

## ANALIZA ROZKŁADU GĘSTOŚCI PRĄDU I STRAT MOCY W RAMIONACH ZGRZEWARKI REZYSTANCYJNEJ PRĄDU STAŁEGO

Mariusz STĘPIEŃ\*, Bogusław GRZESIK\*, Krzysztof HABELOK\*, Zygmunt MIKNO\*\*

\* Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Gliwice

\*\* Instytut Spawalnictwa, Gliwice

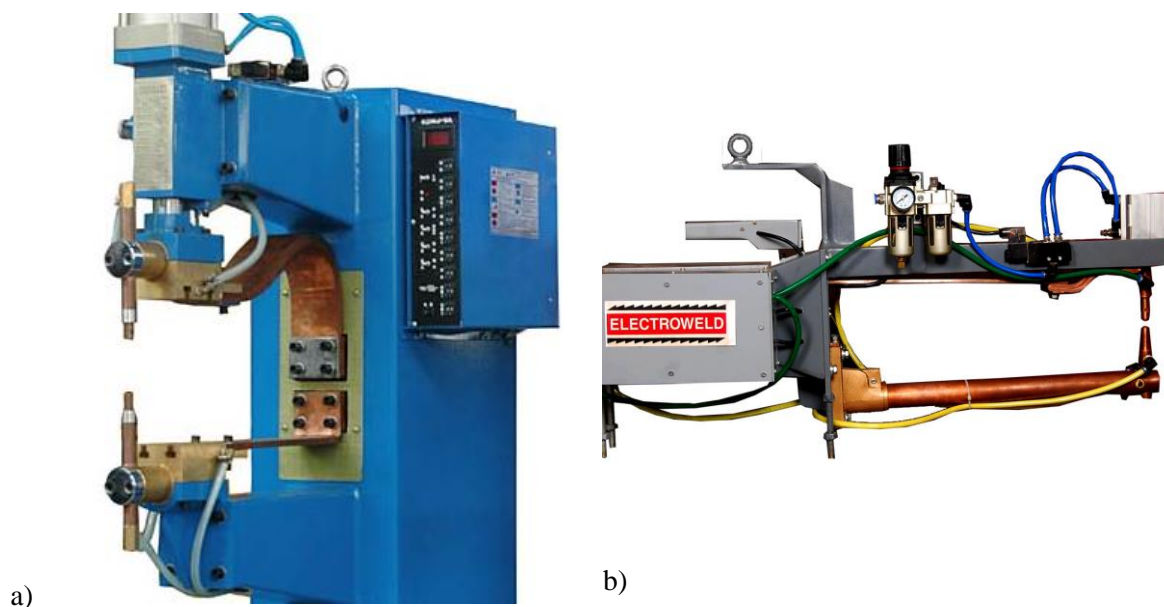
Streszczenie. Artykuł poświęcono analizie rozkładu gęstości prądu oraz powstających przy jego przepływie strat mocy w ramionach zgrzewarki rezystancyjnej prądu stałego. Analiza strat mocy pozwala na określenie sprawności ramion zgrzewarki w zależności od ich gabarytów. Jest to szczególnie istotne w przypadku systemów mobilnych, gdzie długość ramion zgrzewarki ulega zmianie w zależności od wielkości zgrzewanego elementu. Analiza prowadzona jest w 3D na bazie interfejs ANSYS Mechanical APDL. W analizie uwzględniono dodatkowe rezystancje styku w torze prądowym. Materiałem zgrzewanym są blachy stalowe o grubości 2 mm. W artykule przedstawiono analizę porównawczą w zakresie długości i szerokości ramion zgrzewarki, odległości pomiędzy ramionami oraz temperatury średniej systemu chłodzącego. Analiza prowadzona jest przy założeniu przepływu stałego prądu DC 10 kA. Spadki napięcia w obwodzie zgrzewarki są wynikiem rezystancji jej elementów. W analizie pominięto dynamiczne zmiany temperatury, a tym samym rezystancji blach zachodzące podczas zgrzewania. Przedstawiona analiza jest fragmentem szerszej analizy systemu zgrzewania obejmującego przekształtnik częstotliwości, transformator z prostownikiem oraz ramiona zgrzewarki.

