



# Model matematyczny procesów cieplnych na podstawie instalacji VORTEX® JET HEATING do wyżarzania blachy aluminiowej w kręgach

Mathematical model of thermal processes in the Vortex® Jet Heating System for aluminium coil annealing

dr inż. Łukasz PIECHOWICZ, mgr inż. Mariusz RASZEWSKI, mgr inż. Damian SIEMIATOWSKI



## W KILKU SŁOWACH

W procesie produkcji blach aluminiowych obróbka cieplna jest etapem krytycznym, jeśli chodzi o własności produktu końcowego. Z tego powodu, realizacja wyżarzania blach w postaci kręgów wymaga precyzyjnej kontroli temperatury w przekroju wsadu oraz uzyskania wysokiej jednorodności temperatury końcowej. W pracy sformułowano podstawy modelu matematycznego nagrzewania wsadu, który będzie stanowił zasadniczą część systemu automatycznej regulacji i sterowania procesem wyżarzania kręgów blach aluminiowych w piecach Vortex® Jet Heating. Zadaniem opracowanego algorytmu będzie wyznaczanie charakterystycznych temperatur w przekroju kręgu blachy aluminiowej w trakcie procesu wyżarzania. Zadanie to realizowane będzie na podstawie pomiaru temperatury w jednym, ściśle określonym punkcie komory grzewczej pieca. Pozwoli to na bieżącą kontrolę procesu nagrzewania oraz będzie informować o momencie jego zakończenia. Działanie systemu sterowania opartego na modelu matematycznym umożliwi zmniejszenie zużycia energii dostarczanej do pieca oraz podniesienie jakości gotowego wyrobu. Działanie modelu matematycznego przetestowano porównując wyniki obliczeń z wynikami pomiarów przemysłowych.



## SUMMARY

Heat treatment is a crucial step in the production of aluminium sheet with regard to the final product properties. For this reason, annealing of aluminium coils requires a precise temperature control of the cross-section of the load as well as ensuring maximised final temperature uniformity. The following paper presents a basic mathematical model of the load heating process, which plays a crucial role in the system of automatic regulation and process control of aluminium coils in the Vortex® Jet Heating furnaces. The aim of the algorithm is to determine characteristic temperatures within the cross-section of the aluminium coil undergoing annealing. The task is based on measuring the temperature of one well-defined point in the heating chamber. As a result, it is possible to maintain a continuous control of the heating process and determine the moment of its completion. The operation of the mathematical model-based control system allows for reducing the furnace power consumption while enhancing quality of the finished product. The mathematical model was tested by comparing calculations with industrial measurements.

Przemysłowy proces obróbki cieplnej, którego celem jest przywrócenie plastyczności metalowi poddanemu uprzednio obróbce plastycznej na zimno nazywa się wyżarzaniem rekrytalizującym. Proces ten usuwa niektóre skutki zgniotu i jest przeprowadzany w temperaturze nieco wyższej od temperatury rekrytalizacji. Dla stopów aluminium w zależności od ich składu, temperatura procesu wyżarzania rekrytalizującego mieści się w przedziale 300÷580°C. Wyżarzanie to przeprowadza się jako zabieg międzyoperacyjny lub jako zabieg końcowy.

Wyżarzanie rekrytalizujące jest integralną częścią produkcji taśm i blach aluminiowych wytwarzanych w procesie walcowania na zimno. Proces ten przeprowadza się w piecach komorowych opartych na technologii „Mass Flow” (masowy przepływ atmosfery) lub „Jet Heating” (dyszowy nadmuch atmosfery), gdzie blacha wprowadzana jest do komory pieca w postaci ściśle zwiniętych kręgów o masie od kilku do kilkunastu ton.

