

Adam PIETRAS
Roman BOGUCKI

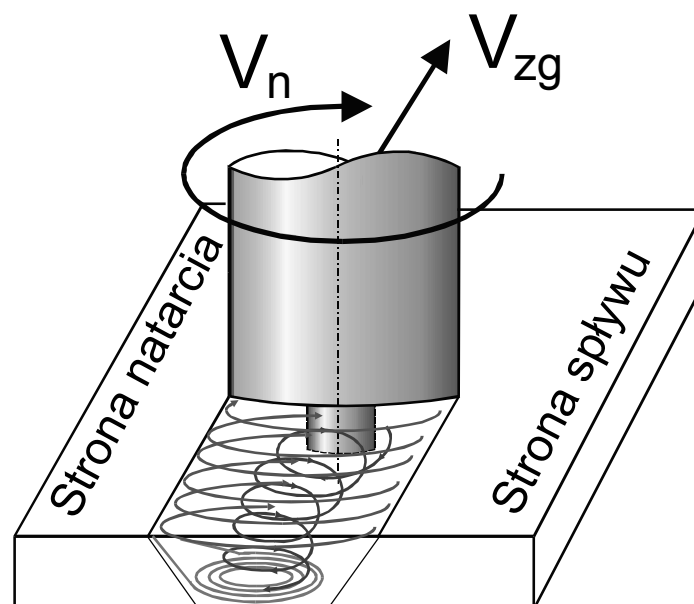
ROZWÓJ TECHNOLOGII ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z MIESZANIEM MATERIAŁU UPLASTYCZNIONEGO W STREFIE ZGRZEINY

Streszczenie: W artykule przedstawiono zarys technologii zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny - jej zalety i rozwój w ciągu ostatnich lat. Zwrócono uwagę na różnego typu konfiguracje możliwe do zastosowania w praktyce przemysłowej.

1. WSTĘP

Technologia zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (Friction Stir Welding, w skrócie FSW) została opracowana i opatentowana w 1991 r. przez Angielski Instytut Spawalnictwa (TWI Ltd) [1]. Od tego czasu obserwuje się jej dynamiczny rozwój, zwłaszcza w USA i Japonii, gdzie znalazła swe pierwsze zastosowania przemysłowe w kolejnictwie i przemyśle kosmicznym.

W metodzie tej do nagrzewania i uplastyczniania materiału zastosowano głowicę z obrotowym trzpieniem umieszczoną w miejscu łączenia dociśniętych blach. Po wprowadzeniu w ruch obrotowy głowicy z trzpieniem, nagrzaniu ciepłem wydzielonym w procesie tarcia i uplastycznieniu materiału blach w bezpośrednim jego sąsiedztwie, następuje wolne przesuwanie się całego układu wzdłuż linii styku (rys. 1). Nagrzany i uplastyczniony materiał blach przed ostygnięciem zostaje zagęszczony zgmiotowo wieńcem opory.



Rys. 1 Schemat poglądowy procesu zgrzewania metodą FSW oraz przemieszczania się uplastycznionej masy metalu w złączu [2]

2. PODSTAWOWE CECHY METODY ZGRZEWANIA FSW

FSW jest metodą zgrzewania w stanie stałym, stosowaną dotychczas głównie dla aluminium i jego stopów oraz miedzi, możliwą do wykorzystania na stosunkowo nieskomplikowanych urządzeniach. Główną zaletą tej metody jest łatwość uzyskiwania złączy o wysokich, powtarzalnych własnościach mechanicznych i strukturalnych.

Można tą metodą wykonywać nawet bardzo długie zgrzeiny, wolne od pęknięć i porowatości. Zależy to w dużym stopniu od kształtu i wymiarów narzędzia uplastyczniającego materiał zgrzewanych blach, a także od jego żarowytrzymałości i odporności na ścieranie. Narzędzia wykonane z materiału o dobrych właściwościach statycznych i dynamicznych w podwyższonej temperaturze, pozwalają obecnie na wykonywanie do 1000 m zgrzeiny bez ich wymiany.

