

dr inż. Krzysztof Kubicki^{1*)}

ORCID: 0000-0002-1804-3389

dr inż. Kwiryn Wojsyk²⁾

ORCID: 0000-0002-7552-3768

Zasady bezpiecznego i ekonomicznego projektowania oraz wykonywania konstrukcji spawanych

Principles of safe and economical design and assembly of welded structures

DOI: 10.15199/33.2022.12.06

Streszczenie. W artykule przedstawiono główne zasady prawidłowego projektowania i wykonywania konstrukcji spawanych. Wskazano korzyści wynikające z wdrażania nowych technologii spawalniczych, a także niebezpieczeństwa spowodowane nieznanymi lub niestosowaniem zasad obowiązujących podczas wytwarzania (na różnych etapach) tego typu konstrukcji. Odniesiono się także do wcześniejszych publikacji dotyczących nakładek „wzmacniających” złącza spawane.

Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe; zasady spawania; złącza spawane; pęknięcia; metody głębokowtapiające.

Abstract. The article presents the main principles of proper design and assembly of welded structures. The benefits of implementing new welding technologies are shown, as well as the dangers of not knowing or non-compliance with the rules applicable during the creation (at various stages) of structures of this type. Reference was also made to an earlier publication regarding "reinforcement" caps for welded joints.

Keywords: metal structures; welding rules; welded joints; rupture; deep-penetrating welding method.

Spawalnictwo, licząc od pierwszego patentu w tej dziedzinie [1], ma niespełna 140 lat, natomiast mechanika pękania ok. 100 lat [2]. Są to więc stosunkowo młode dziedziny wiedzy, nauki i techniki. Niektórzy twierdzą, że idealnej spoiny jeszcze nie wykonano, a konstrukcje spawane nie są tak naprawdę bezpieczne w eksploatacji ze względu na pojawiające się i występujące w czasie użytkowania stany naprężeń wywołane procesami spawalniczymi. Aby opanować wiele zjawisk występujących podczas wytwarzania tego typu konstrukcji i niezawodnej eksploatacji, opracowano wiele dokumentów, które z czasem przekształcono w karty materiałowe, instrukcje technologiczne, a następnie normy – początkowo branżowe i krajowe, a w końcu obejmujące większe obszary uzgodnień, m.in. normy EN i ISO.

Dobór materiałów

Stalowe materiały budowlane oprócz dużej wytrzymałości i dobrej plastyczności powinny charakteryzować się odpowiednią spawalnością [3, 4]. Nie

można jej uzyskać, zwiększając zawartość węgla w stali, gdyż równoważnik węgla CE, którego wartość przekracza 0,4, wymusza konieczność podgrzewania wstępnego materiałów łączonych, a niekiedy również obróbki cieplnej po spawaniu. W przypadku np. stali B700 stosuje się łagodniejsze cykle cieplne, wykorzystując zgrzewanie rezystancyjne (przy spawaniu bez podgrzewania uzyskuje się kruche złącza). Problemy spawalności należy więc rozwiązywać kompleksowo, stosując odpowiednie materiały i technologie [5]. Wprowadza się np. stale drobnoziarniste z grupy SQL, które mają względnie dobrą spawalność, ponieważ ich spawanie przy właściwie dobranych parametrach nie prowadzi do kruchości złączy, ale wymaga stosowania właściwych procedur i technologii. Materiały dodatkowe do spawania (druty i elektrody) powinny charakteryzować się znaczną plastycznością, gdyż wtedy stopiwo powstające z ich wymieszania z materiałami spawanymi również wykazuje zapas plastyczności. Wymagania te spełniają konwencjonalne druty do spawania stali konstrukcyjnej, czyli G3Si1, G4Si1, zasadowe elektrody stalowe, np. EB1.46, EB1.50 lub ich odpowiedniki.

