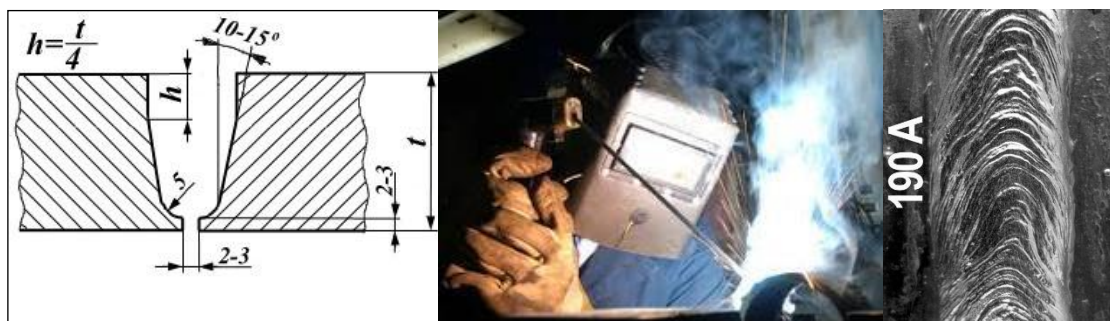


Materiały pomocnicze do ćwiczeń laboratoryjnych
(do użytku wewnętrznego)



MZL-UZY1: Wyznaczanie uzysku stopiwa, wydajności topienia i współczynnika topienia elektrod otulonych.



Opracował: dr inż. Jarosław Grześ

Warszawa 2023

Literatura podstawowa:

1. Ferenc K., Spawalnictwo, WNT, Warszawa 2017
2. Praca zbiorowa: Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo, T. 1,2, WNT, Warszawa, 2017
3. PN-EN 2401:2018-11 Materiały dodatkowe do spawania - Elektrody otulone - Określenie uzysku stopiwa, wydajności topienia i współczynnika topienia; wersja angielska (dostępna na ćwiczeniu).
4. Instrukcje obsługi urządzeń wykorzystywanych na ćwiczeniu (dostępne na ćwiczeniu).
5. Instrukcja i materiały dostępne są na stronie Zakładu Inżynierii Spajania:
<https://www.mt.pw.edu.pl/zis/Dydaktyka/Pomoce-dydaktyczne>

1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z procesami ręcznego spawania i napawania elektrodami otulonymi oraz ze znaczeniem i wyznaczaniem wybranych wskaźników technologiczno–ekonomicznych elektrod otulonych takich jak:

- uzysk elektrody i uzysk stopiwa,
- wydajność topienia,
- współczynnik topienia.

2. WYMAGANE WIADOMOŚCI

Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia należy:

- a) wykazać się znajomością następujących zagadnień:
- istota metody ręcznego spawania elektrodą otuloną (*ang. MMAW - Manual Metal Arc Welding*),
 - rodzaje otulin elektrod otulonych i ich skład chemiczny,
 - zadania spełniane przez otulinę,
 - źródła prądu do ręcznego spawania elektrodą otuloną,
 - wskaźniki technologiczno-ekonomiczne spawania.

b) zapoznać się, pod nadzorem prowadzącego zajęcia, z budową, obsługą i warunkami BHP stanowiska laboratoryjnego, którego zasadniczymi elementami składowymi są: prostownik spawalniczy, uchwyt elektrodowy, uchwyt próbki, stalowa płyta próbna, woltomierz, amperomierz (klasa 2), waga, stoper, taśma miernicza.

3. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

3.1 Charakterystyka elektrod otulonych

Metoda ręcznego spawania elektrodą otuloną (111 wg PN-EN ISO 4063) może być zastosowana do spawania większości materiałów konstrukcyjnych. Jest metodą uniwersalną, umożliwiającą spawanie zarówno materiałów cienkich (powyżej 1,5 mm) jak i grubych oraz wszystkich rodzajów złączy, niezależnie od pozycji spawania. Niezbędnym do stopienia elektrody otulonej i materiału spawanego źródłem ciepła jest łuk elektryczny ($T \approx 5000 \text{ }^\circ\text{C}$). Z zasady proces spawania elektrodą otuloną jest procesem ręcznym, stąd charakteryzuje się niewielkimi prędkościami spawania i stosunkowo niską wydajnością. Wartości podstawowych parametrów spawania tzn. natężenie prądu spawania I_{sp} i napięcie prądu spawania U_{sp} (dla pozycji spawania podolnej) można wstępnie wyznaczyć na podstawie wzorów:

$$I_{sp} = (30 \div 40) \cdot \phi_{el}$$
$$U_{sp} \approx 20 + 0,04 \cdot I_{sp}$$

gdzie: ϕ_{el} - średnica rdzenia elektrody (elektrody otulonej).

