

**POLITECHNIKA OPOLSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY



**Zjawiska degradacyjne w bimetalu stal-tytan przy obciążeniach  
cyklicznych**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Opracował: mgr inż. Mateusz Kowalski

Promotor: dr hab. inż. Aleksander Karolczuk, prof. P.O

Opole 2014

*Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi  
dr hab. inż. Aleksandrowi Karolczukowi  
za cenne uwagi, opiekę naukową oraz pomoc w trakcie realizacji pracy doktorskiej.  
Dziękuję Rodzinie za wiarę i wsparcie w dążeniu do celu.  
Dziękuję firmie Z.T.W Explomet za udostępnienie materiałów badawczych.*

**Wykaz ważniejszych oznaczeń**

$2N_f$  – liczba nawrotów obciążenia (półcykli),

$A_5$  – wydłużenie względne,

$D$  – prędkość detonacji,

$E$  – moduł Younga,

$f$  – częstotliwość,

$F_a$  – amplituda siły wymuszającej,

$G$  – moduł Kirchhoffa,

$H, h, w$  – wymiary charakterystyczne bimetalu,

$h_0$  – amplituda fali międzypowierzchniowej,

$K'$  – współczynnik cyklicznego umocnienia,

$n$  – stopień uszkodzenia materiału,

$n'$  – wykładnik cyklicznego umocnienia,

$N_f$  – trwałość liczona w cyklach,

$R_e$  – granica plastyczności,

$R_m$  – granica wytrzymałości,

$RPG$  – współczynnik równoważnej wielkości przetopień,

$t$  – czas,

$V_c$  – prędkość zderzenia punktu C względem łączonych płyt,

$V_k$  – prędkość strumienia odwrotnego,

$A$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej,

$\lambda$  – długość fali międzypowierzchniowej,

$\nu$  – współczynnik Poissona,

$\sigma_1, \sigma_2$  – naprężenia główne,

$\varepsilon_{a,e}$  – amplituda odkształcenia sprężystego,

$\varepsilon_{a,p}$  – amplituda odkształcenia plastycznego,

$\varepsilon_{a,t}$  – amplituda odkształcenia całkowitego,

$\sigma'_f, b$  – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,

$\alpha, \beta$  – kąty zderzania,

$\delta$  – kąt odrzutu,

$\sigma$  – naprężenie,

$\sigma_a$  – amplituda naprężenia,

$\varepsilon'_f, c$  – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego,

<b>Spis treści</b>	<b>Str.</b>
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>6</b>
<b>2. TECHNOLOGIA ZGRZEWANIA WYBUCHOWEGO .....</b>	<b>8</b>
2.1. Zarys historyczny.....	8
2.2. Charakterystyka procesu zgrzewania wybuchowego .....	10
2.3. Zastosowanie materiałów wytworzonych w technologii zgrzewania wybuchowego .....	17
<b>3. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH ZAGADNIEŃ ZWIĄZANYCH Z ZMĘCZENIEM MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH.....</b>	<b>19</b>
3.1. Rys historyczny badań poświęconych zjawisku zmęczenia materiałów .....	19
3.2. Mechanizm powstawania pęknięć zmęczeniowych.....	20
3.3. Naprężenia własne a zjawisko zmęczenia materiałów .....	24
3.4. Podstawowe rodzaje charakterystyk zmęczeniowych.....	26
3.4.1. Wykresy naprężeniowe .....	26
3.4.2. Wykresy odkształceniowe.....	27
<b>4. PRZEGLĄD BADAŃ MATERIAŁÓW WIELOWARSTWOWYCH WYTWORZONYCH W TECHNOLOGII ZGRZEWANIA WYBUCHOWEGO ....</b>	<b>28</b>
4.1. Kierunki rozwoju technologicznego i badań materiałów zgrzewanych wybuchowo w literaturze specjalistycznej .....	28
4.2. Zjawiska degradacyjne w materiałach platerowanych przy obciążeniach cyklicznych.....	30
4.3. Normy i wymogi stawiane materiałom wielowarstwowym.....	31
4.3.1. Pobór materiału przeznaczonego do badań.....	31
4.3.2. Próba rozciągania .....	33
4.3.3. Próba zginania.....	34
4.3.4. Próba udarności.....	35
4.3.5. Próba ścinania .....	35
4.3.6. Próba ścinania przez rozciąganie .....	36
4.4. Podsumowanie przeglądu literatury .....	37

---

<b>5. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY.....</b>	<b>38</b>
5.1. Cel i zakres .....	38
5.2. Teza pracy .....	38
<b>6. EKSPERYMENTALNA CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH I METALOGRAFICZNYCH BIMETALU STAL-TYTAN ...</b>	<b>39</b>
6.1. Opis materiału pobranego do badań.....	39
6.2. Podstawowe właściwości mechaniczne .....	42
6.3. Badania metalograficzne.....	48
6.3.1. Stal S355J2+N .....	48
6.3.2. Tytan Grade 1.....	49
6.3.3. Bimetal stal-tytan .....	51
6.3.4. Identyfikacja parametrów złącza .....	59
<b>7. BADANIA EKSPERYMENTALNE .....</b>	<b>62</b>
7.1 <b>Badania zmęczeniowe.....</b>	<b>62</b>
7.1.1. Stanowisko do badań zmęczeniowych.....	62
7.1.2. Bimetal stal-tytan .....	64
7.1.3. Tytan Grade 1.....	70
7.1.4. Analiza właściwości cyklicznych materiałów poddanych próbie cyklicznego rozciągania – ściskania	75
7.2 <b>Pomiar naprężeń własnych .....</b>	<b>80</b>
7.2.1. Metoda trepanacyjna .....	81
7.2.2. Stanowisko pomiarowe .....	83
7.2.3. Kształt i wymiary próbek .....	86
7.2.4. Analiza wpływu wiercenia na pomiar naprężeń własnych .....	88
7.2.5. Obliczenia według zaleceń TML .....	90
7.2.6. Obliczenia według zaleceń normy ASTM .....	92
7.2.7. Dyskusja wyników .....	95
<b>8. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA .....</b>	<b>99</b>
<b>9. STRESZCZENIE .....</b>	<b>101</b>
<b>10. LITERATURA.....</b>	<b>102</b>

# 1. Wprowadzenie

Zmęczenie materiałów jest pojęciem obecnym w literaturze specjalistycznej od ponad 150 lat. Na przestrzeni tego czasu badania eksperymentalne prowadzone przez uczonych uczyniły z analizy zmęczeniowej narzędzie powszechnie stosowane w projektowaniu maszyn i urządzeń. Choć zakres realizowanej problematyki badawczej obejmuje wiele zagadnień, to w dalszym ciągu opis zjawiska zmęczenia materiałów, zrozumienie mechanizmów nim rządzących oraz co najważniejsze jednoznaczne określenie trwałości zmęczeniowej przysparza uczonym i inżynierom wiele kłopotów. Dlatego też poznanie właściwości zmęczeniowych np. nowych grup materiałów konstrukcyjnych jest kwestią mającą istotny wpływ na wydajność oraz bezpieczeństwo pracy. Rozwój technologiczny obecnie produkowanych maszyn i urządzeń jest w dużej mierze zależny od jak najefektywniejszego wykorzystania unikalnych właściwości materiałów konstrukcyjnych. Coraz wyższe normy wydajności narzucają również bardziej rygorystyczne standardy bezpieczeństwa układów maszynowych. Taka sytuacja prowadzi do poszukiwania nowego rodzaju materiałów lub wykorzystania ich mniej znanych form w nowych zastosowaniach. Grupą materiałów konstrukcyjnych, które mogą spełniać coraz wyższe wymagania eksploatacyjne są kompozyty metalowe wykonywane w technologii platerowania. Zgrzewanie wybuchowe jest technologią pozwalającą na uzyskanie kompozytów metalowych poprzez detonację materiałów wybuchowych. Główną zaletą technologii wybuchowej jest możliwość spajania materiałów, których nie da się połączyć przy użyciu konwencjonalnych metod. Alternatywą dla zgrzewania wybuchowego może być np. walcowanie na gorąco [1]. Początki platerowania sięgają czasów pierwszej wojny światowej. Sukcesywny rozwój technologiczny sprawił że w dzisiejszych czasach zgrzewanie wybuchowe ma ugruntowaną pozycję na rynku. Pomimo bardzo rozbudowanej tematyki badań prezentowanych w literaturze, materiały wielowarstwowe wykonane w technologii wybuchowej pozostają praktycznie nieprzebadane pod kątem zjawisk zmęczeniowych w nich zachodzących.

W niniejszej pracy skupiono się na określeniu zjawisk degradacyjnych zachodzących w bimetalu stal S355J2+N – tytan Grade 1 narażonemu na działanie obciążeń cyklicznych (rozciąganie-ściskanie). Głównym celem pracy jest określenie wpływu procesu zgrzewania wybuchowego na właściwości zmęczeniowe bimetalu stal – tytan oraz wyjaśnienie zjawisk towarzyszących tym zmianom. Prace podzielono na dziewięć rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiono historię zgrzewania wybuchowego i jego charakterystykę oraz główne zastosowania materiałów platerowanych. Rozdział trzeci poświęcono

opisowi podstawowych wiadomości dotyczących zjawiska zmęczenia materiałów. W rozdziale czwartym zamieszczono przegląd literatury, który podzielono na dwie części. Pierwsza z nich opisuje ogólne trendy w badaniu materiałów wielowarstwowych, natomiast druga swoim zakresem obejmuje wyłącznie literaturę, której przedmiotem zainteresowania jest zjawisko zmęczenia materiałów platerowanych wybuchowo. W rozdziale piątym przedstawiono cel, zakres i tezę badawczą niniejszej pracy. W rozdziałach szóstym i siódmym zaprezentowano przeprowadzone badania eksperymentalne. W pierwszym z nich scharakteryzowano właściwości wytrzymałościowe oraz metalograficzne bimetalu stal-tytan. Rozdział siódmy zawiera wyniki badań zmęczeniowych oraz pomiar naprężeń własnych metoda trepanacyjną. Pozostałe trzy rozdziały obejmują swoim zakresem podsumowanie, wnioski, streszczenie oraz literaturę.

## 2. Technologia zgrzewania wybuchowego

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną podstawowe wiadomości dotyczące zgrzewania wybuchowego. W pierwszym podrozdziale przedstawiono zarys historyczny technologii zgrzewania wybuchowego. Podrozdział drugi i trzeci zawierają kolejno opis procesu zgrzewania oraz zastosowanie materiałów w nim wytworzonych.

### 2.1. Zarys historyczny

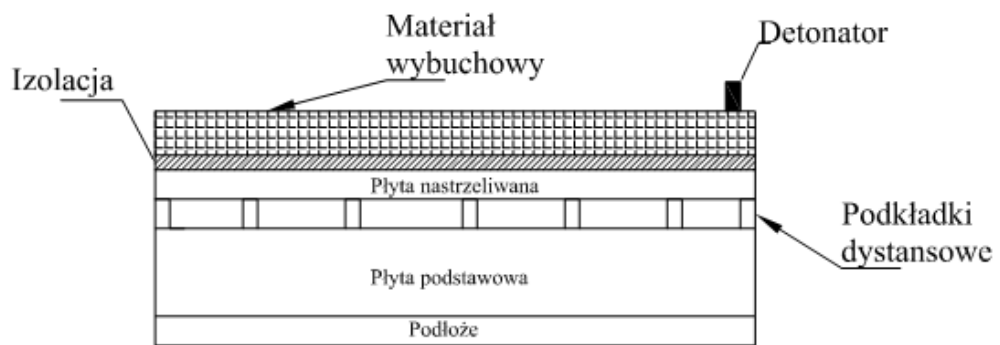
Rozwój konstrukcji projektowanych i budowanych na przestrzeni wieków powodował potrzebę wykorzystywania coraz nowszych i bardziej zaawansowanych typów połączeń pomiędzy materiałami konstrukcyjnymi [30,50]. Uzyskiwanie trwałych złączy pomiędzy metalami znane już w starożytności i średniowieczu pozwalało na wykonywanie podstawowych narzędzi oraz biżuterii. Stopniowy rozwój technologii spajania materiałów doprowadził do powszechnego stosowania metod takich jak spawanie gazowe i elektryczne, których początek przemysłowego zastosowania datuje się na koniec dziewiętnastego wieku. Technologia zgrzewania wybuchowego jest metodą stosunkowo młodą w porównaniu do powszechnie znanych konwencjonalnych metod łączenia materiałów, ponieważ jej początki sięgają pierwszej połowy dwudziestego wieku. Podczas trwania pierwszej wojny światowej [94,96] zaobserwowano, że odłamki pocisków moździerzowych rozpraszające się na skutek detonacji materiału wybuchowego uderzając w inne elementy metalowe przyklejały się do nich w trwały sposób [24]. Pierwsze złącza wykonane w technologii zgrzewania wybuchowego zaobserwowano w 1944r. podczas trwania II wojny światowej. L.R. Carl [20,55] obserwujący opisywane zjawisko określił je jako zgrzewanie pod wpływem wysokich prędkości. Przeprowadzono serię eksperymentów uzyskując identyczny efekt w postaci złączy pomiędzy warstwami miedzi. W badaniach metalograficznych przeprowadzonych przez Carla, połączenie zidentyfikowano jako uzyskane na zimno [24,94,97]. Ze względu na niedoskonałości dostępnego ówczesnie sprzętu w obrębie połączeń nie odnotowano występowania stref przetopionych. Dwa lata później w 1946r. zjawisko zgrzewania wybuchowego zostało zaobserwowane przez Lavrentieva [94], który skoncentrował się na falistym charakterze uzyskanego złączy. W latach pięćdziesiątych XX wieku tematyką zgrzewania wybuchowego zajmowała się niewielka grupa uczonych. Wskazanie pierwszego praktycznego zastosowania technologii zgrzewania wybuchowego jest utrudnione. Źródła literaturowe najczęściej wskazują V.Philipchuka [96], który w 1957r. podczas próby kształtowania materiałem wybuchowym aluminiowej płyty w ceow-



nik zastosował stalową matrycę [94]. Połączenie uzyskane pomiędzy materiałami pozwoliło na dostrzeżenie możliwości zastosowania technologii wybuchowej w aplikacjach przemysłowych. Rezultatem prac przeprowadzonych przez badacza był patent uzyskany w 1962. W zbliżonym okresie czasu w latach 1958-1969r. swoje prace prowadził również Pearson [67,73,80], który pracując nad prasowaniem proszków metalicznych zauważył proces zgrzewania się płyt, które podczas detonacji materiału wybuchowego nie były ustawione równoległe względem siebie. Podobnie jak inni badacze Alen Mapes i Wilson [9] zauważył falisty charakter uzyskanych połączeń. Zauważalne było również zastosowanie materiałów wybuchowych w utwardzaniu oraz formowaniu materiałów konstrukcyjnych. Równoległe badania prowadzono również w dawnym ZSRR, podczas których w próbie umacniania stali magnezowej uzyskano i przebadano trwałe połączenie z stalą węglową [94]. Prace badawcze trwały również na terenie Polski w ośrodkach takich jak: Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, Politechnice Gdańskiej. Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres badań przeprowadzonych na Wojskowej Akademii Technicznej, które zostały przedstawione w licznych publikacjach [10–12]. W późniejszych latach zgrzewanie wybuchowe rozpatrywane było także jako technologia, która mogłaby służyć do produkcji materiałów mających zastosowanie w rozwijającym się okresie podboju kosmosu [96]. W miarę upływu czasu pojawiało się coraz więcej firm oferujących wykonanie materiałów kompozytowych, a co za tym idzie coraz większy stopień zaawansowania technologicznego oferowanych produktów, które znalazły szerokie zastosowanie w licznych aplikacjach przemysłowych. Dotychczas w Polsce funkcjonuje tylko jedno przedsiębiorstwo oferujące produkcję kompozytów metalowych w technologii zgrzewania wybuchowego Z.T.W Explomet.

## 2.2. Charakterystyka procesu zgrzewania wybuchowego

Złącza uzyskiwane w technologii zgrzewania wybuchowego powstają w wyniku oddziaływań zachodzących podczas zderzenia łączonych warstw materiałów. Trwałe połączenie pomiędzy materiałami jest uzyskiwane, jeśli energia detonacji jest na tyle wysoka, aby zachowanie się materiału mogło zostać określone jako hydrodynamiczne [27,28,62,94]. Główne elementy wchodzące w skład standardowego układu służącego do zgrzewania płyt to: płyta bazowa nazywana często materiałem podstawowym, płyta materiału nakładanego oraz materiał wybuchowy. Schematyczny równoległy układ platerowania został przedstawiony na rys. 1.

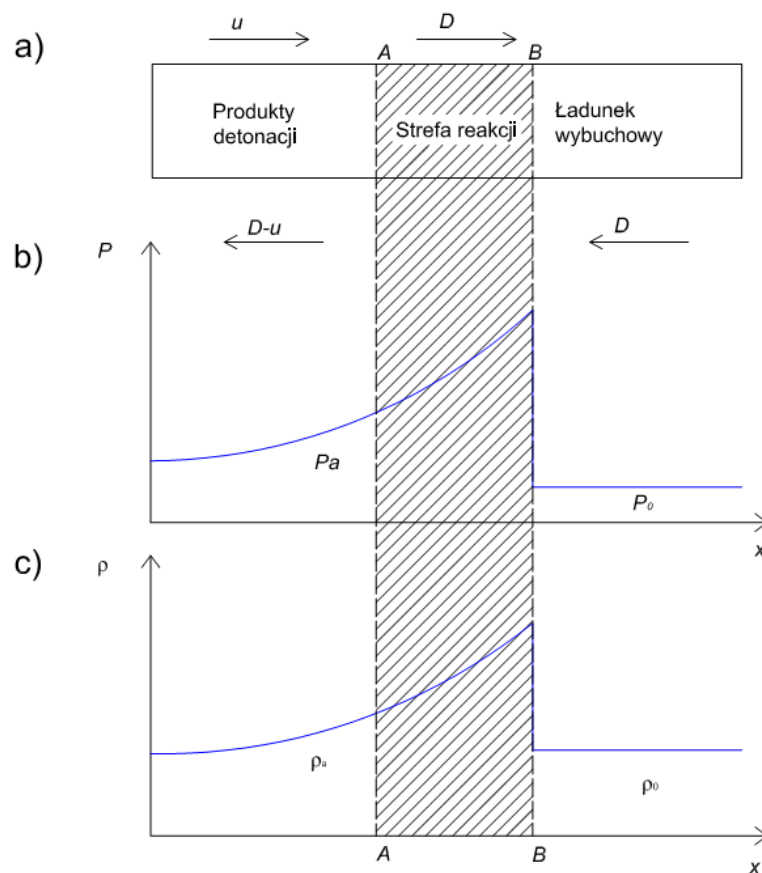


Rys. 1. Schemat podstawowego (równoległego) układu zgrzewania wybuchowego [94]

W praktyce zastosowanie znajduje również układ, w którym płyta nastrzeliwana jest ustawiona pod pewnym kątem względem płyty podstawowej. Rozwiązanie to jest wykorzystywane rzadziej w porównaniu do układu równoległego. Uzyskanie odpowiedniej energii detonacji jest związane z zastosowaniem właściwego materiału wybuchowego. W literaturze specjalistycznej materiały wybuchowe definiowane są jako związki chemiczne lub mieszaniny, które znajdując się pod wpływem zewnętrznych bodźców ulegają bardzo szybkim przemianom chemicznym. Wynikiem tych reakcji są duże ilości rozgrzanych gazów zdolnych do wykonania pracy mechanicznej (znajdujących się pod wysokim ciśnieniem) [23,24]. Istnieje wiele grup materiałów wybuchowych o różnorodnym przeznaczeniu: inicjujące, kruszące, miotające [23]. Ze względu na specyficzne wymagania w łączeniu materiałów konstrukcyjnych zastosowanie znajdują jedynie ładunki kruszące i inicjujące (jako detonator) [24,94]. Taki stan rzeczy jest związany z charakterem przyrostu ciśnienia podczas eksplozji. Materiały kruszące cechują się bardzo szybkim narastaniem produktów reakcji i niewielką wrażliwością na impulsy zewnętrzne. Do wymagań, którym muszą sprostać materiały wybuchowe używane w procesach zgrzewania można zaliczyć [94]:

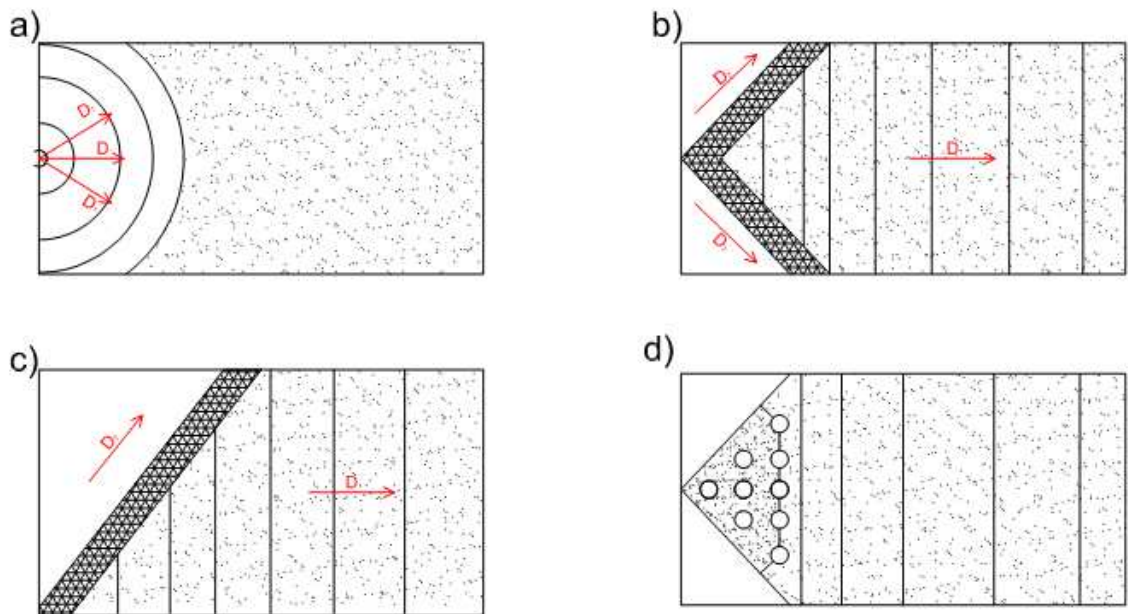
- Odpowiednią prędkość detonacji oznaczającą wartość poniżej prędkości rozchodzenia się fal dźwiękowych w zgrzewanych metalach, jednocześnie nie niższą niż 1500m/s.
- Stabilna prędkość detonacji musi zostać zachowana dla ładunków o dużych rozmiarach i niewielkiej grubości.
- Odpowiednią relację ceny do właściwości użytkowych.
- Możliwość bezpiecznego transportu, przechowywania oraz – jeśli zachodzi taka potrzeba – przygotowania w warunkach polowych.

W praktyce okazuje się, że najczęściej stosowane są sypkie mieszaniny, w skład których wchodzi TNT, saletra amonowa oraz sól [94]. Dokładny skład chemiczny jest ustalany w zależności od łączonych materiałów, w większości przypadków pozostaje on tajemnicą handlową firm specjalizujących się w wytwarzaniu kompozytów metalowych w technologii wybuchowej. Pojęciem nierozzerwalnie związanym z detonacją jest rozchodzenie się fali uderzeniowej, na czole której zostaje wzbudzona intensywna reakcja chemiczna (rys. 2). Energia reakcji zapewnia ciągłość detonacji i stałość parametrów procesu zgrzewania.



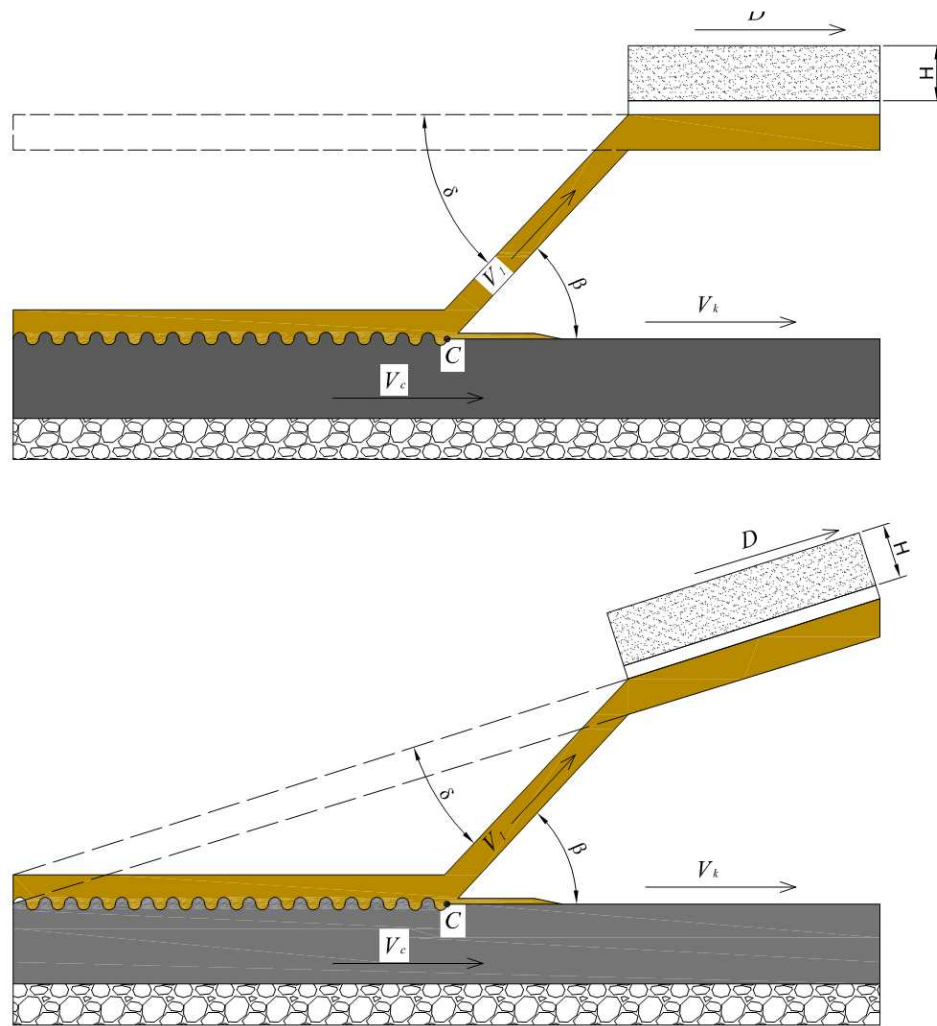
Rys. 2. Rozkład spalania materiału wybuchowego: a) materiał wybuchowy, b) zmiana ciśnienia  $P$  c)- zmiana gęstości w strefie reakcji [94]

Długość strefy reakcji jest zależna od rodzaju materiału wybuchowego. Powierzchnia oznaczona linią B-B stanowi front detonacji i oddziela strefę reakcji od pozostałego ładunku wybuchowego. Linia A-A wyznacza strefę dzielącą produkty detonacji od strefy reakcji. Płaszczyzna A-A nosi nazwę Chapmana-Joqueta. Kształt rozchodzenia się fali propagacyjnej jest zależny od sposobu jej zainicjowania. W przypadku punktowego pobudzenia fala detonacyjna posiada sferyczny kształt. Jednak praktyka pokazuje, że w wielu przypadkach wymagane jest uzyskanie frontu detonacji wzdłuż prostej (rys. 3). Najpopularniejszy sposób uzyskiwania tego typu fali detonacyjnych polega na zastosowaniu tzw. wybiegu w kształcie trójkąta zawierającego materiał wybuchowy o innej prędkości detonacji. Rozwiązanie to określane jest jako generator fali płaskiej (rys. 3c, b). Drugim sposobem na uzyskanie fali detonacyjnej o płaskim przebiegu fali detonacyjnej jest zastosowanie ładunku wybuchowego z otworami (rys. 3d).



Rys. 3. Schematy frontów detonacji, a)- sferyczny, b), c), d) - front o fali płaskiej, obszary zakreskowane - materiał wybuchowy o innych parametrach [24,94]

Układy zgrzewania stosowane w praktyce są podzielone na dwa rodzaje. W pierwszym wariantcie zgrzewane płyty są ustawione równoległe do siebie, natomiast w drugim płyta nakładana jest ustawiona pod pewnym kątem do płyty materiału podstawowego (rys. 4). Płyte bazową i nastrzelianą dzieli odsunięcie wstępne utrzymywane poprzez podkładki dystansowe. Materiał wybuchowy jest izolowany od płyty nakładanej przez warstwę technologiczną. Tworzywo używane, jako izolacja stanowi na ogół tajemnicę technologiczną firmy. Warstwa materiału wybuchowego jest również zabezpieczona na krawędziach zgrzewanych płyt poprzez listwy utrzymujące materiał na krawędziach.



Rys. 4. Schematy przebiegu zderzenia płyt, a) układ równoległy, b) układ z płytą nastrzeliwaną ustawioną pod kątem  $\alpha$ ,  $\beta$ - kąt zderzenia,  $\delta$ -kąt odrzutu,  $V_c$  – prędkość zderzenia punktu C względem łączonych płyt,  $V_k$  – prędkość strumienia odwrotnego,  $D$ - prędkość detonacji [24,94]

Określenie mechanizmu łączenia się materiałów podczas detonacji jest utrudnione ze względu na dynamiczny charakter zjawiska. Możliwe jest jednak zdefiniowanie zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami poprzez zastosowanie związków geometrycznych [29]. W ogólnym przypadku uwzględniając nachylenie płyty nastrzeliwanej pod kątem  $\beta$ , oraz przyjmując założenie pomijalnie małych sił działających wzdłużnie. Spełnione jest wtedy, kiedy ciśnienie znacznie przekracza dynamiczną granicę plastyczności materiału płyty nakładanej. Zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami przedstawiają się następująco [94]:

$$V_c = V_p \frac{\cos \frac{\delta}{2}}{\sin \beta} = D \frac{\sin \delta}{\sin \beta} \quad (1)$$

oraz

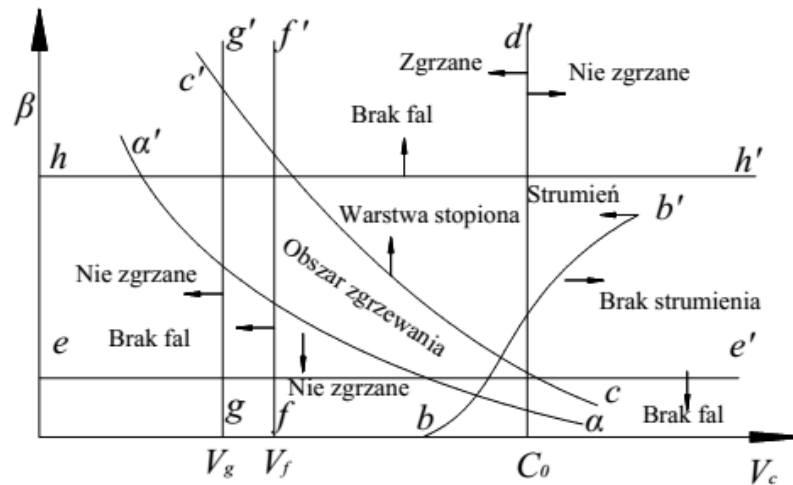
$$V_1 = V_c \frac{\cos(\frac{\beta + \alpha}{2})}{\cos(\frac{\beta - \alpha}{2})} = D \frac{\sin \delta \cos(\frac{\beta + \alpha}{2})}{\sin \beta \cos \frac{\delta}{2}}, \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha$  – kąt nachylenia płyty nastrzelwanej,  $\beta$  – kąt zderzenia,  $\delta$  – kąt odrzutu,  $V_c$  – prędkość zderzenia punktu  $C$  względem łączonych płyt,  $V_k$  – prędkość strumienia odwrotnego,  $D$  – prędkość detonacji. W przypadku równoległego ustawienia płyt  $\alpha=0$  więc  $V_1 = V_c = D$ . W literaturze przedmiotu wskazywane są również inne analityczne wyprowadzenia zależności między parametrami procesu zgrzewania [24,94] np. Crosslanda i Wiliamsa; Brkhoffa i Covana; Holtzmana, Dierbasa, Kudinowa i Krotorejewa, Wyile i in. Cechą wspólną prezentowanych związków analitycznych jest założenie odrzucenia płyty nastrzelwanej ku płycie podstawowej o niezmiennym położeniu.

Cechą charakterystyczną materiałów uzyskanych w technologii zgrzewania wybuchowego jest kształt przebiegu linii złącza, który w zależności od parametrów zgrzewania może być zbliżony do płaskiego lub częściej falistego. Kształty złącza utworzone podczas zgrzewania materiałów noszą również nazwę fal międzypowierzchniowych. Zjawisko ich powstawania jest przedmiotem wielu opracowań oraz symulacji. Jednak ze względu na dynamikę procesu zgrzewania prezentowane hipotezy mają charakter jakościowy lub pół jakościowy. Podejmowane są również próby numerycznej symulacji mechanizmów formowania się fal międzypowierzchniowych. Jakkolwiek, numeryczne symulacje o tak znaczącej dynamice procesów, uwzględniające interakcje pomiędzy falą detonacyjną a płytami metalowymi wymagają identyfikacji wielu parametrów modeli z różnych dziedzin fizyki [16]. Właściwości mechaniczne uzyskanego złącza są zależne głównie od parametrów zastosowanych w procesie zgrzewania. Do podstawowych wielkości charakteryzujących połączenie należą amplituda i długość fali. Jednak ze względu na lokalną zmienność, nie mogą być one traktowane, jako parametry o stałej wartości w obrębie całej płyty. Do głównych hipotez opisujących mechanizm powstawania fal, można zaliczyć modele oparte o [94]:

- efekty fal naprężeniowych,
- penetrację strumienia,
- niestabilność przepływu,
- analogie z opływem przeszkody.

Cechą charakterystyczną procesu zgrzewania jest bardzo wysoka wrażliwość na dobór parametrów. Wąskie okno technologiczne może zostać opisane za pomocą zależności w układzie  $\beta$ ,  $V_c$  (rys. 5).



Rys. 5. Podstawowe parametry zgrzewania wybuchowego a cechy uzyskanego złącza [94]

Wykres podzielony jest prostymi wytyczającymi granicę uzyskania prawidłowego złącza. Prosta  $bb'$  stanowi wartości graniczne kąta  $\beta$ , dla których, możliwe jest osiągnięcie zjawiska samooczyszczenia. Polega ono na wydmuchiowaniu zanieczyszczeń z pomiędzy łączonych płyt. Zgrzewanie przy parametrach leżących po prawej stronie krzywej powoduje osiągnięcie zbyt wysokiej energii, co skutkuje rozwarstwieniem się materiału. W obszarach delaminacji kompozytu na jednej z płyt naniesiona zostaje cienka warstwa materiału drugiej płyty. Prosta  $dd'$  oznacza górną wartość granicy prędkości  $V_c$ , która powinna być niższa niż prędkość rozchodzenia się dźwięku w łączonych materiałach. Zmiana jej wartości następuje poprzez prędkość detonacji i wstępne ustalenie zgrzewanych płyt (kątami  $\alpha$ ,  $\beta$ ). Prosta  $ff'$  wyznacza zakres parametrów, dla których osiągnięte jest połączenie faliste. W obszarze parametrów znajdujących się pomiędzy prostymi  $ff'$  i  $gg'$  połączenia charakteryzują się płaskim przebiegiem, z wyróżniającym się jednokierunkowym odkształceniem struktur materiału przylegających do powierzchni złącza. Krzywa  $aa'$  określana jest jako dolna granica zgrzewania wskazując warunek uzyskania minimalnej wartości ciśnienia powodującej dostatecznie duże odkształcenia plastyczne.

Ze względu na zastosowanie materiałów wybuchowych technologia zgrzewania wybuchowego może być stosowana wyłącznie z zachowaniem wysokich standardów bezpieczeństwa. Operacje zgrzewania przeprowadzane są na przystosowanych do tego poligonach wojskowych, w kamieniołomach, itp. Obecnie na rynku dostępne są również komory detonacyjne umożliwiające przeprowadzenie zgrzewania w zamkniętych pomieszczeniach.

Jednak ze względu na ograniczenia technologiczne nie są one przeznaczone dla ładunków o bardzo wysokiej mocy.

Przygotowanie układów zgrzewania następuje zazwyczaj w miejscu detonacji. W pierwszej kolejności płyty wykonane z materiału podstawowego są ustawiane i poziomowane na wyrównanym podłożu. Następnie ich powierzchnia jest oczyszczana z zanieczyszczeń. Na górnej powierzchni płyty bazowej umieszczane są podkładki dystansowe, ich regularne rozłożenie na całej powierzchni zapewnia stałą odległość pomiędzy łączonymi płytami. Po zapewnieniu równomiernego odsunięcia wstępnego na podkładkach dystansowych kładziona jest płyta materiału nastrzeliwanego. Aby uniknąć zanieczyszczenia powierzchni łączonych materiałów, np. ziarnami piasku nawiewanego przez wiatr, krawędzie płyt oklejane są taśmą. W kolejnym kroku do płyt dokładane jest ramka opasająca, którą zasypuje się warstwą izolatora, a następnie materiału wybuchowego (rys. 6).



Rys. 6. Przygotowanie układu zgrzewania

W ostatnim kroku sypki materiał wybuchowy jest wyrównywany i zabezpieczany kolejną warstwą izolacji. W punkcie detonacji mocowany jest zapalnik. Ostatnim etapem jest połączenie kablami zapalnika i urządzenia wzbudzającego (rys. 7). Detonacja materiałów wybuchowych następuje po oddaleniu się załogi na bezpieczną odległość.





Rys. 7. Układ zgrzewania przygotowany do detonacji

Materiały wielowarstwowe po zgrzewaniu wybuchowym wymagają w większości przypadków walcowania ze względu na znaczne deformacje płyt spowodowane wybuchem. W przypadku niektórych grup kompozytów metalowych przed walcowaniem stosuje się operacje obróbki cieplnej zapobiegającą pękaniu warstw materiału podczas prostowania.

### **2.3. Zastosowanie materiałów wytworzonych w technologii zgrzewania wybuchowego**

Zgrzewanie wybuchowe umożliwia łączenie ze sobą wielu grup materiałów konstrukcyjnych. Niepodważalną zaletą technologii wybuchowej jest możliwość łączenia ze sobą materiałów, których w obecnej chwili nie da się połączyć trwale konwencjonalnymi metodami takimi jak: lutowanie, klejenie czy spawanie. Jednak kluczową korzyścią wynikającą z zastosowania kompozytów metalowych jest możliwość znacznego obniżenia kosztów wykonania danej konstrukcji poprzez zmniejszenie ilości kosztownych materiałów o unikalnych właściwościach. Przykładem tego typu materiału może być bimetel stal-tytan, który dzięki warstwie stali przenoszącej obciążenia zachowuje zakładane parametry wytrzymałościowe zapewniając bezpieczeństwo pracy, równocześnie pozwalając na zmniejszenie ilości użytego, kosztownego tytanu. Materiały platerowane znajdują zastosowanie głównie w postaci blach lub taśm dwu lub trój-warstwowych. Do głównych aplikacji materiałów platerowanych można zaliczyć zbiorniki wysokociśnieniowe oraz wysoko wyspecjalizowane elementy aparatury procesowej (rys. 8).



Rys. 8. Ściana sitowa wykonany z bimetalu stal-tytan [59]

Wśród ważniejszych aplikacji można także wymienić następujące elementy:

- łożyska ślizgowe,
- elementy agregatów metalurgicznych,
- kessony sklepień pieców wysokiej mocy do przerobu rudy,
- łopatki turbin wodnych,
- zbiorniki i dna sitowe dla przemysłu chemicznego i energetyki,
- retorty chemiczne do pracy w wysokich temperaturach,
- pojemniki na wodę i odpady nuklearne,
- zbiorniki ścieków miejskich zawierających znaczne ilości jonów chloru,
- elementy wyposażenia kuchennego,
- płyty przeciwpancerne,
- końcówki narzędzi maszyn do prac ziemnych lub urządzeń przemysłowych,
- taśmy bimetaliczne mające zastosowanie w termostatach,
- folie jubilerskie,
- łączniki spawalnicze w łodziach,

Badania naukowe wskazują na poszerzającą się perspektywę zastosowania materiałów platerowanych. Realizowana w pracy tematyka daje możliwość próby zastosowania bimetalu stal-tytan w nowych konstrukcjach inżynierskich. Jako przykład mogą tu służyć perspektywy zastosowania łączników spawalniczych (stal-aluminium) w konstrukcji naczip samochodów ciężarowych.

