

OPTIMALIZACJA PROCESU NAGRZEWANIA PAKIETÓW BLACH STALOWYCH W TRAKCIE CIĘCIA NA GILOTYNIE

JAROSŁAW KACZMARCZYK

*Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: jaroslaw.kaczmarczyk@polsl.pl*

Streszczenie. W pracy przedstawiono metody i algorytmy służące do wyznaczania optymalnych prędkości cięcia blach stalowych ułożonych w pakiety w trakcie przecinania ich nożem o zdefiniowanej geometrii na gilotynach. Optymalizację prowadzono przy użyciu algorytmów genetycznych. Za funkcję celu przyjęto maksymalne wartości temperatury występujące w bezpośredniej strefie cięcia pakietów blach, a za zmienną decyzyjną prędkość przecinania. Wyniki obliczeń numerycznych zestawiono graficznie w postaci wykresów przedstawiających krzywe nagrzewania w funkcji czasu względnego dla wybranych węzłów znajdujących się na linii cięcia przecinanego pakietu blach przed optymalizacją i po optymalizacji.

1. WSTĘP

Obecnie coraz częściej w przemyśle krajowym stosuje się gilotyny do przecinania pakietów blach ze względu na ich dużą wydajność w procesie cięcia w porównaniu z wydajnością przecinania pojedynczych blach na nożycach. Często jednak zdarza się, że w trakcie przecinania pakietów pojawiają się niepożądane losowe defekty w ich przekroju poprzecznym. Gilotyny zużywają wówczas więcej energii, nóż gilotyny szybciej się tępi, w procesie cięcia wydzielają się więcej ciepła, a w rezultacie maszyny takie ulegają przyspieszonemu zużyciu i dostarczają dużej ilości odpadów, co wiąże się bezpośrednio ze zwiększonymi wydatkami finansowymi ponoszonymi na produkcję związaną z przecinaniem. Nagrzewanie się pakietów w trakcie cięcia jest wynikiem tarcia, odkształceń plastycznych, itp. W zależności od temperatury zmieniają się własności mechaniczne materiału w bezpośredniej strefie cięcia oraz własności naniesionych warstw ochronnych na powierzchni blach i dlatego konieczne wydaje się modelowanie i optymalizacja parametrów nieustalonego przepływu ciepła [1, 2, 6, 7].

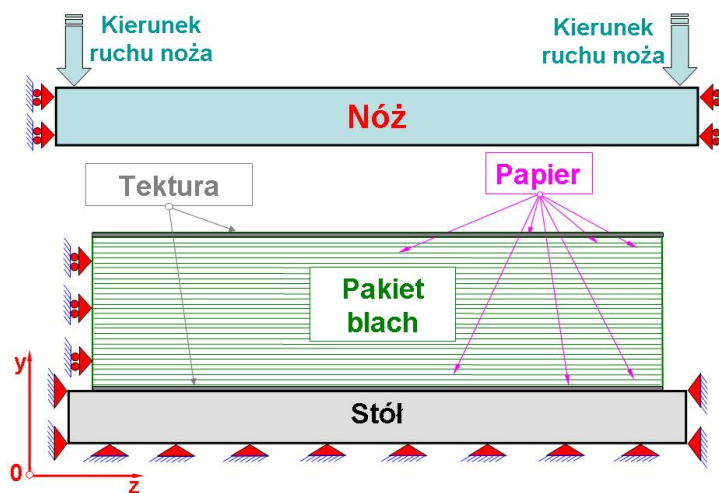
W pracy przedstawiono wyniki dotyczące minimalizacji maksymalnych wartości temperatur pojawiających się w bezpośredniej strefie cięcia. Optymalizację prowadzono przy użyciu algorytmów genetycznych [3]. Opracowano modele fizyczne i odpowiadające im modele matematyczne uwzględniające nieustalony przepływ ciepła i anizotropowe termofizyczne własności materiału.