### I. WSTĘP

Zgrzewanie rezystancyjne jest techniką łączenia bardzo powszechnie stosowaną w przemyśle. Przykładem może być przemysł motoryzacyjny, gdzie do wyprodukowania jednego egzemplarza samochodu konieczne jest wykonanie 3-5 tysięcy złącz. W tego typu procesie bardzo istotne są dwa elementy. Pierwszym z nich jest sprawność procesu, która przy tak licznych operacjach wpływa na stronę ekonomiczną procesu, natomiast drugim elementem jest gęstość mocy przekazywanej do układu [1]. Sprawność procesu może być podwyższana między innymi poprzez kształt ramion zgrzewarki, które stanowią znaczący udział w procesie przetwarzania (strat) energii. Jest to o tyle istotne, że ramiona przewodzą prąd zgrzewarki, mający bardzo wysoką wartość. Dlatego ze względu na skrócenie obwodu przepływu prądu zgrzewalniczego transformator spawalniczy stosuje się możliwie najbliżej elektrod. Podwyższanie gęstości mocy realizowane jest bardziej zaawansowanymi technikami, między innymi poprzez podwyższanie częstotliwości przekształcania wewnętrznego w zgrzewarce (zmniejszając tym samym gabaryty przekształtnika i transformatora). Podwyższenie gęstości mocy w transformatorze pozwala na jego umieszczenie blisko elektrod nawet w przenośnych systemach zgrzewalniczych (na ruchomych głowicach).

Przedmiotem analizy w niniejszym artykule są straty mocy powstające w ramionach zgrzewarki. Ze względu na zastosowania zgrzewarki, a w szczególności ich ramiona mogą mieć bardzo różny kształt. Na Rys. 1 przedstawiono dwa przykładowe rozwiązania komercyjne zgrzewarek, odpowiednio Shanghai Zhengte WE&C [2] i Electroweld Industries [3] na których

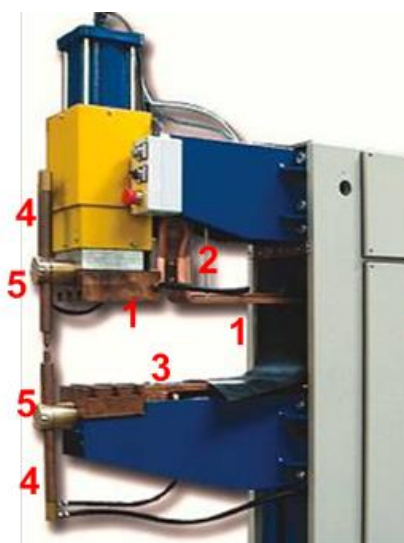
widoczne są ramiona zgrzewarki. Są to przykładowe referencyjne rozwiązania pokazujące, że strukturę ramion zgrzewarki można zdefiniować poprzez kilka podstawowych elementów. Są to głębokość ramion, odległość między ramionami (jednocześnie długość elektrod) oraz szerokość ramion. Będą one przedmiotem analizy zgrzewarki opisaney w następnym rozdziale.



Rys. 1. Przykłady zgrzewarek a) Shanghai Zhengte WE&C, b) Electroweld Industries

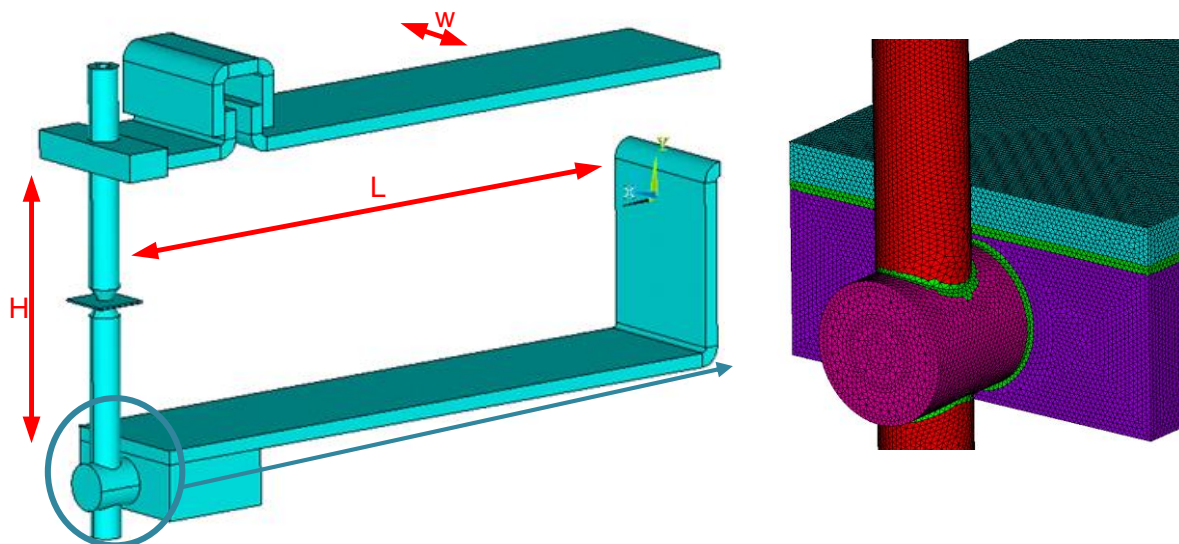
## 2. STRUKTURA I MODEL NUMERYCZNY ZGRZEWARKI