Elektrody otulone są wytwarzane w postaci pręta metalowego o określonej średnicy i długości (średnica pręta (elektrody) ϕ_{el} : 1.6, 2.0, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0, 6.0 mm; długość elektrody l_{el} : 250, 300, 350, 400 i 450 mm), pokrytego specjalną masą o określonych właściwościach – otuliną (wyróżniamy elektrody cienko-, średnio- i grubootulone). Materiał rdzenia elektrody otulonej

przeznaczonej do spawania na ogół współgra z materiałem spawanym (rodzaj i skład chemiczny). W przypadku elektrod otulonych przeznaczonych do napawania materiał rdzenia z reguły ma inne właściwości i skład chemiczny niż materiał podłoża.

Do zadaniem otuliny należy:

- osłona łuku i ciekłego metalu przed dostępem atmosfery, a w szczególności tlenu i azotu,
- wprowadzenie do obszaru spawania pierwiastków odtleniających, wiążących azot i rafinujących ciekły metal spoiny,
- wytworzenie powłoki żuźlowej na powierzchni ciekłego jeziora spoiny i krzepnącego metalu spoiny,
- regulacja składu chemicznego spoiny.

Skład chemiczny otulin bazuje na następujących grupy składników:

- gazotwórcze (wytworzenie odpowiedniej ilości gazów),
- żuźlotwórcze (umożliwienie reakcji metalurgicznych ciekłego metalu i jego osłona, formowanie lica spoiny, spowolnienie szybkości chłodzenia),
- stabilizujące jarzenie się łuku (pierwiastki o niskim potencjale jonizacyjnym np. wapń, potas, sód),
- odtleniające ciekły metal (np. dla stali potas, sód, magnez, wapń, tytan, aluminium, krzem),
- stopowe (sproszkowane metale, żelazostopy),
- wiążące (np. szkło wodne).

Pod względem charakteru oddziaływania metalurgicznego otuliny wyróżniamy pięć podstawowych grup: kwaśne, celulozowe, zasadowe, rutyłowe i mieszane.

Otulina kwaśna (oznaczenie A) – zawiera dużą ilość składników odtleniających (tlenki Fe, Mn, Si) i żelazomanganu, pozwala na uzyskanie spoin o gładkim, płaskim licu i o przeciętnych własnościach mechanicznych. Elektrodamy o otulinie kwaśnej można spawać w pozycji podolnej, nabocznej i warunkowo w pozycjach przymusowych. Spawa się prądem przemiennym lub stałym o biegunowości ujemnej (minus na elektrodzie). Stopiwo elektrod kwaśnych jest podatne na pęknięcia krystalizacyjne i zawiera dużo wodoru (>30ml/100g stopiwa), Z tego względu stosuje się je do spawania stali niestopowych o dobrej spawalności. Przy prawidłowym przechowywaniu elektrody kwaśne nie wymagają suszenia przed spawaniem.

Otulina celulozowa (oznaczenie C) – zawiera dużą ilość substancji palnych (np. celulozę), dzięki intensywnemu jarzeniu się łuku pozwala na spawanie w trudnych warunkach montażowych w terenie. Elektrodamy o otulinie celulozowej można spawać we wszystkich pozycjach w tym szczególnie w pozycji pionowej z góry w dół. Elektrody celulozowe nie są wrażliwe na jakość przygotowania złącza i umożliwiają spawanie z dużą wydajnością. Stopiwo tych elektrod zawiera dużo wodoru i posiada niskie właściwości mechaniczne. Elektrody stosuje się głównie do spawania rurociągów ze stali niestopowych. Spawa się prądem przemiennym lub stałym o biegunowości dodatniej (plus na elektrodzie). Elektrody celulozowe nie wymagają suszenia przed spawaniem.

Otulina zasadowa (oznaczenie B) – zawiera znaczną ilość węglanów wapnia i magnezu oraz fluorytu, pozwala na uzyskanie bardzo dobrych właściwości mechanicznych spoin dzięki wysokiej plastyczności stopiwa, również w niskiej temperaturze oraz odporności na pęknięcia gorące (mała zawartość wodoru <10 ml/100g stopiwa, wysoka czystość metalurgiczna). Elektrodamy z tą otuliną można spawać we wszystkich pozycjach z wyjątkiem pionowej z góry w dół. Spawa się (na ogół) prądem stałym z biegunowością dodatnią na elektrodzie. Nie należy ich przeciążać prądowo. Zalecane są do spawania stali trudno spawalnych. Elektrody zasadowe wymagają suszenia przed spawaniem przez około 1-3h w temperaturze około 300÷400°C chyba, że zostały dostarczone w specjalnych, szczelnych opakowaniach próżniowych po wysuszeniu przez producenta.

