

Sposób spawania i obróbki cieplnej niestopowej stali konstrukcyjnej

Przedmiotem wynalazku jest sposób wykonania i obróbki cieplnej złączy spawanych niestopowej stali konstrukcyjnej gatunku S355J0 (1.0553) o grubości wynoszącej 10 mm, wyrażonej w procencie wagowym składem chemicznym wg normy EN 10025-2:2019: C – max. 0,23; Si – max. 0,60; Mn – max. 1,70; P – max. 0,040; S – max. 0,040, Cu – max. 0,60, N – max. 0,014, charakteryzującej się w stanie normalizowanym wytrzymałością na rozciąganie (R_m) min. 470 MPa.

W procesach cieplnych zachodzących podczas spawania, w strefach wpływu ciepła następuje degradacja struktur spawanych stali. Skutkuje to znacznymi zmianami poziomów twardości, a także lokalną utratą odporności na zużywanie ściernie. W literaturze przedmiotu dotyczącej obróbki cieplnej stali przyjmuje się, iż:

- w strefie wpływu ciepła występuje problem „warstwy rozhartowanej”, która decyduje o wytrzymałości całej konstrukcji;
- zmiany strukturalne w materiale spoiny i w strefie wpływu ciepła wywołują powstanie karbu strukturalnego i mogą skutkować zmniejszeniem trwałości konstrukcji;
- poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego materiałów dodatkowych oraz optymalnie dobrane warunki i parametry spawania możliwe jest uzyskanie w strefie wpływu ciepła struktur i właściwości mechanicznych zbliżonych do materiału rodzimego.

Z chińskiego opisu wynalazku CN101862887B znany jest sposób spawania łukiem krytym grubej blachy S355NL w niskotemperaturowej wieży wiatrowej. Powyższy wynalazek realizuje taki proces spawania, zgodnie z którym nie jest potrzebne wstępne podgrzewanie przed spawaniem i nie jest wymagana obróbka cieplna po spawaniu. Obróbka cieplno-plastyczna stali S355J2 i sposób jej wytwarzania zostały ujawnione w chińskiej normie CN101654760A.

Z międzynarodowego zgłoszenia patentowego WO1998048061A1 znana jest obróbka cieplna niskowęglowych stali niestopowych lub niskostopowych, która jest zalecana jako post-obróbka cieplna złącza spawanego. Obróbka cieplna składa się między innymi z takich zabiegów jak: nagrzewanie powyżej temperatury A_{c3} (850-1050°C), następnie chłodzenie poniżej temperatury A_{c1} lub wyższej, gdzie połowa

struktury składa się z austenitu (czas wygrzewania wynosi najczęściej od kilku do kilkudziesięciu sekund, ale nie dłużej niż 5 minut). Wygrzewanie należy zacząć, kiedy temperatura stali wynosi od 500-700°C (na przykład po normalizowaniu lub obróbce cieplnej na gorąco). Według wynalazku tak przeprowadzona obróbka cieplna poprawia wytrzymałość i udurowienie stali.

Z chińskiego dokumentu patentowego CN1176227C znana jest obróbka cieplna stopowej stali konstrukcyjnej. Rozwiązanie charakteryzuje się tym, że stal jest wstępnie podgrzewana pod ciśnieniem od 1.5 do 6.0 GPa, następnie podgrzewana do właściwej temperatury, z której jest hartowana w wodzie. Grzanie do temperatury odpuszczania również odbywa się pod wysokim ciśnieniem. Taka obróbka cieplna ma zapewnić wysoką twardość stali.

Znana jest z literatury [Rozumek D., Lewandowski J., Lesiuk G., Correia J.A.: The influence of heat treatment on the behavior of fatigue crack growth in welded joints made of S355 under bending loading. *International Journal of Fatigue*. 2020, vol. 131, str. 105328] obróbka cieplna złącza spawanego ze stali S355 obejmująca wyżarzanie odprężające w temperaturze 630°C przez dwie godziny. W efekcie odprężania nastąpiło pogorszenie wytrzymałości zmęczeniowej spoiny.