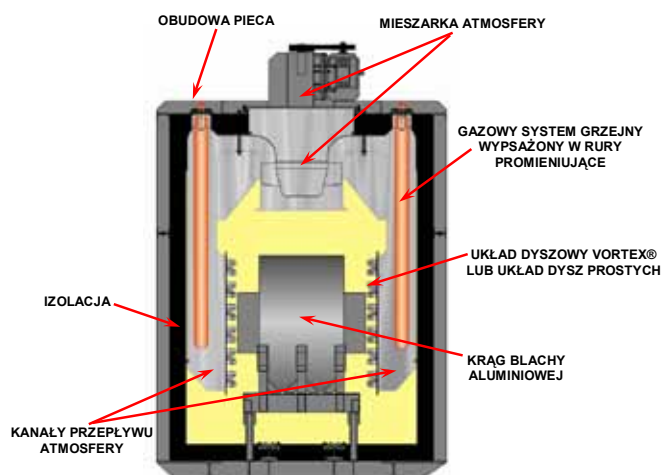
W piecach do wyżarzania kręgów blach aluminiowych, produkowanych przez firmę SECO/WARWICK ThermAL, zastosowano system „szczotek wirowych”, które składają się z czterech okrągłych dysz (rur) umiejscowionych blisko siebie, gdzie każda nachylona jest pod odpowiednim kątem (rys. 1). Odpowiednia wzajemna konfiguracja dysz zapewnia wirowy przepływ gazu. System dyszowy Vortex® łączy w sobie zalety zarówno wysokokonwekcyjnej technologii „Jet Heating” (uderzenie strumienia

gazu w czołową powierzchnię kręgu), jak i technologii „Mass Flow” nie powodującej lokalnych przypaleń powierzchni wsadu [1].

Główne zalety systemu Vortex® to:

- duża szybkość nagrzewania do temperatury procesu (wysoka produktywność pieca),
- zachowanie równomierności rozkładu temperatury w całej masie wsadu podczas wytrzymania,
- wyeliminowanie przegrzań miejscowych (przypaleń odparowywanego oleju) na powierzchni wsadu,
- niskie zużycie czynników energetycznych.

Badania przeprowadzone w piecu testowym (rys. 2), wykazały że przy zastosowaniu dysz Vortex® można uzyskać bardziej równomierny rozkład temperatury na powierzchni wsadu w stosunku do tradycyjnych dysz prostych (rys. 3).



Rys. 2. Piec do testów z systemami „Jet Heating” wybudowany w SECO/WARWICK Polska

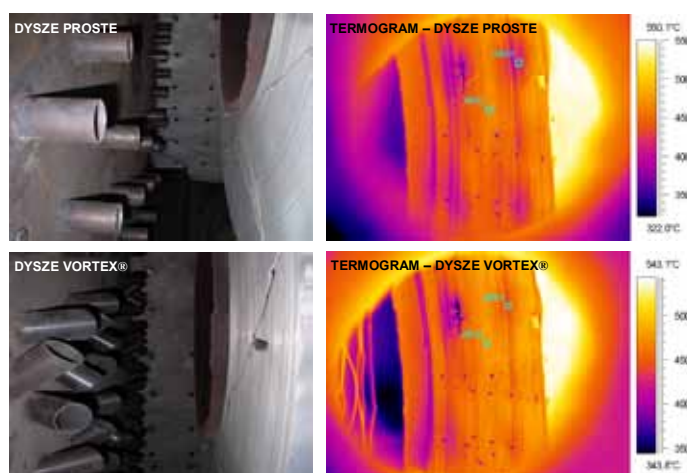


WYSUWNE OPRZYRZĄDOWANIE WSADOWE



WYSOKOKONWEKCYJNY SYSTEM DYSZOWY VORTEX®

Rys. 1. Piec z wysokokonwekcyjnym dyszowym systemem – Vortex®



Rys. 3. Termogramy wykonane podczas testów

Wyżarzanie blachy aluminiowej w kręgach jest procesem długotrwałym i składa się z trzech zasadniczych etapów: nagrzewania, wygrzewania (wytrzymania) oraz chłodzenia. Dlatego dąży się do optymalizacji przebiegu wyżarzania, celem możliwie maksymalnego skrócenia czasu tego procesu, przy jednoczesnym zachowaniu żądanych własności w obrębie całego wsadu.

Należy podkreślić, iż w procesie produkcji blach aluminiowych obróbka cieplna jest etapem krytycznym jeśli chodzi o własności produktu końcowego. Z tego powodu, realizacja wyżarzania blach w postaci kręgów wymaga precyzyjnej kontroli pola temperatury w przekroju wsadu, uzyskania wysokiej jednorodności temperatury we wsadzie w okresie wytrzymania oraz możliwości otrzymywania powtarzalnych wyników dla szerokiego asortymentu wytwarzanych produktów. Warunkiem niezbędnym dla uzyskania wymaganych własności w obszarze całego wsadu, jest nagrzanie kręgu w całej





objętości do określonej technologią temperatury końcowej. Oprócz tego, podczas wyżarzania z warstw zwiniętej blachy usuwany jest olej pozostały po procesie walcowania. Jeśli olej w wyniku oddziaływania zbyt wysokiej temperatury przypali się do powierzchni blachy, może to spowodować miejscowe zabrudzenia lub pęknięcia powierzchni, czyli pogorszenie jakości produktu. Dlatego tak ważna jest precyzyjna kontrola temperatury wsadu.

