

Ocena ilości ciepła wprowadzonego do spoin i napoin metodą pomiaru ich pól poprzecznych w konwencjonalnych i hybrydowych procesach spawalniczych

Evaluation of the amount of heat introduced into the welds and padding welds by means of their transverse fields measurement in conventional and hybrid welding processes

Streszczenie

W pracy przedstawiono przyczyny niewystarczająco dokładnego opisu energii liniowej spawania i napawania zarówno w procesach konwencjonalnych, jak i hybrydowych. Wykonano badania spawania metodą MAG, laserem oraz hybrydowo (laser + MAG) wykazując niewłaściwość sumowania energii zużytej do spawania dla oceny ilości ciepła wprowadzonego. Przeprowadzono, na podstawie literatury, zestawienie energii liniowej dla złączy spawanych i napawanych oraz zaproponowano efektywny sposób obliczania i uporządkowania energii liniowej spawania lub napawania.

Słowa kluczowe: ciepło wprowadzone; procesy hybrydowe; energia liniowa spawania

Abstract

The paper presents the causes of insufficiently detailed description of the heat input of welding and hardfacing in both conventional and hybrid processes. MAG, laser and hybrid (laser + MAG) welding experiments were performed, showing the incomplete aggregation of the consumed energy for welding to assess the amount of heat introduced. Based on the literature, heat input for welded joints and padding welds was calculated, and an effective way of calculating and arranging the heat input of welding or hardfacing was proposed.

Keywords: heat input; hybrid processes; linear energy of weld

Wstęp

Ciepło wprowadzone (ang. *heat input*) do materiałów spajanych odniesione do długości wykonanych spoin lub napoin jest jednym z podstawowych technologicznych parametrów procesów spawania lub napawania. Definiowane jest jako energia liniowa i opisywane prostą zależnością (1):

$$E_l = \frac{E}{l} = \frac{q}{v} = \frac{\eta UI}{v}, \quad \frac{J}{mm} \quad (1)$$

gdzie:

- E_l – energia liniowa, J/mm;
- E – energia wprowadzana, J;
- l – długość spoiny/napoiny, mm;
- q – moc skuteczna źródła ciepła, W;
- v – prędkość liniowa spawania/napawania dla spawania łukowego, mm/s;
- η – współczynnik sprawności procesu;
- U – napięcie łuku, V;
- I – natężenie prądu spawania/napawania, A.

Podawana jest w instrukcjach technologicznych spawania (WPS), wytycznych i normatywach spawania stali oraz metali nieżelaznych i ich stopów. Przez wiele lat wzór wystarczał do definiowania poprawności i kontroli stabilności elektrycznych procesów spawalniczych.

Wszeczhronny rozwój spawalnictwa doprowadził jednak do objęcia procesami łączenia termicznego nowych materiałów, których wrażliwość na miejscowe oddziaływanie ciepła jest znacząco większa niż niskowęglowych stali konstrukcyjnych. Są to m.in. stale energetyczne nowej generacji, stopy niklu, dyspersyjnie utwardzone stopy aluminium, stale obrobione termomechanicznie oraz wiele innych materiałów konstrukcyjnych [1÷3].

Postępy inżynierii materiałowej wymusiły jednocześnie wynalezienie i dopracowanie nowych, precyzyjnych i wyspecjalizowanych metod spajania, których oddziaływanie cieplne na zespalane elementy powoduje niewielkie zmiany

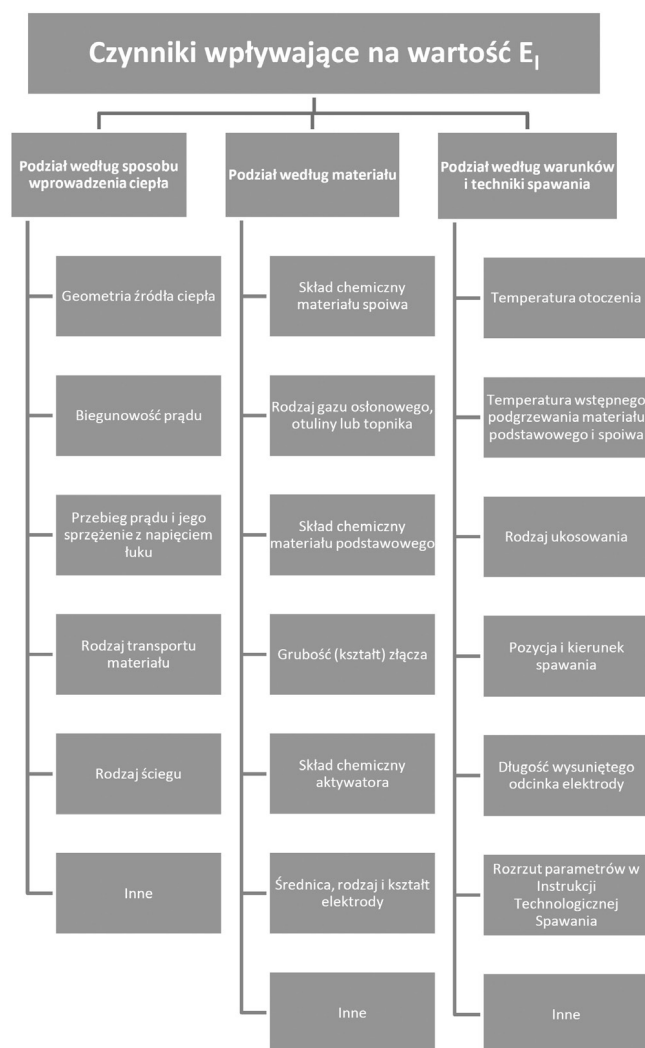
Dr inż. Kwiryn Wojsyk, mgr inż. Michał Macherzyński – Politechnika Częstochowska, mgr inż. Rafał Lis – Wielton S.A.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: kwiryn@gmail.com

metalograficzne i naprężeniowo-odkształceniowe w obrębie złączy. Brak jakichkolwiek odchyłek właściwości łączonych materiałów od pożądanych w miejscach łączenia jest docelowym zadaniem spawalnictwa.

