

# Nastawy zgrzewania tarcowego

## Parametry RFW (doczołowe) prętów

### SPIS TREŚCI

Wprowadzenie.....	1
Zgrzewanie konwencjonalnych materiałów.....	2
Urządzenia do zgrzewania.....	2
Parametry zgrzewania tarcowego.....	3
Strategie sterowania procesem zgrzewania.....	3
Wykorzystanie parametrów.....	4
Zgrzewanie metali UFG.....	6
Charakterystyka zależności występujących podczas operacji.....	6
Ustalanie wartości parametrów.....	8
Prędkość obrotowa.....	8
Siła osiowa.....	8
Siła w fazie tarcia.....	8
Siła w fazie spęczania.....	9
Literatura.....	10

## WPROWADZENIE

Celem opracowania jest przygotowanie do dyskusji nt. potrzeb w zakresie ustalania wartości parametrów zgrzewania tarcowego, zwłaszcza w przypadku zastosowania tej metody do doczołowego łączenia prętów. Rozważania będą prowadzone w odniesieniu do stanowiska roboczego, które przystosowano do klasycznego zgrzewania tarcowego (zgrzewanie konwencjonalnych metali). Konstrukcja i osiągi zespołów tego stanowiska roboczego dają nadzieję na uzyskiwanie złączy o wytrzymałości bliskiej materiałowi rodzimemu również przy zgrzewaniu tarcowym metalowych materiałów o ultra drobnym ziarnie (zgrzewanie ultradrobnoziarnistych metali, tzw. metali UFG). Dlatego poniżej zagadnienia określenia zakresu zmienności i możliwości wprowadzania nastaw będą rozpatrywane w rozdzieleniu na wspomniane dwie klasy materiałów:

- Metale konwencjonalne
- Metale ultradrobnoziarniste

Przygotowując operację zgrzewania tarcowego należy każdorazowo określić pożądane wartości ekstremalne parametrów (**zakres zmienności parametrów**), aby dopasować je do osiągnięć, jakie stanowisko robocze powinno oferować. Drugim zadaniem natury technologicznej jest wybranie sposobu sterowania zmiennością parametrów, z jakimi maszyna zgrzewająca będzie w stanie pracować (**strategia sterowania przebiegiem zgrzewania**). Oczywiście w obu przypadkach decyzja o dobranych wartościach nastaw i sposobie ich wprowadzenia jest weryfikowana jakością uzyskanego połączenia. Dobrą jakością najczęściej utożsamia się z wysokim stopniem bliskości wytrzymałości złącza do wytrzymałości materiału rodzimego.

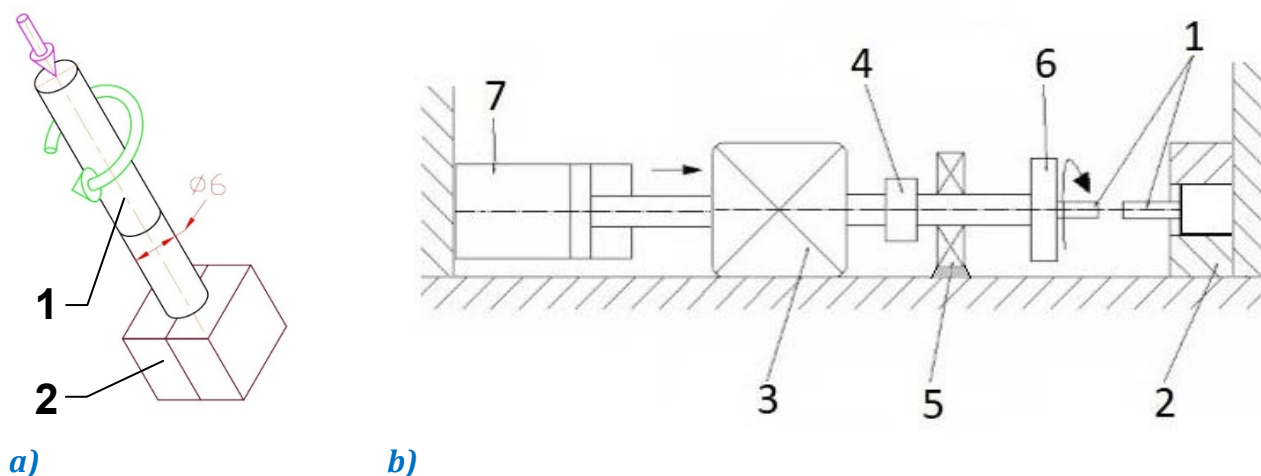
## ZGRZEWANIE KONWENCJONALNYCH MATERIAŁÓW

W metodzie zgrzewania tarcowego wykorzystuje się energię dostarczaną przez założony czas. Energia mechaniczna pochodzi z niewyczerpalnych źródeł. W przypadku ruchu obrotowego jest to napęd elektryczny, a dla obciążania prętów wzdłuż ich osi – napęd płynowy (hydrauliczny lub pneumatyczny, gdyż wartości sił w fazach tarcia i spęczania prętów zgrzewanych tarcowo – zwłaszcza o niewielkiej średnicy – nie muszą być duże).

Zgrzewanie tarcowe konwencjonalnych materiałów odbywa się zwykle w powietrzu, bez dodatkowych osłon chroniących strefę zgrzewania. Nie stosuje się gazów ochronnych a zgrzewanie metali pod warstwą cieczy jest rzadkością. W [1] opisano pierwsze próby zgrzewania tarcowego w cieczy na urządzeniu w układzie pionowym. Aby ułatwić prowadzenie procesu w cieczy taki właśnie układ wydaje się pożądany.

### Urządzenia do zgrzewania

Większość przemysłowych Wzwozów ma jednak budowę z poziomym ustawieniem osi zgrzewanych prętów. Na Rys. 1 przedstawiono schematycznie konfigurację zgrzewanych przedmiotów prętowych i typowe urządzenie do zgrzewania tarcowego doczołowego ze stałą prędkością obrotową.