Ponieważ jest to metoda zgrzewania w stanie stałym, poniżej temperatury topnienia materiału łączonego, uzyskane własności wytrzymałościowe złączy mogą być wyższe, niż przy zastosowaniu technologii spawania łukowego. Dodatkową zaletą jest wyeliminowanie kosztownych zabezpieczeń przed wydzielającymi się szkodliwymi dymami i wypryskami ciekłego metalu.

Stosowanie metody FSW może przynieść konkretne korzyści ze względów technicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Poniżej zestawiono najważniejsze, pozytywne cechy tej metody, do których zaliczyć można następujące [3, 4, 5, 6]:

- proces zgrzewania przebiega w stanie stałym; wiąże się z tym kilka istotnych - cech: brak skurczu krzepnięcia metalu, pęknięć gorących, segregacji pierwiastków (lub faz międzymetalicznych), oraz porowatości; struktura zgrzeiny jest zwarta i można zgrzewać elementy w każdym usytuowaniu przestrzennym,
- proces jest nieszkodliwy dla środowiska; wynika to z braku gazów osłonowych oraz niewydzielania się w procesie zgrzewania gazów i pyłów; istnieje możliwość zgrzewania w różnych atmosferach, także pod lustrem wody,
- proces FSW jest energooszczędny; w wyniku jego stosowania można obniżyć koszty produkcji o około 30% do 50%,
- proces FSW można łatwo mechanizować i automatyzować; do zgrzewania tą metodą można zaadoptować konwencjonalną frezarkę,
- metoda FSW eliminuje konieczność ukosowania blach; zaleca się zachowanie czystości łączonych blach, ale samo przygotowanie elementów do zgrzewania jest mniej skomplikowane i pracochłonne,
- można łączyć tą metodą, jednym przejściem, materiały o grubości od 1,5mm do 60 mm, co wyklucza wielowarstwowe spawanie łukowe z wymaganą międzyściegową kontrolą jakości spoiny oraz eliminuje materiał dodatkowy; w przypadku grubych elementów można zastosować jednoczesne zgrzewanie dwustronne,
- złącza wykonane z zastosowaniem metody FSW wykazują znacznie mniejsze odkształcenia i wymagają mniejszych nakładów na wyrównanie powierzchni, niż w przypadku spawania łukowego,
- konstrukcje ze zgrzeinami wykonanymi metodą FSW cechują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, a w tym:
 - własności statyczne zgrzein są równe lub wyższe niż uzyskiwane metodą spawania łukowego,
 - wysokie własności zmęczeniowe zgrzein,
 - zgrzeiny są odporne na kruche pękanie i w strefie wpływu ciepła jest wyższa niż materiału rodzimego,
 - uzyskuje się dużą powtarzalność parametrów użytkowych,

- metoda FSW pozwala na uzyskanie właściwego połączenia w całej płaszczyźnie łączenia, bez widocznych wad w styku między ściegami oraz od strony grani zgrzeiny,
- proces FSW jest bezpieczny dla obsługi ze względu na brak szkodliwego promieniowania ultrafioletowego oraz oddziaływania promieniowania wysokiej częstotliwości, a także braku kontaktu z topionym metalem; operator swobodnie może śledzić przebieg procesu zgrzewania,
- metoda pozwala na poprawne wykonanie złączy dla różnych stopów i ich kombinacji, w tym wytłaczanych lub po przeróbce plastycznej, dotychczas uznawanych za „niespawalne”.

Wskazane powyżej zalety metody zgrzewania z mieszaniem materiału zgrzeiny bardzo silnie wpływają na obniżenie kosztów spajania metali. Związane jest to zarówno ze znacznym ograniczeniem konieczności stosowania różnego rodzaju zabezpieczeń niezbędnych przy spawaniu łukowym aluminium i jego stopów (względny BHP oraz wymogi ekologiczne), tanim i nieskomplikowanym przygotowaniem blach do procesu łączenia, brakiem gazów osłonowych i oczywiście brakiem urządzeń służących do właściwego dozowania i przechowywania gazów, jak i nakładów na obróbkę wykańczającą po procesie spajania.

