. Śliwiński: Regeneration of vehicle alternators by soldering methods, W: Transport problems 2024. XVI International scientific conference, XIII International symposium of young researchers. Proceedings / Sładkowski Aleksander [i in.] (red.), 2024, Politechnika Śląska, ISBN 978-83-959742-8-1, s. 133-139
125. Szczucka-Lasota B., Węgrzyn T., Łazarz B.: Influence of the structure and mechanisms of intermetallic phase formation on the strength properties of a newly developed solder joint, Materials, MDPI, vol. 181, nr 3, 2025, Numer artykułu: 489, s. 1-21, DOI:10.3390/ma18030489
126. <https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html> na dzień 12.11.2023
127. <https://homework.study.com/explanation/use-the-pb-sn-phase-diagram-to-answer-the-following-question-pb-sn-phase-diagram-at-200-oc-an-alloy-with-a-composition-of-2-55-times10-1-wt-sn-is-made-up-of-two-phases-alpha-and-liquid-what.html>. na dzień 12.11.2023
128. <https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html> na dzień 12.11.2023
129. [https://www.researchgate.net/publication/344612242_Low-temperature_synthesis_of_Ti3AlSnC2_solid_solution_using_replacement_reactio](https://www.researchgate.net/publication/344612242_Low-temperature_synthesis_of_Ti3AlSnC2_solid_solution_using_replacement_reaction/figure?lo=1)n/figure?lo=1 na dzień 12.11.2023
130. Materiały firmy Weidinger <https://www.weidinger.eu/pl/lutowanie-jbc>
131. Materiały firmy Flextronics S.A.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Alternator samochodowy [opracowanie własne]	5
Rys. 2. Budowa alternatora [122]	5
Rys. 3. Układ prostowania prądu alternatora [1]	6
Rys. 4. Stojan alternatora [opracowanie własne]	7
Rys. 5. Napięcia powstałe w uzwojeniach twornika (stojana)[3]	7
Rys. 6. Alternator zamontowany do jednostki napędowej [opracowanie własne]	8
Rys. 7. Uzwojenie wirnika [2]	12
Rys. 8. Uzwojenie stojana [opracowanie własne]	13
Rys. 9. Magnesy neodymowe łukowe [4]	15
Rys. 10. Magnesy ferrytowe łukowe [4]	15
Rys. 11. Uszkodzenie koła pasowego sprzęgłowego alternatora	17
Rys. 12. Uszkodzenie obudowy alternatora	18
Rys. 13. Uszkodzone diody	18
Rys. 14. Uszkodzony regulator napięcia	19
Rys. 15. Uszkodzony wirnik alternatora	19
Rys. 16. Przerwane połączenia elektryczne	20
Rys. 17. Uszkodzenie alternatora z przyczyn przeciążenia: a. elektryczne, b. mechaniczne	21
Rys. 18. Uszkodzenie alternatora z przyczyn eksploatacyjnych	21
Rys. 19. Alternatory: a. przed regeneracją, b. po regeneracji	22
Rys. 20. Przykład wykresu równowagowego lutowia Sn-Pb [9]	25
Rys. 21. Rozkład napięć powierzchniowych w przypadku: a) cieczy zwilżającej, b) cieczy niezwilżającej [17]	28
Rys. 22. Zależność między kątem zwilżania a stopniem zwilżenia [17]	29
Rys. 23. Zjawisko włoskowatości w warunkach: a) lutu zwilżającego, b) lutu niezwilżającego ścianek kapilary [17]	30
Rys. 24. Zależność napięcia powierzchniowego od temperatury: dla cyny i dla miedzi,	31
Rys. 25. Zależność napięcia powierzchniowego od temperatury: dla cynku i srebra [9]	32
Rys. 26. Zachowanie się kropli na: a) chropowatej powierzchni w porównaniu do b) gładkiej powierzchni [23]	34
Rys. 27. Wpływ temperatur likwidus i solidus na rzadkość materiałów [15]	35
Rys. 28. Schemat przebiegu dyfuzji w metalu: 1 – wzdłuż powierzchni, 2 – po granicach ziarn, 3 – przez ziarno [26]	38
Rys. 29. Schemat budowy lutowanego złącza w przypadku, gdy ciekłe spoiwo nie oddziałuje na metal rodzimy: 1 – metal rodzimy, 2 – lut [9]	39
Rys. 30. Schemat budowy lutowanego złącza w przypadku wzajemnego oddziaływania na siebie ciekłego spoiwa i metalu rodzimego: 1 - metal rodzimy, 2 - strefa dyfuzji bogatsza w metal lutowany, 3 - strefa dyfuzji bogatsza w spoiwo 4 - spoiwo [9]	40
Rys. 31. Czynniki wpływające na powstanie dendrytów [121]	41
Rys. 32. Skład pasty lutowniczej stosowanej podczas regeneracji alternatorów	47
Rys. 33. Morfologia pasty lutowniczej [źródło własne]	48
Rys. 34. Lupa elektroniczna USB200 firmy Reflecta	60
Rys. 35. Tygiel lutowniczy z roztopioną lutowiną	63
Rys. 36. Laski stopów cyny do rozpuszczenia w tyglach i wannach lutowniczych	64