Rys. 1. Schemat urządzenia do zgrzewania tarcowego prętów dla typowego stanowiska RFW: a) charakterystyka geometryczna przekroju poprzecznego prętów planowanych do zgrzewania, b) elementy układów dostarczających energię mechaniczną; 1-pręty zgrzewane (górny/lewy obracany, dolny/prawy nieruchomy), 2- uchwyt, 3-napęd ruchu obrotowego, 4- sprzęgło, 5-hamulec, 6-wrzeciono, 7-napęd ruchu prostoliniowego

Realizacja konwencjonalnego zgrzewania tarcowego polega na rozpędzeniu wrzeciona z zamocowanym przedmiotem do określonej prędkości, zbliżeniu obu elementów do siebie (aż dojdzie do ich styku), przy czym prędkość utrzymywana jest na stałym poziomie, a następnie zatrzymaniu wrzeciona i zwiększeniu docisku. Wobec wysokich wymagań dynamicznych napędu wrzeciona i spodziewanego skutecznego zwalniania prędkości obrotowej przez proces zgrzewania wydaje się zbędne zastosowanie sprzęgła i hamulca w układzie przeniesienia napędu. W zgrzewarkach przeznaczonych do zgrzewania tarcowego kombinowanego (połączenie

zgrzewania ze stałą prędkością obrotową **DD-RFW** ze zgrzewaniem inercyjnym **IFW**<sup>1</sup> hamulec służy do wyeliminowania wpływu bezwładności mas wirujących, gdy wybierze się pierwszy typ zgrzewania. Zgrzewanie inercyjne wymaga obecności koła zamachowego w układzie napędu wrzeciona. W takim przypadku dla odłączenia/załączenia koła zamachowego konieczne jest zastosowanie sprzęgła.

## Parametry zgrzewania tarcowego

Zagadnienia dotyczące parametrów zgrzewania tarcowego szczegółowo omawiano w oddzielnych raportach. Podano listę parametrów oraz opisano charakterystykę zależności występujących między nimi w poszczególnych fazach operacji zgrzewania<sup>2</sup>. Oddzielnie omówiono zaś wykorzystanie parametrów do śledzenia przebiegu zgrzewania, podając wyniki szczegółowej analizy kilku przypadków<sup>3</sup>. Zwrócono przy tym uwagę na dwa charakterystyczne przypadki:

1. wykorzystanie parametrów o typowych wartościach
2. wykorzystanie parametrów o wyśrubowanych wartościach

## Strategie sterowania procesem zgrzewania

Intensywne prace badawcze zmierzające do zapanowania nad przebiegiem zgrzewania tarcowego rozpoczęto w latach 70 ubiegłego wieku. Dla konwencjonalnego zgrzewania tarcowego wypracowano dwie strategie sterowania procesem:

1. pierwsza (najczęściej stosowana) polega na zadaniu wstępnego (bo występującego w fazie tarcia) skrócenia elementów  $S_T$ . Po osiągnięciu tego skrócenia następuje spęczanie. Wynika stąd, że czas tarcia  $t_T$  jest parametrem wynikowym,
2. druga zakłada zadawanie czasu tarcia  $t_T$ ; tutaj skrócenie zgrzewanych elementów jest wielkością wynikową.

Sterowanie napędami zgrzewarki powinno realizować obie strategie. Wrzeciono z zamocowanym przedmiotem powinno być rozpędzane do określonej prędkości, która w fazie tarcia będzie utrzymywana na stałym poziomie. Po osiągnięciu skrócenia  $S_T$  lub czasu  $t_T$  następuje gwałtowne zatrzymanie wrzeciona i zwiększenie docisku. Zaleca się podzielenie okresów tarcia i spęczania na podokresy, w których będzie można zadawać siły osiowe o różnych wartościach. Czas zatrzymania ruchu obrotowego (tzn. czas hamowania) i czas rozpoczęcia wywierania zwiększonego docisku wywołującego spęczanie (tj. czas opóźnienia) powinny być regulowane. Dzięki temu będzie można uzyskać efekt nakładania się fazy tarcia i spęczania. Spęczanie będzie wówczas prowadzone przy obracających się elementach. Obecnie takie właśnie zgrzewanie kombinowane często wykorzystuje się podczas zgrzewania materiałów o różnych właściwościach<sup>4</sup>. Na Rys. 2 pokazano wzbogacone przebiegi parametrów w czasie procesu zgrzewania tarcowego opisane w monografii [2], a stosowane przy zgrzewaniu metali trudno topliwych, które autor wspomnianej monografii dodatkowo prowadził w cieczy.

Możliwość precyzyjnego sterowania cyklem zgrzewania w funkcji czasu zapewni odpowiednią stabilność procesu zgrzewania, a tym samym dużą powtarzalność wyników zgrzewania. Trzeba jednak podkreślić, że ultra szybkie nagrzewanie tarciami czoł łączonych prętów i ekstremalnie krótkie czasy utrudniają automatyzację procesu.

Z punktu widzenia działania układu sterowania niektóre parametry mogą przyjmować wartości krytyczne. Wynika to przede wszystkim z konieczności wymuszenia zadziałania elementów maszyny do zgrzewania w

<sup>1</sup> Czytaj o tym rozróżnieniu w raporcie rpdtA00: L.Olejnisk: „Podstawy spajania metali w stanie stałym z zastosowaniem odkształcenia plastycznego”. Raport rpdtA00 wstępny PROJEKTU DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu APMA1. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2019