Pewne ograniczenia związane z metodą FSW można scharakteryzować następująco:

- wymagane jest sztywne mocowanie elementów,
- wymagane jest stosowanie podpór po przeciwnej stronie narzędzia, a w przypadku zgrzewania profili zamkniętych wystąpić może problem z małą sztywnością elementów,
- trwałość narzędzia jest ograniczona,
- na początku oraz na końcu ściegu występuje obszar o obniżonej jakości, co wymaga stosowania płytek dobiegowych i wybiegowych,
- prędkości zgrzewania są stosunkowo niskie; aktualnie są prowadzone próby zgrzewania z prędkością do 6 m/min; należy jednak podkreślić, że:
 - grube elementy mogą być zgrzewane jednym przejściem,
 - uzyskiwane zgrzeiny mają stabilną, wysoką jakość, co wpływa na efektywny czas łączenia (np. brak napraw).

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA METODY FSW

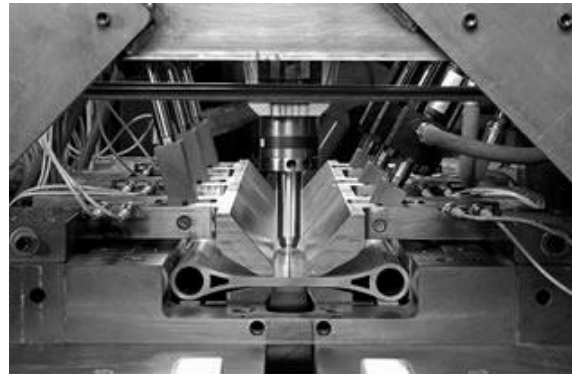
Badania mechanizmu tworzenia zgrzein tarcowych FSW oraz ich jakości, prowadzone w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach w ramach projektu EuroStir[®], wskazują na możliwe bardzo szerokie zakresy warunków zgrzewania, gwarantujące uzyskiwanie prawidłowych i powtarzalnych złączy [7].

Z badań porównawczych wynika, że można z powodzeniem zastosować metodę FSW wszędzie tam, gdzie do łączenia aluminium stosowane są konwencjonalne techniki spawania łukowego (tablica 1, rys. 2a, 2b). Jest to metoda ograniczająca konieczność spawania wielowarstwowego i w konsekwencji, zwłaszcza dla elementów o większych grubościach, znacznie bardziej efektywna od konwencjonalnych metod spawania. Konkurencyjne pod względem szybkości i jakości łączenia są jedynie metody spawania skoncentrowaną energią (laser, wiązka elektronów). Są to jednak metody wymagające znacznie kosztowniejszych urządzeń i bardziej energochłonne.

a.



b.

**Rys. 2. Przykłady zgrzewania metodą FSW**

a. obręcze kół pojazdów samochodowych [4]

b. aluminiowy układ zawieszenia [5]

Przeprowadzone badania wykazały, że ilość ciepła wprowadzanego do złącza wykonanego metodą FSW jest mniejsza, niż przy stosowaniu innych metod spawalniczych. Przy spawaniu plazmowym doświadczalnie określone ilości ciepła wprowadzanego do złącza blach aluminiowych o grubości 6 mm wynoszą 0.81 KJ/mm, a przy zgrzewaniu metodą FSW tylko 0.45 KJ/mm [8, 9].

Prowadzone są również próby opisanie procesu zgrzewania FSW równaniami matematycznymi oraz symulacji tego procesu z wykorzystaniem programów MES [6].

Metoda FSW może być obecnie stosowana również do łączenia aluminium i stopów aluminium, takich kombinacji, których dotąd nie można było łączyć metodą spawania łukowego, jak na przykład stop aluminium-lit.

Tablica 2. Porównanie różnych metod stosowanych do spajania stopów aluminium [8]

Rodzaj i grubość złącza/	FSW	MIG	TIG/ Plazma	Laser	Wiązka elektronów	Zgrzewanie punktowe/liniowe
doczołowe / 1÷5 mm	T	T	T	T	T	T
doczołowe / 5÷12 mm	T	T	W	T	T	N
doczołowe / 12÷25 mm	T	W	W	T	T	N
doczołowe / >25 mm	T	W	W	T	T	N
nakładkowe / 1÷5 mm	T	N	T	T	T	T
nakładkowe / 5÷12 mm	T	N	W	T	T	N
nakładkowe / 12÷25 mm	T	W	W	N	T	N
nakładkowe / >25 mm	N	W	W	N	T	N