### **3. Przegląd podstawowych zagadnień związanych z zmęczeniem materiałów konstrukcyjnych**

W niniejszym rozdziale zawarte zostały podstawowe informacje dotyczące zjawiska zmęczenia materiałów konstrukcyjnych niezbędne do realizacji tematyki badawczej będącej przedmiotem niniejszej pracy. W podrozdziałach przedstawione zostaną: krótki przegląd historyczny wybranych prac istotnych dla rozwoju zmęczenia materiałów, prezentacja podstawowych mechanizmów powstawania pęknięć zmęczeniowych, wpływ obecności naprężeń własnych na procesy zmęczeniowe zachodzące w materiale oraz przegląd charakterystyk zmęczeniowych zastosowanych w pracy.

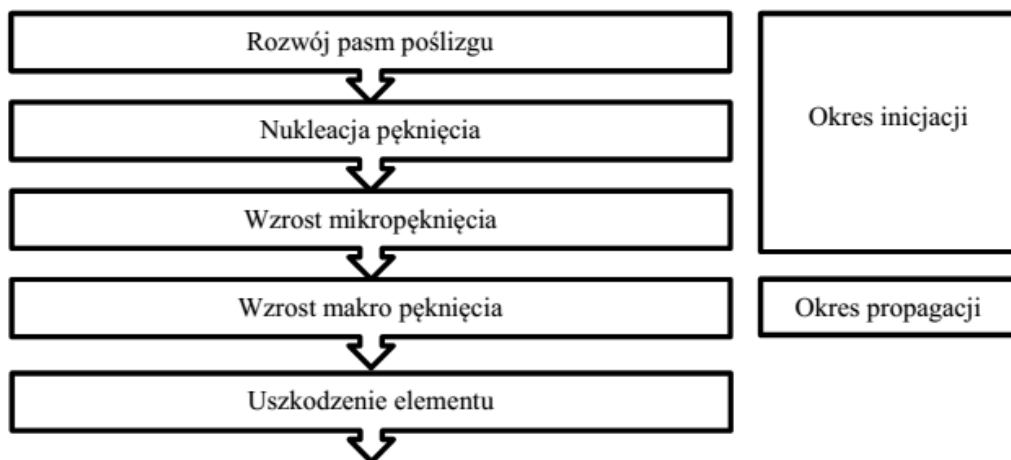
#### **3.1. Rys historyczny badań poświęconych zjawisku zmęczenia materiałów**

Jednym z najbardziej znanych badaczy (lecz nie pierwszym podejmującym tą tematykę) utożsamianych z rozwojem badań nad zjawiskiem zmęczenia materiałów konstrukcyjnych jest August Wöhler. Uczony w okresie od około 1850 do 1875 roku przeprowadzał liczne badania eksperymentalne. Głównym ich celem było określenie granicy naprężenia, poniżej której nie zachodzi uszkodzenie materiału wywołane zjawiskiem zmęczenia. Badania, mające jednoznacznie określić wspomnianą granicę, przeprowadzano dla rzeczywistych elementów oraz na próbkach laboratoryjnych. Najważniejszym rezultatem ponad stuletnich prac przeprowadzanych przez wielu różnych uczonych było określenie czynników wpływających na trwałość zmęczeniową. Jako ważne wydarzenie można również wymienić opracowanie przez Bauschingera lustrzanego ekstensometru (1885) pozwalającego uzyskać dokładność na poziomie jednego promila. Wynalazca przez wiele lat zajmował się określeniem zależności pomiędzy niewielkimi odkształceniami plastycznymi a granicą zmęczenia. Uczony wierzył w „naturalną” granicę elastyczności mierzoną w cyklach, poniżej której zjawisko zmęczenia nie występuje. W dzisiejszych czasach zjawisko to jest określane jako różnica pomiędzy statyczną (monotoniczną) a cykliczną granicą plastyczności materiałów. W 1903 roku Ewing i Humphrey opublikowali pracę „*The fracture of materials under repeated alterations of stress*”, w której podjęto próbę wyjaśnienia zjawiska zmęczenia poprzez badanie mikrostruktury. Autorzy wykorzystując mikroskop optyczny prowadzili obserwacje mikrostruktury próbek podczas testów zmęczeniowych. W roku 1923 Jenkin opracował pierwszy prosty model opisujący zachowanie materiału z użyciem zależności pomiędzy odkształceniem i naprężeniem. Praca pod tytułem „*The*

Fatigue of Metals” autorstwa H.F Moore’a opublikowana została w 1927 roku. Była ona rezultatem wieloletnich badań nad praktycznymi aspektami zmęczenia materiałów obejmującymi między innymi problemy spotykane w kolejnictwie. W latach 30-40 dwudziestego wieku prace naukowców koncentrowały się na eksperymentalnym ustaleniu czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową materiałów. W latach 50-tych swoje prace rozpoczęli Coffin i Manson ustalając zależność pomiędzy odkształceniami plastycznymi a trwałością zmęczeniową. Od lat 70-tych analiza konstrukcji pod kątem zjawiska zmęczenia materiałów stała się powszechnym narzędziem stosowanym w projektowaniu. Pomimo zaawansowania technologicznego prowadzonych badań oraz szerokiego dorobku naukowego, którego przedmiotem jest zjawisko zmęczenia dalej pozostaje ono w sferze zainteresowania wielu badaczy. Rozwój i poszerzanie prowadzonych badań pozwalają na podwyższenie standardów bezpieczeństwa urządzeń oraz konstrukcji [13].

### 3.2. Mechanizm powstawania pęknięć zmęczeniowych

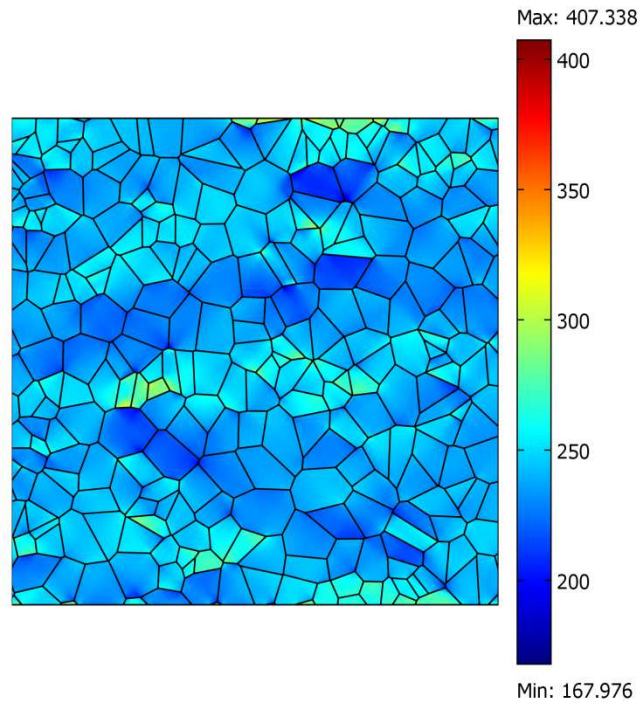
Zmęczenie definiowane jest jako lokalnie zachodzący proces wywołany obciążeniem cyklicznym. Jest ono rezultatem wielu zjawisk zachodzących w materiale takich jak: inicjacja pęknięcia, propagacja, całkowite uszkodzenie elementu [13,17,51,54,61,63]. Podczas oddziaływania obciążeń o cyklicznym charakterze lokalne odkształcenia plastyczne występują w miejscach o najwyższych naprężeniach. Trwałe odkształcenia plastyczne powodują nieodwracalne uszkodzenie materiału, a w miejscu ich występowania rozwija się pęknięcie zmęczeniowe. Jeśli materiał doznaje coraz wyższej liczby cykli obciążenia długość pęknięcia wzrasta prowadząc w rezultacie do całkowitego uszkodzenia elementu. Zmęczeniowy proces uszkodzenia materiału składa się z następujących etapów (rys. 9):



Rys. 9. Etapy rozwoju pęknięcia zmęczeniowego[82]

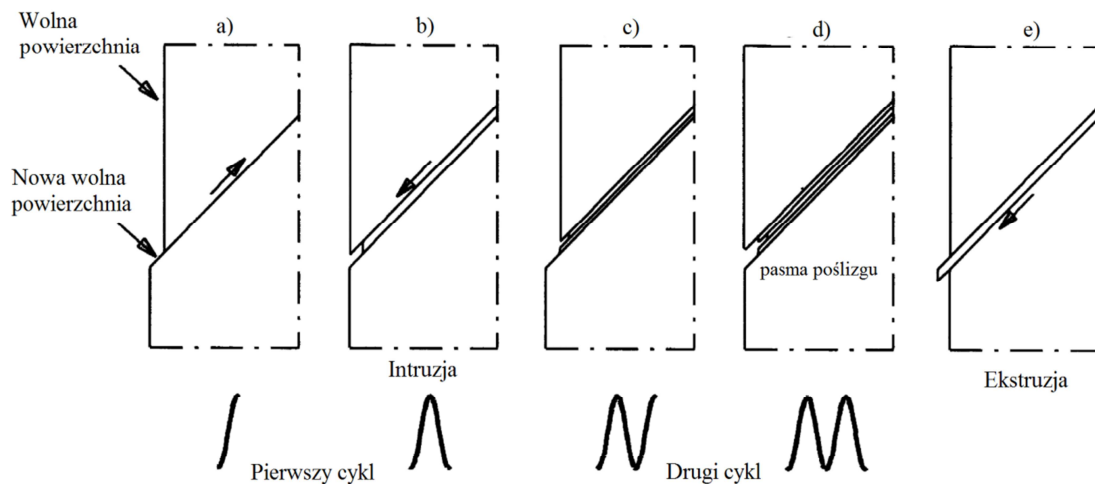
Przez wiele lat uważano, że występowanie zjawiska zmęczenia jest bezpośrednio powiązane z granicą zmęczenia, definiowaną jako wartość naprężenia, poniżej którego nie występuje zmęczeniowe uszkodzenie materiału. Najnowsze prace wskazują jednak, że klasycznie definiowana granica zmęczenia nie istnieje [65,66]. Inicjacja pęknięcia zmęczeniowego może następować już od pierwszych cykli obciążenia oddziałujących na materiał. Pomimo procesu nukleacji pęknięcia zmęczeniowego, mikropęknięcia obecne w materiale pozostają niewidoczne przez pewien okres czasu. Jeśli w warunkach laboratoryjnych mikropęknięcia zaczynają być dostrzegalne to na ogół moment ten stanowi niewielki procent całkowitej trwałości zmęczeniowej danego elementu. Nawet po zainicjowaniu pęknięcia zmęczeniowego jego wzrost często pozostaje powolny i nierównomierny. Jest to spowodowane czynnikami związanymi z mikrostrukturą takimi jak np. granice ziarna. Jeśli w objętości materiału pojawiają się inne mikropęknięcia oddalone od siebie, to proces ich wzrostu może przybierać bardziej regularny charakter i bywa określany jako rzeczywisty moment rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [82].

Mechanizm inicjacji pęknięcia zmęczeniowego i jego wzrostu jest konsekwencją formowania się nowych pasm poślizgów. Powodują one cykliczną plastyczną deformację mikrostruktury, inne określenie tego zjawiska to aktywowanie dyslokacji. Uszkodzenie materiału zachodzi dla wartości naprężeń lokalnie przekraczających granicę plastyczności. Przy niskim poziomie naprężeń w elemencie, odkształcenia plastyczne są obecne jedynie w objętości kilku ziaren materiału. Zazwyczaj miejscem ich pojawiania się jest powierzchnia materiału. Ponieważ pasma poślizgu nie są „zablokowane” przez otaczającą mikrostrukturę, odkształcenia na powierzchni zewnętrznej pojawiają się na ogół przy niższych poziomach naprężeń. Proces tworzenia się pasm poślizgu jest związany z naprężeniami stycznymi. W skali mikrostruktury naprężenia nie są rozłożone równomiernie w całej objętości materiału (rys. 10).



Rys. 10. Nierównomierne rozłożenie naprężeń w mikrostrukturze[36]

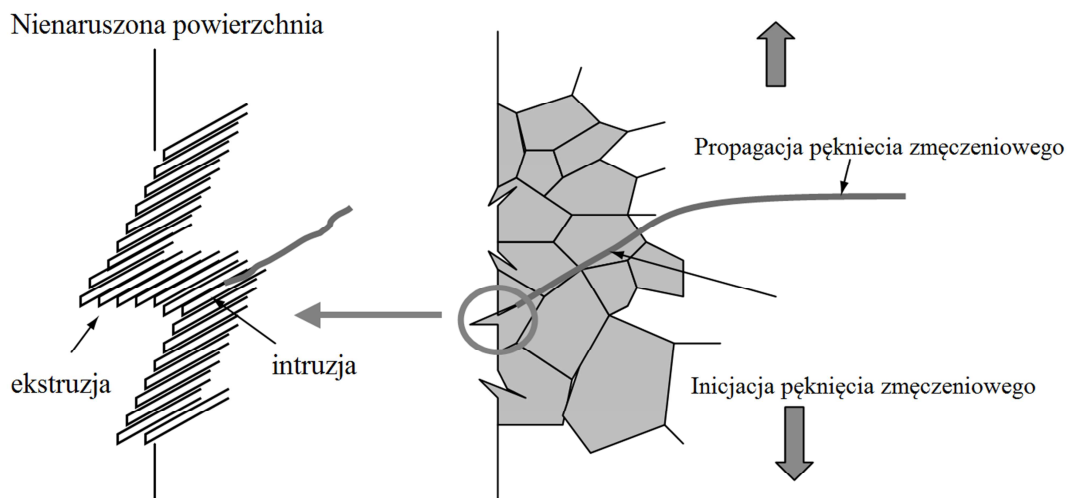
Poziom naprężeń stycznych oddziałujących na pasma poślizgu jest zależny od kształtu, rozmiarów oraz orientacji ziarna (rys. 10). W przypadku niektórych ziaren materiału znajdujących się na powierzchni czynniki te bardziej sprzyjają powstawaniu nowych pasm poślizgu, których mechanizm powstawania zaprezentowano na rys. 11.



Rys. 11. Mechanizm powstawania pasm poślizgu[82]

Jeśli w ziarnie materiału powstanie pasmo poślizgu wraz z nim na powierzchni materiału zostanie utworzone obrzeże, które stanowi nowy wysunięty fragment struktury (rys. 11a). Na powierzchni zewnętrznej wystawionej na działanie powietrza atmosferycznego lub cieczy osadzają się np. tlenki. Poślizg podczas wzrostu obciążenia powoduje częściowe

utwardzenie się struktury w rejonie jego występowania. W wyniku tego zjawiska przy odciążeniu w obrębie pasma poślizgu zostanie wytworzone większe naprężenie styczne, ale tym razem działające w przeciwnym kierunku (rys. 11b). Ponieważ tlenki i zanieczyszczenia, które osadziły się na nowopowstałej powierzchni nie mogą być usunięte. Proces utwardzenia się struktury w obrębie pasma poślizgu nie jest w pełni odwracalny. W miarę działania obciążenia w kolejnych cyklach, tworzone są nowe pasma poślizgu co przedstawiono na rys. 11c,d,e. Ogół zjawisk zachodzących w materiale powoduje rozrost pęknięcia zmęczeniowego (rys. 12).



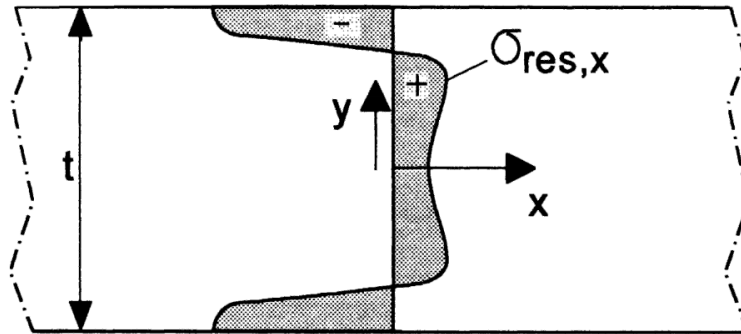
Rys. 12. Etapy rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [61]

Obserwacje zmian zachodzących w mikrostrukturze materiału poddanego obciążeniom cyklicznym prowadzą do następujących wniosków:

- (i) Nawet jeden cykl obciążenia jest wystarczający do zainicjowania intruzji w materiale, defekt może być traktowany jako mikropęknięcie.
- (ii) Mechanizm powstawania nowych pasm poślizgów mający miejsce w pierwszym cyklu może być powtórzony w każdym następnym równocześnie powodując rozrost pęknięcia w każdym cyklu.
- (iii) Pierwsze mikropęknięcie może być zainicjowane wzdłuż pasma poślizgu [51,63,82].

### 3.3. Naprężenia własne a zjawisko zmęczenia materiałów

Jako definicję naprężeń własnych przyjmuje się rozkład naprężeń obecnych w danym elemencie, który nie został wywołany poprzez zewnętrzne obciążenia [87]. Naprężenia własne bywają również błędnie określane jako wewnętrzne. Naprężenia własne o charakterze ściskającym i rozciągającym zawsze występują razem. Przykładem może być fragment płyty widoczny na rys. 13. Jeśli na dany element nie działa żadna zewnętrzna siła naprężenia rozciągające muszą być zrównoważone przez naprężenia ściskające materiał.



Rys. 13 Rozkład naprężeń własnych[82]

Jeśli nie istnieją żadne siły zewnętrzne to musi być spełniony warunek opisany następującym równaniem:

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_x dy = 0, \quad (3)$$

gdzie:  $\sigma_x$ -naprężenia w kierunku  $x$ ,  $t$ -wymiar charakterystyczny.

Identyczne założenie dotyczy również momentów działających na układ płaski (rys. 13):

$$\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y \cdot \sigma_x dy = 0. \quad (4)$$

Jeśli do elementu, w którym występują naprężenia własne przyłożona zostanie siła zewnętrzna utworzony zostanie nowy rozkład naprężeń, który w zakresie odkształceń sprężystych będzie sumą rozkładów:

$$\sigma = \sigma_{zew} + \sigma_{res}, \quad (5)$$

gdzie:  $\sigma_{zew}$ -rozkład naprężeń wywołany obciążeniami zewnętrznymi,  $\sigma_{res}$ - rozkład naprężeń własnych (*residuals*).

Obecność naprężeń własnych w materiale może mieć duży wpływ na trwałość zmęczeniową. Jeśli do elementu, w którym panują naprężenia własne przyłożone zostanie obciążenie cykliczne o amplitudzie  $\sigma_a$  i wartości średniej  $\sigma_m$ , to amplituda obciążenia po-



zostaje bez zmian, natomiast wartość średnia zostaje zmieniona przez naprężenia własne według następującego równania:

$$\sigma_m = \sigma_{m,zew} + \sigma_{res} . \quad (6)$$

W przypadku dodatniej wartości naprężeń własnych (powodujących rozciąganie materiału), ich wpływ na trwałość zmęczeniową może być niekorzystny [52,53]. Ściskające naprężenia własne mogą oczywiście zapobiegać otwieraniu się mikropęknięć. Nie powoduje to jednak całkowitego zatrzymania ich propagacji, obniżone jest jedynie tempo zachodzącego procesu.

Do głównych przyczyn występowania naprężeń własnych można zaliczyć:

- obróbkę cieplną,
- wszelkiego rodzaju procesy produkcyjne,
- odkształcenia plastyczne, w wielu przypadkach występujące w krawędziach geometrycznych,
- połączenia pomiędzy elementami.

Jeśli obecność naprężeń własnych w materiale jest niekorzystna najczęściej są one usuwane poprzez zabiegi obróbki termicznej. Jeżeli wyżarzanie jest przeprowadzane dla temperatury rekrytalizacji danego materiału to jego rezultatem jest prawie całkowite usunięcie naprężeń własnych. W trakcie obróbki termicznej rekrytalizacja struktury powoduje usunięcie dyslokacji oraz wszystkich trwałych odkształceń plastycznych a co za tym idzie eliminowane są naprężenia własne. W przypadku obróbki cieplnej, której parametry nie obejmują temperatury rekrytalizacji, zostaną usunięte tylko niektóre dyslokacje i niedoskonałości mikrostruktury, a co za tym idzie zredukowana zostanie tylko część naprężeń własnych. Wadą obróbki cieplnej może być pogorszenie właściwości materiału poprzez osłabienie efektów hartowania, czy spadek właściwości mechanicznych [82]. Problematyka naprężeń własnych oraz ich wpływ na zjawiska zmęczeniowe zachodzące w materiałach wielowarstwowych wyprodukowanych w technologii wybuchowej jest przedmiotem niewielkiej ilości opracowań specjalistycznych [40,44,83].

### 3.4. Podstawowe rodzaje charakterystyk zmęczeniowych

Wyniki badań zmęczeniowych są przedstawiane w formie charakterystyk zmęczeniowych. Zastosowanie charakterystyk zmęczeniowych umożliwia nie tylko porównywanie materiałów między sobą, ale również jest pomocne przy projektowaniu. Zaprezentowane zostaną trzy najpowszechniej stosowane rodzaje wykresów zmęczeniowych.

#### 3.4.1 Wykresy naprężeniowe

Wykres naprężeniowy był pierwszą próbą ilościowego opisu zjawiska zmęczenia. Jest powszechnie stosowany do dzisiaj między innymi jako narzędzie oceny trwałości przy projektowaniu elementów maszyn. Nie zaleca się stosowania charakterystyki naprężeniowej dla zakresu niskiej liczby cykli, gdzie występują duże odkształcenia plastyczne. Wyniki badań eksperymentalnych opisane są w układzie naprężenie-liczba cykli ( $\sigma_a-N_f$ ). Klasyyczny wykres Wöhlera jest podzielony na dwa odcinki. Nachylona część obejmuje obszar ograniczonej trwałości zmęczeniowej natomiast odcinek równoległy wyznacza wartość hipotetycznego naprężenia, poniżej którego zjawisko zmęczenia nie zachodzi dla danego materiału. Odcinek ograniczonej wytrzymałości jest aproksymowany zależnością Wöhlera:

$$\sigma_a = A + m \log N_f, \quad (7)$$

gdzie  $N_f$  – trwałość liczona w cyklach;  $\sigma_a$  – amplituda naprężenia;  $A$ ,  $m$  – stałe modelu regresji. Często stosowana jest również postać podwójnie logarytmiczna  $\log(\sigma_a) - \log(N_f)$ , zaproponowana przez Basquina:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b, \quad (8)$$

lub w postaci:

$$\log N_f = A + m \log(\sigma_a). \quad (9)$$

Do głównych zalet podejścia naprężeniowego należy przede wszystkim prostota w stosowaniu i bardzo duża ilość charakterystyk zmęczeniowych materiałów dostępnych w literaturze [54].

### 3.4.2 Wykresy odkształceniowe

Wykresy odkształceniowe opierają się o amplitudę odkształcenia. Model został zaproponowany przez Mansona-Coffina-Basquina, i wyrażony jest następującym wzorem:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_{f,c} (2N_f)^c, \quad (10)$$

gdzie:  $\varepsilon_{a,t}$  – amplituda odkształcenia całkowitego,  $\varepsilon_{a,e}$  – amplituda odkształcenia sprężystego,  $\varepsilon_{a,p}$  – amplituda odkształcenia plastycznego,  $2N_f$  – liczba nawrotów obciążenia (półcykli),  $E$  – moduł Younga,  $\sigma'_f$ ,  $b$  – współczynnik i wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,  $\varepsilon'_{f,c}$ ,  $c$  – współczynnik i wykładnik zmęczeniowego odkształcenia plastycznego.

Znane są również modele oparte o zależność pomiędzy amplitudą naprężenia  $\sigma_a$  i odkształcenia  $\varepsilon_a$ . Stosuje się je dla zakresu dużych odkształceń plastycznych. Model opracowany przez Ramberga – Osgooda, nazywany jest inaczej krzywą cyklicznego odkształcenia. Zastosowanie go ułatwia weryfikację zachowania się materiału poddanego działaniu obciążeń cyklicznych.

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (11)$$

gdzie:  $\sigma_a$  – amplituda naprężenia,  $K'$  – współczynnik cyklicznego umocnienia,  $n'$  – wykładnik cyklicznego umocnienia [54].

## **4. Przegląd badań materiałów wielowarstwowych wytworzonych w technologii zgrzewania wybuchowego**

Przeprowadzony przegląd literatury podzielono na dwa obszary. W pierwszym podrozdziale pokrótce zaprezentowano główne trendy w literaturze światowej i krajowej dotyczące procesu zgrzewania wybuchowego oraz materiałów wytworzonych za jego pomocą. W podrozdziale drugim skupiono się na zaprezentowaniu stanu wiedzy na temat zjawiska zmęczenia zachodzącego w materiałach wielowarstwowych ze szczególnym uwzględnieniem analizowanego w pracy bimetalu stal-tytan. Jako uzupełnienie przeglądu w podrozdziale trzecim przedstawiono przegląd znormalizowanych procedur dotyczących kontroli jakości materiałów wielowarstwowych wykonanych w technologii zgrzewania wybuchowego.

### **4.1. Kierunki rozwoju technologicznego i badań materiałów zgrzewanych wybuchowo w literaturze specjalistycznej**

Literaturę specjalistyczną, której przedmiotem jest zgrzewanie wybuchowe podzielono na dwie główne grupy. Do pierwszej z nich zaliczyć można obszernie tematycznie i powszechnie uznane wydania podręcznikowe, które swoim zakresem obejmują technologie zgrzewania wybuchowego od podstaw teoretycznych do samego przygotowania procesu. Ze względu na wąskie zastosowanie i fakt, że zgrzewanie wybuchowe może być traktowane, jako pewnego rodzaju uzupełnienie standardowych technologii do zbioru tych publikacji można zaliczyć niewielką liczbę pozycji literaturowych, np. [24,91] oraz mniej szczegółowe głównie obcojęzyczne opracowania w różnego rodzaju literaturze specjalistycznej dla inżynierów, np. pozycje [28,84]. Drugą grupę stanowi bardzo szeroki zbiór publikacji podejmujących tematykę materiałów wielowarstwowych z perspektywy badań skoncentrowanych na właściwościach strukturalnych oraz parametrach użytkowych. Prezentowane są szczegółowe wyniki badań metalograficznych dla różnych często stosowanych par materiałów np. takich jak: stal-stal [34,79], aluminium-stal [2], stal-tytan [70], miedź-aluminium [74]. Badany jest również wpływ czynników technologicznych, na jakość i cechy materiałowe platerów. Jako przykład zespołu badaczy specjalizującego się w badaniach nad materiałami platerowanymi można przytoczyć liczne prace [3–5,7,8] autorstwa zespołu Prof. Akbari Mousavi. Szeroko podjęta tematyka obejmuje swym zakresem analizę mechanizmów formowania się połączeń, badań nad właściwościami mechanicz-

nymi i strukturalnymi uzyskanych połączeń. Tematyką szczególnie zasługującą na uwagę są próby numerycznej symulacji procesu zgrzewania np. [6]. Zagadnienie to jest również przedmiotem zainteresowania innych badaczy np. Yuxin Wang [95]. Istotny wkład w aktualny stan wiedzy wnoszą także pozycje podsumowujące ogólnoswiatowe osiągnięcia badawcze [29]. Prace nad zagadnieniami związanymi ze zgrzewaniem wybuchowym prowadzone są również w polskich ośrodkach naukowych. Do grona instytucji wnoszących istotny dorobek w omawianej tematyce zaliczyć można: Politechnikę Opolską [14,43,47,74–76], Politechnikę Warszawską, Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie [76], Politechnikę Śląską, Akademię Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie [71,71,72], Wojskową Akademię Techniczną, Politechnikę Częstochowską czy Politechnikę Gdańską [91–93].

Nieodłącznym elementem rozwoju działań badawczych z zakresu zgrzewania wybuchowego jest współpraca z wyspecjalizowanym partnerem przemysłowym. W wypadku badań prowadzonych przez polskich naukowców jedynym krajowym dostawcą materiałów jest Zakład Technologii Wysokoenergetycznych Explomet, Gałka, Szulc spółka jawna. Przedsiębiorstwo Explomet posiada silnie ugruntowaną pozycję na rynku międzynarodowym jednocześnie uczestnicząc w wielu projektach badawczych i rozwojowych.

Reasumując ogólny przegląd literatury zaznaczono główne kierunki badań prowadzonych przez naukowców Polskich i zagranicznych nad materiałami platerowanymi:

- Poznanie procesów formowania złącza, np. mechanizmów powstawania fal międzypowierzchniowych i wykorzystanie ich w polepszaniu właściwości materiałów wielowarstwowych.
- Zbudowanie modeli obliczeniowych odzwierciedlających proces zgrzewania wybuchowego.
- Uzyskiwanie połączeń pomiędzy nowymi grupami materiałów, zastosowanie nowych rodzajów obróbki cieplnej oraz zdefiniowanie ich wpływu na właściwości materiałów oraz połączeń.
- Identyfikacja zjawisk i procesów związanych z eksploatacją materiałów wielowarstwowych np. zjawiska zmęczenia lub wykorzystania naprężeń własnych generowanych podczas zgrzewania wybuchowego.

## 4.2. Zjawiska degradacyjne w materiałach platerowanych przy obciążeniach cyklicznych

W szerszej perspektywie zjawisko zmęczenia materiałów konstrukcyjnych jest efektem oddziaływania wielu czynników, do których zaliczyć można: obciążenie elementów maszyn (cykliczne, losowe, statyczne oraz dynamiczne, naprężenia własne), strukturę oraz rodzaj materiału, warunki pracy i inne. Są one zależne od czasu i intensywności oddziaływań. Końcowym efektem procesów degradacyjnych zachodzącym w materiale poddanym obciążeniom cyklicznym lub losowym jest zazwyczaj zniszczenie danego elementu [18,51,63,86]. Z tego względu poznanie właściwości zmęczeniowych kompozytów metalowych ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa pracy urządzeń aktualnie pracujących. Daje też wytyczne, które mogą służyć przy projektowaniu nowych konstrukcji [17,85]. Bimetały wyprodukowane w technologii wybuchowej są elementami znajdującymi główne zastosowanie w wysoko wyspecjalizowanej aparaturze procesowej, między innymi w elektrowniach jądrowych. Poznanie wpływu zgrzewania na trwałość bimetałów oraz zjawisk silnie związanych z nim w przyszłości częściowo przyczyni się do możliwości zastosowania tych materiałów w nowych grupach urządzeniach. Niestety w literaturze specjalistycznej da się wyróżnić jedynie nieliczne publikacje związane z poruszaną tematyką. Większość przeprowadzonych badań stanowi uzupełnienie innego rodzaju tematów np. związanych z mikrostrukturą. Badania właściwości mechanicznych mają charakter znormalizowany (opisane w kolejnym podrozdziale) typowych dla materiałów wielowarstwowych wykonanych w technologiach wybuchowych. Pewne informacje na temat przeprowadzonych badań zmęczeniowych zawarto w pozycjach [19,21,33,70]. Wśród polskich ośrodków naukowych podejmujących tematykę zmęczenia materiałów wielowarstwowych wyróżnić można Politechnikę Opolską. Efektem prowadzonych badań są liczne publikacje traktujące o zjawisku zmęczenia bimetału stal-tytan [56–59]. Głównymi celami badawczymi przytoczonych prac było wyznaczenie charakterystyk zmęczeniowych bimetału stal – tytan w warunkach cyklicznego zginania, oraz odniesienie ich do trwałości zmęczeniowych tytanu oraz stali. W pracach tych skupiono się wyłącznie na zbudowaniu charakterystyk zmęczeniowych bimetału opartych o właściwości mechaniczne materiałów przed zgrzewaniem wybuchowym. Próby identyfikacji charakteru zmian zachowania się bimetału poddanego obciążeniom cyklicznym zaprezentowano w [41,43,45–49]. Jako przykład publikacji, których tematyką jest rozwój pęknięć zmęczeniowych w materiałach wielowarstwowych mogą posłużyć prace [15,75,77,81]. Badania zmęczeniowe bimetału stal-tytan były również

prorowadzone na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej [68]. W publikacji zaprezentowano próbę trójpunktowego zginania próbek wykonanych między innymi z bimetalu stal-tytan.

Zaprezentowany przegląd literatury wskazuje na dużą potrzebę rozwoju aktualnego stanu wiedzy na temat zjawiska zmęczenia materiałów wielowarstwowych, ponieważ w literaturze specjalistycznej tego typu opracowania są nieliczne. Zauważalna jest również bardzo mała liczba publikowanych charakterystyk zmęczeniowych materiałów wielowarstwowych, które ułatwiałyby proces projektowania i zwiększyły bezpieczeństwo pracy urządzeń.

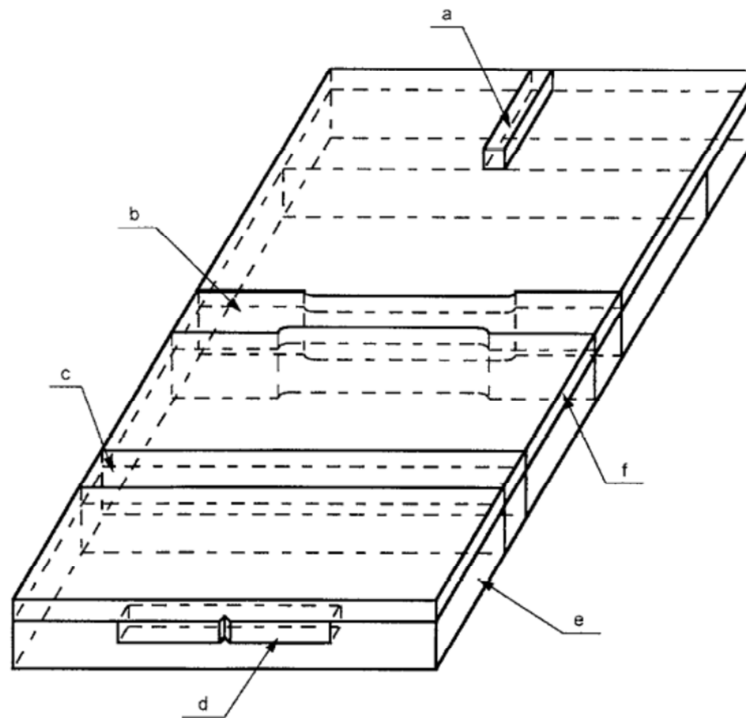
### **4.3. Normy i wymogi stawiane materiałom wielowarstwowym**

Poziom utrzymywanych parametrów i weryfikacji wymagań technologicznych produkowanych materiałów jest zależny od aktualnie obowiązujących norm oraz specjalnych wymogów narzucanych przez zleceniodawcę. Indywidualne wymagania są kwestią ustaleń. Natomiast w przypadku aktualnych norm, zalecenia w nich zamieszczone powinny pozwalać na dokładną weryfikację właściwości materiałów oraz ich przydatności do użycia w różnych aplikacjach [107]. Przepisy obecnie obowiązujące na terenie Unii Europejskiej ustosunkowują się do materiałów wielowarstwowych wyłącznie w jednym dokumencie: PN-EN 13445-2: „*Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe. Annex D*” [108]. Wytyczne obejmują swoim zakresem niezbędne próby wytrzymałościowe, w wyniku których otrzymywane są podstawowe stałe materiałowe. Testy nakazywane przez normę to monotoniczne rozciąganie, zginanie, ścinanie lub ścinanie przez rozciąganie w zależności od grubości kompozytu. Do norm ASTM określających wymagania oraz testy którym sprostać muszą kompozyty metalowe zaliczyć można: ASTM A263-03 [100], ASTM A264-03 [100], ASTM A265-03 [100], ASTM B432-04 [102], ASTM B898-05 [104], ASTM D3165-95 [111]. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono opis procedur i wymagań europejskich dotyczących poszczególnych testów wymaganych przez aktualnie obowiązujące normy.

#### **4.3.1 Pobór materiału przeznaczonego do badań**

Przed przystąpieniem do testów wytrzymałościowych pobierany jest wycinek materiału przeznaczonego do badań. Wszystkie próbki powinny być wycięte w taki sposób, aby ich oś wzdluzna była usytuowana prostopadle do kierunku detonacji. Zadanie to jest w większości przypadków niemożliwe do zrealizowania, ponieważ zwiększenie rozmiarów

produkowanych blach jest nieopłacalne. Problem rozwiązano przyjmując, że wytrzymałość materiału pobranego z obszarów płyty niekorzystnych pod względem usytuowania (geometrycznie i materiałowo) jest co najmniej taka sama jak dla materiału pobranego zgodnie z zaleceniami. Na ogół próbki pobierane są z obszaru nadatków technologicznych. Sposób pobierania próbek do poszczególnych testów wytrzymałościowych został zaprezentowany na rys. 14.



Rys. 14. Rozmieszczanie próbek przeznaczonych do badań wytrzymałościowych, a – próba ścinania, b – próba rozciągania, c – próba zginania, d – próba udarności [108]

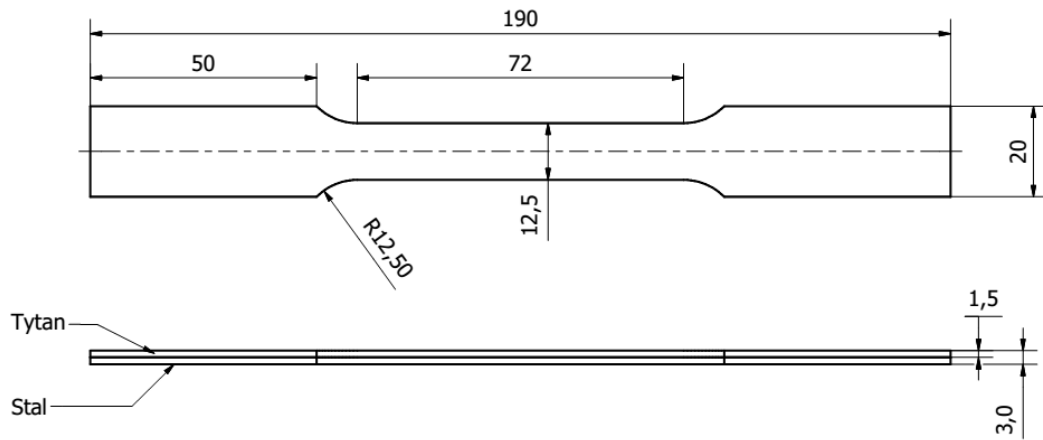


### 4.3.2 Próba rozciągania

Dokument [108] nie zawiera konkretnych wytycznych odnoszących się do metodyki przeprowadzenia badania. Aby próba została wykonana w prawidłowy sposób należy się kierować normami PN-EN 10002 [103] lub ASTM E8 / E8M - 13a [109]. Wynik badania przyrównuje się do oczekiwanej wartości wytrzymałości na rozciąganie, która jest wyznaczana ze wzoru:

$$\sigma_{pl} = \frac{\sigma_p S_p + \sigma_n S_n}{S_p + S_n}, \quad (12)$$

gdzie:  $\sigma$  – oznaczają dopuszczalne naprężenia w poszczególnych warstwach,  $S$  – pole powierzchni przekroju warstwy, indeksy  $p, n$  – kolejno materiał podstawowy i nakładany. Jeśli rzeczywista wartość  $\sigma_{pl}$  jest niższa niż obliczeniowa, próba jest powtarzana dla próbek ze sfrezowaną warstwą materiału nakładanego. Usunięcie materiału nakładanego wykonuje się również w przypadku dużych różnic twardości pomiędzy łączonymi materiałami. Na rys. 15 przedstawiono przykładowy model płaskiej próbki znormalizowanej wykonanej z bimetalu stal-tytan (1,5mm + 1,5mm).