Obliczenia numeryczne prowadzono przy użyciu autorskiego programu komputerowego przygotowanego w języku programowania obiektowego C++ w oparciu o metodę różnic skończonych i wspomnianą metodę algorytmu genetycznego, które zdaniem wielu specjalistów są najbardziej wygodnymi i efektywnymi metodami przybliżonego

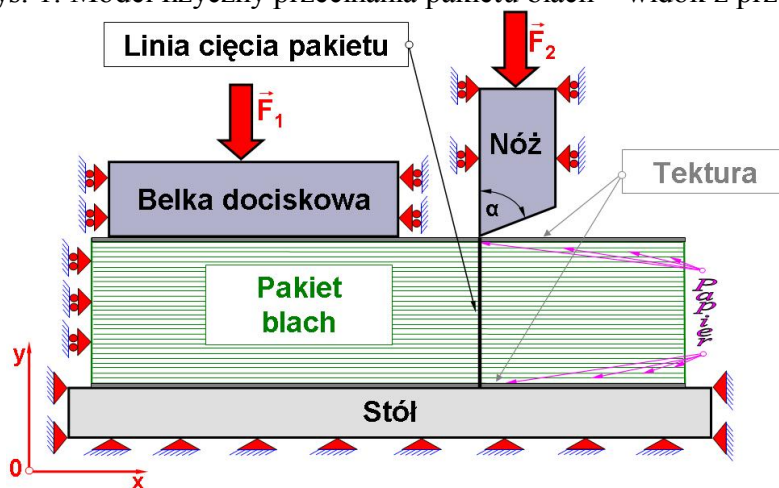
rozwiązywania zadań związanych zarówno z minimalizacją maksymalnych wartości temperatur jak i z przepływem ciepła.

2. MODEL FIZYCZNY

Rozważane gilotyny stosowane są głównie w przemyśle poligraficznym do cięcia pakietów papieru, ale coraz częściej używa się ich do przecinania pakietów blach metalowych o niewielkich grubościach od $0,1\text{mm}$ do około $0,4\text{mm}$ [8]. Opracowany model fizyczny procesu przecinania blach stalowych na gilotynach przedstawiono na rys.: 1, 2 i 3. Na stole gilotyny układają się pakiety blach, a belka dociskowa obciąża je z pewną siłą (Rys. 2). Pakiet blach jest następnie przecinany za pomocą noża (Rys. 1). Po przecięciu pakietu nóż wraca do swojej początkowej pozycji, a belka dociskowa jest zwalniana. Pakiet jest następnie przesuwany za pomocą podajnika na żądaną szerokość cięcia i proces powtarza się cyklicznie do uzyskania wymaganych wymiarów blach.

