

Kazimierz BANYŚ¹
Zbigniew MIRSKI²
Zbigniew FAŁEK³

TECHNOLOGIA NAPRAWY SPAWANYCH USTROJÓW NOŚNYCH DŹWIGNIC

Opracowanie przedstawia w sposób syntetyczny problematykę związaną z analityczną oceną spawalności stali konstrukcyjnych oraz wpływem temperatury procesu spawania na właściwości złącza w procesie regeneracji ustrojów nośnych dźwignic. Zamieszczono również podstawowe dane, niezbędne do opracowania technologii spawania w procesach naprawczych tych ustrojów. Na przykładzie naprawy wysięgnika koparki zilustrowano wpływ zastosowanej metody naprawczej na jego żywotność eksploacyjną.

1. WPROWADZENIE

W wyniku wieloletniej eksploatacji ustrojów nośnych dźwignic, w których głównymi elementami konstrukcyjnymi są blachownice, dźwigary blachownicowe i skrzynkowe, następuje w różnym nasileniu proces zmęczenia zastosowanych materiałów. Zmęczenie może objawiać się trwałymi odkształceniami przekrojów dźwigarów jak również lokalnymi pęknięciami zmęczeniowymi pasów i środków. Pęknięcia zmniejszają czynny przekrój tych elementów aż do wyczerpania się zapasu wytrzymałości, co powoduje zniszczenie ustroju. Pociąga to za sobą konieczność wyłączenia maszyny z dalszej eksploatacji i poddania jej procesowi naprawczemu.

W praktyce spotyka się przypadki wykonywania napraw ustrojów nośnych dźwignic bez należytego przygotowania procesu spawalniczego. W efekcie po kilku, a najwyżej kilkunastu miesiącach problem powraca.

Systemowe rozwiązanie technologii naprawy ustrojów nośnych ma duże znaczenie, gdyż poprawnie wykonana naprawa, z reguły w 100% przywraca pierwotną funkcję maszyny.

¹ Przedsiębiorstwem Badawczo Wdrożeniowe Insmaszbud we Wrocławiu,

² Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechnika Wrocławska,

³ Biuro Projektowo-Badawcze MIFA-Projekt, Oława.

2. OCENA SPAWALNOŚCI STALI STOSOWANYCH NA USTROJE NOŚNE

Spawane ustroje nośne wykonywane są przede wszystkim ze stali konstrukcyjnych niestopowych. Spawalność tych stali uwarunkowana jest przede wszystkim:

- stopniem uspokojenia w procesie metalurgicznym,
- odpornością na starzenie,
- granicą wytrzymałości na rozciąganie [MPa],
- zawartością węgla [% wag.],
- równoważnikiem węgla [%],
- grubością spawanych elementów [mm],
- temperaturą otoczenia podczas spawania [°C].

Badania Międzynarodowego Instytutu Spawalniczego wykazały, że specjalne środki ostrożności podczas spawania na ogół nie są konieczne, jeżeli spawana stal spełnia następujące warunki [2]:

- wytrzymałość na rozciąganie $R_m \leq 510\text{MPa}$,
- zawartość węgla $C \leq 0,25\%$,
- równoważnik węgla $C_E \leq 0,41\%$,
- grubość spawanych elementów $s \leq 37\text{ mm}$.

Równoważnik węgla jest obliczany ze wzoru (1) [2]:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + 0,03 \text{ [%]} \quad (1)$$

(stała 0,03 uwzględnienia pozostałe pierwiastki pochodzące z wytopu).

Stale tego typu można spawać, stosując szeroki zakres parametrów, w temperaturze poniżej 0°C, a ich grubość nie ma praktycznie znaczenia. Podgrzewanie strefy złącza zaleca się jedynie w elementach o grubości powyżej 50mm, spawanych w temperaturze poniżej 0°C, z wprowadzeniem małej ilości ciepła (np. przy spoinach szczepnych).

Odporność stali na starzenie zapewnia dodatek aluminium podczas wytopu, który wiąże azot (0,02% Al w stali gwarantuje całkowite związanie azotu w sposób trwały, tworząc azotki AlN) oraz jest bardzo dobrym odtleniaczem.

Problemy spawalności związane z powstawaniem pęknięć gorących oraz kruchych mogą pojawić się przy spawaniu stali nieuspokojonych.

Skłonność stali nieuspokojonych do pęknięcia kruchego powodowana jest starzeniem w SWC (strefa wpływu ciepła) po odkształceniu. Starzenie wpływa na obniżenie właściwości plastycznych i wzrost kruchości stali. Proces spawania jeszcze bardziej potęguje to zjawisko, ponieważ w połączeniach spawanych starzenie może powodować sam zgniot oraz wpływ temperatury występujący łącznie ze zgniotem.

Intensywność starzenia uwarunkowana jest obecnością azotu związanego z żelazem lub występującego w roztworze stałym w żelazie. Obecność azotu w stali nawet w ilości 0,01‰ powoduje starzenie. Pęknięcia kruche intensyfikowane są dodatkowo wzrostem grubości spawanego materiału. Wyroby spawane ze stali podatnych na starzenie należy normalizować (wyżarzanie normalizujące eliminuje skutki starzenia).

Twardość złączy spawanych w stalach niestopowych spełniających warunki: $R_m \leq 510 \text{ MPa}$, $C \leq 0,25\% \text{ wag.}$, $C_E \leq 0,41\%$, nie przekracza wartości 350 HV10 (przy obciążeniu 98,1N – pomiar w skali twardości Vickersa wg normy PN-EN 1043-1:2000 [6]). Dla tej wartości HV zmiany strukturalne w złączu nie wpływają nadmiernie na zmianę właściwości mechanicznych.

Przekroczenie tych parametrów spowoduje wzrost twardości złączy spawanych powyżej wartości dopuszczalnej. W celu niedopuszczenia do nadmiernego utwardzenia się złącza, należy:

- proces spawania przeprowadzić po wstępnym podgrzaniu,
- zastosować taką technologię i parametry spawania, które zapewnią dostateczną ilość ciepła do utworzenia połączenia spawanego o poprawnej geometrii.

W uzasadnionych przypadkach mogą mieć zastosowane obydwa sposoby równocześnie. Wartość temperatury podgrzewania strefy złącza lub całego elementu przed spawaniem, wyznacza się na podstawie normy PN-EN 1011-2:2004 [4].

Przy zastosowaniu do spawania stali procesu niskowodorowego (podczas spawania odpowiednio wysuszonymi elektrodami zasadowymi lub w osłonie gazowej, zawartość wodoru w stopiwie nie przekracza 5ml/100g) oraz w temperaturze otoczenia powyżej 0°C, wartość temperatury podgrzewania można wyznaczyć metodą Seferiana, wg zależności (2) [3]:

$$T_p = 350 \sqrt{C_E - 0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

Ilość wprowadzonego ciepła przy spawaniu wpływa na cykle spawalnicze temperatura – czas. Bez podgrzewania wstępnego dostateczną ilość ciepła można dostarczyć do strefy złącza poprzez odpowiednie sterowanie parametrami procesu spawania tj. efektywną mocą łuku i prędkością spawania. Ilość wprowadzonego ciepła na jednostkę długości złącza oblicza się wg zależności (3) [5]:

$$Q = k \frac{UI}{v} 10^{-3} \text{ [kJ/mm]} \quad (3)$$

Oznaczenia:

Q – ciepło wprowadzone [kJ/mm],

U – napięcie łuku [V],

I – natężenie prądu spawania [A],

v – prędkość spawania [mm/s],

k – współczynnik sprawności cieplnej metody spawania; przy ręcznym spawaniu łukowym współczynnik $k = 0,8$.

Jeżeli przy ręcznym spawaniu łukowym układa się ściegi zakosowe, to dla poprawności obliczeń zaleca się aby szerokość zakosów była ograniczona do 3 średnic rdzenia elektrody.

Proces spawania może być realizowany:

- prostym cyklem spawalniczym - spawanie jednowarstwowe,
- złożonym cyklem spawalniczym - spawanie wielowarstwowe.

W złożonym cyklu spawalniczym spoiny układa się jako ciągłe lub sposobem kaskadowym, czyli na niewielkich, przesuwających się stopniowo odcinkach spoiny (rys 1).



Rys. 1. Układanie spoiny wielowarstwowej systemem kaskadowym [3]
 Fig. 1. The fitting of a multi-layered weld bonding using cascading system [3]

Układanie kolejno poszczególnych warstw na niewielkim odcinku spoiny powoduje zwiększenie ilości ciepła doprowadzonego do strefy spawania. Układanie spoin systemem kaskadowym należy rozpoczynać od najbardziej usztywnionego miejsca spawanego węzła ku brzegom swobodnym złącza. Poprawność doboru parametrów spawania można ocenić na podstawie pomiarów twardości HV10 w spoinie i strefie wpływu ciepła. Pomiar twardości wykonuje się na płytkach dobiegowych i/lub wybiegowych - pkt 3.5.