Kolejny przykład obróbki cieplnej stali S355 ujawnia opracowanie [Dziona I., Lipiec S.: Testing the mechanical properties of S355JR steel with different types of microstructure. *Problemy eksploatacji – maintenance problems* 2016, vol. 3, str. 179-186], w którym obróbka cieplna obejmuje austenitowanie w temperaturze 950°C przez 20 minut, chłodzenie na powietrzu lub w oleju, odpuszczanie w 600°C przez 9000 minut, a następnie chłodzenie w oleju. W materiale na skutek przeprowadzenia laboratoryjnej obróbki cieplnej uzyskano mikrostruktury: ferrytyczno-perlityczną, ferrytyczno-bainityczną oraz ferrytu ze skoagulowanymi węglkami, które miały na celu odtworzyć struktury uzyskiwane w połączeniu spawanym i ich ewolucję w warunkach eksploatacyjnych. Autorzy wskazują, że długotrwała eksploatacja nieobrobionych cieplnie elementów spawanych ze stali S355, zwłaszcza w wysokich temperaturach, prowadzi do zmian mikrostrukturalnych w strefie wpływu ciepła i wytworzenie struktury ferrytycznej ze skoagulowanymi węglkami.

Dotychczasowe metody spawania stali S355 powodują powstawanie w spoinie stref o odmiennej budowie strukturalnej, co prowadzi do obniżenia trwałości stali konstrukcyjnych klasy S355. Złącze spawane stali S355, otrzymywane dotychczas

znanymi technikami spawania i obróbki cieplnej, cechuje się relatywnie niskimi wskaźnikami wytrzymałościowymi oraz niską odpornością na zużywanie ścierne.

Tak więc, celem wynalazku jest rozwiązanie pozwalające na takie spawanie i późniejszą obróbkę cieplną stali S355, aby zniwelować występowanie powyższych niedogodnych cech w celu zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie i odporności na zużywanie ścierne. Celem wynalazku jest rozwiązanie pozwalające na uzyskanie połączenia spawanego stali S355 charakteryzującego się mikrostrukturą i właściwościami mechanicznymi zbliżonymi do mikrostruktury i właściwości niskostopowych, wysokowytrzymałych stali odpornych na zużywanie ścierne.

Sposób spawania i obróbki cieplnej niestopowej stali konstrukcyjnej, w którym dla wytworzenia złącza spawanego blachę ze stali S355J0 (1.0553) o grubości 10 mm i wyrażonej w procencie wagowym składem chemicznym: C – max. 0,23; Si – max. 0,60; Mn – max. 1,70; P – max. 0,040; S – max. 0,040, Cu – max. 0,60, N – max. 0,014, spawa się metodą SAW (121) drutem elektrodowym S3Ni2,5CrMo (OK Autrod 13.43 zgodnie z EN ISO26304) wraz z topnikiem $\text{MgO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$, stosując parametry spawania: prędkość spawania $v \approx 60 \text{ cm/min}$, znamionowy prąd łuku elektrycznego $I = 530 \div 630 \text{ A}$, napięcie łuku elektrycznego $U = 31 \div 33 \text{ V}$, energia liniowa $Q \leq 2,0 \text{ kJ/mm}$ i temperatura międzywarstwowa $T_i < 250^\circ\text{C}$, **według wynalazku charakteryzuje się tym**, iż otrzymane złącze poddaje się normalizowaniu poprzez austenitizowanie w temperaturze $880 \div 900^\circ\text{C}$ przez 60 minut i chłodzenie na powietrzu; dalej hartowaniu poprzez austenitizowanie w temperaturze $920 \div 950^\circ\text{C}$ przez 20 minut i chłodzenie w wodzie o temperaturze $\leq 30^\circ\text{C}$; oraz odpuszczaniu w temperaturze 100°C przez 2 godziny, po którym złącze chłodzi się na powietrzu.

W wyniku zastosowanych, objętych wynalazkiem, operacji technologicznych, uzyskane w miejscu złącza spawanego właściwości stali S355 pozwalają na rozszerzenie możliwych jej obszarów aplikacyjnych, do analogicznych jak dla niskostopowych, martenzytycznych stali odpornych na zużywanie ścierne.