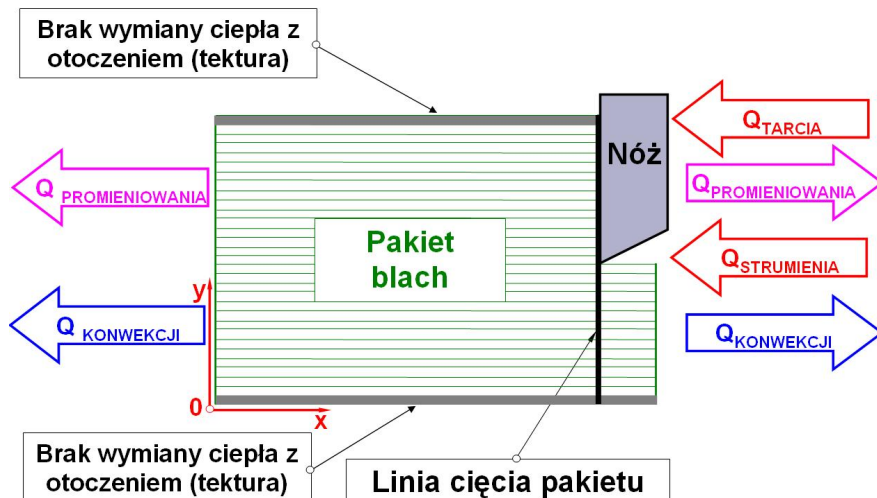


Rys. 1. Model fizyczny przecinania pakietu blach – widok z przodu



Rys. 2. Model fizyczny przecinania pakietu blach – widok z boku

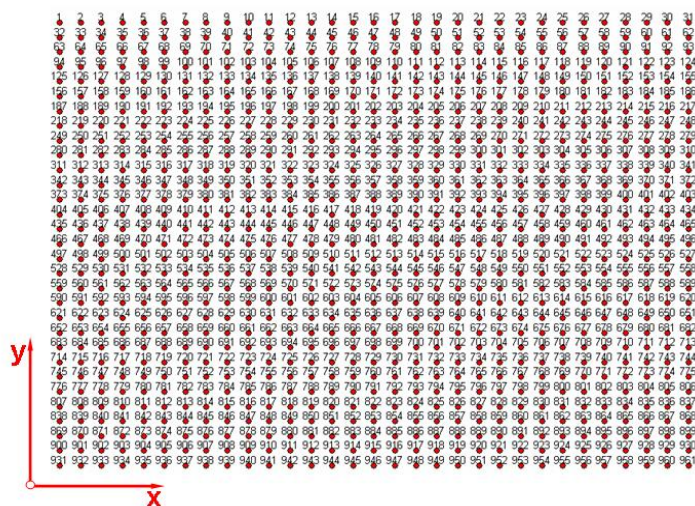
Modelowaniu poddany został pakiet blach, w którym poszczególne blachy oddzielone są papierem, a grubość całkowita pakietu wynosi 1 cm . Dolna i górna jego powierzchnia oddzielona jest tekturą, która stanowi dobry izolator. W związku z powyższym, przyjęto założenie o braku wymiany ciepła pomiędzy górną i dolną powierzchnią pakietu a otoczeniem (Rys. 3).



Rys. 3. Model fizyczny przecinania pakietu blach z warunkami brzegowymi

3. ZAŁOŻENIA I DANE PRZYJĘTE W OBLICZENIACH

Po lewej stronie pakietu blach założono wymianę ciepła pakietu z otoczeniem przez konwekcję i promieniowanie, a po prawej zamodelowano strumień ciepła przemieszczający się z prędkością odpowiadającą prędkości ostrza noża (Rys. 3). Założono, że strumień ciepła rozdziela się symetrycznie względem linii cięcia na dwa strumienie; z których jeden jest przekazywany do pakietu znajdującego się po lewej stronie linii cięcia, a drugi rozdziela się na kilka strumieni po prawej stronie linii cięcia, po której znajdują się odcinane blachy i nóż. W związku z powyższym, w procesie modelowania przepływu ciepła w trakcie cięcia uwzględniono połowę wartości wyjściowego strumienia ciepła odpowiadającego pracy 400J. Następnie wartość tę pomniejszono o 1% ze względu na występowanie tarcia pomiędzy pakietem a nożem. Jednocześnie po prawej stronie linii cięcia założono wymianę ciepła z otoczeniem przez konwekcję i promieniowanie. Osie układu współrzędnych (Rys. 4) zostały tak przyjęte, aby ich kierunki pokrywały się z głównymi osiami anizotropii przecinanego pakietu.



Rys. 4. Podział modelowanego pakietu na węzły

Założono szerokość przecinanego pakietu równą 10 cm oraz łączną grubość pojedynczego arkusza blachy stalowej i papieru 0,4 mm. Pakiety blach stalowych poprzekładano papierem

i dlatego obszar obliczeniowy modelowany jest jako jednorodny, zakładając, że w poziomie występuje równoległe, zaś w pionie szeregowo łączenie oporów cieplnych [2, 4, 5]. Przyjęte wartości własności termofizycznych dla papieru i stali zestawiono w tab. 1.

