

Piotr Adamiec  
Jerzy Dziubiński  
Marceli Mazur

Instytut Metaloznawstwa  
i Spawalnictwa

**BADANIE KRUCHOŚCI POŁĄCZEŃ ZE STALI 18G2VA  
SPAWANYCH RĘCZNIE ELEKTRODAMI OTULONYMI  
I AUTOMATYCZNIE ŁUKIEM KRYTYM**

**Streszczenie.** Przeprowadzono badania kruchości połączeń ze stali 18G2VA spawanych ręcznie elektrodami otulonymi i automatycznie łukiem krytym. Spoiny wykonano stosując dla danych warunków minimalną i maksymalną energię liniową łuku. W oparciu o badania udarności i próbę Niblink ustalono, że ze względu na odporność połączeń spawanych na kruche pękanie stal 18G2VA najkorzystniej jest spawać możliwie niskimi energiami liniowymi łuku.

**Wstęp**

Stosowanie w przemyśle stali o podwyższonej wytrzymałości (SPW) stwarza konieczność zwrócenia uwagi na problem kruchości połączeń spawanych. Pękanie kruche zachodzi na ogół przy bardzo małych odkształceniach plastycznych i często przy naprężeniach niższych od granicy plastyczności. Połączenie spawane bardzo często spełnia warunki niezbędne do zapoczątkowania pęknięcia kruchego (karb, wieloosiowy stan naprężeń, obniżona temperatura). W przypadku stali SPW wrażliwych na procesy wytwarzania i przetworstwa problem odporności połączeń spawanych na pęknięcia kruche jest szczególnie ważny.

Istnieje szereg prób oceny skłonności na kruche pękanie, lecz żadna z nich nie uwzględnia wszystkich czynników występujących w rzeczywistych konstrukcjach [1, 2].

Najczęściej spotykaną metodą oceny kruchości jest próba udarności stosowana przez wszystkie towarzystwa klasyfikacyjne. Do oceny kruchości połączeń spawanych, zwłaszcza w warunkach laboratoryjnych, stosuje się również próbę Niblink [3, 4]. Te dwie próby zastosowano w niniejszych badaniach do oceny kruchości połączeń ze stali 18G2VA spawanych przy krańcowo różnych energiach liniowych łuku.

Badania uzupełniono zmodyfikowaną próbą Čabelki w celu umiejscowienia obszaru o podwyższonej kruchości w strefie wpływu ciepła (SWC).




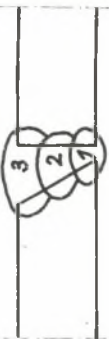
Tablica 1

Skład chemiczny i własności mechaniczne blach  
i materiałów dodatkowych do spawania