Opisane zabiegi technologiczne wymagane są przy spawaniu stali niestopowych o strukturze ferrytycznej i ferrytyczno-perlitycznej. Do tej grupy należy zaliczyć również stale węglowo-manganowe o podwyższonej wytrzymałości ($R_m > 510 \text{ MPa}$). Poprawę właściwości mechanicznych (wytrzymałości, plastyczności i udarności) w tych stalach, następuje w wyniku oddziaływania Mn i Si na umocnienie roztworu stałego oraz rozdrobnienie ziaren ($\text{Mn} \leq 1,60\%$, $0,41\% > C_E \geq 0,47\%$).

W zależności od warunków spawania stali ferrytycznych, właściwości mechaniczne i technologiczne w SWC, ulegają znacznym zmianom w porównaniu z analogicznymi właściwościami materiału podstawowego. W wyniku cieplnego cyklu spawania (szybkie stygnięcie spoiny i jej sąsiedztwa w zakresie temperatury przemian austenitu), następuje przemiana perlitu w martenzyt. Zjawisko to sprzyja pojawianiu się pęknięć zimnych i kruchych struktur w tym obszarze. Ograniczenie przemian strukturalnych w spoinie i jej sąsiedztwie można osiągnąć poprzez stosowanie technologii spawania, która ujmuje:

- podgrzewanie wstępne (w całości lub strefy złącza), szczególnie w niskiej temperaturze spawania,
- wykonywanie spoin dużą energią liniową łuku,
- spawanie prostym cyklem spawalniczym.

Dla wyrobów charakteryzujących się niewielką grubością i dużą swobodą ruchów dylatacyjnych w czasie spawania, można zrezygnować z podgrzewania wstępnego i zastąpić je odpowiednio zwiększoną energią liniową łuku.

Twardość złączy spawanych w stalach o strukturze ferrytycznej nie powinna przekraczać [2]:

- 380HV10 – nieobrabianych cieplnie,
- 320HV10 - po obróbce cieplnej.

3. TECHNOLOGIA NAPRAW

3.1. PRZYGOTOWANIE ELEMENTÓW DO SPAWANIA

Przed przystąpieniem do wykonania elementów przeznaczonych na spawane ustroje nośne należy sprawdzić czy materiał podstawowy ma oznakowanie cechą materiałową lub

numerem zgodne z dokumentacją.

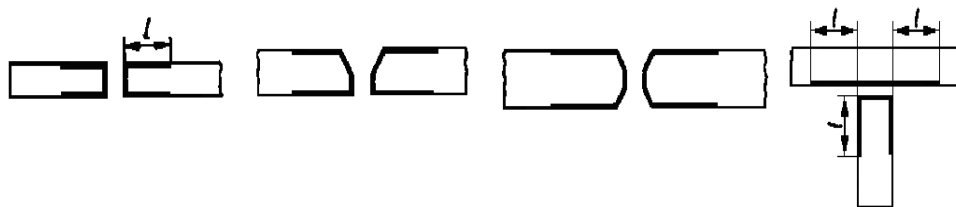
Nadawanie elementom oraz ich krawędziom pożądanego kształtu przed spawaniem, może odbywać się poprzez obróbkę mechaniczną (cięcie na gilotynie) lub termicznie (cięcie tlenowe). Przed cięciem termicznym należy usunąć zgorzelinę z powierzchni materiału.

Przycinając elementy na określony wymiar, należy zwrócić uwagę na odpowiednie ukierunkowanie włókien walcowania w odniesieniu do krawędzi cięcia. W przypadkach uzasadnionych, należy również przewidzieć niezbędny naddatek, uwzględniający wpływ skurczu spawalniczego (pkt 2.8), odkształcenia spawalnicze lub ewentualną obróbkę mechaniczną. Na krawędziach elementów ciętych gilotyną występuje utwardzenie zgniotem. Badania wizualne tych krawędzi, przy odpowiednim powiększeniu, powinny zapewnić, że nie występują na nich mikropęknięcia. Utwardzenie i mikropęknięcia należy wyeliminować na drodze obróbki mechanicznej, poprzez usunięcie 1 do 2mm odciętej powierzchni czołowej. Samo utwardzenie można zmniejszyć lub wyeliminować odpowiednią obróbką cieplną.

Stale niestopowe można ciąć termicznie w dowolnej temperaturze otoczenia, bez specjalnych zabiegów. Gdy obszar cięcia jest odkształcany na zimno, wówczas strefę cięcia należy podgrzać do temperatury 100÷120°C, na szerokości ok. 100mm.

Przygotowanie krawędzi do spawania na J i U zwykle wykonuje się obróbką skrawaniem. Powierzchnie po żłobieniu elektropowietrznym elektrodą węglową należy zeszlifować do metalicznej czystości, w celu usunięcia warstwy nawęglonej.

Przed spawaniem, brzegi złącza wraz z przylegającą powierzchnią należy starannie oczyścić na szerokość $l_{min} = 10\text{mm}$, w celu uniknięcia powstawania pęcherzy gazowych i porowatości lica spoiny (zwłaszcza przy spawaniu elektrodami z otuliną zasadową) - rys. 2.



Rys. 2. Czyszczenie brzegów w złączach przygotowanych do spawania (grube kreski oznaczają miejsca czyszczenia) [3]

Fig. 2. The clearing of edges in joints prepared for welding (thick strokes indicate the cleaned areas) [3]

Czyszczenie należy wykonać metodą płomieniową (usuwa z powierzchni tlenki, zgorzelinę, korozję, smar, lakier i podobne zanieczyszczenia).

Po czyszczeniu płomieniowym powierzchnię należy wyszczotkować (np. obrotową szczotką drucianą), do czystości metalicznej. Tlenkowe barwy nalotowe od cięcia termicznego można pozostawić (tlenki Fe_2O_3 i Fe_3O_4 nie rozpuszczają się w metalu spoiny). Występujące wady geometrii złącza należy skorygować przez napawanie, zgodnie z obowiązującą technologią spawania - WPS (ang. *Welding Procedure Specifications*), opracowaną na podstawie wytycznych normy PN-EN ISO 15609-1:2007 [10]. Napoinę należy wyrównać (oszlifować) a przyległe powierzchnie wygładzić i oczyścić.

3.2. KSZTAŁT I WYMIARY KRAWĘDZI SPAWANYCH

Kształt krawędzi elementów spawanych powinien być przystosowany do grubości spoiny i metody spawania. Sposoby przygotowania krawędzi do ręcznego spawania łukowego metodą MMA (*Manual Metal Arc Welding*) - spawanie elektrodą otuloną i MAG (*Metal Active Gas*) - spawanie w atmosferze gazów aktywnych, na podstawie normy PN-EN ISO 9692-1:2008 [7] ujęto w tabeli 1.

Tabela 1. Przygotowanie brzegów do spawania stali niestopowych i niskostopowych metodami MMA i MAG
Table 1. The preparation of edges for non-alloyed and low-alloyed steel welding with MMA and MAG method

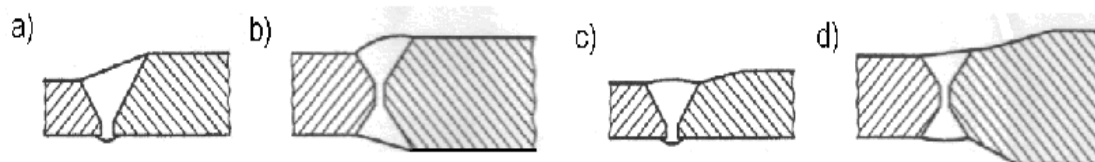
L.p.	Nazwa spoiny	Symbol spoiny	Kształt rowka złącza przed i po spawaniu	Wymiary rowka spawanego [mm] metodą [8]:	
				MMA	MAG
1	2	3	4	5	6
1	Spoina I jednostronna a	II		$s = 1 \div 3$ $b = 0 \div 2$	$s = 0 \div 6$ $b = 0 \div 2$
2	Spoina I z podkładką			$s = 1 \div 4$ $b = 0 \div 2$ $g = 3 \div 6$ $l = 15 \div 40$	$s = 0 \div 6$ $b = 0 \div 2$ $g = 3 \div 6$ $l = 15 \div 40$
4	Spoina I dwustronna			$s = 2 \div 5$ $b = 1 \div 3$	$s = 4 \div 12 \text{ mm}$ $b = 0 \div 3 \text{ mm}$
5	Spoina V	V		$s = 4 \div 12$ $b = 0 \div 3$ $\alpha = 50 \div 60^\circ$	$s = 4 \div 20$ $b = 0 \div 3$ $\alpha = 40 \div 50^\circ$
6	Spoina V z podkładką			$s > 4$ $b = 4 \div 8$ $\beta = 8 \div 12^\circ$ $g \geq 3$ $l = 20$	$s > 6$ $b = 4 \div 8$ $\beta = 8 \div 12^\circ$ $g \geq 3$ $l = 20$
7	Spoina Y	Y		$s = 4 \div 20$ $b = 0 \div 3$ $c = 1 \div 2$ $\alpha = 50 \div 60^\circ$	$s = 4 \div 30$ $b = 0 \div 3$ $c = 2 \div 5$ $\alpha = 40 \div 50^\circ$
8	Spoina 1/2 V lub 1/2 Y			$s = 3 \div 20$ $b = 0 \div 3$ $c = 0 \div 3$ $\alpha = 50 \div 60^\circ$	$s = 3 \div 30$ $b \leq 3$ $c \leq 3$ $\alpha = 40 \div 60^\circ$
9	Spoina L			$s < 2$ $b = 0 \div 3$ $\alpha = 90^\circ$	$s < 2$ $b = 0 \div 3$ $\alpha = 90^\circ$

Spoiny otworowe oraz zakładkowe i nakładkowe należy traktować tak, jak spoiny pachwinowe (tabela 1, poz. 9).