Dlatego też nowo powstające materiały konstrukcyjne są spajane technologiami gwarantującymi minimalną, konieczną ingerencję cieplną, wytyczoną bardzo wąsko doborami parametrami [1]. Okazało się jednak, że jeżeli stosowane są impulsowe bądź hybrydowe metody spawania, szacowanie ilości ciepła wprowadzonego do materiałów spawanych staje się zawodne [4,5], a opieranie się w tym celu na zależności (1) jest bezużyteczne.

Sprawę komplikuje dodatkowo szereg innych czynników, mających niewątpliwą wpływ na sprawność procesów spawania lub napawania, a zatem na ilość ciepła wprowadzonego w ich trakcie. Niektóre z nich pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Czynniki wpływające na wartość energii liniowej spawania E_1
Fig. 1. Factors which affect the heat input of E_1 welding

Uwzględnienie pokazanych na rysunku 1 czynników zakłócających szacowanie ciepła wprowadzonego do elementów spajanych praktycznie uniemożliwia korzystanie z zależności (1) w celu uzyskania w miarę dokładnego obliczenia E_1 . Każdy z nich bowiem może być wyznaczony z kilkunasto-kilkudziesięciu procentową dokładnością, a kolejne ich wymnażanie prowadzi do znacznych rozbieżności rezultatu końcowego [6,7].

Nie wydaje się zatem możliwe szacowanie energii liniowej spawania przez opieranie się na tzw. zewnętrznych technologicznych parametrach procesów spawania lub napawania.

Perspektywicznym podejściem może być natomiast ocena efektów spawalniczego oddziaływania cieplnego na podstawie śladu cieplnego.

Prowadzone są w tym kierunku prace teoretyczne oparte o symulacje zachowań termomechanicznych materiałów w warunkach oddziaływania różnorodnych cykli cieplnych [8÷12].

Ostatecznymi miernikami działania źródeł cieplnych mogą być bowiem materiałowe parametry wynikowe procesu termomechanicznego takie jak:

- objętość przetopienia;
- objętość lub szerokość zmian strukturalnych w strefach wpływu ciepła spoin lub napoin;
- wielkość maksymalna i rozkład pola naprężeń w złączy;
- wielkość odkształceń ostatecznych – wzdłużnych lub poprzecznych;
- maksymalna lub minimalna twardość w strefach wpływu ciepła;
- minimalny poziom udarności złącza.

Jak pokazano w pracy [11] stosunkowo prostym i wygodnym sposobem oceny wprowadzonego przez źródło ciepła jest pomiar jednego z efektów jego działania – pola poprzecznego spoiny lub napoiny, będącego reprezentacją objętości przetopienia.

W celu wyznaczenia energii liniowej procesu należy wyznaczyć na zglądzie metalograficznym pola przetopienia zgodnie np. z procedurą pokazaną na rysunku 2.



Rys. 2. Procedura wyznaczania pola poprzecznego przekroju spoiny (napoiny) przy użyciu np. programu Autodesk Inventor Professional – wersja studencka

Fig. 2. Procedure for determining the cross-sectional area of a weld (padding weld) using, for example, Autodesk Inventor Professional – student version

Dla rozważań dokonywanych w niniejszej pracy istotne jest to, że niezależnie od metody spawania lub ich kombinacji wyznaczyć można wielkość pola poprzecznego otrzymanej spoiny (napoiny). Zatem metoda ta jest przydatna do oceny efektywności spawania łukowego – konwencjonalnego lub jego odmian pulsacyjnych, spawania laserem, wiązką elektronów, napawania, przetapiania powierzchniowego, a także różnorodnych metod hybrydowych.

W tablicy I przedstawiono wyniki badań uzyskanych przez różnych autorów, które zostały opublikowane w ostatnich latach na łamach Przeglądu Spawalnictwa, Biuletynu Instytutu