| Materiał           | Skład chemiczny (%) |      |       |       |                  |                  |                                |       |   |   | Własności mechaniczne |  |                   |                            |  | Uwagi |
|--------------------|---------------------|------|-------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-------|---|---|-----------------------|--|-------------------|----------------------------|--|-------|
|                    | C                   | Mn   | Si    | V     | Al               | N <sub>2</sub>   | P                              | S     | R <sub>m</sub><br>kG/mm <sup>2</sup><br>(Nm/mm <sup>2</sup> ) | Fe<br>kG/mm <sup>2</sup><br>(Nm/mm <sup>2</sup> ) | A5<br>%               | KV -40°<br>kGm/cm <sup>2</sup><br>(Nm/m <sup>2</sup> ) | zgi-<br>manie     |                            |  |       |
| 18G2A<br>g = 16 mm | 0,17                | 1,47 | 0,42  | 0,20  | 0,05             | 0,015            | 0,027                          | 0,035 | 70,5<br>(680)   | 50,0<br>(490)                                     | 24,5                  | 6,1<br>(5,95·10 <sup>5</sup> )                         | dotat-<br>ni      | Atest<br>hutr.<br>10618    |  |       |
|                    | 0,21                | 1,96 | 0,50  | 0,15  | -                | -                | 0,026                          | 0,017 | 72,0<br>(705)   | 51,0<br>(500)                                     | -                     | 1,6<br>(1,53·10 <sup>5</sup> )                         | 180°              | wg ana-<br>lizy            |  |       |
| SP4                | 0,07                | 2,06 | 0,07  | -     | -                | -                | 0,019                          | 0,020 | -   | -   | -                     | -  | -                 | Atest<br>hutr.<br>1364/CdA |  |       |
|                    | 0,12                | 1,7  | 0,07  | -     | -                | -                | 0,024                          | 0,020 | -   | -   | -                     | -  | -                 | wg ana-<br>lizy            |  |       |
| EB150              | 0,08                | 1,1  | 0,5   | -     | -                | -                | 0,03                           | 0,03  | 52-57<br>(510-560)  | 40,46<br>(390-450)                                | 28-34                 | -  | 180°              | [6]                        |  |       |
|                    | SiO <sub>2</sub>    | MnO  | CaO   | MgO   | TiO <sub>2</sub> | CaF <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   |   |   |                       |  |                   |                            |  |       |
| TAS11              | 26-30               | 5-8  | 12-16 | 12-15 | 6-10             | 9-13             | 14-18                          | 1,5   |   |   |                       |  |                   |                            |  |       |
|                    | 27,3                | 6,5  | 12,3  | 15,4  | 9,3              | 10,6             | 14-15                          | 1,3   |   |   |                       |  |                   |                            |  |       |
|                    |                     |      |       |       |                  |                  |                                |       |   |   |                       |  | PN-67/<br>H-69350 | wg<br>atestu               |  |       |

Tablica 2

## Warunki spawania płyt próbnych

| Oznaczenie | Materiały dodatkowe | Sposób ułożenia warstw   | Średnica drutu elektrod $\phi$ (mm) | Ilość ściegów | Natężenie prądu I (A) | Napięcie żuku U (V) | Szybkość spawania $V_{sp}$ (cm/s) | Energia liniowa żuku E (KJ/cm) | Rodzaj prądu, biegunowość |
|------------|---------------------|--|-------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1          | EB150               |  | 3,25                                | 5             | 130                   | 24                  | 0,25                              | 12,5                           | stały "+"                 |
| 2          | EB150               |  | 5                                   | 3             | 180                   | 24                  | 0,25                              | 11,3                           | stały "+"                 |
| 3          | TAS11 SP4           |  | 3                                   | 8             | 350                   | 31                  | 0,78                              | 14,0                           | przemienny                |
| 4          | TAS11 SP4           |  | 5                                   | 5             | 860                   | 34                  | 0,83                              | 35,2                           | przemienny                |

Badania własne

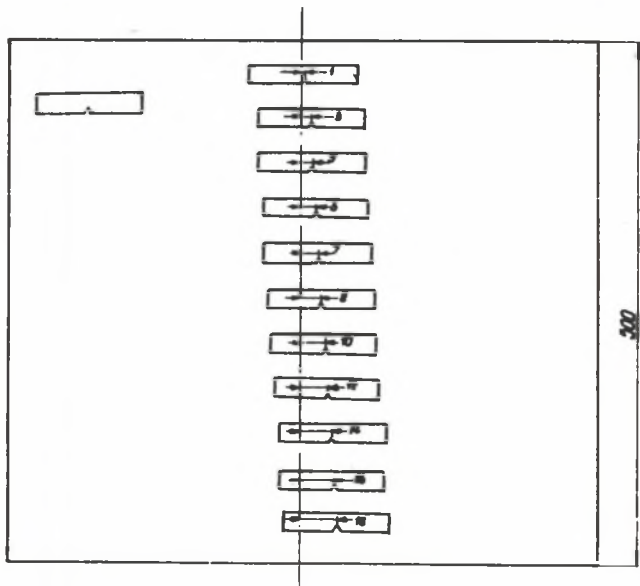
Badania przeprowadzono na blachach w gatunku 18G2VA o grubości 16 mm spawanych ręcznie i automatycznie przy zastosowaniu maksymalnej i minimalnej energii liniowej łuku. Do spawania ręcznego zastosowano elektrody EB150, do spawania automatycznego drut SP4 i topnik TAST1. Skład chemiczny i własności mechaniczne blach i materiałów dodatkowych podano w tabl.1.