Rys. 37. Pirometr temperaturowy o symbolu IRThermometr	64
Rys. 38. Przygotowanie próbek blach miedzianych.....	65
Rys. 39. Przykładowy proces pobielania próbki drutu. Przygotowanie próbki do badań:	
a) roztopienie lutownicy, b) zanurzenie drutu, c) pobielona próbka.....	65
Rys. 40. Pobielone w tyglu i połączone próbki o kształcie: a) płaskowników, b) drutów	66
Rys. 41. Lutownica i grot firmy JBC	67
Rys. 42. Czyścik do grotów firmy JBC.....	67
Rys. 43. Ocena połączeń lutowanych: a) porowatość, pęknięcia (ZEN-2); przebarwienia, brak wypełnienia (Zen-1); c) nierówność wypełnienia, brak menisku (Zen-6); d) brak zwilżalności, zimny lut (Zen-5)	70
Rys. 44. Złącze lutowane, poprawnie wykonane (ludem Zen-11)	71
Rys. 45. Złącze lutowane, wykonane nieprawidłowo (ludem Zen-2) przy temp grota 290° C i czasie styku 7s.....	71
Rys. 46. Mikrostruktura i EDS blach miedzianych przeznaczonych do lutowania	76
Rys. 47. Złącze lutowane wykonane z użyciem czystej cyny	77
Rys. 48. Lutowanie blach miedzianych za pomocą lutu Sn-5% Pb	78
Rys. 49. Analiza składu chemicznego lutownicy Sn-0,5% Cu	79
Rys. 50. Złącze lutowane wykonane z wykorzystaniem lutu Sn-3%Pb-0,7%Cu	79
Rys. 51. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-0,7% Cu-0,7% Al	80
Rys. 52. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-2% Pb-2% Ag.....	81
Rys. 53. Złącze wykonano z zastosowaniem lutu Sn-2%Ag-3%Pb-0,7% Cu	82
Rys. 54. Złącze wykonano z zastosowaniem innowacyjnego lutu Sn - 2% Ag - 3% Pb - 0,7% Cu - 0,4% Al (autorskie rozwiązanie).....	82
Rys. 55. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 3369, na której wykonano badania doraźnej wytrzymałości na rozciąganie polutowanych elementów.	84
Rys. 56. Wymiary próbek do wykonania złączy lutowanych.....	85
Rys. 57. Schemat umieszczenia próbki w maszynie wytrzymałościowej [25]	86
Rys. 58. Pomiar próbki mikrometrem [źródło własne]	86
Rys. 59. Badanie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie drutu miedzianego (Zen-S) [źródło własne]	87
Rys. 60. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-6 [źródło własne]. a) umocowanie próbki w maszynie wytrzymałościowej, b) wykonanie próby statycznego rozciągania	88
Rys. 61. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-7 [źródło własne].....	89
Rys. 62. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-8 [źródło własne].....	89
Rys. 63. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-9 [źródło własne].....	90
Rys. 64. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-10 [źródło własne].....	90
Rys. 65. Wykonywanie badań wytrzymałościowych złączy lutowanych na przykładzie lutu Zen-11 [źródło własne].....	91
Rys. 66. Wykres równowagowy Sn-Cu [126]	93
Rys. 67. Wykres równowagowy Sn-Pb [127]	94
Rys. 68. Wykres równowagowy Sn-Ag [128].....	95