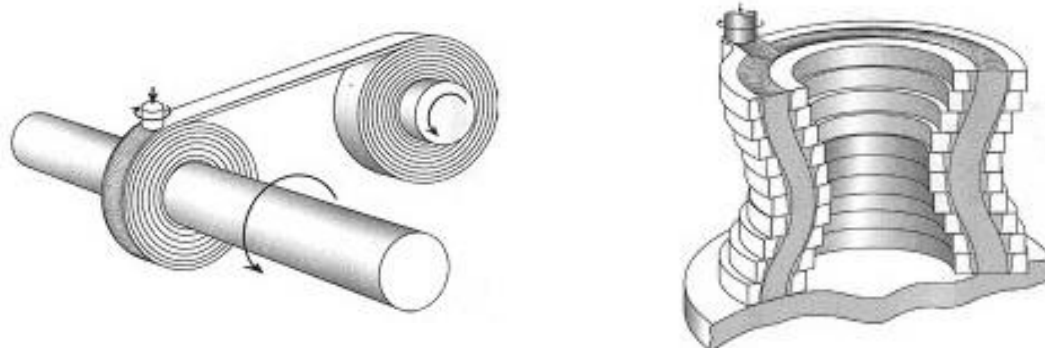
Oznaczenie: T – możliwe, N – niemożliwe, W – połączenie wielowarstwowe

Pozytywne wyniki badań przyniosło wykorzystanie metody FSW do zgrzewania blach miedzianych. W Instytucie Spawalnictwa TWI Ltd przeprowadzono próby zgrzewania blach miedzianych o grubości do 50 mm z szybkością do 100 mm/min. Uzyskano bardzo wysoką i powtarzalną jakość połączenia [4]. Próby zgrzewania blach z czystej miedzi przeprowadzone w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach na stanowisku zbudowanym w oparciu o konwencjonalną frezarkę w pełni potwierdziły możliwość łączenia blach miedzianych nowo opracowaną metodą.

Zgrzewanie FSW zastosowano również do łączenia stopów magnezowych oraz cynku i ołowiu [4, 6]. Możliwe także jest łączenie tą metodą odlewów magnezowych z aluminium przerabianym plastycznie.

Bardzo pozytywne wyniki uzyskano w próbach stosowania FSW do łączenia blach stalowych [10, 11]. Prace prowadzone w Instytucie Spawalnictwa TWI Ltd nad zgrzewaniem stali niskowęglowej 07M20 wg BS970 (BS EN 10083-1) i stopowej X2CrNi12 wg DIN 1.4003 (EN 10083-3) wykazały, że można wykonać krótkie, bardzo poprawne złącza o wytrzymałości na rozciąganie około 450 MPa - w przypadku stali węglowej, a w przypadku stali chromowej do - 540 MPa. Można również metodą FSW łączyć stal węglową ze stopową z zachowaniem bardzo dobrych własności wytrzymałościowych połączenia. W przypadku tego typu materiałów możliwość wdrożenia metody FSW do produkcji zależy od doboru materiału na narzędzie uplastyczniające i mieszające materiał zgrzeiny. Jak dotąd największą trudność stanowi opracowanie odpowiedniego materiału na narzędzie penetratora.

Poza zgrzewaniem metoda FSW może służyć również do wykonywania wielu wyrobów, dotychczas nie produkowanych z wykorzystaniem metod spawalniczych. Tego typu przykłady przedstawia rys. 3.



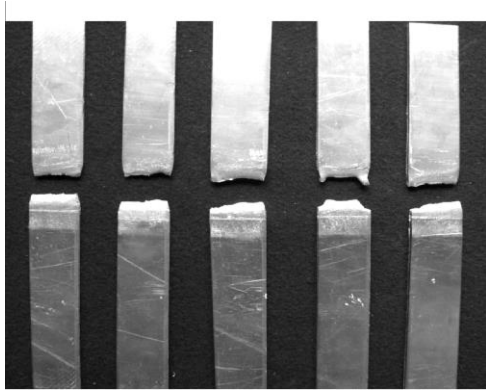
Rys. 3 Schemat procesu FSW zastosowanego w produkcji różnych wyrobów [12]