Brak informacji o temperaturze wsadu podczas procesu wyżarzania może być przyczyną:

- przypaleń, zabrudzeń a nawet nadtopień brzegów obrabianych blach,
- nierównomiernego rozkładu własności mechanicznych na długości obrabianej taśmy na skutek niejednorodnego pola temperatury w przekroju kręgu,
- nadmiernego zużycia energii.

Jednym ze sposobów kontroli temperatury w procesie nagrzewania jest bezpośredni jej pomiar w określonych punktach wsadu. Jednak pomiar temperatury nagrzewanego detalu w warunkach przemysłowych wydaje się być bardzo kłopotliwy i często mało efektywny, co w przypadku kręgów blachy nagrzewanych w piecach typu „Jet Heating” objawia się błędami pomiarowymi spowodowanymi „wentylowaniem” punktów pomiarowych, w efekcie czego wskazania termoelementów nie odpowiadają rzeczywistej temperaturze wsadu. Niedogodności i błędy pomiarowe związane z bezpośrednią kontrolą temperatury można wyeliminować poprzez modelowanie matematyczne. W podejściu tym rzeczywisty proces zachodzący w piecu imituje się za pomocą odpowiednich formuł matematycznych, przez co może być ono wykorzystywane jako uniwersalne narzędzie do sterowania, analizowania, optymalizacji oraz projektowania operacji wyżarzania. Ponadto model matematyczny nagrzewania może stać się częścią szerszego modelu zintegrowanego w skład którego, oprócz omawianego modułu cieplnego, wchodzi jeszcze dwa moduły: mikrostrukturalny i własności mechanicznych. Moduł cieplny oblicza przebiegi czasowe temperatury w różnych punktach wsadu. Wyniki obliczeń z modułu cieplnego służą następnie jako dane wejściowe do modułu mikrostrukturalnego, w którym na podstawie zasad kinetyki rekrysta-

lizacji i rozrostu ziaren obliczane są rozmiary ziaren w obszarze nagrzewanego wsadu. Wreszcie na podstawie wiedzy na temat współzależności między własnościami a mikrostrukturą, wyznaczone są własności mechaniczne [2].

### Własności cieplne kręgu blachy

Kręgi blachy aluminiowej poddawane obróbce cieplnej ze względu na swoją niejednorodną strukturę wewnętrzną, stanowią specyficzny rodzaj wsadu. Nawinięcie blachy powoduje, że krąg jest układem wielu równoległych cienkich warstw metalu. Na podstawie obserwacji wzrokowej kręgu można sądzić, iż kolejne zwoje na skutek dużych sił stosowanych przy nawijaniu ściśle do siebie przylegają. Jednak w rzeczywistości między zwojami występują wąskie szczeliny wypełnione gazem. Taka struktura kręgu blachy powoduje, iż jako wsad należy traktować go jak materiał porowaty o budowie warstwowej, gdzie fazą stałą jest aluminium, a fazą płynną gaz będący atmosferą pieca, w którym realizowane jest wyżarzanie.

Dwufazowa i warstwowa struktura kręgu powoduje, że przy jego nagrzewaniu w poszczególnych kierunkach występują odmienne mechanizmy przepływu ciepła. W efekcie tej anizotropii, przewodność cieplna kręgu jest tensorem o dwóch składowych, osiowej oraz promieniowej. Pomija się składową w kierunku obwodowym, czego można dokonać z uwagi na symetrię osiową kręgu. Niejednorodna struktura kręgu powoduje ponadto, że przepływ ciepła w jego wnętrzu ma charakter złożony. W związku z tym, jego przewodność cieplną należy traktować jako wielkość efektywną.

