

# Spajanie metali w stanie stałym

## z zastosowaniem odkształcenia plastycznego

### SPIS TREŚCI

Wprowadzenie.....	1
Spajanie zgniotem na zimno .....	2
Parametry spajania zgniotowego.....	3
Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny.....	4
Zgrzewanie tarciove doczołowe.....	5
Przebieg operacji RFW .....	5
Fazy operacji zgrzewania .....	5
Parametry zgrzewania tarciove.....	6
Charakterystyka zależności występujących podczas operacji.....	6
Zgrzewanie tarciove ruchem liniowym.....	7
Literatura .....	8

## WPROWADZENIE

Spajaniem metali w stanie stałym nazywamy proces zmierzający do nierozłącznego montażu dwóch części metalowych zachodzący z udziałem odkształcenia plastycznego. Podczas spajania zachodzą złożone procesy cieplno-odkształceniowe, które najintensywniej przebiegają na styku dwóch spajanych metali. Zastosowane odkształcenie plastyczne i charakter zjawiska plastycznego płynięcia determinują powstanie złącza o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych, cechach geometrycznych i własnościach użytkowych.

Celem opracowania jest przedstawienie najważniejszych metod spajania metali w stanie stałym oraz wskazanie ich zastosowania w procesach wytwarzania. Wiedza technologiczna zostanie przekazana bez podania naukowego wytłumaczenia zjawiska spajania dwóch metali, które zachodzi w procesie ich plastycznego odkształcenia.

Spajanie metali w stanie stałym szczególnie chętnie stosowane jest wszędzie tam, gdzie w procesie wykonywania złączy trzeba eliminować niekorzystne zjawiska, jak np. silnie rozwinięta rekrytalizacja oraz przemiany fazowe i procesy dyfuzyjne zagrażające rozwojem niejednorodności czy powstawaniem kruchych faz międzymetalicznych. Technologia wykorzystuje odkształcenie plastyczne i umożliwia łączenie takich materiałów, które nie mogą być łączone za pomocą innych technologii spawania bez narażania na utratę właściwości mechanicznych. Metale poddane wzrastającemu obciążeniu odkształcają się sprężysto, a po przekroczeniu naprężenia odpowiadającego granicy plastyczności zaczynają się odkształcać plastycznie. Podniesienie temperatury ułatwia uplastycznienie. Właśnie takie cechy metali wykorzystuje się przy spajaniu metali w stanie stałym.

Aby uzyskać połączenie dwóch metali w stanie stałym, należy zbliżyć atomy na odległość rzędu parametru sieci krystalograficznej. Wówczas może nastąpić oddziaływanie między atomami znajdującymi się na powierzchni złączenia. Żeby doszło do połączenia trzeba doprowadzić do uplastycznienia warstwy wierzchniej, izolującej łączone powierzchnie – materiał z tej warstwy dobrze jest wyprowadzić ze strefy złącza (np. do wypłytki). Istotną rolę w procesie spajania w stanie stałym zawsze odgrywa **siła wywierana na łączone elementy**, gdyż to ona powoduje ich miejscowe odkształcenie plastyczne. Dobór wartości tej siły jest kluczowy dla umożliwienia powstania połączeń adhezyjnych.

Spajanie stosujące odkształcenie plastyczne może odbywać się w dwojaki sposób:

1. z użyciem narzędzia spajającego części materiału łączone celem uzyskania określonego przedmiotu o złożonym kształcie
2. z wykorzystaniem części sztywnych przedmiotów łączonych miejscowo celem uzyskania trwałego ich połączenia

Pierwszy sposób jest stosowany powszechnie w procesach obróbki plastycznej gdyż umożliwia trwałe spajanie tych obszarów kształtowanych plastycznie przedmiotów, które znajdują się w strefie roboczej narzędzi. W ten sposób produkuje się takie przedmioty jak: zamknięte profile wyciskane współbieżnie na zimno, bimetalowe tuleje wyciskane przeciwbieżnie czy bimetalowe rury bez szwu ciągnięte na zimno oraz wyroby powłokowe ze złączami uzyskiwanymi w stanie stałym przez walcowanie wzdłużne. Najczęstszym jednak sposobem spajania metali i ich stopów w stanie stałym jest zastosowanie kucia swobodnego oraz matrycowego. Używa się do tego celu nacisku statycznego lub uderzenia (udary). Takimi sposobami uzyskuje się złącza punktowe w wyrobach blaszanych i złącza doczołowe w wyrobach prętowych. Najprostszym sposobem wykonania złącza w stanie stałym z udziałem odkształcenia plastycznego jest spajanie zgniotem na zimno. Najnowszym zaś pomysłem technologicznym w tym zakresie jest spajanie metalu z przemieszaniem.