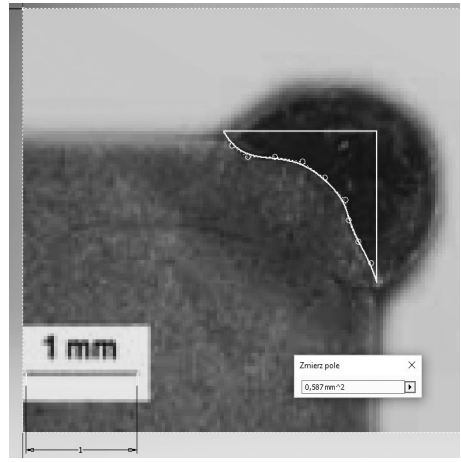
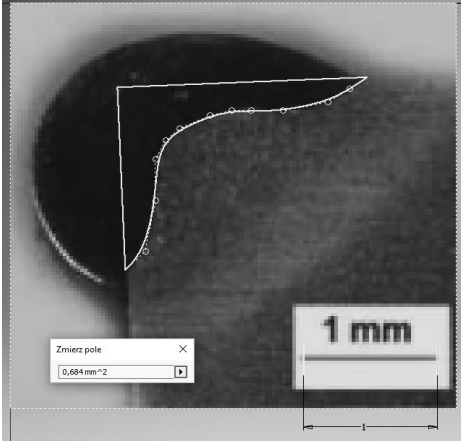
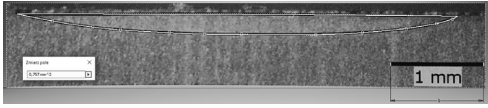
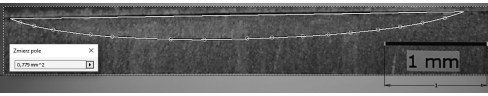
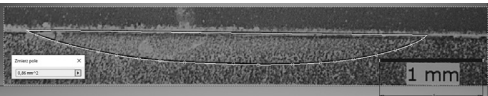
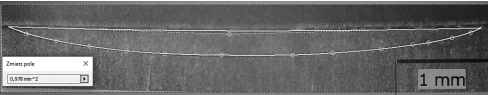
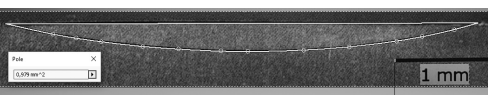
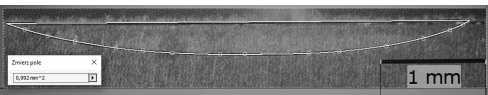
Spawalnictwa, a także w materiałach Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa [12÷24], a na rysunku 3 ich zestawienie w formie wykresu.

Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin

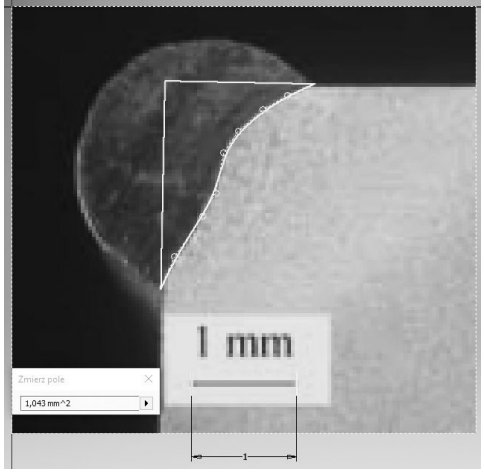
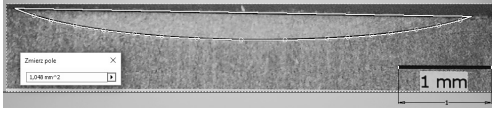
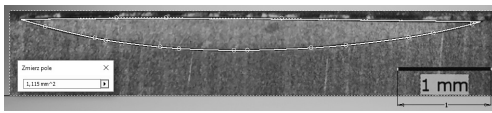
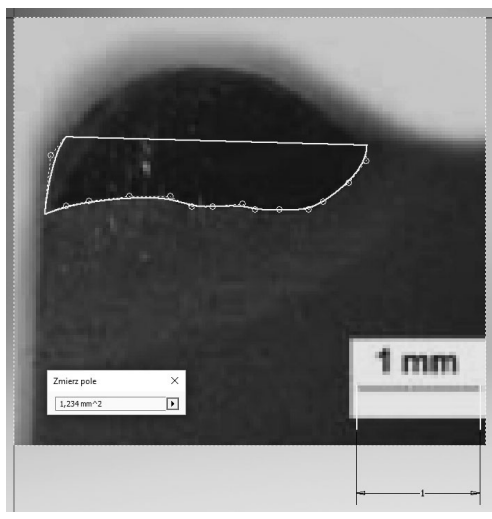
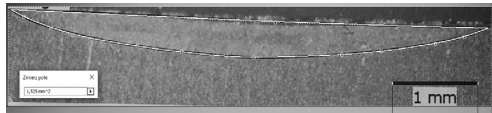
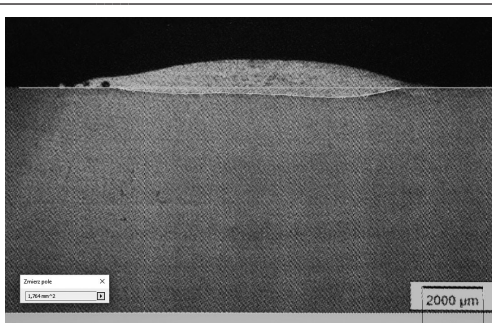
Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
1	0,016	1,080	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
2	0,03	0,771	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
3	0,2	0,900	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
4	0,539	1,200	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
5	0,556	0,385	TIG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	