Przewodność cieplna kręgu blachy w kierunku osiowym jest zbliżona do przewodności cieplnej samego materiału, z którego wykonana jest blacha, natomiast promieniową przewodność cieplną wyznacza się z równania [3, 4]:

$$\lambda_r = (\delta + \mu) \cdot \left\{ \frac{\delta}{\lambda_m} + \left[ \frac{(1-\Phi) \cdot \lambda_g}{\mu} + \frac{1,13 \cdot \lambda_m \cdot \tan \theta \cdot \Phi^{0,94}}{\sigma_p} + \frac{4 \cdot (1-\Phi) \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3}{2-\varepsilon} \right]^{-1} \right\}^{-1}$$

gdzie:

T – temperatura bezwzględna, K;

δ – grubość blachy, m;

μ – szerokość szczeliny, m;



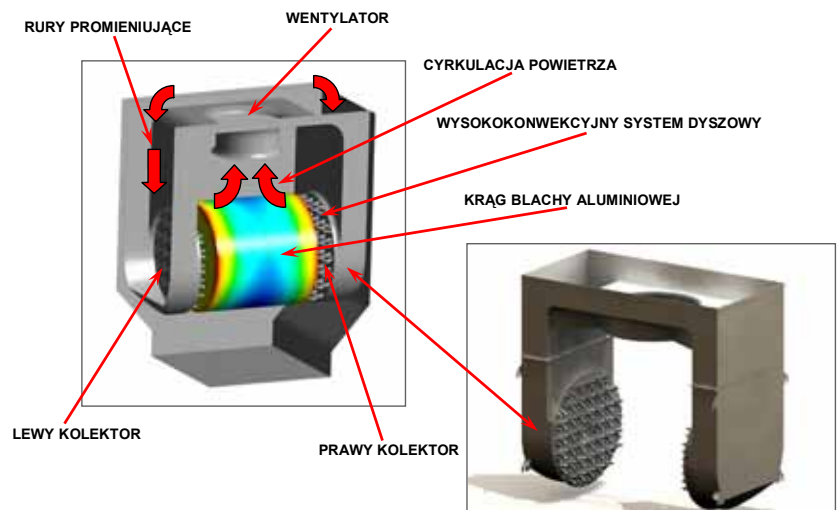
$\lambda_m$  – przewodność cieplna metalu, W/(m·K);  
 $\lambda_g$  – przewodność cieplna gazu, W/(m·K);  
 $\Phi$  – współczynnik kontaktu;  
 $\tan \theta$  – średnie bezwzględne pochylenie profilu chropowatości powierzchni blachy;  
 $\sigma_p$  – odchylenie standardowe wysokości profilu chropowatości powierzchni blachy,  $\mu\text{m}$ ;  
 $\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  
 $\epsilon$  – emisyjność powierzchni blachy.

Dla bardzo cienkich blach przewodność cieplna kręgu w kierunku promieniowym może być nawet czterokrotnie niższa od przewodności cieplnej w kierunku osiowym. Z tego powodu najlepsze wyniki nagrzewania otrzymujemy, kiedy zasadniczy strumień ciepła przepływa wzdłuż osi kręgu, tzn. wnika do jego powierzchni czołowych.

### Model matematyczny nagrzewania kręgu blachy

Model matematyczny zjawiska nagrzewania kręgu blachy aluminiowej wykonano dla układu piec – wsad przedstawionego na rys. 4. Nagrzewanie wsadu w takim układzie odbywa się poprzez nadmuch gorącego powietrza na czołowe powierzchnie kręgu. Zamontowany wentylator tłoczy zasysany z komory roboczej czynnik (powietrze lub azot) do dwóch kieszeni zakończonych segmentem dyszowym, mającym na celu przyspieszenie tłoczonego powietrza i dostarczenie ciepła do nagrzewanej blachy aluminiowej. Cyrkulujący w układzie zamkniętym gaz jest podgrzewany przy użyciu rur promieniujących. Powierzchnia czołowa kręgu nagrzewa się bezpośrednio od wyływającego z dużą szybkością gazu w wyniku konwekcji. Z uwagi na stosunkowo małe prędkości omywania powierzchni walcowych kręgu, przepływ ciepła odbywa się głównie w kierunku osiowym. Udział promieniowania w procesie wymiany ciepła jest niewielki z uwagi na niską temperaturę procesu oraz małą wartość emisyjności blachy aluminiowej.

Obiektem analizy nieustalonego przewodzenia ciepła jest wsad w postaci pierścienia (rys. 5). Z powodu symetrii osiowej wsadu pomija się w nim przepływ ciepła w kierunku obwodowym.