Drugi sposób wymaga dostarczenia energii mechanicznej o wartości umożliwiającej częściowe uplastycznienie łączonych elementów w obszarze powierzchni styku bez udziału narzędzia. Nacisk potrzebny do uplastycznienia jest przenoszony przez oba łączone elementy, a energia mechaniczna bierze się z pracy tarcia. Takie sposoby spajania metali w stanie stałym w literaturze technicznej są zwane procesami zgrzewania tarcowego.

W dalszej części opracowania podano definicje i określenia dotyczące czterech metod spajania w stanie stałym. Szerzej zaś omówiono tylko dwie, mianowicie (1) i (3), spośród czterech współcześnie stosowanych metod spajania. Są to następujące metody:

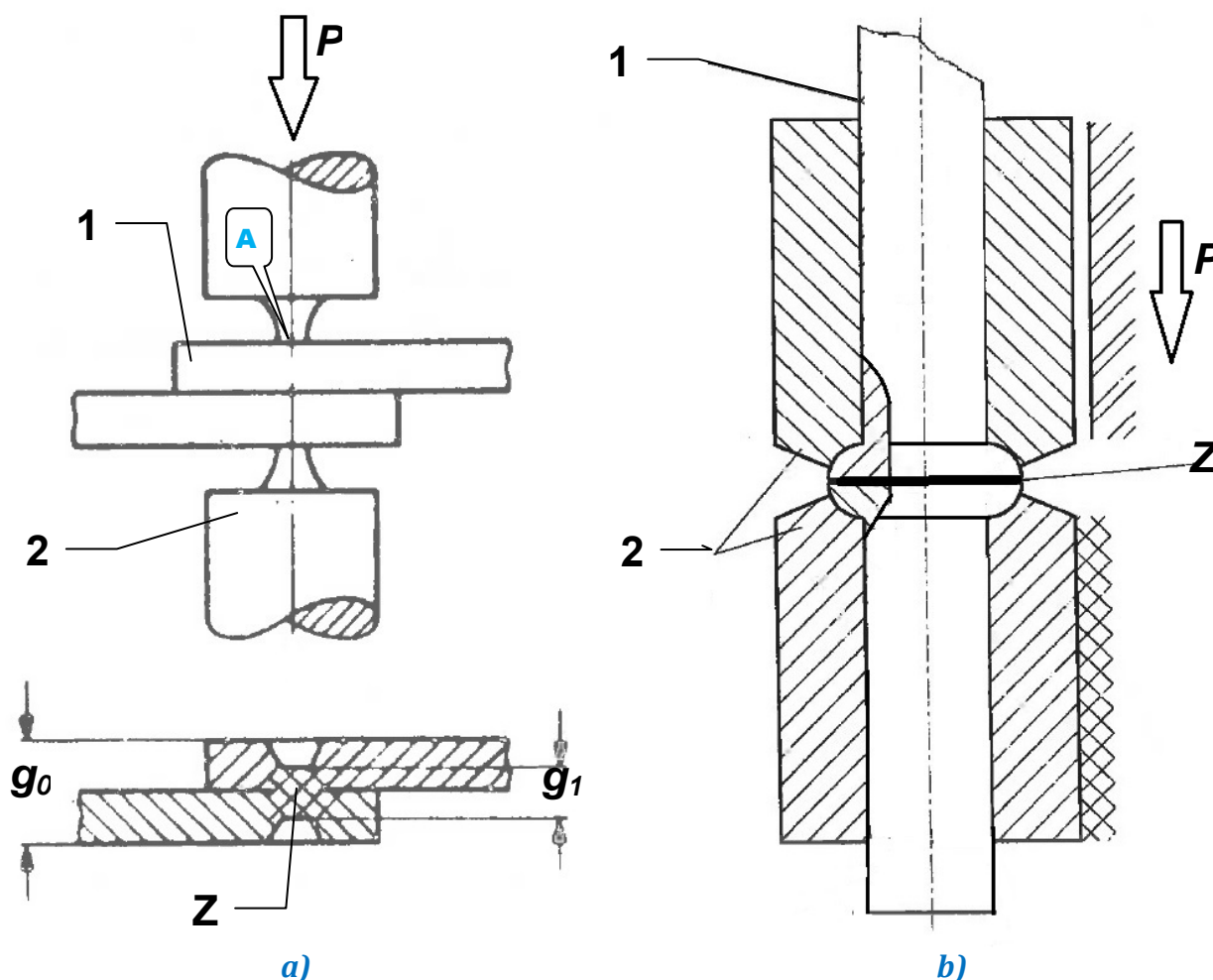
1. Spajanie zgniotem na zimno
2. Zgrzewanie tarcowe z mieszaniem materiału zgrzeiny
3. Zgrzewanie tarcowe doczołowe wykorzystujące ruch obrotowy
4. Zgrzewanie tarcowe cyklicznym ruchem posuwisto-zwrotnym