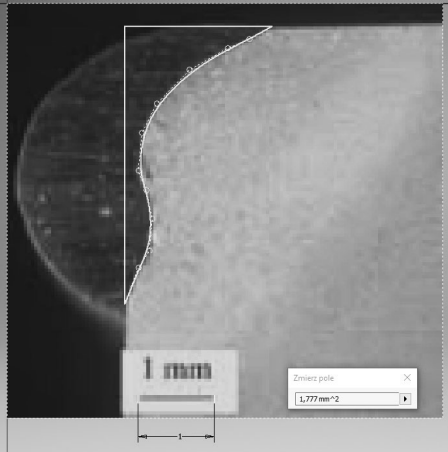
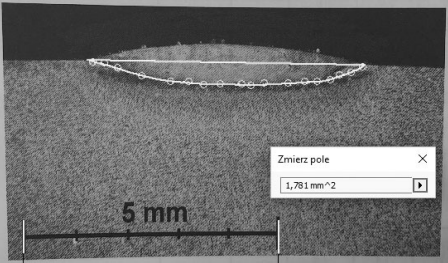
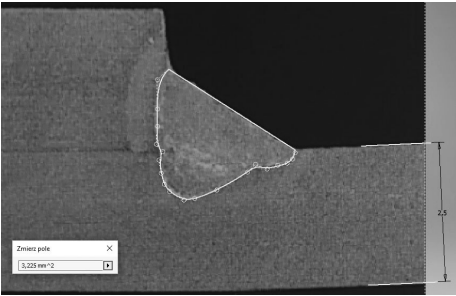
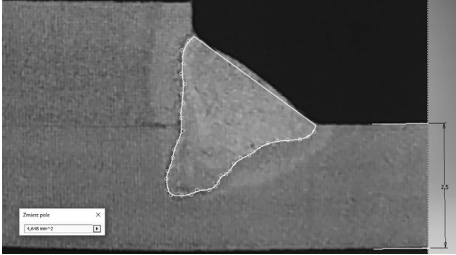
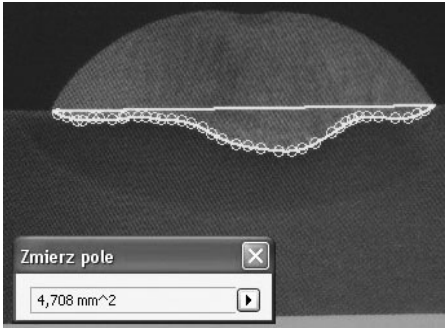
CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
6	0,587	0,296	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	
7	0,684	0,371	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	
8	0,757	0,660	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
9	0,779	0,700	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
10	0,860	0,600	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
11	0,978	0,800	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
12	0,979	0,675	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
13	0,992	0,600	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	

CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

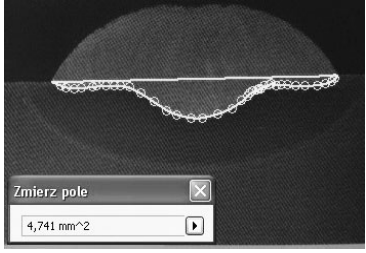

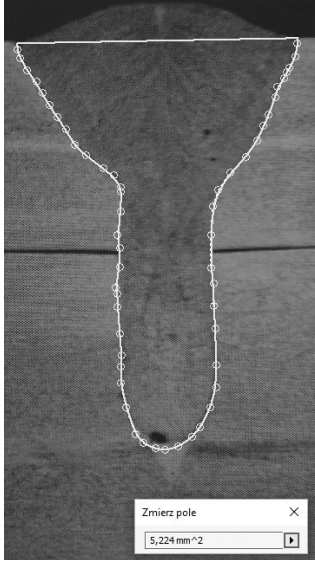
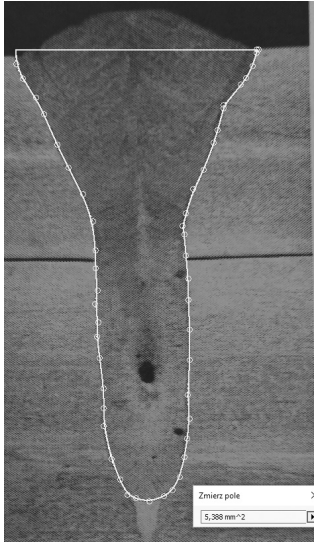
Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
14	1,043	0,385	TIG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	
15	1,048	0,600	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
16	1,115	0,720	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
17	1,234	0,373	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	
18	1,525	0,750	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 5/2017	
19	1,764	1,285	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	

CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
20	1,777	0,385	TIG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 9/2011	
21	1,781	0,360	LASER	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 11/2006	
22	3,225	0,160	LASER	Lutospoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2017	
23	4,648	0,160	LASER	Lutospoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2017	
24	4,700	0,612	LASER	Napoina (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	—
25	4,708	1,500	MAG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 2/2016	

CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin

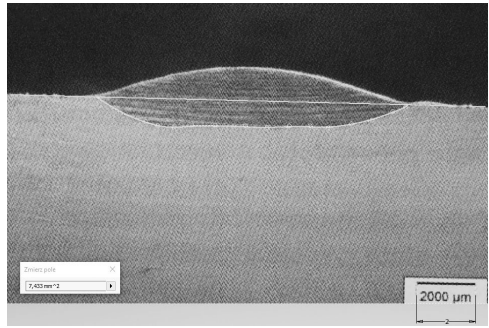

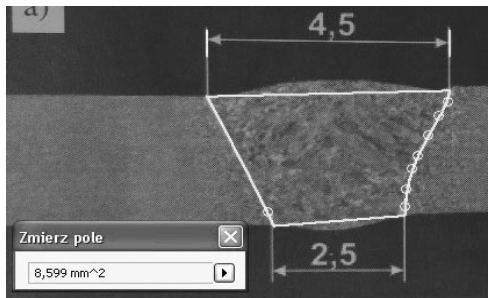
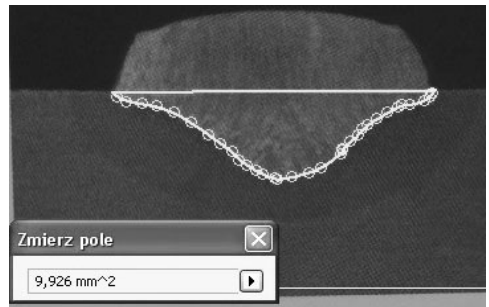
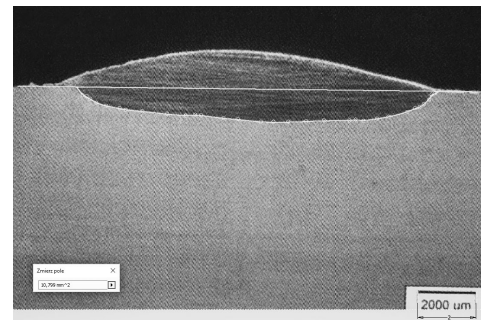
Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
26	4,741	0,800	MAG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 2/2016	
27	5,013	0,018	LASER	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	
28	5,224	0,130	LASER	Spoina czołowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	
29	5,388	0,140	LASER	Spoina czołowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	

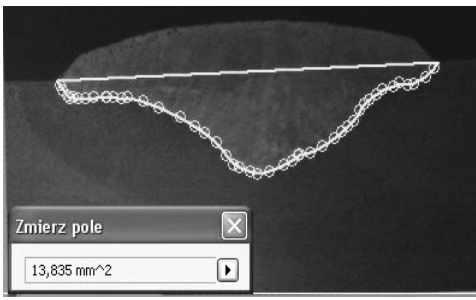
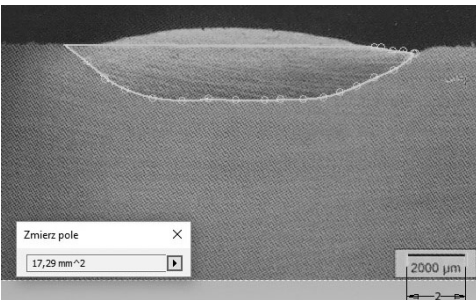
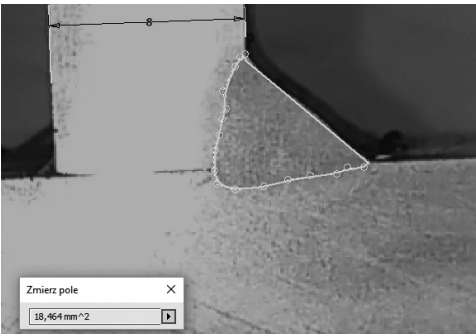
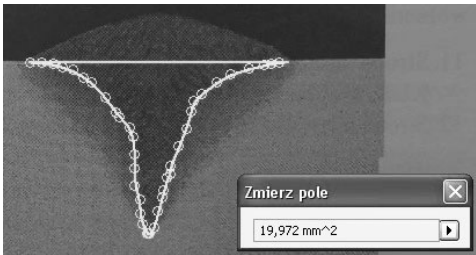
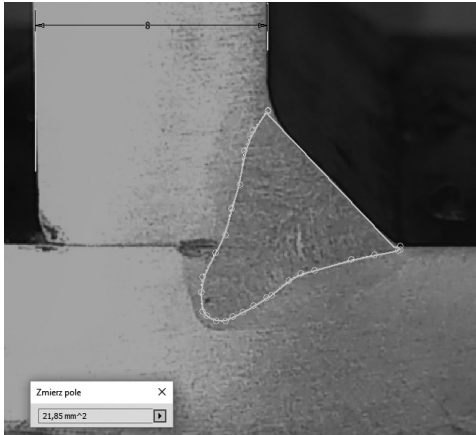
CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
30	5,392	0,180	LASER	Lutospoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2017	
31	5,598	8,300 (J/m)	MAG	Napoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2014	
32	5,728	0,150	LASER	Spoina czołowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	
33	6,332	0,030	LASER	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	
34	6,626	0,320	PLAZMA	Spoina czołowa (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2/2016	

CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
35	6,800	0,765	LASER	Napoina (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	—
36	7,433	1,500	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
37	7,637	2,400 (J/m)	LASER	Napoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2014	
38	8,100	1,224	LASER	Napoina (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	—
39	8,599	0,480	PLAZMA	Spoina czołowa (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2/2016	
40	9,926	0,800	MAG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 2/2016	
41	10,300	0,918	LASER	Napoina (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	—
42	10,799	1,800	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	

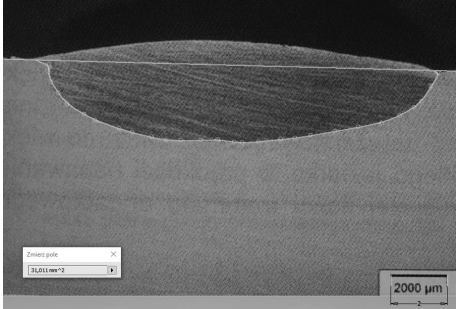
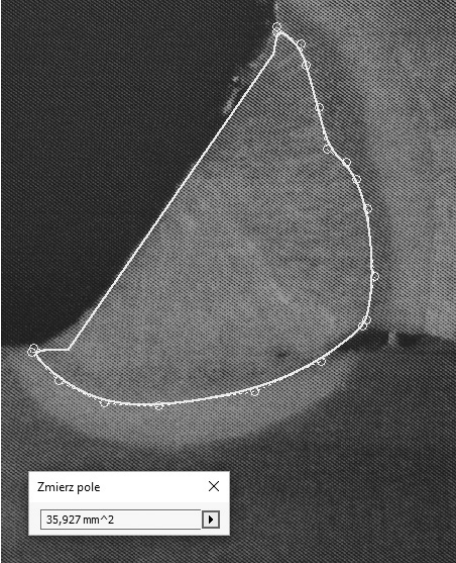