Rys. 4. Model geometryczny komory grzewczej pieca

W takiej sytuacji, dla przyjętego wcześniej założenia o anizotropii przewodności cieplnej kręgu, jego pole temperatury wyrazić można za pomocą równania różniczkowego Fouriera-Kirchhoffa rozpisanego dla biegunowego układu współrzędnych (r-z):

$$\rho_e \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_r \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

gdzie:

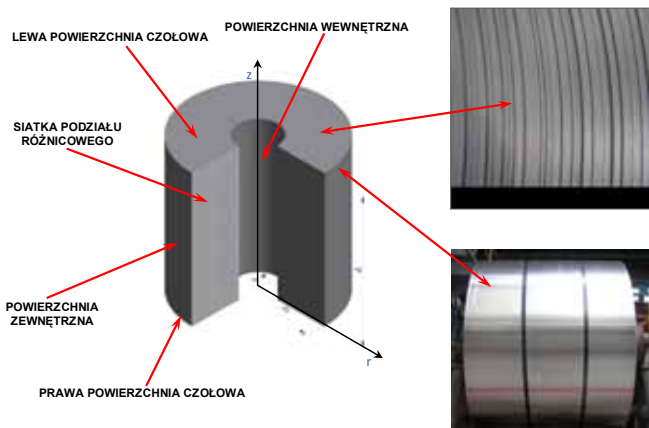
- $\rho_e$  – gęstość efektywna kręgu,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- $c_p$  – pojemność cieplna właściwa blachy,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;
- $\lambda_r$  – promieniowa przewodność cieplna,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;
- $\lambda_z$  – osiowa przewodność cieplna,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;
- $\tau$  – czas, s.

W celu rozwiązania równania różniczkowego (2), opracowano model numeryczny nagrzewania kręgu oparty na metodzie różnic skończonych (finite difference method). Przy rozwiązywaniu zadań nieustalonego przewodzenia ciepła metodą różnic skończonych, wyjściowe równanie różniczkowe przewodzenia ciepła jest przedstawiane w postaci skończonych różnic, co pozwala na wyliczenie szukanych temperatur w wydzielonych punktach wsadu. Jak ilustruje rys. 5, punktem wyjścia tej metody jest zastąpienie obszaru kręgu dyskretną siatką różnicową o stałym skoku podziału w kierunku promieniowym i osiowym.

#### Bibliografia

- [1] Talerzak J, Kramer C.: High Convection Vortex® Flow – Improved Performance in Coil Annealing. [http://www.secowarwick.com.pl/pub/files/Produkty/Artykuly/wszystkie\\_J\\_Olejnik/AP-3.pdf](http://www.secowarwick.com.pl/pub/files/Produkty/Artykuly/wszystkie_J_Olejnik/AP-3.pdf).
- [2] Wyczółkowski R.: Modelowanie zintegrowane procesów obróbki cieplnej wsadów o strukturze porowatej. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowe Technologie w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej”, s. 40-50, Wyd. WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012.
- [3] Mehta R., Sahay S.: Heat Transfer Mechanisms and Furnace Productivity During Coil Annealing: Aluminum vs. Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vo 118 (1) February 2009.
- [4] Wyczółkowski R., Piechowicz Ł.: Analiza własności cieplnych kręgu stalowej taśmy. *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, nr 10, 2011.
- [5] Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury, WNT, Warszawa 1992.





Rys. 5. Model geometryczny kręgu blachy

Otrzymanie jednoznacznego rozwiązania analizowanego zadania przewodzenia ciepła wymaga przyjęcia warunków brzegowo-początkowych. Przyjęto zatem:

$$\text{dla } \tau = 0 \quad T = T_p = \text{const}$$

$$\text{dla } r = r_o \quad \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_o (T_g - T_m) + \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_m^4)$$

$$\text{dla } r = r_i \quad \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_i (T_g - T_m)$$

$$\text{dla } z = 0 \quad \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{f \text{ right}} (T_g - T_m) + \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_m^4)$$

$$\text{dla } z = L \quad \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{f \text{ left}} (T_g - T_m) + \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_m^4)$$

gdzie:

$T_p$  – temperatura początkowa, K;

$T_m$  – temperatura powierzchni kręgu, K;

$T_g$  – temperatura gazu, K;

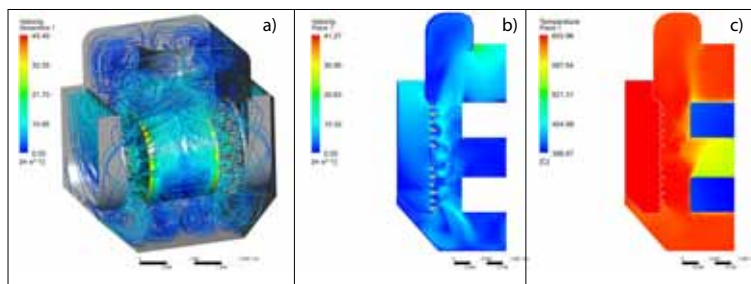
$T_c$  – temperatura ścian wewnątrz komory pieca, K;

$\alpha_o$  – współczynnik wnikania ciepła do zewnętrznej powierzchni walcowej kręgu,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\alpha_i$  – współczynnik wnikania ciepła do wewnętrznej powierzchni walcowej kręgu,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\alpha_f$  – współczynnik wnikania ciepła do czołowej powierzchni kręgu,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\epsilon_c$  – emisyjność zastępcza (ekwiwalentna) układu komora – wsad.