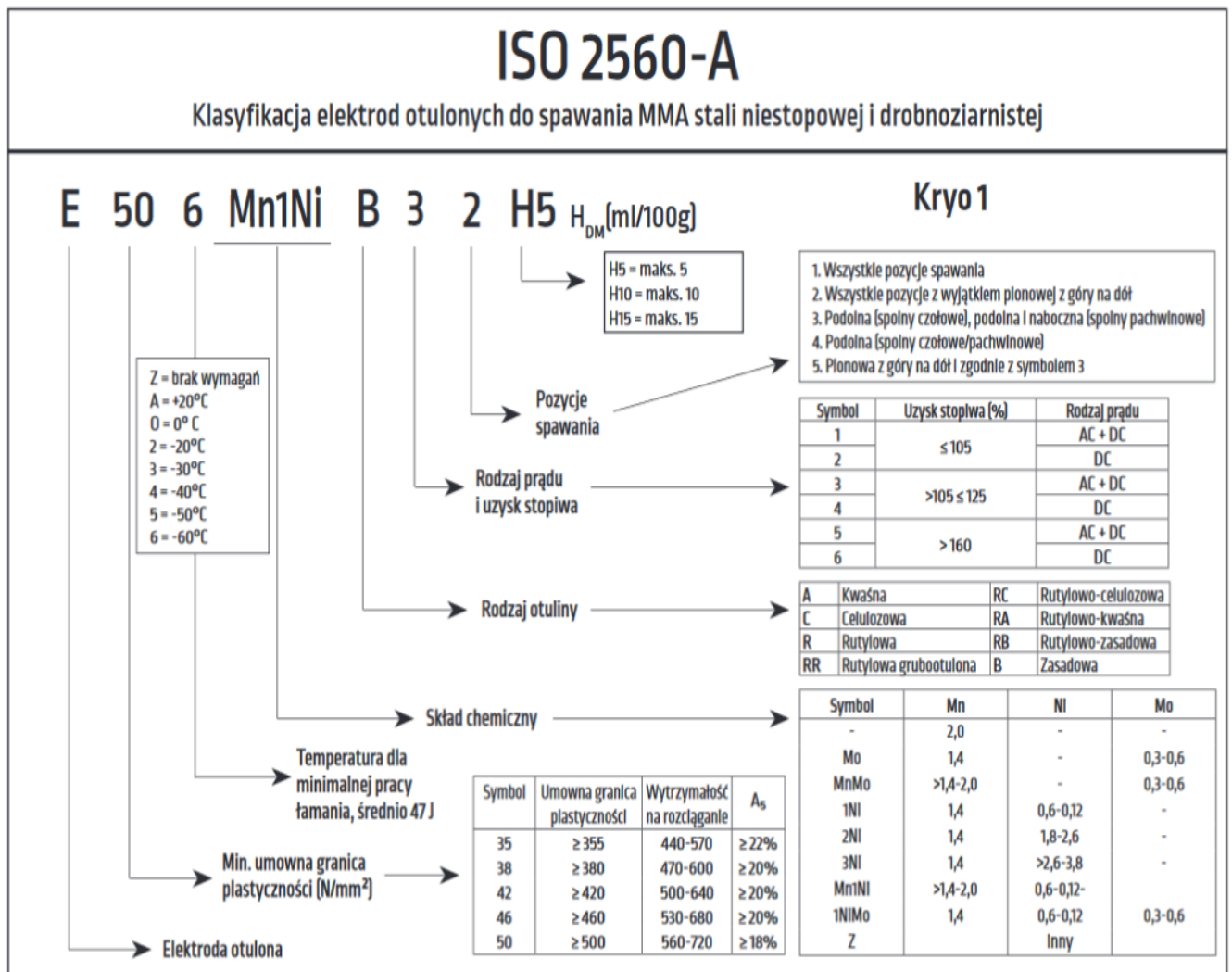
Otulina rutyłowa (oznaczenie R) - to najbardziej popularna otulina, zawiera dużo TiO₂ (rutyłu), jej zastosowanie jest uniwersalne i łatwe, pozwala na spawanie prawie we wszystkich pozycjach z wyjątkiem pionowej z góry w dół. Elektrodamy rutyłowymi można spawać elementy

cienkie. Są stosunkowo wydajne. Stopiwo zawiera wodór do ok. 30ml/100g. Uzyskuje się spoiny o gładkiej powierzchni, estetyczne a proces jest stabilny i powstaje mała ilość rozprysków, zaś żużel jest łatwy do usunięcia. Elektrodamy rutyłowymi można spawać prądem przemiennym lub stałym o biegunowości ujemnej (minus na elektrodzie). Nie zaleca się ich do spawania stali drobnoziarnistych, stali o ograniczonej spawalności, o znacznych grubościach oraz narażonych na pękanie kruche. Przy prawidłowym przechowywaniu elektrody rutyłowe nie wymagają suszenia przed spawaniem.

