

Adam **PIETRAS**  
Roman **BOGUCKI**

## CHARAKTERYSTYKA ZGRZEWANIA TARCIOWEGO ELEMENTÓW KONSTRUKCJI METALOWYCH

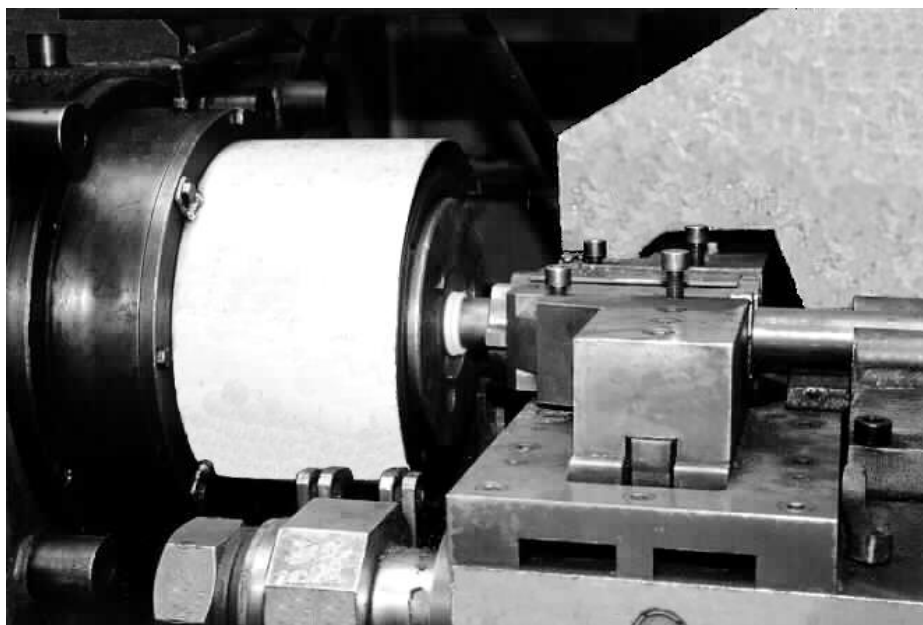
**Streszczenie:** W artykule przedstawiono krótki opis technologii zgrzewania tarciowego i podano przykłady jej wykorzystania w praktyce przemysłowej.

### 1. WPROWADZENIE

Szczególne warunki eksploatacyjne maszyn i urządzeń narzucają konieczność opracowywania i stosowania nowych technologii. Technologia zgrzewania tarciowego jest jednym z nielicznych pozytywnych przykładów wykorzystania ciepła tarcia w technice. Łączenie metali i ich stopów następuje w stanie stałym. W wyniku działania docisku na powierzchniach styku obu łączonych elementów podczas ich względnego ruchu występuje tarcie i w następstwie zamiana energii mechanicznej tarcia w energię cieplną.

Obecnie metodą zgrzewania tarciowego łączone są elementy wykonane ze stali węglowych, stopowych, czystych metali, takich jak nikiel, aluminium, miedź i inne. Dużą zaletą zgrzewania tarciowego jest możliwość uzyskiwania w ciągu kilkadziesiąt sekund dobrych jakościowo złączy różnych zestawów materiałów trudnych do łączenia innymi technikami spawalniczymi, jak np. aluminium i miedź czy aluminium i stali stopowe.

Elementy nagrzewane ciepłem tarcia są w czasie zgrzewania dociśnięte do siebie odpowiednią siłą, co powoduje nagrzewanie i przemieszczanie się metalu z obszaru zgrzewania poza styk uplastyczniany tarciowo, do tzw. wypływkki metalu. Na rys. 1 przedstawiono fragment wykonywania połączenia zgrzewanego tarciowo na zgrzewarce ZT IMŻ-40[1].



**Rys. 1. Wykonywanie połączenia zgrzewanego tarciowo na zgrzewarce ZT IMŻ-40 [1]**

Po nagrzeniu do odpowiedniej temperatury i uplastycznieniu materiału, w obszarze zgrzewania następuje zatrzymanie względnego ruchu trących się elementów. Połączenie jest uzyskiwane po zatrzymaniu ruchu oraz wywarceniu dodatkowej siły spęczania, zapewniającej zbliżenie powierzchni na odległość działania sił atomowych. W wyniku zgrzewania uzyskuje się zwartą metaliczną strukturę na całym przekroju złącza.