Rys. 6. Przykładowe wyniki badań modelowych: a) rozkład linii prądu, b) pole prędkości przepływu, c) pole temperatury

Dla potrzeb obliczeń przepływu ciepła konieczna jest informacja o współczynniku wnikania ciepła. Dla wielu rodzajów przepływów określono go na drodze eksperymentalnej. Ponieważ badania eksperymentalne zjawisk fizycznych występujących w rzeczywistych urządzeniach są możliwe tylko w bardzo ograniczonym zakresie, większość rezultatów uzyskano dzięki badaniom na modelach fizycznych. Współczynnik ten może być wyznaczony również za pomocą modelowania matematycznego [5].

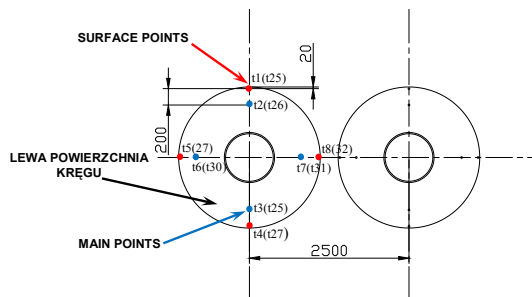
Dla analizowanego przypadku w celu opracowania zależności współczynnika wnikania ciepła w funkcji podstawowych parametrów procesu, wykonano badania modelowe przy użyciu profesjonalnego oprogramowania, jakim jest ANSYS CFD (Computer Fluid Dynamics). Uzyskane równania opisują współczynnik wnikania ciepła w zależności od takich parametrów jak: średnia prędkość wylotowa gazu z dysz, odległość powierzchni czołowej kręgu od płaszczyzny wylotu gazu oraz temperatura.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań modelowych z wykorzystaniem komputerowej mechaniki płynów.

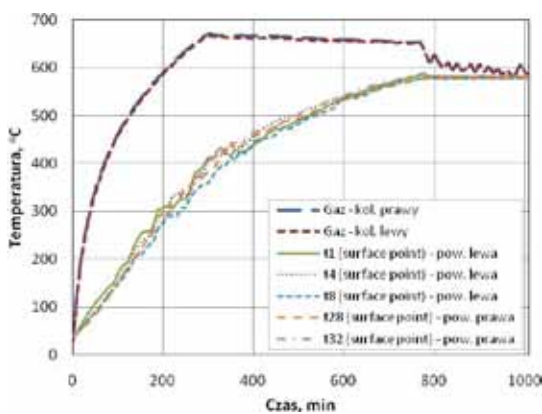
### Badania przemysłowe

W celu weryfikacji opracowanego modelu matematycznego wykonano badania przemysłowe w piecu trójkomorowym (rys. 1). Wsad do badań wykonany był ze stopu aluminium typu 3003. Stanowiła go blacha o grubości 2,3 mm zwinięta w krąg o średnicy zewnętrznej 1678 mm, średnicy wewnętrznej 610 mm, szerokości 1355 mm i masie ok. 7000 kg. Badania polegały na pomiarze temperatury w ściśle określonych punktach kręgu. Ponadto wykonano pomiary prędkości wylotowej powietrza w funkcji temperatury, które posłużyły jako warunki brzegowe do obliczeń numerycznych. Pomiaru temperatury we wsadzie dokonywano na jego czołowych powierzchniach na głębokości ok. 50 mm. Główne punkty pomiarowe (main points) usytuowano w odległości ok. 220 mm od zewnętrznej krawędzi rulonu (rys. 7). Ponieważ niestabilne wskazania termoelementów umieszczonych w pobliżu krawędzi (surface points) mogły być spowodowane „wentylowaniem” punktów pomiarowych (rys. 8), do dalszej