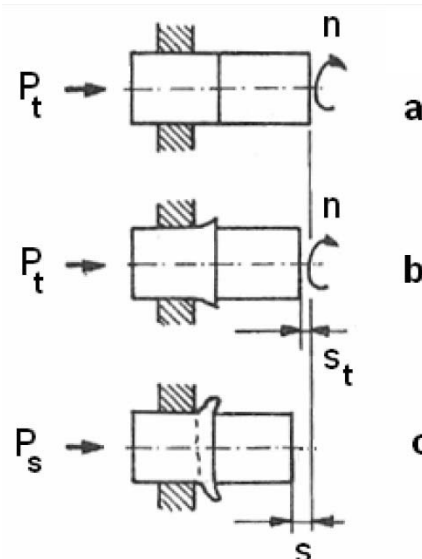
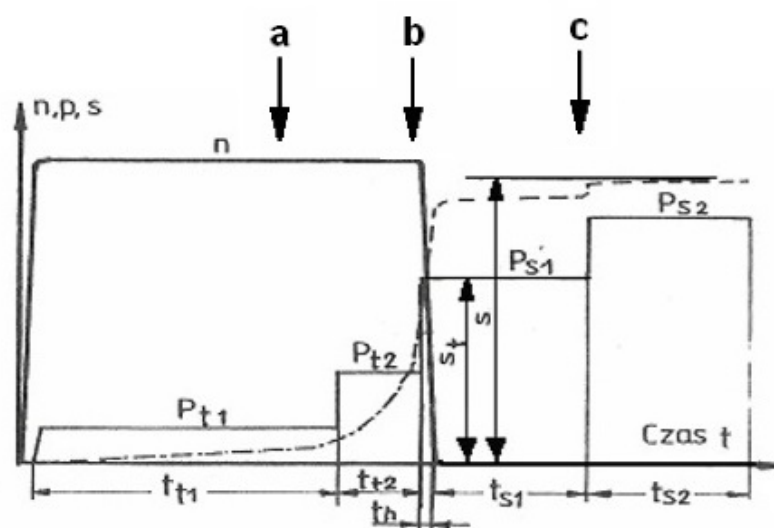
<sup>2</sup> Czytaj o parametrach w raporcie rpdtA00: L.Olejnisk: „Podstawy spajania metali w stanie stałym z zastosowaniem odkształcenia plastycznego”. Raport rpdtA00 wstępny PROJEKTU DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu APMA1. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2019

<sup>3</sup> Czytaj o wykorzystaniu parametrów w raporcie rpdtA02: L.Olejnisk, A.Stępnisk: „Analiza parametrów zgrzewania tarcowego doczołowego (RFW)”. Raport rpdtA02 wstępny PROJEKTU DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu APMA1. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2018

<sup>4</sup> Chodzi o spajanie różnorodnych materiałów celem uzyskania złącz materiałów różnoimiennych (ang. *dissimilar joins*)

krótkich odcinkach czasu. Taką wielkością jest np. czas tarcia  $t_T$ . Opóźnienia w uzyskiwaniu odpowiedzi układu na rozkazy programu sterującego i czasy zadziałania poszczególnych elementów układu sterowania powodują, że lista czynników mogących utrudnić skuteczne sterowanie jest długa. Należy mianowicie uwzględnić:

- Czas działania sterownika PLC (praca sterownika w pętli, który zajmuje zazwyczaj kilka ms)
- Czas wykonania programu (w zależności od zaprojektowanej aplikacji może sięgać kilkunastu ms)
- Czas reakcji wyjścia sterownika PLC (zależny od klasy sterownika)
- Czas zadziałania sterownika serwonapędu (jeżeli ruchy będą wywoływane przez napęd elektryczny)
- Czas wykonania komend (programu sterownika serwonapędu)
- Czas zadziałania sterownika zaworu proporcjonalnego (jeżeli ruchy będą wywoływane przez napęd pneumatyczny lub hydrauliczny)
- Czas zadziałania zaworu proporcjonalnego



a)

b)

Rys. 2. Przebieg parametrów w czasie procesu zgrzewania tarcowego konwencjonalnego:  $P_T$  – siła docisku w okresie tarcia;  $P_S$  – siła docisku w okresie spęcznienia;  $n$  – prędkość obrotowa;  $S_T$  – skrót w czasie tarcia;  $S_S$  – skrót w czasie spęcznienia;  $S$  – skrót całkowite;  $t_T$  – czas fazy tarcia;  $t_S$  – czas fazy spęcznienia;  $t_H$  – czas hamowania, wg. [2]

Wobec powyższego wielu producentów maszyn do zgrzewania rozważa użycie niekonwencjonalnych napędów osi roboczych. Taka sytuacja zachodzi w przypadku Weldera firmy HWH wytypowanego do ćwiczenia projektowego. Poniżej pokazano wykorzystanie układu monitorowania tej maszyny do śledzenia zmian parametrów opisujących zgrzewanie.

## Wykorzystanie parametrów

Zgrzewanie jest operacją, która bardzo często jest stosowana w połączeniu z innymi w wielooperacyjnych procesach technologicznych. Mając to na uwadze, buduje się maszyny ułatwiające łączenie operacji. Przykładem jest maszyna specjalna umożliwiająca połączenie operacji obróbki plastycznej (wykrawanie, gięcie, tłoczenie, cięcie), spajania (zgrzewanie), skrawania (gwintowanie) i montażu (nitowanie), znana jako automatyczna prasa wielosuwakowa<sup>5</sup>. Bardzo często odbiorca musi włączyć operację zgrzewania tarcowego do ciągu urządzeń technologicznych w zautomatyzowanej linii produkcyjnej. Dlatego wytwórcy urządzeń do zgrzewania przyjęli takie rozwiązania konstrukcyjne, żeby proces integracji z otoczeniem nie był kłopotliwy. Z tego powodu wszystkie elementy ruchome są grupowane w jednej jednostce. Jednostka ta nazywana głowicą do zgrzewania tarcowego wyposażona jest w wrzeciono z uchwytem automatyzującym mocowanie ruchomego przedmiotu. Głowica współpracuje z nieruchomym uchwytem, który służy do mocowania drugiego elementu dopełniającego parę przedmiotów łączonych w jeden zespół konstrukcyjny.