## 2. ETAPY ZGRZEWANIA TARCIOWEGO

Proces zgrzewania tarciowego można podzielić na kilka etapów. W pierwszym etapie zgrzewania, pomiędzy stykającymi się powierzchniami występuje tarcie suche lub graniczne i wydziela się nieznaczna ilość ciepła. Pojawiają się tzw. mostki adhezyjne, następuje wyrywanie cząstek materiału, ich odkształcenie plastyczne i zacieranie przylegających mikronierówności. Odkształceniom plastycznym towarzyszy wzrost temperatury, który prowadzi do rozprzestrzeniania się połączeń adhezyjnych.

W drugim etapie tworzą się i ulegają niszczeniu adhezyjne szczipienia. Następuje nagrzewanie się cienkiej warstwy materiału zgrzewanych elementów. Rozpoczyna się osiowe odkształcanie łączonych części oraz promieniowe i styczne przemieszczanie się materiału do wypłytki. Zimniejsze obszary materiału ulegają przesunięciu w kierunku powierzchni łączenia gdzie „uczestniczą” w procesie tarcia.

Trzeci etap charakteryzuje się rozwojem szczipień metalicznych obejmujących całą powierzchnię tarcia oraz intensywnym wydzielaniem ciepła, któremu towarzyszy silne uplastycznienie materiału w obszarze bliskim płaszczyzn tarcia. Uplastyczniony materiał jest przesuwany promieniowo i stycznie do wypłytki. W tym czasie temperatura na powierzchni styku zgrzewanych elementów osiąga wartość maksymalną.

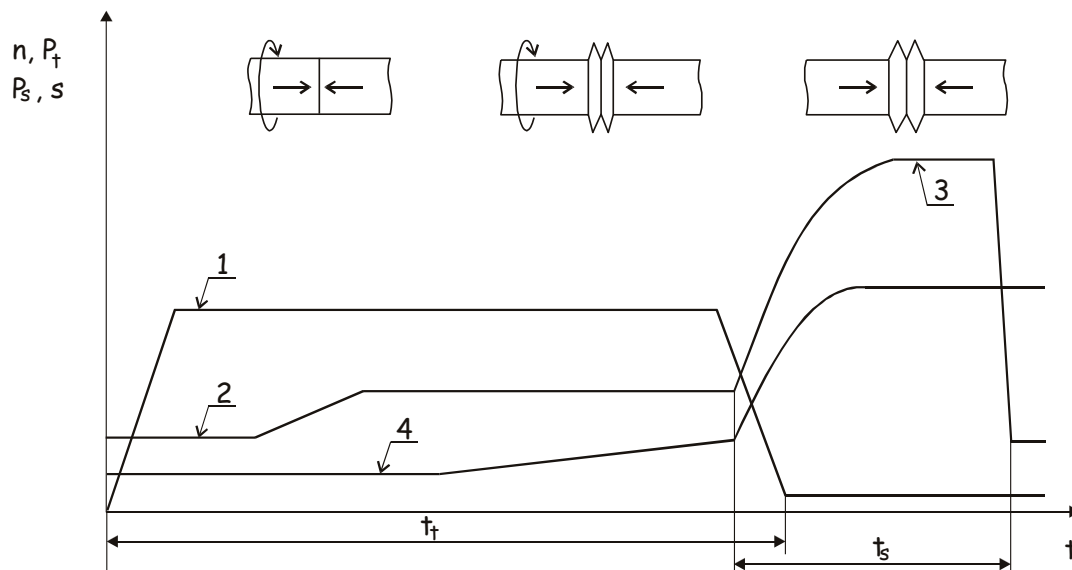
Odpowiednio wytrzymałe połączenie jest uzyskiwane w czwartym etapie, po całkowitym zatrzymaniu ruchu oraz wywarceniu dodatkowej siły spęczania.

Proces zgrzewania ze względym ruchem obrotowym łączonych elementów może być realizowany w dwojaki sposób:

- ze stałą prędkością obrotową,
- ze zmienną prędkością obrotową.