Rys. 69. Wykres równowagowy Sn-Al [129].....	96
Rys. 70. Zdjęcie radiograficzne z niezgodnościami w postaci braków przetopu lutownicy (próbka Zen-8) [źródło własne].....	98
Rys. 71. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-9, z niezgodnościami w postaci wycieków przetopu lutownicy [źródło własne]	99
Rys. 72. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-2 z niezgodnościami w postaci występowania pęcherzyków powietrza oraz porowatości [źródło własne]	99
Rys. 73. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-5. Próbkę nie posiada wad w przetopie lutownicy [źródło własne].....	100
Rys. 74. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen-10. Nie zaobserwowano wad w przetopie lutownicy [źródło własne].....	100
Rys. 75. Zdjęcie radiograficzne próbki Zen11. Brak widocznych wad przetopu lutownicy w wykonanym złączu [źródło własne].....	101
Rys. 76. Złącze lutowane Zen-11	103
Rys. 77. Złącze lutowane Zen-11, trawione nitałem [źródło własne]	104
Rys. 78. Tulejka z miedzi cynowanej.....	110
Rys. 79. Grot lutowniczy C245001 stożkowy, śr.: 0,6 mm firmy JBC	111
Rys. 80. Pisak topnikowy z nylonowym pędzlem 14 × 4,3 mm	112
Rys. 81. Rentgenowska maszyna inspekcyjna AX9100MAX firmy Unicomp.....	112
Rys. 82. Zdjęcie rentgenowskie płytki PCB z lutami o symbolu Zen-7 oraz Zen-11.	113
Rys. 83. Płytki PCB z lutami o symbolu Zen-6 oraz Zen-10	114
Rys. 84. Obszar występowania faz międzymetalicznych w kompozytowej osnowie w złączu lutowanej tulejki z zastosowaniem lutu Zen-11. Próbkę trawioną Nitałem.....	117
Rys. 85. Model wzrostu faz międzymetalicznych: etap 1) kształtowanie się struktury eutektycznej i początek powstawania warstwy międzymetalicznej;.....	121
Rys. 86. Model mechanizmu pęknięcia pod wpływem działania sił rozciągających i ścinających	123
Rys. 87. Budowa i wymiary tulejki.....	126
Rys. 88. Elementy lutowane za pomocą tulejki: a. uzwojenie stojana, b. układ prostowników, c. regulator napięcia.....	126
Rys. 89. Schemat połączenia elementów alternatora	127
Rys. 90. Budowa i wymiary grotu używanego w regeneracji alternatora samochodowego	128
Rys. 91. Przygotowane połączenia elektryczne regenerowanego alternatora samochodowego .	128
Rys. 92. Proces lutowania połączeń elektrycznych regenerowanego alternatora samochodowego [opracowanie własne]	129
Rys. 93. Testy alternatora na maszynie testującej Starter&Alternator Tester MD-2s	131

