



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



GRZEGORZ ROGALSKI

PROGNOZOWANIE WŁAŚCIWOŚCI
ZŁĄCZY SPAWANYCH POD WODĄ
METODĄ LOKALNEJ
KOMORY SUCHEJ

GDAŃSK 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Krzysztof J. Kaliński

RECENZENCI

Dariusz Golański

Andrzej Kolasa

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-747-5

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 7,9, ark. druku 7,5, 175/1032

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	5
1. WSTĘP	7
2. HISTORIA I ROZWÓJ SPAWANIA POD WODĄ	8
3. CHARAKTERYSTYKA METOD SPAWANIA POD WODĄ	13
3.1. Spawanie pod wodą metodą mokrą	18
3.1.1. Wpływ zasolenia wody na proces spawania	23
3.1.2. Wpływ ciśnienia na proces spawania	25
3.1.3. Prędkość stygnięcia złączy podczas spawania metodą mokrą	27
3.1.4. Wodór w złączach podczas spawania metodą mokrą	31
3.2. Spawanie pod wodą metodą suchą	33
3.2.1. Spawanie suche izobaryczne	35
3.2.2. Spawanie suche hiperbaryczne	36
3.3. Spawanie pod wodą metodą lokalnej komory suchej	43
4. PROGNOZOWANIE WŁAŚCIWOŚCI ZŁĄCZY SPAWANYCH METODĄ LOKALNEJ KOMORY SUCHEJ	52
4.1. Charakterystyka warunków w lokalnej komorze suchej	52
4.2. Twardość złączy spawanych pod wodą metodą lokalnej komory suchej	67
4.3. Wytrzymałość złączy spawanych pod wodą metodą lokalnej komory suchej	76
4.4. Udarność złączy spawanych pod wodą metodą lokalnej komory suchej	85
4.5. Prognozowanie czasów stygnięcia $t_{8/5}$ przy spawaniu pod wodą metodą lokalnej komory suchej	95
4.6. Opis przekazywania ciepła podczas spawania pod wodą metodą lokalnej komory suchej	103
5. PODSUMOWANIE	108
BIBLIOGRAFIA	111
Streszczenie w języku polskim	119
Streszczenie w języku angielskim	119

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

A	– obszar wrzenia [mm ²]
C_e	– równoważnik węgla [%]
c_p	– ciepło właściwe [kJ/kgK]
C_{sf}	– współczynnik doświadczalny
F_p	– współczynnik korekcyjny
g	– przyspieszenie ziemskie [m/s ²]
H_D	– zawartość wodoru dyfundującego [ml/100 g]
p	– ciśnienie [Pa]
p_r	– ciśnienie zredukowane [Pa]
p_{kr}	– ciśnienie krytyczne [Pa]
Pr	– liczba Prandtla
r_f	– ciepło parowania [kJ/kg]
T	– temperatura [K lub °C]
ΔT_b	– różnica pomiędzy temperaturą ścianki a temperaturą nasycenia cieczy w danych warunkach [K lub °C]
ΔT_e	– różnica pomiędzy temperaturą powierzchni grani a temperaturą nasycenia wody dla danej głębokości (temperatura saturacji) [K lub °C]
$t_{8/5}$	– czas stygnięcia w zakresie temperatur 800–500°C [s]
w	– wilgotność w obszarze spawania [g/m ³]
W_g	– natężenie przepływu gazu osłonowego [l/min]
\dot{q}	– gęstość strumienia ciepła [W/m ²]
q_L (el)	– ilość wprowadzonego ciepła (energia liniowa spawania) [kJ/mm, kJ/cm]
α	– współczynnik przejmowania ciepła [W/m ² K]
Δ	– różnica pomiędzy wartościami
ε_s	– współczynnik emisji
ρ_l	– gęstość cieczy [kg/m ³]
ρ_v	– gęstość gazu [kg/m ³]
σ	– napięcie powierzchniowe [N/m]
ω	– prędkość stygnięcia złącza [°C/s]
MLKS	– spawanie pod wodą metodą lokalnej komory suchej

Rozdział 1

WSTĘP

Procesy spawania oraz procesy pokrewne spawaniu podlegają ciągłemu i dynamicznemu rozwojowi. Wynika to z postępu w technologiach wytwarzania, związanych z różnymi sektorami przemysłowymi. Szeroko pojęte technologie spajania znajdują zastosowanie do łączenia, regeneracji oraz napraw różnego rodzaju konstrukcji. Obecny stan wiedzy oraz aktualny poziom technologiczny pozwalają na ich stosowanie nie tylko w środowisku powietrznym, ale również w przestrzeni kosmicznej oraz pod wodą [102, 103].

Zgodnie z normami dotyczącymi systemów zarządzania jakością, np. PN-EN ISO 9001, procesy spawalnicze są uznawane za procesy specjalne, co determinuje konieczność kontroli od etapu projektowania, poprzez etap wytwarzania, a kończąc na wydaniu produktu zleconodawcy. Z tego względu, niezależnie od procesu oraz środowiska spawania, złącza spawane muszą spełniać ściśle określone kryteria akceptacji. Najczęściej wynikają one ze stosowanych przepisów lub norm przedmiotowych, np. dotyczących projektowania, oraz specyfikacji technicznych klienta. Te standardy dotyczą spawania nie tylko na powietrzu, ale również pod wodą. Zaprojektowanie procesu spawania wymaga szczegółowej analizy wielu czynników, tzw. zmiennych istotnych, wpływających na właściwości złączy spawanych, które bardzo często stanowią o trwałości eksploatacyjnej wytwarzanej konstrukcji. Podstawowymi zmiennymi istotnymi są gatunek materiału (grupy materiałowe, grubość i postać materiału) oraz środowisko spawania (powietrze, woda). Wymienione czynniki wpływają na dobór pozostałych zmiennych zasadniczych, np. procesu spawania, typu złącza oraz rodzaju spoiny, pozycji spawania, ilości wprowadzonego ciepła, rodzaju i postaci materiałów dodatkowych do spawania, temperatury podgrzewania wstępnego i międzyścięgowej itp. Nawet w przypadku spawania na powietrzu dobór optymalnych parametrów wymaga dogłębnej analizy, która uwzględni czynniki metalurgiczne, konstrukcyjne oraz technologiczne. Przeniesienie procesu spawania pod wodę jeszcze bardziej intensyfikuje te działania. Brak informacji dotyczących możliwości prognozowania właściwości złączy spawanych pod wodą metodą lokalnej komory suchej powoduje, że niezbędne jest opracowanie zależności pozwalających na ich szacowanie oraz wskazanie umożliwiających to narzędzi i metodologii. Jest to tym ważniejsze, że w obszarze, w którym znajdują zastosowanie procesy spawania pod wodą, dochodzi do bardzo dynamicznej wymiany materiałów konstrukcyjnych, zmiany technologii wytwarzania oraz wymagań jakościowych. Ewolucja wymienionych czynników wymusza ciągłe doskonalenie stosowanych technologii oraz rozwój nowych.