Nagrzewanie tarciove ze stałą prędkością obrotową, czyli z napędem ciągłym wrzeciona, jest rozwiązaniem najczęściej stosowanym w przemyśle krajowym. Znane jest również nagrzewanie tarciove ze zmienną prędkością obrotową podczas fazy tarcia tzw. zgrzewanie tarciove inercyjne.

Schemat typowego cyklu zgrzewania tarciowego ze stałą prędkością obrotową przedstawiono na rys. 2.



**Rys. 2. Schemat typowego cyklu zgrzewania tarcowego ze stałą prędkością obrotową**  
 1 – prędkość obrotowa tarcia  $n$ ; 2 – siła docisku tarcia  $P_f$ ;  
 3 – siła docisku spęczania  $P_s$ ; 4 – skrócenie elementów  $s$ ;  $t_f$  – czas tarcia;  
 $t_s$  – czas spęczania [2]

Do podstawowych parametrów zgrzewania tarcowego z napędem ciągłym należą [2]:

- prędkość obrotowa tarcia,
- siła docisku tarcia,
- czas tarcia,
- siła docisku spęczania,
- czas spęczania.

**Prędkość obrotowa tarcia** decyduje o nagrzewaniu obszaru styku. Ze wzrostem prędkości obrotowej, przy stałej sile docisku, węższa jest strefa odkształcenia plastycznego i maleje moment tarcia. Temperatura materiału w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni styku wzrasta wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

**Siła docisku tarcia** wpływa na prędkość nagrzewania obszaru styku. Dobór siły docisku tarcia polega na poszukiwaniu takich jej wartości dla danego zestawu materiałów, aby czas tarcia był możliwie krótki i skrócenie zgrzewania elementów było minimalne.

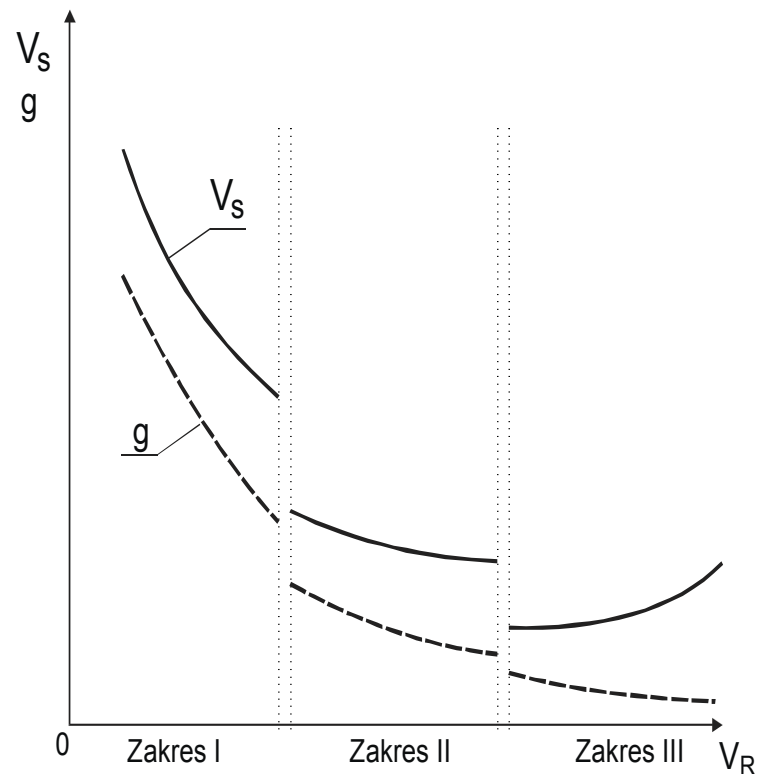
**Czas tarcia** ustalany jest w ścisłej korelacji z prędkością obrotową i siłą docisku tarcia. Czas tarcia powinien być wystarczająco długi, by w danych warunkach tarcia materiał w styku nagrzał się na odpowiedniej głębokości do temperatury pozwalającej na uzyskanie trwałego połączenia metalicznego w fazie spęczania.