<sup>5</sup> Multi-slide Machine, np. <https://www.youtube.com/watch?v=WoJQnUosChU&index=2&list=PLrLvTQYgkJBx3Kq1Xv6aEI-hD5o8Qdj3>

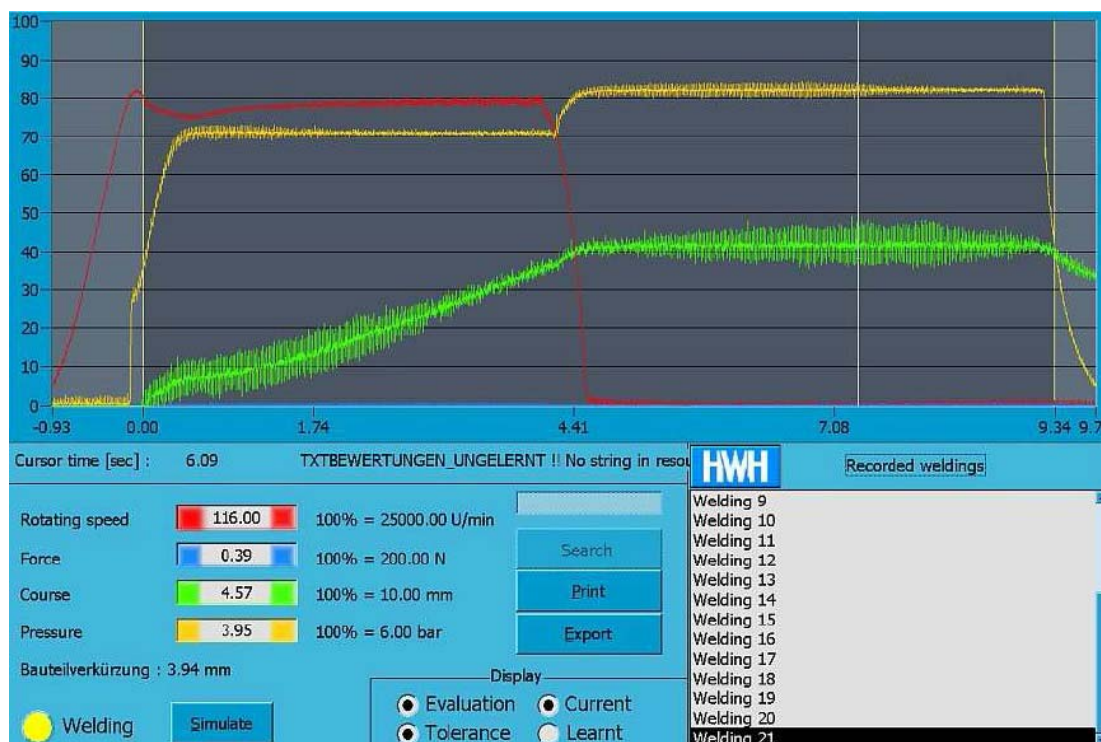
Warto bliżej przyrzeć się pracy stanowiska, które zbudowano wykorzystując komponenty dostępne handlu. Takie komponenty dostarcza, np. firma HWH<sup>6</sup> HARMS+WENDE Schweisstechnik, której specjalnością jest dostawa modułowych systemów do zgrzewania.

Technologia zgrzewania tarcowego wymaga wyspecyfikowania szeregu parametrów. W zgrzewarkach tarcowych najczęściej można nastawić następujące parametry:

- prędkość obrotowa pręta ruchomego  $n$ ,
- siła docisku w okresie tarcia  $P_T$ ,
- czas tarcia  $t_T$ ,
- siła docisku w okresie spęczania  $P_S$ ,
- czas spęczania  $t_S$ ,
- skrócenie w okresie tarcia  $S_T$ ,
- czas hamowania  $t_H$ ,
- opóźnienie rozpoczęcia spęczania (czas zwłoki)  $t_z$ .

Operator – w czasie trwania operacji zgrzewania – może, np. na panelu układu monitorowania dołączonego do maszyny, obserwować jak w funkcji czasu zmieniają się wartości parametrów. Ilustruje to zrzut z ekranu pokazany na Rys. 3. Warto zwrócić uwagę, że wykresy wykreślono w funkcji czasu, czyli podobnie jak na Rys. 2. Początek osi czasu ustalono arbitralnie w chwili, gdy ciśnienie w układzie napędu posuwu liniowego wrzeczona, osiągnęło wartość zbliżoną do ok. 50% wartości maksymalnej (100%) dostępnej na tej maszynie. Od tego punktu rozpoczyna się rejestrowanie skrócenia łączonych elementów.

Wartości monitorowanych parametrów są wyświetlane w jednostkach umownych – w procentach obliczanych w stosunku do maksymalnych wartości, dla których przyjęto 100%. Legenda podaje wprawdzie jakie wartości ekstremalne przypisano poziomowi 100%, ale i tak przy takim przedstawieniu zmienności parametrów operator ma duże trudności z oceną prawidłowości relacji występujących między parametrami. Wobec tego trudno mu na bieżąco oceniać znaczenie wartości wyświetlanych parametrów.



Rys. 3. Wygląd panelu obsługowego zgrzewarki HWH model RSM200 oglądany podczas zgrzewania materiałów konwencjonalnych: 1- czerwona linia – prędkość obrotowa pręta ruchomego  $n$ , 2- żółta linia – siły docisku reprezentowane przez ciśnienia (w okresie tarcia  $P_T$  oraz w okresie spęczania  $P_S$ ), 3- zielona linia – skrócenie sumaryczne łączonych przedmiotów  $S$

<sup>6</sup> <https://www.harms-wende.de/> ;

## ZGRZEWANIE METALI UFG

Spajanie bezpośrednio metali o strukturze ultradrobnoziarnego ziarna bez utraty ich właściwości nie zostało jeszcze przeprowadzone. W obszarze połączenia obserwuje się jednak zależność stopnia zdefektowania od prędkości nagrzewania w pierwszej fazie zgrzewania (faza **tarcia**) oraz od ciśnienia spęczania w ostatniej fazie zgrzewania (faza **spęczania**). Zadowolające efekty spodziewamy się uzyskać ograniczając ilość wprowadzanego ciepła do poziomu wystarczającego do przekroczenia bariery energetycznej spajania. Oznacza to, że należy zastosować ultra szybkie nagrzewanie tarciami czół łączonych prętów. Oczekujemy, że takie warunki zapewnią dużą energię użytą w krótkim czasie do wstępnie oziębionego zgrzewanego materiału.