3.3. SPOINY CZOŁOWE

Łącząc doczołowo elementy o różnych grubościach należy zapewnić łagodną zmianę przekroju, w celu uniknięcia koncentracji nadmiernych naprężeń. W tym celu zaleca się:

- przy różnicy grubości brzegów spawanych elementów do 25%, przygotować krawędzie wykonując pochylenie w spoinie (rys. 3a i 3b),
- przy różnicy grubości brzegów spawanych elementów powyżej 25%, przygotować krawędzie wykonując pochylenie w grubszym elemencie tak, aby były dopasowane pochyleniem w stosunku od 1:2 do 1:4 (w zależności od rodzaju obciążenia złącza), (rys. 3c i 3d).

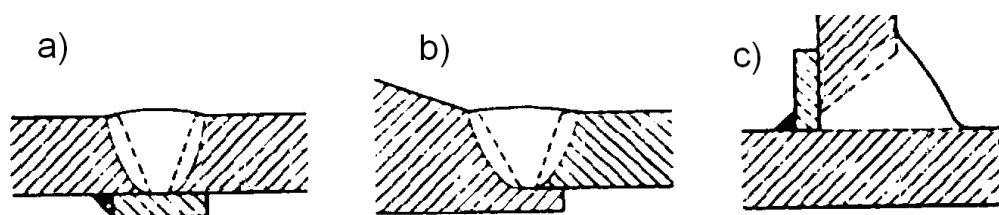


Rys. 3. Obróbka grubszej części [4]: a) pochylenie w spoinie przy styku niesymetrycznym, b) pochylenie w spoinie przy styku symetrycznym, c) pochylenie w grubszym elemencie przy styku niesymetrycznym, d) pochylenie w grubszym elemencie przy styku symetrycznym

Fig. 3. Treatment of the thicker part [4]: a) the tilt in a weld at asymmetrical junction, b) the tilt in a weld at symmetrical junction, c) the tilt in the thicker element at asymmetrical junction, d) the tilt in the thicker element at symmetrical junction

Złącza doczołowe z ukosowaniem jednostronnym powinny być podspawane. Złącza dostępne jednostronnie należy wykonać na podkładce, zapewniającej dobre przetopienie grani spoiny (rys. 4).

Podkładka może być oddzielnym elementem (rys. 4a i c) lub integralną częścią przekroju (rys. 4b). Materiał zastosowany na podkładki oddzielne powinien być kompatybilny pod względem metalurgicznym ze spoiwem i materiałem podstawowym. Grubość i szerokość podkładek przyjmuje się na podstawie tabeli 1.



Rys. 4. Złącza dostępne jednostronnie wykonane na podkładce [3]

Fig. 4. One-side accessible joints set on a pad [3]

Spoiny szepne, mocujące podkładkę od strony rowka spawalniczego powinny być usytuowane tak, aby podczas spawania uległy całkowitemu przetopieniu. Ułożenie podkładek usuwalnych powinno zapewnić przetopienie krawędzi łączonych elementów na całej grubości.

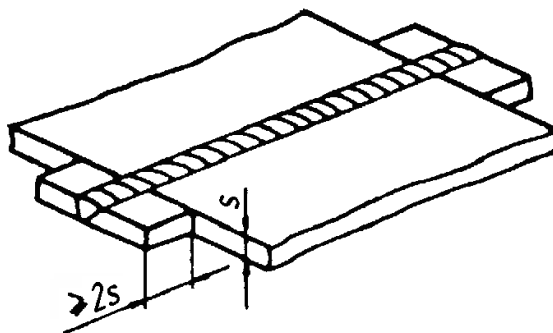
3.4. SPOINY PACHWINOWE

Zaleca się aby powierzchnie i krawędzie połączone spoinami pachwinowymi wykazywały możliwie mały odstęp – max 3mm. Odstęp większy zwiększa ryzyko pęknięcia. Zbyt duży odstęp należy rekompensować zwiększeniem grubości spoiny pachwinowej.

Spoiny w otworach lub wycięciach traktowane są jako spoiny pachwinowe.

3.5. PŁYTKI DOBIEGOWE I WYBIEGOWE

W celu wyeliminowania kraterów końcowych oraz wykonania spoin czołowych złączy doczołowych o długości równej szerokości łączonych elementów, spawanie należy rozpoczynać na płytkach dobiegowych i kończyć na płytkach wybiegowych (rys. 5).



Rys. 5. Połączenie spawane z płytkami dobiegowymi i wybiegowymi [3]

Fig. 5. Welded joint with in-sheet and out-sheet [3]

Materiał płytek dobiegowych i wybiegowych powinien być kompatybilny z materiałem podstawowym. Brzegi płytek powinny być przygotowane tak, jak we właściwym złączy.

Jeżeli na płytkach będzie wykonywany pomiar twardości złączy, powinny one być wykonane z materiału w gatunku i grubości zgodnej z materiałem podstawowym, a wymiary poszczególnych płytek (długość i szerokość) nie powinny być mniejsze niż 75mm.

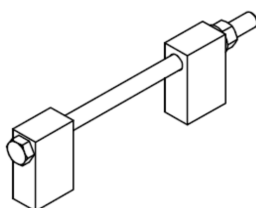
W złączach, w których przy wykonywaniu spoin czołowych, nie stosuje się płytek dobiegowych i wybiegowych, początkowe i końcowe kraterki należy dokładnie wypełnić

stopiwem, a powierzchnie czołowe spoin powinny się oszlifować tak, aby ich początki i końce pokrywały się z powierzchniami łączonych elementów.

W uzasadnionych przypadkach, płytki dobiegowe i wybiegowe stosuje się również przy wykonywaniu spoin czołowych w złączach teowych.

3.6. TYMCZASOWE UCHWYTY MOCUJĄCE

Tymczasowe uchwyty mocujące mają zastosowanie tam, gdzie wymagane jest ustalenie określonego położenia względem siebie spawanych elementów. Materiał tymczasowych uchwytów mocujących powinien być kompatybilny z materiałem podstawowym. Spoiny mocujące uchwyty powinny być wykonane wg zasad obowiązującej technologii spawania. Uchwyty należy rozmieścić tak, aby ich usunięcie było możliwe bez uszkodzenia wyrobu. Przykładowy tymczasowy uchwyt mocujący - ściągacz ilustruje rysunek 6.



Rys. 6. Przykładowy ściągacz tymczasowy
Fig. 6. An example of a temporary ribbing

3.7. SPOINY SZCZEPNE

Elementy przygotowane do spawania, nie zamocowane w oprzyrządowaniu ustalającym ich wzajemne położenie, należy połączyć spoinami szczepnymi, o wymiarach wg tabeli 2.

Dla materiału podstawowego o granicy plastyczności $R_e > 510 \text{ MPa}$, zaleca się przyjmowanie górnego zakresu wymiarowego spoin szczepnych.

Dla materiału podstawowego o grubości $s > 50 \text{ mm}$ zaleca się stosowanie dwucięgowej techniki wykonywania spoin szczepnych.