Grupa otulin mieszanych – w ramach tych otulin wytwarza się otuliny rutyłowo-kwaśne (**RA**), rutyłowo-zasadowe (**RB**) i rutyłowo-celulozowe (**RC**) o właściwościach w przybliżeniu pośrednich w odniesieniu do tworzących je typów otulin podstawowych.

3.2 Klasyfikacja elektrod otulonych

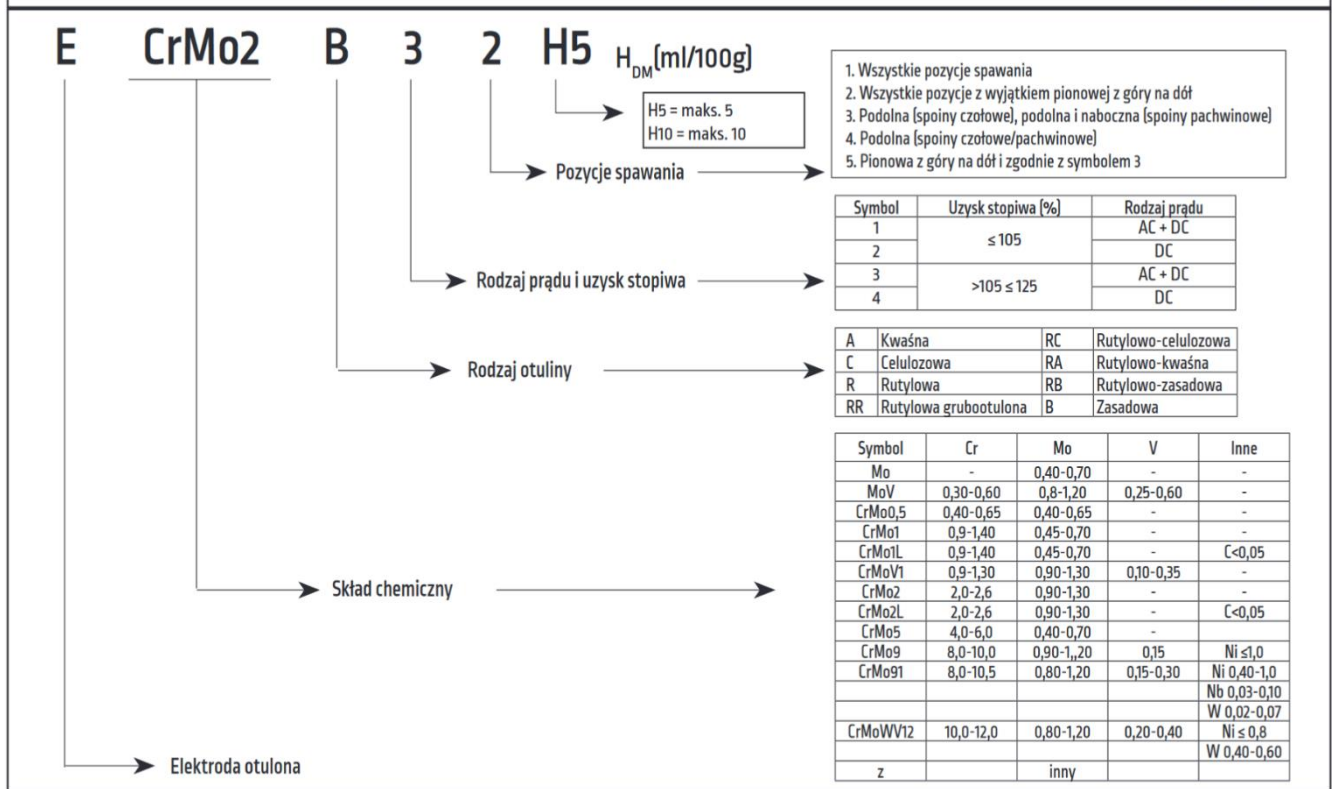
Poniżej przedstawiono klasyfikację wg ISO elektrod otulonych do spawania wybranych grup materiałów. W katalogach producentów spotyka się jeszcze inne oznaczenia np. wg AWS - *The American Welding Society*, ASME - *The American Society of Mechanical Engineers*, GOST - *Gosudarstwiennyj standart*). Praktycznie każdy z producentów stosuje również własne oznaczenia.