SPIS TABLIC

Tabl. 1. Porównanie z lutami bezołowiowymi	50
Tabl. 2. Koncepcja lutów zastosowanych w badaniach	62
Tabl. 3. Wyniki badań nieniszczących połączeń występujących w regenerowanym alternatorze.	74
Tabl. 4. Fragment tabeli przedstawiającej właściwości wytrzymałościowe niektórych metali	88
Tabl. 5. Wytrzymałość na rozciąganie złączy lutowanych.....	92
Tabl. 6. Skład chemiczny lutowiny a właściwości połączenia Zen-11	119
Tabl. 7. Parametry tulejki	126
Tabl. 8. Wyniki badań parametrów elektrycznych połączeń lutowanych w regenerowanych alternatorach	135
Tabl. 9. Dane dotyczące reklamacji przed i po wdrożeniem autorskiego rozwiązania	138

STRESZCZENIE PRACY

Alternator to jeden z najważniejszych elementów każdego pojazdu. Odpowiada za dostarczanie energii elektrycznej do akumulatora i zasilanie różnych systemów podczas jazdy.

Awaria alternatora może prowadzić do wielu problemów. Niesprawny alternator może wpływać na słabe ładowanie akumulatora, a co za tym idzie, może unieruchomić samochód. Wymiana alternatora na nowy to prostsza i szybsza opcja, która zazwyczaj gwarantuje większą niezawodność i dłuższy okres bezawaryjnej eksploatacji. Jej wadą jest natomiast znacznie wyższy koszt w porównaniu do regeneracji. Regeneracja alternatora samochodowego to proces przywracania jego pełnej sprawności poprzez diagnostykę, wymianę zużytych elementów i testy końcowe. Jest to ekonomiczna i ekologiczna alternatywa dla zakupu nowego podzespołu, pozwalająca na obniżenie kosztów eksploatacji pojazdu.

Proces regeneracji obejmuje kilka kluczowych etapów: demontaż alternatora, dokładne czyszczenie, diagnostykę uszkodzeń, wymianę elementów eksploatacyjnych (łożysk, szczotek, regulatora napięcia, diod prostowniczych, wirnika) oraz końcowe testy na stanowisku badawczym.

Dzięki regeneracji można znacząco zmniejszyć ilość odpadów elektronicznych i metalowych, co przyczynia się do ochrony środowiska. Warto jednak pamiętać, że skuteczność procesu zależy od jakości użytych części zamiennych oraz precyzji wykonania naprawy.

Regeneracja alternatora samochodowego metodami lutowniczymi to skuteczny sposób na przywrócenie jego sprawności poprzez naprawę uszkodzonych elementów elektrycznych i elektronicznych. Lutowanie jest wykorzystywane głównie do połączeń wymienionych lub naprawionych podzespołów elektrycznych alternatora. Standardowe luty dostępne na rynku nie dają oczekiwanych rezultatów. Świadczy o tym duży wskaźnik reklamacji alternatorów zregenerowanych z wykorzystaniem tradycyjnych stopów lutowniczych. Luty wieloskładnikowe, dzięki odpowiednio dobranej kompozycji stopów metali, charakteryzują się zwiększoną odpornością na wysokie temperatury, lepszym przewodnictwem elektrycznym oraz większą trwałością mechaniczną w porównaniu do tradycyjnych stopów lutowniczych.

Jako materiał badawczy wykorzystano 12 próbek lutów na bazie cyny o różnych dodatkach stopowych. Miało to na celu uzyskanie trwalszych i bardziej niezawodnych połączeń, co przekłada się na dłuższą żywotność zregenerowanego alternatora.

Analiza literatury a także wykonane badania wstępne umożliwiły wybór metody lutowania jako skuteczny sposób na efektywne i ekologiczne rozwiązanie wykorzystane podczas regeneracji alternatorów samochodowych, które przywraca pełną funkcjonalność układu ładowania pojazdu, minimalizując koszty i odpady.