Tabela 2. Wymiary spoin szczepnych [3]
Table 2. Sizes of positional welds [3]

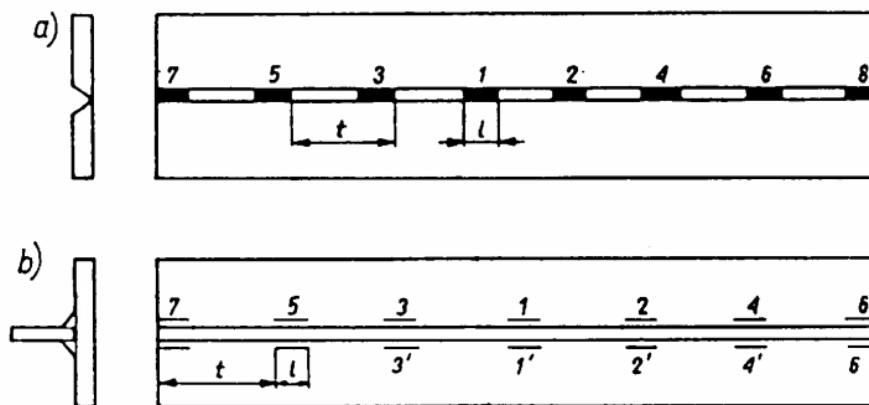
Spoiny czołowe		Spoiny pachwinowe		Długość spoin szczepnych l [mm]
Grubość spawanych elementów s [mm]	Grubość spoin szczepnych g [mm]	Grubość spoiny pachwinowej a [mm]	Grubość spoin szczepnych a [mm]	
2	2	2	2	10÷20
2÷4	2÷3	2÷6	2÷3	20÷30
4÷12	3÷4	6÷10	3÷4	30÷40
12÷50	0,33s (max. 6)	> 10	0,4a (max. 6)	40÷60

Do łączenia blach i kształtowników, podziałkę t spoin szepnych przyjmuje się w zależności od grubości spawanych elementów s , wg wzoru (4) [2]:

$$t = (10 \div 30)s \leq 500 \text{ [mm]} \quad (4)$$

W celu uniknięcia deformacji długich elementów, jako zasadę należy przyjąć wykonywanie spoin szepnych naprzemiennie, od środka ku brzegom (rys. 7a i 7b).

Wykonane spoiny szepne należy poddać badaniom wizualnym, w celu wykrycia nieakceptowanych niezgodności spawalniczych (wzajemną odległość, grubość i długość, pęknięcia lub pory). Wykryte niezgodności należy zgłaszać przełożonym, w celu zastosowania środków zapobiegawczych przed położeniem spoiny.



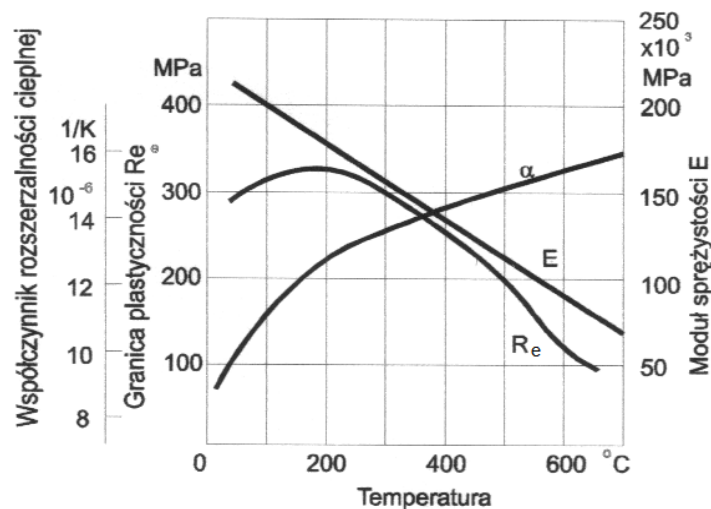
Rys. 7. Kolejność układania spoin szepnych [3]: a) dla złącza doczołowego, b) dla złącza teowego
Fig. 7. The order of laying of the positional welds [3]: a) for butt joint, b) for T-joint

3.8. ODKSZTAŁCENIA SPAWALNICZE

Technologia spawania powinna uwzględniać zjawiska cieplne, które w procesie spawania wpływają na zmianę większości właściwości mechanicznych oraz geometrii spawanego materiału w strefie złącza (rys. 8). Podczas nagrzewania następuje wydłużanie, a podczas chłodzenia skracanie spawanego materiału, które to skutki są trwałe. Uwidaczniają się one w postaci odkształceń elementów spawanych oraz w postaci rys lub pęknięć, co świadczy o istnieniu naprężeń wewnętrznych.

Ulegają również zmianie właściwości wytrzymałościowe złącza. Skurcz występuje w kierunku grubości, długości i szerokości spoiny, przy czym skurcz w kierunku grubości nie wywiera istotnego wpływu na odkształcenia spawanego wyrobu. Jego wartość bezwzględna zależy od zmiany temperatury i pierwotnej długości elementu.

Zmiany naprężenia zachodzące w materiale spawanym w wyniku skurczu, zależą od sztywności i utwierdzenia spawanego węzła oraz przemian fazowych zachodzących w spoinie i SWC. Przy spawaniu kilku elementów, sztywność wyrobu wzrasta w miarę postępu spawania.



Rys. 8. Zmiany właściwości stali niestopowej w złączu doczołowym w funkcji zmian temperatury [1]
 Fig. 8. The changes of properties of non-alloyed steel in a butt joint, considering a temperature function [1]

Skurcz wzdłużny w stalowych złączach spawanych wynosi przeciętnie 0,1÷0,3 mm/m spoiny. W przypadku konieczności kompensacji skurczu, wydłużenie bezwzględne należy obliczyć z przekształcenia wzoru na wydłużenie względne (5):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_T}{l_0} = \alpha_T \Delta T \Rightarrow \Delta l_T = \alpha_T l_0 \Delta T \text{ [mm]} \quad (5)$$

gdzie: $\Delta T = T_1 - T_0$ [°C].

Wartość naprężenia wywołanego skurczem złącza elementów utwardzonych, wyznacza się na podstawie uogólnionego prawa Hooke'a: $\sigma = E\varepsilon$. W tym przypadku wzór przyjmie postać (6):

$$\sigma = E \alpha_T \Delta T \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Pomiar naprężenia w dowolnym miejscu na powierzchni elementu utwardzonego, można wyznaczyć również metodą tensometrii oporowej, wykorzystując zjawisko zmiany oporności elektrycznej przewodnika, wynikającej z jego wydłużenia lub skrócenia. Na podstawie prawa Hooke'a, naprężenie elementu wynosi (7):

$$\sigma = E \alpha \frac{\Delta R}{R} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

gdzie: $R = \rho \frac{L}{A}$ [Ω]

Oznaczenia:

- A - pole przekroju przewodnika [mm],
- E - moduł sprężystości wzdłużnej (Younga),
dla stali niestopowej $E = 205\text{GPa}$,
- L - długość przewodnika [mm],

- l_0 - pierwotna długość elementu [mm],
 R - rezystancja (oporność) materiału przewodnika [Ω],
 T_0 - temperatura początkowa [$^{\circ}\text{C}$],
 T_1 - temperatura końcowa [$^{\circ}\text{C}$],
 Δl_T - wydłużenie bezwzględne [mm],
 ΔT - przyrost temperatury [$^{\circ}\text{C}$],
 ΔR - przyrost rezystancji materiału przewodnika po odkształceniu [Ω],
 α - współczynnik stały, zależny od wymiarów materiału (typowa wartość 2),
 α_T - współczynnik rozszerzalności cieplnej, dla stali $\alpha_T=12\cdot 10^{-6}$ 1/K,
 ε - odkształcenie,
 ρ - rezystywność (oporność właściwa) materiału przewodnika [Ωm],
 σ - naprężenie [MPa].

Na wartość odkształceń spawalniczych wpływają [2]:

- kształt krawędzi spawanych elementów,
- sposób wykonywania spoin wielowarstwowych,
- metoda spawania,
- kolejność wykonywania spoin.

Tabela 3. Zestawienie wartości kątów przeciwokształceń dla różnych elementów [2]

Table 3. Set of values of counter-strain angles for different components [2]

Rodzaj spoiny	Metoda spawania	Grubość spoiny [mm]	Liczba ściegów	Technika układania ściegów ¹⁾	Kąt wstępnego wygięcia α
Czołowa	MAG	12	3	Z	1
	MMA	12	6	Z	1°30'
	MAG	15	3	Z	5°30''
	MMA	15	12	P	11°30'
		20	8	Z	7°
		20	25	P	13°
Pachwinowa	MMA	5	1	Z	1°
		7	4	P	3°
		9	7	P	7°
		12	10	P	13°