Zgrzewarka będąca przedmiotem analizy przedstawiona została na Rys. 2. Na rysunku zaznaczono najważniejsze elementy obwodu wyjściowego, to jest szynę górną (1) wraz z elementem elastycznym (2), szynę dolną (3), elektrody (4) oraz mocowanie elektrod (złącze) (5). Zgrzewarka pracuje z prądem stałym (wyprostowanym) o znamionowej wartości 10 kA. Wszystkie elementy obwodu zgrzewarki wykonane są z miedzi (z wyjątkiem blach zgrzewanych, które są stalowe).



Rys. 2. Struktura zgrzewarki będącej przedmiotem analizy

Na podstawie gabarytów zgrzewarki opracowano bazowy model komputerowy ANSYS Mechanical APDL ramion. Geometrię modelu wraz z fragmentem siatki pokazano na Rys. 3. Na rysunku zaznaczono parametry geometrii będące przedmiotem analizy porównawczej, to jest głębokość ramion  $L$ , odległość między ramionami  $H$  oraz szerokość ramion  $w$ . Dla modelu bazowego wartości tych parametrów były następujące: głębokość  $L=400$  mm, wysokość  $H=300$  mm oraz szerokość ramion  $w=150$  mm.



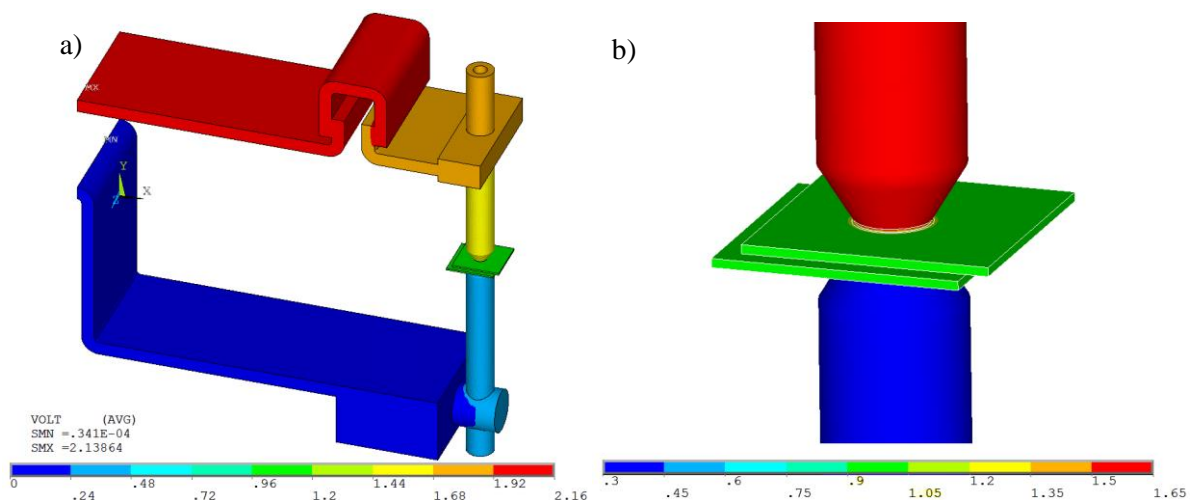
Rys. 3. Model komputerowy ramion zgrzewarki wraz z fragmentem siatki elementów MES