ISO 3580-A

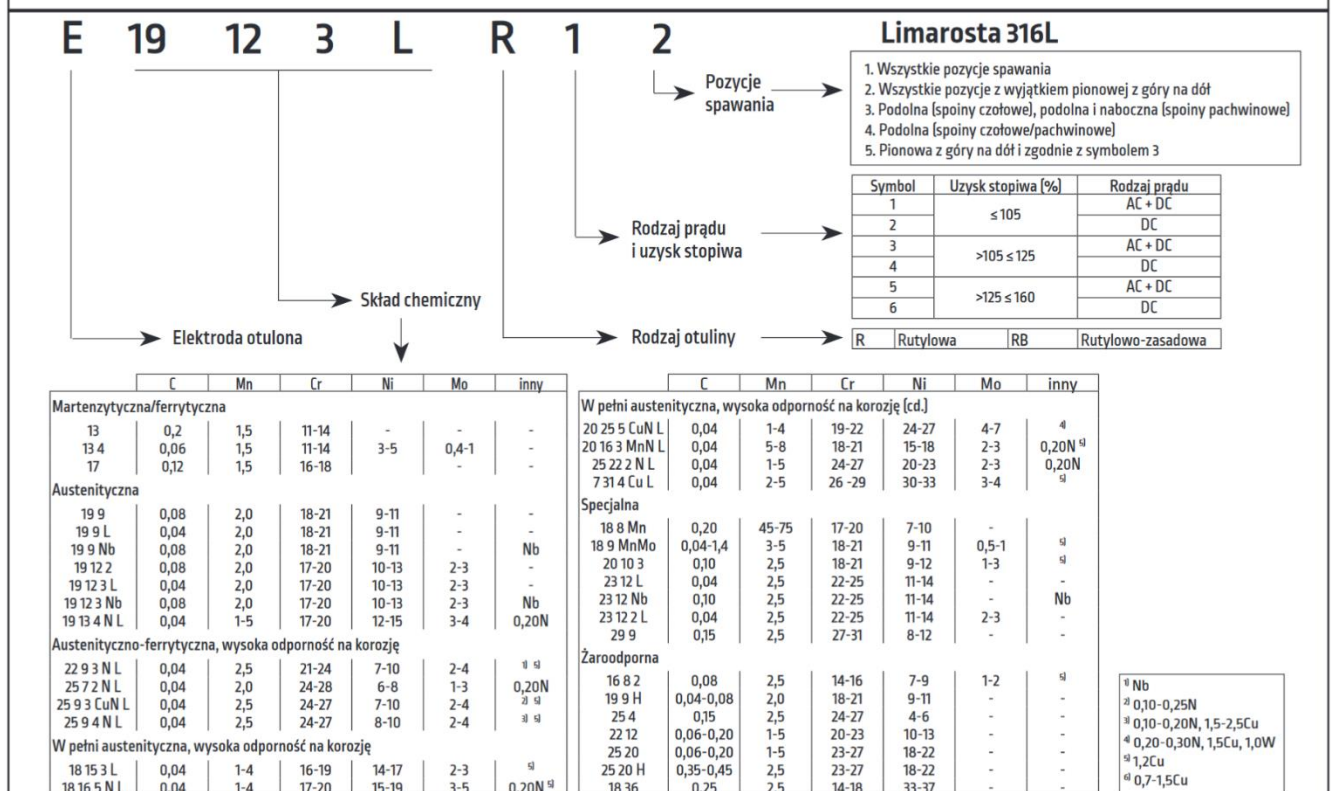
Klasyfikacja elektrod otulonych do spawania MMA stali odpornej na pękanie

