

Silesian University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Fundamentals of Machinery Design

Doctoral Dissertation

**MANUFACTURING PROCESS
DIAGNOSTICS AND DAMAGE
ASSESSMENT OF HSLA STEEL
BUTT-WELDED PIPELINES**

MSc., Eng., Massimiliano Pedot

Supervisor

Dr hab. inż. Prof. PŚ Anna Timofiejczuk

Gliwice, 2022

MANUFACTURING PROCESS DIAGNOSTICS AND DAMAGE ASSESSMENT OF HSLA STEEL BUTT-WELDED PIPELINES

Odporność to termin, który ostatnio jest szeroko stosowany w różnych kontekstach, określając zdolność systemu do stawienia czoła trudnym zdarzeniom i zjawiskom, na przykład wstrząsom czy odzyskaniu pierwotnego stanu. Znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, np. w medycynie, materiałoznawstwie, naukach o środowisku i ekonomii i opisuje zdolność systemu, poddanego zewnętrznym zaburzeniom, do stawienia im oporu i powrotu do stanu wyjściowego lub stanu uznawanego za właściwy. Głównym celem tej pracy jest zastosowanie tej ogólnej koncepcji do konkretnych przypadków z praktycznymi zastosowaniami w dziedzinie badań inżynierskich. Szczególnie interesujące są tak zwane wypadki "Natech", które są skutkami wtórnymi wynikającymi z zagrożeń naturalnych dla infrastruktury i złożonych systemów przemysłowych, powodując m.in. pożary, wybuchy oraz emisje toksyczne lub radioaktywne. Badania opisane w pracy koncentrują się w szczególności na rurach spawanych doczołowo ze stali o wysokiej wytrzymałości. Systemy rurociągów są kluczowymi elementami zakładów petrochemicznych i rafineryjnych. Typowa instalacja obejmuje zbiorniki zasobnikowe i kompletne połączenie rur liniowych, kolanek, kształtek rurowych i elementów pomocniczych, takich jak pompy, wymienniki ciepła i zawory. Wszystkie te elementy są połączone ze sobą za pomocą połączeń kołnierzowo-śrubowych lub doczołowych. Takie konstrukcje służą do transportu ropy, gazu i innych substancji łatwopalnych. Sytuacja ta wymaga ciągłej i starannej oceny stanu systemów rurociągów przez cały okres ich użytkowania, ponieważ wyciek zawartości może prowadzić do wybuchów. Jednym z możliwych źródeł ryzyka może być niska jakość produkcji połączeń. Eksperymenty i obserwacje zostały przeprowadzone w celu oceny ich właściwości mechanicznych i odporności podczas katastrof.

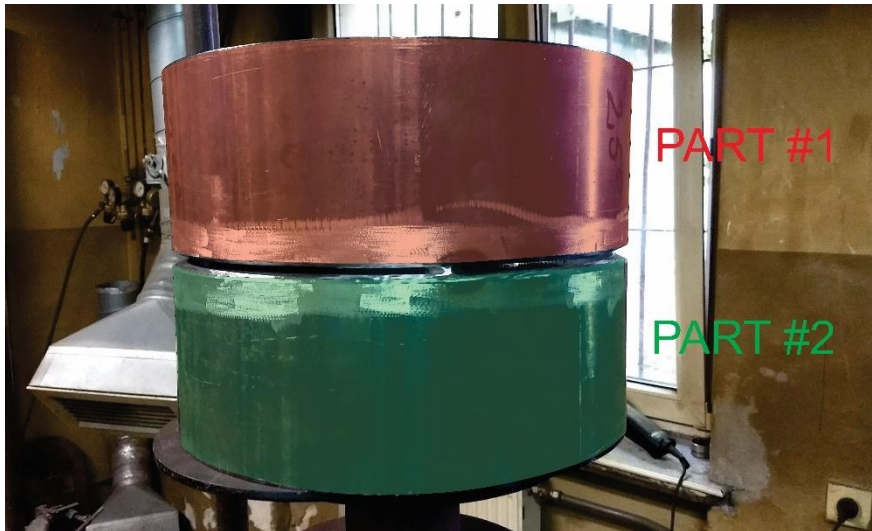
W złożonych systemach rurociągów konieczne jest połączenie ze sobą wielu odcinków rur, odgałęzień i armatury, co pozwala na spełnienie wymagań serwisowych i bezpieczeństwa instalacji. Istnieją głównie dwie możliwości połączenia dwóch elementów systemu rurowego: połączenia doczołowe i połączenia kołnierzowo-śrubowe. Pierwsza metoda to trwałe połączenie bezpośrednio między końcowymi powierzchniami, które są odpowiednio przygotowane, a następnie połączone ze sobą za pomocą zewnętrznego źródła ciepła, które topi część materiału. Druga metoda to połączenia kołnierzowo-śrubowe, które są połączeniami nietrwałymi łączącymi powierzchnie gładkie dwóch kołnierzy za pomocą zmiennej ilości śrub. Tylne części każdego kołnierza jest na ogół spawana doczołowo z końcem rury. Właściwości uszczelniające połączenia są wówczas wymagane do uszczelki umieszczonej między dwiema sąsiednimi powierzchniami kołnierzy. Nowoczesne