Zastanawiać może używanie dla określenia łączenia w stanie stałym dwóch nazw, tzn. spajanie i zgrzewanie. Spajanie jest pojęciem bardzo ogólnym, zgrzewanie zaś sugeruje wykorzystanie ciepła w procesie spajania. Energia dostarczana w procesach zgrzewania najczęściej pochodzi z pracy tarcia.

## SPAJANIE ZGNIOTEM NA ZIMNO

Spajanie zgniotem na zimno (zwane często **spajaniem zgmiotowym**) jest pierwszą odnotowaną w literaturze technicznej metodą trwałego łączenia metali. Spajanie odbywa się w stanie silnego uplastycznienia a oprócz odkształcenia plastycznego podstawowymi mechanizmami tworzenia połączenia są tarcie i dyfuzja zachodzące w temperaturze otoczenia. Odkształcenie plastyczne jest potrzebne do odsłonięcia w obszarze styku czystych powierzchni metalicznych co umożliwi dalej tworzenie mostków szkieletu aktywnych dyslokacji, a w wyniku oddziaływania objętościowego napierającego metalu ostateczne połączenie metaliczne.

Przebieg spajania z wykorzystaniem zgmiotu metalu na zimno i metody służące do wykonania zgrzein zgmiotowych opisano w podręczniku [1]. Jedną z metod może być zaprezentowana w ćwiczeniu laboratoryjnym (pierwotnie przygotowanym dla przedmiotu Techniki Wytwarzania 1) [2]. Przewidziano w tym ćwiczeniu wykonanie zgrzeiny punktowej w złączu zakładkowym przez dwustronne odkształcenie blach. Operacja będzie prowadzona wg. schematu pokazanego na Rys. 1a. Drugą często stosowaną metodą spajania przez lokalne odkształcenie plastyczne jest doczołowe spajanie prętów i rur, prowadzone wg. schematu przedstawionego na Rys. 1b.



Rys. 1. Wybrane schematy spajania zgniotowego metali: a) wykonanie zgrzeiny punktowej bez dociskacza (złącze zakładkowe blach), b) wykonanie zgrzeiny doczołowej (spajanie drutu): 1 spajane przedmioty, 2- narzędzia – stempel lub szczęki (dolna mocująca i górna zaciskowa),  $P$ - siła nacisku,  $Z$ - zgrzeina,  $g_0$ ,  $g_1$  – grubości przedmiotu w strefie styku

## Parametry spajania zgniotowego

W przypadku metod pokazanych na Rys. 1 podstawowe parametry spajania metali zgniotem na zimno to:

- sposób przygotowania powierzchni stykowych na przedmiotach przeznaczonych do połączenia – parametr rozstrzygająco wpływa na jakość złącza
- zastosowana wielkość odkształcenia plastycznego  $\epsilon$  i związana z tym odkształceniem siła nacisku
- wielkość powierzchni roboczej  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) stempla przy spajaniu punktowym (Rys. 1a)
- długość przedmiotów  $L$  (mm) przeznaczona do odkształcenia przy spajaniu doczołowym (Rys. 1b)
- wielkość wstępnego odkształcenia na zimno  $\epsilon_0$  materiału, z którego wykonano spajane przedmioty.