**Siła docisku spęczania** zależy od własności zgrzewanych materiałów i wymaganego stopnia zgniotu. Docisk spęczania jest na ogół o 20÷100 % większy od siły docisku w strefie tarcia kinetycznego.

**Czas spękania** wynosi zazwyczaj kilka sekund i zależy od wartości opóźnienia podczas hamowania obrotów wrzeciona i właściwości zgrzewanych materiałów.

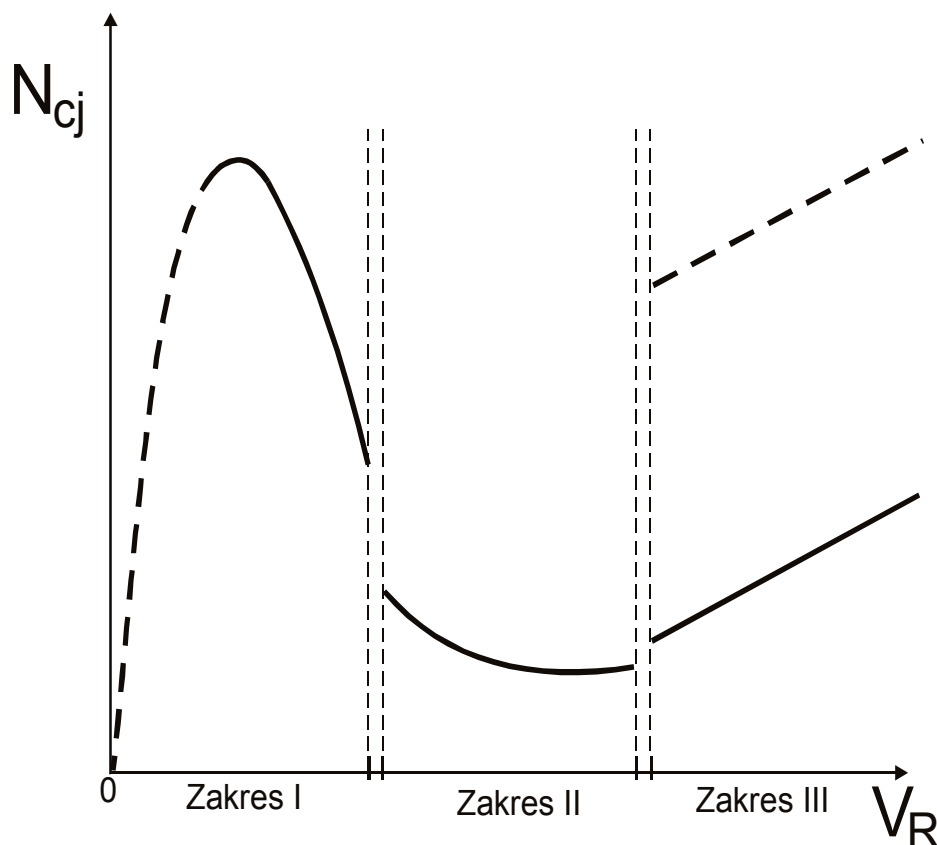
Olbrzymia różnorodność zjawisk występująca w procesie zgrzewania tarcowego powoduje trudności w prawidłowym opisie procesu. Dlatego parametry technologiczne zgrzewania tarcowego łączonych materiałów ustala się doświadczalnie. Konwencjonalne zgrzewanie tarcowe odbywa się najczęściej przy prędkościach obrotowych tarcia w zakresie 500 do 5000 obr/min [3]. Obecnie zgrzewarki tarcowe umożliwiają zgrzewanie z prędkościami obrotowymi dochodzącymi do 25 000 obr/min [4]. Wysokoobrotowe zgrzewarki tarcowe w znaczny sposób zmieniają warunki łączenia w stosunku do konwencjonalnych metod zgrzewania tarcowego.

Na rys. 3 przedstawiono przebieg zależności prędkości odkształcania (skracania) elementów od prędkości tarcia oraz zmianę grubości warstwy odkształcanej plastycznie wraz ze zmianą prędkości tarcia.