Katalog zasad

Normy to dokumenty znane określające często przeszłe (by nie powiedzieć przestarzałe) wymagania techniczne i informacje umożliwiające wytwarzanie, kontrolę, handel i eksploatację konstrukcji spawanych. Bazują na sprawdzanych latami danych technicznych oraz nie zawsze uzasadnionych wizjach i założeniach wcześniejszych pokoleń inżynierów. Do tych ostatnich należy opinia wyrażona w pracy [6], że *spoina jest najsłabszym miejscem konstrukcji*. Tymczasem, jak wskazują dziesięciolecia doświadczeń w badaniach, wytwarzaniu i eksploatacji konstrukcji spawanych, zniszczenie prawidłowo wykonanej konstrukcji następuje nie tylko poza spoiną, ale również poza złączem spawanym [7]. Pokazuje to zniszczenie złącza krzyżowego po próbie rozciągania (fotografia 1), które nastąpiło w materiale rodzimym. Dyskusyjne jest określenie *prawidłowo wykonanej konstrukcji spawanej*, które nie może być wprowadzone w żadne unormowania, lecz stanowi otwarty katalog podstawowych, niekiedy wzajemnie sprzecznych zasad, którymi powinni kierować się projektanci, wykonawcy i osoby odpowiedzialne za eksploatację konstrukcji spawanych. Katalog ten jest

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

²⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki

*) Adres do korespondencji: krzysztof.kubicki@pcz.pl



Fot. 1. Próba rozciągania złącza krzyżowego

Photo 1. Tensile test of cross joint

przykładem zdobywania i nawarstwiania się wiedzy spawalniczej w ciągu 140 lat. W ślad za pracą [8] można go poszerzyć o aktualny stan wiedzy, zgodnie z którym należy:

1) stosować podstawowe i dodatkowe materiały o dobrej spawalności;

2) dobierać do spawania materiały dodatkowe (druty i elektrody) o właściwościach mechanicznych i chemicznych najbliższych podstawowym (istnieją uzasadnione wyjątki od tej reguły, np. w przypadku spawania żeliwa, stali chromowej i stali pracującej w podwyższonej temperaturze);

3) w przypadku spawania materiałów o różnej wytrzymałości, dobierać materiały dodatkowe do słabszego (łatwiej spawalnego), a ewentualną obróbkę cieplną do mocniejszego (zwykle trudniej spawalnego);

4) minimalizować operacje spawalnicze; stosować jak najmniejszą liczbę spoin o minimalnej, wyłącznie obliczeniowo uzasadnionej objętości;

5) stosować spoiny czołowe zamiast pachwinowych, gdyż nie zwiększają one objętości i masy konstrukcji, stanowiąc jedynie karb metalurgiczny. Wadą (zanikającą) tego rozwiązania jest konieczność ukosowania przed spawaniem grubszych elementów wchodzących w skład złącza. Postęp w technologiach cięcia termicznego, skrawaniem i wodą oraz spawania głębokowtapijącego zmniejszają ten defekt;

6) stosować możliwie cienkie i długie spoiny pachwinowe zamiast grubych i krótkich, gdyż ich wytrzymałość zwiększa się z kwadratem, a objętość z sześcianiem ich grubości. Im grubsza jest spoina pachwinowa, tym gorzej przenosi obciążenia, powoduje proporcjonalnie większe odkształcenia katowe konstrukcji, wymusza zabiegi prostowania i w efekcie kłopoty odbiorcze i eksploatacyjne, co generuje zbędne koszty;

7) długość spoin pachwinowych powinna stanowić $6 \div 150$ -krotności ich grubości;

8) stosować złącza doczołowe przed kątowymi lub teowymi;

9) nie przekraczać granicznych wymiarów spoin pachwinowych przy łączeniu blach: $0,2 g_{\max} \leq a \leq 0,7 g_{\min}$ w przypadku spoin jednostronnych oraz $a \leq 0,5 g_{\min}$ – spoin dwustronnych;

10) unikać występowania kraterów, a zapalenie łuku nie powinno odbywać się w tych samych miejscach spoiny ani pozarowkowo;

11) unikać nakładania się kraterów przy spawaniu wielowarstwowym (stosować przesunięcia rozpoczynania ściegów);

12) unikać projektowania spoin, które powinny być wykonane w pozycjach: naściennej, okapowej lub pułapowej;

13) minimalizować liczbę i objętość spoin montażowych;

14) stosować spoiny pachwinowe wklęsłe lub płaskie (unikać wypukłych) oraz czołowe płaskie (nigdy wklęsłe);