Model komputerowy ANSYS był modelem elektromagnetycznym przepływowym (w przepływie prądu elektrycznego nie było uwzględniane zjawisko naskórkowości) [4]. Model bazował na elemencie skończonym SOLID231. Wymuszenie zrealizowano poprzez element obwodowy CIRCU124 [5]. Rezystywność materiałów konstrukcyjnych miała stałą wartość, niezależną od temperatury (zależność liniową uwzględniono przy analizie wpływu temperatury). Model numeryczny w zależności od długości ramion zawierał od 200 do 300 tysięcy elementów skończonych oraz od 40 do 80 tysięcy węzłów. Siatkę zagęszczono w warstwach łączeniowych oraz w elementach zgrzewanych. Warunkiem brzegowym modelu były potencjały elektryczne modelu. Jeden z nich miał wartość zero, natomiast drugi wynikał z całkowitego spadku napięcia w obwodzie przy wymuszonej stałej wartości prądu 10 kA.

## 2. ANALIZA REZYSTANCJI I STRAT MOCY

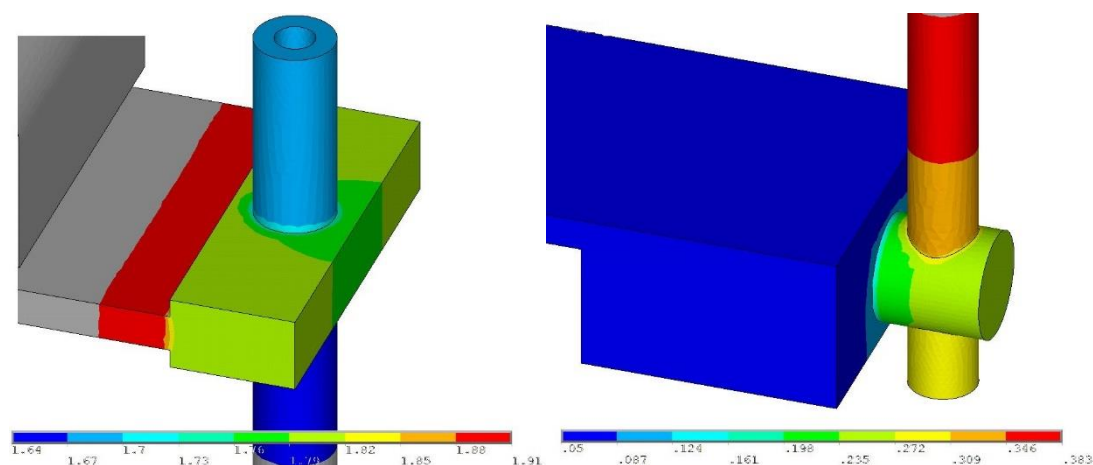
Na podstawie analizy numerycznej wyznaczone zostały rozkłady potencjałów elektrycznych wzdłuż ramion zgrzewarki. Ze względu na wymuszenie w obwodzie stałego prądu o wartości 10 kA możliwe było wyznaczenie rezystancji zastępczej poszczególnych elementów zgrzewarki oraz określenie wartości powstających w tych elementach strat mocy.

Na Rys. 4 przedstawiono uzyskane w wyniku analizy rozkłady potencjałów elektrycznych (spadki napięć), w całym obwodzie zgrzewarki oraz na elektrodach zgrzewających. Całkowity spadek napięcia wynosi nieco ponad 2 V, z czego spadek napięcia na elementach zgrzewanych to ponad 1,6 V. Znaczące wartości spadków napięć można zaobserwować również na łączeniach (stykach) poszczególnych elementów zgrzewarki, to jest między ramionami a elektrodami oraz między częścią sztywną a elastyczną ramienia górnego.



Rys. 4. Rozkład spadków napięcia wzdłuż ramion zgrzewarki (a) oraz na elemencie zgrzewanym (b)