**Rys. 3. Zmiana prędkości odkształcania (skracania) elementów  $V_s$  oraz grubości warstwy odkształcanej plastycznie  $g$  w zależności od prędkości tarcia  $V_R$  [5]**

Również intensywność nagrzewania, czyli moc cieplna procesu tarcia, zależy od prędkości podczas zgrzewania. Zmianę jednostkowej mocy cieplnej procesu tarcia w funkcji zmiany prędkości tarcia przedstawiono na rys. 4.



**Rys. 4. Schemat zmiany jednostkowej mocy cieplnej procesu tarcia  $N_{cj}$  wraz ze wzrostem prędkości tarcia  $V_R$  [5]**

Przy prowadzeniu procesu nagrzewania tarciowego z małą prędkością tarcia (zakres I na rys. 3 i 4) moc cieplna procesu tarcia oraz prędkość odkształcania (skracania się) elementów są bardzo duże [5, 6]. Przygotowanie do zgrzewania stykających się powierzchni elementów ma mały wpływ na jakość złącza. Występują duże prędkości skracania podczas tarcia i tworzy się duża wypływka z uplastycznionego materiału, a obszar styku jest skutecznie oczyszczany z wszelkich zanieczyszczeń. Łączenie materiałów zachodzi w stosunkowo niskich temperaturach. Tego typu warunki zgrzewania występują przy zgrzewaniu prowadzonym z prędkościami do kilkuset obrotów na minutę.

Zgrzewanie z większymi prędkościami tarcia wiąże się ze znacznie mniejszymi mocami cieplnymi procesu (zakres II na rys. 3 i 4). Temu procesowi towarzyszy nieznaczne skrócenie elementów. Ze względu na niewielkie prędkości skracania się elementów, czyli małą prędkość pozornego ruchu źródła ciepła wzdłuż osi elementów, temperatura obszaru styku jest wyższa niż w pierwszym przypadku i bardziej wyrównana wzdłuż promienia zgrzewanych powierzchni. Aby uzyskać wysoką jakość połączenia przygotowanie powierzchni elementów do zgrzewania musi być bardziej dokładne, niż w przypadku zgrzewania z małymi prędkościami obrotowymi. W tym zakresie warunków zgrzewania, mimo wzrostu prędkości tarcia spada wartość momentu tarcia i dlatego ilość generowanego ciepła tarcia wraz ze wzrostem prędkości tarcia nieznacznie spada lub pozostaje na niezmiennym poziomie. Tego typu warunki zgrzewania występują przy zgrzewaniu prowadzonym z prędkościami od 800 do 5 000 obr/min.

Przy bardzo dużych prędkościach obrotowych, rzędu kilkudziesięciu tysięcy obrotów na minutę, strefa odkształcenia materiału jest bardzo mała (zakres III na rys. 4). Ze względu na minimalne skrócenie elementów temperatura w styku może w pewnych mikroobszarach styku sięgać temperatury topnienia materiału. Ze względu na bardzo duże prędkości tarcia moc cieplna procesu w tym zakresie warunków zgrzewania ma tendencję wzrostową. Na rysunku 3 teoretyczny wzrost intensywności nagrzewania zaznaczono linią przerywaną. W praktyce stosowane są znacznie niższe dociski w trakcie zgrzewania tarciovego z bardzo dużymi prędkościami tarcia w porównaniu do zgrzewania w warunkach obejmujących zakresy I i II (rys. 4) i dlatego też rzeczywisty przebieg zmian intensywności nagrzewania, w zależności od prędkości tarcia, przedstawiony w postaci linii ciągłej różni się od teoretycznego.

Warunki zgrzewania są dobierane w zależności od rodzaju i wymiarów zgrzewanych elementów. Zarówno siła docisku tarcia, jak i prędkość obrotowa i czas tarcia wpływają na szybkość nagrzewania powierzchni styku tarciovego, głębokość oddziaływania sił tarcia, prędkość skracania się elementów, szerokość strefy wpływu ciepła w złączu itp., co w efekcie znajduje swe odbicie w jakości uzyskanego połączenia. Dla każdego rodzaju zgrzewanych materiałów ze stali węglowych, stopowych, a także metali nieżelaznych, można dobrać właściwe parametry zgrzewania, które muszą uwzględniać zarówno wymiary zgrzewanych elementów, jak i parametry zgrzewarki tarcioviej.