Dokładne **przygotowanie powierzchni stykowych** przedmiotów przed spajaniem ma na celu nie tylko usunięcie wszelkich zanieczyszczeń, które utrudniają styk czystych powierzchni metalicznych. Głównie chodzi o odsłonięcie czystego metalu przykrytego warstwą tlenków. W przypadku złączy zakładkowych (Rys. 1a) powszechnie stosuje się czyszczenie wcześniej odłuszczonej powierzchni blach szczotkami z drutu (o średnicy ok. 0,1 mm) ze stali austenitycznej. Odkształcanie w przyrządzie do spajania zgniotowego powinno być wykonane w możliwie jak najkrótszym czasie po oczyszczeniu powierzchni stykowej, aby uniknąć ponownego utlenienia. Przy wykonywaniu złączy doczołowych zgrzewarki zgniotowe wyposażone są w specjalne gilotyinki, które tuż przed spajaniem odcinają końce łączonych przedmiotów.

W celu uzyskania połączenia metalicznego przygotowanych powierzchni styku konieczne jest ich wydłużenie powyżej określonej wielkości progowej. Wielkość ta zależy od rodzaju spajanych metali i użytej techniki ich spajania. Odpowiednią **wartość niezbędnego odkształcenia plastycznego  $\epsilon$**  dobiera się biorąc pod uwagę stosunek twardości warstwy tlenkowej do twardości metalu, na którym ta warstwa jest

utworzona. Stosunek ten dla aluminium wynosi ok. 4 i dla tego materiału zaleca się zastosowanie minimalnej wartości względnego odkształcenia 40%. W przypadku miedzi i żelaza, dla których wspomniany stosunek jest w zakresie  $1,2 \div 2$ , trzeba już zastosować odkształcenie względne minimum 75%. Minimalna wielkość zgniotu na zimno, niezbędna dla uzyskania poprawnego złącza, jest określona zazwyczaj przez podanie względnego odkształcenia powierzchni styku  $\epsilon_A$ . Przybliżoną wartość parametru  $\epsilon_A$ , który w wystarczający sposób określa stopień odkształcenia obszaru styku, można obliczać ze wzoru:

$$\epsilon_A = (A_1 - A_0) / A_0 \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:  $A_0$  – powierzchnia styku przed spajaniem,  $A_1$  – powierzchnia styku po zastosowaniu odkształcenia.

W przypadku wykonywania złącza zakładkowego blach można przyjąć, że  $A_0 = A$ , czyli początkowa powierzchnia styku jest równa wielkości powierzchni roboczej stempla. Z punktu widzenia praktyki prowadzenia odkształcenia blach wg. schematu z Rys. 1a, wskazane jest powiązanie wielkości zastosowanego odkształcenia plastycznego  $\epsilon$  ze zmianą grubości łączonych blach, a więc z wartością zgniotu

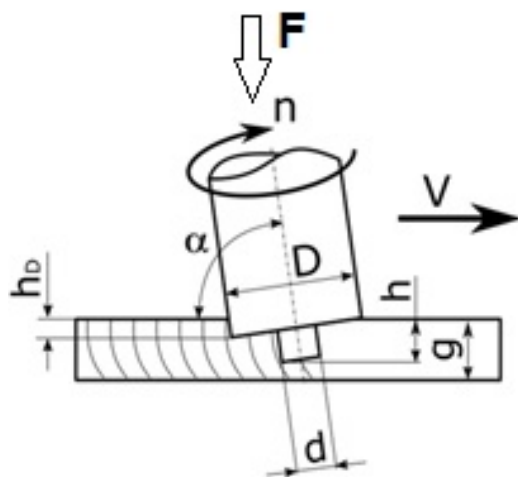
$$\epsilon_g = (\Delta g / g) \cdot 100 \quad [\%].$$

Zastosowanie **wstępnego odkształcenia na zimno**  $\epsilon_0$  zwiększa gęstość ruchomych dyslokacji. Dzięki temu spajanie materiału odkształconego zgniotem w operacjach obróbki plastycznej poprzedzających wykonanie złącza umożliwia obniżenie wymaganego minimalnego względnego odkształcenia powierzchni styku  $\epsilon_A$  o ok. 3-5%.