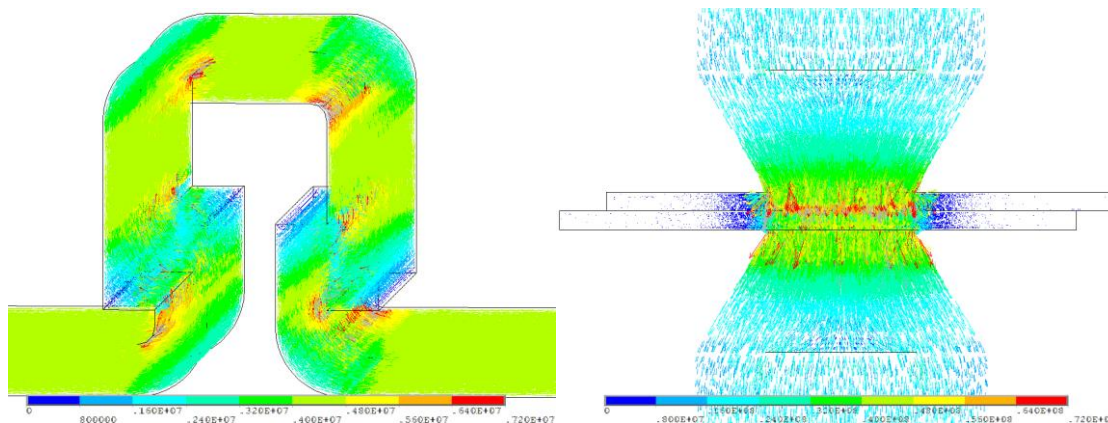
Analizę spadków napięć na elementach łączących z elektrodami przedstawiono bardziej szczegółowo na Rys. 5. Ze względu na różnice w mocowaniu elektrody dolnej i górnej różne, choć porównywalne wartości mają powstające spadki napięć. Dla elektrody górnej spadek wynosi 0,30 V, natomiast dla elektrody dolnej 0,38 V. W obydwu przypadkach złącza składają się z dwóch połączeń, to jest bloku łączącego z elektrodą i z ramieniem zgrzewarki.



Rys. 4. Rozkład spadków napięcia na elementach mocujących elektrody

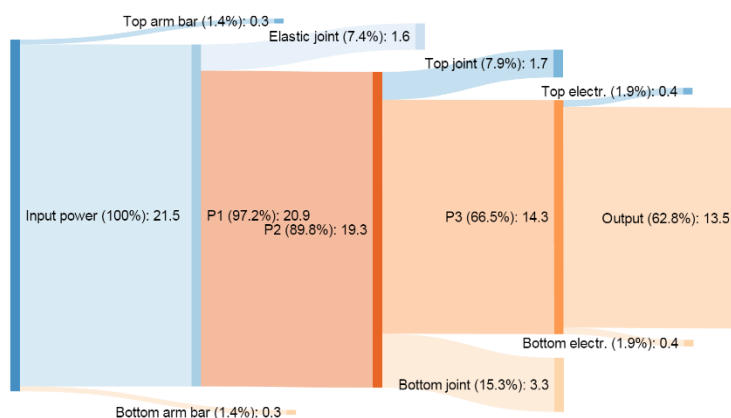
Analiza spadków napięcia pozwala bezpośrednio na analizę strat mocy w obwodzie ramion zgrzewarki. Przy wymuszeniu stałego prądu na zaciskach ramion wygenerowany spadek napięcia odpowiada mocy doprowadzonej do układu w wysokości 21,6 kW, natomiast spadek napięcia na zgrzewanych blachach jest równoważny z mocą użyteczną doprowadzaną do elementu zgrzewanego. Zgodnie z wynikami analizy moc ta wyniosła 13,5 kW. Jak widać sprawność przekazywania energii w obwodzie ramion zgrzewarki jest bardzo niska i wynosi około 62%. Wyznaczone straty mocy wynoszą około 8 kW. Są to straty na elementach miedzianych (ramiona, elektrody), ale głównie na połączeniach. Straty te generowane są przez prąd o dużej gęstości lokalnej przepływający przez elementy o podwyższonej rezystywności.

Na Rys. 5 przedstawiono dwa przypadki rozkładu prądu. Jest to prąd płynący przez element elastyczny górnego ramienia (widoczne są wzrosty gęstości prądu na zakrzywieniach kształtu) oraz prąd w obszarze zgrzewania (warto zauważyć, że prąd nie rozplywa się praktycznie poza obszar elektrod, stąd nagrzewanie następuje w obszarze dobrze skupionym między elektrodami).