Tablica 1. Własności termofizyczne papieru i stali [5]

Wielkości termofizyczne	Papier	Stal
Gęstość ρ , kg/m^3	930	7850
Ciepło właściwe c_p , $J/(kg \cdot K)$	2500	434
Współczynnik przewodności cieplnej λ , $W/(m \cdot K)$	0,13	64

Współczynnik przewodności cieplnej dla pakietu na kierunku osi x (rys. 2) oszacowano jako bliski współczynnikowi przewodności cieplnej dla stali ($48 W/(m \cdot K)$), natomiast na kierunku osi y przybliżono go średnią harmoniczną [4] współczynników przewodności cieplnej dla papieru i stali ($0,52 W/(m \cdot K)$). Do obliczeń przyjęto grubość pojedynczej blachy stalowej równą $0,3 mm$ i grubość przekładki papierowej $0,1 mm$. Procentowe udziały objętościowe odpowiadające przyjętym grubościom wynoszą dla papieru i stali: $x_1=25\%$ i $x_2=75\%$, a odpowiadające im procentowe udziały wagowe: $x'_1=3,8\%$ i $x'_2=96,2\%$. Gęstość i ciepło właściwe dla pakietu obliczono jako średnią arytmetyczną procentowych udziałów wagowych ($\rho = 6120 kg/m^3$, $c_p = 512,5 J/(kg \cdot K)$). Założono wymianę ciepła pomiędzy modelowanym obszarem, a otoczeniem jednocześnie przez konwekcję i promieniowanie. Przyjęto współczynnik konwekcji ($\alpha=10 W/(m^2 \cdot K)$), współczynnik emisyjności $\varepsilon=0,5$ i temperaturę otoczenia $T_0=20^\circ C$.

4. MODEL MATEMATYCZNY

Rozważany obszar oddziaływań cieplnych (Rys. 4) podzielono na dostatecznie dużą liczbę części (900 elementów różnicowych, co odpowiada 961 węzłom) i sporządzano bilanse energii dla tych elementów. Doprowadziło to do sformułowania równania różniczkowego (1), za pomocą którego określano temperatury w węzłach:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q}_v, \quad (1)$$

gdzie:

ρ - gęstość kg/m^3 ,

c_p - ciepło właściwe $J/(kg \cdot K)$,

λ_x, λ_y - współczynniki przewodności cieplnej odpowiednio na kierunku osi x i y $W/(m \cdot K)$,

T - temperatura K lub $^\circ C$,

t - czas s ,

x, y - współrzędne m ,

\dot{q}_v - jednostkowa moc objętościowych źródeł ciepła W/m^3 .

Przy obliczeniach ciepła założono liniowy rozkład temperatury między sąsiednimi węzłami, jak również przyjęto założenie, że pakiet jest nieściśliwy. Powyżej sformułowane równanie uzupełniono o następujące warunki początkowo-brzegowe:

a) warunek początkowy zwany warunkiem Cauchy'ego:

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_0(x, y), \quad (2)$$

b) warunek brzegowy I rodzaju (warunek Dirichleta):

$$T(x, y, t)|_A = T_A(x_A, y_A, t), \quad (3)$$

gdzie: T_A – temperatura powierzchni K ,

c) warunek brzegowy II rodzaju (warunek von Neumanna):

$$-\left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot n_x + \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot n_y\right)|_A = \dot{q}(x_A, y_A, t), \quad (4)$$

gdzie:

$n_x = \cos(n, x)$, $n_y = \cos(n, y)$ – są kosinusami kierunkowymi normalnej do powierzchni.

Dla powierzchni izolowanych cieplnie przyjęto:

$$-\left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot n_x + \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot n_y\right)|_A = 0, \quad (5)$$

d) warunek brzegowy III rodzaju (warunek Robina lub Newtona) z nieliniowym warunkiem brzegowym (promieniowanie) w celu zamodelowania łącznego przepływu ciepła przez konwekcję i promieniowanie:

$$-\left(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot n_x + \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot n_y\right)|_A = \alpha(x_A, y_A, t, T_A) \cdot [T(x_A, y_A, t) - T_{cz}] + \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot [(T|_A)^4 - T_r^4], \quad (6)$$

gdzie:

α – współczynnik wnikania ciepła $W/(m^2 \cdot K)$,

T_{cz} – temperatura czynnika K ,

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ – stała Stefana-Boltzmana,

ε – współczynnik emisyjności,

T_r – temperatura ścian otaczających, które „widzą” analizowane ciało K .