Rys. 15. Przykładowy kształt i wymiary próbki bimetalowej stal-tytan (1,5mm-1,5mm) przeznaczonej do próby rozciągania według [109]

### 4.3.3 Próba zginania

Próba zginania nakazywana przez normę europejską w swych założeniach nie posiada wyniku scharakteryzowanego przez wielkości liczbowe. Jakościowy charakter próby zakłada obserwację ewentualnych rozwarstwień lub pęknięć w linii złącza bimetalu. Warunki dotyczące przygotowania próbek są ściśle określone. Pobiera się ją z całej grubości płyty. W przypadku, kiedy sumaryczna grubość kompozytu przekracza maksymalnie dopuszczone 80mm, materiał bazowy jest zredukowany do dozwolonego minimum. Szerokość próbki musi wynosić 10mm, natomiast jej długość nie może przekraczać 130 mm. Podczas przeprowadzania testu próbka musi być zgięta pod kątem 180°. Przykładową próbkę po badaniu zaprezentowano na rys. 16.



*Rys. 16. Próbka po przeprowadzonej próbie zginania*

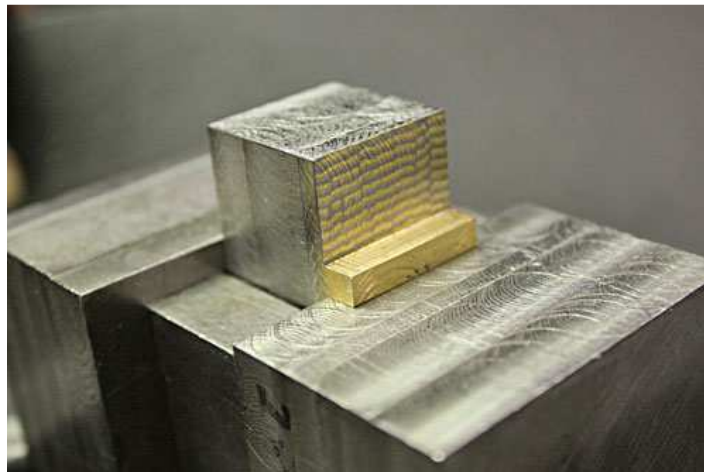
Zalecenia obejmują również warunki, które musi spełniać maszyna przeznaczona do wykonywania badań. Wyposażenie powinno obejmować wgłębnik o średnicy równej czterem szerokościom próbki a odstęp pomiędzy podporami nie może być mniejszy niż siedmiokrotna szerokość próbki.

#### 4.3.4 Próba udarowości

Próbie udarowości przeprowadza się z pewnymi odstępstwami w odniesieniu do standardowych procedur [109]. Główna różnica to orientacja próbki, której oś wzdłużna powinna być ustawiana prostopadłe do kierunku detonacji. Karb natomiast wycinany jest prostopadłe do płaszczyzny materiału nakładanego (rys. 14). Wycinek na próbki pobierany jest z obszarów znajdujących się bezpośrednio pod złączem, ponieważ właśnie w tym obszarze istnieje prawdopodobieństwo obniżenia odporności materiału na kruche pękanie.

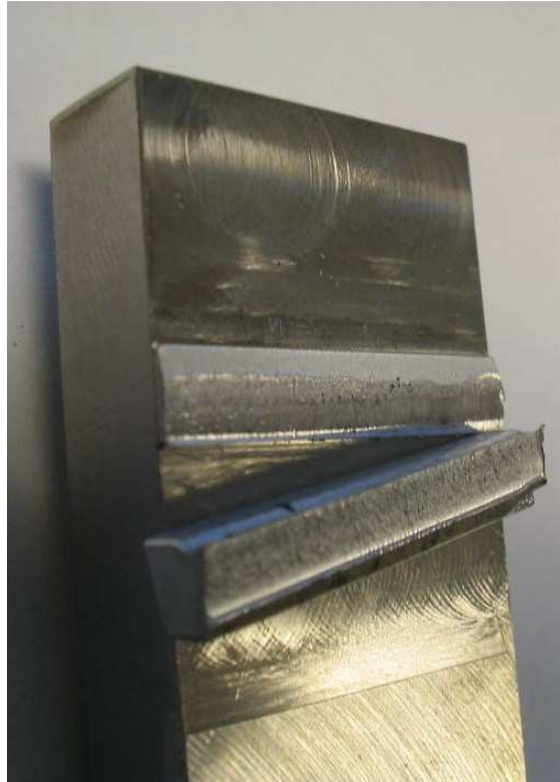
#### 4.3.5 Próba ścinania

Próba ścinania w przypadku materiałów wielowarstwowych jest jedną z najbardziej interesujących. Nie tylko ze względu na sposób wykonywania, ale również dlatego, że pozwala na jednoznaczne określenie jakości i wytrzymałości otrzymanego złącza. Testy wykonuje się przy użyciu specjalnego uchwytu (rys. 17).



Rys. 17. Próba ścinania bimetalu aluminium-miedź

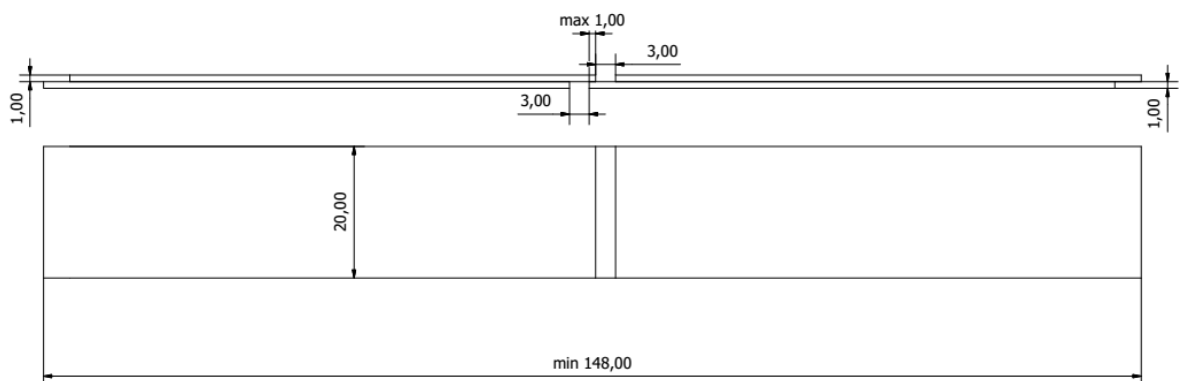
Próbka jest przygotowywana poprzez sfrezowanie warstwy materiału nakładanego i pozostawienie jedynie niewielkiej części o sprecyzowanych wymiarach. Normy DIN [98] oraz standardy ASME jasno opisują dane oraz parametry niezbędne do wykonania próbki oraz prawidłowego przygotowania maszyny wytrzymałościowej. Główna różnica pomiędzy zaleceniami to orientacja osi próbki względem kierunku detonacji. W przypadku DIN równoległe, natomiast w zaleceniach ASME prostopadłe. Przykładową próbkę po teście wytrzymałościowym zaprezentowano na rys. 18.



Rys. 18. Próbką po ścięciu warstwy nakładanej

#### 4.3.6 Próba ścinania przez rozciąganie

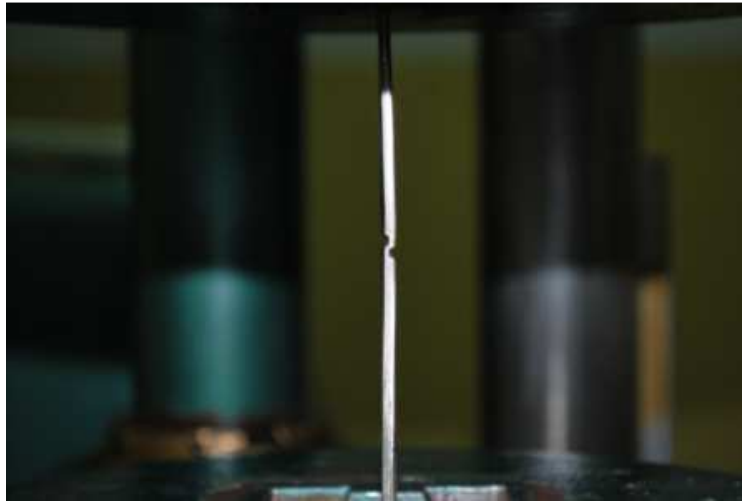
W przypadku materiałów wielowarstwowych o grubości mniejszej niż 3mm przeprowadza się nienormatywną próbę ścinania przez rozciąganie. Przygotowanie próbek polega na wycięciu w każdej z warstw rowka o szerokości około 3mm tak, aby w środku utworzona została zakładka materiałów o długości maksymalnie równej 1mm (rys. 19).



Rys. 19. Kształt oraz wymiary próbki przy próbie ścinania przez rozciąganie

Podczas statycznego rozciągania stan naprężenia w obrębie nakładki może być traktowany jako bliski ścinaniu. Ponieważ wartość przyłożonej siły i pole powierzchni ścinanej warstwy są znane, przybliżoną wartość granicy wytrzymałości złącza można określić używa-

jąc prostej zależności. Na rys. 20 zaprezentowano próbkę zamocowaną w maszynie wytrzymałościowej.



Rys. 20. Próba ścinania poprzez rozciąganie

#### 4.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Reasumując zaprezentowany przegląd literatury wyciągnięto następujące wnioski:

- Właściwości materiałów poddanych zgrzewaniu wybuchowemu są analizowane w większości przypadków pod kątem niejednorodności struktury oraz wytrzymałości przy obciążeniach monotonicznych.
- W literaturze przedmiotu nieliczne są opracowania naukowe dotyczące zjawisk zmęczenia materiałów platerowanych.
- Niepublikowane są charakterystyki zmęczeniowe materiałów platerowanych, które ułatwiłyby proces projektowania i zwiększyły bezpieczeństwo pracy urządzeń z nich wykonanych.
- Nie istnieją standardy dotyczące badań zmęczeniowych elementów zgrzewanych wybuchowo, w przeciwieństwie do badań w zakresie obciążeń monotonicznych.

## **5. Cel, zakres i teza pracy**

### **5.1. Cel i zakres**

Głównym celem pracy jest identyfikacja właściwości zmęczeniowych bimetalu stal S355J2+N – Tytan Grade 1 poprzez wykonanie serii badań zmęczeniowych próbek pobranych z kompozytu oraz tytanu Grade 1. Testy cyklicznego rozciągania-ściskania posłużą do określenia właściwości cyklicznych bimetalu, w tym identyfikacji zjawisk zmęczeniowych. Uzyskane trwałości zmęczeniowe zostaną użyte do zbudowania charakterystyki zmęczeniowej bimetalu.

Celami drugoplanowymi są:

- Analiza stanu odkształcenia w materiale podczas testów zmęczeniowych.
- Analiza naprężeń własnych w obydwu warstwach bimetalu.
- Wyznaczenie podstawowej charakterystyki zmęczeniowej tytanu Grade 1.

### **5.2. Teza pracy**

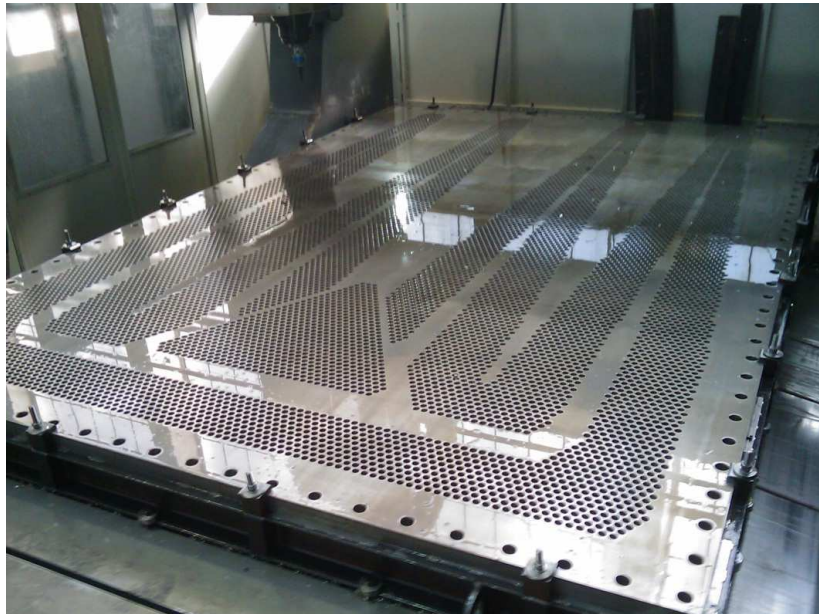
**Technologia zgrzewania wybuchowego zmienia zmęczeniowe procesy degradacyjne bimetalu stal-tytan w porównaniu do procesów zachodzących w metalach przed połączeniem.**

## 6. Eksperymentalna charakterystyka właściwości mechanicznych i metalograficznych bimetalu stal-tytan

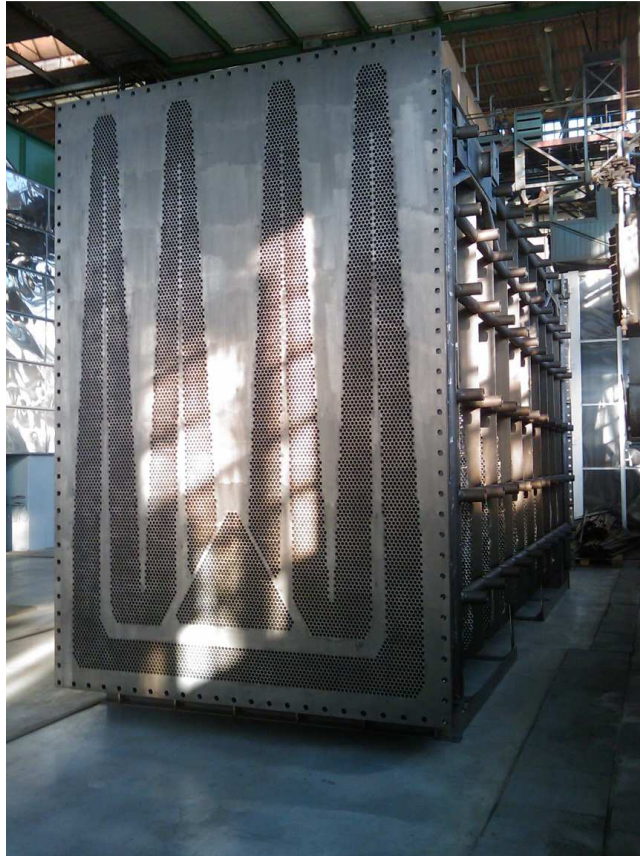
W niniejszym rozdziale przedstawiono właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturalne bimetalu Stal S355J+N – Tytan Grade 1. W podrozdziale pierwszym opisano rodzaj pobranego materiału wraz z jego przemysłowym zastosowaniem. Właściwości mechaniczne bimetalu, materiału nakładanego (tytan Grade 1) i bazowego (stali S355) scharakteryzowano w podrozdziale drugim. Zamieszczono w nim również podstawowe wzory służące do wyznaczania naprężeń w warstwach bimetalu. W podrozdziale trzecim zamieszczono wyniki badań metalograficznych.

### 6.1. Opis materiału pobranego do badań

Próbki materiału przeznaczonego do badań zostały pobrane z dwóch płyt (nr 10 i nr 30) które wykonano w jednym czasie przy identycznych parametrach procesu zgrzewania. Wytworzony bimetal posłużył do produkcji wkładu rurowego i ściany sitowej kondensatora elektrowni Mochovce (rys. 21, 22). W procesach zgrzewania połączono płyty ze stali S355J2+N i tytanu Grade1 o wymiarach 4330x3150mm. Grubości zgrzanych blach wynosiły 40mm i 6mm odpowiednio dla stali i tytanu.



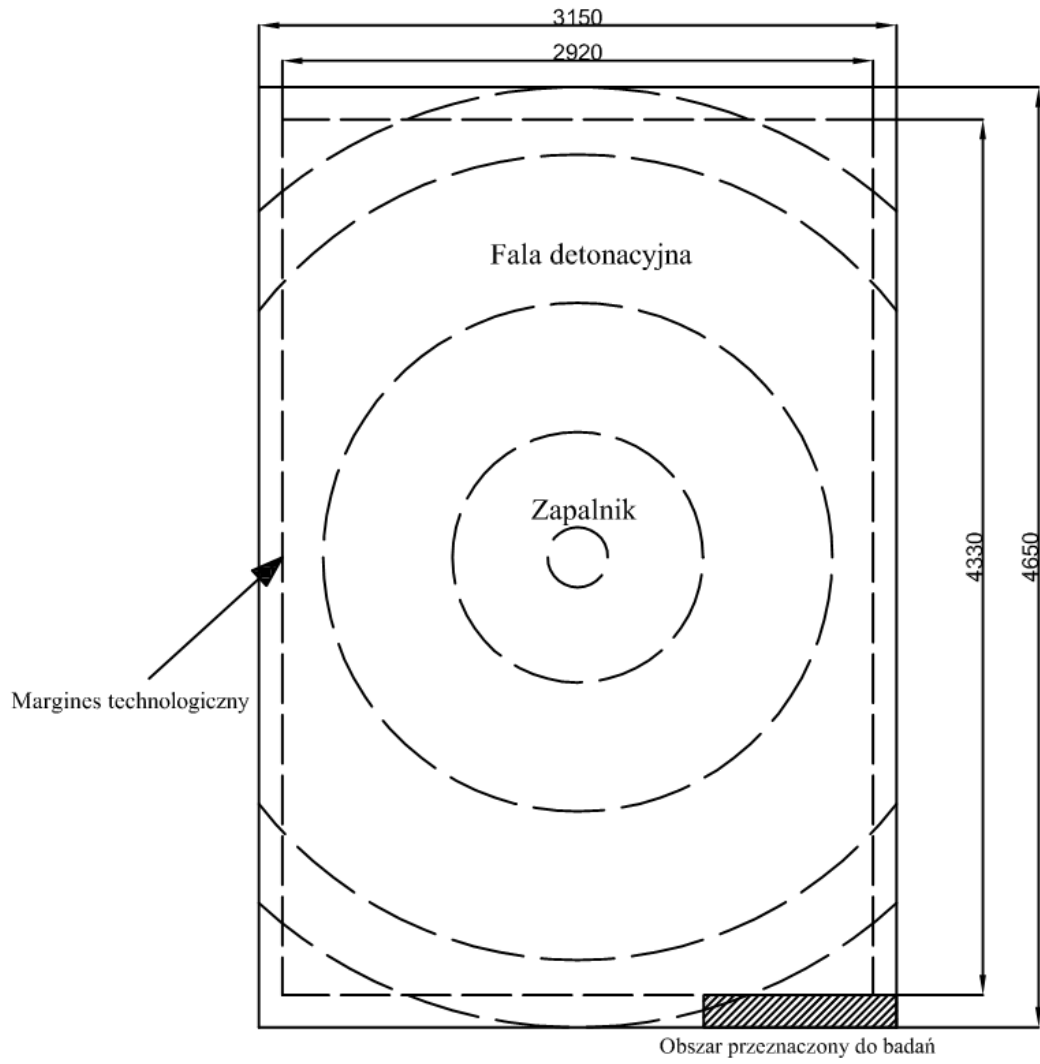
Rys. 21. Ściana sitowa kondensatora



*Rys. 22. Wkład rurowy kondensatora*

Po procesie zgrzewania płyt zastosowano obróbkę cieplną bimetalu zapobiegającą pękaniu warstwy tytanowej podczas mechanicznego prostowania blach (walcowania). Przeprowadzona obróbka termiczna składała się z wygrzewania prowadzonego w temp  $600^{\circ}\text{C}$  przez czas 90 minut następnie chłodzeniu płyt wraz z piecem do temperatury  $300^{\circ}\text{C}$  (przy prędkości chłodzenia  $100^{\circ}\text{C/h}$ ). Końcowy etap chłodzenia przebiegał na spokojnym powietrzu. Wycinek materiału, z którego następnie wykonano próbki został pobrany z obszaru przeznaczonego na badania certyfikujące produkt. Lokalizację obszaru zaznaczono na rys. 23.

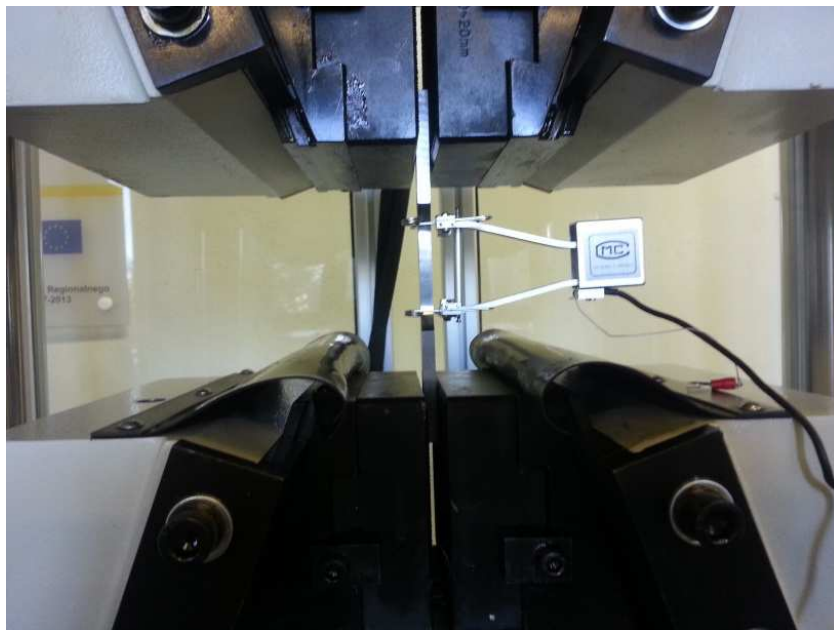




Rys. 23. Usytuowanie materiału przeznaczonego do badań w dużej płycie [47]

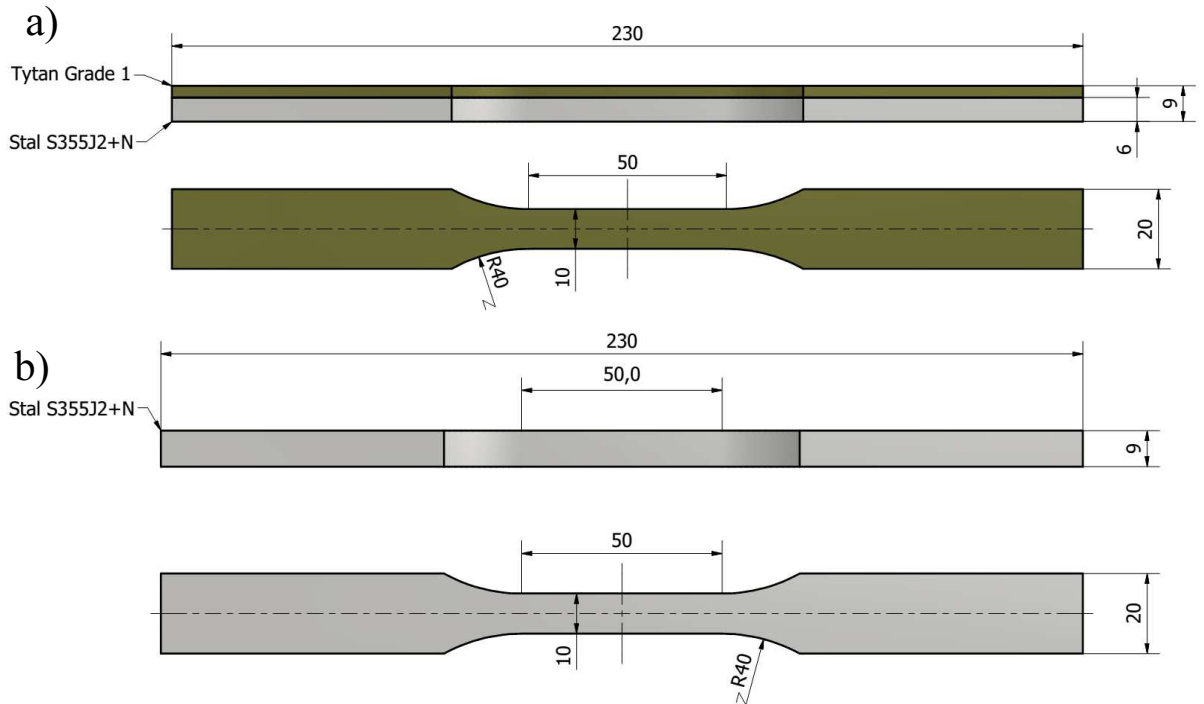
## 6.2. Podstawowe właściwości mechaniczne

Materiał podstawowy (Stal S355J2+N), nakładany (tytan Grade 1) oraz bimetali stal – tytan zostały scharakteryzowane przez podstawowe parametry wytrzymałościowe takie jak: granica wytrzymałości na rozciąganie, granica plastyczności, moduł sprężystości podłużnej, współczynnik Poissona [26]. Stałe materiałowe wyznaczono w oparciu o próbę statycznego rozciągania i pomiary odkształceń ekstensometrem lub za pomocą tensometrów naklejonych na próbkę w trakcie trwania innych badań np. testów zmęczeniowych. Badania wytrzymałościowe przy obciążeniach monotonicznych przeprowadzono na uniwersalnej hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej do testów rozciągania, ściskania i zginania WAW-1000E (rys. 24).



Rys. 24. Próba statycznego rozciągania, próbka stalowa

Badania przeprowadzono na próbkach płaskich (rys. 25). Dla wszystkich rodzajów próbek wymiary przekroju rozciąganego w przewężeniu wynosiły 9x10mm. Próbkę bimetaliową składały się z 3mm warstwy tytanu i 6mm stali.



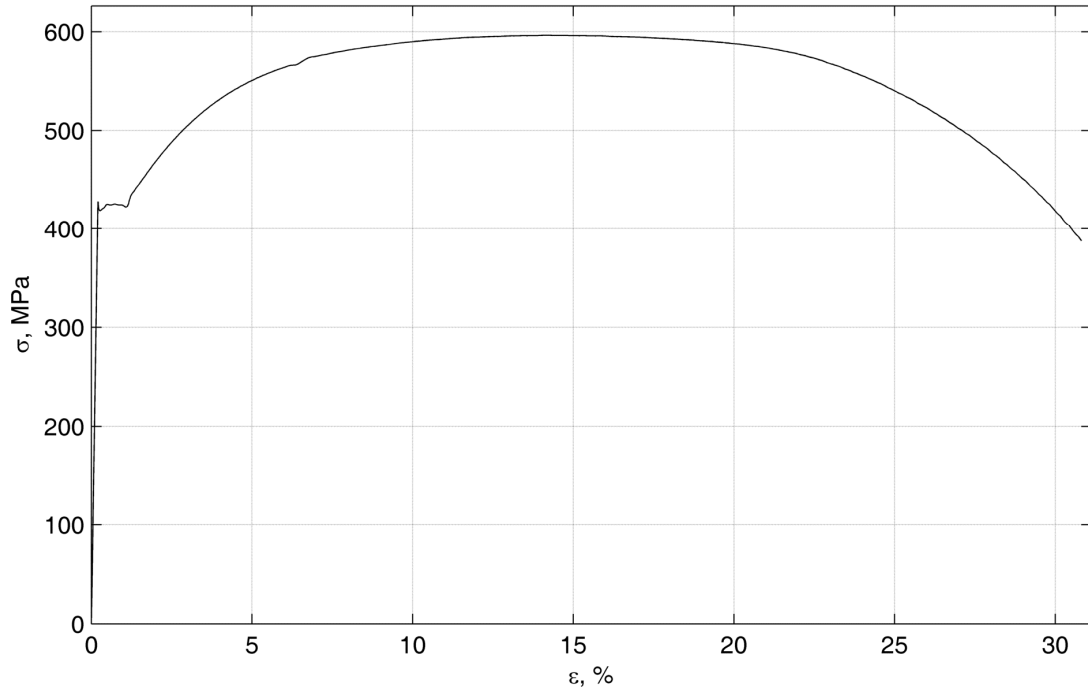
Rys. 25. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do testów monotonicznego rozciągania, a) bimetali stal – tytan (dwie próbki), b) stal S355J2+N (trzy próbki)

Otrzymane wyniki uzupełniono z certyfikatów wystawionych przez producentów materiałów uzyskując zakresy zmienności parametrów mechanicznych przedstawionych w tabelach 1-2. W tabeli 3 umieszczono wyniki badań dla bimetali. Zaprezentowano również przykładowe wykresy zarejestrowane podczas prób wytrzymałościowych (rys. 26 – 27).

Tabela 1. Właściwości mechaniczne stali S355J2+N

Stal S355J2+N				
$R_e$ , MPa	$R_m$ , MPa	$E$ , GPa	$\nu$ , -	$A_5$ , %
382 – 430	598 – 605	196 – 210	0,29 – 0,3	24 – 34

Gdzie:  $E$  – moduł Younga,  $R_e$  – granica plastyczności,  $R_m$  – granica wytrzymałości,  $\nu$  – współczynnik Poissona,  $A_5$  – wydłużenie względne.



Rys. 26. Wykres rozciągania przykładowej próbki stalowej

Tabela 2. Właściwości mechaniczne tytanu Grade 1

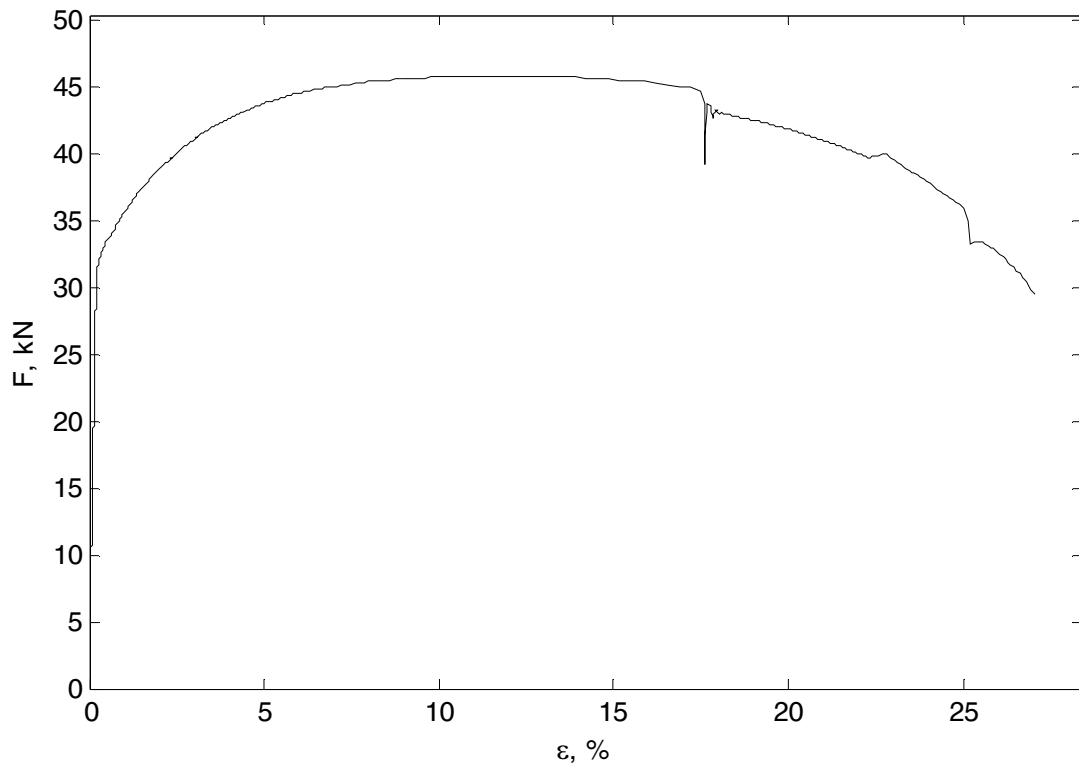
Tytan Grade 1				
$R_{0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	E, GPa	$\nu$ , -	$A_5$ , %
189 – 215	308 – 324	95 – 105	0,37 – 0,39	43-56

Ponieważ próbki wykonane z bimetalu składają się z dwóch warstw o różnych modułach Younga naprężenie panujące w obu warstwach są różne. Z tego względu przedstawione dane oraz wykresy dotyczące bimetalu są niestandardowe. Na osi odciętych przedstawiono odkształcenia zmierzone przez ekstensometr a na osi rzędnych siłę w kN.

Tabela 3. Zastępcze właściwości mechaniczne bimetalu stal-tytan

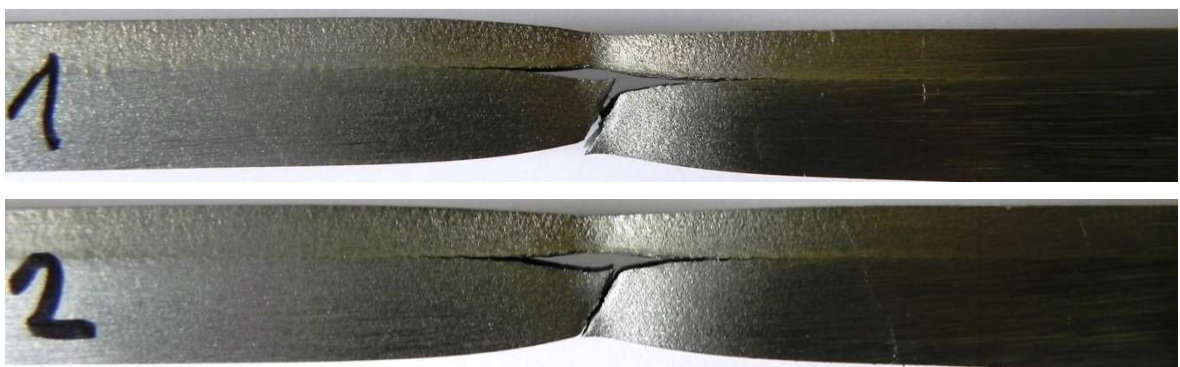
Bimetal stal S355J-tytan Grade 1			
$F_{p0,2}$ , kN	$F_m$ , kN	$F_d$ , kN	$F_u$ , kN
33 – 34,2	45,8 – 47,2	44,7 – 45,5	29,5 – 30,8

Gdzie:  $F_{p0,2}$  – siła odpowiadająca odkształceniu trwałemu 0,2%;  $F_m$  – maksymalna siła;  $F_d$  – siła przy której zaobserwowano delaminację,  $F_u$  – siła zrywająca część stalową.



Rys. 27. Wykres rozciągania przykładowej próbki bimetalowej

Przeprowadzone próby statycznego rozciągania materiałów wykazały, że bimetel stal – tytan w przeciwieństwie do stali S355J2+N nie wykazuje wyraźnej granicy plastyczności. Ponadto w przypadku próbek bimetalowych w trakcie próby rozciągania zauważono delaminację warstw stali i tytanu (rys. 28) objawiającą się gwałtownym spadkiem i ponownym wzrostem siły rozciągającej ( $F \approx 45\text{kN}$ , rys. 27).

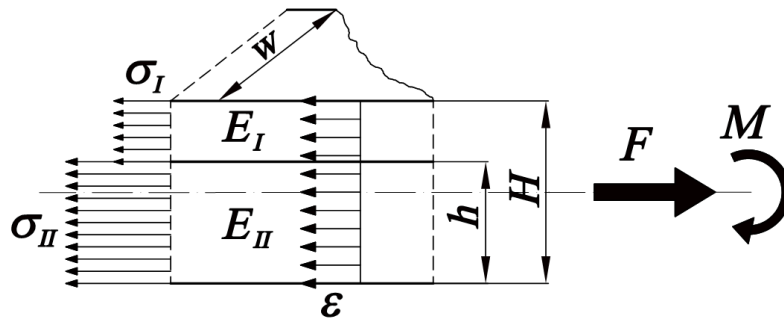


Rys. 28. Przykładowe próbki po przeprowadzeniu próby rozciągania z widoczną delaminacją warstw

Ze względu na niejednolite właściwości mechaniczne (połączenie dwóch materiałów o różnych parametrach) bimetalu podczas próby rozciągania-ściskania występuje niejednorodny rozkład naprężeń (rys. 29).

Przyjmując następujące założenia :

- jednorodny rozkład odkształceń w całym przekroju próbki, będący rezultatem przemieszczenia części chwytowej próbki,
- idealne połączenie pomiędzy materiałami (bez defektów),
- płaskie złącze,
- sprężysty zakres odkształceń,
- jednorodne właściwości mechaniczne połączonych materiałów,
- jednoosiowy model naprężenia materiału.



Rys. 29. Rozkład odkształceń i naprężeń w próbce rozciąganej [47]

Wyznaczono zależności analityczne pozwalające na wyznaczenie naprężeń w warstwach rozciąganego bimetalu. Naprężenia w poszczególnych warstwach bimetalu przy wykorzystaniu prawa Hooke'a w jednorodnym stanie naprężenia wyglądają następująco:

$$\sigma_I = E_I \varepsilon, \quad \sigma_{II} = E_{II} \varepsilon, \quad (13)$$

gdzie:  $\sigma_I, \sigma_{II}$  - naprężenia w warstwach materiału,  $E_I, E_{II}$  moduły Younga połączonych materiałów,  $\varepsilon$  - odkształcenie w kierunku działania siły. Pomijając ciężar własny, równanie równowagi sił jest następujące:

$$\sigma_I (H - h)w + \sigma_{II} hw = F \quad (14)$$

gdzie:  $H, h, w$  - wymiary charakterystyczne bimetalu (rys. 29). Podstawiając równanie (13) do (14) otrzymano następującą zależność na odkształcenie  $\varepsilon$  wywołane przyłożoną siłą  $F$ :

$$\varepsilon = \frac{F}{E_I (H - h)w + E_{II} hw}. \quad (15)$$

Następnie powracając do naprężeń:

$$\sigma_I = \frac{F}{(H - h)w + \frac{E_{II}}{E_I} hw}, \quad \sigma_{II} = \frac{F}{\frac{E_{II}}{E_I} (H - h)w + hw}. \quad (16)$$

Przyjmując, że kierunek siły  $F$  pokrywa się z osią próbki a rozkład naprężeń nie jest jednorodny to w takim układzie sił pojawi się moment sił  $M$  równoważący układ:

$$M = \sigma_I(H-h)w\frac{h}{2} + \sigma_{II}hw\frac{H-h}{2}. \quad (17)$$

Podstawiając (16) do (17) otrzymano równanie momentu  $M$  w funkcji siły obciążającej  $F$ :

$$M = F \left[ \frac{(H-h)h}{2(H-h) + 2\frac{E_{II}}{E_I}h} + \frac{(H-h)h}{2\frac{E_{II}}{E_I}(H-h) + 2h} \right]. \quad (18)$$

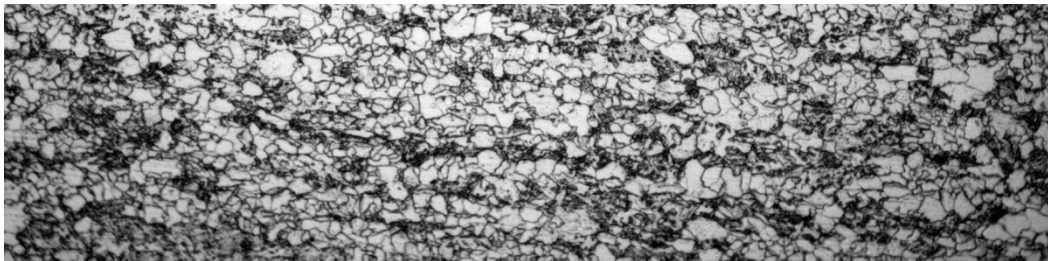
Działanie momentu  $M$  może być istotne podczas prowadzenia badań zmęczeniowych. Obciążenie jest przenoszone przez uchwyty mocujące próbkę np. na siłownik hydrauliczny, co może mieć istotny wpływ na jego trwałość. Otrzymane wartości momentu  $M$  oraz naprężeń  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  mogą być uznane za prawidłowe wyłącznie w zakresie odkształceń sprężystych. Aby zweryfikować ryzyko zginania próbki podczas testów zmęczeniowych przeprowadzono test polegający na równoczesnej rejestracji odkształceń po stronie stali i tytanu. Rezultatem pomiarów była różnica w wartości odkształceń nieprzekraczająca 1% [43,47,49].