15) unikać spawania w pobliżu naroży, krawędzi, gwintów, powierzchni dokładnie obrobionych oraz po obróbce cieplnej lub cieplno-chemicznej;

16) unikać stosowania jakichkolwiek elementów pośrednich typu: nakładki, łączniki itp. (zalecane jest bezpośrednie łączenie profili doczołowo, najkrótszą możliwą spoiną);

17) obciążać profile zgodnie z kierunkami ich najwyższych wskaźników wytrzymałościowych;

18) stosować spoiny punktowe lub przerywane zamiast ciągłych (wyjątki stanowią konstrukcje szczelne oraz poddane eksploatacji zmęczeniowej, wykonywane w celu zabezpieczenia antykorozyjnego i np. przeznaczone do cynkowania ogniowego);

19) nie projektować spoin w wewnętrznych narożach kształtowników walcowanych na gorąco, ze względu na segregację niskotopliwych składników wywołujących pęknięcie gorące;

20) stosować metody głębokowtapijące wykonywania spoin czołowych i pachwinowych (fotografia 2);

21) unikać krzyżowania się spoin i wielokierunkowej ich zbieżności oraz punktów koncentracji naprężeń rozciągających;



Fot. 2. Złącze krzyżowe ze spoinami pachwinowymi wykonane metodą głębokowtapijącą

Photo 2. Cross joint made with fillet welds using a deep-penetrating welding method

22) unikać zbliżania się spoin na odległość mniejszą niż 30 mm;

23) umieszczać spoiny w miejscach nieobciążonych lub obciążonych w minimalnym stopniu, pamiętając, że z dwóch funkcji pełnionych przez spoiny: łącznej i nośnej – ta druga powinna być ograniczana bądź wyłączana;

24) przenosić obciążenia ze spoin na elementy łączone, stosując żebra, przepony i podpory;

25) dążyć do minimalizacji liczby różnych profili w konstrukcji;

26) nie dopuszczać do obciążenia rozciągającego blach i kształtowników w kierunku ich grubości, gdyż może ono prowadzić do pęknięć lamelarnych (fotografia 3) lub rozwarstwienia blach;



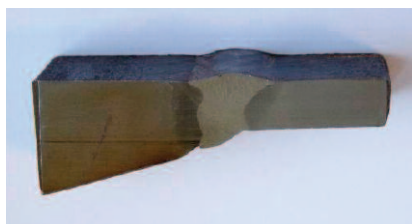
Fot. 3. Pęknięcie lamelarne prostopadle do kierunku jego propagacji

Photo 3. Lamellar projection perpendicular to the direction of its propagation

27) umieszczać spoiny w miejscach technologicznie łatwo dostępnych;

28) umieszczać spoiny w punktach lub osiach obojętnych albo w ich pobliżu;

29) stosować łagodne przejście oraz w przypadku zmiany grubości lub kształtu konstrukcji (fotografia 4);



Fot. 4. Złącze doczołowe elementów o różnej grubości

Photo 4. Butt joint of elements of different thickness

30) zastępować w miarę możliwości spawanie zgrzewaniem, a zgrzewanie lutowaniem (wyjątkiem od tej reguły jest np. spawanie laserowe);

31) stosować otwory technologiczne w konstrukcjach zamkniętych, np. zbiorniki spawane, elementy przygotowane do cynkowania;

32) w przypadkach zgrzein punktowych bądź liniowych obciążać je wyłącznie siłami ścinającymi, a także unikać naprężeń złożonych – szczególnie odrywających lub zmęczeniowych;

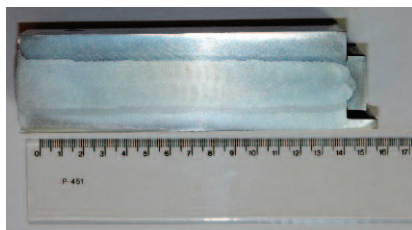
33) zastępować w miarę możliwości zgrzewanie rezystancyjne zgrzewaniem tarciovym (szczególnie FSW) lub innymi technologiami niskoenergetycznymi, np. spawaniem laserowym.