Analiza uzyskanych wyników umożliwiła sformułowanie tezy, która zakłada że, ***znaczną poprawę własności użytkowych połączeń podzespołów alternatorów pojazdów samochodowych można uzyskać poprzez odpowiednią modyfikację składu chemicznego lutów i technologii lutowania używanych podczas regeneracji podzespołów tych urządzeń.***

W celu udowodnienia tezy zaproponowano następujące badania na dodatkowych próbkach autorskiego opracowania (dla których otrzymano najlepsze rezultaty po badaniach rozpoznawczych), oraz na obiekcie rzeczywistym, który stanowią regenerowane alternatory. Postanowiono przede wszystkim wykonać:

- opracowanie sposobu lutowania elementów alternatora przy pomocy autorskiej metody z wykorzystaniem tulejki ocynowanej tulejki miedzianej,
- badania rzadkopłynności testowanych lutów,
- badania rentgenowskie próbek rzadkopłynności, które wykazały najlepsze własności mechaniczne spośród lutów stosowanych w części badań rozpoznawczych,
- ustalenie prawidłowych parametrów lutowania testowych złączy na obiekcie rzeczywistym,
- testowanie złączy lutowanych na obiekcie rzeczywistym,
- badania elektryczne badanych złączy lutowanych,
- porównywanie charakterystyk napięć w regenerowanym alternatorze wg autorskiej metody i porównanie ich z charakterystykami napięć w fabrycznie nowym alternatorze,
- analiza jakości regenerowanych alternatorów autorską metodą na podstawie raportu reklamacji/zwrotów w wybranym okresie

Wyniki badań laboratoryjnych pozwoliły potwierdzić, że opracowana autorska metoda regeneracji alternatorów z zastosowaniem lutu wieloskładnikowego o składzie Sn-2% Ag-3% Pb-0,7% Cu-0,4% Al, który znacznie poprawi jakość regenerowanych urządzeń w tym alternatorów samochodowych. Opracowany lut wykazał lepsze właściwości mechaniczne i elektryczne w porównaniu do tradycyjnych stopów Sn-Pb i Sn-Ag, co potwierdziły testy wytrzymałości oraz przewodności po regeneracji. Wykorzystanie tej technologii pozwala na zwiększenie trwałości naprawionych podzespołów, co jest istotnym aspektem w układach elektrycznych poddawanych dużym obciążeniom.

Prawidłowo przeprowadzona regeneracja z użyciem autorskiej metody, zapewnia wydajność alternatora na poziomie zbliżonym do fabrycznego a w niektórych przypadkach znacznie wyższym, co pozytywnie wpływa na funkcjonowanie układu elektrycznego pojazdu.

Teza pracy została udowodniona. Opracowana, zweryfikowana i w dalszej części walidowana autorska metoda regeneracji alternatorów została wdrożona w procesie regeneracji alternatorów samochodowych w zakładzie AS-PL w Lubichowie (załącznik 3).

Regeneracja alternatora przy użyciu autorskiego stopu lutowniczego stanowi innowacyjne rozwiązanie, które może znaleźć zastosowanie w szeroko pojętej elektromechanice pojazdowej, łącząc trwałość, wydajność i efektywność kosztową. Rozwiązanie zostało poddane procesowi weryfikacji, która potwierdziła redukcję emisji CO₂ w procesie regeneracji alternatorów samochodowych co wpisuje się w działania na rzecz ochrony środowiska, wspierając redukcję śladu węglowego przyczyniając się do zrównoważonego rozwoju w przemyśle w myśl dyrektywy CSRD (załącznik 2).

SUMMARY

The alternator is one of the most important components of any vehicle. It is responsible for supplying electrical energy to the battery and powering various systems while driving.

A malfunctioning alternator can lead to many problems. A faulty alternator may result in insufficient battery charging, which in turn can immobilize the vehicle. Replacing the alternator with a new one is a simpler and faster option that usually guarantees greater reliability and a longer trouble-free service life. However, its drawback is the significantly higher cost compared to remanufacturing.