Poprawne złącza planuje się uzyskać przez podwyższenie parametrów technologicznych spajania, poza zakres dostępny dla uniwersalnych urządzeń do zgrzewania tarcowego. Proponuje się:

- - zastosowanie wysokiej prędkości obrotowej wrzeciona
- - obniżenie temperatury wyjściowej łączonych prętów
- - zastosowanie wysokiej wartości ciśnienia spęczania
- - znaczne skrócenie czasu zgrzewania

Celem projektu jest rozpoznanie możliwości uzyskiwania złączy o wytrzymałości bliskiej materiałowi rodzimemu przy zgrzewaniu tarcowym metalowych materiałów o ultradrobnoziarnym ziarnie. Badanie zależności między parametrami wymaga stworzenia możliwości ustalania ich wartości i sprawnego oddziaływania na zmiany tych wartości. Niezbędne jest pozyskiwanie informacji o przebiegu procesów zachodzących podczas zgrzewania na potrzeby sterowania napędów. Być może oprócz możliwości nastawy parametrów typowych dla zgrzewania tarcowego takich, jak  $n$ ,  $P_T$ ,  $t_T$ ,  $P_S$ ,  $t_S$ , trzeba będzie wymuszać zmiany innych parametrów, a z pewnością pozyskiwać dodatkowe informacje takie, jak np. wartość chwilowa momentu obrotowego.

### **Charakterystyka zależności występujących podczas operacji**

Podstawowym celem tego podpunktu jest zaprojektowanie wykresu zależności podobnego do Rys. 2, ale z uwzględnieniem specyfiki zgrzewania z wysoką energią. Na razie poprzestaniemy na opisie słownym. Dopiero po zebraniu dostatecznej liczby danych zostanie sporządzony wykres wstępny przebiegów czasowych. Będzie on podstawą do dyskusji strategii kontrolowania zgrzewania pod kątem dobierania wartości i ustalania wzajemnych zależności. Rysunek będzie podstawą do opracowania cyklogramów działania napędów, doboru ich parametrów, konfiguracji układu sterowania i układu monitorowania.

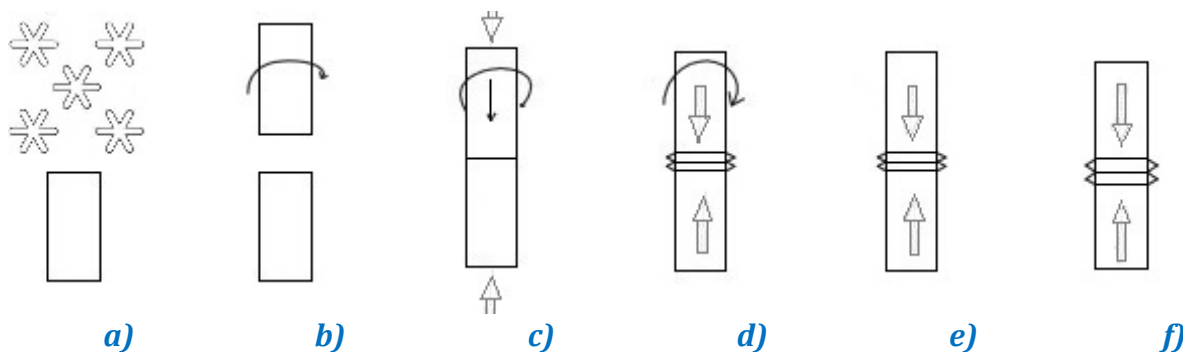
Odmienność zgrzewania wysokoenergetycznego wymaga, aby łączenie było prowadzone z wykorzystaniem wysokiego zakresu prędkości obrotowej, czas tarcia był krótki, a siły w fazach tarcia i spęczania były utrzymywane w pobliżu wartości maksymalnych (próbę oszacowania właściwych dla zgrzewania metalu UFG wartości sił w każdej fazie zgrzewania, podjęto w końcowym rozdziale opracowania). Rozpoczęcie spęczania powinno nastąpić z krótkim opóźnieniem, co da dodatkową możliwość oddziaływania na przebieg zgrzewania po podjęciu decyzji o zakończeniu fazy tarcia. Układ napędu ruchu obrotowego powinien mieć możliwość hamowania dla wyraźnego odróżnienia zgrzewania ze stałą prędkością obrotową od zgrzewania inercyjnego. Oczywiście będzie to miało znaczenie tylko w przypadkach, gdy obrót wrzeciona nie będzie w wystarczająco dużym stopniu hamowany procesem zgrzewania. Rozważane jest też oddziaływanie na temperaturę wyjściową prętów (schłodzenie przez natrysk cieczy oziębiającej). Te fakty powodują, że należy również zmodyfikować obraz faz, jakie występują w przebiegu doczołowego zgrzewania prętów z metali UFG.

Na Rys. 4 pokazano przewidywane etapy pracy wyróżniane w cyklu zgrzewania tarcowego prętów z metali ultradrobnoziarnistych.