Zasady, np. nr 4, 5, 8 czy 14, można zilustrować przykładami złączy przedstawionymi na fotografiach 5 i 6. Pokazują one połączenie doczołowe dwóch blach grubości 150 mm. Na fotografii 5 przedstawiono spoinę V wykonaną tradycyjnie metodą MAG (600 ściegów), natomiast na fotografii 6 spoinę I wg metody wąskoszczelinowej MAG (70



Fot. 5. Spoina czołowa V

Photo 5. Butt weld V



Fot. 6. Spoina czołowa I

Photo 6. Butt weld I

ściegów). Spoina I wymaga 4 razy mniej spoiwa w porównaniu ze spoiną V. Zastosowanie spoiny I daje nie tylko korzyści materiałowe, ale także energetyczne, czasowe (mniej pracochłonne przygotowanie krawędzi i mniejsza liczba ściegów) oraz pozwala na uzyskanie dobrej jakości złącza.

Rozwój doświadczeń odnośnie do nakładek

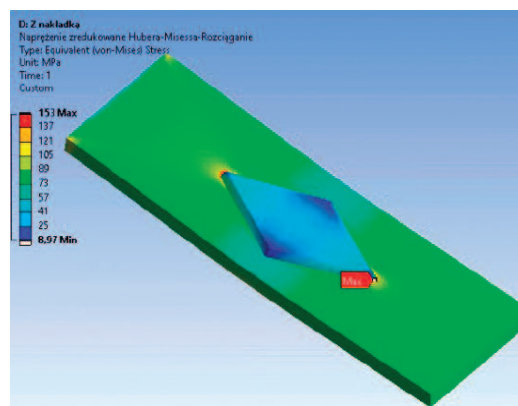
Do zaprezentowanego, niepełnego zbioru zasad konstrukcyjnych dochodzono metodą prób i – niestety – błędów, co oznaczało konieczność zmierzania się z licznymi awariami i katastrofami wytwarzanych i eksploatowanych konstrukcji spajanych. Liczba tych przypadków jest ogromna, np. [9 – 13]. W celu zapewnienia właściwej jakości spoin i całej konstrukcji oraz zapobieżenia ewentualnym awariom przeprowadza się kontrolę złączy – zwykle metodami nieniszczącymi – przed dopuszczeniem do eksploatacji lub badania stany przedawaryjne [14 – 18].

Niektóre wadliwie (z dzisiejszego punktu widzenia) zaprojektowane i wykonane konstrukcje spajane wciąż są eksploatowane. Należą do nich hale, wysokościowce, mosty i wiadukty. Na fotografii 7 przedstawiono fragment najslynniejszego (obecnie zabytkowego) mostu spawanego w Polsce [19], w którym pod koniec lat dwudziestych XX w. zastosowano nakładki. Na szczęście nie są to nakładki rombowe, które w szczytach rombu mają największą koncentrację naprężeń. Na rysunku pokazano wyniki wstępnej symulacji złącza spawanego z nakładką rombową. Model złącza składa się z dwóch blach o wymiarach 150 x 100 x 12 połączonych na środku spoiną czołową z ukosowaniem na X. Na górnej części umieszczono nakładkę o wymiarach 70 x 70 x 5 mm, którą połączono z blachą spoinami pachwinowymi. Na potrzeby symulacji założono, że spoiny pachwinowe są wykonywane procesem 111 za pomocą typowej elektrody



Fot. 7. Fragment mostu spawanego w Maurzycach z nakładką na pasie górnym

Photo 7. A fragment of a welded bridge in Maurzyce with a cover plate on the top chord of the truss



Symulacja wstępna – naprężenie zredukowane Hubera-Misesa-Hencky'ego

Initial simulation – Huber-Mises-Hencky reduced stress

zasadowej przeznaczanej do spawania stali niskostopowych. Model został poddany obciążeniu statycznemu siłą rozciągającą o wartości 100 kN. Na tak prostym modelu można wykazać nieefektywność stosowania nakładek i wskazać miejsca powstawania koncentracji naprężeń. Naprężenia w przekroju bez nakładki zwiększają się w miejscach koncentracji prawie dwukrotnie.