### 6.3. Badania metalograficzne

Analiza mikrostrukturalna wnosi wiele cennych informacji na temat właściwości bimetalu. Analizę mikrostruktury materiału podzielono na trzy części. Pierwsza i druga zawiera ogólną charakterystykę łączonych materiałów (stali i tytanu). W części trzeciej zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań strukturalnych bimetalu oraz strefy złącza. Aby scharakteryzować bimetel stal-tytan pod względem mikrostruktury posłużono się standardowymi oraz stosowanymi powszechnie rodzajami badań [90]: mikroskopią optyczną, elektronową i pomiarami mikrotwardości. Przeprowadzono również analizę składu chemicznego.

#### 6.3.1 Stal S355J2+N

Stal S355J2+N wykorzystana do produkcji bimetalu jako materiał podstawowy należy do grupy niestopowych o podwyższonej wytrzymałości [26]. Stal niestopowa definiowana jest jako stop żelaza z węglem w którym inne pierwiastki chemiczne nie przekraczają wartości granicznych zamieszczonych w obowiązującej normie PN-EN 10020:2002U [101]. Przykładową mikrostrukturę stali S355J2+N zaprezentowano na rys. 30.



Rys. 30. Przykładowa mikrostruktura stali niestopowej

Normy europejskie wyróżniają na dwa gatunki stali niskostopowych: maszynowy gdzie głównym zastosowaniem materiału są elementy maszyn oraz konstrukcyjny stosowany na mało odpowiedzialne konstrukcje w budownictwie przemysłowym i ogólnym.

Stal S355J2+N używana jest między innymi do budowy konstrukcji narażonych na działanie niekorzystnych warunków środowiska. Charakteryzuje się większą wytrzymałością od stali konstrukcyjnej wyższej jakości oraz większą odpornością na korozję. Materiał jest określany jako dobrze spawalny i nadający się do obróbki skrawaniem. Wyroby ze stali niestopowych dostarczane są na ogół jako wyroby długie i płaskie tj. blachy grube, uniwersalne i cienkie pręty, kształtowniki oraz taśmy. Skład chemiczny stali S355J2+N według PN-EN 10025-2:2004 [105] przedstawiono w tabeli 4. Płyty ze stali S355J2+N wyko-



rzystane w produkcji bimetalu posiadały certyfikaty zgodności z normami wystawione przez producenta. W związku z tym nie przeprowadzono analizy metalograficznej materiału przed zgrzewaniem.

Tabela 4. Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe Stali S355J2+N (reszta Fe)

Skład chemiczny stali S355J2 według EN 10025-2:2004						
Pierwiastek chem.:	C	Si	Mn	P	S	Cu
Maks. zawartość, %:	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	0,45

### 6.3.2 Tytan Grade 1

Tytan jest materiałem który ze względu na swoje właściwości jest wykorzystywany w wielu specjalistycznych urządzeniach. Do cech wyróżniających go spośród innych materiałów konstrukcyjnych można zaliczyć:

- niższy ciężar właściwy w porównaniu do stali,
- wysoką odporność na korozję która może być poprawiona domieszką pierwiastków z grupy platynowej,
- niskie wartości współczynnika tarcia i wynikająca z niego wysoka trwałość eksploatacyjna w aplikacjach typu rurociągi itp. [26].

Produkcja tytanu w warunkach przemysłowych polega na redukcji czterochlorku tytanu magnezem w obecności gazu szlachetnego. Proces przeprowadzany jest w temperaturze wynoszącej około 800-900°C. Tytan otrzymywany jest w postaci gąbczastej (rys. 31). W ostatniej fazie jest przetapiany (zazwyczaj dwukrotnie) na lity metal. W procesie przetapiania stosuje się piece elektryczne łukowe, rzadziej piece elektronowe lub plazmowe. Główne trudności podczas wytwarzania tytanu to skłonność do silnego reagowania z tlenem, azotem i węglem. Dlatego też jego wytworzenie jest bardzo drogie w porównaniu do innych materiałów [25,26,64].

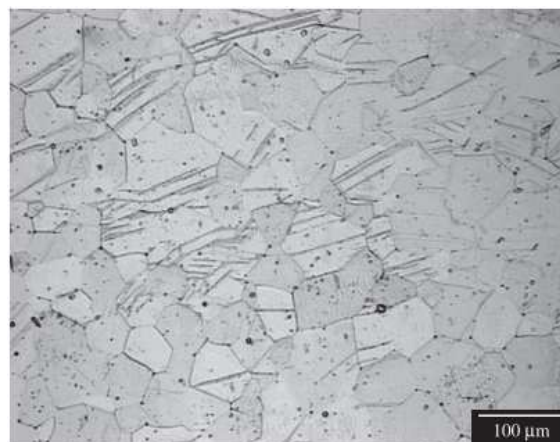


Rys. 31. Element wykonany z piany tytanowej [69]

Tytan Grade 1 jest jedną z najczystszych produkowanych postaci tego materiału, bywa określany jako „niestopowy” [26]. Właściwości mechaniczne materiału zapewniają wysoką plastyczność, a co za tym idzie możliwość kształtowania na zimno. Charakterystyczną cechą jest również wysoka odporność na uderzenia. Nie bez znaczenia aplikacyjnego pozostaje dobra spawalność stopu Grade 1. Materiał jest w większości przypadków dostępny w formie blach, spawanych rur, płyt, prętów, odkuwek i kęsów. Jedynie elementy produkowane na potrzeby branży medycznej są wykonywane w technologii odlewania np. implanty dentystyczne. Wymogi technologiczne odnoszące się do tytanu Grade 1 wyszczególniono w normach ASTM-B625 [110]. Skład chemiczny przedstawiono w tabeli 5, natomiast przykładową mikrostrukturę prezentuje rys. 32.

Tabela 5. Skład chemiczny tytanu Grade 1 (reszta Ti)

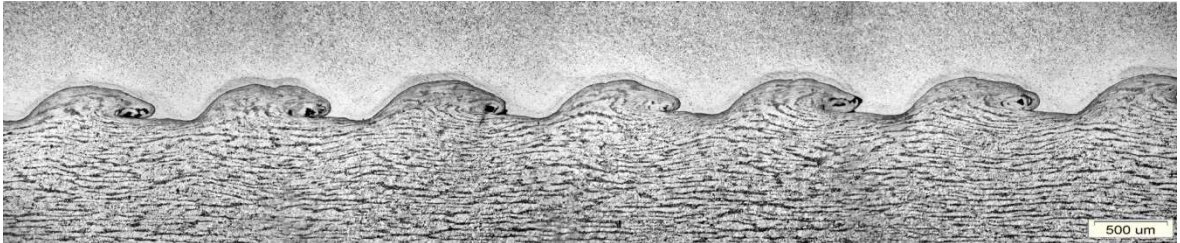
Tytan Grade 1 według ASTM-B625					
Pierwiastek chem.:	C	Fe	H	N	O
Maks. zawartość, %:	0,10	0,20	0,015	0,03	0,18



Rys. 32. Przykładowa mikrostruktura tytanu Grade 1 [35]

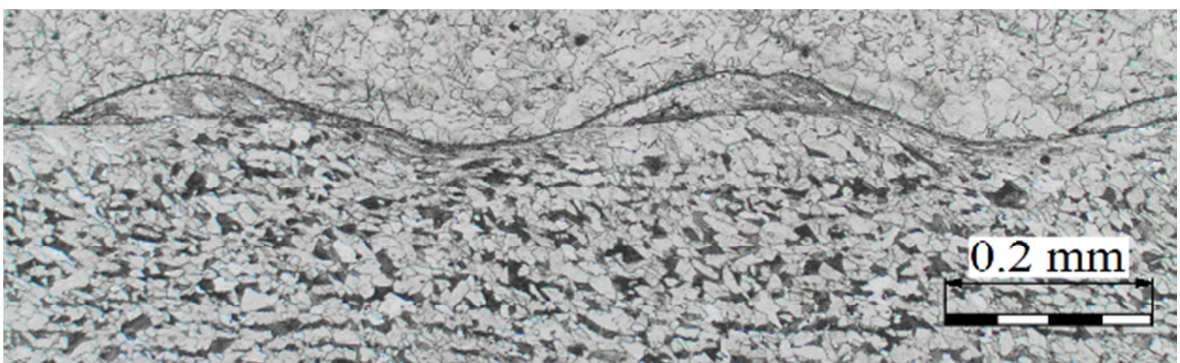
### 6.3.3 Bimetal stal-tytan

Bimetal powstał na skutek połączenia stali i tytanu. Przedmiotem przeprowadzonej analizy była mikrostruktura próbek przeznaczonych do badań zmęczeniowych. Obserwacje przeprowadzono dla wycinków pochodzących z obydwu płyt bimetalowych (10 i 30). Przykładowy obraz przedstawiający fragment złącza zaprezentowano na rys. 33.

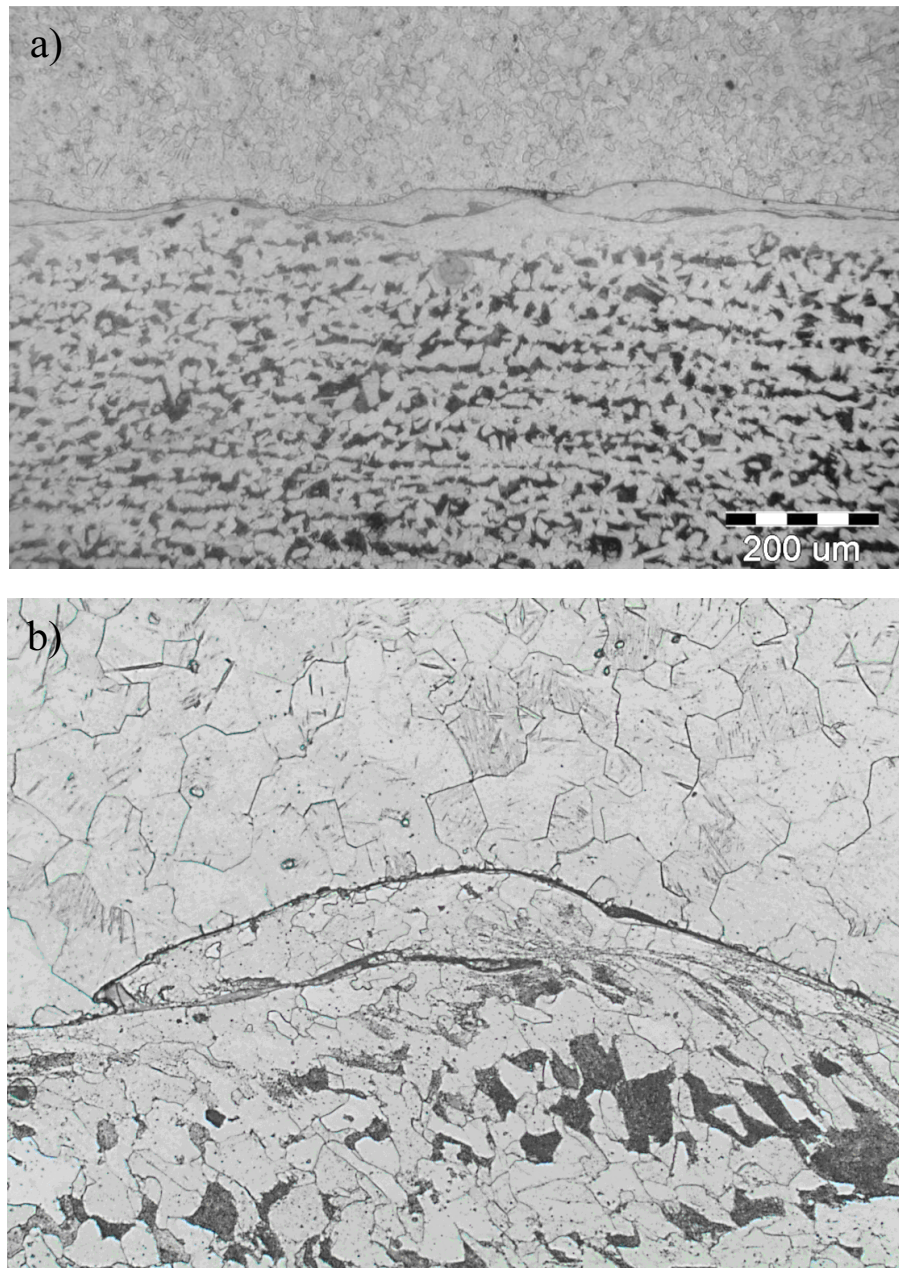


Rys. 33 Fragment złącza bimetalu stal-tytan

Mikrostruktura stali składała się z ferrytu oraz perlitu z charakterystycznym dla przeróbki plastycznej pasmowym ułożeniem ziaren. Blachę stalową przed platerowaniem walcowano na zimno, lecz pasmowy układ struktury stali uległ częściowemu zanikowi w wyniku przeprowadzonych zabiegów obróbki cieplnej (rys. 34, 35a). W warstwie tytanowej nastąpiła rekrytalizacja ziaren. Przyczyną tego zjawiska również była przeprowadzona obróbka cieplna. Ostateczna wielkość ziaren w warstwie tytanu nie jest zależna wyłącznie od przyjętych parametrów obróbki termicznej, ale wynika także z lokalnego stopnia gniotu. Wygrzewanie spowodowało zjawisko dyfuzyjnego odwęglenia stali w okolicy linii złącza. Atomy węgla w stali podczas obróbki cieplnej dyfundują do warstwy tytanowej (rys. 34, 35b) tworząc twarde węgliki tytanu (TiC) [41,43,49].

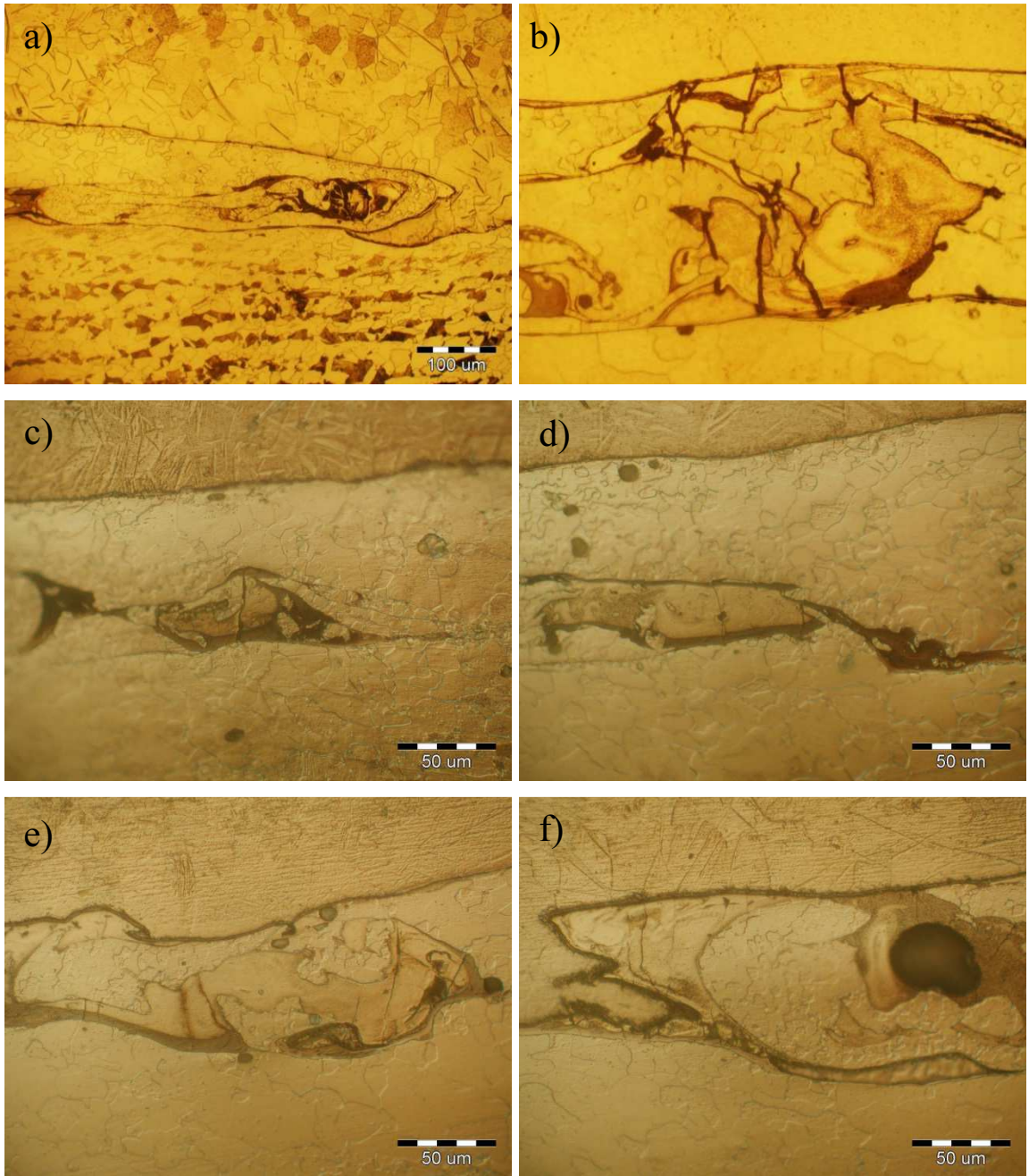


Rys. 34. Fragment złącza próbki P04

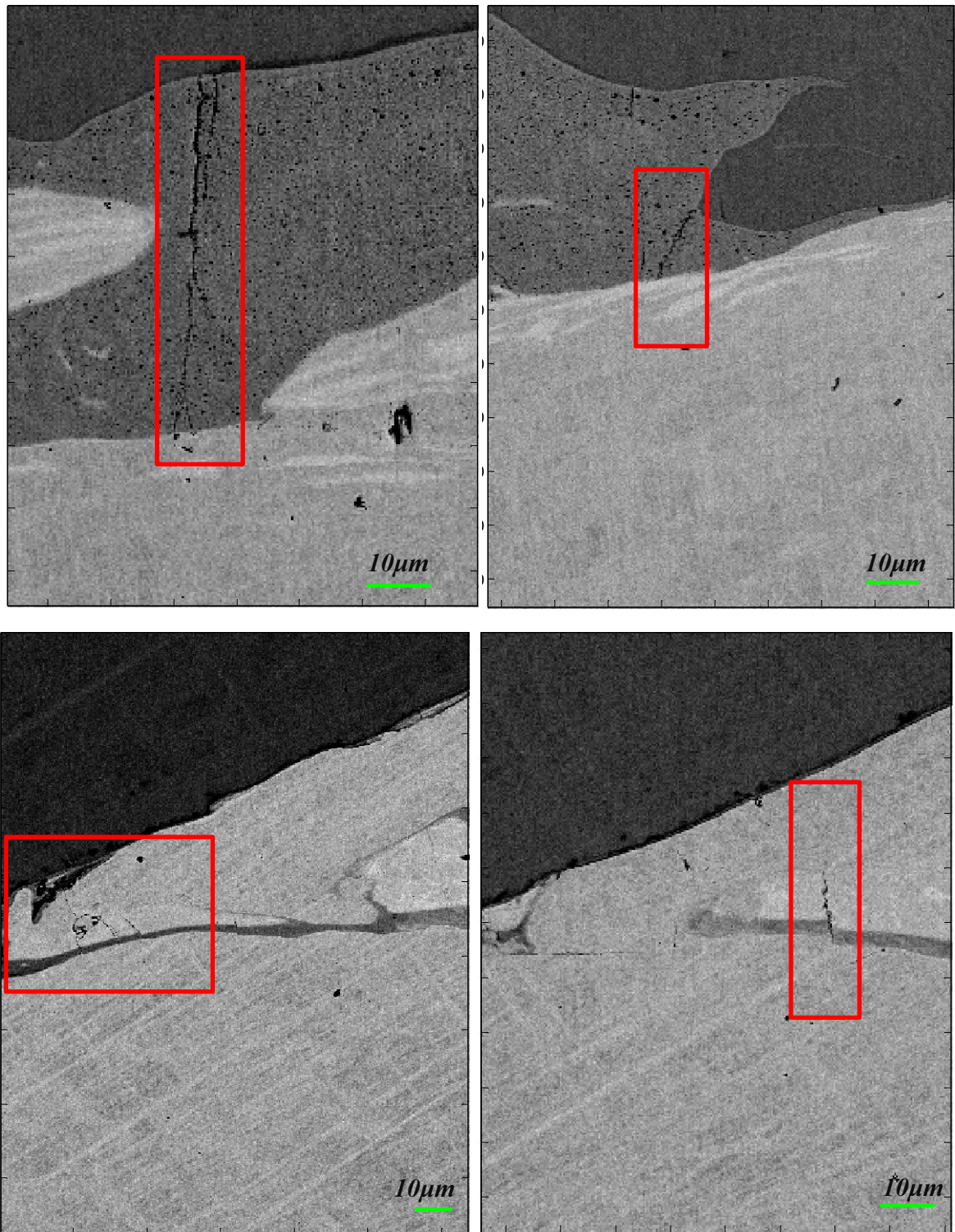


Rys. 35. Dyfuzyjne odwęglenie stali w okolicy linii złącza próbki P04, a) fragment mikrostruktury w obrębie strefy złącza, b) odwęglenie stali w obrębie fali międzypowierzchniowej

W przebadanych próbkach zidentyfikowano również fragmenty złącza posiadające lokalnie warstwę przetopioną, która zawiera liczne mikropustki i mikropełnięcia (rys. 36-37).



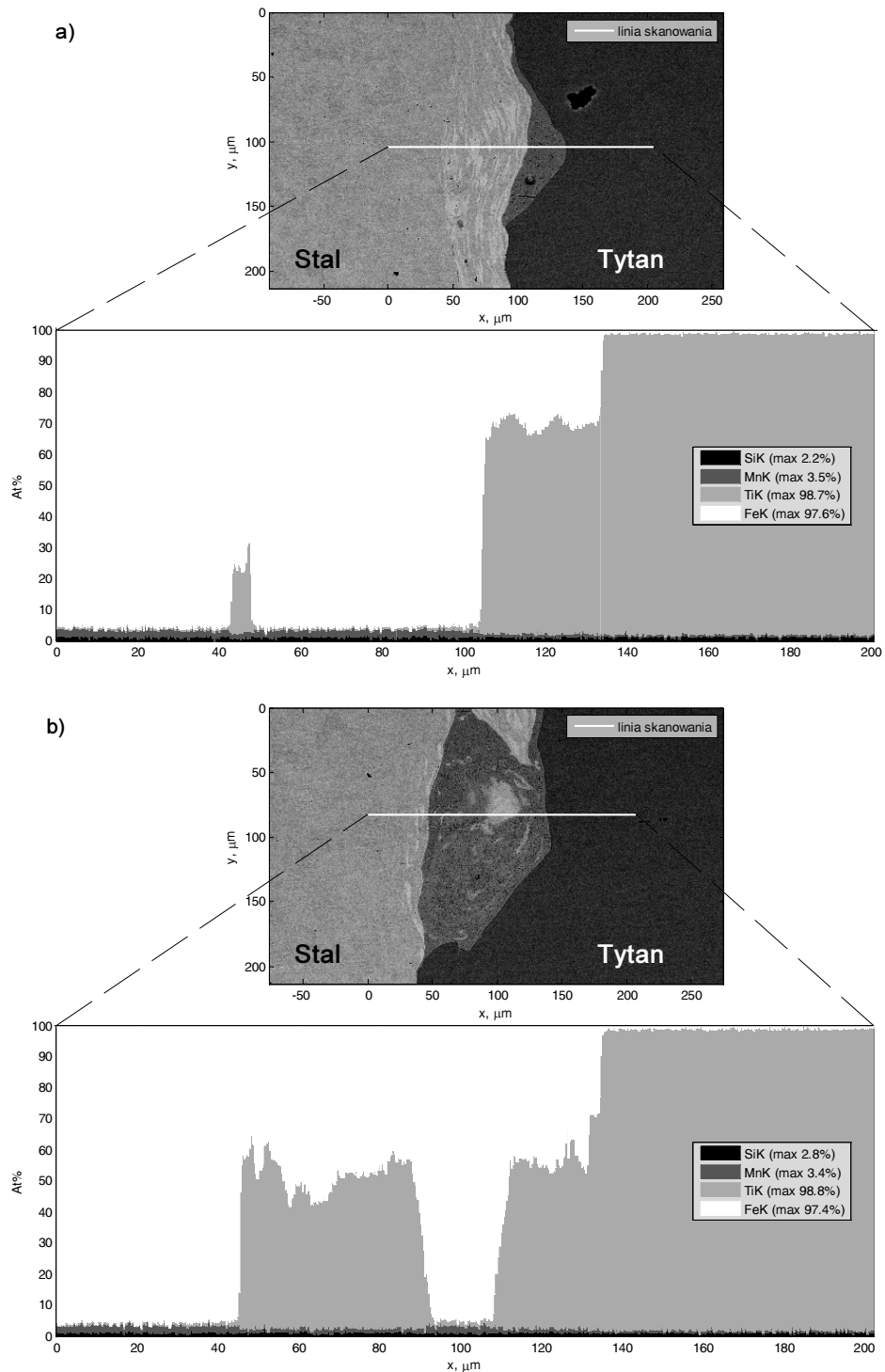
Rys. 36. Warstwa przetopiona obecna w mikrostrukturze linii złącza, a) widok pojedynczej fali, b)-f) zblżenia przedstawiające liczne defekty obecne w okolicach strefy przetopionej



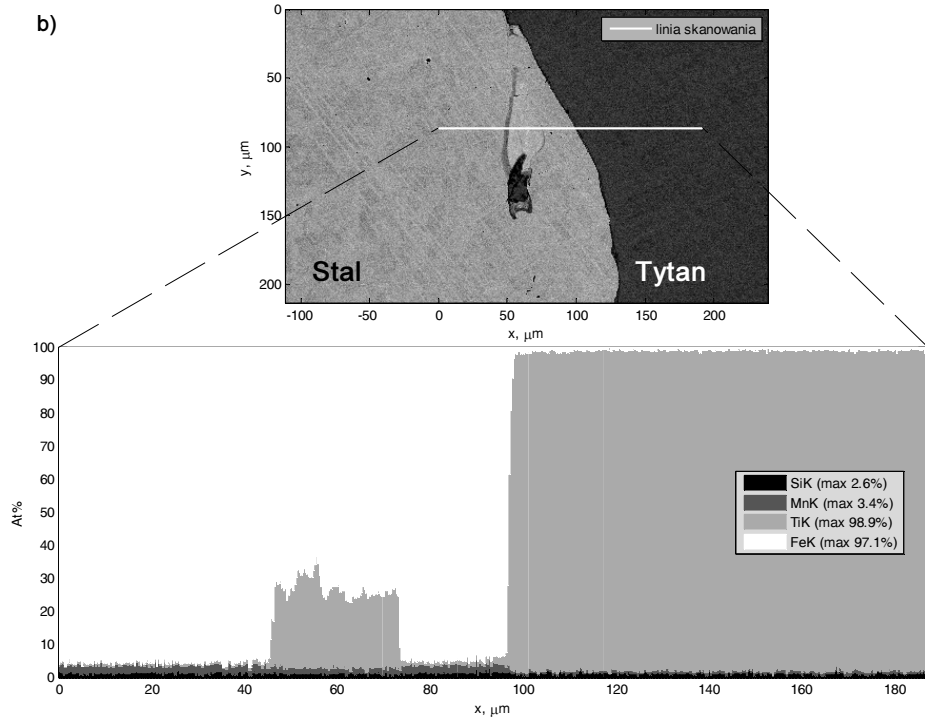
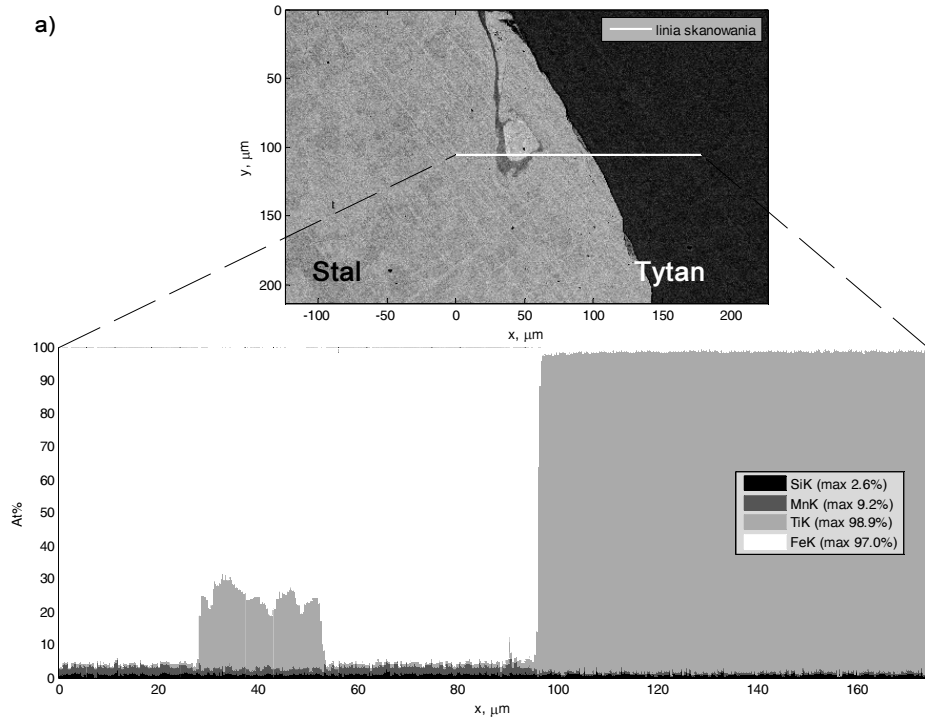
Rys. 37. Mikropęknięcia obecne w strefie przetopionej, zaznaczone czerwoną ramką. Zdjęcie wykonane mikroskopem skaningowym

Skład chemiczny materiałów w obrębie linii złącza określono przy użyciu mikroskopii elektronowej. Prezentowane wyniki zostały uzyskane w akredytowanym laboratorium skaningowej mikroskopii elektronowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Linie skanowania wytyczono z 521 punktów na długości 0,174mm. Została ona ulokowana tak,

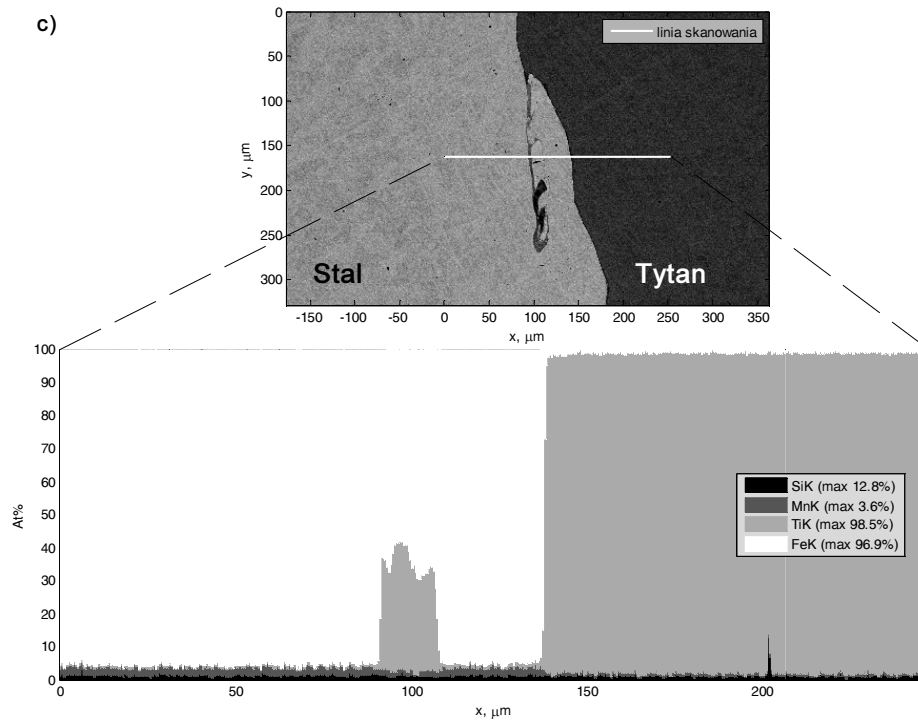
aby na swojej długości przechodziła przez strefę połączenia stali i tytanu obejmując lokalne przetopienie. Badanie składu chemicznego polegało na określeniu udziału następujących pierwiastków: Fe, Ti, Si, Mn. Wynik przeprowadzonych pomiarów zaprezentowano dla przykładowych próbek przed (rys. 38) i po obróbce cieplnej (rys. 39). Na rysunkach zaprezentowano wykresy udziałów procentowych poszczególnych pierwiastków oraz położenie skanowanego odcinka [38].



Rys. 38. Wynik analizy składu chemicznego w obrębie linii złącza, próbka przed procesem obróbki cieplnej



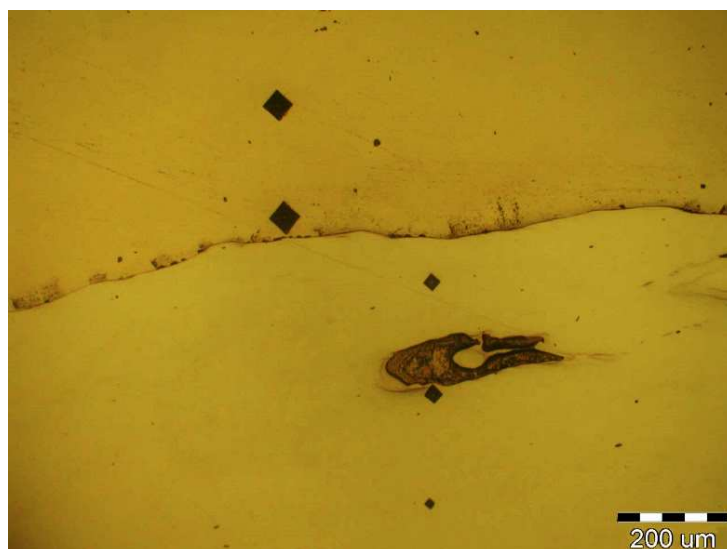




Rys. 39. Wynik analizy składu chemicznego w obrębie linii złącza, próbka po procesie obróbki cieplnej [38]

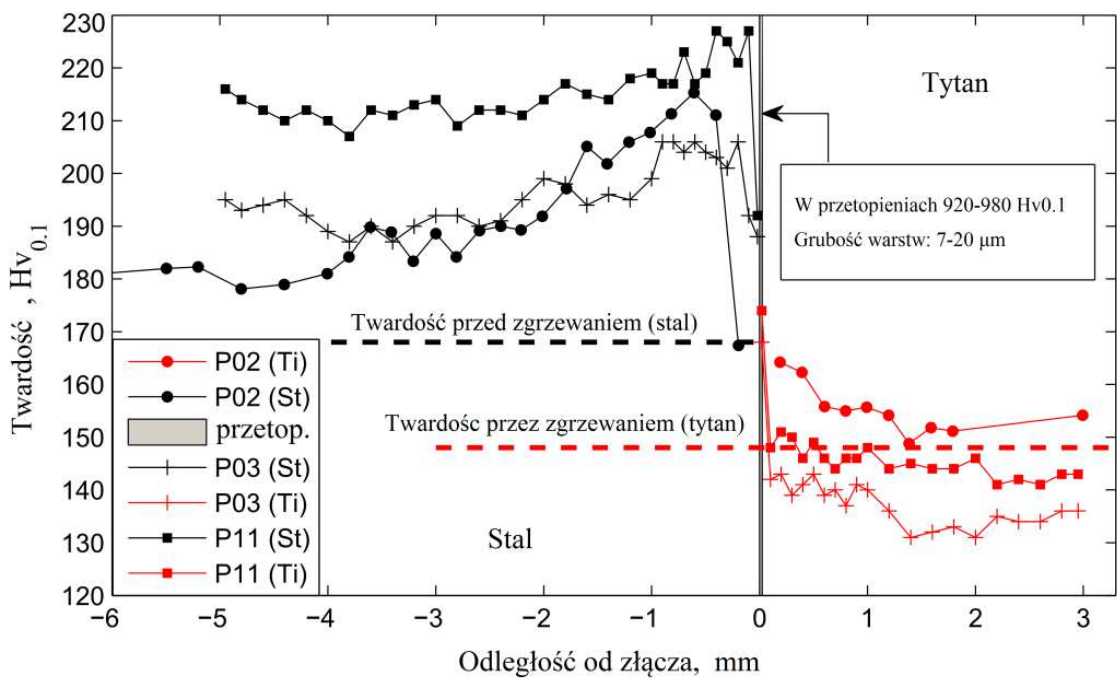
Obróbka cieplna może zmieniać rozkład składu chemicznego obserwowanych przetopień. Strefy przetopień w próbkach po obróbce cieplnej, zawierały około 25% tytanu i 75% żelaza. Jest to materiał o właściwościach poznanych w niewielkim stopniu.

Aby scharakteryzować wpływ grzewania na właściwości mikrostruktury bimetalu wykonano pomiar mikrotwardości w linii przechodzącej przez strefę połączenia o kierunku prostopadłym do złącza. Orientację punktów pomiarowych w okolicy linii złącza przedstawiono na rys. 40 [38,43,47].



Rys. 40. Pomiar mikrotwardości w rejonie linii złącza bimetalu, widoczne ślady po wgłębniku [38]

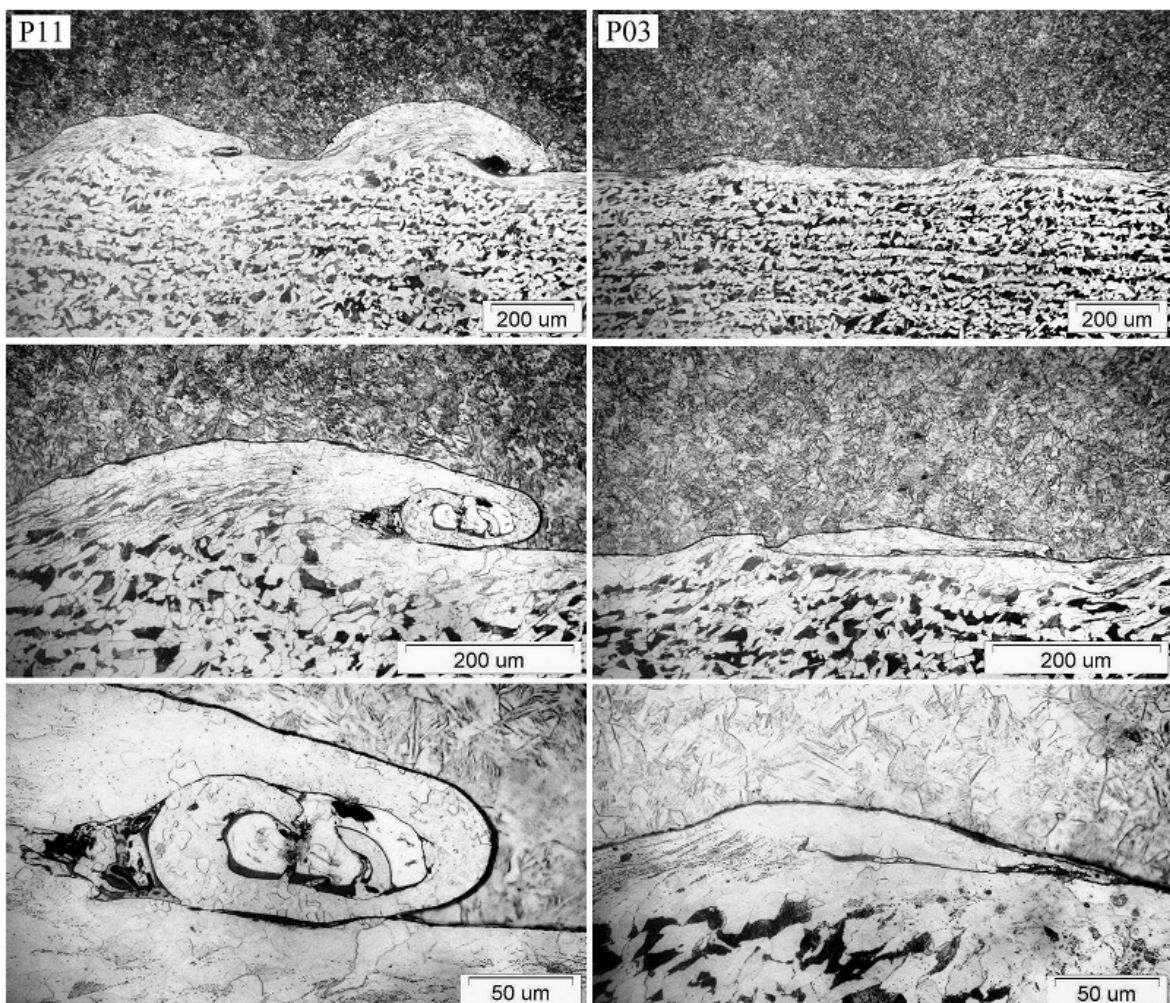
Rezultaty pomiarów zaprezentowano w formie wykresu przedstawiającego mikrotwardości zarejestrowane dla trzech próbek (rys. 41). Warstwa stalowa wykazuje wzrost twardości wraz ze zmniejszaniem się odległości do strefy złącza od około 210 do 250 ( $Hv_{0.1}$ ). Jest to związane ze zgniotem materiału podczas detonacji ładunku wybuchowego. Spadek twardości blisko strefy przejściowej jest spowodowany dyfuzyjnym odwęglaniem stali. W otoczeniu linii złącza zawierających strefy przetopione zarejestrowano gwałtowny wzrost mikrotwardości sięgający nawet 980Hv. Punktowe pomiary mikrotwardości wykonano również w strefach przetopienia dla próbek (P04, P08, P10). W pięciu punktach pomiarowych uzyskano następujące wartości średnie: 664, 697, 690  $Hv_{0.1}$ . Otrzymane wyniki są około trzykrotnie wyższe niż twardości w części stalowej.