SL 20G



ISO 3581-A

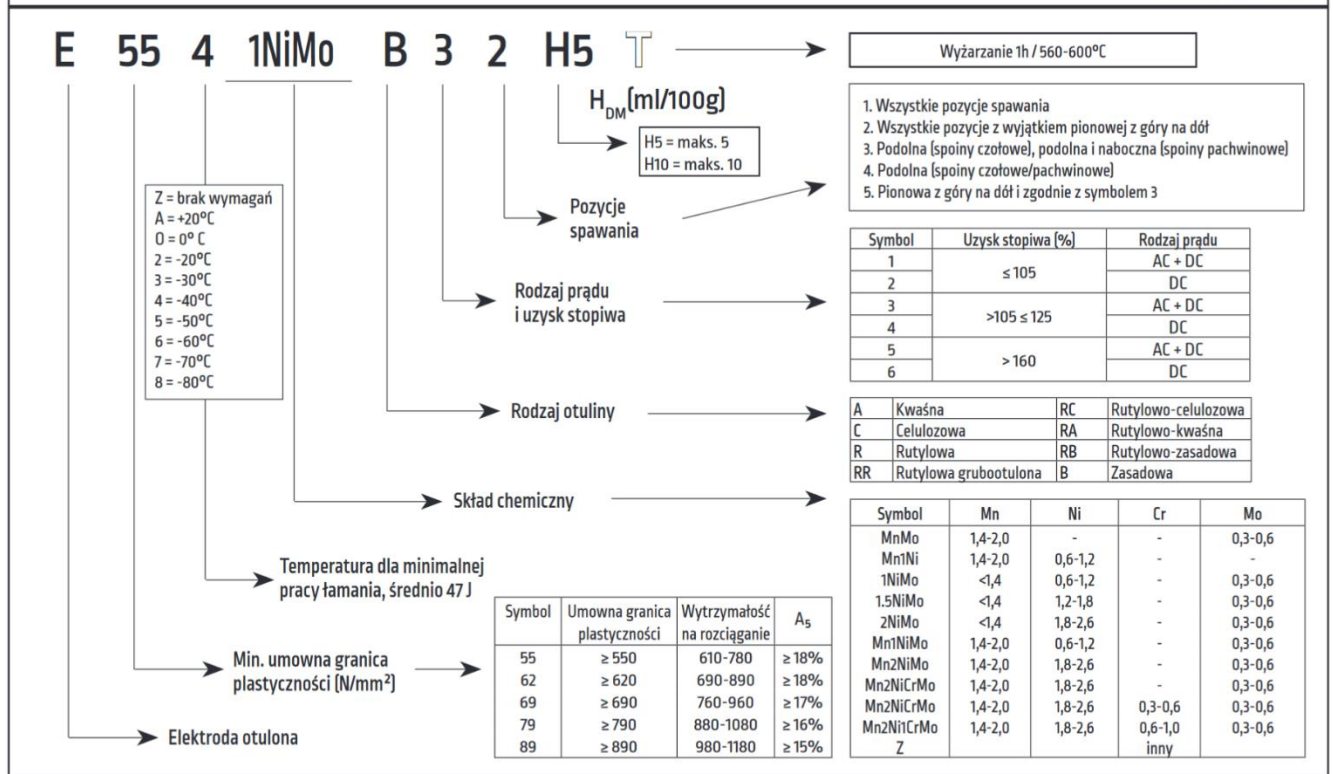
Klasyfikacja elektrod otulonych do spawania MMA stali nierdzewnej i żaroodpornej



EN-ISO 18275-A

Klasyfikacja elektrod otulonych do spawania MMA stali o podwyższonej wytrzymałości

Conarc 70G



3.3 Wskaźniki technologiczno-ekonomiczne elektrod otulonych

Do grupy wskaźników technologiczno-ekonomicznych charakteryzujących elektrody otulone zaliczamy:

- uzysk elektrody (%),
- uzysk stopiwa (%),
- współczynnik topienia elektrody (g/Ah),
- wydajność topienia elektrody (g/h).

Wskaźniki technologiczno-ekonomiczne umożliwiają określenie czasów spawania, zużycia materiałów dodatkowych oraz kosztów procesu. Na ich podstawie można określić efektywność procesu spawania elektrodą otuloną.

Uzysk elektrody

Określony jest stosunkiem uzyskanej masy stopiwa G_{st} [g] z elektrody do masy całkowitej (wraz z otuliną) elektrody G_{el} [g]:

$$U_{el} = \frac{G_{st}}{G_{el}} \cdot 100\%$$

W tabelicy 3.3.2. przedstawiono wartości uzysku elektrody dla wybranych elektrod otulonych.

Tablica 3.3.1. Uzysk elektrody dla wybranych elektrod otulonych

Oznaczenie elektrody wg wg producenta / PN-EN ISO 2560	Uzysk elektrody, [%]
ER 142 / E 35 AR 12	ok. 90
ER 146 / E 38 0 RC 11	ok. 90
EA 146 / E 35 0 RA 22	ok. 86
EB 146 / E 38 3 B 42	ok. 110
EB 150 / E 42 4 B 42	ok. 110
EB 155 / E 46 2 B 42	ok. 110
ES 10 HA / E 42 A Z RA 22	ok. 90
ERW 160 / E 42 0 RR 53	ok. 160

Uzysk stopiwa

Określony jest stosunkiem uzyskanej masy stopiwa G_{st} [g] z elektrody do masy stopionego rdzenia elektrody G_{rd} [g]:

$$U_{sel} = \frac{G_{st}}{G_{rd}} \cdot 100\%$$

Współczynnik topienia elektrody

Określa masę stopiwa odniesioną do 1 ampera i 1 godziny spawania [g/(Ah)]. Jego wartość dla elektrod otulonych zawiera się w granicach 5÷14 g/(Ah).

$$\alpha_{el} = \frac{G_{st}}{I_{sp} \times t_{sp}}$$

gdzie: I_{sp} – natężenie prądu spawania [A], t_{sp} – czas spawania [h].