podejście do projektowania złożonych struktur obejmuje koncepcję odporności, która zakłada zdolność do uniknięcia katastrofy lub poważnego zakłócenia, przewidywania i obchodzenia zagrożeń oraz, w razie potrzeby, szybkiej regeneracji po katastrofalnym zdarzeniu. W tym sensie niezbędne jest przyjęcie specjalnych procesów produkcyjnych, a także wybór odpowiedniego materiału. Rury stalowe HSLA dla zakładów petrochemicznych można postrzegać jako zastosowanie wyżej wymienionych koncepcji do rzeczywistego scenariusza. Nie istnieje precyzyjna definicja stali niskostopowych o wysokiej wytrzymałości, ale powszechnie można je odpowiednio określić jako stale niskowęglowe o granicy plastyczności powyżej 275 MPa i składzie z niewielkimi ilościami pierwiastków stopowych (takich jak Ti, Cu, V, Nb itp.) w celu uzyskania dobrego połączenia wytrzymałości, twardości i spawalności.

Badanie rur spawanych doczołowo ze stali o wysokiej wytrzymałości przebiegało w czterech odrębnych kierunkach:

- badanie procesu produkcyjnego i warunków połączeń doczołowych
- ocena wpływu niedoskonałości na zachowanie mechaniczne konstrukcji i połączeń rurociągów
- zachowanie się rur w skali rzeczywistej podczas próby obciążenia udarowego
- metody wykrywania wad wewnątrz połączeń doczołowych konstrukcji rurociągów

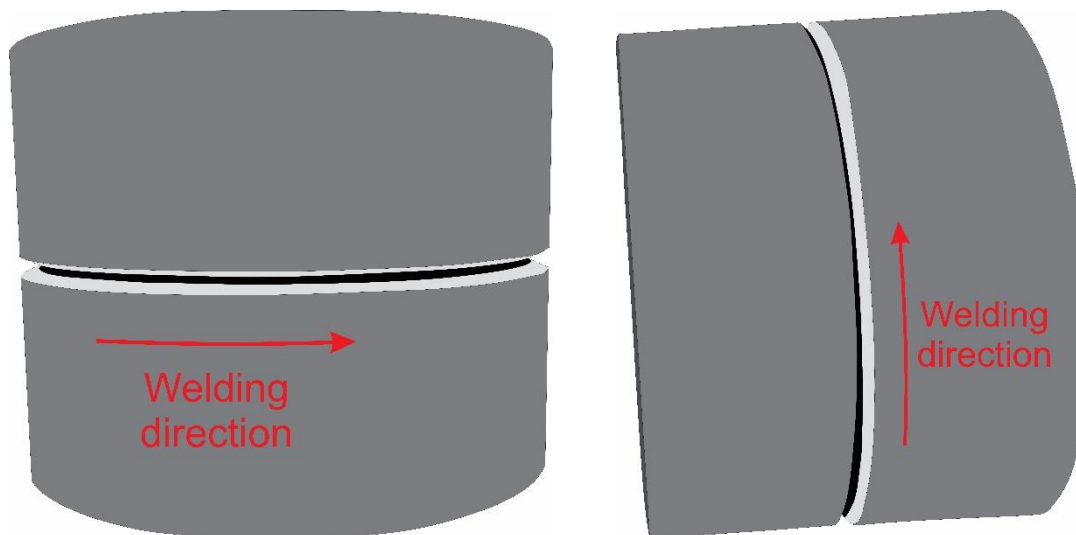
Do tych badań wybrano jedną rurę gatunku API-5L X80 o średnicy 12" ^{3/4} (323,9 mm) i grubości ścianki 10 mm. Certyfikat od producenta, uzyskany z próby rozciągania na 5 różnych próbkach, podaje minimalną wartość 615 MPa i maksymalną 634 MPa dla granicy plastyczności $R_{t0,5}$ oraz minimalną 679 MPa i maksymalną 699 MPa dla wytrzymałości na rozciąganie R_m . Do przeprowadzenia eksperymentów rurę pocięto na segmenty o długości około 20-25 cm w celu przygotowania odpowiednich próbek z dwóch złączonych ze sobą kawałków.