Badania prowadzone w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach doprowadziły m.in. do opracowania warunków zgrzewania metodą FSW dla aluminium i wielu stopów aluminium serii 5000 oraz aluminium z miedzią. W przypadku łączenia aluminium z miedzią, trudnego do uzyskania innymi metodami spawalniczymi, dobrą jakość złącza doczołowego można uzyskać stosując specjalne narzędzie i odpowiednio przygotowując materiał w miejscu łączenia. W tego typu połączeniach bardzo istotna jest czystość obszaru styku oraz dobór parametrów w bardzo wąskim zakresie warunków zgrzewania [12].

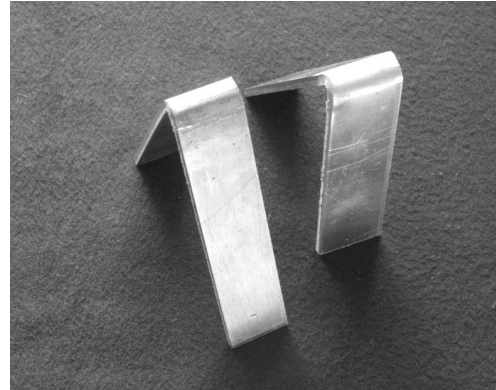
Podobną trudność, jak w przypadku zgrzewania doczołowego, sprawia uzyskanie poprawnych złączy podczas zgrzewania na zakładkę blach aluminiowych z miedzianymi. Przy próbach zastosowania narzędzia z trzpieniem penetrującym, materiały zgrzewanych elementów tworzą w styku kruche struktury, znacznie ograniczające własności wytrzymałościowe uzyskanego połączenia. Opracowana w Instytucie Spawalnictwa metoda

zgrzewania na zakładkę blach aluminiowych z miedzianymi polega na tym, że trzpień penetruje materiał aluminium na całej grubości zgrzewanej blachy, natomiast dolną częścią jedynie oczyszcza i nagrzewa tarciovo wąski obszar blachy miedzianej, stanowiący miejsce tworzącej się liniowo zgrzeiny. Od wymiarów narzędzia z trzpieniem i parametrów zgrzewania zależy wytrzymałość i kruchość osiąganego połączenia [13].

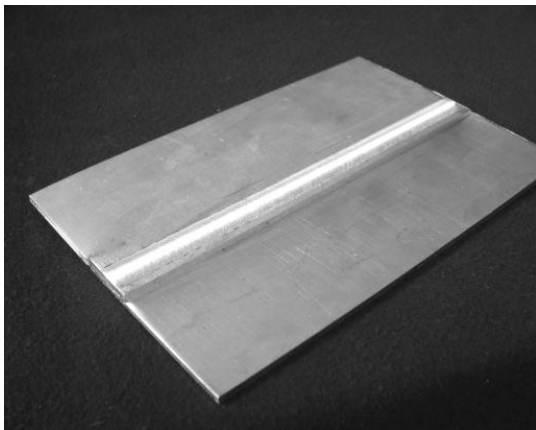
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki zgrzewania FSW czystego aluminium z czystą miedzią. Uzyskano dobre własności plastyczne i wytrzymałościowe połączenia; wytrzymałość zgrzeiny Al+Cu w próbie rozciągania sięga 90 % wytrzymałości zgrzeiny FSW Al+Al, a kąt gięcia na trzpieniu o średnicy 16 mm przekraczał 130°.



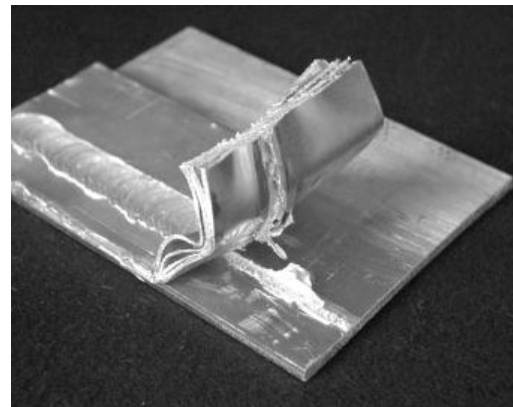
Zniszczenie w próbie rozciągania złączy Al+Cu zgrzanych doczołowo (g = 4.0 mm)