### **3. ZAKRES ZASTOSOWANIA ZGRZEWANIA TARCIOWEGO W PRAKTYCE**

W Polsce opracowywaniem technologii zgrzewania tarciovego w zakresie średnic od ok. 10 do 35 mm (maksymalny nacisk osiowy 250 MN) różnych elementów zajmują się Instytut Spawalnictwa oraz, w zakresie średnic od 20 do 115 mm (maksymalny nacisk osiowy 400 MN) – Instytut Metalurgii Żelaza.

Zgrzewanie tarciove można stosować do łączenia różnych elementów ze stali konstrukcyjnych węglowych i stopowych, różnych gatunków stali narzędziowych, nierdzewnych, kwasoodpornych i żaroodpornych, tytanu, cyrkonu, niobu, miedzi, aluminium i innych. Jest to metoda, którą z powodzeniem można stosować do łączenia materiałów różniący się kształtem i wymiarami geometrycznymi oraz własnościami fizycznymi.

Szczególne cechy zgrzewania tarciovego pozwalają na zastosowanie tej metody łączenia do zgrzewania materiałów różnoimiennych, nawet znacznie różniących się własnościami fizycznymi, jak np. stal austenityczna z węglową, stal węglowa z aluminium czy aluminium z miedzią. Poprawne zgrzeiny można uzyskiwać podczas łączenia takich materiałów jak aluminium ze stalą niskowęglową, kwasoodporną, tytanem, niobem, niklem, stopami niklu i magnezu, miedzią, miedzi ze stalą węglową i kwasoodporną oraz tytanem i srebrem itp. W specjalnie dobranych warunkach zgrzewane są również mosiądze z miedzią, brąz ze stalą, tytan z niklem, a także stal węglowa czy narzędziowa z przedmiotami z węglików spiekanych, ze stopami z tantalu, cyrkonu, niobu i wolframu. Możliwe jest również łączenie doczołowe prętów ze stopu aluminium, otrzymanego metalurgią proszków z szybkim krzepnięciem (np. Al-Fe-Ce) z prętami aluminiowymi ze stopu przemysłowego (np. serii 2000).

W przypadku, gdy niemożliwe jest uzyskanie połączenia o wymaganej jakości, ze względu na znaczne różnice we własnościach fizycznych zgrzewanych materiałów, można

stosować wkładkę z materiału pośredniego, wykonanego z materiału dobrze zgrzewalnego z każdym z obu łączonych elementów.

Zgrzewanie tarcowe stosuje się w produkcji seryjnej odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych pojazdów samochodowych, np. rozpierek hamulcowych, elementów układów sterowania, elementów ciągników, rowerów, motocykli, maszyn rolniczych (główek, łączników, wsporników, wałków, sworzni lub haków [7]), górniczych [8,9] (rur podsadzkowych i rur do zasilania obudów górniczych), poligraficznych, włókienniczych, armatury przemysłowej, urządzeń chemicznych, turbin gazowych, urządzeń wiertniczych, rolek przenośników taśmowych rur kołnierzych [10], a także sprawdzianów i narzędzi do obróbki metali i drewna.

W Instytucie Spawalnictwa opracowano technologię doczołowego zgrzewania tarcowego prętów aluminiowych z prętami miedzianymi o średnicach od 20 do 34 mm. Na rys. 5 przedstawiono zgrzewane tarcowo próbki prętów aluminiowych z prętami miedzianymi a w tablicy 1 przyjmowane parametry zgrzewania tarcowego[11].



Rys. 5. Próbkki po zgrzewaniu tarcowym [11]

Tablica 1. Parametry zgrzewania tarcowego prętów aluminiowych z miedzianymi[11]

Średnica pręta d [mm]	Siła docisku [kN]		Czasy [s]		Prędkość obrotowa wrzeciona n [obr/min]
	tarcia $P_w$	spęczania $P_{s1}=P_{s2}$	tarcia $t_w$	spęczania $t_{s1} = t_{s2}$	
20	11	68	4.0	6	800
25	18	95	6.0	6	800
28	19	100	7.0	6	800
30	21	105	7.5	6	800
34	40	180	4.2	6	600