Automotive alternator remanufacturing is a process of restoring its full functionality through diagnostics, replacement of worn components, and final testing. It is an economical and environmentally friendly alternative to purchasing a new unit, helping to reduce vehicle operating costs.

The remanufacturing process involves several key stages: disassembly of the alternator, thorough cleaning, damage diagnostics, replacement of consumable components (bearings, brushes, voltage regulator, rectifier diodes, rotor), and final testing on a test bench.

Through remanufacturing, it is possible to significantly reduce the amount of electronic and metal waste, contributing to environmental protection. However, it is important to note that the effectiveness of the process depends on the quality of the replacement parts used and the precision of the repair work.

Remanufacturing automotive alternators using soldering methods is an effective way to restore functionality by repairing damaged electrical and electronic components. Soldering is mainly used for connecting replaced or repaired electrical components of the alternator. Standard solders available on the market do not yield the expected results. This is evidenced by the high rate of warranty claims for alternators remanufactured using traditional soldering alloys.

Multicomponent solders, thanks to a carefully selected composition of metal alloys, exhibit increased resistance to high temperatures, better electrical conductivity, and greater mechanical durability compared to traditional soldering alloys.

The research used 12 samples of tin-based solders with various alloying additions. The aim was to achieve more durable and reliable joints, which translates into longer lifespan of the remanufactured alternator.

Literature analysis and preliminary tests made it possible to choose soldering as an effective and environmentally friendly method used in the remanufacturing of automotive alternators. This restores the full functionality of the vehicle's charging system while minimizing costs and waste.

The analysis of the obtained results enabled the formulation of a thesis stating that a significant improvement in the performance properties of automotive alternator component joints can be achieved through appropriate modification of the chemical composition of the solder and the soldering technology used during component remanufacturing.

To verify this thesis, the following tests were proposed on additional samples developed by the author (those that yielded the best results in preliminary research), as well as on real-world objects, namely remanufactured alternators. The main activities included:

- developing a method for soldering alternator components using the author's proprietary technique with a tinned copper sleeve,
- testing the flowability of the solders,
- performing X-ray analysis of the flowability samples that exhibited the best mechanical properties among those used in preliminary tests,
- determining optimal soldering parameters for test joints on real objects,
- testing soldered joints on real alternators,
- performing electrical tests of the soldered joints,
- comparing voltage characteristics in the remanufactured alternator using the author's method with those of a brand-new alternator,
- analyzing the quality of alternators remanufactured with the author's method based on warranty/return reports over a selected period.

The results of laboratory testing confirmed that the developed proprietary method of alternator remanufacturing using a multicomponent solder with the composition Sn–2% Ag–3% Pb–0.7% Cu–0.4% Al significantly improves the quality of remanufactured devices, including automotive alternators. The developed solder demonstrated better mechanical and electrical properties compared to traditional Sn–Pb and Sn–Ag alloys, which was confirmed by durability and conductivity tests after remanufacturing.

Using this technology increases the durability of repaired components, which is a critical factor in electrical systems subject to high loads.

Properly conducted remanufacturing using the proprietary method ensures alternator performance at a level close to that of a new unit and, in some cases, even significantly higher, which positively affects the operation of the vehicle's electrical system.

The thesis of the work has been proven. The developed, validated, and further verified proprietary alternator remanufacturing method has been implemented in the remanufacturing process of automotive alternators at AS-PL's facility in Lubichowo (Appendix 3).

Remanufacturing alternators using the proprietary solder alloy constitutes an innovative solution that can be applied broadly in automotive electromechanics, combining durability, performance, and cost-effectiveness.

This solution underwent a verification process, which confirmed the reduction of CO₂ emissions during the alternator remanufacturing process, aligning with environmental protection efforts and supporting carbon footprint reduction. It contributes to sustainable industrial development in line with the CSRD directive (Appendix 2).