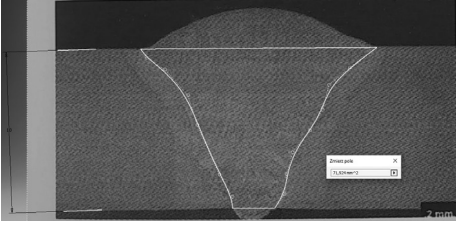
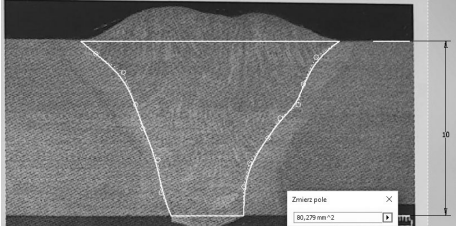
CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
43	13,835	1,500	MAG	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 2/2016	
44	14,100	1,530	LASER	Napoina (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	-
45	17,290	1,800	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
46	18,464	0,391	MAG	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	
47	19,972	10,600 (J/m)	HYBRYDA (LASER + MAG)	Napoina (sl)	Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2014	
48	21,850	0,409	HYBRYDA (LASER + MAG)	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	

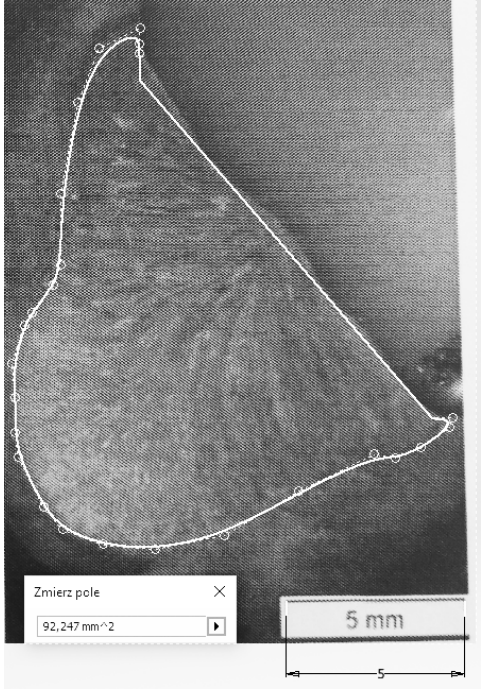
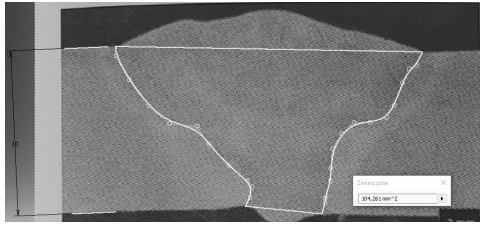
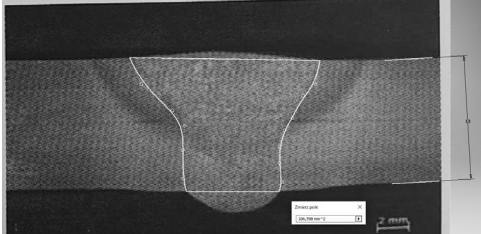
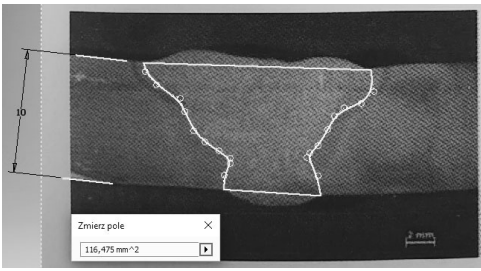
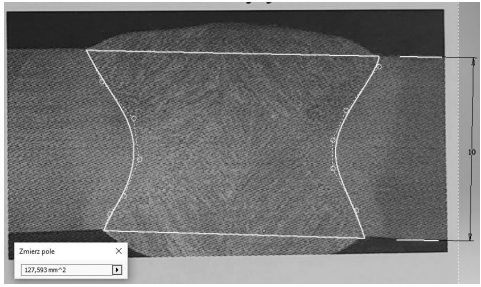
CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
49	23,891	2,100	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
50	27,990	0,694	MAG	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	
51	28,430	1,000	SAW	Spoina pachwinowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	
52	29,632	0,724	HYBRYDA (LASER + MAG)	Spoina pachwinowa (sl)	WIELTON	



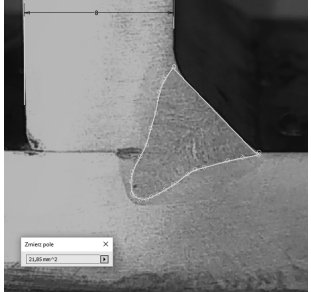
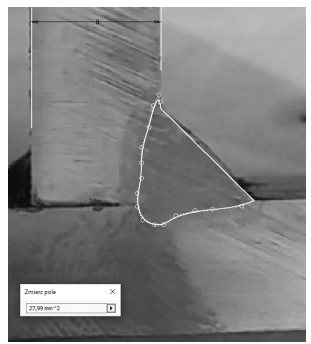
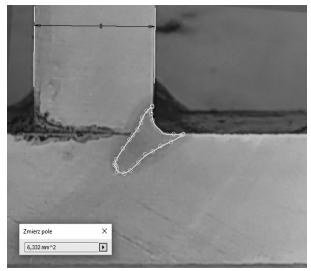
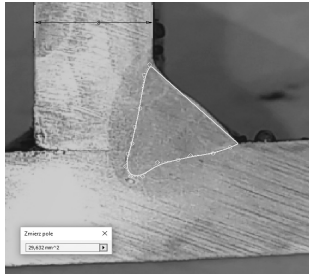
CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