Przykład 1

W przykładzie realizacji pierwszym według wynalazku, arkusze blachy o grubości 10 mm ze stali S355J0 (1.0553), o wyrażonym w procencie wagowym składzie chemicznym: C – 0,23; Si – 0,60; Mn – 1,70; P – 0,040; S – 0,040, Cu – 0,60,

N – 0,014, łączy się metodą SAW (121) spoiną dwustronną, jednościegową, według następujących parametrów gwarantujących prawidłowy przetop blach:

- typ spoiny: BW (doczołowa);
- pozycja spawania: PA (podolna);
- średnica elektrody: 3,0 mm;
- napięcie łuku elektrycznego (spoina 1/2): 31/33 V;
- natężenie prądu (spoina 1/2): 530/630A;
- biegunowość: DC (+);
- prędkość spawania: ~ 60 cm/min;
- drut elektrodowy: OK Autrod 13.43 (S3Ni2,5CrMo wg EN ISO 26304);
- topnik: OK Flux 10.62 (MgO, CaF₂, Al₂O₃, SiO₂);
- podgrzewanie wstępne: brak;
- energia liniowa $Q \leq 2,0$ kJ/mm;
- temperatura międzywarstwowa: $\leq 250^{\circ}\text{C}$;
- przygotowanie krawędzi blach do spawania (ukosowanie): brak.

W utworzonym według powyższych parametrów złączu, wykonanym zgodnie ze stosownymi zaleceniami normatywnymi, w całym obszarze występują zróżnicowane zmiany mikrostruktury, skutkujące lokalnymi zmianami poziomów twardości i wytrzymałości w stosunku do materiału rodzimego. W celu ich wyeliminowania, po spawaniu przeprowadza się obróbkę cieplną złącza według następujących parametrów:

- normalizowanie: austenitizowanie w temperaturze 900°C przez 60 min, chłodzenie na powietrzu do temperatury otoczenia;
- hartowanie: austenitizowanie w temperaturze 950°C przez 20 min, chłodzenie w wodzie o temperaturze $\leq 30^{\circ}\text{C}$;
- odpuszczanie (odprężanie): w temperaturze 100°C przez 2 godziny, chłodzenie do temperatury otoczenia na wolnym powietrzu.

Zrealizowane według powyższych parametrów zabiegi cieplne pozwoliły uzyskać w całej strefie złącza spawanego morfologicznie zbliżone do siebie mikrostruktury, a także wyeliminowały z całego obszaru złącza spawanego strefy zróżnicowanej twardości. Rozwiązanie według wynalazku pozwala na uzyskanie złącza spawanego cechującego się korzystnymi wskaźnikami wytrzymałościowymi, to jest wytrzymałością na rozciąganie $R_m = 1293$ MPa oraz względną odpornością na

zużywanie ściernie, wyznaczoną w badaniach laboratoryjnych za pośrednictwem testera T07 z udziałem luźnego ścierniwa – elektrokorund 90, o współczynniku (K_b) min. 1,27.

Przykład 2

W przykładzie realizacji drugim według wynalazku, arkusze blachy o grubości 10 mm ze stali S355J0 (1.0553), o wyrażonym w procencie wagowym składzie chemicznym: C – 0,18; Si – 0,40; Mn – 1,50; P – 0,020; S – 0,015; Cu – 0,18; N – 0,010, łączy się metodą SAW (121) spoiną dwustronną, jednościgową, według następujących parametrów gwarantujących prawidłowy przetop blach:

- typ spoiny: BW (doczołowa);
- pozycja spawania: PA (podolna);
- średnica elektrody: 3,0 mm;
- napięcie łuku elektrycznego (spoina 1/2): 31/33 V;
- natężenie prądu (spoina 1/2): 530/630 A;
- biegunowość: DC (+);
- prędkość spawania: ~ 60 cm/min;
- drut elektrodowy: OK Autrod 13.43 (S3Ni2,5CrMo wg EN ISO 26304);
- topnik: OK Flux 10.62 ($MgO, CaF_2, Al_2O_3, SiO_2$);
- podgrzewanie wstępne: brak;
- energia liniowa $Q \leq 2,0$ kJ/mm;
- temperatura międzywarstwowa: $\leq 250^\circ C$;
- przygotowanie krawędzi blach do spawania (ukosowanie): brak.

W utworzonym według powyższych parametrów złączu, wykonanym zgodnie ze stosownymi zaleceniami normatywnymi, w całym obszarze występują zróżnicowane zmiany mikrostruktury, skutkujące lokalnymi zmianami poziomów twardości i wytrzymałości w stosunku do materiału rodzimego. W celu ich wyeliminowania, po spawaniu przeprowadza się obróbkę cieplną złącza według następujących parametrów:

- normalizowanie: austenitzowanie w temperaturze $880^\circ C$ przez 60 min, chłodzenie na powietrzu do temperatury otoczenia;
- hartowanie: austenitzowanie w temperaturze $920^\circ C$ przez 20 min, chłodzenie w wodzie o temperaturze $\leq 30^\circ C$;
- odpuszczanie (odprężanie): w temperaturze $100^\circ C$ przez 2 godziny, chłodzenie do temperatury otoczenia na wolnym powietrzu.