## ZGRZEWANIE TARCIOWE Z MIESZANIEM MATERIAŁU ZGRZEINY

Metoda zgrzewania tarcioвого z mieszaniem materiału zgrzeiny (znana jako **FSW**<sup>1</sup>) została opracowana przez Instytut Spawalnictwa w Cambridge w Wielkiej Brytanii (The Welding Institute Ltd.) w roku 1991. Zrazu technologia była chroniona patentem, którego ważność niedawno wygasła. Ten fakt przyczynił się do wzrostu zainteresowania tą technologią w kręgach naukowców i zapewne niebawem spowoduje jej upowszechnienie w przemyśle. Dlatego technika zgrzewania tarciowego z przemieszczaniem zgrzeiny – chociaż dzisiaj jeszcze uważana za niekonwencjonalną – warta jest uwagi.

Z tego właśnie powodu część prac projektowych będzie poświęcona stanowisku badawczemu do zgrzewania, które docelowo będzie mogło być wykorzystane do spajania metodą **FSW**. Głowica urządzenia do **FSW** powinna umożliwiać pracę specjalnego narzędzia wg. schematu przedstawionego na Rys. 2. Głowica musi mieć możliwość pochylenia do powierzchni zgrzewanej blachy o grubości  $g$  pod kątem  $\alpha$  ( $^\circ$ ) – nachylenie zapewnia równomierne przemieszczanie i wymieszanie łączonego materiału. Wrzeciono głowicy musi umożliwić zamocowanie narzędzia trzpieniowego o dwóch średnicach ( $D$  i  $d$ ), nadanie mu prędkości obrotowej  $n$  i prowadzenie w zaprogramowanym kierunku z prędkością liniową  $V$ .



Urządzenie technologiczne umożliwiające – oczywiście dopiero po odpowiedniej modernizacji – prowadzenie zgrzewania metodą **FSW** może być zaprezentowane w ćwiczeniu laboratoryjnym.

Rys. 2. Schemat technologiczny zgrzewania **FSW**

<sup>1</sup> **FSW** = Friction Stir Welding

## ZGRZEWANIE TARCIOWE DOCZOŁOWE

Idea procesu zgrzewania tarcioowego znana jest od ponad stu lat. Konwencjonalne zgrzewanie tarcioowe jest procesem, w którym ciepło niezbędne do wykonania trwałego połączenia pochodzi z bezpośredniej zamiany energii mechanicznej na energię cieplną. Przemiana ta jest wynikiem tarcia zachodzącego w obszarze wzajemnego styku zgrzewanych przedmiotów.

W przemyśle najczęściej stosuje się tarcioowe zgrzewanie doczołowe, w którym w celu dostarczenia energii cieplnej wprawia się jeden element w ruch obrotowy i dociska do drugiego elementu nieruchomego.

Proces konwencjonalnego zgrzewania tarcioowego (znany jako **RFW**<sup>2</sup>) przebiega następująco:

- napędzanie jednego ze zgrzewanych przedmiotów do prędkości obrotowej
- wywarcie docisku przez dosunięcie drugiego zgrzewanego przedmiotu
- nagrzewanie złącza przez zamianę energii kinetycznej na ciepło tarcia
- zatrzymanie ruchu obrotowego i wywarcie docisku celem wywołania spęczania

Z powyższego wynika, że w procesie zgrzewania elementów najpierw nagrzewane są powierzchnie zewnętrzne, a następnie ciepło przepływa do wewnątrz rozkładając się równomiernie w obszarze powierzchni czołowych. Tam powstaje zgrzeina a zanieczyszczenia są wyprowadzane na zewnątrz w tworzącą się wypływkę.

Opisany powyżej przebieg operacji jest typowy dla odmiany zgrzewania tarcioowego doczołowego **RFW**, znanej jako **DD-RFW**<sup>3</sup> (zgrzewanie tarcioowe z napędem ciągłym).

W literaturze technicznej można znaleźć szereg zalet zgrzewania tarcioowego doczołowego (tj. spajania typu **RFW**). Do podstawowych zalet zalicza się m.in.:

- wysoka jakość złączy, dzięki kontrolowanej obróbce cieplno-plastycznej zachodzącej w czasie procesu zgrzewania
- możliwość łączenia materiałów różniących się znacznie własnościami fizycznymi
- możliwość łączenia przedmiotów o różnych kształtach i wymiarach – przeważnie jest ograniczona długość tylko jednego z przedmiotów zgrzewanych
- duża wydajność zgrzewania; w przypadku drobnych elementów nawet do 600 złączy/h (przy czym czas cyklu zależy od stopnia automatyzacji)
- równomierne obciążenie sieci zasilającej i małe zużycie energii
- duża powtarzalność wyników zgrzewania oraz możliwość sterowania i kontroli jakości w czasie cyklu zgrzewania
- prosta obsługa urządzeń i łatwość automatyzacji.