Wykonywane w Instytucie Spawalnictwa złączki Al-Cu o średnicach od 12 mm do 34 mm są wykorzystywane w bieżących naprawach kabli energetycznych. Dotychczas nie stwierdzono przypadku awarii kabla wykonanego z wykorzystaniem technologii zgrzewania tarcowego. Badania przewodności elektrycznej oraz odporności na korozję chemiczną złązek Al-Cu prowadzone przez wyspecjalizowane jednostki przemysłu energetycznego, stwierdziły bardzo dobrą przewodność elektryczną złączy oraz pełną przydatność tych wyrobów do zastosowań przemysłowych.

#### 4. WNIOSKI

Korzystne właściwości techniczno-ekonomiczne zgrzewania tarcowego (duża sprawność procesu, wysoka wydajność, bardzo dobre własności połączeń, bezpieczne warunki pracy itp.) pozwalają obecnie na:

- zastępowanie litych elementów metalowych konstrukcyjnych wykonywanych metodą skrawania, elementami zgrzewanymi z prętów lub rur, co wpływa na zmniejszenie zużycia materiałów,
- obniżenie kosztów wykonania konstrukcji poprzez zastąpienie elementów konstrukcyjnych, wykonywanych dotychczas z drogich metali, elementami bimetalowymi składającymi się z metali tańszych lub bardziej odpowiednich ze względów użytkowych, oraz zastąpienie skomplikowanych odkuwek lub odlewów elementami zgrzewanymi z kilku części o prostych kształtach, łatwych w produkcji,
- zastępowanie zgrzewaniem tarcowym mniej wydajnych metod spawalniczych, zwłaszcza w produkcji seryjnej,
- poprawę warunków BHP w procesach łączenia elementów konstrukcji.

#### 5. LITERATURA

- [1] BOGUCKI R., LESZCZYŃSKI J., MAKARUCHA J.: Przystosowanie metody zgrzewania tarcowego do różnych technologii, Sprawozdanie nr 2505, IMŻ, Gliwice, 30.09.1980 r.
- [2] Praca zbiorowa, Poradnik inżyniera, Spawalnictwo, 1983.
- [3] KLIMPEL A.: Technologia zgrzewania metali i tworzyw termoplastycznych, Wyd. Pol. Śl. Gliwice, 1999r.
- [4] Prospekty i materiały firmy Harms+Wende
- [5] PIETRAS A.: Studium i badania zjawisk cieplno-naprężeniowych przy zgrzewaniu tarcowym materiałów o różnych własnościach fizycznych. Sprawozdanie nr ST-162, IS, 2000 r.
- [6] PIETRAS A.: Zgrzewanie tarcowe z głowicą wysokoobrotową – nowe możliwości i zastosowanie. Seminarium IS, Listopad, 2002 r.
- [7] MICHALSKI R.: Prace własne Instytutu Spawalnictwa, Gliwice, 1976-1987 r.
- [8] BOGUCKI R., LESZCZYŃSKI J., MAKARUCHA J.: Opracowanie produkcji rur podszkawkowych o zwiększonej odporności na zużycie metodą zgrzewania tarcowego, Sprawozdanie nr N-2243, IMŻ, Gliwice, 31.12.1979 r.
- [9] BOGUCKI R., LESZCZYŃSKI J., MAKARUCHA J.: Opracowanie produkcji zgrzewanych tarcowo rur do zasilania obudów górniczych, Sprawozdanie nr N-3631, IMŻ, Gliwice, 30.06.1980 r.



- [10] BOGUCKI R., LESZCZYŃSKI J., MAKARUCHA J.: Badanie powtarzalności zgrzewania tarcowego rur kołnierzowych, Sprawozdanie nr W-440, IMŻ, Gliwice, 30.03.1979r.
- [11] PIETRAS A.: Opracowanie technologii zgrzewania tarcowego złączy Al+Cu, Sprawozdanie nr A-5, IS, 1996 r.

## **CHARACTERISTIC OF IRON CONSTRUCTION FRICTION WELDING**

**Abstract:** The paper presents a short description of friction welding technology and some examples of its use in industrial practice.

Recenzent: dr inż. Jacek SPAŁEK