Przygotowanie i wykonanie płyt próbnych

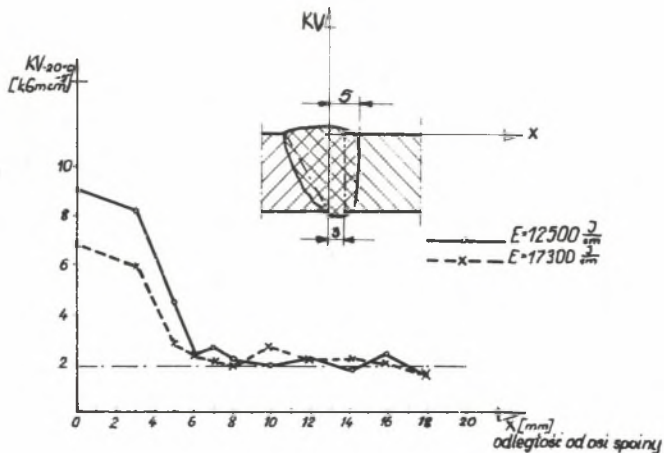
Z arkusza blachy o grubości 16 mm wycięto poprzecznie do kierunku walcowania płyty o szerokości 200 mm i długości 1500 mm. Blachy do spawania przygotowano na 1/2 V z odstępem 3 mm. Spawanie ręczne i automatyczne wykonano na podkładce miedzianej. Warunki spawania płyt próbnych podano w tablicy 2.

Zmodyfikowana próba Čabelki

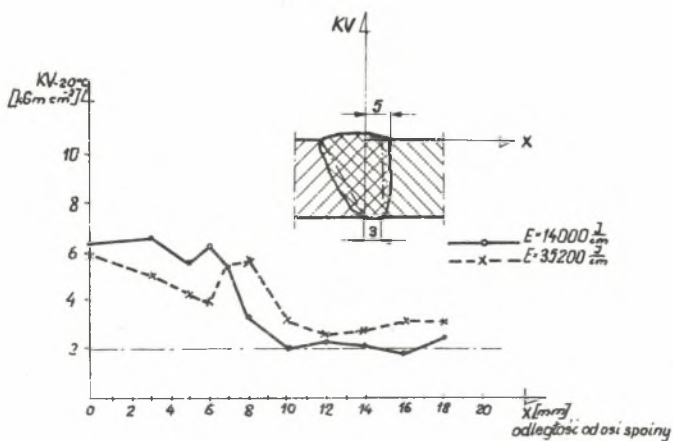
Z płyt spawanych ręcznie i automatycznie przy maksymalnej i minimalnej energii liniowej łuku wycięto próbki udarnościowe w różnej odległości od osi spoiny (rys. 1).



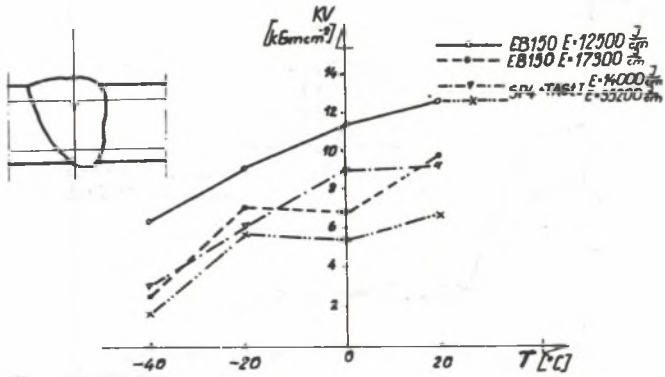
Rys. 1. Próba udarności złącza spawanego - zmodyfikowana próba Čabelki