Rys. 5. Rozkład gęstości prądu w części elastycznej górnego ramienia oraz w obszarze zgrzewania

Dalsza analiza strat mocy w układzie wykazuje, że straty mocy na elektrodach wynoszą zaledwie po 0,4 kW na elektrodę. W częściach stałych ramion straty są jeszcze mniejsze i wynoszą sumarycznie około 0,6 kW. Część elastyczna górnej elektrody jest źródłem strat mocy w wysokości 1,7 kW, natomiast połączenia elektrod do ramion generują odpowiednio 1,7 kW dla górnego połączenia i 3,3 kW dla dolnego. Graficznie rozkład strat mocy w układzie przedstawiono za pomocą wykresu Sankey'a na Rys. 6.



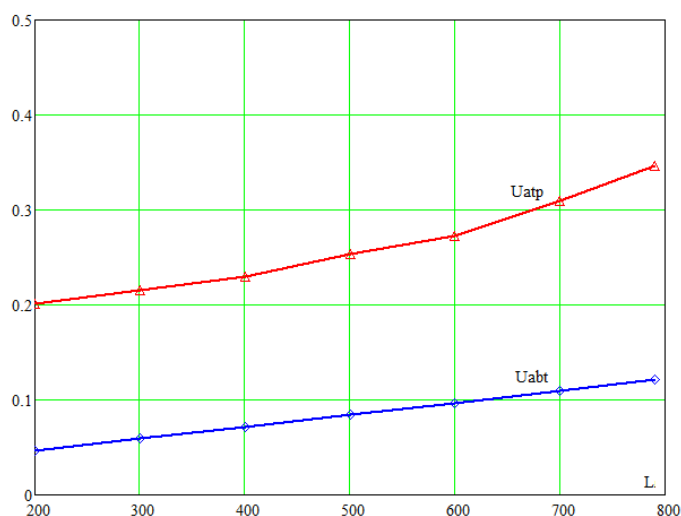
Rys. 5. Wykres Sankey'a rozkładu strat mocy

### 3. WYBRANE ELEMENTY ANALIZY PORÓWNAWCZEJ

Dla przebadania wpływu zmian geometrii analizowanego układu ramion na straty mocy przeprowadzono badania porównawcze. Analizę przeprowadzono dla różnych długości ramion oraz odległości między nimi. Na Rys.6 została przedstawiona charakterystyka spadku napięcia

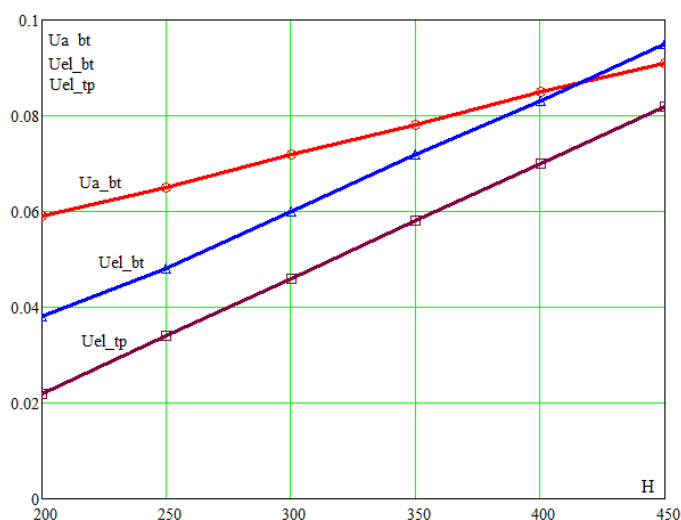


w funkcji odległości ramion. Spadki napięcia są różne dla każdego z ramion. Wynika to z obecności elementu elastycznego w górnym ramieniu. Na Rys. 6 oznaczono przebiegi w następujący sposób:  $U_{atp}$ - spadek napięcia na górnej elektrodzie  $U_{abt}$ - spadek napięcia na dolnej elektrodzie. Spadki napięcia podano w woltach, a długość w milimetrach.