RYSUNEK 1: PRZYKŁAD DWÓCH ODCINKÓW RURY O DŁUGOŚCI 10 M PRZED WYKONANIEM BADANIA

Podczas pierwszego etapu badań wyprodukowano dwie różne grupy próbek rur spawanych doczołowo: pierwsza grupa obejmuje próbki rur z indukowanymi niedoskonałościami wewnątrz połączeń spawanych doczołowo, podczas gdy druga grupa zawiera próbki rur o optymalnym poziomie jakości połączeń spawanych.

Wykonanie pierwszej grupy próbek rur z indukowanymi niedoskonałościami wewnątrz złącza zgrzewanego doczołowo wykonano w Mostostalu Zabrze SA. Wszystkie segmenty rur zostały ukosowane, na ogół pod kątem 25 lub 30 stopni, a następnie zaciśnięte razem, gotowe do zespawania przy użyciu różnych technologii spawania: spawania łukowego w osłonie gazowej elektrodą topliwą (GMA), spawania łukowego elektrodą otuloną (MMA) i samo ekranowego spawania drutem rdzeniowym topnikowym (SSW). Do przeprowadzenia eksperymentów, na tym etapie wyprodukowano dwanaście rur ze złączami spawanymi doczołowo, po cztery próbki dla każdej wyżej wymienionej technologii spawania. Cztery próbki wyprodukowane dla każdej technologii spawania miały różne konfiguracje, aby w jak największym stopniu oddać rzeczywiste warunki procesu: dwie z nich zostały wykonane przy użyciu poziomej pozycji spawania (PC), podczas gdy pozostałe dwie przy zastosowaniu pionowej pozycji spawania (PH).



RYSUNEK 2: POZIOMA POZYCJA SPAWANIA (PC) PO LEWEJ I PIONOWA POZYCJA SPAWANIA (PH) PO PRAWIEJ

ID próbki	Technologia spawania	Pozycja spawania	Pozycja niedoskonałości
GMA1	Gazowy łuk metalowy	Poziomo (PC)	Root pass
GMA2	Gazowy łuk metalowy	Poziomo (PC)	Przejście nasadki/wlewu
GMA3	Gazowy łuk metalowy	Pionowe (PH)	Root pass
GMA4	Gazowy łuk metalowy	Pionowe (PH)	Przejście nasadki/wlewu
MMA1	Ręczny łuk metalowy	Pionowe (PH)	Root pass
MMA2	Ręczny łuk metalowy	Pionowe (PH)	Przejście nasadki/wlewu
MMA3	Ręczny łuk metalowy	Poziomo (PC)	Root pass
MMA4	Ręczny łuk metalowy	Poziomo (PC)	Przejście nasadki/wlewu
SSA1	Drut samoekranowany	Poziomo (PC)	Root pass
SSA2	Drut samoekranowany	Poziomo (PC)	Przejście nasadki/wlewu
SSA3	Drut samoekranowany	Pionowe (PH)	Root pass
SSA4	Drut samoekranowany	Pionowe (PH)	Przejście nasadki/wlewu

TABELA 1: PODSUMOWANIE WYPRODUKOWANYCH PRÓBEK RUR

Przed procesem spawania każda z dwunastu próbek rur została oznaczona w przybliżeniu na 8-9 różnych segmentów wzdłuż obwodu. Dla każdego z segmentów zastosowano różne parametry spawania, tj. napięcie, prąd, gaz osłonowy, starając się stworzyć odpowiednie warunki do powstania niedoskonałości.