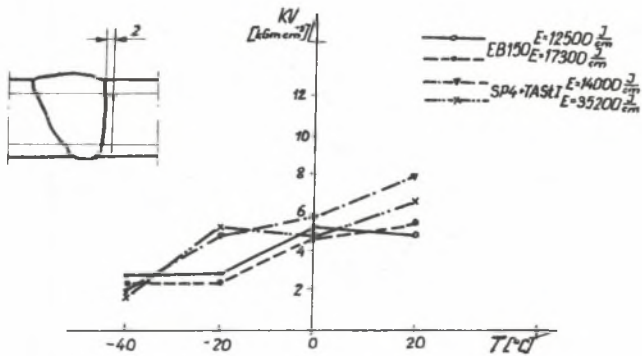
Rys. 2. Udarność KV<sub>-20°C</sub> złącza spawanego ręcznie elektrodami EB150



Rys. 3. Udarność KV<sub>-20°C</sub> złącza spawanego łukiem krytym (SP4 + TAsT1)



Rys. 4. Wyniki badań udarności spoiny



Rys. 5. Wyniki badań udarności SWC

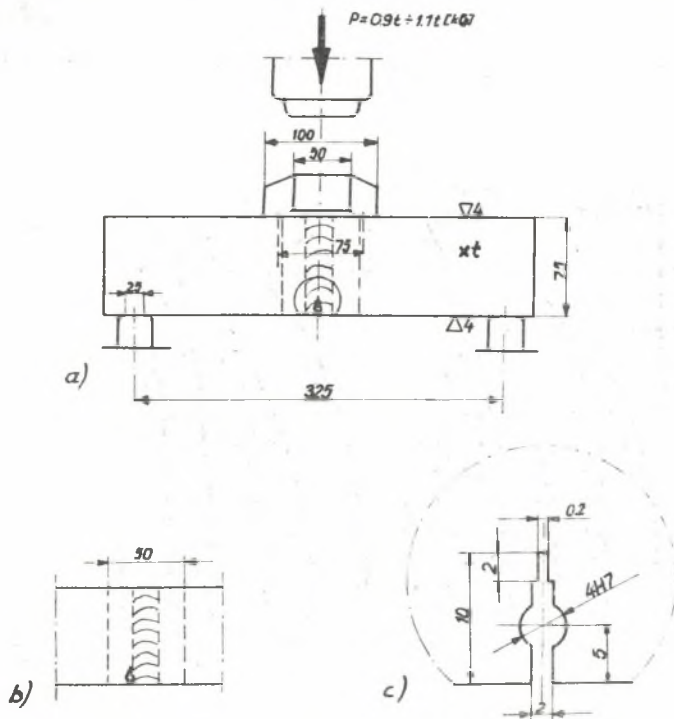
Dla każdego punktu wykonano 3 pomiary udarności. Udarność badano na próbkach Charpy V w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Dodatkowo wycięto z materiału trzy próbki, które łamano w identycznych warunkach. Otrzymane wyniki (średnie z trzech pomiarów) przedstawiono na rys. 2 i 3.

#### Wyznaczenie krzywych przejścia w stan kruchości

Badania udarności przeprowadzono na próbkach typu Charpy V zgodnie z normą PN-69/H-04370 w temperaturach  $+20$ ,  $0$ ,  $-20$  i  $-40^{\circ}\text{C}$ . Sposób pobrania próbek do badania udarności spoiny i SWC jak również wyniki badań udarności przedstawiono na rys. 4 i 5.