### Przebieg operacji RFW

Szczegółowe informacje na temat procesu zgrzewania tarcioowego można znaleźć w normie [3], gdzie podano wymagania dotyczące zgrzewania tarcioowego metalowych elementów konstrukcyjnych.

### Fazy operacji zgrzewania

W typowym przebiegu doczołowego zgrzewania prętów można wydzielić dwie istotne fazy technologiczne: fazę **tarcia** i fazę **spęczania**. Otrzymanie prawidłowego połączenia wymaga wykonania szeregu dodatkowych czynności, jak np. uzyskanie odpowiedniej prędkości ruchu obrotowego jednego pręta, zbliżenie prętów, czy obciążanie poosiową siłą o zmiennej wartości, zapewnienie odpowiedniego przyspieszenia a

<sup>2</sup> **RFW** = Rotary Friction Welding

<sup>3</sup> **DD-RFW** = Direct Drive Rotary Friction Welding; Są dwa zasadnicze sposoby dostarczania energii z wykorzystaniem tarcia:

1. Direct Drive (or continuous drive friction welding) → element ruchomy jest zamocowany we wrzecionie obracającym się w wyniku nieustającego napędu pochodzącego z silnika elektrycznego
2. Inertia friction welding (IFW) → element ruchomy jest zamocowany we wrzecionie połączonym z kołem zamachowym, które jest odłączane od napędu pochodzącego z silnika elektrycznego w chwili gdy zostanie osiągnięta założona prędkość obrotowa. Wówczas dosuwany jest drugi element i koło zamachowe może przekazać swoją energię do powierzchni złączenia spajanych elementów. W tym sposobie zgrzewania prędkość obrotowa sukcesywnie się zmniejsza aż koło zamachowe w końcu stanie.

zwłaszcza kontrolowanego opóźnienia (obejmującego hamowanie). Z ww. powodów w przebiegu operacji można wyróżnić liczne etapy. Najważniejsze z nich (wg. [4]) przedstawiono na Rys. 3.



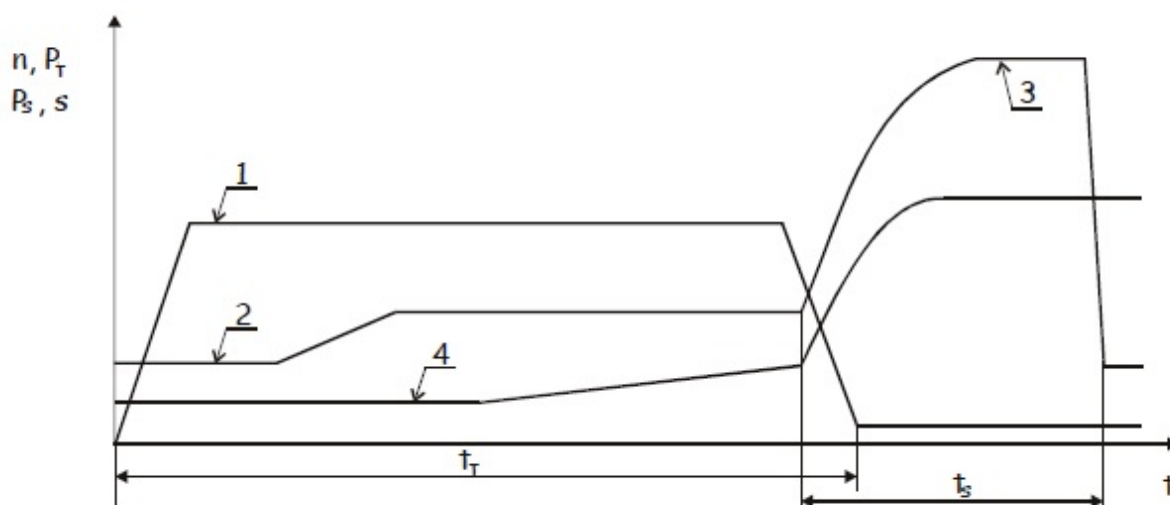
Rys. 3. Etapy wyróżniane w cyklu zgrzewania tarcioowego ze stałą prędkością obrotową: a) nadanie jednemu z prętów prędkości obrotowej, b) zbliżenie powierzchni czołowych prętów i dociśnięcie ich, c) zwiększanie siły docisku pręta obracającego się do pręta nieruchomego, d) utrzymanie docięnięcia prętów dużą siłą o stałej wartości przy równoczesnym skracaniu długości prętów wskutek powiększania wypłytki