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.) poświęcona była przygotowaniu dodatkowych próbek rur ze złączami spawanymi doczołowo o optymalnym poziomie akceptacji jakości, które następnie poddano testowi obciążenia uderowego. Cztery rury zostały wyprodukowane przy użyciu tych samych technologii spawania, co w poprzednim etapie badania, tj. GMA, MMA i SSA (rysunek

65). Wyprodukowano dodatkową próbkę rury przy użyciu hybrydowej technologii spawania. Metoda ta składa się z dwóch etapów procesu spawania: pierwsze przejście złącza spawanego doczołowo jest wytwarzane przy użyciu technologii spawania laserowego, a następnie przechodzi przez technologię spawania łukiem gazowo-metalowym. Przed rozpoczęciem procesu spawania laserowego konieczna była ocena najlepszych parametrów eksploatacyjnych w celu prawidłowego i bezbłędnego przebiegu pierwszego etapu. Ocena jakości różnych próbek testowych, w oparciu o penetrację spoiny i jakość spawanego metalu, pozwoliła na dobór prawidłowego zestawu parametrów spawania (moc, prędkość posuwu i położenie ogniska).

Testowanie konfiguracji spawania laserowego			
System dostarczania światłowodu: 300 μ m			
Zasięg ostrości 300 mm			
Wymiary belki: 0,45 mm			
Gaz osłonowy: Ar 10-12 l/min			
Numer konfiguracji	Moc [W]	Prędkość jazdy [m/min]	Pozycja ostrości [mm]
25	5000	2,0	0

Kolejnym etapem działania eksperymentalnego był przegląd pierwszej grupy rur ze złączami spawanymi doczołowo w celu oceny jakości połączenia i wykrycia ewentualnych niedoskonałości. Przeprowadzono oględziny i badania radiograficzne pozwalające określić rodzaj, wielkość i dokładne położenie niedoskonałości. Wszystkie próbki rur zostały przetestowane wzdłuż obwodu złącza spawanego. Badania radiograficzne wykonano również w laboratoriach w Mostostalu Zabrze zgodnie z zaleceniami normy ISO 17636-1, a wady zostały sklasyfikowane zgodnie z normą ISO 6520-1:2007. Testy przeprowadzono przy użyciu przenośnego aparatu rentgenowskiego z głowicą gazową o energii promieniowania ustawionej na 190 kV i natężeniu prądu 13 mAmin. Przyjęto ustawienie ekspozycji pojedynczej ściany z odległością celu do kliszy wynoszącą 450 mm.

Po ocenie jakości połączeń spawanych rury zostały poddane testom niszczącym mającym na celu ustalenie, czy są w stanie wytrzymać ekstremalne obciążenia typowe dla zdarzeń NaTech. Test mechaniczny zastosowany do tych dwóch grup rur był różny. W przypadku pierwszej grupy rury zostały pocięte na sekcje wraz z wadami wykrytymi za pomocą analizy radiograficznej, które następnie poddano próbom rozciągania i zginania. W przypadku drugiej grupy próbki poddano próbie obciążenia uderowego.

Zaleca się, aby próbki do prób rozciągania miały kształt kości psa, podczas gdy próbki niezbędne do próby zginania muszą mieć kształt prostokąta o szerokości 30 mm i taką samą długość jak próbki do rozciągania. W przypadku niektórych konkretnych próbek uszkodzenie zaobserwowano na

spawanym materiale: na próbce oznaczonej 4_G2 podczas próby zginania, natomiast na próbkach 2_G3, 3_G3 i 9_M1 podczas próby rozciągania.