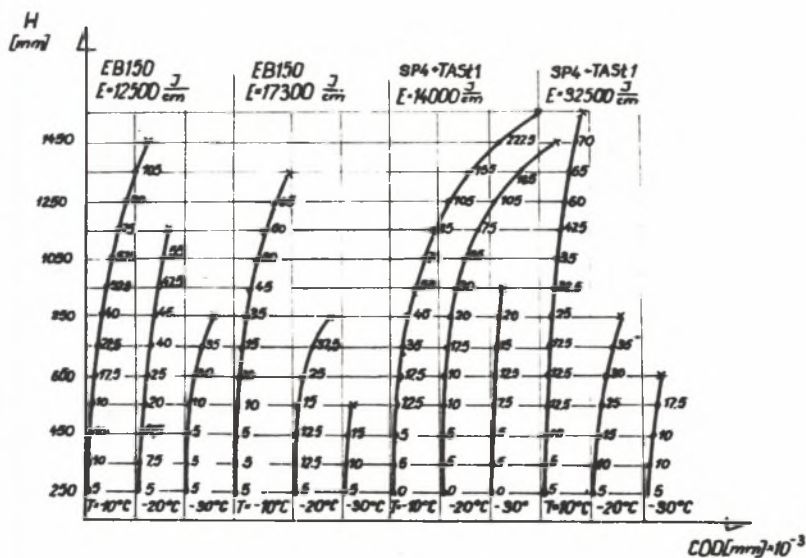
#### Badanie kruchości metodą Niblink

Badania przeprowadzono na próbkach typu T zgodnie z dokumentem MIS-IIC-334-70. Karb o promieniu  $r = 0,2$  mm nacinano w spoinie oraz w SWC w odległości 2 mm od linii wtopienia. Wymiary próbek oraz sposób wykonania karbu pokazano na rys. 6. Próbki zginano udarowo w różnych temperaturach.