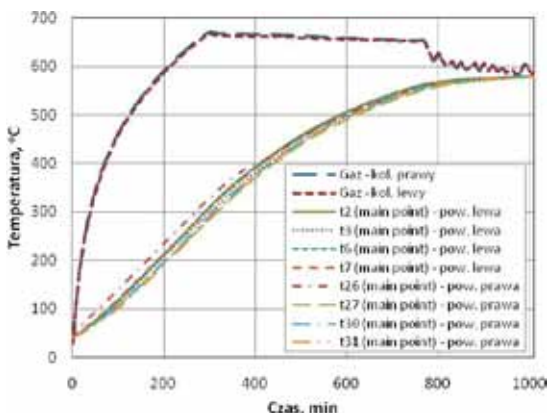
analizy wzięto pod uwagę wyłącznie wskazania termoelementów umieszczonych w głównych punktach pomiarowych (rys. 9).



Rys. 7. Rozmieszczenie termoelementów wsadowych



Rys. 8. Niestabilne wskazania termoelementów wsadowych podczas pomiarów przemysłowych



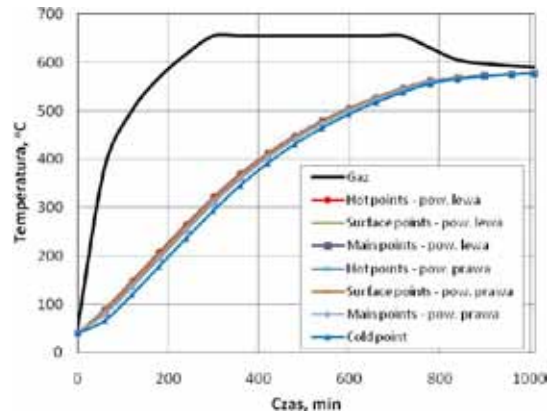
Rys. 9. Stabilne wskazania termoelementów wsadowych podczas pomiarów przemysłowych

### Obliczenia numeryczne

Symulację procesu nagrzewania kręgu blachy aluminiowej wykonano na podstawie danych uzyskanych podczas badań przemysłowych przy użyciu opracowanego modelu numerycznego w środowisku aplikacji Mathcad.

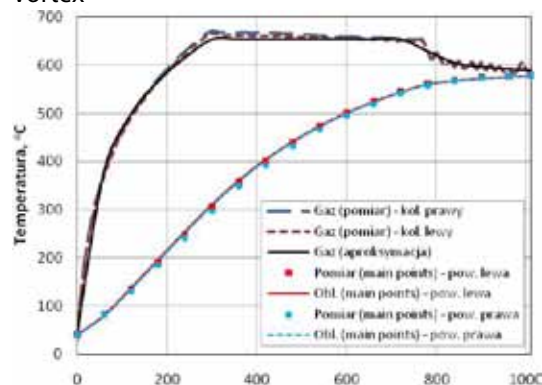
Krzywe nagrzewania (rys. 10) sporządzono dla punktów rozmieszczonych identycznie jak w przypadku pomiarów przemysłowych (rys.

7). Dodatkowo wyznaczono przebieg temperatury maksymalnej (hot points) i minimalnej (cold point). W przyjętym modelu pominięto przepływ ciepła w kierunku obwodowym, zatem punkty o tych samych współrzędnych biegunowych (r, z) posiadają jednakową wartość temperatury.



Rys. 10. Symulacja procesu nagrzewania kręgu blachy

Porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów przemysłowych przedstawiono na rys. 11. Średnia różnica względna między wartościami zmierzonymi a obliczonymi nie przekracza 1,5 %. Można zatem sądzić, że założenia do modelu matematycznego zostały sformułowane poprawnie, a sam model może stanowić zasadniczą część systemu automatycznej regulacji i sterowania procesem wyżarzania w piecach z systemem dyszowym Vortex®



Rys. 11. Porównanie obliczeń numerycznych z pomiarami przemysłowymi

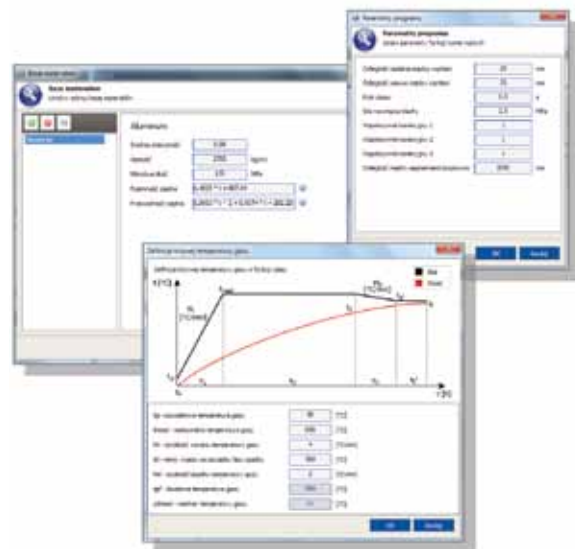
### Symulator procesu nagrzewania blachy aluminiowej w kręgach