Równanie różniczkowe (1) z warunkami od (2) do (6) zdyskretyzowano zgodnie z jawną metodą różnic skończonych (centralnych). W celu zapewnienia stabilności rozwiązań założono, że współczynniki w równaniu różnicowym stojące przy temperaturach powinny być nieujemne. Z warunku tego wyznaczono maksymalny krok czasowy, który przyjmuje następującą postać:

$$\Delta t \leq \frac{\rho \cdot c_p \cdot h^2 \cdot k^2}{2 \cdot (\lambda_x \cdot k^2 + \lambda_y \cdot h^2)}, \quad (7)$$

gdzie:

Δt – maksymalny krok czasowy s ,

h, k – odległości między dwoma sąsiednimi węzłami odpowiednio w poziomie i w pionie m .

5. WYZNACZANIE MAKSYMALNYCH PRĘDKOŚCI CIĘCIA

Wyznaczanie maksymalnych wartości prędkości cięcia prowadzono przy użyciu algorytmu genetycznego, którego struktura jest taka sama jak jakiegokolwiek programu ewolucyjnego. Zastosowano takie operatory genetyczne jak: *selekcja*, *krzyżowanie*, *mutacja* i *klonowanie*.

Selekcja umożliwia wybór osobników najlepiej dopasowanych w kolejnym pokoleniu.

Krzyżowanie prowadzi do połączenia cech dwóch chromosomów rodzicielskich w chromosomach dwóch potomków przez wymianę odcinków chromosomów rodziców. Krzyżowanie można interpretować jako wymianę informacji genetycznej między potencjalnymi rozwiązaniami.

Mutacja polega na losowej zamianie jednego lub więcej genów wybranego chromosomu (zera na jedność lub jedność na zero), z prawdopodobieństwem równym częstości mutacji. Operator mutacji oznacza wprowadzenie pewnej dodatkowej zmienności w populacji.

Klonowanie z kolei stosuje się w celu zapobiegania ewentualnej utracie najlepszego materiału genetycznego.

Za funkcję celu przyjęto maksymalne wartości temperatury występujące w bezpośredniej strefie cięcia (8):

$$\psi = \max[T(\vartheta)], \quad (8)$$

a za zmienną decyzyjną przyjęto prędkość cięcia pakietu blach (ϑ) odpowiadającą prędkości noża. Problem optymalizacji sformułowano jako minimalizację maksymalnych wartości temperatur (9):

$$\min[\psi(\vartheta)] = \min\{\max[T(\vartheta)]\}, \quad (9)$$

przy następujących ograniczeniach nałożonych na zmienną decyzyjną i funkcję celu:

$$\vartheta_{\min} \leq \vartheta \leq \vartheta_{\max}, \quad (10)$$

$$T_{\min} \leq \psi(\vartheta) \leq T_{\max}. \quad (11)$$

Ze względu na warunek ograniczający (11) nałożony na przyjętą funkcję celu (8) wprowadzono jej modyfikację w następującej postaci:

$$\psi^*(\vartheta) = \begin{cases} \psi(\vartheta), & \text{gdy } \vartheta \in \mathfrak{I}, \\ \psi(\vartheta) \cdot \Psi(\vartheta), & \text{gdy } \vartheta \in \mathfrak{N}, \end{cases} \quad (12)$$

gdzie:

$\Psi(\vartheta)$ - funkcja kary; wynosi ona jeden, gdy ograniczenia narzucone na funkcję celu nie są naruszone, a w przeciwnym przypadku jest zawarta w przedziale $0 \leq \Psi(\vartheta) \leq 1$,

\mathfrak{I} - przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych,

\mathfrak{N} - przestrzeń rozwiązań niedopuszczalnych.