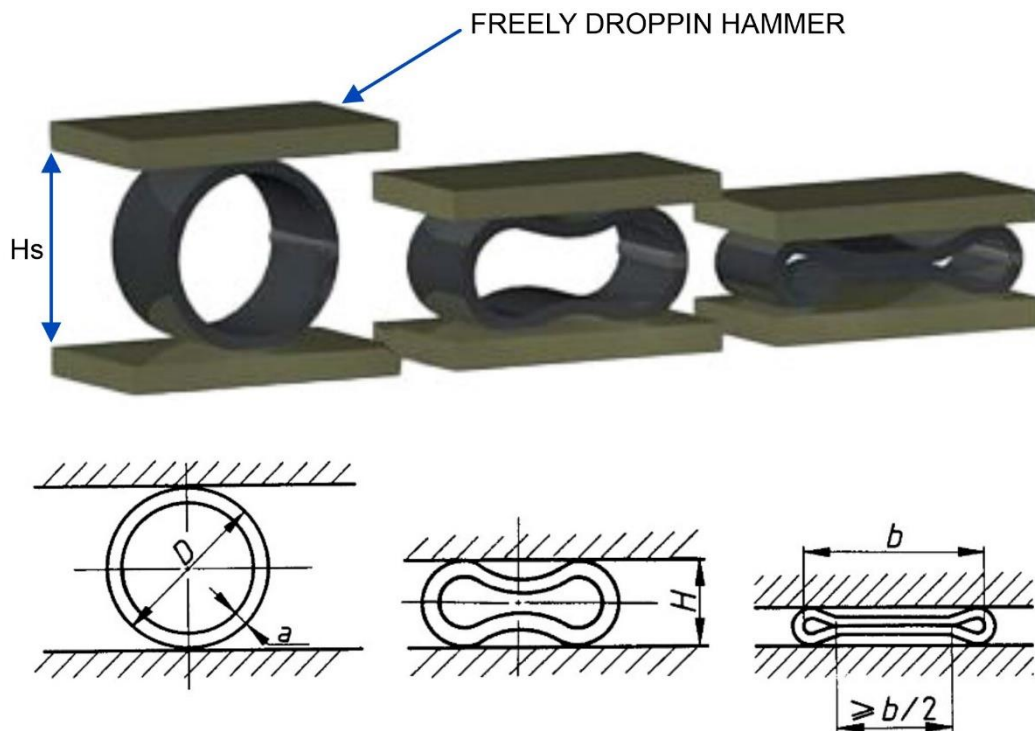


RYSUNEK 3: USZKODZENIE PRÓBKII 4_G2



WYKRES 93: USZKODZENIE PRÓBEK 2_G3, 3_G3 I 9_M1

Druga grupa rur została poddana pełnowymiarowej próbie obciążenia uderowego. Celem tych eksperymentów była symulacja katastrofalnego wpływu pobliskiej zapadającej się struktury na system rurociągów. Badania rur ze złączami spawanymi doczołowo GMA, MMA, SSA oraz laser+GMA przeprowadzono w fabryce KUŹNIA ŁABĘDY S.A. przy użyciu młota do kucia matrycowego SKM-3T o masie spadku swobodnego 3000 kg. Swobodnie opadający młot został umieszczony na różnej wysokości początkowej H_s (mierzonej od dolnego plateru) w celu uzyskania różnych poziomów spłaszczenia wyrażonych parametrami H (częściowe spłaszczenie) i b (całkowite spłaszczenie).



RYSUNEK 5: KONFIGURACJA PRÓBY OBCIĄŻENIA UDAROWEGO [70]