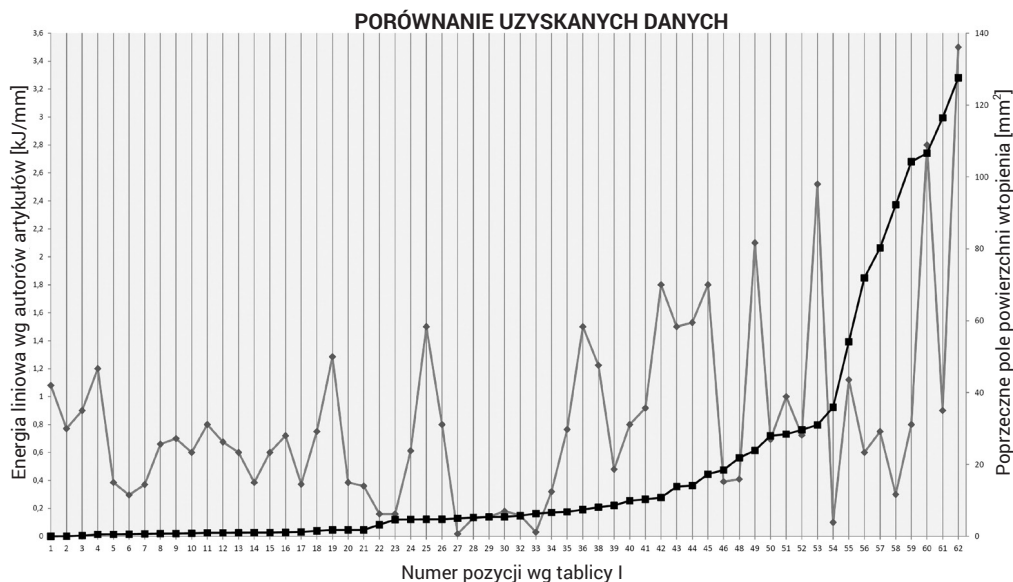
Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
53	31,011	2,520	PLAZMA	Napoina (sl)	Przegląd Spawalnictwa 4/2017	
54	35,927	0,100	SAW	Spoina pachwinowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	
55	54,137	1,120	HYBRYDA (PLAZMA + MAG)	Spoina czołowa (sl)	Przegląd Spawalnictwa 1/2016	
56	71,924	0,600	MAG (drot proszkowy)	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	
57	80,279	0,750	MAG	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	

CD. Tablica I. Określenie pól poprzecznych spoin i napoin
 Cont. Table I. Determination of the transverse field of welds and padding welds

Lp.	Poprzeczne pole powierzchni spoin / napoin, mm ²	E ₁ wg autorów źródeł, kJ/mm	Metoda	Typ spoiny / napoiny	Źródło	Fotografie
58	92,247	0,300	SAW	Spoina pachwinowa (sl)	Symp. Katedr i Zak. Spaw. Istebna 13-14.06.2017	
59	104,261	0,800	MAG	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	
60	106,598	2,800	TIG	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	
61	116,475	0,900	MMA	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	
62	127,593	3,500	SAW	Spoina czołowa (ml)	Przegląd Spawalnictwa 12/2011	

Tablica II. Skład chemiczny i własności mechaniczne stali martenzytycznej DOCOL 1200M
Table II. Chemical composition and mechanical properties of martensitic steel DOCOL 1200M

Nr próbki	Natężenie prądu I, A	Napięcie prądu U, V	Moc wiązki LP, W	Prędkość spawania v, m/min	Energia liniowa wg wzoru (1), kJ/mm	Poprzeczne pole powierzchni wtopienia, mm ²	Fotografia
2 MAG	311	26,2	–	1	0,39	18,464	
3 Laser	–	–	3000	1	0,20	5,013	
1 MAG+laser	311	27,9	3000	1	0,59	21,850	
6 MAG	311	27,9	–	0,6	0,69	27,990	
4 Laser	–	–	3000	0,6	0,30	6,332	
5 MAG+laser	311	27,9	3000	0,6	0,99	29,632	



Rys. 3. Uporządkowanie energii liniowej spawania i napawania metodą pomiaru ich pól poprzecznych
Fig. 3. Order of the heat input of welding and hardfacing by measuring their transverse fields

Wykres wykonano zakładając, że większa objętość przetopienia odpowiada większej rzeczywistej energii liniowej spawania (napawania). Do badań porównawczych włączono rezultaty autorskich eksperymentów przeprowadzonych w warunkach przemysłowych na identycznych złączach teowych spawanych odpowiednio: metodą MAG, laserem i hybrydowo (MAG + laser) – tablica II.

Zsumowano obliczone energie liniowe spawania metodą MAG i laserem oraz pola przetopienia powstające w wyniku zastosowania tych metod.

Okazało się, że pole przetopienia wynikające z zastosowania spawania hybrydowego jest mniejsze o 6,9% dla niższych parametrów spawania i o 13,7% dla wyższych parametrów

od sumy pól przetopień w przypadku niezależnego spawania metodą MAG i laserem. Do tablicy I włączono te dane.