## Parametry zgrzewania tarcioowego

Do podstawowych parametrów zgrzewania tarcioowego z napędem ciągłym należy wg. [4] zaliczyć:

- prędkość obrotowa wrzeciona  $n$ ,
- siła docisku w fazie tarcia  $P_T$ ,
- czas tarcia  $t_T$ ,
- siła docisku w fazie spęczania  $P_S$ ,
- czas spęczania  $t_S$ .

Parametry te zaznaczono na schematycznym przedstawieniu ich przebiegów w czasie pełnego cyklu zgrzewania, który wg. [4]. zaprezentowano na Rys. 4. W operacji zgrzewania tarcioowego nieuchronnym zjawiskiem jest skrócenie  $S$  zgrzewanych prętów, którego zmianę w czasie cyklu również pokazano na tym rysunku. Skrócenie  $S$  jest wynikiem powstawania wypłytki, którą przy zgrzewaniu konwencjonalnych metali można minimalizować przez dobór siły docisku w fazie tarcia.



Rys. 4. Przebiegi czasowe parametrów typowego zgrzewania tarcioowego ze stałą prędkością obrotową: 1 – prędkość obrotowa wrzeciona  $n$ , 2 – siła docisku w fazie tarcia  $P_T$ , 3 – siła docisku w fazie spęczania  $P_S$ , 4 – skrócenie prętów  $S$ ; wg. [4]

## Charakterystyka zależności występujących podczas operacji

Istota prawidłowego przebiegu zgrzewania zasadza się na dobrym przygotowaniu zgrzewanych powierzchni do powstania połączenia. Podstawowym warunkiem uzyskania metalicznych złączy w stanie stałym jest kontakt metalicznie czystych powierzchni. Odpowiednie przygotowanie powierzchni następuje w fazie tarcia i jest kontynuowane w początkowej części fazy spęczania. Chodzi o to, żeby metal na powierzchni styku był uplastyczniony, powierzchnia tarcia uaktywniona, a tlenki i inne wtrącenia usunięte do wypłytki.

Parametry zgrzewania mają określone znaczenie. Poniżej wymieniono ich najważniejsze role:

- gwałtowny wzrost momentu tarcia  $M_T$  następuje w pierwszym okresie po nadaniu elementowi ruchomemu prędkości obrotowej i towarzyszy mu wzrost temperatury na powierzchni tarcia; gdy  $M_T$  osiąga maksimum tarcie z suchego przechodzi do granicznego – na całej powierzchni styku tworzy się cienka warstwa uplastycznionego metalu spełniająca rolę „smaru”,
- temperatura w zgrzeinie  $T_z$  stopniowo wzrasta przy jednoczesnym zmniejszaniu się momentu tarcia  $M_T$  – wzrost  $T_z$  ułatwia uplastycznienie metalu i może rozpocząć się przenoszenie uplastycznionego materiału do wypłytki,
- gdy przebiegi czasowe momentu tarcia  $M_T$ , temperatury  $T_z$  i prędkości skracania  $V_s$  ustabilizują się to zgrzewanie wchodzi w okres quasi-stacjonarnego procesu tarcia – po zakończeniu tego okresu powierzchnie zgrzewane są przygotowane do powstania połączenia,
- prędkość obrotowa  $n$  powoduje rozrywanie mostków szczepnych, które tworzą się w wyniku wydzielania ciepła (cząstki materiału są wyrwane i zacierają się nierówności powierzchniowe); adhezja rozprzestrzenia się na cały obszar styku, a jej rozszerzenie powoduje wzrost temperatury – szczipienia metaliczne obejmują całą powierzchnię tarcia,
- czas zatrzymania obracającego się elementu (czas hamowania  $t_H$ ) ma istotny wpływ na właściwości złącza – uplastyczniony materiał jest przemieszczany do tworzącej się wypłytki wraz ze wszelkimi powierzchniowymi zanieczyszczeniami (z zatrzymaniem wiąże się gwałtowny wzrost momentu tarcia  $M_T$ ),
- siła docisku w końcowej części fazy tarcia  $P_T$  ma wpływ na wielkość wypłytki, tworzącej się w wyniku zadanego nacisku podczas tarcia (występuje osiowe skrócenie elementów),
- docisk siłą o wartości  $P_s$  w fazie spęczania (zazwyczaj większej od wartości siły  $P_T$ ) wywołuje obróbkę plastyczną na gorąco złącza zgrzanego tarciowo (powiększa się wypływka oraz następuje dalsze skrócenie łączonych elementów) – duży nacisk podczas spęczania wyprowadza do wypłytki zanieczyszczenia i pory co ma wpływ na uzyskanie odpowiednio wytrzymałego połączenia wierzchnich warstw materiałów.