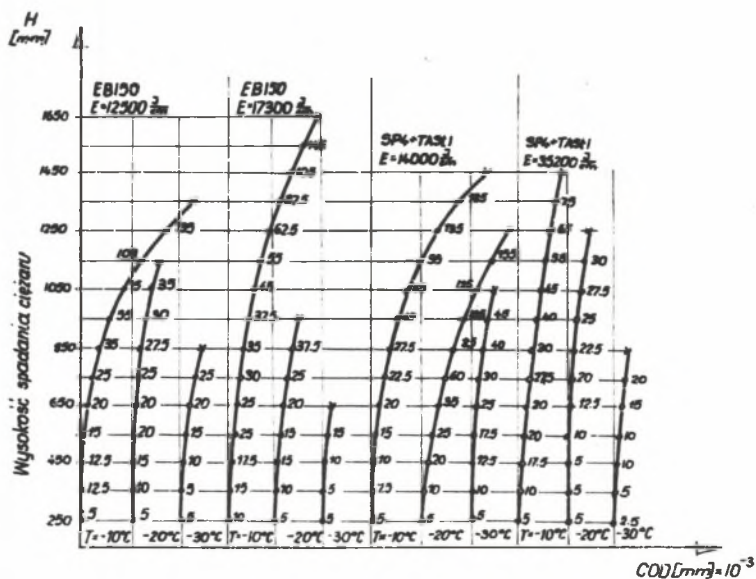


Rys. 6. Próba Niblink

a) karb w spoinie, b) karb w strefie wpływu ciepła, c) szczegół nacięcia karbu

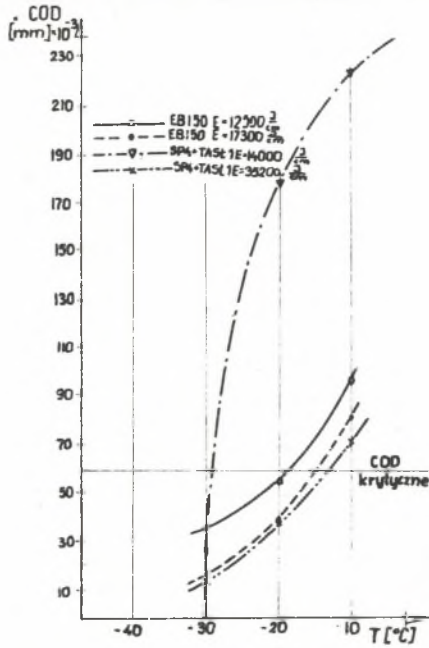


Rys. 7. Wykresy zginania uderowego próbek Niblink z karbem w spoinie

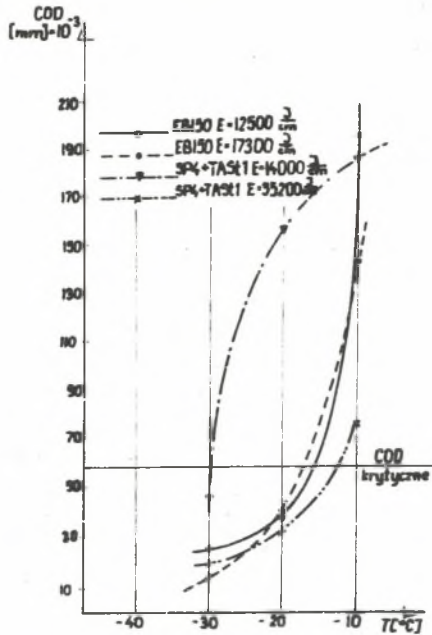


Rys. 8. Wykresy zginania uderowego próbek Niblink z karbem w SWC





Rys. 9. Temperatury przejścia w stan kruchości spoin wyznaczone próbą Niblink



Rys. 10. Temperatury przejścia w stan kruchości SWC wyznaczone próbą Niblink

Wyniki przedstawiono w postaci wykresów  $COD = f(H)$  (rys. 7 i 8) przedstawiających odkształcenie plastyczne w obrębie szczeliny ( $COD$  - crack opening displacement) w funkcji zaabsorbowanej energii. Na podstawie tych danych sporządzono wykresy  $COD = f(T)$ . Porównując wartości  $COD$  z  $COD$  krytycznym otrzymanym przy zginaniu statycznym ( $COD$  krytyczne przyjmuje się  $0,06 \text{ mm}$  [5]), można wyznaczyć temperatury przejścia w stan kruchości (tablica 3).

Tablica 3

Temperatury przejścia w stan kruchości spoin  
i strefy wpływu ciepła wyznaczone próbą Niblink

| Materiały dodatkowe<br>i energia liniowa<br>żuku                   | Temperatury przejścia ( $^{\circ}\text{C}$ ) |     |
|--|--|-----|
|  | spoina                                       | SWC |
| EB150<br>$E = 12,5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$       | -19  | -15 |
| EB150<br>$E = 17,3 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$       | -13  | -17 |
| SP4 + TAST1<br>$E = 14,0 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$ | -29  | -30 |
| SP4 + TAST1<br>$E = 35,2 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$ | -12  | -12 |

#### Analiza wyników i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono obecności wyraźnego progu kruchości w badanych czterech przypadkach (rys. 2 i 3). Kryterium Čabelki 50% udarności materiału rodzimego zostało spełnione dla wszystkich płyt w całym zakresie. Należy zwrócić uwagę na bardzo niską udarność badanej blachy  $KV = 1,9 \text{ kGm/cm}^2$  w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ , gdy wymagania LRS dla tej grupy stali wynoszą  $KV_{-20^{\circ}\text{C}} = 5 \text{ kGm/cm}^2$ . Porównując wynik udarności spoiny (rys. 4) w badanych czterech przypadkach stwierdzono korzystny wpływ małych energii liniowych żuku i to zarówno w przypadku spawania ręcznego, jak i automatycznego.