¹⁾ P – ściegi proste, Z - ściegi zakosowe

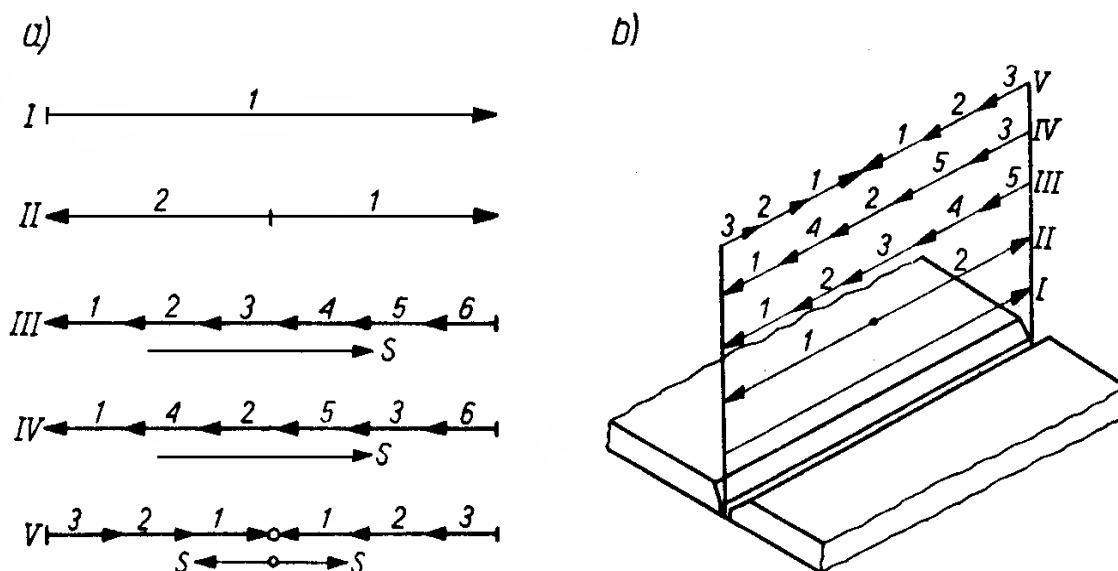
Skrócenie poprzeczne strefy spawania w spoinach czołowych zależy od szerokości rowka spoiny i jej kształtu. Największy jednak wpływ ma metoda spawania, od której zależy szerokość SWC. Orientacyjnie wartość skurczu poprzecznego przyjmuje się 0,1 grubości spoiny czołowej. Skurcz poprzeczny występuje również w przypadku nałożenia spoiny na pełny materiał (spawanie żeber usztywniających, napawanie).

Zestawienie orientacyjnych wartości kątów przeciwokształceń dla różnych elementów, w zależności od metody i techniki spawania zestawiono w tabeli 3.

3.9. KOLEJNOŚĆ I KIERUNKI UKŁADANIA SPOIN

Sposoby zmniejszenia naprężeń i odkształceń spawalniczych podczas wykonywania spoin:

- krótkie elementy wyrobów spawa się ściegiem prostym (rys. 9 - I),
- dłuższe elementy, (do których trzeba użyć więcej niż jedną elektrodę otuloną) spawa się ściegiem prostym dwuczęściowym (rys. 9 - II),
- spawanie długich elementów korzystniej jest wykonać ściegiem krokowym (rys. 9 - III) lub skokowym (rys. 9 - IV),
- przy spawaniu elementów bardzo długich (kilkumetrowych) stosuje się spawanie ściegiem krokowo-skokowym (rys. 9 -V).



Rys. 9. Rodzaje ściegów stosowanych przy spawaniu [3]: a) spoiny jednowarstwowe, b) spoiny wielowarstwowe
Fig. 9. Types of welding stitches [3]: a) single-bead welds, b) multilayer welds

Opisane zasady należy stosować zarówno w prostych przypadkach łączenia pojedynczego elementu wyrobu jak i w przypadkach bardziej złożonych.

4. TEMPERATURA PROCESU SPAWALNICZEGO

4.1. TEMPERATURA OTOCZENIA PODCZAS SPAWANIA

Proces spawania powinien być przeprowadzony w pomieszczeniach zamkniętych i w temperaturze nie niższej niż 0°C. Przy zastosowaniu skutecznej ochrony stanowisk spawalniczych przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (deszcz, śnieg, wiatr) i przy podgrzewaniu strefy złącza lub całego elementu, spawanie może odbywać się

również na wolnym powietrzu oraz w temperaturze otoczenia poniżej 0°C. Należy uwzględnić przy tym wpływ temperatury otoczenia na szybkość stygnięcia złącza.

4.2. TEMPERATURA PODGRZEWANIA, MIĘDZYŚCIEGOWA, UTRZYMANIA I PRZEJŚCIOWA

Wymagania dotyczące pomiarów temperatury podgrzania, temperatury międzyściegowej i temperatury utrzymania podczas spawania określa norma PN-EN ISO 13916:1999 [9].

Przy spawaniu w warunkach dużej wilgotności powietrza oraz zawsze w temperaturze poniżej 10°C, wymagane jest podgrzewanie strefy złącza do temperatury $T_p=50^\circ\text{C}$ (eliminacja skondensowanej wilgoci).

Przy spawaniu wielowarstwowym, minimalną temperaturę międzyściegową (T_i) przyjmuje się jako maksymalną temperaturę T_p .

Temperatura utrzymania T_m z zasady nie powinna być niższa od temperatury T_p . Spawanie wielowarstwowe może jednak odbywać się w temperaturze T_m niższej od temperatury T_p pod warunkiem, że przy układaniu kolejnych ściegów wprowadzona będzie większa ilość ciepła niż przy warstwie graniowej. W celu uniknięcia utwardzenia w SWC przy spawaniu stali podatnej na tworzenie struktury martenzytycznej ($C_E \geq 0,41\%$), strefę złącza lub cały element należy podgrzać do temperatury T_p . Temperaturę przejściową T_t warstw wypełniających należy utrzymać w wymaganym czasie stygnięcia $t_{8/5}$. Czas $t_{8/5}$, oblicza się na podstawie normy PN-EN ISO 13916:1999 [9]. W przybliżeniu, czas ten wynosi:

- dla stali niestopowych $t_{8/5} = 10\text{s}$,
- dla stali drobnoziarnistych $t_{8/5} = 15\div 20\text{s}$,
- dla stali o wysokiej wytrzymałości, ulepszonych cieplnie $t_{8/5} = 25\text{s}$.

Przy spadku temperatur T_i i T_m poniżej dopuszczalnej lub nadmiernej prędkości spadku temperatury T_t , zaleca się podgrzewanie złącza utrzymując temperaturę T_p .

4.3. MIEJSCE POMIARU TEMPERATURY

Wg zaleceń normy PN-EN 1011-2:2001 [4], dla wszystkich grubości odległość punktu pomiarowego temperatury od osi spoiny powinna wynosić co najmniej 75mm, bez względu na sposób nagrzewania.

Temperaturę T_p należy mierzyć na powierzchni przeciwległej do powierzchni nagrzewanej. Jeżeli jest to niemożliwe, temperaturę T_p można mierzyć na powierzchni nagrzewanej, po czasie od usunięcia źródła ciepła, 2min na każde 25mm grubości materiału podstawowego w strefie spoiny - czas potrzebny na wyrównanie temperatury T_p po zakończeniu podgrzewania.

Temperaturę T_i należy mierzyć w obszarze spawania (na powierzchni lica spoiny lub przylegającego materiału rodzimego) bezpośrednio przed przejściem łuku.

Temperaturę T_m - mierzona analogicznie jak temperaturę T_p - należy kontrolować przez okres w którym nastąpiła przerwa w procesie spawania.

Temperaturę T_t należy mierzyć w złączu próbnym (w licu spoiny płytek dobiegowych lub wybiegowych). Pomiar należy wykonać poprzez zanurzenie termopary w jeszcze płynnym metalu lica spoiny, a następnie odczytać czasu stygnięcia spoiny w przedziale temperatur od 800 do 500°C.

5. PRZYKŁADOWE NAPRAWY WYSIĘGNIKA KOPARKI

5.1. NAPRAWA PIERWSZA

W skrzynce wysięgnika koparki uwidoczniło się pęknięcie pasa górnego i przyległej strefy środka. Grubość tych elementów wynosiła odpowiednio 12 i 10mm.

Aby zahamować dalsze rozprzestrzenianie się pęknięcia, istniejące uszkodzenie zaspawano od zewnątrz (bez odpowiedniego przygotowania technologicznego) a następnie wzmocniono nakładką z blachy o grubości 10mm. Blachę przyspawano do pasa wysięgnika obwodową spoiną pachwinową o wysokości $a=6\div 7$ mm. Po kilku miesiącach eksploatacji wysięgnik koparki uległ ponownej awarii, lecz tym razem nastąpiło złamanie w miejscu wykonywanej naprawy - w całości pozostał tylko odkształcony pas dolny (rys. 10a i 10b). Złamanie wysięgnika nastąpiło w wyniku naprawy w sposób nieprofesjonalny, bez uwzględnienia wymagań normy PN-M/06515:1979 [11] oraz z zaniechaniem podstawowych zasad wykonywania tego typu czynności naprawczych.

a)



b)



Rys. 10. Złamany wysięgnik koparki: a) widok ogólny wysięgnika, b) szczegół strefy złamania
Fig. 10. Fractured boom: a) general view of the boom, b) close-up view of the boom

Główne przyczyny złamania wysięgnika po naprawie to:

- niezdemontowanie wysięgnika z koparki w celu jego odpowiedniego przygotowania i dokonania naprawy w pozycjach niewymuszonych,
- nieoczyszczenie strefy złącza z korozji, zanieczyszczeń i pokryć ochronnych (na skorodowanej powierzchni po usunięciu nakładki znajdują się również resztki przepalanej farby- rys.10b),

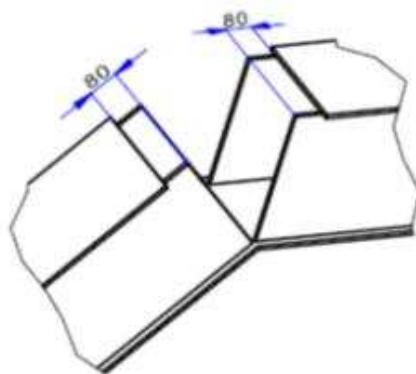
- brak wycięcia fragmentu pasa górnego o długości min. 80mm, z każdej strony złamania (w celu wyeliminowania krzyżowania się spoin po naprawie środника i pasa górnego),
- brak ukosowania pasów wysięgnika w strefie pęknięcia,
- niezastosowanie podkładki do wykonania pełnego przetopu spoiny jednostronnej,
- niewykonanie naprawy pękniętego środnika,
- zastosowanie nakładki ze stali o nieokreślonym gatunku.