Na podstawie opracowanego modelu numerycznego sporządzono symulator procesu nagrzewania blachy aluminiowej w kręgach. Symulator ten może być zainkludowany do





systemu automatycznej regulacji i sterowania w efekcie czego można wyeliminować konieczność stosowania termoelementów wsadowych do kontroli temperatury wsadu podczas procesu nagrzewania. Za pomocą symulatora można w sposób ciągły (w czasie rzeczywistym) wyznaczać krzywe nagrzewania dla ustalonych punktów wsadu (rys. 12) oraz pole temperatury w przekroju wzdłużnym kręgu blachy (rys. 13). Symulator umożliwia przeprowadzenie pełnej kalibracji oraz posiada otwartą bazę danych materiałowych. Przy użyciu symulatora można dokonać optymalizacji profilu temperatury gazu (szybkość wzrostu temperatury, przewyższenie temperatury, itp.) pozwalającej na skrócenia czasu nagrzewania wsadu (rys. 14)



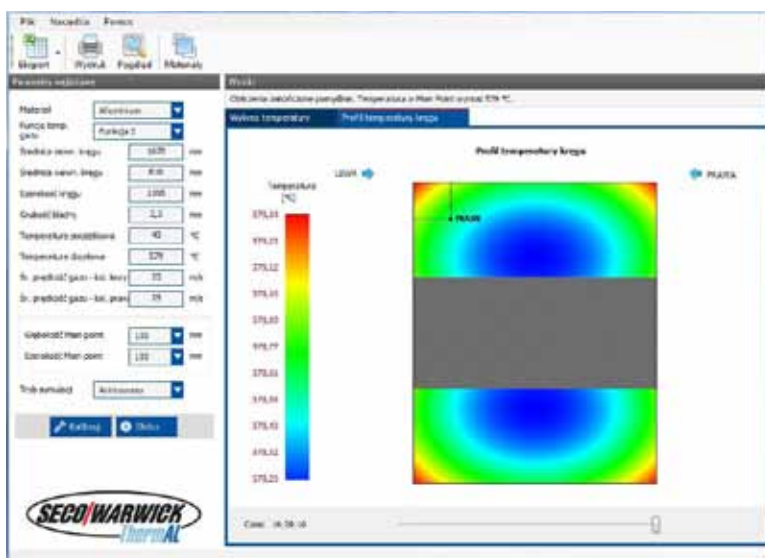
Rys. 14. SeCoil Simulator – baza materiałowa, kalibracja oraz definiowanie krzywej temperatury gazu

**Podsumowanie**

Jednym z priorytetów SECO/WARWICK ThermAL jest ciągły rozwój oferowanych przez firmę produktów. Wiąże się to z koniecznością podejmowania działań w kierunku badań i rozwoju, których ostatecznym efektem jest wdrożenie opracowanych rozwiązań do aplikacji przemysłowych. Zadaniem opracowanego modelu matematycznego będzie zarówno poprawa jakości gotowego produktu, jak i obniżenie jednostkowego zużycia energii poprzez precyzyjną kontrolę temperatury w przekroju nagrzewanego wsadu. Przeprowadzone badania modelowe oraz wykonane pomiary przemysłowe pozwoliły na opracowanie profesjonalnego symulatora pozwalającego na optymalizację procesu nagrzewania blachy aluminiowej w kręgach. Symulacja procesu nagrzewania będzie mogła być prowadzona w zależności od takich parametrów jak: rodzaj oraz wymiary wsadu, odległość między powierzchnią czołową kręgu a płaszczyzną wylotu gazu, rzeczywista wydajność wentylatora, rozkład temperatury gazu w czasie. Dalsze prace będą skupione na tworzeniu obszernej bazy danych zawierającej własności cieplno-fizyczne obrabianych stopów aluminium. Informacje te są konieczne do poprawnego działania modelu matematycznego dla szerokiego asortymentu obrabianych blach.



Rys. 12. SeCoil Simulator – wykres temperatury



Rys. 13. SeCoil Simulator – pole temperatury