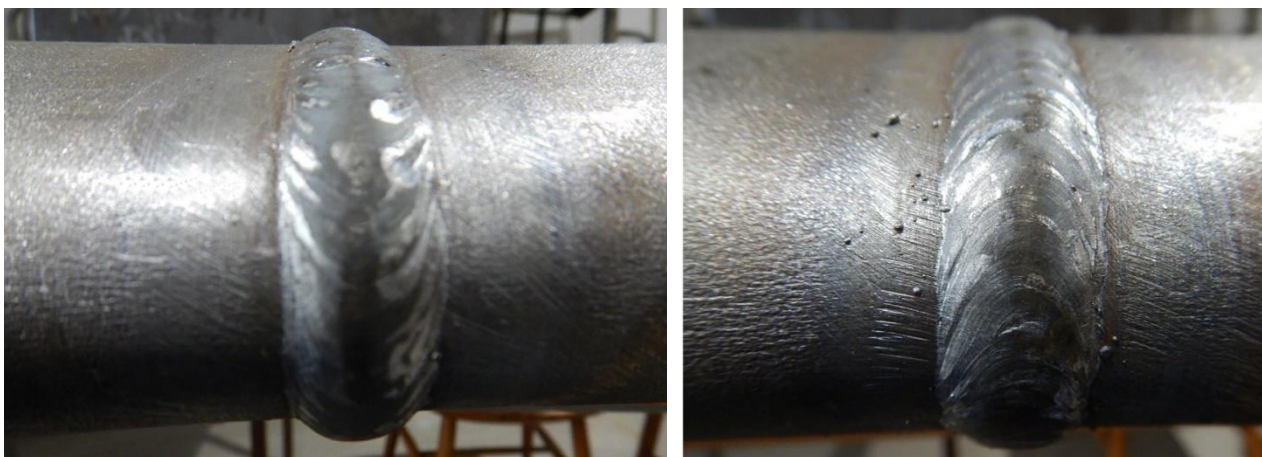
Wstępne próby obciążenia udarowego przeprowadzono przy użyciu czterech rur – po jednej próbce dla każdej technologii spawania. Początkowe położenie H_s górnej płyty ustalono na wysokości 1 metra. Oczekiwanym rezultatem, jak sugerowały symulacje numeryczne, miało być częściowe spłaszczenie rury. Rzeczywiste wyniki testu obciążenia wykazały dokładnie ten efekt.

PRÓBKA RURY GMA



H_1 [mm]	B_1 [mm]
75	466

TABELA 2: PARAMETRY SPŁASZCZANIA PRÓBEK RURY GMA



RYSUNEK 6: WPLYW PRÓBY OBCIĄŻENIA UDAROWEGO NA PRÓBKĘ RURY GMA (1 M)

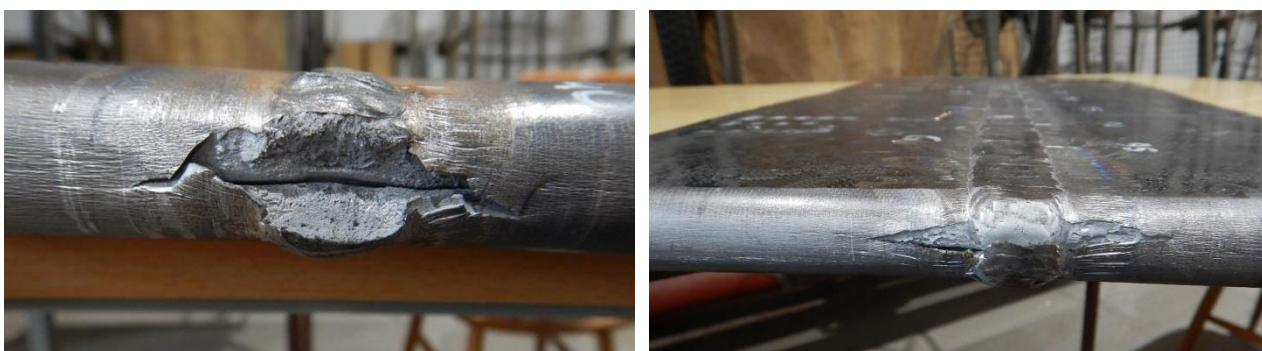
Ostatnią próbkę rury MMA poddano następnie całkowitemu spłaszczeniu, umieszczając młot kuźniczy na początkowej wysokości 1,5 metra.