5.2. NAPRAWA DRUGA

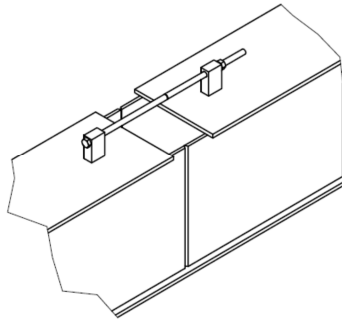
Złamany wysięgnik poddano ponownej naprawie, jednak już wg procesu technologicznego, opracowanego na podstawie pkt 2.

Technologia naprawy obejmowała następujące zalecenia (odwołania odnoszą się do danych zamieszczonych w opracowaniu):

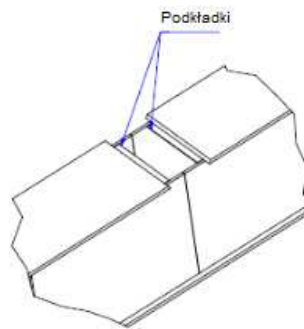
1. Wycięcie obustronnie fragmentu pasa górnego o wymiarze min. 80mm wg rys. 11.
2. Oczyszczenie obustronnie strefy złącza wg rys. 5.
3. Wykonanie ukosowania środników wg tabeli 1, wiersz 5, kolumna 6.
4. Wykonanie ukosowania pasów górnych wg tabeli 1, wiersz 6, kolumna 6.
5. Za pomocą ściągacza/ściągaczy (rys. 6) doprowadzenie kształtu i położenia złamanego wysięgnika do stanu pierwotnego wg rys. 12.
6. Wykonanie podgrzewania osuszającego strefy złącza do temp. 50°C.
7. Wykonanie połączenia spawanego środników wysięgnika wg WPS wytwórcy.
8. Usunięcie ściągacza.
9. Zeszlifowanie na płasko spoin technologicznych po usunięciu ściągacza.
10. Wykonanie rowków w graniach spoin środników (wycięcie szlifierką spoin graniowych).
11. Wypełnienie rowków grani spoinami wg WPS.
12. Przyspawanie spoinami szczelnymi podkładek ze stali S235JRG2 – rys. 13 oraz tabela 1, wiersz 6, kolumna 6 i rys. 4a.



Rys. 11. Wycięcie fragmentów pasa górnego
Fig. 11. Cutting out of fragments of the upper tile



Rys. 12. Ustalenie pierwotnego kształtu złamanego wysięgnika za pomocą ściągacza
Fig. 12. Assessment of the basic shape of the fractured boom using a ribbing



Rys. 13. Przyspawanie podkładek
Fig. 13. Pad welding

13. Wykonanie wstawki ze stali ze stali S235J2G3 o grubości 12mm i szerokości równej szerokości wysięgnika w miejscu brakującego fragmentu pasa.
14. Wykonanie ukosowania wstawki z zachowaniem wymiarów rowka wg tabeli 1 wiersz 6 kolumna 6.
15. Przyspawanie wstawki spoinami szepnymi wg tabeli 2 i WPS.
16. Przyspawanie spoinami szepnymi punktowymi płytek dobiegowo-wybiegowych wg rys. 5.
17. Wykonanie połączenia spawanego wstawki wg WPS.
18. Odcięcie płytek dobiegowo-wybiegowych, oznakowanie stemplem identyfikacyjnym spawacza i przekazanie do dyspozycji KJ (kontroli jakości).
19. Oszlifowanie na płasko miejsc po odcięciu płytek dobiegowo-wybiegowych.
20. Oznakowanie połączeń spawanych stemplem identyfikacyjnym spawacza (identyfikowalność).
21. Odbiór jakościowy połączeń spawanych:
 - badania wizualne VT (ang. *Visual Test*),
 - badanie twardości płytek dobiegowo-wybiegowych HV – wg uznania KJ,
 - pomiary kształtu i położenia wysięgnika po spawaniu,
 - potwierdzenie odbioru jakościowego stemplem identyfikacyjnym KJ (identyfikowalność).

22. Pomalowanie strefy złącza w kolorze wysięgnika.

Uwaga: Na zastosowane elementy naprawcze i technologiczne wymagane są atesty materiałowe.

Na rys. 14 przedstawiono ten sam wysięgnik po drugiej naprawie. Koparka pracowała z tym wysięgnikiem bezawaryjnie do czasu wycofania jej z eksploatacji tj. przez kolejne 5 lat. W okresie eksploatacji nie stwierdzono objawów zmęczenia wysięgnika w strefie wykonanej naprawy.



Rys. 14. Wysięgnik po naprawie

Fig. 14. The repaired boom

5.3. BADANIA MES MODELI WYKONANYCH NAPRAW

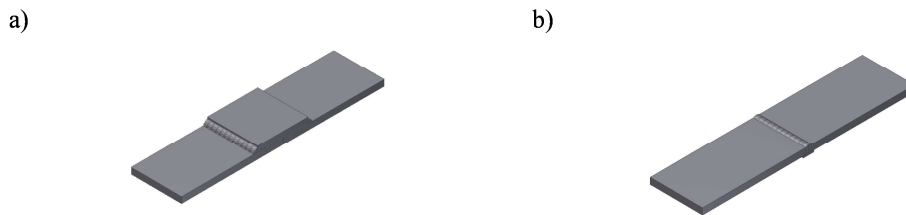
W celu zobrazowania zachowania się wysięgnika podczas pracy po naprawie, opracowano modele do badań numerycznych MES (metoda elementów skończonych), o połączeniach odpowiadających pierwszej i drugiej metodzie naprawczej (rys. 15).

Parametry modeli:

- wymiary pasa – 200x100x12mm,
- wymiary nakładki – 100x100x10mm,
- gatunek materiału pasa i nakładki – stal S235J2G3,
- wysokość obliczeniowa spoiny pachwinowej $a=6\text{mm}$,
- wysokość obliczeniowa spoiny doczołowej $h=12\text{mm}$,
- obciążenie symulacyjne – 100kN.

Szerokości pasów modeli dobrano tak, aby pod statycznym obciążeniem próbnym siłą rozciągającą $F=100\text{kN}$, współczynnik bezpieczeństwa w pasach wynosił nie mniej niż 2. Ponadto w założeniach przyjęto, że właściwości mechaniczne spoiny i strefy wpływu ciepła odpowiadają analogicznym właściwościom materiału rodzimego.

Modele poddano badaniom numerycznym, przy użyciu programu Autodesk Inventor Professional 2011, pod obciążeniem statycznym, symulującym siłę rozciągającą $F=100\text{kN}$. Wyniki badań przedstawiono na rys. 16 ÷ 21.