Przedmioty planowane do zgrzewania na modernizowanych stanowisku, będą wykonane z metali o mikrostrukturze ultradrobnoziarnistej (UFG). Metale UFG mają ziarno mniejsze od jednego mikrona i najczęściej są uzyskiwane z użyciem dużych odkształceń, tzw. metodami SPD. Podczas zgrzewania metali UFG w obszarze złącza dochodzi do degradacji mikrostruktury (wskutek rekrytalizacji) i znaczącego pogorszenia właściwości fizycznych, w tym wytrzymałości złącza. Charakter i zasięg rekrytalizacji można w znacznym stopniu kontrolować pod warunkiem ograniczenia ilości wprowadzanego ciepła. W tym celu rozsądne jest zastosowanie:

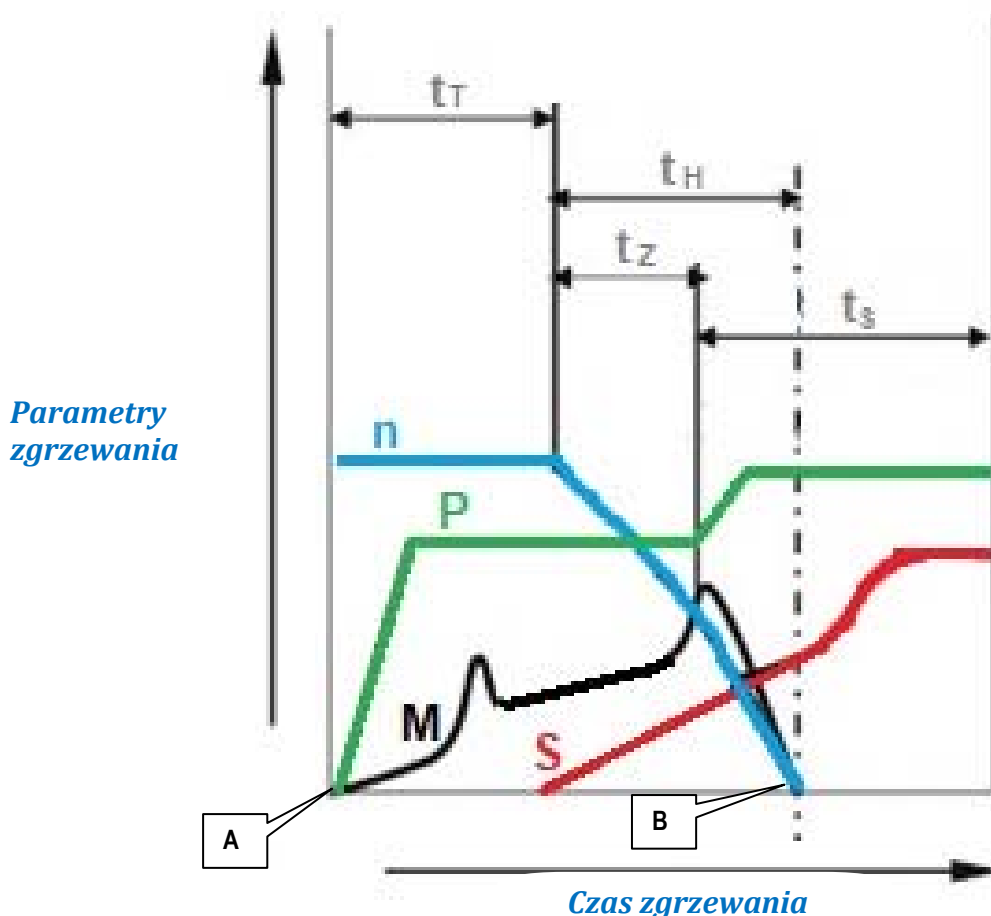
- ultra szybkiego nagrzewania tarciami czół łączonych prętów, co wymaga stosowania ekstremalnie wysokich prędkości obrotowych (w zakresie 16÷20 tys. obr./min.),

- ekstremalnie krótkich czasów (czas tarcia rzędu maks. 100 ms, czas spęczania do 3000 ms), co wymaga efektywnego hamowania rozpedzonego wrzeciona (niemalże natychmiast) i szybkiego osiągnięcia przez siłę spęczającą jej docelowej wartości maksymalnej (obciążenie udarowe).



Rys. 4. Planowane etapy cyklu zgrzewania tarcowego prętów UFG: a) schładzanie czoł prętów, b) nadanie prętowi ruchomemu prędkości obrotowej, c) zbliżenie powierzchni czołowych prętów i dociśnięcie ich, d) zwiększanie siły docisku pręta obracającego się do pręta nieruchomego, e) utrzymanie dociśnięcia prętów poprzednią siłą (opóźnienie), f) dociśnięcie prętów dużą siłą o stałej wartości przy równoczesnym skracaniu długości prętów wskutek powiększania wypłytki

Mając na względzie te postulaty zgłoszono propozycję przebiegu w czasie parametrów tarcowego zgrzewania doczołowego prętów z metalu UFG, którą przedstawiono na Rys. 5. Parametry:  $n$  (prędkość obrotowa w okresie tarcia),  $P$  (siła docisku, zazwyczaj różna w okresie tarcia i spęczania) i czasy  $t_T$ ,  $t_S$ ,  $t_Z$  są parametrami wymuszającymi – zadawanymi przed rozpoczęciem zgrzewania. Pozostałe są parametrami wynikowymi, chociaż niektóre też mogą być nastawiane, jak np. skrócenie prętów w okresie tarcia  $S_T$ .



Rys. 5. . Przebiegi czasowe parametrów zgrzewania tarcowego ze stałą prędkością obrotową miedzi UFG (wykres o charakterze jakościowym):  $n$ – prędkość obrotowa wrzeciona,  $P$ – siła docisku (o wartości różnej w fazie tarcia i fazie spęczania),  $M$ – moment obrotowy,  $S$ – skrócenie prętów,  $t_T$ – czas tarcia,  $t_S$ – czas spęczania,  $t_H$ – czas hamowania,  $t_Z$ – czas zwłoki), A – rozpoczęcie, B – zakończenie

Poszukując wartości liczbowych należy przyjąć wymiary przekroju poprzecznego łączonego pręta i rodzaj materiału, z którego jest on wykonany. Założono, że materiałem zgrzewanym będzie miedź<sup>7</sup> UFG dostarczona do zgrzewania tarcowego w postaci pręta o średnicy 6 mm. Miedź jest metalem powszechnie stosowanym w elektrotechnice, np. w budowie elementów maszyn elektrycznych czy szynoprzewodów. Dlatego opanowanie skutecznego spajania miedzi, ma ogromne znaczenie dla rozwoju elektrotechniki.