PRÓBKA RURY MMA



H_1 [mm]	B_1 [mm]
20	485

TABELA 3: PARAMETRY SPŁASZCZANIA PRÓBEK RURY MMA

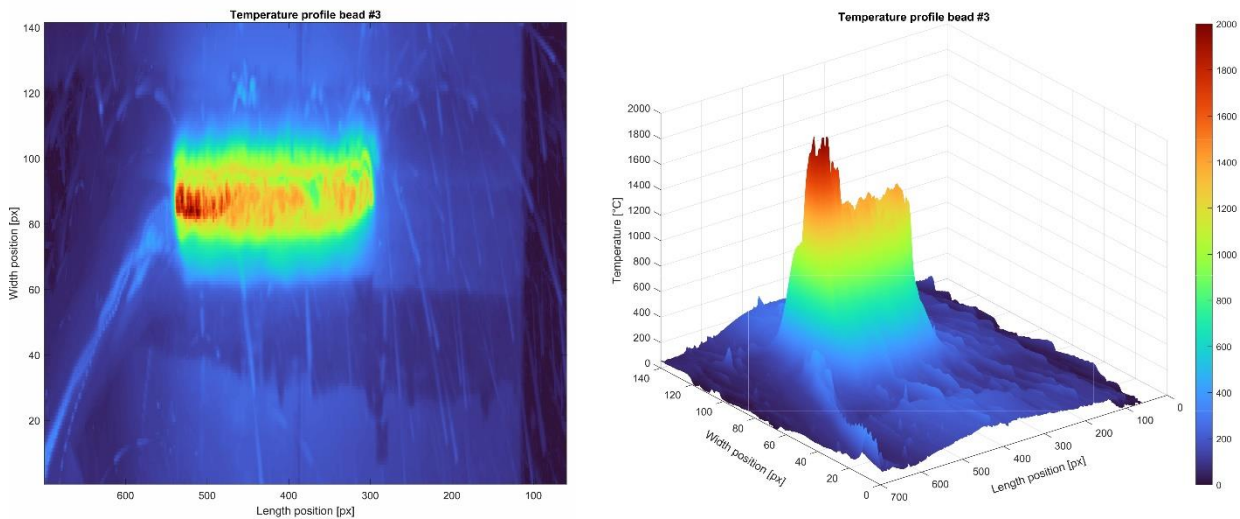


RYSUNEK 7: WPLYW PRÓBY OBCIĄŻENIA UDAROWEGO NA PRÓBKĘ RURY MMA (1,5 M)

Cały proces polegający na wytwarzaniu próbek rur ze złączami spawanymi doczołowo z indukowanymi wadami był monitorowany za pomocą kamery termowizyjnej rejestrującej temperaturę jeziora spawalniczego oraz urządzenia rejestrującego prąd spawania i napięcie łuku.

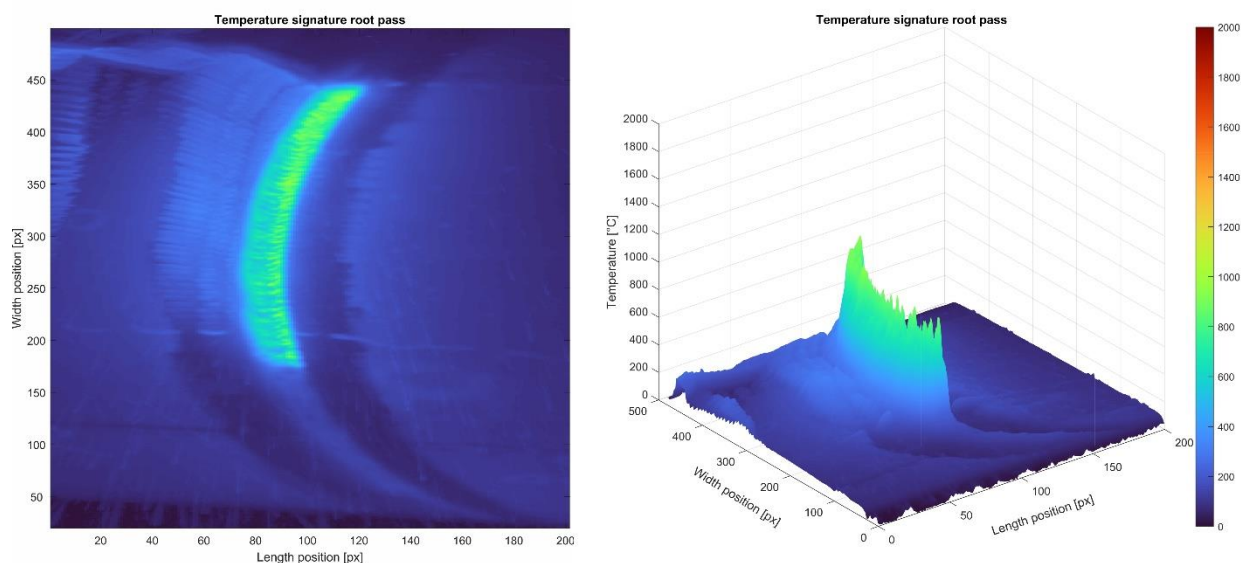
Pomysł polegał na zapewnieniu pełnego przeglądu warunków krytycznych, które są związane z rozwojem niedoskonałości wewnątrz spawanego materiału.