Wydajność topienia elektrody

Wydajność stapiania obliczymy mnożąc współczynnik stapiania elektrody przez natężenie prądu spawania czyli masę stopiwa ułożonego w ciągu 1 godziny nieprzerwanego spawania. Wydajność stapiania zależy od metody spawania i parametrów spawania.

W tabeli 3.3.2. przedstawiono wartości współczynnika topienia i średnią wydajność topienia dla wybranych elektrod otulonych.

Tabela 3.3.2. Współczynnik i wydajność topienia wybranych elektrod otulonych

Oznaczenie elektrody wg producenta / PN-EN ISO 2560	Współczynnik topienia [g/Ah]	Średnia wydajność topienia [g/h] dla elektrody otulonej o średnicy [mm]:				
		2,5	3,25	4	5	6
ER 142 / E 35 AR 12	ok. 9	675	990	-	-	-
ER 146 / E 38 0 RC 11	ok. 10	650	1100	1500	2000	2500
EA 146 / E 35 0 RA 22	ok. 9,2	736	1104	1564	2024	2392
EB 146 / E 38 3 B 42	ok. 10,8	864	1296	1728	2268	2700
EB 150 / E 42 4 B 42	ok. 11	880	1320	1760	2310	2750
EB 155 / E 46 2 B 42	ok. 10	800	1100	1600	2100	2500
ES 10 HA / E 42 A Z RA 22	ok. 10,2	-	1122	1632	-	-
ERW 160 / E 42 0 RR 53	ok. 13,5	-	2025	2700	3780	-

4. PRZEBIEG I WYKONANIE ĆWICZENIA

W czasie wykonywania ćwiczenia studenci realizują trzy zadania. Przed przystąpieniem do ćwiczenia prowadzący wskaże gatunek(i) badanych elektrod i ich średnicę.

Zadanie 1. Przygotowanie płyt(y) i elektrod otulonych do spawania:

1. Przed przystąpieniem do spawania sprawdzić stanowisko oraz poprawność połączeń.
2. Przygotować do spawania wymaganą ilość płyt próbnych i elektrod otulonych (dla każdego gatunku badanej elektrody i danej średnicy należy przeprowadzić spawanie na oddzielnej płycie próbnej):
 - w przypadku płyty próbnej należy sprawdzić jej wymiary, czystość powierzchni (musi być pozbawiona śladów korozji, farb, plam oleju itd.); w razie potrzeby należy ją oczyścić,
 - każdą elektrodę otuloną, która będzie wykorzystana do spawania, należy sprawdzić pod kątem wilgotności oraz jakości otuliny (wszelkie zabrudzenia, ślady wilgoci, przerwy w jej ciągłości, odpryski itp. są niedopuszczalne).
3. Po przygotowaniu płyt(y) i elektrod należy dokonać ważenia płyty próbnej z dokładnością $\pm 1\text{g}$. Masę płyty próbnej oznaczyć G_{pt} .

Zadanie 2. Wykonanie spawania płyty próbnej i pomiarów

1. Jeżeli przewidywana masa napoiny uzyskana z pojedynczej elektrody przekracza 100g, to do badania należy użyć trzech elektrod; w przeciwnym wypadku należy wykonać napoinę stosując pięć elektrod.
2. Przed spawaniem należy zważyć elektrody z dokładnością $\pm 1\text{g}$ Sumaryczną masę elektrod otulonych należy oznaczyć G_{el} . Na elektrodach otulonych należy zaznaczyć odległość **50 mm** od strony mocowania elektrody w uchwycie elektrodowym.
3. Stosownie do ilości badanych elektrod (trzy lub pięć) należy przygotować inne elektrody tego samego rodzaju i ostrożnie usunąć ich otulinę. Otrzymane w ten sposób rdzenie elektrod należy zważyć z dokładnością $\pm 1\text{g}$, a sumaryczną ich masę oznaczyć G_{rdel} (Uwaga: wg normy dopuszczalne jest określenie G_{rdel} poprzez dokonanie pomiaru sumarycznej długości elektrod L_{rd} i ich średnicy, a następnie, po przyjęciu gęstości $7,85\text{ g/cm}^3$, obliczenie masy rdzeni elektrod).
4. Przyjąć prąd spawania przemienny AC lub stały DC o biegunowości zalecanej przez producenta.
5. Wyznaczyć prąd spawania przyjmując jego wartość równą 90% maksymalnej wartości zakresu przewidzianego przez producenta dla badanych elektrod otulonych. Podczas spawania wartość natężenia prądu spawania należy kontrolować za pomocą miernika.
6. Zamocować badaną elektrodę otuloną w uchwycie elektrodowym,
7. Zamocować płytę próbną w uchwycie.
8. Wykonać spawanie (napawanie) układając ściegi na płycie próbnej. Podczas spawania daną elektrodą niedopuszczalne są jakiegokolwiek przerwy. Spawanie należy prowadzić tak długo, aż pozostanie elektroda (ogarek) o długości 50 mm. Czas jarzenia łuku należy mierzyć z dokładnością $\pm 0,2\text{ s}$. Spawanie powtórzyć dla pozostałych dwóch (czterech) elektrod otulonych przestrzegając następujących zasad:

- po zakończeniu spawania daną elektrodą płytę należy schłodzić w wodzie,
 - usunąć żużel i odpryski z powierzchni płyty próbnej,
 - temperatura międzyściągowa nie powinna przekraczać 100 °C,
 - przed kontynuacją spawania płytę należy wysuszyć.
9. Po zakończeniu spawania należy dokonać ważenia pozostałych po spawaniu końcówek elektrod (ogarków) z dokładnością $\pm 1\text{g}$ i określić ich sumaryczną masę G_{elo} .
 10. Powtórzyć ważenie po usunięciu otuliny i określić sumaryczną masę rdzeni ogarków G_{rdo} .
 11. Zmierzyć długość rdzeni pozostałych końcówek elektrod z dokładnością $\pm 1\text{ mm}$ i określić sumaryczną ich długość L_{rdo} .
 12. Po zakończeniu wykonywania płyty próbnej należy ją schłodzić do temperatury otoczenia, oczyścić ze wszelkich pozostałości żużla i odprysków, a następnie zważyć z dokładnością $\pm 1\text{g}$. Masę płyty próbnej z napoiną oznaczyć G_{ptnap} .

Zadanie 3. Opracowanie wyników pomiarów i wykonanie sprawozdania z ćwiczenia

Przedmiot: MAIUS, BEKMA SPRAWOZDANIE Z ĆWICZENIA		Data ćwiczenia
Ćwiczenie	Wyznaczanie uzysku stopiwa, wydajności topienia i współczynnika topienia elektrod otulonych	
Zespół, dzień tygodnia, godzina/...../	Ocena	Uwagi

Zadanie 1. Przygotowanie płyty próbnej i elektrod otulonych do badania:

1. *Dane spawarki zastosowanej w badaniach*
2. *Opis płyty próbnej (materiał, wymiary, sposób układania poszczególnych ściegów, masa płyty).*
3. *Zestawienie i charakterystyka użytych w badaniach elektrod otulonych (gatunek, klasyfikacja wg ISO, rodzaj otuliny, średnica, długość).*

Zadanie 2. Zestawienie wyników pomiarów

1. *W tabeli należy umieścić wartości przyjętych wielkości i poszczególnych pomiarów:.*
 - rodzaj prądu spawania i jego wartość założona i zmierzona,
 - wyniki ważenia płyty próbnej, elektrod i ich rdzeni,
 - wyniki pomiarów długości,
 - wyniki pomiarów czasu jarzenia łuku.

Zadanie 2. Opracowanie wyników pomiarów:

1. *Dokonać niezbędnych obliczeń:*
 - masy uzyskanej napoiny $G_{st} = G_{ptnap} - G_{pt}$
 - masy G_{rd} rdzeni stopionych w czasie spawania (napawania): $G_{rd} = G_{rdet} - G_{rdo}$
 - wartości wskaźników technologiczno-ekonomicznych wg wzorów podanych w instrukcji do ćwiczenia
2. *Dokonać analizy otrzymanych wyników, porównać je z danymi katalogowymi. W przypadku wykorzystania w badaniach elektrod o różnych otulinach lub średnicach należy określić ich wpływ na wartości wskaźników technologiczno-ekonomicznych*
3. *Opracować wnioski .*

Literatura uzupełniająca i rozszerzająca:

1. Ferenc K., Grześ J. i inni (praca zbiorowa) „Technika spawalnicza w praktyce. Poradnik inżyniera konstruktora i technologa.” Rozdział 6.8: „Dobór parametrów spawania elektrodą otuloną”, Verlag Dashofer, Warszawa 2019 (cykl wydawniczy)