Najbardziej istotną cechą, odróżniającą przebieg czasowy parametrów zgrzewania metalu UFG (Rys. 5) od zgrzewania metalu konwencjonalnego (Rys. 2, a także Rys. 3) jest znaczne skrócenie czasów operacji, które powinny być utrzymywane w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset ms. Najdłuższą wartością będzie miał czas spęczania  $t_s$ , dochodzący nawet do 3000ms. Długość czasu tarcia będzie porównywalna z czasem hamowania  $t_H$ . Czas opóźnienia  $t_z$  rozpoczęcia fazy spęczania może w ogóle nie występować. W stosunku do wykonywanych wcześniej udanych prób zgrzewania nierdzewnej stali UFG<sup>8</sup> na wykresie z Rys. 5 przyjęto dłuższy czas tarcia  $t_T$ . Uczyniono tak spodziewając się, że obniżona temperatura wsadu spowoduje wydłużenie czasów potrzebnych do uzyskania odpowiedniej temperatury, potrzebnej do przeprowadzenia zgrzewania.

## USTALANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW

Podstawowe parametry zgrzewania **FSW** to prędkość obrotowa wrzeciona **n** i siła docisku **P** wywierana w dwóch fazach operacji. Omawiając wartości parametrów posłużono się przykładem, w którym łączono pręty wykonane z miedzi wg. schematu pokazanego na Rys. 1. Zgrzewanie będzie prowadzone na urządzeniu, którego sterowanie opisano na Rys. 1a.

### Prędkość obrotowa

Prędkość obrotowa **n** wrzeciona powinna być możliwie duża. Przegląd dostępnych na rynku rozwiązań konstrukcyjnych głowic do tarcowego zgrzewania doczołowego, wykazuje, że dla zgrzewania oferowane są już prędkości w zakresie 21 tys. ÷ 24 tys. obr/min.

### Siła osiowa

Przy doborze siły **P** miarodajne będą wartości reprezentowane przez nacisk jednostkowy wywierany na powierzchni czoł łączonego materiału prętowego. Sprecyzowanie wartości tych sił dla poszczególnych faz zgrzewania wymaga poczynienia pewnych założeń dotyczących właściwości zgrzewanych materiałów i stanu powierzchni, na której ma powstać zgrzeina. Uplastycznienie materiału ułatwia podniesienie temperatury co uzyskuje się dzięki zjawisku tarcia. W obu przypadkach (nagrzania materiału w fazie **tarcia** i wyprowadzania materiału do wypłytki w fazie **spęczania**) pierwszoplanową rolę odgrywa siła wywierana wzdłuż osi łączonych elementów. Dobór wartości tej siły jest kluczowy dla umożliwienia powstania połączeń adhezyjnych.

### Siła w fazie tarcia

Na trących powierzchniach styku występują oddziaływania mechaniczne i oddziaływania molekularne (międzycząsteczkowe). Oszacowanie siły potrzebnej do wywołania nagrzewania można zatem prowadzić z punktu widzenia:

<sup>7</sup> Miedź jest metalem półszlachetnym, odpornym na korozję atmosferyczną i na korozję w wodzie. Ma doskonałe przewodnictwo cieplne (400 W/(m·K)). Także stosunkowo duży, jak dla metali, współczynnik rozszerzalności liniowej ( $16,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ), co przy również stosunkowo dużym skurczu objętościowym jest przyczyną wywoływania naprężeń wewnętrznych. Te zaś mogą być przyczyną utrudnień w spajaniu miedzi. Kolejnym problemem może być niska temperatura rekrytalizacji. Cenną zaś właściwością jest wysoka ciągliwość, którą miedź wykazuje zarówno w podwyższonych jak i obniżonych temperaturach

<sup>8</sup> Czytaj o parametrach zgrzewania metali UFG w raporcie rpdtA02: L.Olejniki, A.Stępniki: „Analiza parametrów zgrzewania tarcowego doczołowego (RFW)”. Raport rpdtA02 wstępny PROJEKTU DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu APMA1. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2018



- mechaniki, rozważając pochłanianie energii mechanicznej ruchu obrotowego, które jest oparte na wykorzystaniu zjawiska tarcia – działanie właściwe dla sprzęgieł maszynowych i hamulców mechanicznych, jak i
- fizyki procesu współpracy dwóch ruchomych elementów, które wzajemnie starają się wprowadzić w ruch poszczególne drobiny elementu współpracującego

### Tarcie posuwiste w obszarze styku

Ten rodzaj tarcia występuje podczas powierzchniowego styku ciał. Opory wywoływane są oddziaływaniem sił powierzchniowych.

Przy zgrzewaniu doczołowym tarcie posuwiste zachodzi na powierzchni płaskiej o kształcie kołowym. W związku z tym rozważając opory oddziaływania można wykorzystać parametry – znane geometryczne i energetyczne oraz inne o wartościach założonych – określające współpracę stykających się elementów, a mianowicie:

- średnicę łączonych prętów,  $D = 6 \text{ mm} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ,
- moc napędu elementu obracającego się,  $N = 2 \text{ kW} = 2000 \text{ Nm/s}$ ,
- prędkość obrotową elementu ruchomego,  $n = 20\,000 \text{ obr/min} = 20\,000/60 \text{ s}^{-1}$ ,
- współczynnik tarcia posuwistego  $\mu = 0,35$  (metal o metal na sucho, pow. szorstkie)

Dla powyższych danych moment tarcia  $M_T$  (prętów stykających się czołami) pod działaniem siły  $P_T$  wynosi

$$M_T = \mu P_T D / 2$$

Moc napędu obracanego pręta, wyrażona przy użyciu tego momentu wyniesie

$$N = M_T n = n \mu P_T D / 2$$

Stąd można obliczyć pożądaną wartość siły osiowej wywieranej w czasie tarcia

$$P_T = 2 N 60 / \mu D n = 2 \cdot 2000 \cdot 60 / 0,35 \cdot 0,006 \cdot 20000 = \sim 6 \text{ kN}$$