Zaobserwowano, że próbka 4_G2, znajdująca się wewnątrz segmentu nr 3, uległa uszkodzeniu złącza spawanego podczas próby zginania. Wykryta wada została sklasyfikowana jako porowatość. Profile temperatury przedstawiają maksymalną temperaturę osiąganą przez stopiony materiał jeziorka spawalniczego w każdym pojedynczym punkcie wzdłuż monitorowanego odcinka złącza.



RYSUNEK 8: PROFILE TEMPERATURY

Próbki 2_G3 i 3_G3 uległy zniszczeniu złącza spawanego podczas próby rozciągania: próbki te znajdowały się 43 i 50 cm wzdłuż obwodu rury na segmencie numer cztery. W przypadku obu próbek rodzaj wykrytej wady charakteryzował się dużym brakiem penetracji w pierwszym przejściu. Maksymalna temperatura osiąganą przez jeziorco spawalnicze w obszarze, który obejmuje brak wady penetracji, mieści się w przybliżeniu w zakresie od 600 do 800 °C.



RYSUNEK 9: TEMPERATURA PROFILU SEGMENTU 4 W PIERWSZYM PRZEJĘCIU

Działanie to wykazało spójność wyboru rur ze stal wysokoodpornej X80 do instalacji petrochemicznych i przemysłowych pod względem procesu produkcyjnego i odporności na ekstremalne obciążenia. Szczególnym przedmiotem analizy były złącza spawane doczołowo stosowane do łączenia dwóch oddzielnych odcinków rur, a ich zachowanie badano zarówno pod obciążeniem quasi-statycznym, jak i dynamicznym. W pierwszym przypadku, pracując na próbkach pobranych z rur o poziomie akceptacji jakości poniżej B+, zaobserwowano uszkodzenie połączenia tylko w niektórych szczególnych przypadkach, gdzie wykryto poważne niedoskonałości wewnątrz spawanego materiału. Przetestowano wiele próbek z różnego rodzaju defektami i tylko w 3 z 96 próbek stwierdzono uszkodzenie spawanego metalu przed materiałem rodzimym. Te 3 próbki charakteryzowały się wyraźnie widocznym brakiem wady penetracyjnej. Dlatego też konieczne jest kontrolowanie i unikanie rozwoju tego rodzaju niedoskonałości wewnątrz złącza spawanego. Kontrolę tę można uzyskać przy użyciu techniki termograficznej jako nieniszczącej metody oceny jakości. Wykazano, że analizując profil termiczny temperatury jeziora spawalniczego zarejestrowanej podczas procesu spawania można przewidzieć rozwój nie tylko braku penetracji, ale także innych kategorii defektów. Informacje te mogłyby posłużyć do opracowania automatycznej metody wykrywania niedoskonałości w oparciu o pomiar temperatury jeziora spawalniczego podczas tego samego procesu produkcyjnego. W przypadku próby obciążenia dynamicznego wykazano, że dla każdej przyjętej technologii spawania, próba obciążenia udarowego powodująca poważne częściowe spłaszczenie rury, nie spowodowała uszkodzenia samej rury ani złącza spawanego. Dopiero po poddaniu do całkowitego spłaszczenia zaobserwowano pojawienie się poprzecznych pęknięć na zewnętrznej powierzchni rury. Szeroko zakrojone prace nad produkcją

różnych konfiguracji próbek rur i różnymi obciążeniami przykładanymi do części lub całych odcinków rur stalowych klasy X80 wykazały obiecujące wyniki pod względem odporności na ekstremalne obciążenia, co sugeruje możliwe zastosowanie w infrastrukturze krytycznej.