Złącza Al+Cu zgrzane doczołowo po próbie zginania



Przykład zgrzewanych liniowo na zakładkę blach Cu+Al (g = 4.0 mm)



Przykład zgrzanego pakietu czterech blach Al do blachy Cu

Rys. 4 Wyniki zgrzewania FSW blach aluminiowych z miedzianymi

4. PODSUMOWANIE

Metoda FSW stosowana jest w wielu gałęziach przemysłu japońskiego i amerykańskiego. Znajduje obecnie także zastosowanie w przemyśle europejskim. W Polsce na skalę przemysłową nie jest jeszcze stosowana. Przedstawione w opracowaniu zalety metody FSW pozwalają jej w wielu przypadkach skutecznie konkurować z innymi technikami spawalniczymi. Metoda ta wykorzystywana jest głównie do doczołowego łączenia blach i płyt z aluminium i jego stopów do wytwarzania różnego rodzaju zbiorników, platform,

plyt pancernych, obręczy kół, paneli, kratownic, bloków, żurawi itp. stosowanych w przemyśle obronnym, energetycznym, lotniczym, maszynowym, stoczniowym, budowlanym, górniczym, samochodowym i kolejowym. Uzyskane pozytywne wyniki badań laboratoryjnych pozwalają sądzić, iż metoda FSW zostanie wkrótce wykorzystana w krajowych warunkach przemysłowych do łączenia wielu różnorodnych materiałów konstrukcyjnych.

5. LITERATURA

- [1] THOMAS W. M., NICHOLAS E. D., NEEDHAM J. C., MURCH M. G. TEMPLESMITH P., DAWIS C. J.: European Patent Specification 0 615 480 B1.
- [2] PIETRAS A., ZADROGA L., ŁOMOZIK M.: Charakterystyka zgrzeiny utworzonej metodą zgrzewania z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW). Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 3, Gliwice 2003.
- [3] PIETRAS A.: Technologia FSW, jej zalety i obszary zastosowania. Seminarium: Nowa technologia zgrzewania tarcowego metali z mieszaniem materiału zgrzeiny, FSW. Zastosowanie i korzyści. Gliwice, listopad 2002.
- [4] NICHOLAS E. D.: Technical Benefits of FSW. Second EuroStir[®] Workshop, Cambridge, listopad 2002.
- [5] Aluminum Now Online, Ford Motor Company, Vol.5 No. 1 January/February 2003.
- [6] KALLEE S. W.: Current and Potential FSW Applications. Second EuroStir[®] Workshop, Cambridge, listopad, 2002.
- [7] EUREKA Project EuroStir[®] Σ12430 „European Industrialisation of Friction Stir Welding”.
- [8] Sampath D, Moldenhauer S., i inni: Latest developments in aluminium materials for application in fast ferries. Proceedings of the Aluminium 98 Conference. Essen, Niemcy, 23-24 wrzesień 1998.
- [9] LUMSDEN J., MAHONEY M., POLLOCK G.: Stress corrosion Susceptibility in 7050 T7541 Aluminium following Friction Stir Welding. 1st Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, 14-16 June 1999.
- [10] THOMAS W. M.: Friction Stir Welding of Ferrous Materials: A Feasibility Study. 1st Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, California, USA, 14-16 June 1999.
- [11] THOMAS W. M., WOOLLIN P. L., JOHNSON K. I.: Friction Stir Welding of Steel. Welding: a novel technique for steel. Steel World, vol. 4, nr. 2,
- [12] THOMAS W.M., SYLVA G.: Development In Friction Stir Welding. Konferencja ASM Materials Solution, Pennsylvania, USA, October 2003..
- [13] PIETRAS A. i inni: P 364683. Zgłoszenie patentowe. Sposób liniowego zgrzewania tarcowego na zakładkę elementów z różnych materiałów.

DEVELOPMENTS OF THE FRICTION STIR WELDING PROCESS

Abstract: In the paper the development of the friction stir welding process is described. Particular attention is paid to process variants, properties, and processing methods.

Recenzent: dr inż. Jacek SPAŁEK