Zrealizowane według powyższych parametrów zabiegi cieplne pozwoliły uzyskać w całej strefie złącza spawanego morfologicznie zbliżone do siebie mikrostruktury, a także wyeliminowały z całego obszaru złącza spawanego strefy zróżnicowanej twardości. Rozwiązanie według wynalazku pozwala na uzyskanie złącza spawanego cechującego się korzystnymi wskaźnikami wytrzymałościowymi, to jest wytrzymałością na rozciąganie $R_m = 1255 \text{ MPa}$ oraz względną odpornością na zużywanie ściernie, wyznaczoną w badaniach laboratoryjnych za pośrednictwem testera T07 z udziałem luźnego ścierniwa – elektrokorund 90, o współczynniku (K_b) min. 1,24.

Przykład 3

W przykładzie realizacji trzecim według wynalazku, arkusze blachy o grubości 10 mm ze stali S355J0 (1.0553), o wyrażonym w procencie wagowym składzie chemicznym: C – 0,15; Si – 0,20; Mn – 1,35; P – 0,015; S – 0,003; Cu – 0,10; N – 0,008, łączy się metodą SAW (121) spoiną dwustronną, jednościegową, według następujących parametrów gwarantujących prawidłowy przetop blach:

- typ spoiny: BW (doczołowa);
- pozycja spawania: PA (podolna);
- średnica elektrody: 3,0 mm;
- napięcie łuku elektrycznego (spoina 1/2): 31/33 V;
- natężenie prądu (spoina 1/2): 530/630 A;
- biegunowość: DC (+);
- prędkość spawania: ~ 60 cm/min;
- drut elektrodowy: OK Autrod 13.43 (S3Ni2,5CrMo wg EN ISO 26304);
- topnik: OK Flux 10.62 ($\text{MgO}, \text{CaF}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$);
- podgrzewanie wstępne: brak;
- energia liniowa $Q \leq 2,0 \text{ kJ/mm}$;
- temperatura międzywarstwowa: $\leq 250^\circ\text{C}$;
- przygotowanie krawędzi blach do spawania (ukosowanie): brak.

W utworzonym według powyższych parametrów złączu, wykonanym zgodnie ze stosownymi zaleceniami normatywnymi, w całym obszarze występują zróżnicowane zmiany mikrostruktury, skutkujące lokalnymi zmianami poziomów twardości i wytrzymałości w stosunku do materiału rodzimego. W celu ich wyeliminowania, po spawaniu przeprowadza się obróbkę cieplną złącza według następujących parametrów:

- normalizowanie: austenitzowanie w temperaturze 880°C przez 60 min, chłodzenie na powietrzu do temperatury otoczenia;
- hartowanie: austenitzowanie w temperaturze 950°C przez 20 min, chłodzenie w wodzie o temperaturze $\leq 30^{\circ}\text{C}$;
- odpuszczanie (odprężanie): w temperaturze 100°C przez 2 godziny, chłodzenie do temperatury otoczenia na wolnym powietrzu.

Zrealizowane według powyższych parametrów zabiegi cieplne pozwoliły uzyskać w całej strefie złącza spawanego morfologicznie zbliżone do siebie mikrostruktury, a także wyeliminowały z całego obszaru złącza spawanego strefy zróżnicowanej twardości. Rozwiązanie według wynalazku pozwala na uzyskanie złącza spawanego cechującego się korzystnymi wskaźnikami wytrzymałościowymi, to jest wytrzymałością na rozciąganie $R_m = 1278 \text{ MPa}$ oraz względną odpornością na zużywanie ściernie, wyznaczoną w badaniach laboratoryjnych za pośrednictwem testera T07 z udziałem luźnego ścierniwa – elektrokorund 90, o współczynniku (K_b) min. 1,25.

Rzecznik Patentowy
mgr Tomasz Szelwiga

PROREKTOR
[Signature]
Prof. Dariusz Łydźba