Rys. 41. Rozkład mikrotwardości na przekroju poprzecznym złącza, porównanie wyników próbek P02, P03, P11 [47]

### 6.3.4 Identyfikacja parametrów złącza

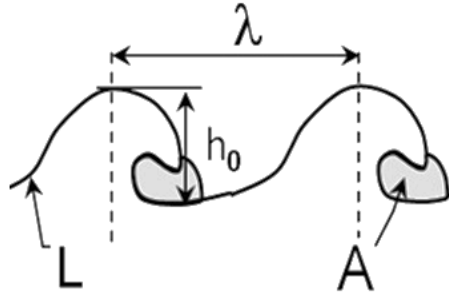
Złącze uzyskane podczas zgrzewania wybuchowego cechuje pewna regularność geometryczna. Powierzchnia połączenia może być scharakteryzowana przez podstawowe cechy takie jak amplituda  $h_0$  czy długość fali  $\lambda$ . Właściwości te są częściowo związane z parametrami zgrzewania, np. im wyższa energia detonacji tym większa amplituda fal międzypowierzchniowych. Pomimo tego, że blachy numer 10 i 30 zostały wykonane w identycznych warunkach i w tym samym czasie, wymiary fal połączeń różniły się pomiędzy sobą dla poszczególnych próbek. Przykładowe porównanie linii złącza dla dwóch próbek przedstawiono na rys. 42.



Rys. 42. Mikrostruktura złącz próbek P03 i P11 w różnych skalach [47]

Pomiar amplitudy  $\lambda$  oraz długości fali  $h_0$  (rys. 43) przeprowadzono dla czternastu próbek. Wyjątek stanowiły próbki P16 i P17, które podczas testów zmęczeniowych zostały poddane działaniu wysokich amplitud obciążenia powodujących duże deformacje przelomów zmęczeniowych utrudniających jednoznaczną ocenę amplitudy fali połączenia. W bada-

niach posłużono się zdjęciami wykonanymi za pomocą mikroskopu optycznego. Wyniki pomiarów zaprezentowano w tabeli 6. Jako uzupełnienie podano również wartości średnie oznaczone indeksem *m* oraz odchylenia standardowe z indeksem *std*.



Rys. 43 Podstawowe parametry opisujące połączenie faliste,  $\lambda$ -długość fali,  $h_0$ -amplituda fali,  $L$ -długość linii złącza,  $A$ -pole powierzchni przetopień

Tabela 6. Wyniki pomiaru parametrów złącza

Nr płyty	Oznaczenie	$\lambda$ , mm	$h_0$ , mm
10	P01	0,45	0,045
	P02	0,53	0,040
	P03	0,50	0,018
	P04	0,42	0,030
	P05	0,69	0,055
	P06	0,83	0,075
	P13	0,67	0,077
	P14	0,58	0,069
	P15	0,61	0,069
		$\lambda_m=0,587$	$h_{0m}=0,053$
		$\lambda_{std}=0,130$	$h_{0std}=0,021$
30	P07	0,81	0,088
	P08	0,77	0,077
	P09	----	0,079
	P10	0,66	0,092
	P11	0,95	0,079
	P16	----	----
	P17	----	----
		$\lambda_m=0,798$	$h_{0m}=0,083$
		$\lambda_{std}=0,121$	$h_{0std}=0,006$

Pomimo identycznych warunków zgrzewania średnie wysokości fal połączenia dla dwóch płyt (10 i 30) różnią się pomiędzy sobą o około 35%:  $0,053/0,083=0,64$ . Stosunek średnich długości fal wynosi  $0,587/0,798=0,736$ . Odchylenie standardowe  $h_{0std}$ , wykazuje, że zmienność wartości amplitudy fali i jej długości jest większa dla płyty nr 10. Biorąc pod

uwagę to, że obydwie płyty zostały wykonane przy identycznych parametrach zgrzewania można stwierdzić, że uzyskane połączenie faliste ma dużą zmienność wymiarów. Wysokość fali zmienia się w zakresie 0,018 – 0,092mm, czyli prawie pięciokrotnie, natomiast długość fali zmienia się w granicach 0,45 – 0,955 mm, czyli ponad dwukrotnie [41,49].

Właściwości złącza można również określić za pomocą współczynnika odnoszącego się do cech mikrostruktury. Współczynnik równoważnej wielkości przetopień (RGP) odpowiada średniemu udziałowi warstwy przetopionej w odniesieniu do długości linii połączenia i jest opisany za pomocą następującej zależności:

$$RGP = \frac{\sum A}{L} \quad (19)$$

gdzie:  $\sum A$ - oznacza sumę pól wszystkich obserwowanych przetopień,  $L$ - całkowitą długość rozpatrywanego fragmentu złącza. Niestety współczynnik RGP ma charakter lokalny i jego wartość może ulegać dużym wahaniom w zależności od rozpatrywanego fragmentu złącza. W tabeli 7 zaprezentowano przykładowe wartości współczynnika RGP wyznaczone dla fragmentów złączy trzech próbek [38].

Tabela 7. Przykładowe wartości współczynnika RGP

Próbka	RGP
P04	4,04 mm
P08	3,07 mm
P10	1,45 mm

## 7. Badania eksperymentalne

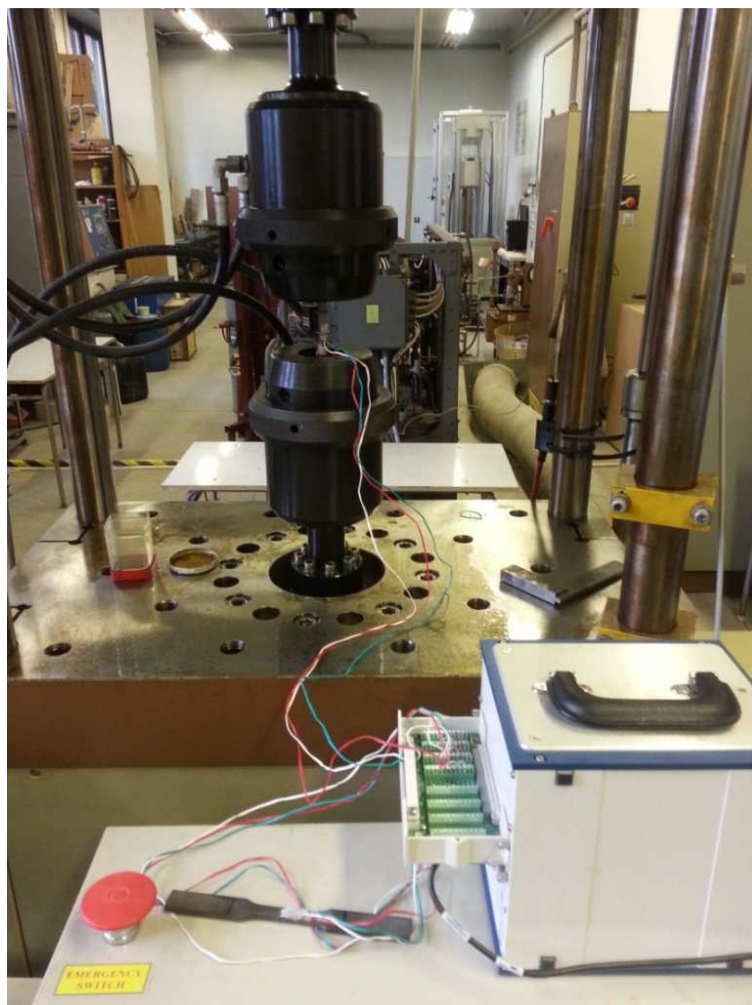
W niniejszym rozdziale zaprezentowano przeprowadzone badania eksperymentalne, które składały się z testów zmęczeniowych oraz pomiarów naprężeń własnych. W podrozdziałach szczegółowo opisano sposób wykonania testów, stanowiska pomiarowe oraz dyskusję uzyskanych wyników.

### 7.1. Badania zmęczeniowe

Aby określić wpływ procesu zgrzewania wybuchowego na właściwości zmęczeniowe bimetalu w porównaniu do materiałów podstawowego i nakładanego przed zgrzaniem, przeprowadzono dwie serie badań zmęczeniowych. Wykonano testy dla próbek pobranych z bimetalu oraz samego tytanu Grade 1. Ponieważ Stal S355J2+N jest materiałem obszernie opisanym w literaturze specjalistycznej i jej właściwości cykliczne są znane, w niniejszej pracy nie przedstawiono badań zmęczeniowych próbek pobranych z płyty materiału podstawowego. Na cele porównawcze wykorzystano informacje zawarte w literaturze.

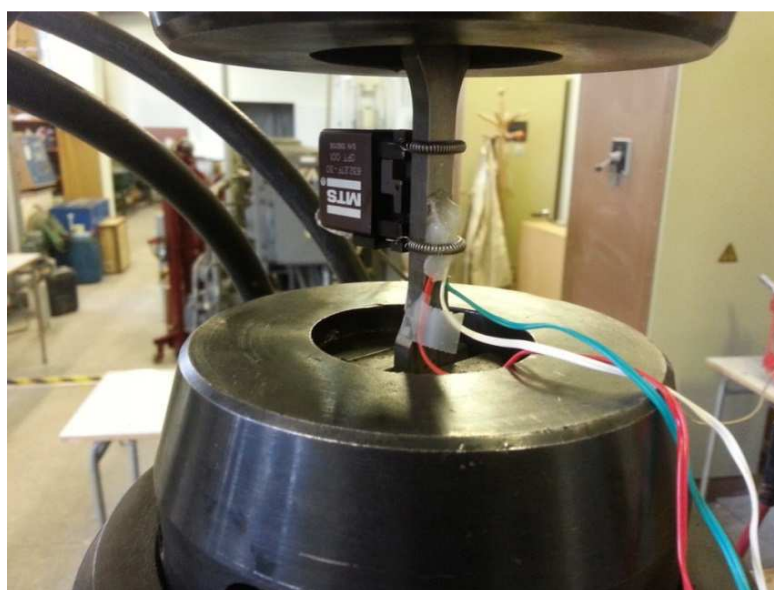
#### 7.1.1 Stanowisko do badań zmęczeniowych

Testy cyklicznego rozciągania-ściskania wykonano przy pomocy hydraulicznej maszyny do badań zmęczeniowych SHM 250. Stanowisko wyposażone jest we wbudowane czujniki siły i przemieszczenia. Do pomiaru odkształceń wykorzystywano ekstensometr mocowany na próbkę. Urządzenie jest sterowane poprzez oprogramowanie napisane w systemie Matlab/Simulink. Stanowisko pomiarowe zaprezentowano na rys. 44.



Rys. 44. Stanowisko zmęczeniowe SHM250

Jako uzupełnienie pomiarów odkształceń zastosowano rozety tensometryczne podłączone do mostka tensometrycznego National Instruments (rys. 45).



Rys. 45. Pomiar odkształceń podczas testu zmęczeniowego

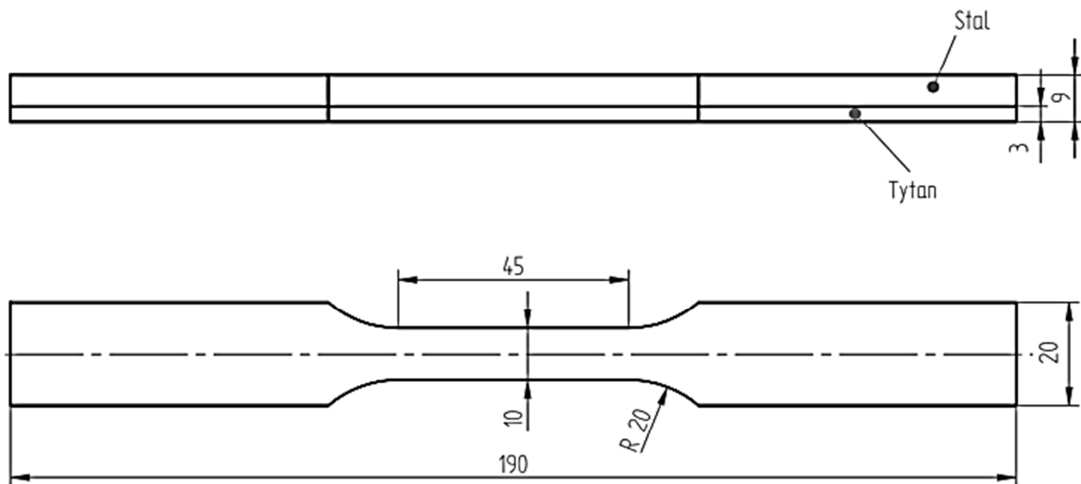
We wszystkich przeprowadzonych testach zmęczeniowych zastosowano sterowanie siłą. Sinusoidalne wymuszenie  $F(t)$  generowano zgodnie z zależnością:

$$F(t) = F_a \sin(2\pi ft) \quad (20)$$

gdzie:  $F_a$ -amplituda wymuszenia,  $f$ -częstotliwość,  $t$ -czas. Natomiast jego częstotliwość zawierała się w przedziale od 2 do 24Hz. Za zniszczenie próbek uważano jej całkowite rozerwanie.

### 7.1.2 Bimetal stal-tytan

Ze względu na ograniczone możliwości dostępnego stanowiska zmęczeniowego zredukowano grubość warstw bimetalu. Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rys. 46.



Rys. 46. Kształt i wymiary próbek wykonanych z bimetalu stal-tytan

Łącznie przebadano szesnaście próbek bimetalowych. Wyniki przeprowadzonych testów zmęczeniowych zaprezentowano w formie tabeli zawierającej parametry testów oraz trwałości zmęczeniowe (tabela 8). Na podstawie uzyskanych trwałości zbudowano charakterystyki zmęczeniowe. Ponieważ właściwości mechaniczne bimetalu są niejednorodne i nieznane są podstawowe parametry wytrzymałościowe strefy połączenia znajdującej się materiale, wykorzystanie naprężeniowej charakterystyki zmęczeniowej nie jest podejściem poprawnym, choć może być uzasadnione jako podejście inżynierskie w projektowaniu elementów wykonanych z bimetalu. Zastosowanie charakterystyki zmęczeniowej Mansona-Coffina-Basquina (wzór 10) nastęrcza również spore trudności, ponieważ model zakłada podział amplitudy odkształcenia  $\varepsilon_a$  na część plastyczną  $\varepsilon_{ap}$  i sprężystą  $\varepsilon_{ae}$ , co w przypadku bimetalu jest niemożliwe. Ze względu na to że odkształcenia po stronie stali i tytanu są równe, punkty reprezentujące trwałości eksperymentalne mogą zostać umiesz-

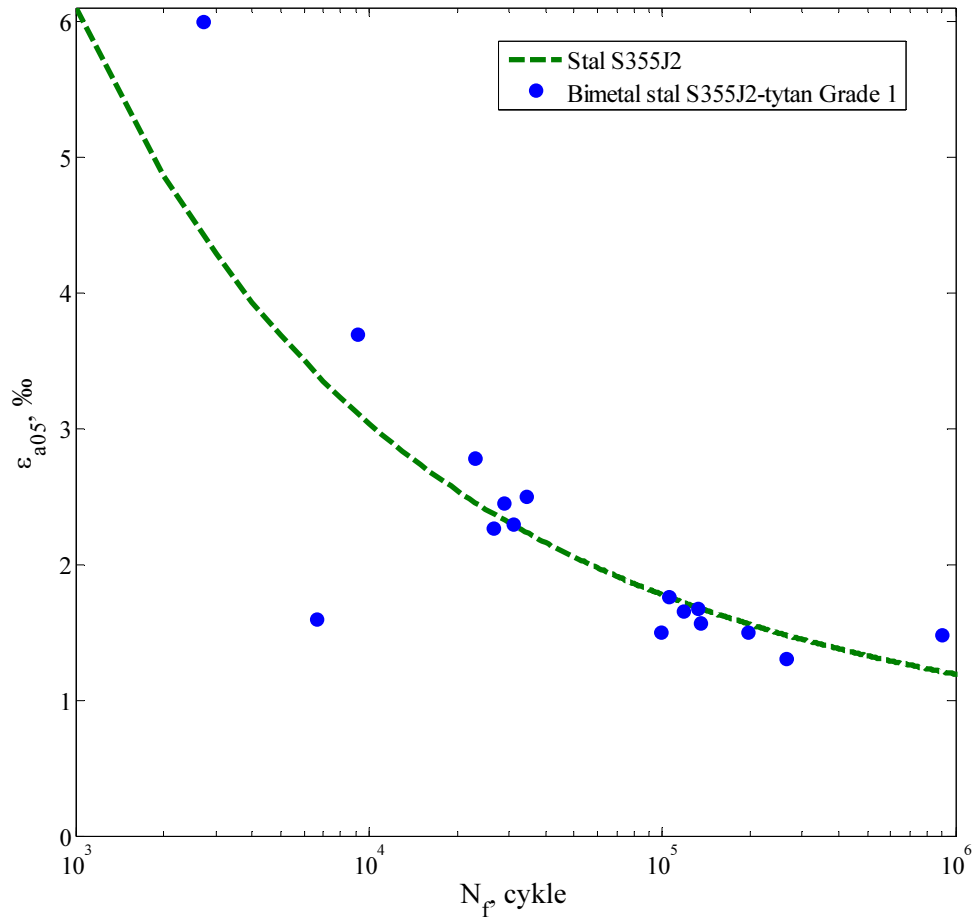


czony na wykresie zmęczeniowym i porównane z innymi charakterystykami. Normy ASTM w przypadku materiałów wielowarstwowych zalecają tworzenie charakterystyk zmęczeniowych dla amplitud odkształceń  $\varepsilon_{a05}$  zarejestrowanych w połowie trwałości zmęczeniowej (stopień uszkodzenia materiału równy 0,5). Wyniki badań zaprezentowano w formie tabeli przedstawiającej parametry testów zmęczeniowych, wymiary próbek oraz wskazanie warstwy, w której zaobserwowano punkt inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Wykres prezentujący uzyskane trwałości zmęczeniowe naniesione na tle charakterystyki zmęczeniowej stali S355J2 przedstawiono na rys. 47 [31].

Tabela 8. Wyniki badań zmęczeniowych bimetalu

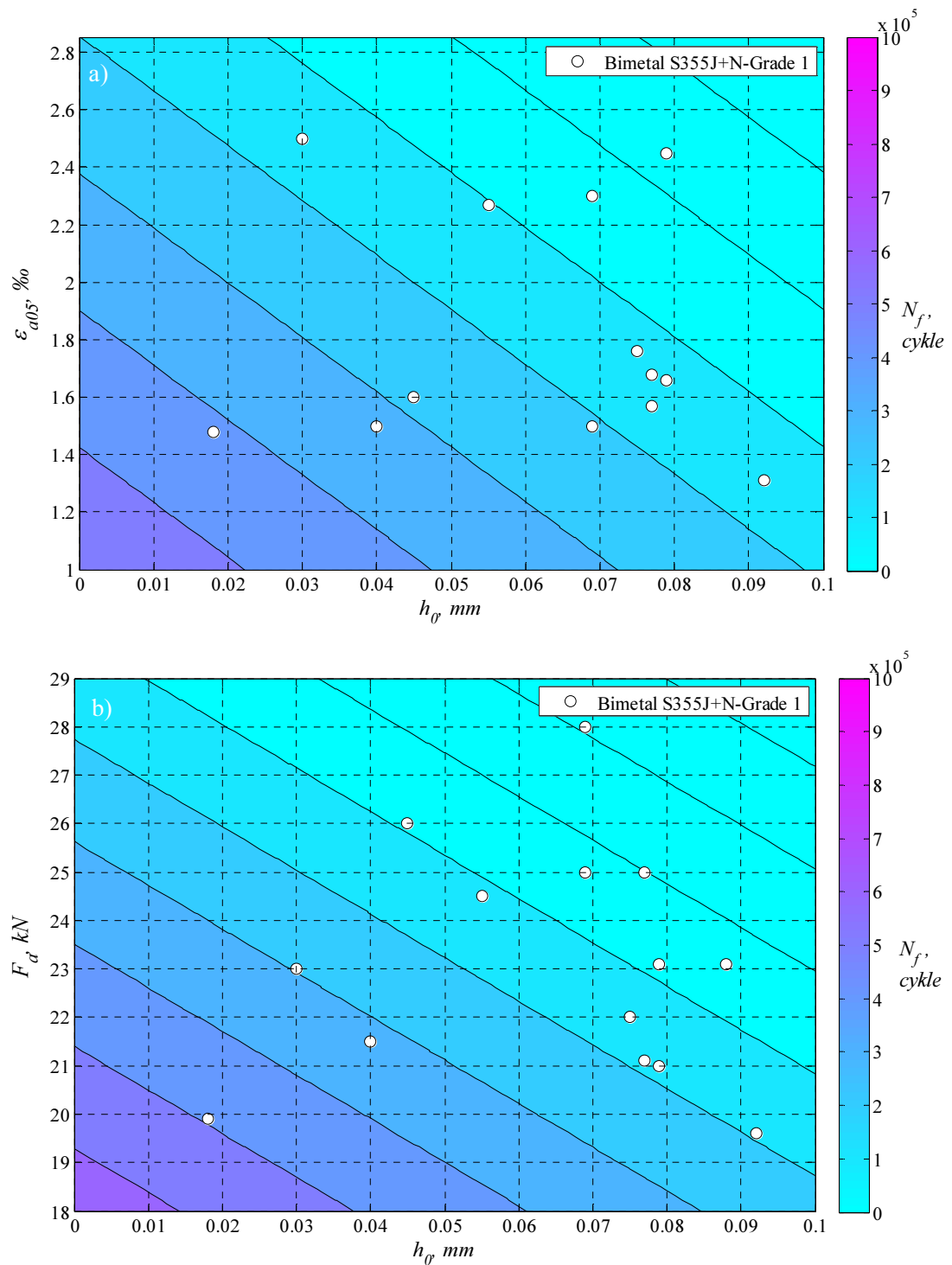
Lp	Nr blachy	Wymiary próbki			$F_a$ , kN	Punkt inicjacji pęknięcia	$N_{exp}$ , cykle
		$w$ , mm	$H$ , mm	$h_0$ , mm			
P01*	10	10,00	9,00	0,045	24-28	S	6650
P02	10	10,00	9,00	0,040	21,5	S	98310
P03	10	9,70	9,00	0,018	19,9	S	895970
P04	10	9,72	9,02	0,030	23,0	S	34390
P05	10	9,65	8,74	0,055	24,5	S	26570
P06	10	9,57	8,96	0,075	22,0	S	104820
P07	30	9,83	9,02	0,088	23,1	S	22980
P08	30	9,91	9,00	0,077	21,1	P	134850
P09	30	9,73	9,08	0,079	23,1	S	28860
P10	30	9,70	9,00	0,092	19,6	S	263540
P11	30	9,85	9,00	0,079	21,0	P	117640
P13	10	9,80	8,50	0,077	25,0	S	132600
P14	10	10,08	9,08	0,069	25,0	S	195050
P15	10	9,90	9,00	0,069	28,0	S	31100
P16	30	9,85	8,93	---	30,0	S	9100
P17	30	9,85	8,85	---	33,0	S	2710

$w$  – szerokość,  $H$  – wysokość,  $S$  – stal,  $P$  – połączenie,  $\lambda_a$  – amplituda fali,  
\* - próby wstępne o zmiennych poziomach obciążenia  $F_a$



Rys. 47. Charakterystyka zmęczeniowa bimetalu stal-tytan

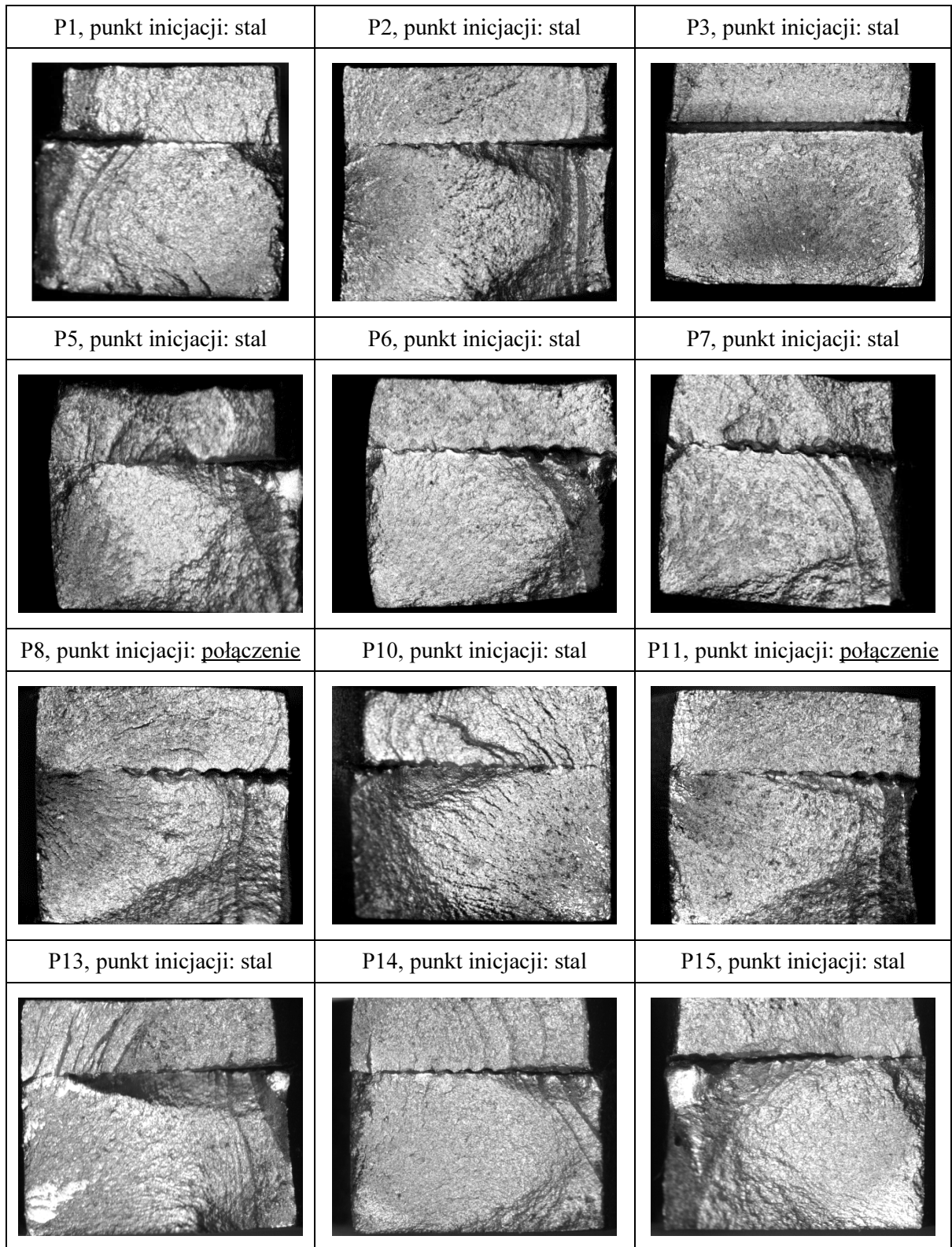
Scharakteryzowanie parametrów złącza pozwoliło na zbudowanie charakterystyk zmęczeniowych opartych o dodatkowy parametr, jakim jest amplituda fali połączenia  $h_0$  (rys. 48). Punkty eksperymentalne w układzie  $\varepsilon_{a0.5} - h_0$  (rys. 48a) i  $F_a - h_0$  (rys. 48b) naniesiono na mapę trwałości uzyskaną poprzez aproksymację wartości  $N_{exp}$  płaszczyzną. W stadium badań prezentowanym w niniejszej pracy nie jest ona dokładna. Jednak poszerzenie zakresu testów pozwoli w przyszłości na zbudowanie nowego narzędzia dającego możliwość uwzględnienia parametrów materiałowych odnoszących się do uzyskanego złącza. Wyniki zaprezentowane w formie wykresów zmęczeniowych (rys. 48) wskazują na zależność pomiędzy trwałością zmęczeniową bimetalu  $N_f$ , a amplitudą fali połączenia  $h_0$ . Przy podobnym poziomie obciążenia oraz amplitudy odkształcenia rejestrowanej w połowie trwałości  $\varepsilon_{a0.5}$  próbki wykazywały nawet kilkukrotną różnicę w osiągniętych trwałościach.



Rys. 48. Dwuparametrowa charakterystyka zmęczeniowa bimetalu uwzględniająca amplitudę fali  $h_0$  połączenia, a) w funkcji amplitudy odkształcenia  $\varepsilon_{a0.5}$  zarejestrowanej w połowie trwałości zmęczeniowej, b) w funkcji amplitudy obciążenia  $F_d$

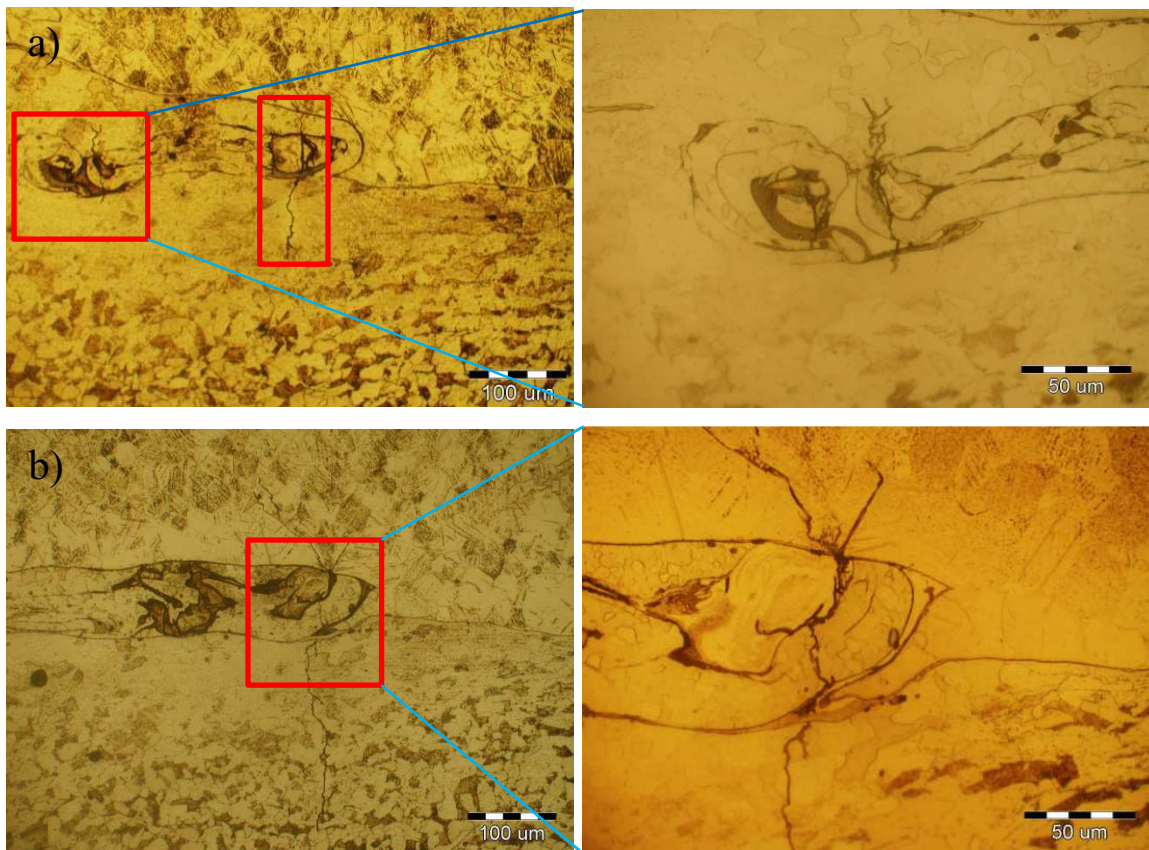
Obserwacje przelomów wykazały, że propagacja pęknięcia zmęczeniowego w większości przypadków następowała po stronie stali. Jedynie w przypadku dwóch próbek

P08 i P11 zaobserwowano inicjację w strefie złącza. Porównanie powierzchni przelomów zaprezentowano na rys. 49.

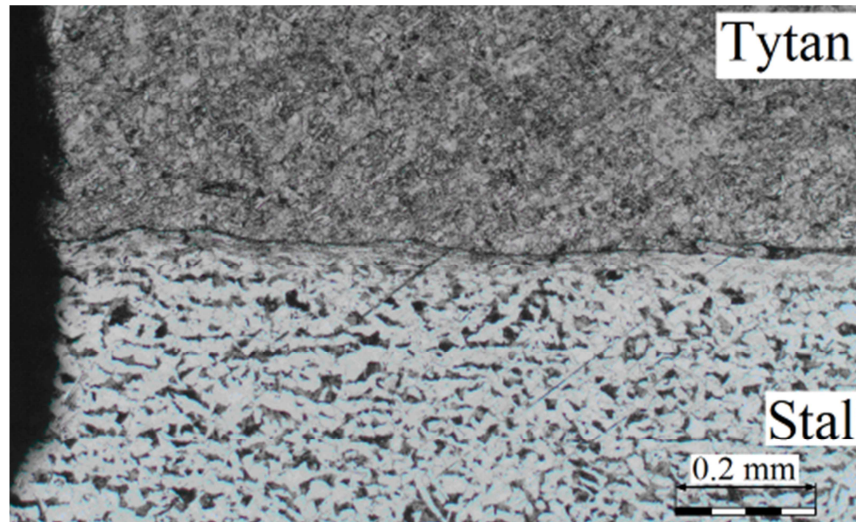


Rys. 49. Przelomy zmęczeniowe próbek bimetalowych

Obserwacje mikrostruktury próbek po badaniach zmęczeniowych wykazały liczne pęknięcia zmęczeniowe propagujące od złącza. Przyczyną takiego zjawiska są liczne defekty istniejące w połączeniu takie jak: strefy przetopione, mikropęknięcia i mikropustki (rys. 50). Cechą charakterystyczną powstałych przełomów zmęczeniowych jest brak zjawiska rozwarstwienia na granicy złącza w miejscu inicjacji pęknięcia (rys. 51). Cecha ta jest widoczna również na rys. 50, delaminacja połączonych warstw pojawia się przy udziale znaczących odkształceń plastycznych, co można zaobserwować w doraźnej strefie dołamania próbek: P1, P2, P5, P6, P7, P10 (rys. 49).



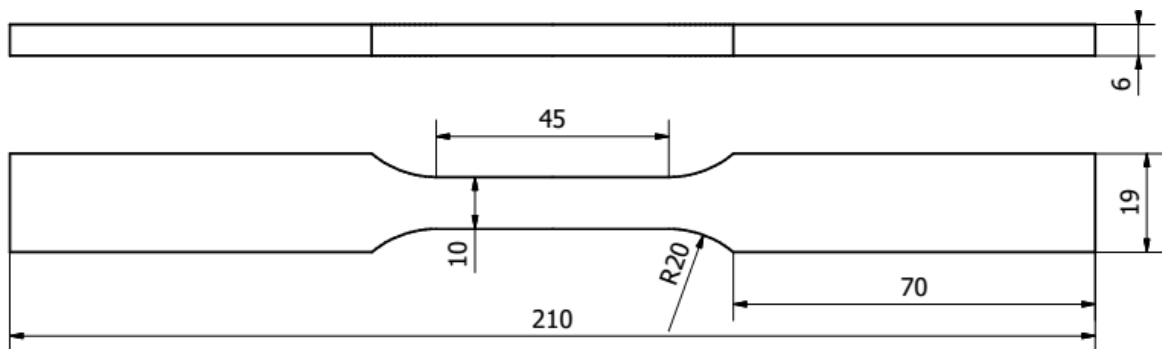
Rys. 50. Mikropęknięcia propagujące ze stref przetopionych próbki P08, obszary pęknięć zaznaczone czerwonymi ramkami, a) mikropęknięcie propagujące w stronę warstwy stalowej, b) mikropęknięcie propagujące w stronę tytanu i stali [38]



Rys. 51 Krawędź przelomu próbki P02[49]

### 7.1.3 Tytan Grade 1

Badania zmęczeniowe tytanu wykonano ponieważ w literaturze praktycznie nie istnieją opracowania naukowe podejmujące tematykę zmęczenia stopu Grade 1. Głównym celem przeprowadzonych testów była identyfikacja zachowania się materiału w warunkach obciążeń cyklicznych. Charakterystyka zmęczeniowa została zbudowana jako cel drugorzędny. Łącznie badaniom poddano siedem próbek o kształcie i wymiarach bardzo zbliżonych do próbek bimetalowych (rys. 52).



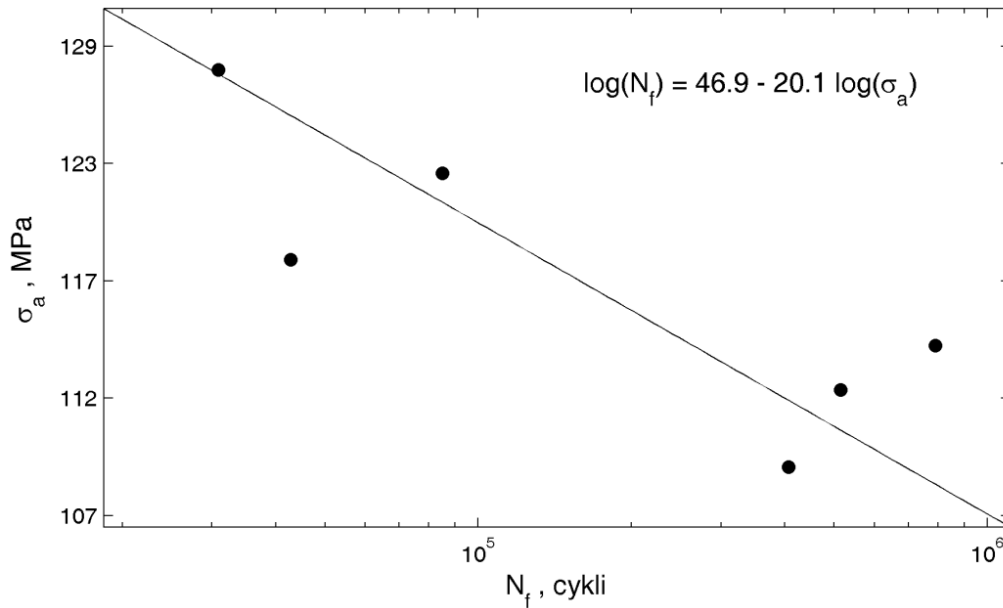
Rys. 52 Kształt i wymiary próbek wykonanych z tytanu Grade 1

Wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano w formie tabeli przedstawiającej parametry testów dla poszczególnych próbek (tabela 9) oraz charakterystyki zmęczeniowej (rys. 53). W przeciwieństwie do bimetalu stal-tytan w przypadku tytanu Grade 1 zastosowano najprostszą charakterystykę naprężeniową.