Różnice udarności SWC w analizowanych przypadkach są niewielkie (rys. 5). Wyższe nieco udarności połączeń spawanych automatycznie tłumaczyć można korzystniejszym cyklem cieplnym. Próby Niblink potwierdziły korzystny wpływ małych mocy liniowych żuku przy spawaniu stali 18G2VA. Najniższe tem-

peratury przejścia stwierdzono w przypadku połączenia spawanego łukiem krytym drutem SP4 i topnikiem TAST1 (rys. 9 i 10, tabl. 3) przy energii liniowej łuku  $E = 14000 \text{ J/cm}$ . Należy przy tym zaznaczyć, że tak niskie parametry ze względów ekonomicznych nie będą stosowane w praktyce przemysłowej.

Temperatury przejścia w stan kruchości wyznaczono na podstawie wyników próby Charpy V (rys. 4 i 5) przyjmując kryterium  $KV = 5 \text{ kGm/cm}^2$ . Wyniki zestawiono w tablicy 4. Nie stwierdzono ścisłej korelacji pomiędzy wynikami podanymi w tablicach 3 i 4. Szczególnie istotne różnice temperatur przejściowych można zauważyć w przypadku strefy wpływu ciepła.

Tablica 4

Temperatury przejścia w stan kruchości spoin  
i strefy wpływu ciepła wyznaczone próbą Charpy V

| Materiały dodatkowe<br>i energia liniowa<br>łuku                   | Temperatury przejścia ( $^{\circ}\text{C}$ ) |     |
|--|--|-----|
|  | spoina                                       | SWC |
| EB150<br>$E = 12,5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$       | -40  | -5  |
| EB150<br>$E = 17,3 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$       | -31  | +2  |
| SP4 + TAST1<br>$E = 14,0 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$ | -30  | 0   |
| SP4 + TAST1<br>$E = 35,2 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{cm}}\right)$ | -26  | -22 |

Z przeprowadzonych badań wynika ogólny wniosek, że przy spawaniu stali 18G2VA należy stosować możliwie małe energie liniowe łuku i to zarówno przy spawaniu ręcznym, jak i automatycznym łukiem krytym.

## LITERATURA

1. Mryka J. - Materiały konferencji na temat: Stale spawalne o podwyższonej wytrzymałości, Gdańsk-Gliwice, czerwiec 1971.
2. Baranowski B. - Sprawozdanie IMŻ Nr B-942, 1959.
3. Węgrzyn J., Kraszewski S. - Biuletyn Instytutu Spawalnictwa Nr 48, 1971.
4. Duren C. - Behaviour of Brittle Fracture of Manual Welded Joints on 25 mm thick Plates of Steels St. E36 and St. E51, - Doc. IIW IIC-378-72.
5. Simplified procedure for Niblink dropweight testing of weldments, Doc. IIW-IIC-334-70.
6. Program produkcji elektrod, drutów, prętów i pałeczek do spawania i napawania, WEMA, W-wa 1970.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХРУПКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИИ ИЗ СТАЛИ 18G2VA  
ВЫПОЛНЕННЫХ ВРУЧНУЮ ПОКРЫТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ  
И АВТОМАТИЧЕСКИ ПОД ФЛЮСОМ

## Р е з ю м е

Испытывалась хрупкость сварных соединений выполненных на стали 18G2VA ручной сваркой покрытым электродом и автоматической сваркой под флюсом. Сварные швы выполнялись при использовании минимальной и максимальной линейной мощности дуги. Опираясь на испытания ударной вязкости и испытание Ниблинк, было установлено, что, с точки зрения противостояния сварного соединения хрупком растрескиванию сталь 18G2VA целесообразно сваривать с применением возможно низкой линейной мощности сварочной дуги.

BRITTLE FRACTURE TESTS FOR JOINTS OF 18G2VA STEEL  
ARC AND SUBMERGED WELDED

## S u m m a r y

Brittle fracture tests for joints of 18G2VA steel arc and submerged welded has been carried out. Welded joints has been produce using minimum and maximum input energy. On a base Niblink test and impact strenght has settled that on regard brittleness resistance welded joints of 18G2VA steel the best profitable is welding with possible low input energy.