Siła ta wytworzy na płaskiej i prostopadłej do osi powierzchni czoł prętów o polu  $A = \pi D^2/4 = 28,3 \text{ mm}^2$  naciski powierzchniowe

$$p_T = P_T / A = \sim 200 \text{ MPa}$$

### Tarcie w obrębie materiału

Ten rodzaj tarcia występuje, gdy przedmioty wchodzi w oddziaływanie, które skutkuje geometrycznymi zmianami na powierzchni styku. Opory wywoływane są oddziaływaniem międzycząsteczkowym. Opory oddziaływania międzycząsteczkowego (adhezyjne i kohezyjne) są trudne do oszacowania z uwagi na złożoność zjawisk jakie zachodzą w takim węzle tarcia jakim jest obszar powstającej zgrzeiny. Zmiany tych oporów są wywoływane ciągłymi zmianami w nominalnej powierzchni styku i wzrostem temperatury.

Przy zgrzewaniu doczołowym przedmioty zgrzewane przemieszczają się względem siebie w taki sposób, że wprawiają w ruch poszczególne elementy składowe sąsiada (np. warstwy, cząsteczki, itp.). Warunkiem wymuszenia ruchu fragmentów materiału jest odpowiednio duża wartość naprężenia stycznego  $\tau$  w obszarze bliskim powierzchni styku. Jeżeli wartość  $\tau$  będzie zbliżała się do wartości granicy plastyczności  $Rp^{02}$  zgrzewanego materiału to na powierzchni styku wystąpi ścinanie nierówności. Naprężenie styczne  $\tau$  może osiągnąć wartość maksymalną równą

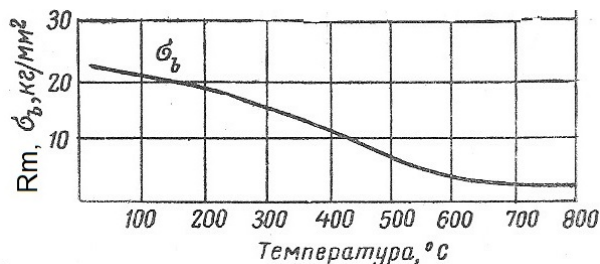
$$\tau = Rp^{02} / \sqrt{3}$$

Ścinanie fragmentów będzie tym łatwiejsze im temperatura w obszarze tarcia będzie wyższa. Dlatego wartość siły potrzebnej do wywołania tarcia w obrębie materiału należy oszacować w powiązaniu z zależnością granicy plastyczności zgrzewanego materiału od temperatury. Zajęto się tym w następnym punkcie.

### Siła w fazie spęczania

Siłę potrzebną do spęczania miedzi oszacowano „z gruba biorąc” na podstawie granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie miedzi.  $Rp^{02} / Rm$  wynoszą odpowiednio: dla stanu wyżarzzonego ok. 100 / 200 MPa, dla stanu umocnionego klasycznie 320 / 360 MPa (maksymalne wartości po konwencjonalnej obróbce plastycznej na zimno). Na podstawie poradnika [3] przeznaczonego dla konstruktorów przyjęto, że w zakresie spodziewanych wzrostów temperatury przy zgrzewaniu (do ok. 500°C) mechaniczne właściwości miedzi zmieniają się ze wzrostem temperatury monotonicznie. Ilustruje to wykres pokazany na Rys. 6. Wynika z niego, że przy wzroście temperatury od temp. otoczenia (ok. 20°C) do ok. 500°C wartość wytrzymałości na rozciąganie spadnie nieco ponad 3 razy. Zakładając podobne zachowanie się zależności granicy plastyczności od temperatury i oczekując przyspieszonej degradacji mikrostruktury UFG ze wzrostem temperatury, oszacowano wartość spodziewanego nacisku na czołowej powierzchni zgrzewanego pręta na ok. 100 MPa. Na

podstawie tej wartości obliczono minimalną wartość siły z jaką w fazie spęczania powinien być dociskany pręt o średnicy  $\phi 6$  mm. Po zaokrągleniu wyniku do ok. 3kN zwiększono go dwukrotnie sugerując dla Weldera wartość siły docisku w okresie spęczania  $P_s = 6$  kN, chociaż nawet 5kN powinno z powodzeniem zapewnić spełnienie wymagań.



Rys. 6. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie miedzi lekko umocnionej zgniotem ze wzrostem temperatury wg. [3]

Z powyższych przytoczonych rozważań wynika, że wartość siły osiowej może mieć jednakową wartość zarówno w fazie **tarcia** jak i w fazie **spęczania**. Zaleca się, aby siła mogła być utrzymywana na stałym poziomie w granicach  $6 \div 10$  kN z dokładnością  $\pm 0,2$  kN i wzrastać udarowo. Konfiguracja osi działania siły poosiowej powinna być uzależniona od warunków zgrzewania. Dla zgrzewania w powietrzu może być pozioma, a dla zgrzewania w cieczy – pionowa.

## LITERATURA

- 1 R.Lison, E.Bachner: Reibschweissen von Sondermetallen und Werkstoffkombinationen, die ein Sondermetall enthalten. 2. Sondertagung Abbrennstumpf-und Reibschweissen, Aachen, Sept. 1987, 187–202
- 2 A.Ambroziak: Zgrzewanie tarciove metali trudno topliwych w cieczy na tle innych metod spajania. Oficyna Wyd. PWr., Wrocław 1998
- 3 A.P.Smirjagin: Przemysłowe stopy metali nieżelaznych. Metallurgizdat 1956

Dokument należy cytować w następujący sposób:

**L.Olejniki:** „Nastawy parametrów zgrzewania tarciovego doczołowego prętów”. Raport rpdtA01 wstępny PROJEKTU DESIGN THINKING do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu APMA1. Grupa UFGbySPD. Instytut Technik Wytwarzania. Warszawa 2019