Tabela 9. Wyniki badań zmęczeniowych tytanu Grade 1

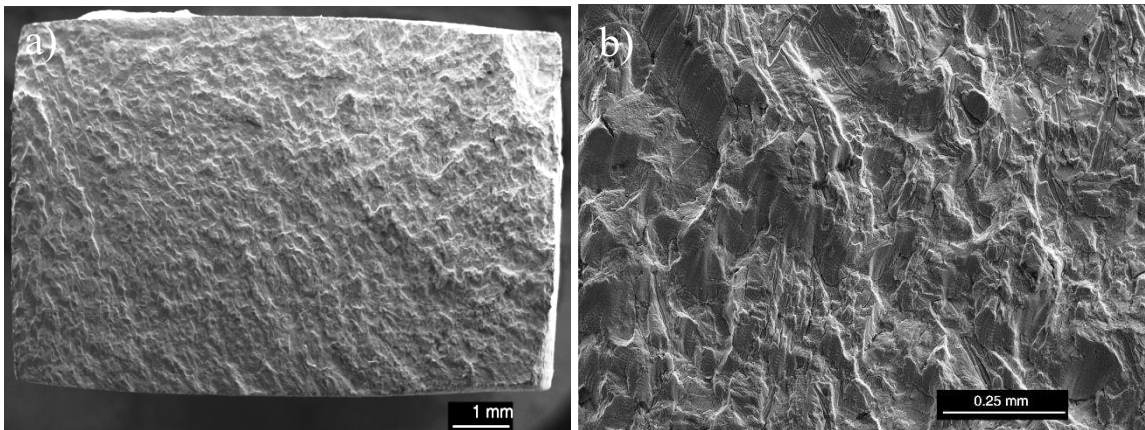
Oznaczenie	$\sigma_a$ , MPa	$N_{exp}$ , cykli
T02	98,3	1149230*
T03	118,5	42820
T04	109,2	406750
T05	127,6	30840
T06	112,6	515400
T07	122,6	85100
T09	114,5	789620

\* - test zmęczeniowy zatrzymany po osiągnięciu trwałości  $10^6$  cykli, nie uwzględniony w budowaniu charakterystyki zmęczeniowej.



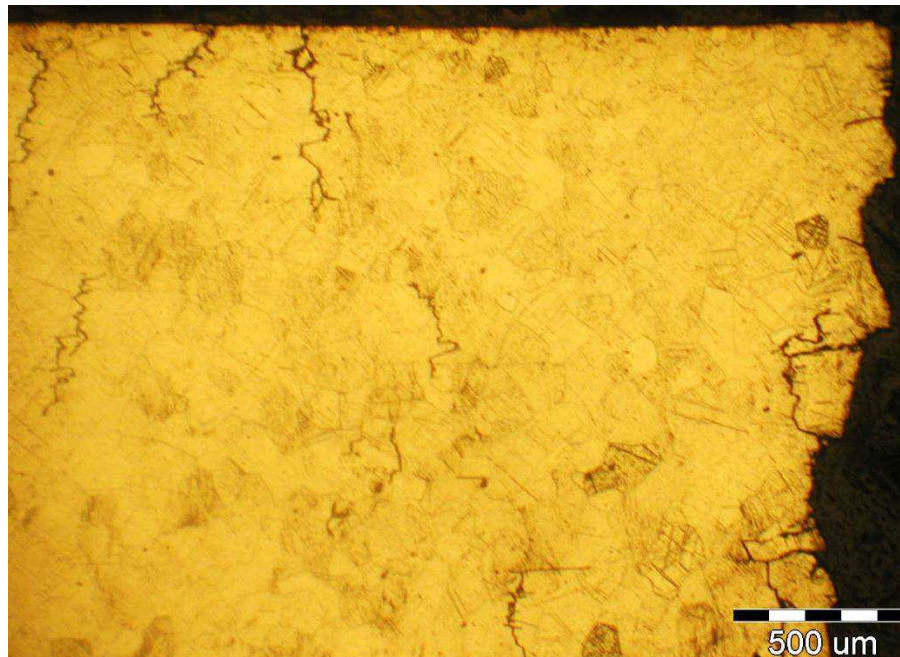
Rys. 53. Charakterystyka zmęczeniowa tytanu Grade 1

Po badaniach zmęczeniowych tytanu powierzchnie boczne próbek oraz otrzymane przełomy zostały poddane obserwacjom. Przykładowy przełom zmęczeniowy zaprezentowano na rys. 54a. Zbliżenie powierzchni przełomu (rys. 54b) świadczy o bezpośrednim charakterze pęknięcia tytanu Grade 1.



Rys. 54. Powierzchnia przelomu zmęczeniowego próbki T03, a) widok ogólny, b) zdjęcie mikroskopem skaningowym [46]

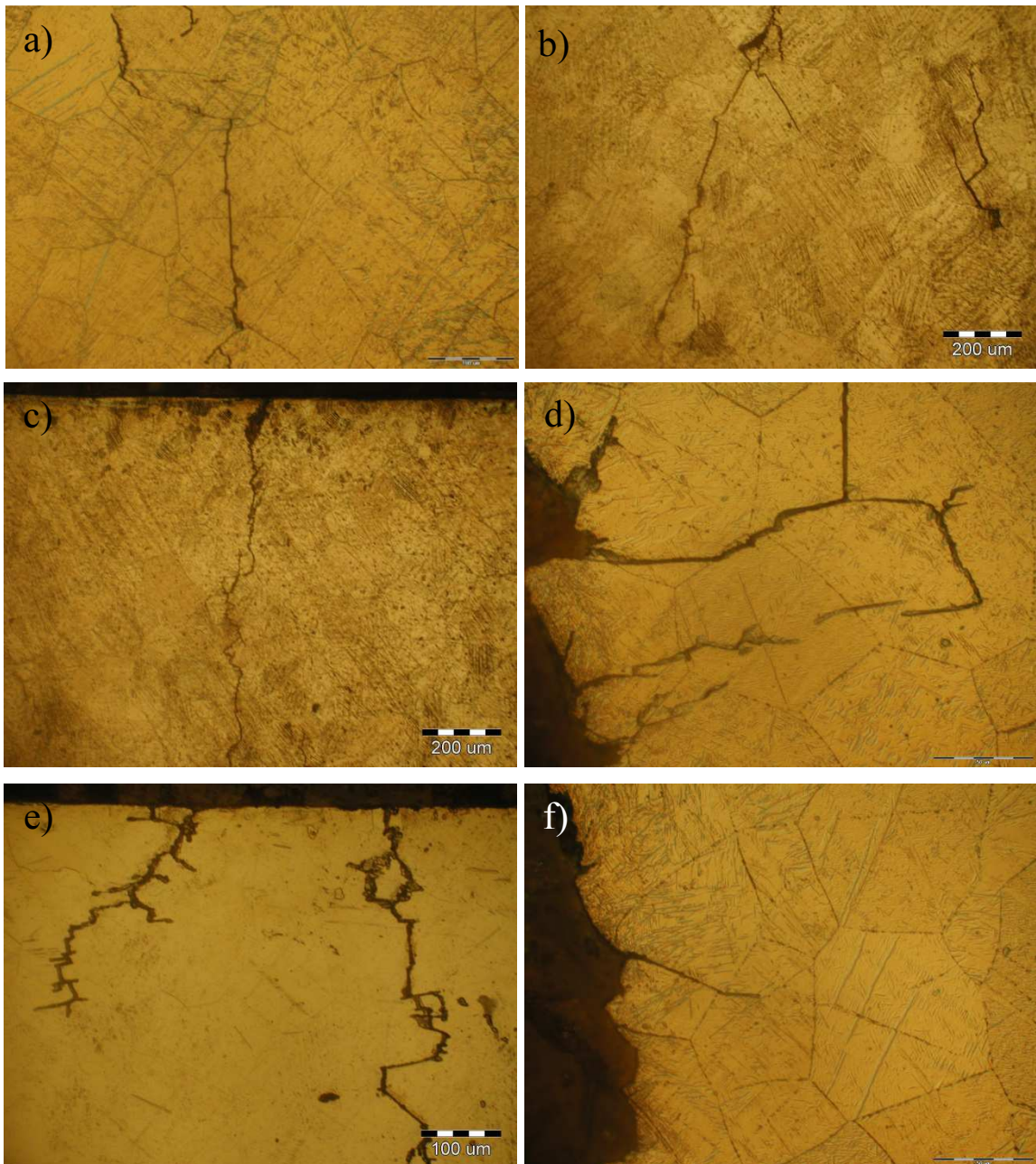
Mikrostruktury próbek zawierają liczne mikropęknięcia, których kierunek główny jest prostopadły do kierunku przyłożenia siły  $F(t)$ . Od pęknięć głównych rozchodzą się liczne mikropęknięcia, których kierunek częściowo pokrywa się z kierunkiem maksymalnych naprężeń stycznych (rys. 55).



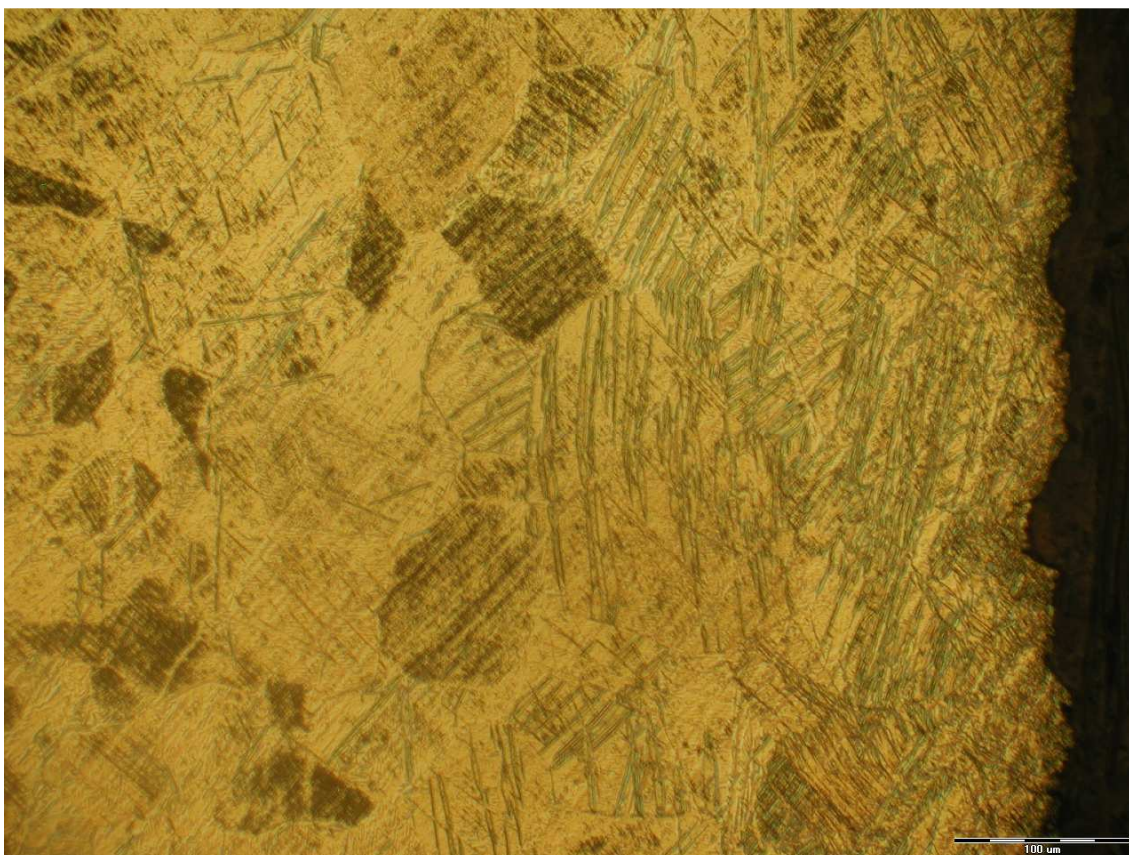
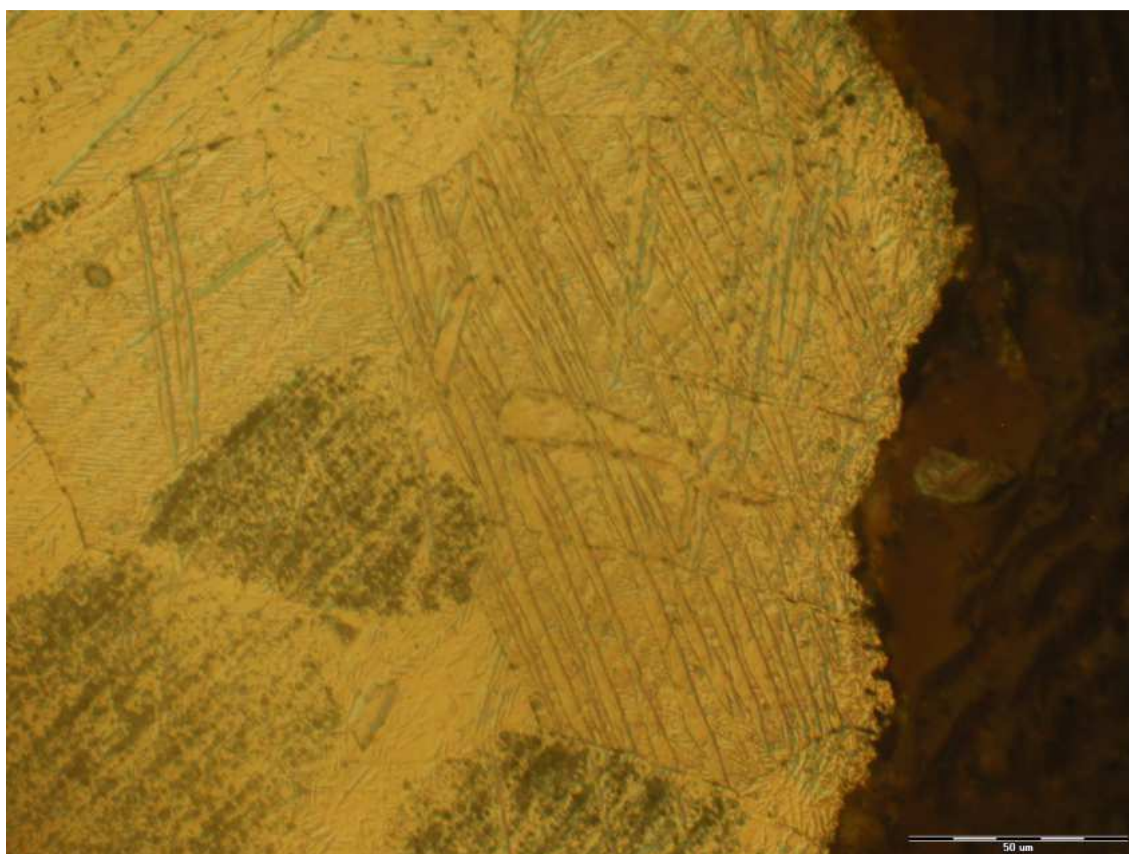
Rys. 55. Powierzchnia próbki T03 w okolicy głównego pęknięcia, prawa strona zdjęcia

W analizowanych próbkach przeważają pęknięcia o charakterze transkystalicznym obserwowane w płaszczyźnie, o normalnej zgodnej z kierunkiem maksymalnego naprężenia normalnego (rys. 56a,e). Świadczy to o kruchym charakterze przelomów zmęczeniowych. Część z obserwowanych pęknięć przebiega po granicy ziaren (rys. 56b, d, f). Wyjątek stanowi próbka T06 która wykazała wyłącznie jedno główne pęknięcie zmęczeniowe, na krawędzi którego zaobserwowane liczne bliźniaki i odkształcenia (rys. 57) [46].





Rys. 56. Powierzchnie próbek a) pęknięcia o charakterze transkrystalicznym próbka T04, b) pęknięcia po granicy ziaren próbka T04 [46], c) powierzchnia próbki T04, d) pęknięcia wtórne po granicach ziaren oraz bliźniaków próbka T03 e) powierzchnia próbki T03, f) pęknięcia w okolicy przelomu zmęczeniowego



Rys. 57. Liczne bliźniaki na powierzchni próbki T06, pęknięcie po prawej stronie[46]

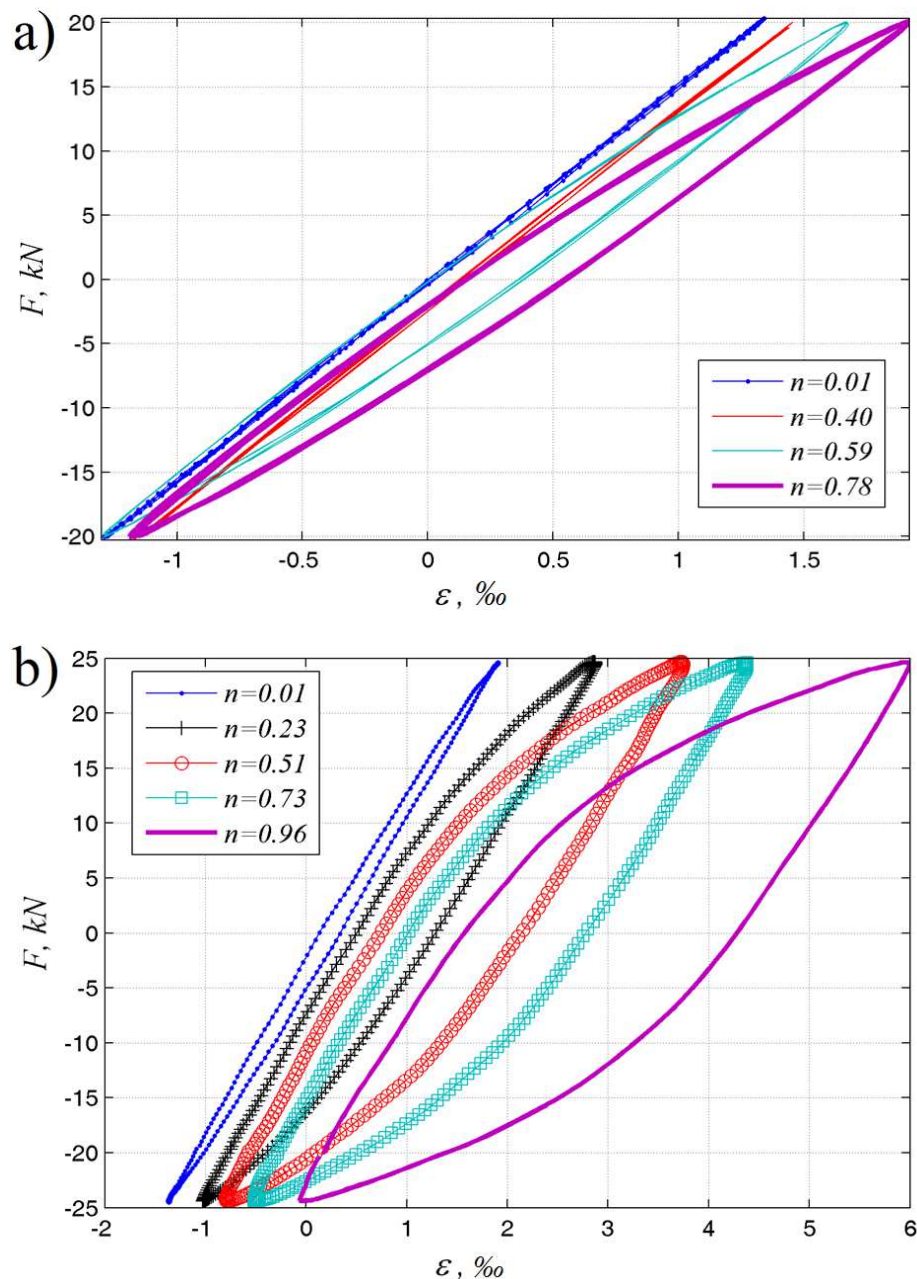
#### 7.1.4 Analiza właściwości cyklicznych materiałów poddanych próbie cyklicznego rozciągania – ściskania

Analizę właściwości cyklicznych przeprowadzono w oparciu o zarejestrowane odkształcenia  $\varepsilon(t)$  i siłę  $F(t)$ . Zależność  $\varepsilon_a-F_a$  jest źródłem ważnych informacji o zmianach zachodzących w materiale. W przypadku badań przy kontrolowanych przebiegach siły  $F(t)$  amplituda siły  $F_a$  pozostaje niezmienna. Zmianom w trakcie trwania cyklicznego obciążenia może ulec wyłącznie amplituda odkształceń  $\varepsilon_a$ . W przypadku rosnącej wartości amplitudy odkształcenia zachowanie badanego materiału klasyfikowane jest jako cyklicznie osłabiające się. W sytuacji odwrotnej jest on definiowany jako cyklicznie umacniający się. Jeśli właściwości mechaniczne materiału konstrukcyjnego są jednorodne, np. próbek wykonanych z tytanu Grade 1, to ocena jego właściwości cyklicznych może być uznana za jednoznaczną. W przypadku bimetalu identyfikacja jest bardziej skomplikowana ze względu na odmienne właściwości połączonych materiałów. Odkształcenia próbki wykonanej z kompozytu zamocowanej w szczękach hydraulicznych są jednorodne z uwagi na wymuszone i jednakowe przemieszczenia części chwytowych. O wartościach naprężeń w każdej z warstw bimetalu decydują wymiary przekrojów, moduł sprężystości wzdłużnej oraz właściwości sprężysto-plastyczne. Brak informacji o cyklicznych właściwościach sprężysto-plastycznych połączonych materiałów, a w szczególności o powstałej strefie połączenia sprawia, że wykreślenie zależności między naprężeniem a odkształceniem jest utrudnione. Możliwe jest jednak wyznaczenie zależności pomiędzy siłą wymuszającą  $F_a$ , a odkształceniem  $\varepsilon_a$ , które w zakresie liniowo – sprężystym przyjmuje formę prostej. Natomiast w zakresie występowania odkształceń plastycznych przedstawia ona pętle histerezy, która jest miarą energii rozproszonej w materiale. Oczywiście dokładna ocena gęstości energii dyssypowanej w materiale jest niemożliwa, ponieważ nieznane są naprężenia obecne w materiałach. Ważną cechą zarejestrowanych pętli histerezy jest to, że pozwalają one ocenić stabilność materiału (zjawisko osłabienia lub wzmocnienia). Używając zarejestrowanych przebiegów odkształcenia  $\varepsilon_a$  i siły wymuszającej  $F_a$  zbudowano pętle histerezy odpowiadające wybranym cyklom obciążenia. Na potrzeby dalszej interpretacji wyników zdefiniowano dodatkowy parametr  $n$  określający stopień uszkodzenia opisany następującym wzorem:

$$n = \frac{N}{N_{exp}}, \quad (21)$$

gdzie:  $N$ - bieżąca liczba cykli,  $N_{exp}$ -liczba cykli do zniszczenia próbki.

Przykładowe pętle histerezy wykreślone dla próbek bimetalowych w układzie  $F(t)-\varepsilon(t)$  ujawniają znaczną niestabilność cykliczną kompozytu (rys. 58). Cechą charakterystyczną badanego bimetalu jest przejście ze stanu odkształceń sprężystych (brak pętli histerezy) lub niewielkich odkształceń plastycznych w pierwszych cyklach obciążenia (dla  $n = 0,01$ ) do znaczących odkształceń plastycznych dla stopnia uszkodzenia materiału  $n > 0,5$ .



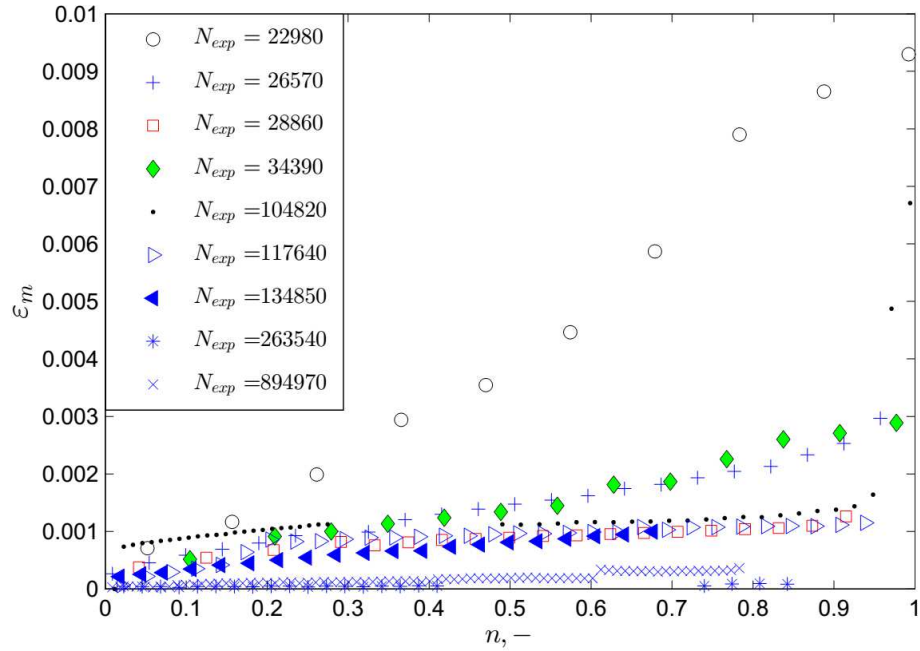
Rys. 58. Pętle histerezy zarejestrowane podczas testów zmęczeniowych, a) próbka P03, b) próbka P05

Interesującym zjawiskiem, które ujawniły przeprowadzone analizy jest trwały wzrost odkształceń w kierunku rozciągania (kumulacja odkształceń) czyli tzw. zjawisko *ratchetingu*. Pojęcie płynięcia cyklicznego (*ratchetingu*) jest jednym z bardziej interesują-

cych obszarów badawczych towarzyszących zjawisku zmęczenia materiałów. W literaturze jest on definiowany jako zjawisko najczęściej zachodzące w elementach obciążonych cyklicznie z niezerową wartością średnią [32,88]. Ważną cechą zjawiska jest to, że może ono występować równocześnie z procesami zmęczeniowymi zachodzącymi w materiale. Badacze zajmujący się problematyką płynięcia cyklicznego wskazują na silną zależność pomiędzy zjawiskiem, a właściwościami cyklicznymi materiałów, które to są bezpośrednio powiązane z mikrostrukturą. Przykładami mogą być gęstość i rozmieszczenie dyslokacji w materiale [32,78,88]. Rozpatrując potencjalne przyczyny płynięcia w perspektywie mikrostruktury bimetalu stal-tytan, za jego występowanie mogą być odpowiedzialne liczne mikropęknięcia oraz wady obecne w strefach przetopionych. Podczas działania cyklicznego obciążenia defekty mikrostruktury wywołują odkształcenia plastyczne, lub powodują niezamykanie się do końca mikropęknięć poszerzających swoje rozwarcie. Ponadto należy zauważyć, że intensywność zjawiska *ratechetingu* jest zależna od trwałości zmęczeniowej, im niższa, tym mniejsza wartość skumulowanych odkształceń.

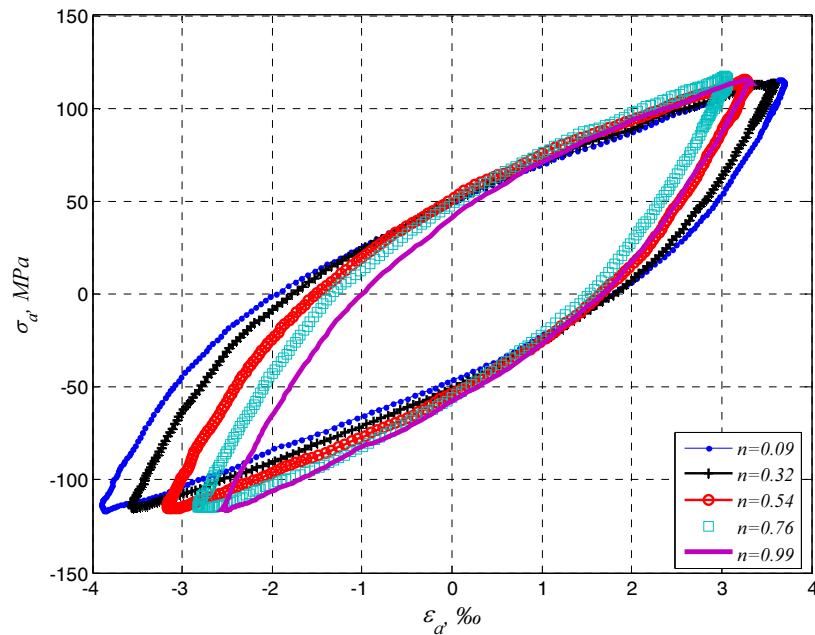
Kolejnym czynnikiem występowania zjawiska mogłyby być odmienne krzywe cyklicznego umocnienia połączonych materiałów. Stal i tytan przechodzą w stan odkształceń plastycznych dla innych wartości naprężeń, tzw. *ratchetingu strukturalnego* czyli blokowania odkształceń sprężystych w jednej warstwie w wyniku odkształceń plastycznych w drugim materiale. Jednak teoria ta została zweryfikowana w pracach [37,48]. Zastosowanie modeli Mroza oraz Chaboche'a ujawniło stabilizację materiału już po pierwszych kilku cyklach obciążenia, nie wykazując tym samym zjawiska cyklicznego płynięcia. Jednoznaczne określenie przyczyny występowania *ratchetingu* w bimetalu wymaga dalszych badań.

Kolejną cechą, która charakteryzuje zachowanie się bimetalu to zależność między stopniem niestabilności cyklicznej, a trwałością zmęczeniową (rys. 59). Dla próbek o trwałości wyższej niż  $2 \cdot 10^5$  cykli zmiana w wartości amplitudy odkształcenia  $\epsilon_a$  jest niższa niż ma to miejsce w przypadku bardziej obciążonych próbek. Dla próbek o trwałości zmęczeniowej bliskiej  $10^5$  cykli stabilność cykliczna jest utrzymana dla stopnia zniszczenia zawierającego się w przedziale od  $n=0,3 - 0,7$ . Próbki o trwałości zmęczeniowej niższej niż  $3 \cdot 10^4$  cykli nie wykazują jakichkolwiek okresów stabilności.



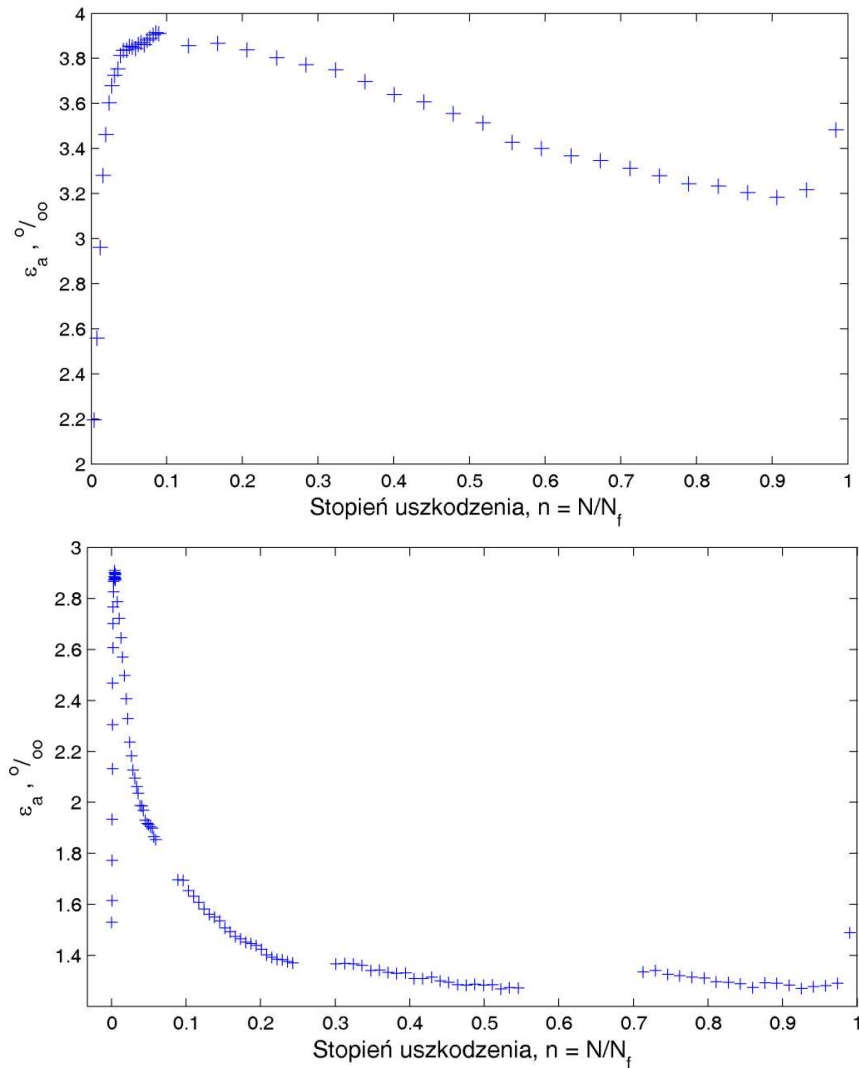
Rys. 59. Amplitudy odkształcenia w zależności od stopnia zniszczenia materiału [47]

W przypadku tytanu Grade 1 zmiany kształtu zarejestrowanych pętli histerezy również wskazują na cykliczną niestabilność materiału (rys. 60). Zauważano duży wzrost temperatury w tytanie w trakcie badań w porównaniu do takich samych obciążeń w stali. Wymagało to zmniejszenia częstotliwości obciążenia około 6 – krotnie w porównaniu do stali. Z eksploatacyjnego punktu widzenia, tytan Grade 1 nie może pracować w częstotliwościach wyższych (zależnie od obciążenia) niż kilka Hz, co może skutkować ograniczonymi możliwościami jego zastosowania.



Rys. 60. Pętli histerezy zarejestrowane podczas badania próbki tytanowej T03

Charakter zmian właściwości cyklicznych tytanu Grade 1 może zostać podzielony na trzy fazy. W pierwszej następuje gwałtowny wzrost amplitudy odkształcenia (cykliczne osłabienie). Po osiągnięciu określonej wartości stopnia uszkodzenia  $n$  następuje stopniowe zmniejszanie się wartości amplitudy odkształcenia (cykliczne umocnienie się materiału). W ostatniej fazie tuż przed pęknięciem ma miejsce gwałtowny wzrost odkształceń spowodowany propagacją pęknięcia zmęczeniowego w materiale (rys. 61).



Rys. 61. Zależność pomiędzy amplitudą odkształcenia całkowitego  $a$  a stopniem uszkodzenia dla próbek: (a) T05 i (b) T06

Zaprezentowana analiza stanu odkształcenia wykazała, że bimetali stal – tytan wykazuje inne właściwości zmęczeniowe niż materiały, z których został wykonany. Stal S355J2 jest materiałem cyklicznie stabilnym i nie wykazuje zjawiska cyklicznego płynięcia [54,60]. W przypadku tytanu Grade 1 zaobserwowano najpierw krótkotrwałe osłabienie się materiału, następnie jego cykliczne umocnienie, czego z kolei nie wykazał bimetali.

## 7.2. Pomiar naprężeń własnych

Specyficzny charakter procesu zgrzewania wybuchowego powoduje, że podczas detonacji ładunków wybuchowych na łączone płyty działa wiele czynników mechanicznych i cieplnych [87]. Badania metalograficzne wcześniej zaprezentowane w niniejszej pracy wykazują zmianę mikrostruktury w poszczególnych warstwach bimetalu oraz w strefie połączenia. Konsekwencją występowania tych zjawisk są naprężenia własne mogące mieć istotny wpływ na właściwości eksploatacyjne materiałów wytworzonych w technologii zgrzewania wybuchowego. Na rys. 62 zaprezentowano rezultat działania naprężeń własnych w bimetalu tytan – nikiel (1mm+1mm). Materiał uległ znacznym deformacjom wywołanym obecnością naprężeń własnych, zjawisko wystąpiło po pewnym czasie od procesu prostowania.



Rys. 62. Naprężenia własne w bimetalu tytan-nikiel

Badania zmęczeniowe dowiodły, że bimetal stal – tytan podczas próby cyklicznego rozciągania ściskania o zerowej wartości średniej wykazuje występowanie zjawisk cyklicznego płynięcia i znacznej niestabilności cyklicznej objawiającej się wzrastającą wartością amplitudy odkształcenia. W celu wyjaśnienia tych zjawisk zastosowano trepanacyj-



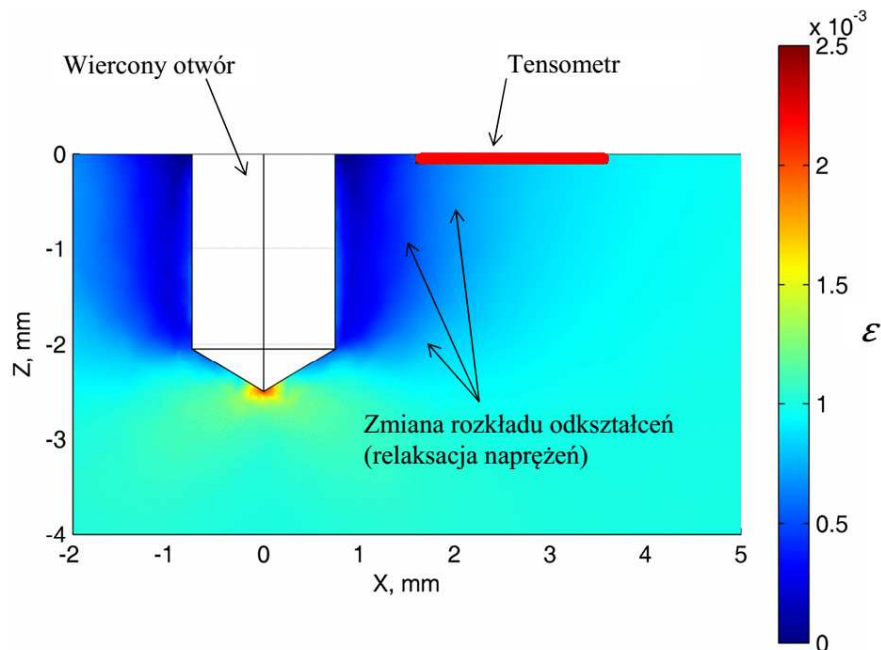
ną metodę pomiaru naprężeń własnych. Badania przeprowadzono dla próbek przed i po obróbce cieplnej. W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostanie stanowisko pomiarowe oraz wyniki obliczeń wykonanych według procedur ASTM i TML.

### 7.2.1 Metoda trepanacyjna

Istnieje wiele metod pomiaru naprężeń własnych, w literaturze specjalistycznej zostały one podzielone na trzy grupy:

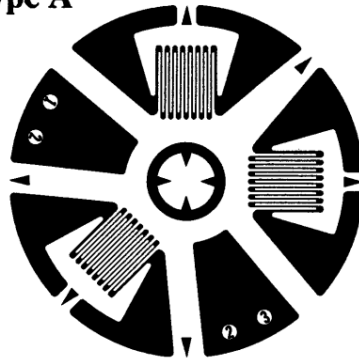
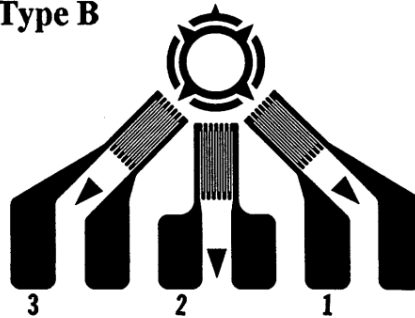
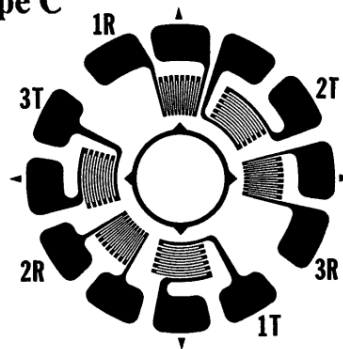
- metody nieniszczące: rentgenowska, magnetyczna ultradźwiękowa oraz neutronowa,
- metody częściowo niszczące, do grupy tej przypisana jest jedynie metoda trepanacyjna,
- metody niszczące: *ring core*, nawiercania elektroerozyjnego, usuwania warstw.