Rys. 15. Modele połączeń do analizy metodą MES: a) model z połączeniem nakładkowym, b) model z połączeniem doczołowym

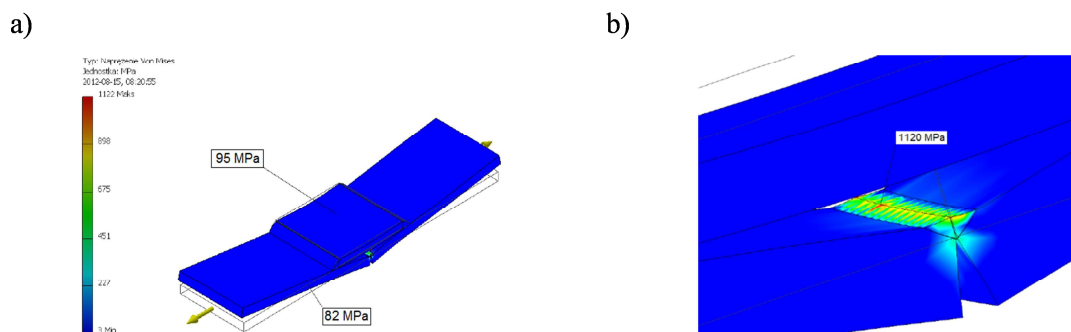
Fig. 15. The models of joints for further analysis using the MES method: a) the strapped joint model, b) the butt joint model

Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Misesa w modelu połączenia nakładkowego, przedstawiono na rys. 16a. Wielkość naprężeń w pasach i nakładce nie przekracza wartości przyjętych w założeniach. Natomiast naprężenia powstałe w spoinie zespalażącej pas górny w miejscu pęknięcia (która wg klasyfikacji połączeń spawanych jest napoiną) nadmiernie przekraczają wartości akceptowalne (rys. 16b) - wygenerowana wartość tych naprężeń wynosi aż 1120MPa. Tak duża koncentracja naprężeń w spoinie jest spowodowana karbem (brakiem pełnego przetopu w strefie pęknięcia). W warunkach laboratoryjnych dojdzie do utraty spójności złącza przy naprężeniu $R_m < 500\text{MPa}$, chwilowo bez naruszenia spójności spoin montażowych nakładki.

Zjawisko to wynika z faktu, że naprężenia nie rozłożyły się równomiernie w złączu i nakładce. Naprężenia rozciągające w nakładce (porównywalne z naprężeniami występującymi w pasach – rys. 16a), spowodowały jedynie jej wydłużenie w zakresie naprężeń sprężystych.

Z analizy tego zjawiska wynika, że:

- do czasu gdy spoina zespalażąca pęknięcie pasa górnego przenosi obciążenia, zastosowana na niej nakładka nie spełnia oczekiwanego zadania – rozkład naprężeń nie jest równomierny (rys. 16b),
- dopiero utrata spójności złącza w miejscu pękniętego pasa powoduje, że nakładka przejmuje pełną funkcję dźwigara (rys. 17a i b).



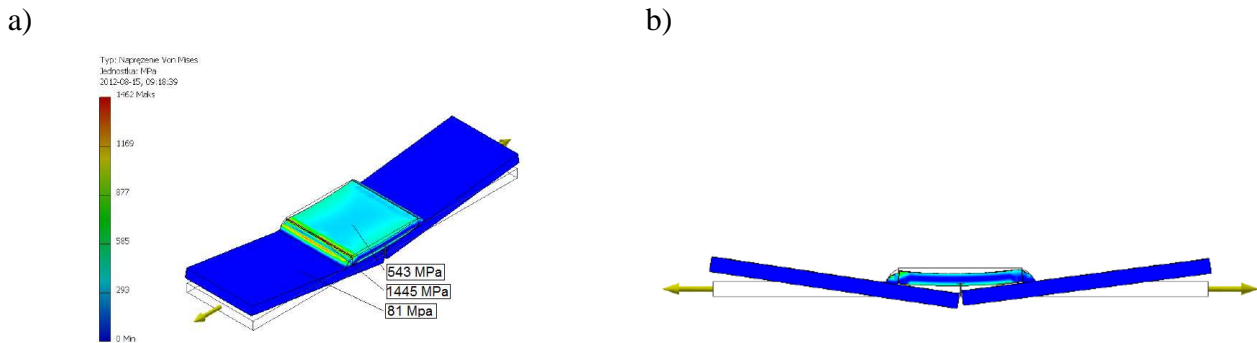
Rys. 16. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Misesa w modelu połączenia nakładkowego:

a) widok perspektywiczny z góry, b) umiejscowienie max. naprężeń

Fig. 16. Tensions distribution reduced in acc. to Mises' hypothesis in a strapped joint model:

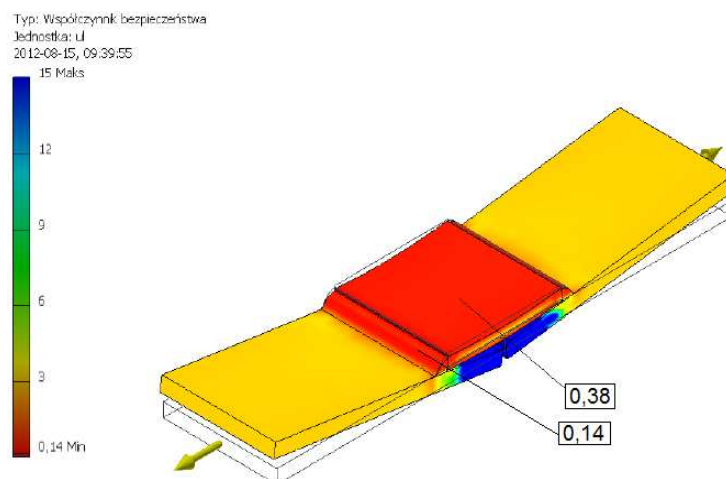
a) the drop-down view b) the distribution of maximal tensions

Po rozerwaniu spoiny zespalającej pęknięcie pasa górnego, naprężenia w nim pozostały na niezmiennym poziomie, natomiast w nakładce i spoinach montażowych poziom ten wzrósł, wielokrotnie przekraczając wartości dopuszczalne (rys. 17a i 17b).



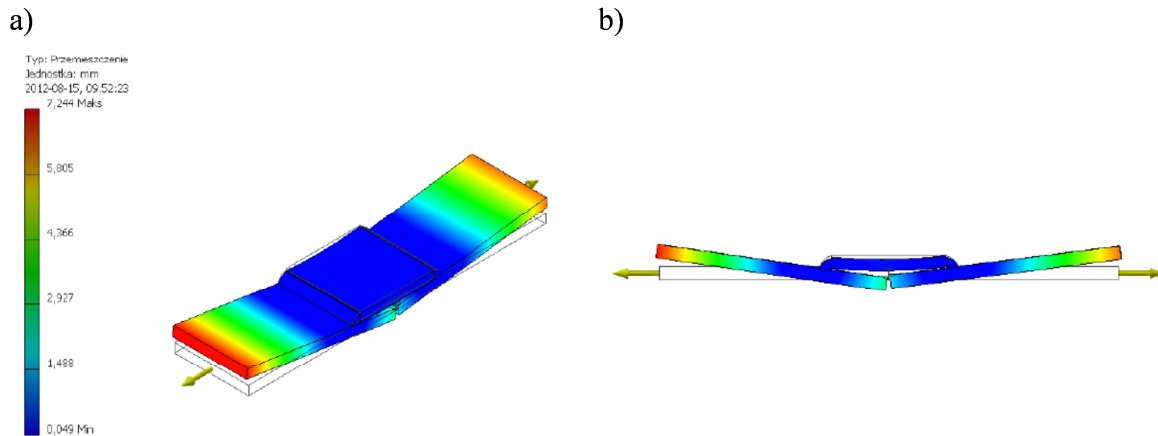
Rys. 17. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Misesa w modelu połączenia nakładkowego, po utracie spójności w spoinie eliminującej pęknięcie pasa górnego: a) widok perspektywiczny z góry, b) widok z boku
 Fig. 17. The distribution of tensions reduced in acc. to Mises' hypothesis in a strapped joint model after the loss of cohesion within the upper tile fracture-compensating joint: a) the drop-down view, b) the side view

Minimalny współczynnik bezpieczeństwa w nakładce wyniósł tylko 0,38 (rys. 18) natomiast w osi symetrii spoin naprężenia rozrywające (o charakterze ścinającym) były jeszcze większe - przy wygenerowanym naprężeniu rzędu 1460MPa, współczynnik bezpieczeństwa wynosi zaledwie 0,14. W tym przypadku w warunkach laboratoryjnych również dojdzie do utraty spójności w spoinach przy naprężeniu $R_m < 500\text{MPa}$, co też się stało (z pewną zwłoką) z pierwotnie naprawianym wysięgnikiem – spoiny montażowe nakładki zostały ścięte.



Rys. 18. Rozkład współczynnika bezpieczeństwa w modelu połączenia nakładkowego
 Fig. 18. The distribution of safety factor within a strapped joint model

Obciążony model połączenia nakładkowego, ulega także znacznej deformacji w wyniku asymetrycznego rozłożenia naprężeń, co również wpływa niekorzystnie na funkcję wykonanego złącza - deformacja sprzyja odrywaniu spoin montażowych nakładki od pasa (rys. 19a i 19b).