Inne czynniki:

- Pożądanym jest regularny kształt powierzchni zgrzewanych – nieosiowosymetryczny kształt przekroju poprzecznego zgrzewanych prętów powoduje cykliczne odsłanianie powierzchni tarcia i prowadzi do jej utlenienia, a w rezultacie obniżenia wytrzymałości.

## ZGRZEWANIE TARCIOWE RUCHEM LINIOWYM

Metoda zgrzewania tarcioвого z ruchem liniowym ( $LFW^4$ ) jest zbliżona do metody  $RFW$ . Zastąpiono w niej ruch rotacyjny ruchem posuwisto zwrotnym (liniowym), co pokazuje uproszczony schemat zaprezentowany na Rys. 5. Dzięki temu, w przeciwieństwie do metody  $RFW$ , w której można zgrzewać doczołowo jedynie przedmioty osiowo symetryczne, w metodzie  $LFW$  łączone elementy nie muszą już spełniać warunku kołowej symetryczności. Umożliwiło to zastosowanie zgrzewania tarciowego do spajania elementów o płaskich powierzchniach łączenia, które mogą nawet mieć niewielką krzywiznę.



Rys. 5. Schemat procesu  $LFW$  z najważniejszymi parametrami i optymalnym układem geometrii łączonych elementów

Zgrzewanie tarcioве z ruchem liniowym zostało opatentowane w roku 1929r. Jednakże przez wiele lat proces ten był uważany za zbyt kłopotliwy do przeprowadzenia, ze względu na konieczność jednoczesnego zapewnienia odpowiednich warunków stykowych na powierzchni połączenia i ruchu oscylacyjnego. Duże zainteresowanie w ostatnich latach zgrzewaniem tarciowym sprawiło, że udoskonalane maszyny coraz lepiej spełniają wymagania dotyczące łączenia materiałów w stanie stałym, przy czym koszt ich zakupu cały czas pozostaje wysoki.

<sup>4</sup>  $LFW$  = Linear Friction Welding

Z metody **LFW** głównie korzysta przemysł lotniczy, który wykorzystuje materiały o niskiej masie (gęstości) i wysokich właściwościach mechanicznych. Zgrzewanie liniowe umożliwia spełnienie wysokich wymagań dotyczących wytrzymałości i jakości zgrzein komponentów lotniczych, przy wytwarzaniu których dopuszcza się wzrost kosztów inwestycyjnych, ponieważ koszt zgrzewarek **LFW** jest duży. Oczekuje się w zamian oszczędności w zużyciu materiału.

## LITERATURA

- 1 A.Klimpel: Technologie zgrzewania metali i tworzyw termoplastycznych. Wyd.Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999 (str.213-251) → [pdrczn Technologie zgrzewania metali Klimpel-](#)
- 2 S.Erbel, L.Olejnik, C.Jasiński: Spajanie metali na zimno (spajanie zgniotowe). Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego z przedmiotu TW1, kier. WIM. ZOPIo ITW WIP PW. 2018 → [zszywka twL6 spajanie 07](#)
- 3 PN-EN ISO 15620:2005 – Zgrzewanie tarciove metali [ [norma DIN EN ISO 15620 Zgrzewanie tarciove metali Deutsche Fassung-.pdf](#) ]
- 4 Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera, Spawalnictwo. 1983

Dokument należy cytować w następujący sposób:

**L.Olejnik: „Podstawy spajania metali w stanie stałym z zastosowaniem odkształcenia plastycznego”. Raport rpdtA00 wstępny PROJEKTu DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych na rok ak. 2018/2019. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2019**