Wymienione techniki pomiaru różnią się pomiędzy sobą w istotny sposób, głównie możliwościami badawczymi (głębokością pomiarów) oraz aparaturą niezbędną do przeprowadzenia pomiarów. Wybrana na potrzeby prezentowanych badań metoda trepanacyjna należy do najtańszych i najłatwiejszych w stosowaniu z powyżej opisanych. Jej mechanizm polega na pomiarze odkształceń wokół stopniowo wierconego otworu (rys. 63). Zmiana wartości odkształcenia mierzona wokół otworu, przez specjalnie do tego przeznaczoną rozetę tensometryczną (zaznaczano czerwoną linią na rys. 63) jest miarą naprężeń własnych obecnych w materiale.



Rys. 63. Symulacja zmiany stanu odkształcenia podczas pomiarów naprężeń własnych metodą trepanacyjną

Zalecenia ASTM dzielą rozety tensometryczne na trzy standaryzowane typy, które mogą być zastosowane podczas pomiarów. Ich cechą charakterystyczną jest precyzyjnie oznaczony środek geometryczny rozety, w którym wiercony jest otwór pomiarowy (rys. 64) [106].

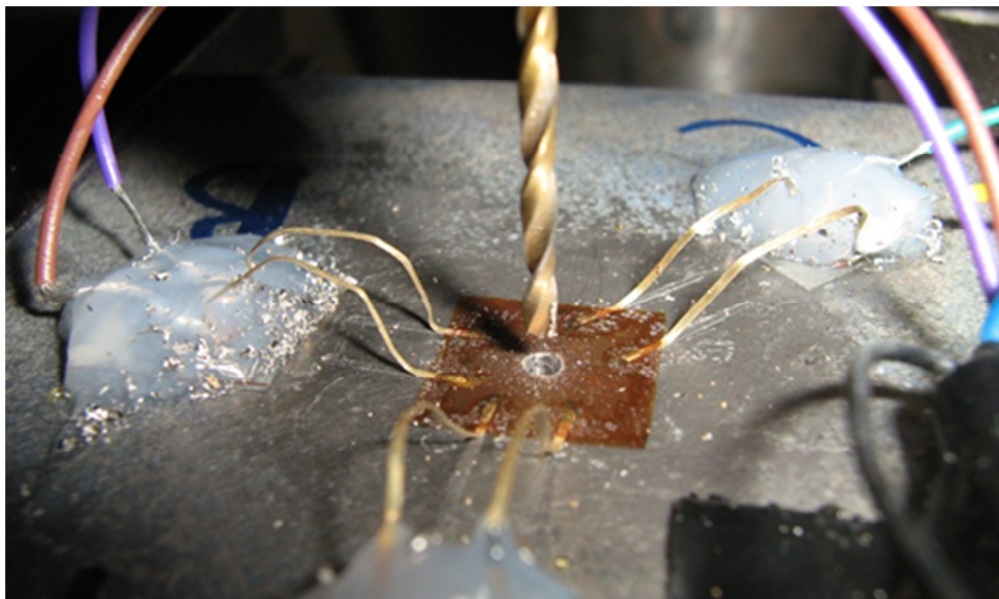
**Type A****Type B****Type C**

Rys. 64. Typy rozet tensometrycznych przeznaczonych do pomiaru naprężeń własnych [106]

Normy ASTM [106] oraz opracowania specjalistyczne [89] zalecają wykonanie pomiarów w sześciu podstawowych krokach:

1. Przyklejenie specjalnej rozety tensometrycznej (3 lub 6 kierunków) w miejscu pomiaru naprężeń własnych.
2. Podłączenie przyklejonych rozet tensometrycznych do mostka tensometrycznego.
3. Ustawienie próbki tak, aby wiertło znalazło się w środku geometrycznym rozety.
4. Ustawienie i wyzerowanie mostka tensometrycznego.
5. Przeprowadzenie pomiarów odkształceń wokół stopniowo wierconego otworu.
6. Obliczenie naprężeń własnych.

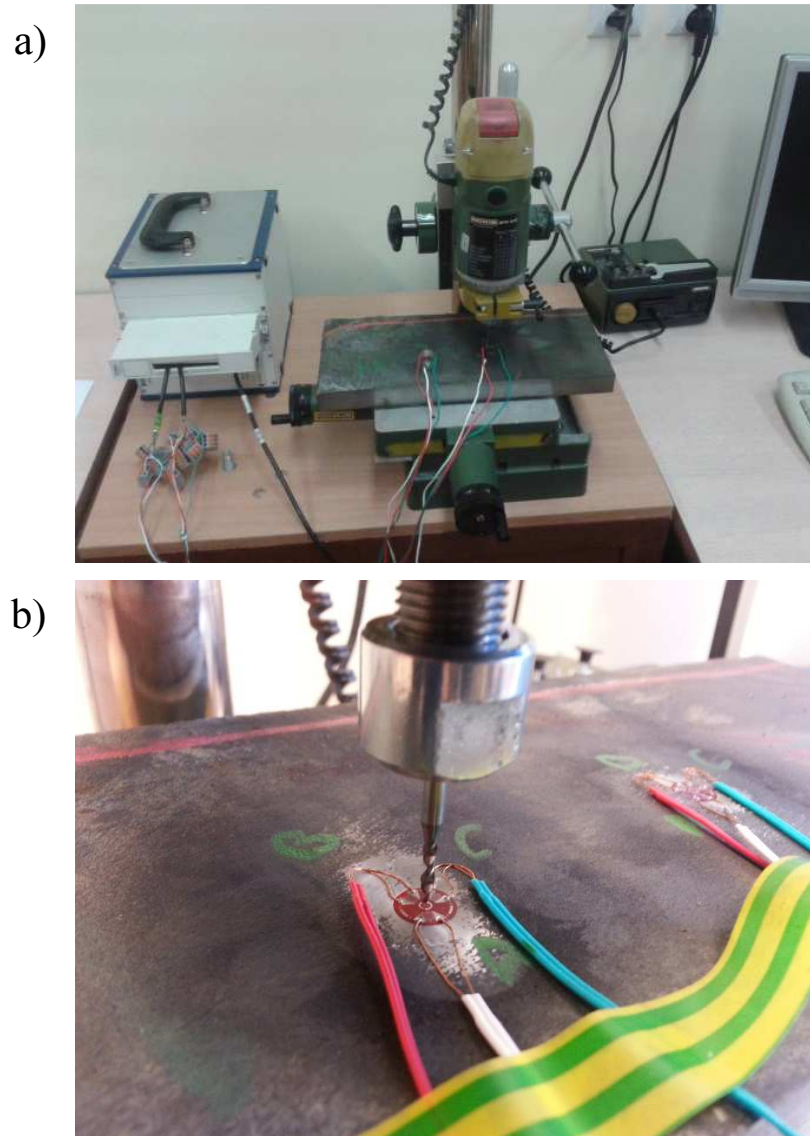
Przykładowy pomiar metodą wiercenia ślepego otworu zaprezentowano na rys. 65. Uzyskanie wiarygodnych wyników zależy w dużym stopniu od zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz dokładności ustawiania wiertła względem środka otworu oznaczonego w rozecie tensometrycznej.



*Rys. 65. Wiercenie otworu pomiarowego przez rozetę tensometryczną*

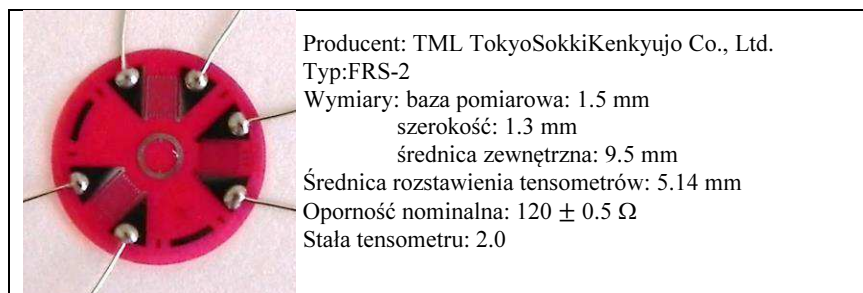
### **7.2.2 Stanowisko pomiarowe**

Główne elementy stanowiska pomiarowego wykorzystanego w prezentowanych badaniach to: wiertarka Proxxon BFW 40/E o maksymalnej prędkości obrotowej 6000 obr/min oraz mostek tensometryczny National Instruments Ni SCXI-1314 (rys. 66a). Ważną cechą wykorzystanej wiertarki jest możliwość bardzo dokładnego ustawienia wiertła, oraz uzyskania równych, co do wartości posuwów w głąb materiału (rys. 66b).



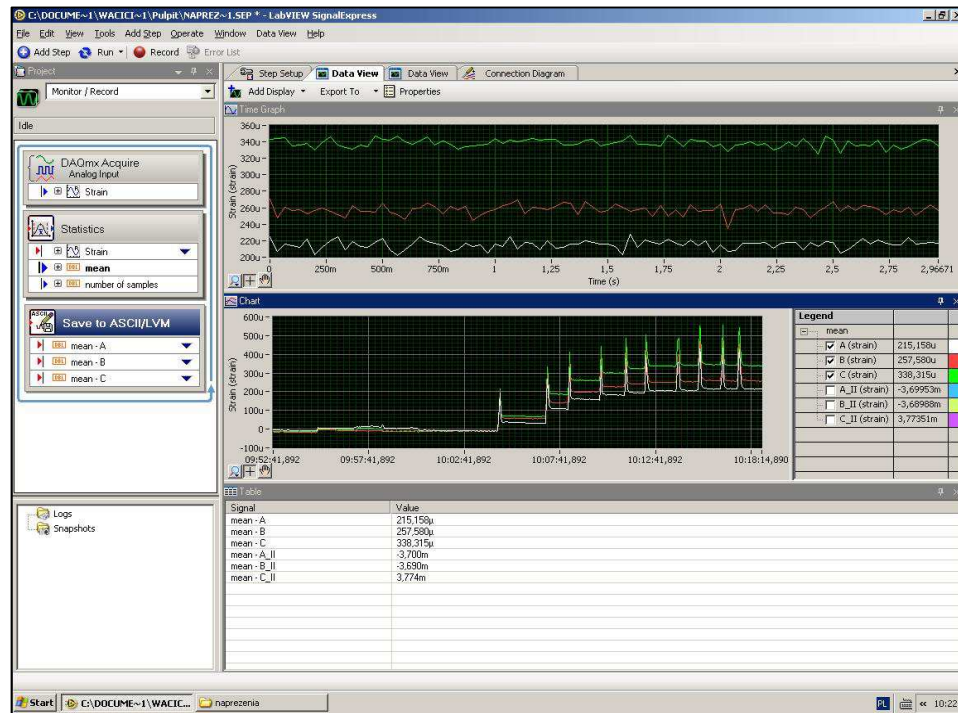
Rys. 66. Stanowisko do pomiaru naprężeń własnych a) stanowisko pomiarowe, b) wiertło przed wykonaniem otworu

We wszystkich prezentowanych pomiarach wykorzystano rozety tensometryczne typu A firmy TML TokyoSokkiKenkyujo Co., Ltd., których dokładne parametry techniczne przedstawiono na rys. 67.

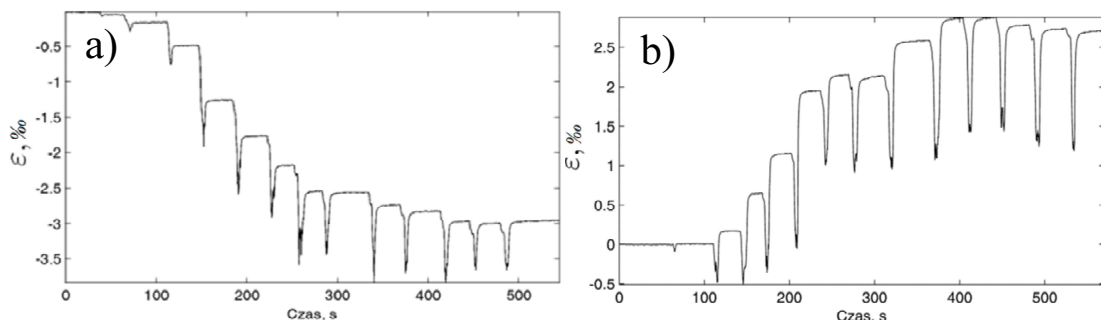


Rys. 67. Parametry rozet tensometrycznych FRS-2

Ważnym elementem układu pomiarowego jest program do akwizycji danych zaprojektowany w systemie LabVIEW Signal Express (rys. 68). Pozwalał on na zapisywanie przebiegów odkształceń rejestrowanych przez rozety tensometryczne. Podczas wiercenia system obsługiwał dwie rozety tensometryczne (kompensacyjna i pomiarową, łącznie sześć tensometrów) w układzie półmostka. Zaprojektowane narzędzie rejestrowało przebiegi w sposób ciągły (rys. 69).



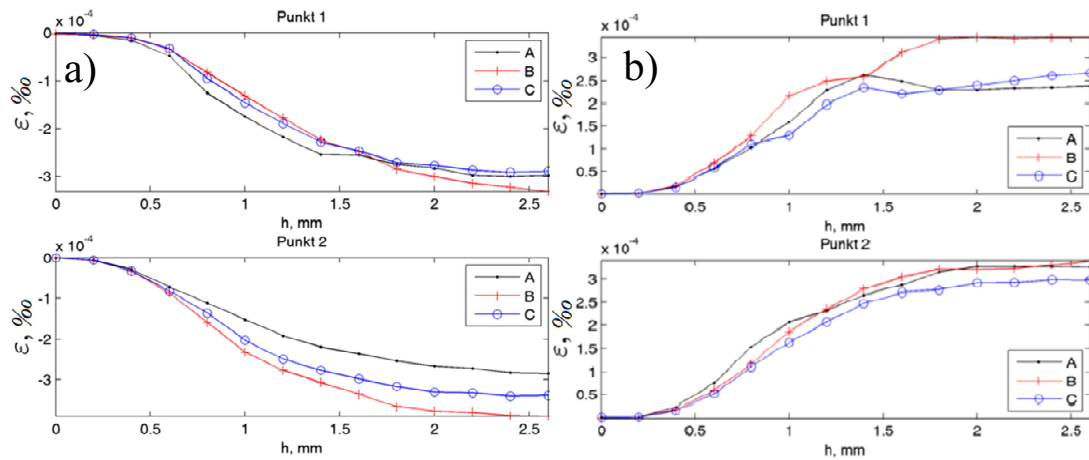
Rys. 68. Program do akwizycji danych



Rys. 69. Przykładowe przebiegi zarejestrowanych (w trakcie wiercenia) odkształceń z jednego tensometru: (a) płyta bimetalowa bez obróbki cieplnej (tytan); (b) po obróbce cieplnej (tytan)

Proces wiercenia odbywał się ze skokowym posuwem równym 0,2mm w głąb materiału. We wszystkich próbach zastosowano wiertło o średnicy 1,5mm wykonane w technologii powlekania tlenkiem tytanu. Dozwolone jest zastosowanie wiertła o większej średnicy, co poprawiłoby czułość układu. Jednak wymaga to również dokładniejszego pozycjonowania wiertła w środku rozety. Ze względu na niewielki posuw nie stosowano żadnej

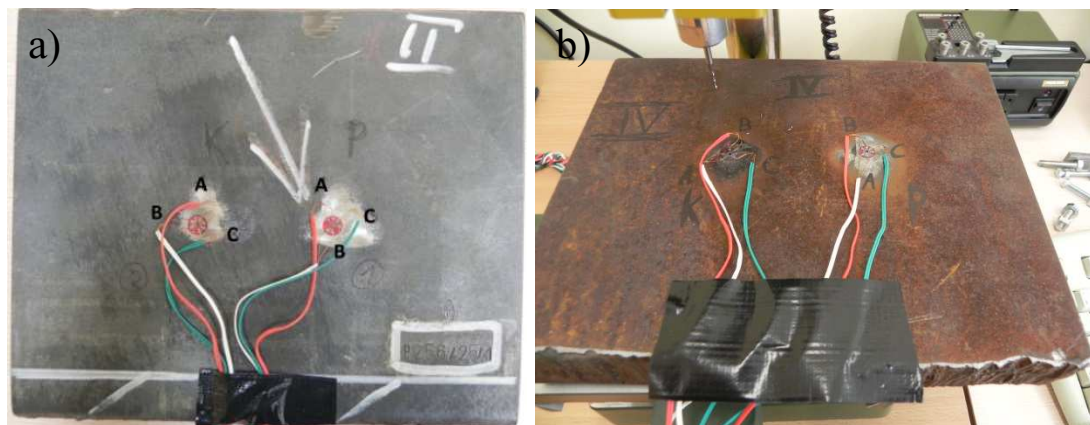
formy chłodzenia otworu lub wiertła. Ponieważ wiercenie wywoływało charakterystyczne piki w odczytach (rys. 69). Wartości pomiarowe odczytywano po ustabilizowaniu się wartości odkształcenia, czyli po wysunięciu wiertła z otworu pomiarowego (rys. 70).



Rys. 70. Zmierzone wartości odkształceń wraz z głębokością wiercenia  $h$  w dwóch punktach a) próbka przed obróbką cieplną, b) po obróbce cieplnej

### 7.2.3 Kształt i wymiary próbek

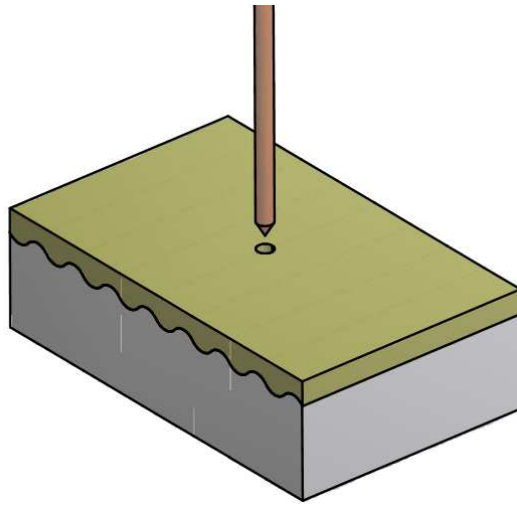
Pomiary wykonano dla sześciu wycinków pobranych z bazowych płyt bimetalowych, w uchwytach próbek przeznaczonych do badań zmęczeniowych (P13, P14) oraz dodatkowo w próbce pobranej z blachy tytanowej o grubości 6mm. Próbki bimetalu posiadały wymiary 200x240x46mm (rys. 71).



Rys. 71. Próbka z naklejonymi tensometrami, biała strzałka oznacza kierunek detonacji, a) strona tytanowa, b) strona stalowa

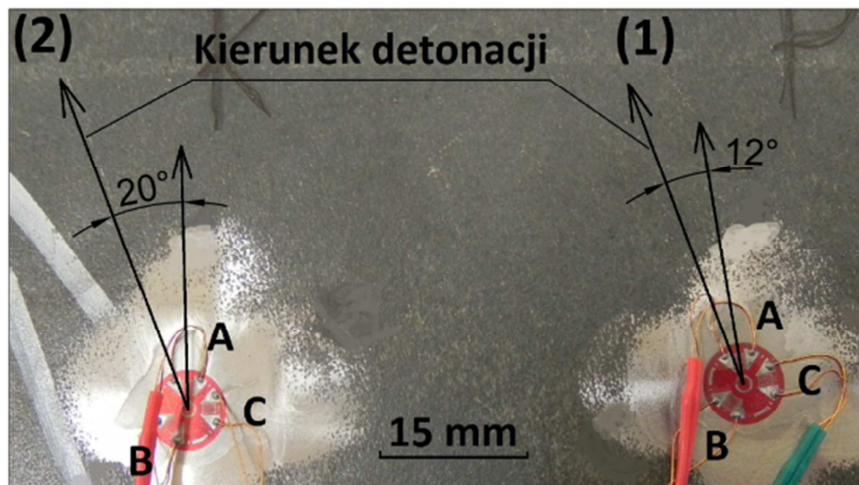
Aby zweryfikować wpływ obróbki cieplnej na stan naprężeń panujący w kompozycie, trzy z nich pobrano przed procesami obróbki termicznej. Przygotowanie do pomiaru polegało na punktowym spolerowaniu powierzchni, do której klejono tensometry.

Pomiar wykonano po stronie stali i tytanu dla każdej płyty w dwóch punktach. Orientację wiertła względem materiału zaprezentowano na rys. 72. Nie prowadzono pomiarów na krawędziach płyt.



Rys. 72. Orientacja wiertła względem bimetalu

Aby zweryfikować czy kierunek naprężeń głównych w warstwie tytanowej pokrywa się z kierunkiem detonacji zmierzono kąt  $\theta(P)$  pomiędzy kierunkiem pomiarowym  $A$ , a kierunkiem rozchodzenia się fali detonacyjnej (rys. 73).



Rys. 73. Ułożenie rozet względem kierunku detonacji na przykładzie płyty I

#### 7.2.4 Analiza wpływu wiercenia na pomiar naprężeń własnych

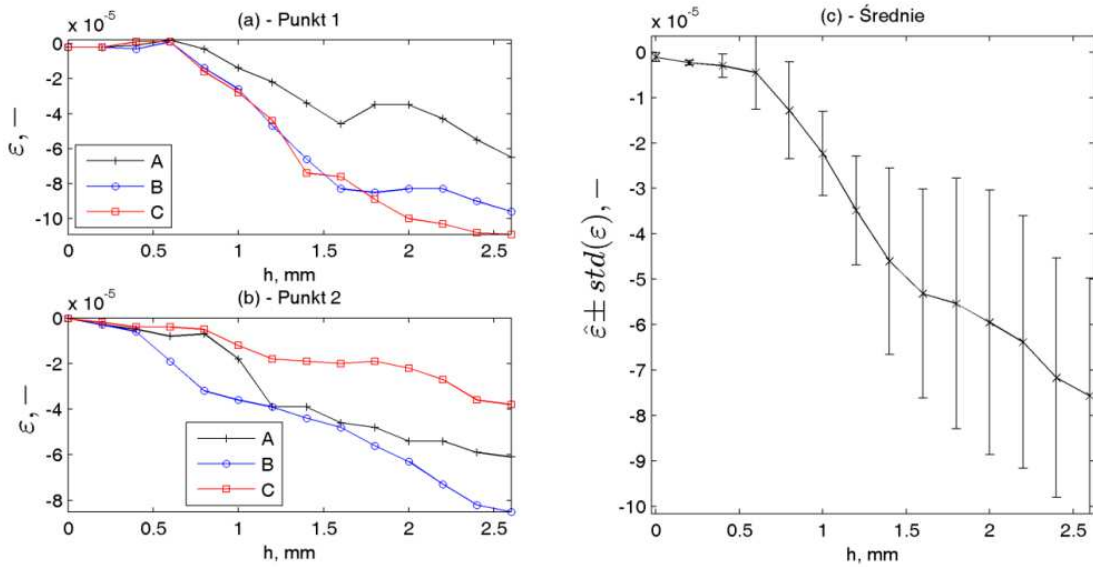
Celem określenia wpływu wiercenia otworu na zmianę stanu odkształcenia rejestrowanego przez rozetę tensometryczną posłużono się próbnymi pomiarami, które wykonano w dwóch punktach próbki pobranej z blachy tytanowej (rys. 74).



Rys. 74. Pomiar naprężeń własnych w blasze tytanowej

Podczas testów zastosowano metodologię identyczną z opisaną w poprzednim punkcie. W celu zapewnienia zerowych naprężeń własnych przed naklejeniem tensometrów próbkę poddano obróbce cieplnej o parametrach jak miało to miejsce w przypadku bimetalu. Proces wiercenia wprowadził trwałe odkształcenia ściskające w trzech mierzonych kierunkach ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ). Przebieg zarejestrowanych wartości odkształceń dla dwóch punktów pomiarowych przedstawiono na rys. 75a,b.



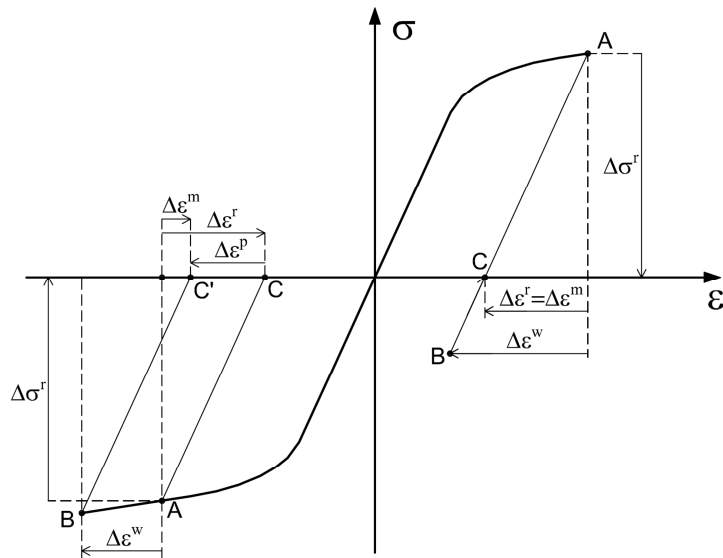


Rys. 75. Zmierzone odkształcenia w trzech kierunkach dla próbki z płyty tytanowej: (a) punkt pomiarowy 1; (b) punkt pomiarowy 2; (c) wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym

Zarejestrowane wartości okazały się być około jednego rzędu mniejsze niż w przypadku odkształceń rejestrowanych podczas pomiarów na próbkach bimetalowych. Ponieważ żaden kierunek odkształcenia nie jest uprzywilejowany (założenie o zachowanej izotropii materiału w wyniku obróbki cieplnej) dokonano uśrednienia odkształceń bez względu na kierunek i punkt pomiarowy. Wyniki przedstawiono w funkcji głębokości wierzonego otworu (rys. 75c). Dodatkowo na rys. 75c wokół wartości średnich zaznaczono rozrzut równy odchyleniu standardowemu [39].

Ponieważ w trakcie wiercenia powstają trwałe odkształcenia uwzględniono ten fakt w obliczaniu naprężeń własnych. Wpływ wprowadzonych odkształceń ma odmienny charakter ze względu na panujący stan naprężeń resztkowych. W przypadku naprężeń własnych wywołujących rozciąganie materiału (punkt *A* na prawej stronie rys. 76) proces wiercenia wprowadza chwilowe odkształcenia ściskające  $\Delta\epsilon^w$ , co sprowadza bieżący stan naprężenia-odkształcenia do punktu *B*. Pomiar odkształceń następuje od punktu *A* (gdzie następuje wyzerowanie mostka tensometrycznego). Przejście stanu naprężenia z punktu *A* do *B* następuje w sposób sprężysty, ponieważ w przypadku rozciągających naprężeń własnych jest to odciążenie. Po usunięciu wiertła naprężenia własne zostały zrelaksowane – punkt *C* na rys. 76 (prawa strona). Zmierzona wartość odkształcenia  $\Delta\epsilon^w$  jest więc równa odkształceniom  $\Delta\epsilon^r$ , z których oblicza się naprężenia resztkowe  $\Delta\sigma^r$ . Z analizy wynika, że w przypadku rozciągających naprężeń własnych wprowadzenie odkształceń w wyniku procesu wiercenia nie ma wpływu na pomiar naprężeń własnych  $\Delta\sigma^r$  [39].

W przypadku ściskających naprężeń własnych, lewa strona rys. 76, proces wiercenia, czyli  $\Delta\varepsilon^w$ , przesuwa stan naprężenia-odkształcenia do punktu  $B$  tym razem w sposób sprężysto-plastyczny. Po usunięciu wiertła i założeniu relaksacji naprężeń - bieżący stan naprężenia to punkt  $C'$ , a zmierzone odkształcenia to  $\Delta\varepsilon^m$ . Stan ten nie odpowiada za istniejące przed wierceniem naprężenia resztkowe. W związku z tym od zmierzonych wartości odkształceń  $\Delta\varepsilon^m$  należy odjąć wprowadzone w wyniku wiercenia trwałe odkształcenia  $\Delta\varepsilon^p$ . Więc do obliczania naprężeń własnych  $\Delta\sigma^r$  służą odkształcenia  $\Delta\varepsilon^r = \Delta\varepsilon^m - \Delta\varepsilon^p$  (gdzie  $\Delta\varepsilon^p < 0$  to wartości średnie przedstawione na rys. 75b [39]).



Rys. 76. Schemat przedstawiający wpływ wprowadzonych w trakcie wiercenia odkształceń trwałych na obliczanie naprężeń własnych rozciągających i ściskających[39]

### 7.2.5 Obliczenia według zaleceń TML

Producent zastosowanych rozet tensometrycznych (TML) w dokumentacji technicznej zaleca stosowanie przedstawionej poniżej procedury obliczania naprężeń własnych. Głębokość nawierconego otworu, dla której przeprowadza się proces obliczania naprężeń resztkowych wynosi  $1,2d$ , gdzie  $d$  to średnica wierconego otworu. Przy zastosowanej średnicy wiertła  $1,5\text{mm}$  obliczenia przeprowadzono dla odkształceń zmierzonych w trzech kierunkach ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) dla głębokości otworu  $h=1,8\text{mm}$ . Przy założeniu jednorodnego stanu naprężeń własnych stosuje się następujące kroki obliczeniowe:

$$\theta = \frac{1}{2} a \tan \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b}{\varepsilon_c - \varepsilon_a} - \frac{n\pi}{2} \quad (22)$$

gdzie:  $\theta$  to kąt określający położenie maksymalnego naprężenia głównego mierzonego zgodnie z ruchem zegara, od kierunku  $A$  do  $\sigma_I$ ;  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$  to odkształcenia zmierzone odpowiednio w kierunku  $A$ ,  $B$  i  $C$ ;  $n=0$  dla  $\varepsilon_a > \varepsilon_c$ ;  $n=1$  dla  $\varepsilon_a < \varepsilon_c$ .

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon a^+ \varepsilon c}{4A} + \frac{\varepsilon a^- \varepsilon c}{4B \cos(2\theta)}, \sigma_2 = \frac{\varepsilon a^+ \varepsilon c}{4A} - \frac{\varepsilon a^- \varepsilon c}{4B \cos(2\theta)} \quad (23)$$

gdzie  $\sigma_1, \sigma_2$  to naprężenia główne ( $\sigma_1 > \sigma_2$ );  $A$  i  $B$  to współczynniki obliczane z następujących zależności:

$$A = -\frac{(1+\nu)d^2}{8ER^2}, B = -\frac{d^2}{2ER^2} + \frac{3(1+\nu)d^4}{32ER^4}, \quad (24)$$

gdzie:  $E$  to moduł sprężystości wzdłużnej (dla tytanu  $E=100$  GPa);  $\nu$  to liczba Poissona ( $\nu = 0,39$ );  $d$  to średnica otworu ( $d=1,5$  mm);  $R$  to promień rozstawienia tensometrów ( $R=5,14/2$  mm). Tabele od 10 do 13 zawierają wyniki obliczeń naprężeń głównych oraz kierunki maksymalnego naprężenia głównego dla próbek przed i po obróbce cieplnej, dla warstwy stalowej i tytanowej.

Tabela 10. Naprężenia własne główne według procedury TML oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki bez obróbki cieplnej, warstwa tytanowa

Nr płyty	Punkt 1				Punkt 2			
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$
I	235	227	-50	-12	269	213	-34	-20
II	243	210	-35	174	373	339	-125	99
IV	313	248	-2	-100	310	220	-43	-130

gdzie:  $\theta(\sigma_1)$ - kąt mierzony zgodnie z ruchem zegara, od kierunku  $A$  do  $\sigma_1$ ;  $\theta(P)$ - kąt mierzony zgodnie z ruchem zegara, od kierunku  $A$  do kierunku propagacji fali detonacyjnej.

Tabela 11. Naprężenia własne główne według procedury TML oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki bez obróbki cieplnej, warstwa stalowa

Nr płyty	Punkt 1			Punkt 2		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
I	85	20	2	103	58	3
II	113	88	2	145	111	6
IV	197	154	-64	161	147	-53

Tabela 12. Naprężenia własne główne według procedury TML oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki po obróbce cieplnej, warstwa tytanowa

Nr płyty	Punkt 1				Punkt 2			
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$
I	-194	-194	-45	-97	-239	-260	26	-98
II	-290	-328	-133	93	-310	-335	17	83
III	-310	-337	32	-112	-310	-331	35	-118

Tabela 13. Naprężenia własne główne według procedury TML oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki po obróbce cieplnej, warstwa stalowa

Nr płyty	Punkt 1			Punkt 2		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
I	11	-28	32	15	-26	12
II	28	28	-45	-67	-79	-8
III	-61	-75	-127	-22	-31	-26

Wyniki obliczeń przeprowadzonych na bazie pomiarów wykonanych w próbkach zmęczonych w obydwu warstwach materiału zaprezentowano w tabeli 14.

Tabela 14. Wyniki obliczeń naprężeń własnych według procedury TML dla próbek P13, P14

Próbka	Stal S355J+N			Tytan Grade 1		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
P013	8	-6	10	12	1	8
P014	-68	-82	23	-9	-12	-27

### 7.2.6 Obliczenia według zaleceń normy ASTM

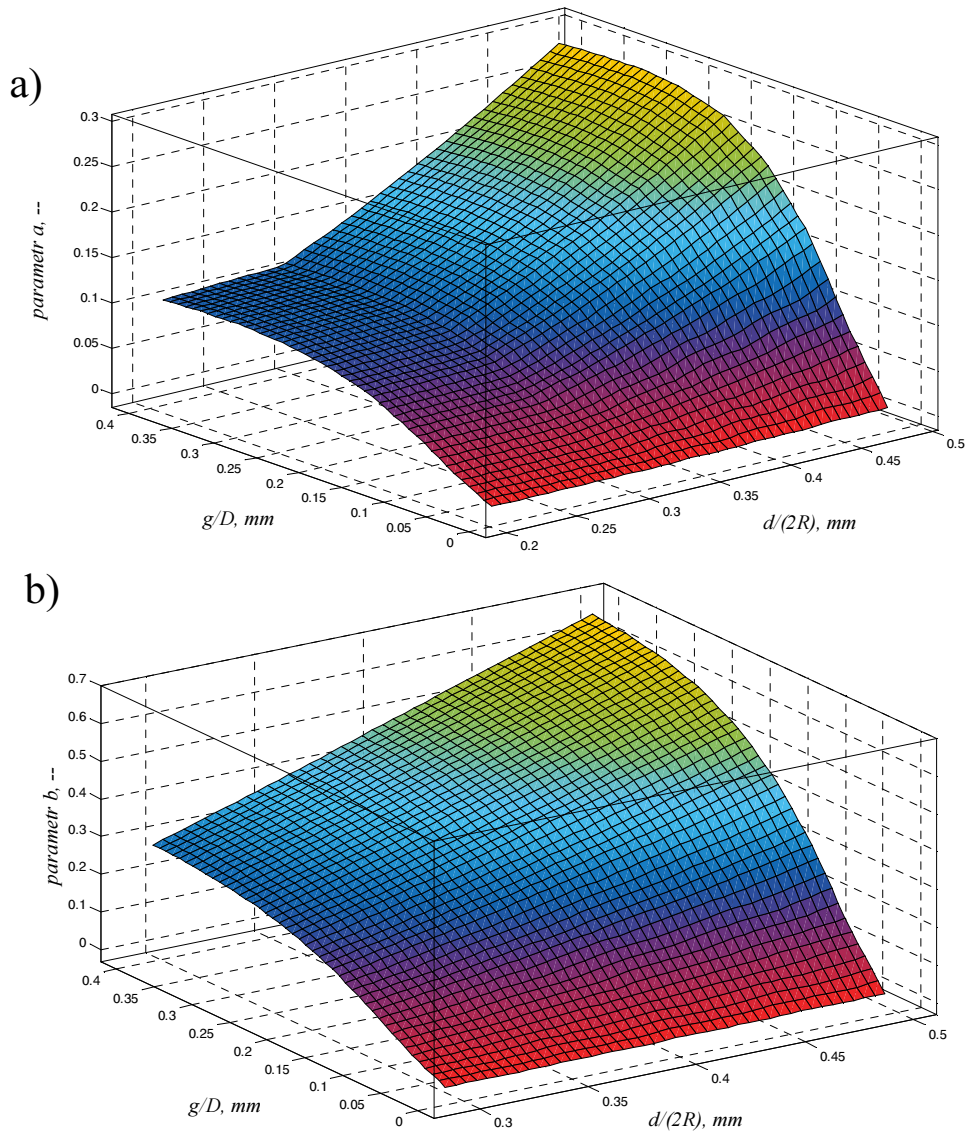
Procedura obliczeniowa naprężeń własnych przedstawiona w normie ASTM E-837-08 [106] uwzględnia odkształcenia zmierzone dla różnych głębokości otworu. W związku z tym jest ona zalecana jako bardziej dokładna, mająca zastosowanie w przypadku jednorodnego stanu naprężenia. W przypadku otworu ślepego procedura obliczeń naprężeń własnych jest następująca:

$$p = \frac{(\varepsilon_c + \varepsilon_a)}{2}, q = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_a)}{2}, t = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_a - 2\varepsilon_b)}{2}, \quad (25)$$

gdzie: parametry  $p, q$  i  $t$  oblicza się dla każdej głębokości otworu  $g$ ;  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  to zmierzone odkształcenia w kierunkach jak w procedurze TML.

$$P = -E \frac{\sum a \cdot p}{(1+\nu) \sum a^2}, Q = -E \frac{\sum b \cdot q}{b^2}, T = -E \frac{\sum b \cdot t}{b^2}, \quad (26)$$

gdzie:  $a$  i  $b$  to stałe podane w normie zależne od głębokości otworu oraz od stosunku średnicy otworu  $d$  do średnicy rozmieszczenia tensometrów  $d/(2R)$ ,  $E, \nu$  - stałe materiałowe jak dla procedury TML. Stałe  $a$  oraz  $b$  zostały przeliczone na nowo ponieważ właściwości wytrzymałościowe tytanu i stali odbiegały wartościami od wytycznych zawartych w normie ASTM (rys. 77).



Rys. 77. Stałe  $a$  i  $b$  wyznaczone dla bimetalu stal-tytan, a) parametr  $a$ , b) parametr  $b$

Kąt maksymalnego naprężenia głównego wyrażono zależnością:

$$\theta = \frac{1}{2} a \tan\left(\frac{T}{Q}\right), \sigma_1 = P + \sqrt{Q^2 + T^2}, \sigma_2 = P - \sqrt{Q^2 + T^2} . \quad (27)$$

Wyniki obliczeń dla wycinków płyt przedstawiono w tabelach od 15 do 17.