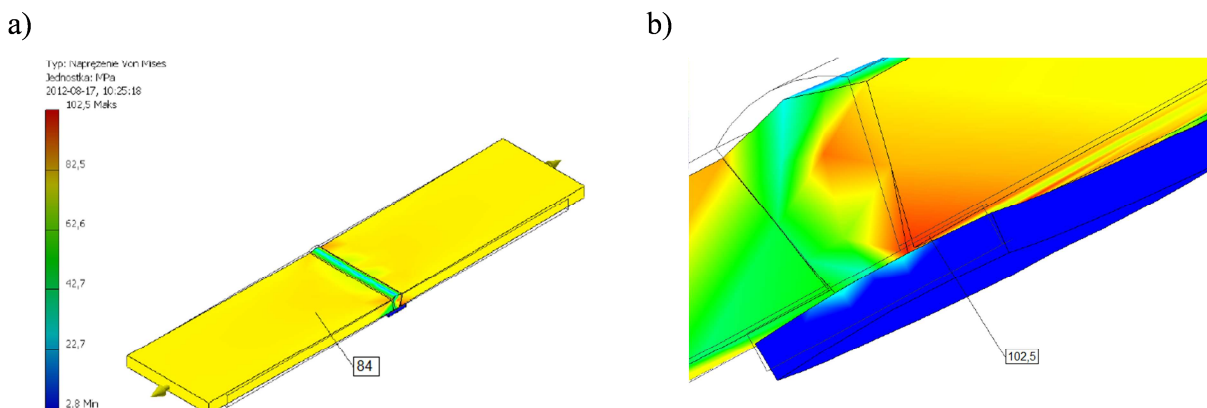


Rys. 19. Rozkład przemieszczeń w modelu połączenia nakładkowego: a) widok perspektywiczny z góry, b) widok z boku

Fig. 19. Deformation distribution in strapped joint model: a) the drop-down view, b) the side view

Na rys. 20 przedstawiono rozkład naprężeń w modelu połączenia doczołowego. Wygenerowany obraz modelu przedstawia stan, jakiego oczekuje się od poprawnie zaprojektowanego i wykonanego złącza. Świadczą o tym m.in. (rys. 20a i 20b):

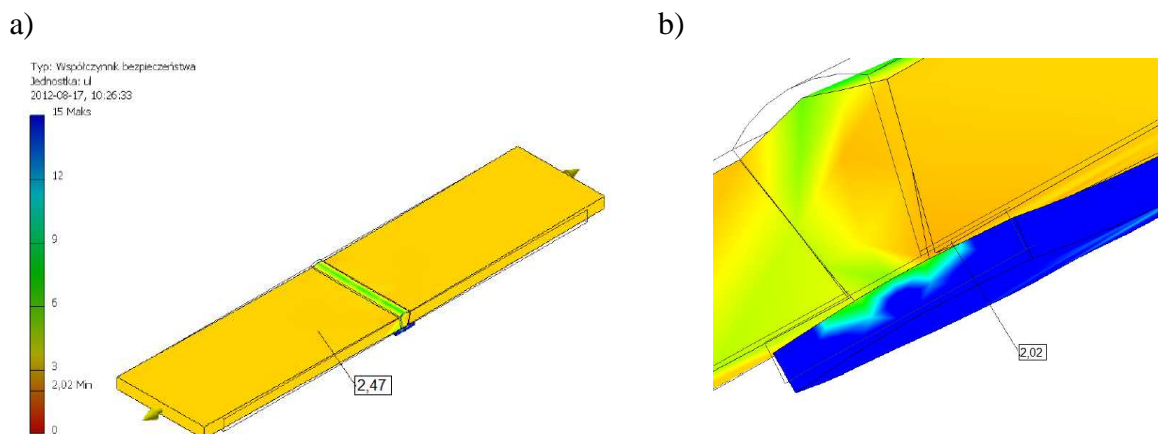
- równomierny rozkład naprężeń rozciągających,
- minimalna koncentracja naprężeń w strefie grani (pod podkładką),
- nieodkształcony model,
- maksymalne naprężenia nie przekraczają naprężeń dopuszczalnych (współczynnik bezpieczeństwa min. jest większy od przyjętego w założeniach wstępnych).



Rys. 20. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Misesa w modelu połączenia doczołowego: a) widok od strony lica, b) szczegół widoku od strony grani

Fig. 20. The distribution of tensions reduced in acc. to Mises' hypothesis within a butt joint model: a) the face of weld-side view, b) the detailed root of the weld-side view

Rozkład współczynnika bezpieczeństwa ilustruje rys. 21a i b. Jego minimalną wartość wynoszącą 2,02 zanotowano w grani spoiny pod podkładką (rys. 21b). Dlatego też przy opracowywaniu technologii połączeń spawanych, tak wielką wagę przywiązuje się do zabiegów technologicznych przy wykonaniu tej strefy złącza (druga naprawa, pkt 9, 10 i 12).



Rys. 21. Rozkład współczynnika bezpieczeństwa w modelu połączenia doczołowego:
a) widok od strony lica, b) widok od strony grani

Fig. 21. The distribution of safety factor within a butt joint model: a) the face of weld -side view, b) the root of the weld -side view

Pozytywne wyniki badań modelu z połączeniem spawanym doczołowo należy traktować tylko poglądowo. Wg założeń wstępnych, nie uwzględniają onebowiem rzeczywistych właściwości mechanicznych złącza.

Ciepło spawania powoduje przemiany w SWC i samej spoinie - przemianie ulega skład fazowy i parametry morfologiczne tej strefy. Przemiany te wpływają na zmniejszenie właściwości mechanicznych złącza. Również niezgodności spawalnicze nie pozostają bez wpływu na te właściwości. Na ogół przyjmuje się, że są one mniejsze od analogicznych właściwości mechanicznych materiału rodzimego o następujące wartości:

- wytrzymałość na rozciąganie $k'_r = 0,8k_r$,
- wytrzymałość na zginanie $k'_g = 0,9k_r$,
- wytrzymałość na ściskanie $k'_c = k_r$,
- wytrzymałość na ścinanie $k'_t = 0,65k_r$.

Po dokonaniu przeliczeń, zredukowany współczynnik bezpieczeństwa w złączu podczas rozciągania przyjmie wartość 1,62. Uzyskane wyniki badań po dokonaniu przeliczeń, również potwierdzają poprawność zastosowanej technologii naprawy.

6. WNIOSKI

1. Błędny dobór technologii naprawy ustrojów nośnych prowadzi w efekcie do wystąpienia w nich ponownych pęknięć, a w skrajnych przypadkach do niebezpiecznych dla otoczenia awarii.

2. Naprężenia w wysięgniku wywołane siłami roboczymi nie rozkładają się proporcjonalnie na złącze pękniętego pasa i nakładkę.
3. Przeprowadzone badania, chociaż tylko o charakterze pogładowym, dyskwalifikują technologię naprawy ustrojów nośnych poprzez zastosowanie nakładek w miejscu występowania pęknięć.
4. Poprawnie wykonana naprawa ustrojów nośnych ze złączami doczołowymi w 100% przywraca ich pierwotną funkcję.

LITERATURA

- [1] BUTNICKI S., 1975, *Spawalność i kruchość stali*, WNT Warszawa.
- [2] PILARCZYK J., (red), 2005, *Poradnik inżyniera*, Spawalnictwo t.1-2, WNT Warszawa.
- [3] Praca zbiorowa, 1983, *Poradnik inżyniera*, Spawalnictwo t.1-2, WNT Warszawa.
- [4] PN-EN 1011-1:2009, Spawanie, Zalecenia dotyczące spawania metali, Część 1, Ogólne wytyczne dotyczące spawania łukowego.
- [5] PN-EN 1011-2:2005, Wytyczne dotyczące spawania metali, Część 2, Spawanie łukowe stali ferrytycznych.
- [6] PN-EN 1043-1:2000, Spawalnictwo, Badania niszczące metalowych złączy spawanych. Próba twardości, Próba twardości złączy spawanych łukowo.
- [7] PN-EN ISO 9692-1:2008, Spawanie i procesy pokrewne, Zalecenia dotyczące przygotowania złączy, Część 1, Ręczne spawanie łukowe, spawanie łukowe elektrodą metalową w osłonie gazów, spawanie gazowe, spawanie metodą TIG i spawanie wiązką stali.
- [8] PN-EN ISO 4063:2002, Spawanie i procesy pokrewne, Nazwy i numery procesów.
- [9] PN-EN ISO 13916:1999, Wytyczne pomiaru temperatury podgrzewania, temperatury międzyścigowej i temperatury utrzymania.
- [10] PN-EN ISO 15609-1:2007, Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania. Instrukcja technologiczna spawania, Część 1, Spawanie łukowe.
- [11] PN-M-06515:1979, Dźwignice, Ogólne zasady projektowania stalowych ustrojów nośnych.

THE REPAIR TECHNOLOGY OF WELDED FITTING IN LOADBEARING LEVERS

Paper presents in a synthetic manner the problems connected with the analytical evaluation of the weldability of structural steels, the weldability of the steel and the influence of temperature on the properties of the welding joint. The paper also contains the basic data necessary to develop a welding repair processes superstructures. The influence of a repair method applied to a supporting structure on its service life, as illustrated with an example of repair of a backhoe boom.