Na osi poziomej rysunku 3 uszeregowano efekty ingerencji cieplnej w procesach spawania lub napawania od małych do dużych pól przetopienia.

Na osi pionowej przedstawiono wielkości energii liniowej spawania proporcjonalnie do pola (objętości) przetopienia.

Linia czerwona przedstawia podane przez autorów prac [12÷24] wartości energii liniowej spawania lub napawania obliczane wg dotychczasowej metodyki.

Można zaobserwować brak korelacji między zużytą na przetopienie energią liniową a objętością przetopienia.

Wnioski

1. Opracowanie skutecznej metody szacowania energii liniowej spawania lub napawania jest niezbędne.
2. Konieczne jest powiązanie energii liniowej ze śladem cieplnym pozostawionym w materiałach nagrzewanych.
3. Perspektywiczne wydaje się oparcie szacowania ciepła wprowadzonego (heat input) na poprzecznych polach przetopienia spoin lub napoin.

Literatura

- [1] Brózda J.: Seminarium dotyczące stali dla nowoczesnych wysokowydajnych elektrowni i materiałów dodatkowych do ich spawania, Rudy Raciborskie 15.02.2019, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2/2009, s. 12-15.
- [2] Nowacki J.: Stal duplex i jej własności, WNT, Warszawa 2009.
- [3] Górka J.: Własności i struktura złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Gliwice, Wyd. Pol. Śląskiej 2013, s. 129-142.
- [4] Kudła K., Wojsyk K.: Czy sposób doprowadzania ciepła ma istotny wpływ na geometrię spoin? Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach 5/2012, s. 140-144.
- [5] Wojsyk K., Macherzyński M.: Określanie energii liniowej spawania metodą pomiaru pól poprzecznych spoin, Biuletyn Instytutu spawalnictwa 5/2016, Gliwice 2016, s. 75-79.
- [6] Słania J., Ptaszek D.: Analiza rozrzutu parametrów w Instrukcji Technologicznej Spawania na przykładzie wybranych metod spawania, Przegląd Spawalnictwa, vol. 89, nr 2/2017, s. 14-31.
- [7] Kensik R.: Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG, Przegląd Spawalnictwa 9-10/2006, s. 5-8.
- [8] Rochalski D., Golański D., Chmielewski T.: Modele spawalniczych źródeł ciepła w analizie pola temperatury. Przegląd Spawalnictwa 5/2017, s. 109-112.
- [9] Grolik L.: Zmiany kształtu geometrycznego jeziora ciekłego metalu w zależności od ilości ciepła wprowadzonego w procesie spawalniczym, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 3/2017, s. 60-64.
- [10] Wojsyk K.: Badanie metodą termograficzną energii liniowej spawania i napawania, Przegląd Spawalnictwa 8/2007, s. 34-38.
- [11] Kudła K., Wojsyk K.: Normowa energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania, Przegląd Spawalnictwa nr 12/2010, s. 21-25.
- [12] Górka J.: Właściwości spoin stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Przegląd Spawalnictwa 12/2011, s. 31-35.
- [13] Szulc J., Chmielewski T., Pilat Z.: Zrobotyzowane spawanie hybrydowe Plazma+MAG stali S700MC, Przegląd Spawalnictwa 1/2016, s. 43.
- [14] Górka J., Opiela M.: Przetapianie plazmowe stali mikroskopowej typu HSLA, Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Istebna 14.06.2017, s. 81-89.
- [15] Bober M.: Badania wpływu głównych parametrów napawania plazmowego na geometrię napoin w oparciu o metody planowania eksperymentu, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 89, Nr 4/2017, str. 5-9.
- [16] Banasik M., Stano S., Urbańczyk M.: Spawanie hybrydowe laser + łuk elektryczny. Rozwój i możliwości metody (Część I), Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 1/2014, str. 34-40.

- [17] Luksa K., Olbrich R., Bednarek M.: Wpływ warunków wykonania napoin na własności stali ARMOX370T w obszarze wokół napoiny, *Przegląd Spawalnictwa* 2-2016, s. 28-30.
- [18] Różański M., Topolski M.: Spawanie plazmowe stali CPW800, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 2/2016, s. 28-30.
- [19] Stano S., Różański M., Grajcar A.: Wpływ parametrów procesu lutowania na strukturę i własności mechaniczne połączeń ze stali CPW800. Cz. II: Lutowanie laserowe, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 1/2017, s. 31-35.
- [20] Klimpel A., Dobrzański L., Nowacki J.: Napawanie laserowe proszkiem niklowym żeliwa sferoidalnego stopowego Si-Mo, *Przegląd Spawalnictwa* 11/2006, s. 32-35.
- [21] Wyględacz B., Kik T., Janicki D.: Symulacja numeryczna i badania cykli ciepłych hartowania laserowego stali narzędziowej WCL, *Przegląd Spawalnictwa* 5/2017, s. 91-95.
- [22] Kik T., Górka J., Czupryński A., Martyniszyn A.: Napawanie krawędzi przedmiotów metodami TIG i PTA, *Przegląd Spawalnictwa* 9/2011, s. 79-86.
- [23] Lisiecki A., Wójciga P., Kurc-Lisiecka A., Barczyk M., Krawczyk S.: Spawanie laserem złączy zakładkowych ze stali AISI30A, *Symposium Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Istebna* 13-14.06.2017, str. 37-46.
- [24] Górka J.: Struktura i własności złączy teowych ze stali TMCP wykonanych łukiem krytym, *Symposium Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Istebna* 13-14.06.2017, s. 47-58.
-