Tabela 15. Naprężenia własne główne według procedury ASTM oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki bez obróbki cieplnej, warstwa tytanowa

Nr płyty	Punkt 1				Punkt 2			
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$
I	152	143	70	-12	187	133	-33	-20
II	168	132	-38	174	252	212	60	99
IV	227	155	0	-100	218	126	-43	-130

Tabela 16. Naprężenia własne główne według procedury ASTM oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki bez obróbki cieplnej, warstwa stalowa

Nr płyty	Punkt 1			Punkt 2		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
I	67	2	1	73	26	-2
II	72	48	6	107	73	11
IV	145	103	-65	120	103	-60

Tabela 17. Naprężenia własne główne według procedury ASTM oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki po obróbce cieplnej, warstwa tytanowa

Nr płyty	Punkt 1				Punkt 2			
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\theta(P)$
I	-112	-164	42	-97	-156	-172	20	-98
II	-181	-227	-44	93	-209	-237	17	83
III	-189	-231	29	-112	-195	-229	35	-118

Tabela 18. Naprężenia własne główne według procedury ASTM oraz kąty określające maksymalny kierunek główny oraz kierunek propagacji fali detonacyjnej – próbki po obróbce cieplnej, warstwa stalowa

Nr płyty	Punkt 1			Punkt 2		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
I	11	-34	37	16	-26	21
II	16	-15	39	-48	-60	-3
III	-35	-59	48	-22	-31	-26

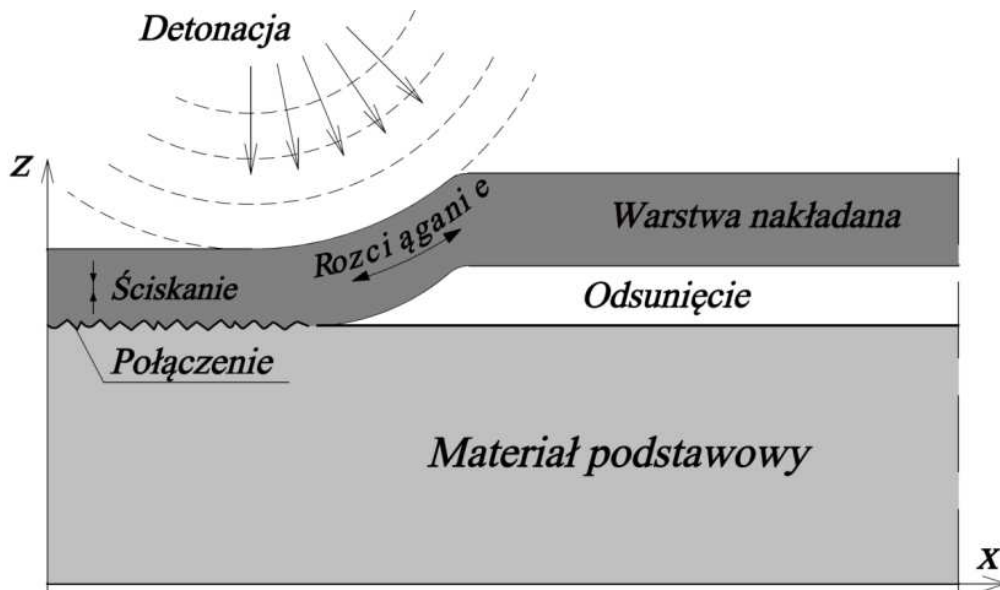
Wyniki obliczeń naprężeń resztkowych według zaleceń ASTM w próbkach P13, P14 przedstawiono w sposób identyczny jak dla procedury według TML (tabela 19).

Tabela 19. Wyniki obliczeń naprężeń resztkowych w próbkach P13, P14 według procedury ASTM

Próbka	Stal S355J+N			Tytan Grade 1		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta(\sigma_1)$
P013	10	-6	11	4	-6	6
P014	-61	-78	11	-5	-11	55

### 7.2.7 Dyskusja wyników

Pomiary odkształceń oraz dwie oddzielne procedury obliczeniowe wykazały znaczne różnice w stanie naprężenia na powierzchni warstwy tytanowej zarówno w płytach przed jak i po obróbce cieplnej. W warstwie tytanowej dla próbek bez obróbki cieplnej wyciętych bezpośrednio po procesie zgrzewania istnieją rozciągające naprężenia własne w zakresie  $\sigma_l = \langle 235, 373 \rangle$  MPa według TML oraz  $\sigma_l = \langle 152, 252 \rangle$  MPa według ASTM. Podobnie w warstwie stalowej otrzymano naprężenia o dodatnim znaku  $\sigma_l = \langle 2, 145 \rangle$  MPa według TML oraz  $\sigma_l = \langle 20, 197 \rangle$  MPa według ASTM. Taki stan naprężenia można wytłumaczyć procesem nakładania wybuchowego warstwy tytanu (rys. 78). W kierunku prostopadłym do powierzchni tytanu  $z$  oddziałuje wysokie ciśnienie wywołane detonacją materiału wybuchowego. Natomiast w kierunku  $x$  równoległym do powierzchni płyt następuje rozciąganie tytanu z uwagi na wstępne odsunięcie płyty tytanowej od stalowej. W wyniku tego procesu płyta tytanowa jest rozciągnięta i nałożona na płytę stalową. Naprężenia rozciągające w warstwie stalowej są spowodowane wygięciem zewnętrznych warstw blachy (rys. 79).



Rys. 78. Proces zgrzewania wybuchowego



Rys. 79. Płyta bimetalu po detonacji materiału wybuchowego

Przeprowadzone zabiegi obróbki termicznej skutkują rekrytalizacją ziaren tytanu. Dodatkowo obydwie warstwy, tj. stalowa i tytanowa, zwiększają swoją objętość w piecu grzewczym. W etapie chłodzenia obydwie warstwy bimetalu zmniejszają swoją objętość. Zmiana stanu naprężenia jest rezultatem różnych wartości współczynników rozszerzalności cieplnej ( $\alpha_{st}=13,0 \cdot 10^{-6}$  1/K ,  $\alpha_{Ti}=8,6 \cdot 10^{-6}$  1/K) trwale połączonych materiałów. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym identyfikację przyczyn zmian stanu naprężenia jest proces prostowania bimetalu przeprowadzany po obróbce cieplnej. Naprężenia wywołane zabiegami obróbki termicznej opisano zależnościami analitycznymi przyjmując następujące założenia:

- (I) sprężysty stan odkształcenia,
- (II) warunek zgodności odkształceń,
- (III) liniowy zakres zmiany wymiarów w zależności od temperatury,
- (IV) płaski stan naprężeń.

Wyprowadzono zależności na naprężenia termiczne  $\sigma_x, \sigma_y$  w funkcji zmiany temperatury  $\Delta t$ :

$$\sigma_{x,st} = \sigma_{y,st} = \frac{\Delta t E_{st} E_{Ti} (\alpha_{st} - \alpha_{Ti})}{E_{Ti} h_{Ti} + E_{st} (h_{st} - h_{st} \nu_{Ti}) - E_{Ti} h_{Ti} \nu_{st}}, \quad (28)$$

$$\sigma_{x,Ti} = \sigma_{y,Ti} = \frac{\Delta t E_{st} E_{Ti} h_{st} (\alpha_{st} - \alpha_{Ti}) (1 - \nu_{Ti})}{E_{Ti} (\nu_{Ti} - 1) [E_{Ti} h_{Ti} + E_{st} h_{st} (1 - \nu_{st}) - E_{Ti} h_{Ti} \nu_{st}]}, \quad (29)$$

gdzie:  $E_{Ti}$ ,  $E_{st}$  – moduły Younga odpowiednio dla stali i tytanu,

$\nu_{Ti}$ ,  $\nu_{st}$  – współczynniki Poissona odpowiednio dla stali i tytanu,

$h_{Ti}$ ,  $h_{st}$  – grubość warstwy stalowej oraz tytanowej,

$\alpha_{Ti}$ ,  $\alpha_{st}$  – współczynniki rozszerzalności termicznej dla tytanu i stali.

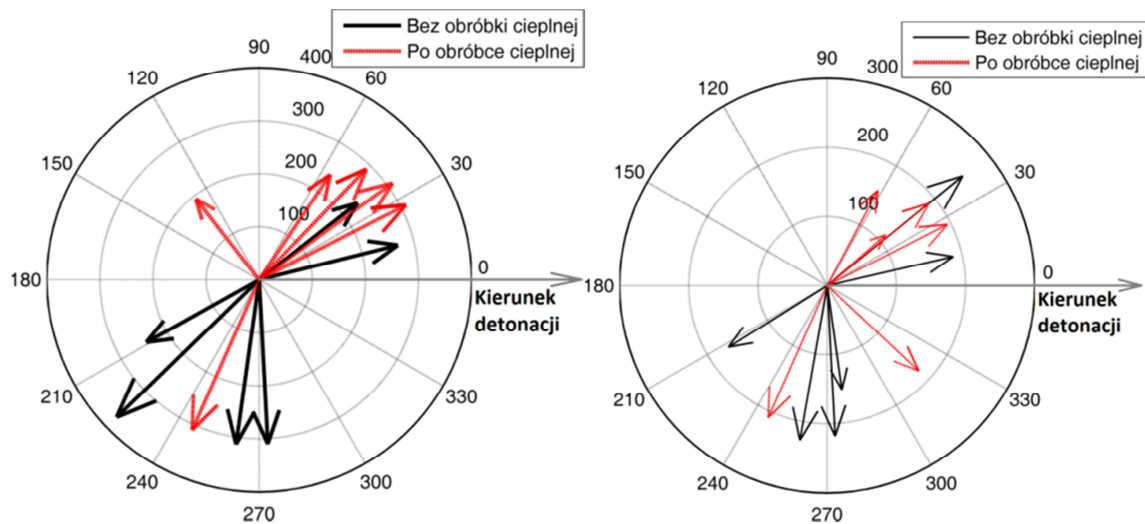


Wartości współczynników rozszerzalności termicznej dla stali i tytanu są zależne od temperatury [22,99]. Okazuje się że dla obu metali różnice w wartościach wynoszą kilkanaście procent przy zmianie temperatury o kilkaset stopni. Ponadto wraz ze wzrostem temperatury wartości obydwu współczynników wzrastają w zbliżonym tempie. W rezultacie różnica pomiędzy współczynnikami rozszerzalności termicznej wynosi około  $\Delta\alpha = \alpha_{St} - \alpha_{Ti} = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  ( $\pm 20\%$ ). Dla danych materiałowych zaczerpniętych z badań eksperymentalnych oraz zmiany temperatury o  $\Delta t = -580 \text{ }^\circ\text{C}$  naprężenia własne spowodowane obróbką cieplną wynoszą (dla  $\Delta\alpha = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) kolejno  $\sigma_{x,st} = \sigma_{y,st} = 55 \text{ MPa}$  dla stali oraz  $\sigma_{x,ti} = \sigma_{y,ti} = -378 \text{ MPa}$  dla warstwy tytanowej. Należy pamiętać że powyższe obliczenia mają charakter analityczny i nie uwzględniają swoim zakresem wszystkich cech materiału.

Naprężenia własne przeliczone na bazie pomiarów dla próbek po procesie obróbki termicznej wykazują naprężenia ściskające w warstwie tytanowej, co jest zgodne z wynikami obliczeń analitycznych. Według procedury TML zawierają się one w zakresie  $\sigma_2 = \langle -194, -337 \rangle \text{ MPa}$  oraz  $\sigma_2 = \langle -164, -237 \rangle \text{ MPa}$  według ASTM, natomiast wartości naprężeń resztkowych dla warstwy stalowej, według TML w zakresie  $\sigma_2 = \langle -79, 20 \rangle \text{ MPa}$  oraz  $\sigma_2 = \langle -60, 15 \rangle \text{ MPa}$  zgodnie z procedurą ASTM.

Wielkości naprężeń własnych obecnych w próbkach do badań zmęczeniowych P13 i P14 dla warstwy tytanowej zawierały się w przedziale  $\sigma_3 = \langle -27, 12 \rangle$  według TML i  $\sigma_3 = \langle -11, 4 \rangle$  według ASTM. W warstwie stalowej  $\sigma_3 = \langle -82, 8 \rangle$  dla procedury TML oraz  $\sigma_3 = \langle -78, 10 \rangle$ . W próbce P14 odnotowano naprężenia ściskające w obydwu warstwach materiału niezależnie od metody. Naprężenia resztkowe wyliczone dla próbki P13 są niewielkie i mogą zostać uznane za wartości na poziomie błędu pomiarowego.

Różnice w obliczeniach według procedury TML (jedna głębokość wiercenia) oraz według ASTM (średnia wartość z 14 głębokości wiercenia,  $h = \langle 0,2, 2,6 \rangle \text{ mm}$ ) świadczą o występowaniu niejednorodnego pola naprężeń własnych. Ukierunkowany proces rozchodzenia się fali detonacyjnej od punktu inicjacji sugeruje, że kierunek maksymalnych naprężeń głównych w warstwie tytanowej przed obróbką cieplną powinien zgadzać się z kierunkiem detonacji. Jednakże, obliczone kierunki maksymalnych naprężeń głównych nie pokrywają się z kierunkiem detonacji. Kierunki maksymalnych naprężeń głównych obliczone według TML i ASTM pokrywają się wzajemnie, co świadczy, że kierunek maksymalnego naprężenia głównego nie zmienia orientacji wraz z głębokością wiercenia. Kierunek naprężenia głównego  $\sigma_1$  wykazuje rozrzut ale jego wartość średnia jest obrócona o około 45 stopni względem kierunku detonacji (rys. 80a,b) [39,40,42,44].



Rys. 80. Kierunki maksymalnych naprężeń głównych  $\sigma_1$  w warstwie tytanu Grade 1, odniesione do kierunku rozchodzenia się fali detonacyjnej, a) obliczenia według TML, b) obliczenia według ASTM

Poziom naprężeń własnych w próbkach P13 oraz P14 (3mm tytan + 6mm stal) jest niższy w porównaniu do naprężeń na powierzchni płyty wejściowej (6mm tytan+40mm stal) od minimum trzech do około dziewięciu razy. Poziom wartości naprężeń własnych oraz ich kierunek działania w próbkach zmęczeniowych nie wskazuje aby były one przyczyną niestabilności cyklicznej oraz zjawiska płynięcia bimetalu, co uwiarygodnia możliwą przyczynę występowania tego zjawiska, wskazaną w rozdziale siódmym punkcie 7.1.4. Różnica w zwrocie naprężeń pomiędzy próbkami P13 i P14 są widoczne również w uzyskanej trwałości zmęczeniowej. Próbka P14 w strukturze, której obecne były naprężenia ściskające, przy identycznej amplitudzie siły wymuszającej i zbliżonej amplitudzie fali międzypowierzchniowych wykazała o około 40% wyższą trwałość zmęczeniową niż próbka P13 (P13  $N_{exp}=132600$ , P14  $N_{exp}=195050$ ).

## 8. Wnioski i spostrzeżenia

Podsumowując przeprowadzone badania wysunięto następujące wnioski i spostrzeżenia:

- Badania zmęczeniowe wykazały niestabilność cykliczną próbek wykonanych z bimetalu stal-tytan oraz samego tytanu Grade 1. W przypadku bimetalu odnotowano zjawisko niestabilności cyklicznej (osłabienie) połączone z cyklicznym płynięciem materiału (dla niektórych próbek już od pierwszych cykli obciążenia). Zjawiska te charakteryzowały się rosnącymi wartościami amplitudy odkształcenia  $\varepsilon_a$  i wartości średniej odkształcenia  $\varepsilon_m$ . Tytan Grade 1 wykazywał osłabienie cykliczne wyłącznie w około 10% całkowitej trwałości zmęczeniowej. Następnie wartość amplitudy odkształcenia  $\varepsilon_a$  ulegała stabilizacji przechodząc do stopniowego obniżania wartości (cykliczne umocnienie), nie wykazując tym samym zjawiska cyklicznego płynięcia.
- Amplituda fali strefy połączenia wpływa na trwałość zmęczeniową materiału. Przy zbliżonym poziomie obciążenia próbki z płaskim złączem wykazywały wyższą trwałość zmęczeniową. Jako przykład może posłużyć porównanie próbek P03 i P10. Próbka P03 o amplitudzie fal międzypowierzchniowych  $h_0 = 0,018\text{mm}$  osiągnęła trwałość  $N_{exp}=895970$  cykli, natomiast P10 posiadająca fale międzypowierzchniowe o amplitudzie  $0,092\text{mm}$  wykazała trwałość  $N_{exp}=263540$  cykli.
- Zastosowanie charakterystyk zmęczeniowych uwzględniających dodatkowy parametr w postaci wysokości fali połączenia  $h_0$  pozwala na powiązanie cech mikrostruktury bimetalu z jego trwałością zmęczeniową. Ponieważ amplituda fali połączenia jest parametrem, który nawet w obrębie jednej płyty przyjmuje różne wartości lokalne (np. P04  $h_0 = 0,030$ , P13  $h_0 = 0,077$ ), sposób konstruowania tego typu charakterystyk zmęczeniowych dla bimetalu stal-tytan wymaga dopracowania poprzez dalsze badania.
- Obliczenia naprężeń własnych wykonane według procedur ASTM i zaleceń TML wykazują niejednorodny stan naprężeń własnych. Ich wartości zmieniają się wraz z głębokością wiercenia przy jednoczesnym zachowaniu kierunku maksymalnych naprężeń głównych. Kierunek maksymalnych naprężeń własnych w warstwie tytanu Grade 1 nie pokrywa się z kierunkiem rozchodzenia się fali detonacyjnej.

- Obróbka cieplna bimetalu wprowadza naprężenia ściskające w obydwu warstwach materiału: dla warstwy tytanowej dla według procedury TML w zakresie  $\sigma_2 = \langle -194, -337 \rangle$  MPa oraz  $\sigma_2 = \langle -164, -237 \rangle$  MPa zgodnie z ASTM, natomiast dla stali według TML w zakresie  $\sigma_2 = \langle -79, 20 \rangle$  MPa i  $\sigma_2 = \langle -60, 15 \rangle$  MPa według ASTM, co może być korzystne nie tylko ze względu na ewentualne obciążenia zmęczeniowe i może wpływać inne czynniki niewynikające z charakteru obciążenia np. odporność korozję wodorową.
- Próbkę do badań zmęczeniowych P13, P14 wykazały niższe wartości naprężeń własnych w porównaniu do próbek pobranych z płyt wyjściowych  $\sigma_l = \langle -27, 12 \rangle$  według TML i  $\sigma_l = \langle -11, 4 \rangle$  według ASTM, natomiast w warstwie stalowej  $\sigma_l = \langle -82, 8 \rangle$  dla procedury TML oraz  $\sigma_l = \langle -78, 10 \rangle$  zgodnie z ASTM. Wysokość i kierunek naprężeń własnych nie stanowi przyczyny występowania zjawiska płynięcia i niestabilności cyklicznej próbek wykonanych z bimetalu stal-tytan.
- Stal S355J2 jest materiałem cyklicznie stabilnym i nie wykazuje zjawiska cyklicznego płynięcia. Tytan Grade 1 jest materiałem cyklicznie niestabilnym, ale podobnie do stali nie wykazuje cyklicznego płynięcia, więc indywidualne właściwości cykliczne połączonych materiałów nie są przyczyną cyklicznego płynięcia bimetalu. W związku z tym, jako możliwą przyczynę występowania zjawiska płynięcia wskazano poszerzenie się mikropęknięć obecnych w mikrostrukturze, a w rezultacie kumulację odkształceń materiału w kierunku rozciągania.

Technologia zgrzewania wybuchowego zmienia zmęczeniowe procesy degradacyjne bimetalu stal-tytan w porównaniu do procesów zachodzących w materiałach przed połączeniem. Wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowanych w niniejszej pracy wykazały cykliczną niestabilność oraz płynięcie bimetalu stal – tytan, którego przyczyną są prawdopodobnie właściwości mikrostruktury materiału (liczne mikropęknięcia). Dokładne określenie przyczyn występowania zjawisk degradacyjnych zachodzących w bimetalu stal-tytan wymaga dalszych badań. Charakterystyki zmęczeniowe uwzględniające cechy połączenia takie jak amplituda fal miedzypowierzchniowych w przyszłości mogą być wykorzystywane, jako standaryzowane narzędzie pozwalające na dokładniejszą ocenę trwałości zmęczeniowej nie tylko elementów wykonanych z bimetalu stal-tytan, ale również innych bimetali.

## 9. Streszczenie

Praca swoją tematyką obejmuje zjawiska degradacyjne towarzyszące materiałom wytworzonym w technologii zgrzewania wybuchowego po poddaniu ich obciążeniom cyklicznym. Głównym celem pracy była identyfikacja właściwości zmęczeniowych bimetalu stal S355J2 – tytan Grade 1 poprzez wykonanie serii badań zmęczeniowych próbek pobranych z kompozytu oraz tytanu Grade 1. Uzyskane trwałości zmęczeniowe wykorzystano do zbudowania charakterystyk zmęczeniowych bimetalu stal – tytan i tytanu Grade 1.

W części teoretycznej zaprezentowano przegląd literatury dotyczący zjawiska zmęczenia materiałów platerowanych, z podziałem na zarys historyczny technologii, opis mechanizmu zgrzewania i zastosowanie materiałów wielowarstwowych wytworzonych w technologii wybuchowej. Przybliżano również podstawowe pojęcia związane ze zmęczeniem materiałów konstrukcyjnych. Przegląd literaturowy zaprezentowany w pracy podzielono na dwa obszary: ogólny – kierunki rozwoju technologicznego i badań materiałów platerowanych oraz szczegółowy – ograniczony do publikacji podejmujących tematykę zmęczenia materiałów wielowarstwowych.

W części badawczej zaprezentowano eksperymentalną charakterystykę właściwości mechanicznych i metalograficznych bimetalu, z uwzględnieniem właściwości materiałów przed połączeniem. Badania eksperymentalne podzielono na dwa podrozdziały. W pierwszym z nich zaprezentowano wyniki prób cyklicznego rozciągania – ściskania, które ujawniły niestabilność cykliczną bimetalu stal-tytan. W podrozdziale zaproponowano dwuparametryczną charakterystykę zmęczeniową uwzględniającą amplitudę fali międzypowierzchniowych. Wyniki testów zmęczeniowych uzupełniono o obserwacje mikrostruktury uzyskanych przełomów i powierzchni próbek. W drugim podrozdziale przedstawiono pomiar naprężeń własnych metodą trepanacyjną według zaleceń TML i ASTM. Wyniki obliczeń wykazały niejednorodny stan naprężeń własnych oraz pozwoliły na określenie wpływu procesów obróbki cieplnej na kierunek działania naprężeń własnych w bimetalu stal – tytan. Podsumowanie przeprowadzonych badań i obliczeń zaprezentowano w ostatnim rozdziale, gdzie wskazano możliwe przyczyny występowania cyklicznego płynięcia i niestabilności bimetalu stal-tytan.

## 10. Literatura

- [1] Abramenkov A.D., Rybal'chenko N.D., Tron' A.S., Structure and phase composition of transition zone in titanium-stainless steel bimetal, *Met Sci Heat Treat.* 11 (1969) 209–211.
- [2] Acarer M., Demir B., An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum–dual phase steel, *Materials Letters.* 62 (2008) 4158–4160.
- [3] Akbari Mousavi A.A., Burley S.J., Al-Hassani S.T.S., Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives, *International Journal of Impact Engineering.* 31 (2005) 719–734.
- [4] Akbari-Mousavi S.A.A., Barrett L.M., Al-Hassani S.T.S., Explosive welding of metal plates, *Journal of Materials Processing Technology.* 202 (2008) 224–239.
- [5] Akbari Mousavi S.A.A., Farhadi Sartangi P., Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel, *Materials & Design.* 30 (2009) 459–468.
- [6] Akbari Mousavi S.A.A., Al-Hassani S.T.S., Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding, *Materials & Design.* 29 (2008) 1–19.
- [7] Akbari Mousavi S.A.A., Al-Hassani S.T.S., Atkins A.G., Bond strength of explosively welded specimens, *Materials & Design.* 29 (2008) 1334–1352.
- [8] Akbari Mousavi S.A.A., Sartangi P.F., Effect of post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium–stainless steel composite, *Materials Science and Engineering: A.* 494 (2008) 329–336.
- [9] Allen W.A., Mapes J.M., Wilson W.G., An Effect Produced by Oblique Impact of a Cylinder on a Thin Target, *Journal of Applied Physics.* 25 (1954) 675–676.
- [10] Babul W., *Odształcanie metali wybuchem*, WNT, Warszawa, 1980.
- [11] Babul W., Włodarczyk E., O warunkach tworzenia się falistej powierzchni złącza metalowego wykonanego metodą wybuchową, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej.* (1970) 153.
- [12] Babul W., Ziemia S., *Materiały wybuchowe w technologicznych procesach obróbki tworzyw*, PWN, Warszawa, 1972.
- [13] Bannantine J.A., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, 1 edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1989.
- [14] Bański R., Badania bimetalu stal austenityczna – tytanwyżarzane w różnych warunkach, in: *Nauka I Praktyka – Staże Zawodowe W Przedsiębiorstwach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2009: pp. 51–59.
- [15] Bański R., Rozumek D., Rozwój pęknięć zmęczeniowych w bimetalach stal-tytan wykonanych metodą zgrzewania wybuchowego (platerowania), *Przegląd Spawalnictwa.* R. 84, nr 4 (2012) 9–14.
- [16] Barnat W., Experimental and numerical study of influence of incidence angle of shock wave created by explosive charge on the steel plate, *B pasts.* 62 (2014) 151–163.
- [17] Barsom J.M., Rolfe S.T., *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, ASTM International, 1999.
- [18] Barsom J., Rolfe S., *Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition: Applications of Fracture Mechanics*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, West Conshohocken, PA., 1999.

- [19] Borisenko V.A., Berezovskii L.B., Levchenko V.A., Kozhevnikov V.E., Sannikov V.I., Special features of failure of bimetal in low-cycle fatigue, *Strength Mater.* 16 (1984) 25–27.
- [20] Carl L.R., Brass welds, made by detonation impulse, *Metal Progress.* (1944) 102–103.
- [21] Čížek L., Ostroushko D., Szulc Z., Molak R., Pramowski M., Properties of sandwich me-tals joined by explosive cladding method, *Archives of Materials Science and Engineering.* (2010) 21–29.
- [22] Collings E.W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, 1994.
- [23] Cooper P., *Explosives Engineering*, 1 edition, Wiley-VCH, New York, N.Y., 1996.
- [24] Crossland B., *Explosive welding of metals and its application*, Clarendon Press, 1982.
- [25] Davis J.R., *ASM Handbook: Volume 2: Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 10th edition, ASM International, S.I., 1990.
- [26] Dobrzański L.A., *Metaloznawstwo: z podstawami nauki o materiałach*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996.
- [27] Dyja H., Maranda A., Trebliński R., *Technologie wybuchowe w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, 2001.
- [28] Ferjutz K., Davis J.R., *ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering*, 10th ed., ASM International, 1993.
- [29] Findik F., Recent developments in explosive welding, *Materials & Design.* 32 (2011) 1081–1093.
- [30] Garrison E.G., *History of Engineering and Technology: Artful Methods*, 2 edition, CRC Press, Boca Raton, Fla, 1998.
- [31] Gómez C., Canales M., Calvo S., Rivera R., Valdés J.R., Núñez J.L., High and low cycle fatigue life estimation of welding steel under constant amplitude loading: Analysis of different multiaxial damage models and in-phase and out-of-phase loading effects, *International Journal of Fatigue.* 33 (2011) 578–587.
- [32] Hübel H., Ratcheting Phenomena, *Proceeding of 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.* (1993) 183–196.
- [33] Jiang F., Zhao K., Sun J., Evaluation of interfacial crack growth in bimaterial metallic joints loaded by symmetric three-point bending, *International Journal of Pressure Vessels and Piping.* 80 (2003) 129–137.
- [34] Kacar R., Acarer M., An investigation on the explosive cladding of 316L stainless steel-din-P355GH steel, *Journal of Materials Processing Technology.* 152 (2004) 91–96.
- [35] Kadowaki N.T., Martinez G.A.S., Robin A., Electrochemical behavior of three CP titanium dental implants in artificial saliva, *Materials Research.* 12 (2009) 363–366.
- [36] Karolczuk A., Modelowanie mikrostruktury i jej wpływu na zmęczeniowe właściwości metali, materiały konferencyjne: XXIII Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji Bydgoszcz - Pieczyska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Pieczyska, 2010, 189–198.
- [37] Karolczuk A., Symulacja efektu ratchetingu w bimetalu stal-tytan przy zastosowaniu modelu umocnienia materiału Chaboche’a, materiały konferencyjne: Nowe Kierunki Rozwoju Mechaniki, Jarnołtówek, 2013, 10.
- [38] Karolczuk A., Bański R., Analiza niejednorodności połączenia bimetalu stal-tytan otrzymanego metodą zgrzewania wybuchowego, materiały konferencyjne: XXVII Konferencja Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane, 2014.

- [39] Karolczuk A., Kluger K., Kowalski M., Żok F., Wpływ obróbki cieplnej na wartość naprężeń resztkowych w bimetalu stal-tytan wyznaczonych metodą nawiercania, materiały konferencyjne: XXVII Konferencja Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane, 2014.
- [40] Karolczuk A., Kluger K., Kowalski M., Żok F., Robak G., Residual Stresses in Steel-Titanium Composite Manufactured by Explosive Welding, *Materials Science Forum*. 726 (2012) 125–132.
- [41] Karolczuk A., Kowalski M., Próba cyklicznego rozciągania-ściskania bimetalu typu stal-tytan wykonanych w technologii zgrzewania wybuchowego, *Spajanie*. (2012) 50–52.
- [42] Karolczuk A., Kowalski M., Pomiar naprężeń szczątkowych oraz analiza naprężeń termicznych w bimetalu stal-tytan wykonanego w technologii zgrzewania wybuchowego, materiały konferencyjne: XXVI Konferencja Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych. Zakopane, 2013, 51–53.
- [43] Karolczuk A., Kowalski M., Structural and Fatigue Properties of Titanium-Steel Bimetallic Composite Obtained by Explosive Welding Technology, *Key Engineering Materials*. 592-593 (2013) 594–597.
- [44] Karolczuk A., Kowalski M., Residual stress determination based on the hole drilling method in explosively welded bimetallic composite, materiały konferencyjne: Third International Conference on Material Modelling, Warszawa, 2013, 140.
- [45] Karolczuk A., Kowalski M., Badania właściwości zmęczeniowych bimetalu stal S355K2-Tytan Grade 1, materiały konferencyjne: Nauka i Technika Wobec Wyzwania Budowy Elektrowni Jadrowej PTN/Mądralin 2013 Warszawa, 44–45.
- [46] Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Eksperymentalna identyfikacja procesów zmęczeniowych zachodzących w tytanie grade 1, materiały konferencyjne: XXVII Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane, 2014.
- [47] Karolczuk A., Kowalski M., Bański R., Żok F., Fatigue phenomena in explosively welded steel-titanium clad components subjected to push-pull loading, *International Journal of Fatigue*. 48 (2013) 101–108.
- [48] Karolczuk A., Kowalski M., Robak G., Modelling of Titanium-Steel Bimetallic Composite Behaviour under Mechanical Cyclic Loading, *Solid State Phenomena*. 199 (2013) 460–465.
- [49] Karolczuk A., Kowalski M., Żok F., Bański R., Badania zmęczeniowe bimetalu typu stal-tytan zgrzewanych metodą wybuchową próbie cyklicznego rozciągania-ściskania, *Inżynieria Materiałowa*. (2012) 160–164.
- [50] Kirby R.S., *Engineering in History*, Reprint edition, Dover Publications, New York, 1990.
- [51] Klesnil M., Lukác P., *Fatigue of Metallic Materials*, Volume 71, Second Edition, 2 edition, Elsevier Science, Amsterdam ; New York, 1992.
- [52] Kluger K., Łagoda T., Fatigue life of metallic material estimated according to selected models and load conditions, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 51 (2013) 581–592.
- [53] Kluger K., Łagoda T., New energy model for fatigue life determination under multiaxial loading with different mean values, *International Journal of Fatigue*. 66 (2014) 229–245.
- [54] Kocańda S., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, 1997.
- [55] Krehl P.O.K., *History of Shock Waves, Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [56] Kurek A., Niesłony A., Trwałość zmęczeniowa wybranego materiału bimetalicznego stosowanego w przemyśle energetycznym, *Energetyka*. nr 11 (2011) 689–691.



- [57] Kurek A., Niesłony A., Wpływ rodzaju charakterystyki zmęczeniowej na trwałość obliczeniową przy obciążeniu losowym, *Modelowanie Inżynierskie*. T. 10, nr 41 (2011) 221–228.
- [58] Kurek A., Niesłony A., Fatigue Life Tests of Explosively Cladded Steel-Titanium Bimetal, *Materials Science Forum*. 726 (2012) 106–109.
- [59] Kurek A., Niesłony A., Szulc Z., Uwzględnienie grubości materiału nakładanego plateru w projektowaniu aparatury procesowej wykonanej z materiałów platerowanych metodą wybuchową, *Przegląd Mechaniczny*. nr 12 (2013).
- [60] Lampman S.R., *ASM Handbook: Volume 19: Fatigue and Fracture*, ASM International, Materials Park, OH, 1997.
- [61] Lee Y.-L., Pan J., Hathaway R., Barkey M., *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*, 1 edition, Butterworth-Heinemann, Amsterdam ; Boston, 2004.
- [62] Lienert T.J., *Welding Fundamentals and Processes*, 1st ed., ASM International, 2011.
- [63] Manson S.S., Halford G.R., *Fatigue and durability of structural materials*, ASM International, 2006.
- [64] Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W., *Tytan i jego stopy*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [65] Miller K.J., Some Recent Advances in Metal Fatigue: Understanding the Two Thresholds of Fatigue Behaviour, *Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity*, Oxford, (1994) 321–331.
- [66] Murakami Y., Miller K.J., What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process, *International Journal of Fatigue*. 27 (2005) 991–1005.
- [67] Murr L., Staudhammer K.P., Meyers M.A., *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain Rate Phenomena*, 1 edition, CRC Press, New York, 1986.
- [68] Niesłony A., Wachowski A., Niesłony A., Płociński T., Kurzydłowski K.J., Testy zmęczeniowe i badania metalograficzne platerów stal-tytan, *Zeszyty Naukowe. Mechanika / Politechnika Opolska*. z. 101 (2013) 65–66.
- [69] Nunag P., Vun S.H., Atiya S., Pillai A., Kurdy N., Surgical tip: Titanium foam blocks can simplify fusion of failed total ankle replacements, *The Foot*. (2004) 111–115.
- [70] Ostroushko D., Mazancová E., Chosen properties of sandwich CrNi steel-Ti material after explosive cladding, *Conference Proceedings of 19th International Conference on Metal-Lurgy and Metals*, Metal. (2010).
- [71] Paul H., Faryna M., Prażmowski M., Bański R., Changes in the Bonding Zone of Explosively Welded Sheets, *Archives of Metallurgy and Materials*. 56 (2011) 463–474.
- [72] Paul H., Lityńska-Dobrzyńska L., Miszczyk M., Prażmowski M., Microstructure and phase transformations near the bonding zone of al/cu clad manufactured by explosive welding, *Archives of Metallurgy and Materials*. Vol. 57, iss. 4 (2012) 1151–1162.
- [73] Pearson J., Metal working with explosives, *Journal of Metals*. 12 (1969) 673–681.
- [74] Prażmowski M., Technologia łączenia materiałów z wykorzystaniem energii wybuchu na przykładzie bimetalu Cu-Al, in: *Nauka I Praktyka – Staże Zawodowe W Przedsiębiorstwach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2009: pp. 51–59.
- [75] Prażmowski M., Paul H., Rozumek D., Marcisz E., Influence of the Microstructure near the Interface on the Fatigue Life of Explosively Welded (Carbon Steel)/Zr Clads, *Key Engineering Materials*. 592-593 (2013) 704–707.

- [76] Prażmowski M., Paul H., Żok F., Wpływ obróbki cieplnej na własności oraz strukturę bimetalu cyrkon/(stal węglowa) wykonanego technologią zgrzewania wybuchowego, *Rudy i Metale Nieżelazne*. R. 58, nr 11 (2013).
- [77] Prażmowski M., Rozumek D., Badania zmęczeniowe próbek płaskich przy zginaniu bimetalu cyrkon-stal, *Przegląd Mechaniczny*. nr 11 (2013).
- [78] Pun C.L., Kan Q., Mutton P.J., Kang G., Yan W., Ratcheting behaviour of high strength rail steels under bi-axial compression–torsion loadings: Experiment and simulation, *International Journal of Fatigue*. 66 (2014) 138–154.
- [79] Raghukandan K., Analysis of the explosive cladding of cu–low carbon steel plates, *Journal of Materials Processing Technology*. 139 (2003) 573–577.
- [80] Rinehart J. S.P., *Explosive Working of Metals*, Pergamon Press, 1963.
- [81] Rozumek D., Bański R., Crack growth rate under cyclic bending in the explosively welded steel/titanium bimetal, *Materials & Design*. 38 (2012) 139–146.
- [82] Schijve J., *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd edition, Springer, New York, 2008.
- [83] Sedighi M., Honarpisheh M., Experimental study of through-depth residual stress in explosive welded Al–Cu–Al multilayer, *Materials & Design*. 37 (2012) 577–581.
- [84] Semiati S.L., *ASM Handbook: Volume 14B: Metal Working: Sheet Forming*, ASM International, 2006.
- [85] Sonsino C.M., Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety, *International Journal of Fatigue*. 29 (2007) 2246–2258.
- [86] Suresh S., *Fatigue of Materials (Cambridge Solid State Science Series) Second Edition*, 2 edition, Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1998.
- [87] Totten G.E., Howes M.A.H., Inoue T., *Handbook of residual stress and deformation of steel*, ASM International, Materials Park, OH, 2002.
- [88] Varvani-Farahani A., Fatigue–ratcheting damage assessment of steel samples under asymmetric multiaxial stress cycles, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. (2014) w druku, dostępne on–line.
- [89] Vishay Precision Grop, *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*, (2010).
- [90] Voort G.F.V., *ASM Handbook: Volume 9: Metallography And Microstructures*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004.
- [91] Walczak W., Wzdłużno-doczłowe zgrzewanie wybuchowe blach z metali jedno- i różnoimiennych, *Zeszyty Naukowe. Mechanika / Akademia Techniczno-Rolnicza W Bydgoszczy*. Z. 43 (216) (1998) 47–56.
- [92] Walczak W., Zgrzewanie wybuchowe metali - Stan obecny i perspektywy badań oraz zastosowań krajowych., *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa W Gliwicach*. R. 45, nr 5 (2001) 48–51.
- [93] Walczak W., Zgrzewanie wybuchowe metali i jego niektóre zastosowania, *Zeszyty Naukowe. Mechanika / Akademia Techniczno-Rolnicza W Bydgoszczy*. Z. 51(237) (2002) 15–22.
- [94] Walczak Z., *Zgrzewanie wybuchowe*, Wyd. Naukowo Techniczne, 1989.
- [95] Y. Wang, H.G. Beom, M. Sun, S. Lin, Numerical simulation of explosive welding using the material point method, *International Journal of Impact Engineering*. 38 (2011) 51–60.
- [96] Young G., *Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History*, *Stainless Steel World*. (2004) 6.
- [97] Young G., *Welding, Technical Growth and Commercial History*, *Stainless Steel World*. (2004) 6.

- 
- [98] DIN 50162 Testing of clad steels; determination of shear strength between cladding metal and parent metal in shear test, (1978).
- [99] ASME B31.1-2001, Power piping, American Society of Mechanical Engineers, 2001.
- [100] ASTM A263 - 12 Specification for Stainless Chromium Steel-Clad Plate, ASTM International, 2003.
- [101] PN-EN 10020:2002 Definicja i klasyfikacja gatunków stali, Polski Komitet Normalizacyjny, 2003.
- [102] ASTM B432 - 09a Specification for Copper and Copper Alloy Clad Steel Plate, ASTM International, 2004.
- [103] PN-EN 10002-1:2004 Metale - Próba rozciągania Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia, Polski Komitet Normalizacyjny, 2004.
- [104] ASTM B898 Specification for Reactive and Refractory Metal Clad Plate, ASTM International, 2005.
- [105] PN-EN 10025-2:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych, Polski Komitet Normalizacyjny, 2007.
- [106] ASTM E837-08 Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain gauge method, (2008).
- [107] PN-EN 45020:2009, Normalizacja i dziedziny związane -Terminologia ogólna, Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [108] PN-EN 13445-2:2009, Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe - Część 2: Materiały, Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [109] ASTM E8 / E8M - 13a Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2013.
- [110] ASTM B265 Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate, ASTM International, 2013.
- [111] ASTM D3165 Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies, ASTM International, 2014.