Projekt mostu w Maurzycach odzwierciedla ówczesny stan wiedzy na temat spawania i mechaniki pękania. Jeszcze na początku XX wieku nieznanym było zjawisko koncentracji naprężenia powodowanego przez nakładki. Mimo że jest to pierwszy na świecie drogowy most spawany i został uszkodzony podczas II wojny światowej, jego stan techniczny powszechnie uznawany jest za dobry, kwalifikujący do jego eksploatacji.

Nie odwrócimy przeszłości, ale nowe konstrukcje należy projektować, wykonywać i eksploatować zgodnie z obec-

nym stanem wiedzy i możliwości obliczeniowych, które daje np. metoda elementów skończonych. Praktyka projektowa i wykonawcza konstrukcji spawanych boryka się nieustannie z bolączkami wynikającymi z niezajomości bądź nieuwzględniania przytoczonych zasad, np. powszechnie stosuje się przewymiarowane spoiny pachwinowe, zamiast korzystać z metod ich obliczania wg normy [20] i wskazanych w różnych pracach, np. [21 – 23]. Na szczęście coraz rzadziej dobiera się druty i elektrody „twardsze, mocniejsze” od materiałów spawanych oraz „wzmacnia się” konstrukcje nakładkami i innymi niepotrzebnymi łącznikami. Należy zaznaczyć, że nakładki, wstawki, dodatkowe żebra i przepony mogą być wprowadzane do konstrukcji starych, których materiał nośny uległ wyczerpaniu przez procesy korozyjne, zmęczeniowe, cieplne, cieplno-mechaniczne lub mechaniczne. Prace powinny zostać poprzedzone analizami symulacyjnymi wykonanymi metodą MES, ponieważ obliczenia ręczne mogą być zbyt mało dokładne. Wprowadzanie do konstrukcji spawanych różnego typu dodatkowych łączników (w tym nakładek) wynika z nieadekwatnych do obecnego stanu wiedzy i poziomu techniki doświadczeń projektowania konstrukcji nitowanych, co wiąże się z wieloma niekorzystnymi zjawiskami, takimi jak:

- niekonnekcyjne zwiększenie masy konstrukcji;
- nieuzasadnione podwyższenie robocizny warsztatowej i montażowej,
- wprowadzenie do konstrukcji karbów metalurgicznych i kształtu, co prowadzi wprost do powstania lub spiętrzenia nieprzewidywalnych, wielokierunkowych naprężeń, a w efekcie kruchości konstrukcji [24 – 26];
- intensyfikowanie przebiegu procesów korozyjnych w przypadku powstania nieszczelności między nakładkami a korpusem konstrukcji.

Podsumowanie

1. Możliwe jest racjonalne i ekonomiczne kształtowanie złączy z użyciem nowoczesnych technologii spawalniczych, co prowadzi do radykalnych oszczędności w zużyciu materiałów do spawania, energii i kosztów wykonania konstrukcji.

2. Znajomość zasad przedstawionych w artykule jest niezbędna do właściwego projektowania, wykonywania i eksploatacji konstrukcji spawanych.

3. Stosowanie przedstawionych zasad prowadzi do zwiększenia bezpieczeństwa użytkownika.

4. Wdrożenie metody elementów skończonych do obliczeń stanów naprężeń w kluczowych węzłach konstrukcji (np. w miejscach nakładek) pozwala na określenie i wizualizację poziomu naprężeń w nich występujących oraz zastosowanie środków prewencyjnych, na różnych etapach „życia” konstrukcji.

5. Nakładki na spoiny używane w konstrukcjach blachownic stanowią zbędny balast, ponieważ przy dominujących naprężeniach rozciągających nie biorą udziału w przenoszeniu naprężeń. Ponadto generują koncentrację naprężeń w szczytach nakładki, co zmniejsza czas do zmęczeniowego zniszczenia konstrukcji.

6. Zagadnienia omówione w artykule są niezwykle istotne dla inżynierów i techników budownictwa zajmujących się spajanymi konstrukcjami stalowymi.