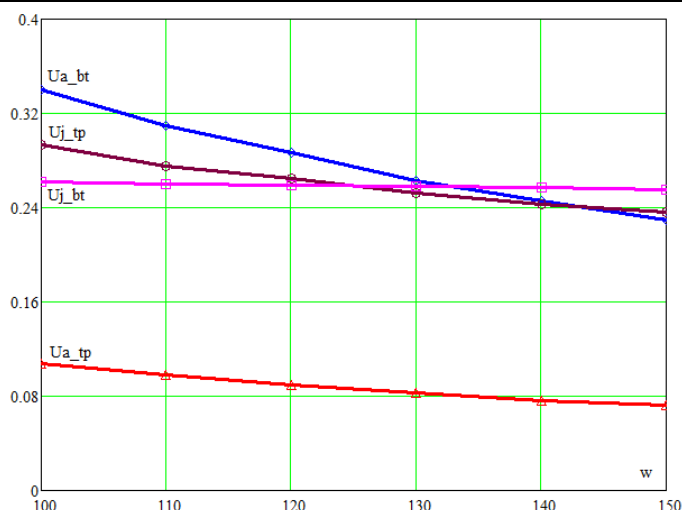
Rys. 6. Wykres spadku napięcia dla górnego i dolnego ramienia w funkcji długości.

Wyniki przedstawiające zmiany szerokości ramion oraz wysokości pomiędzy ramionami przedstawiono w dalszej części rozdziału. Na Rys. 7 przedstawiono spadki napięć w funkcji odległości między ramionami, a na Rys. 8 w funkcji szerokości ramion. Na podstawie charakterystyki z Rys.7 stwierdzono, że spadki napięć wzrastają, czyli maleje sprawność układu wraz ze wzrostem odległości pomiędzy ramionami  $H$ .



Rys. 7: Wykres spadku napięcia w funkcji pionowych odległości pomiędzy ramionami.

Wyniki przedstawione na Rys.8 są funkcjami szerokości ramion. Ponieważ szerokość jest proporcjonalna do powierzchni przekroju ramienia, rezystancja zmniejsza się ze wzrostem szerokości ramion. Spadek napięcia wzdłuż górnego ramienia jest znacznie wyższy niż wzdłuż dolnego. Wynika to głównie z obecności elementu elastycznego i połączeń elektrod.



Rys.8: Wykres sprawności w funkcji szerokości ramienia spawalniczego.

Przedstawione powyżej wyniki pokazują zależność spadków napięć, a tym samym straty mocy i rezystancji w systemie zgrzewania w funkcji parametrów geometrii. Mogą one być używane do optymalizacji kształtu systemu oraz poprawy sprawności.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozkładu gęstości prądu oraz powstających przy jego przepływie stratach mocy w ramionach zgrzewarki rezystancyjnej prądu stałego można wysunąć następujące wnioski:

- Kształt ramion systemów zgrzewania punktowego powinien zostać dobrany odpowiednio do procesu technologicznego,
- Ramiona zgrzewarek są źródłem dużych strat mocy szczególnie w miejscach łączeń,
- Dzięki analizie MES przeprowadzonej w środowisku ANSYS Mechanical APDL uzyskano precyzyjny rozkład mocy w systemie.
- Sprawność ramion zgrzewarki wyznaczona w analizie MES jest stosunkowo niska, na poziomie 60%.
- Analiza porównawcza systemu pokazuje, że straty mocy na połączeniach są głównym źródłem strat. Zwiększenie szerokości ramion zmniejsza straty mocy w ramionach i poprawia sprawność.
- Dla optymalizacji gęstości mocy w systemie powinny być stosowane odpowiednio szerokie ramiona. Jest to kompromis pomiędzy stratami mocy w systemie i jego wagą (oznaczany jako gęstość energii).

#### PODZIĘKOWANIE

Wyniki badań przedstawionych w artykule powstały w ramach badań współfinansowanych z środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu PBS3/B4/12/2015.

#### LITERATURA

- [1]. Li W., Feng E., Cerjanec D. and Grzadzinski G. A.: Energy consumption in AC and

- 
- MFDC resistance spot welding, Sheet Metal Welding Conference XI, Sterling Heights, MI, May 11-14, 2004.
- [2]. Pneumatic Spot Welding Machine. Shanghai Zhengte Welding Equipments & Consumables Co., <http://www.zhengte.net/en/product/> [last access 2016-01-30]
- [3]. User friendly welding machines. Electroweld Industries. <http://www.electroweld.com/spot-gun.html> [last access 2016-01-30]
- [4]. Gacek Z., Mazniewski K., Stepień M.: Computer simulation of a current joint within insulating piercing connectors - chapter in monograph book edited by Ryszard Nawrowski "Computer Applications in Electrical Engineering", Wydawnictwo Gaudentinum, Poznań 2008
- [5]. ANSYS User Manual, v. 15, 2015