Literatura

- [1] Benardos N, Olszewski S. Patent na spawanie łukowe nr 171596. Paryż: 10.10.1885.
- [2] Griffith AA. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921; <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- [3] Tasak E, Ziewiec A. Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Kraków: Wydawnictwo JAK; 2009.
- [4] Pilarczyk J, Pilarczyk J. Spawanie i napawanie elektryczne metali. Katowice: Wydawnictwo Śląsk; 1996.
- [5] Słania J. Plany spawania – teoria i praktyka. Warszawa: Agenda Wydawnicza SIMP; 2015.
- [6] Wichtowski B, Konecki K. Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych blachownicowych mostów kolejowych ze złączami doczołowymi wzmocnionymi nakładkami. Przegląd Spawalnictwa. 2021; <https://doi.org/10.26628/wtr.v93i3.1139>.
- [7] Nawrocki J, Słania J, Wojsyk K, Golański G. Zarys wykorzystania symulacji MES w analizie oddziaływania niezgodności spawalniczych na cechy eksploatacyjne konstrukcji spawanych. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej; 2020.
- [8] Kudła K, Wojsyk K. Łączne i nośne funkcje spoin w nowoczesnych konstrukcjach spawanych. Spajanie materiałów konstrukcyjnych 2010; 3-4: 26 – 28.

[9] Augustyn J, Śledziwski E. Awaryje konstrukcji stalowych. Warszawa: Arkady; 1976.

[10] Ferenc K, Ferenc J. Konstrukcje spawane. Warszawa: WNT; 2018.

[11] Wierzbicki S, Król PA, Żółtowski W, Kołdej A. Błędy wykonawcze przyczyną stanu przedawaryjnego konstrukcji stalowej hali. W: Kaszyńska M. (editor) XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna. Awaryje budowlane. Zapobieganie diagnostyka naprawy rekonstrukcje. Szczecin – Międzyzdroje: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny. 2009; 907 – 914.

[12] Kowalczyk M, Czmochoński J, Rusiński E. Analiza przyczyn pęknięcia zawieszenia wysięgnika przeciwwagi koparki wieloczerpakowej. Acta Mechanica et Automatica. 2009; 3 (2): 41 – 43.

[13] Wuwer W, Swierczyńska S. Awaryja dachu ze stalowymi płytami kratowymi. Przegląd Budowlany 2010; 3: 34 – 38.

[14] Klimpel A. Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie. T. 1. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; 1998.

[15] Szymański A. Kontrola i zapewnienie jakości w spawalnictwie. T. 2. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; 1998.

[16] Czuchryj J, Sikora S. Niezgodności spawalnicze w złączach spawanych z metali i termoplastycznych tworzyw sztucznych. Gliwice: Instytut Spawalnictwa. 2016.

[17] Lewińska-Romicka A. Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. Warszawa: WNT; 2001.

[18] Golański G, Merda A, Wieczorek P, Klimaszewska K. Metody badania wybranych właściwości mechanicznych materiałów metalowych i ich złączy spawanych. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. 2021.

[19] Klimpel A, Melcer M. Stan aktualny i spawanie naprawcze konstrukcji mostu na rzece Słudwi pod Łowiczem. Przegląd Spawalnictwa. 1998; 1: 2 – 5.

[20] PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów. 2006.

[21] Kudła K, Wojsyk K. Wyznaczanie naprężeń obliczeniowych w spoinach pachwinowych w złożonych stanach obciążeń – zgodnie z Eurokodem 3. Przegląd Spawalnictwa. 2014; 8: 8 – 14.

[22] Kudła K, Wojsyk K. The Rational Use of Fillet Welds and Butt-Fillet Welds in Welded Constructions. Welding Technology Review 2019; <https://doi.org/10.26628/wtr.v91i6.1033>.

[23] Kubicki K. The Analysis of the Resistance of Tee Joint Fillet Welds According to Eurocode 3. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo, 2021; <https://doi.org/10.17512/znb.2021.1.16>.

[24] Rykaluk R. Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne; 2000.

[25] Butnicki S. Spawalność i kruchość stali. Warszawa: WNT; 1991.

[26] German J. Podstawy mechaniki pęknięcia. Kraków: Wyd. PK; 2011.

Przyjęto do druku: 19.10.2022 r.