Algorytmy genetyczne przeznaczone są do maksymalizacji funkcji celu. Postawione wcześniej zadanie optymalizacji dotyczy minimalizacji (9) i aby przejść od zadania minimalizacji do zadania maksymalizacji stosuje się następujące przekształcenie [3]:

$$\psi^{**}(\vartheta) = \begin{cases} C_{\max} - \psi^*(\vartheta) & \text{dla } \psi^*(\vartheta) < C_{\max}, \\ 0 & \text{dla } \psi^*(\vartheta) \geq C_{\max}, \end{cases} \quad (13)$$

gdzie: C_{\max} – pewien współczynnik (stała).

Zadanie optymalizacji można zatem przedstawić w następującej formie:

$$\min[\psi(\vartheta)] = \max[\psi^{**}(\vartheta)]. \quad (14)$$

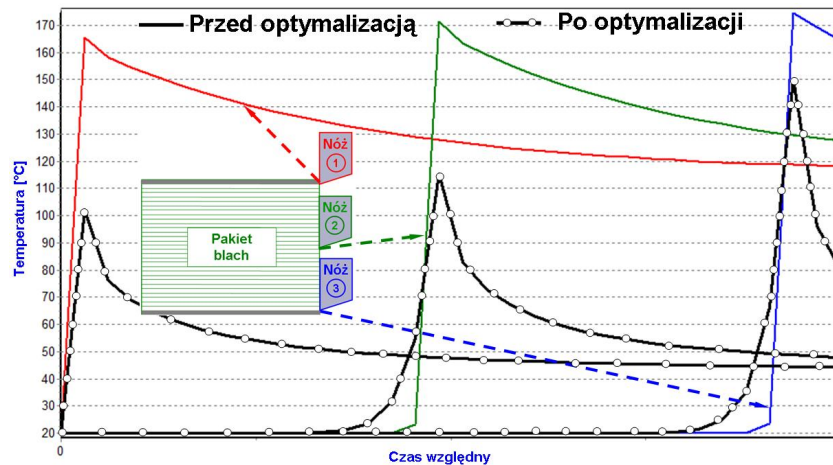
Założona prędkość cięcia odpowiadająca prędkości noża gilotyny może się zmieniać od $\vartheta_{\min} = 0,01 \text{ m/s}$ do $\vartheta_{\max} = 1 \text{ m/s}$, a maksymalne wartości temperatur występujące w bezpośredniej strefie cięcia muszą się mieścić w zakresie od $T_{\min} = 150^\circ \text{C}$ do $T_{\max} = 160^\circ \text{C}$.

Do optymalizacji genetycznej przyjęto następujące dane: liczba osobników 30, liczba populacji 30, prawdopodobieństwo krzyżowania 0,35, prawdopodobieństwo mutacji 0,01 oraz uwzględniono klonowanie. Wyniki obliczeń zestawiono w dalszej części pracy.

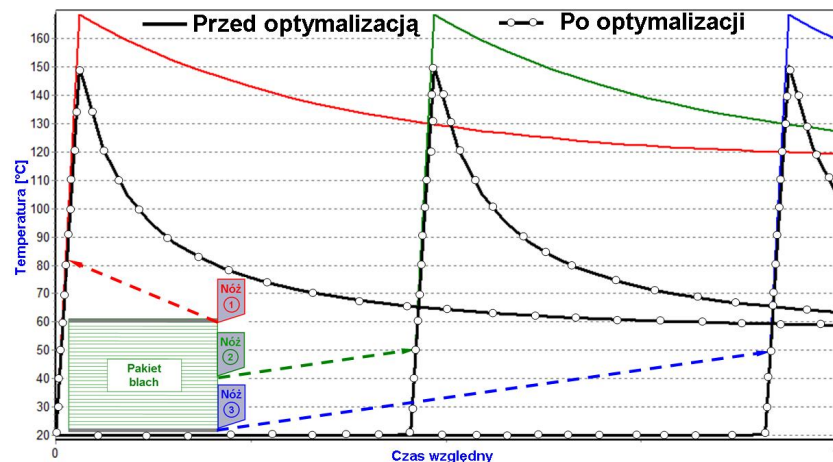
6. WYNIKI

Do wyznaczania maksymalnych wartości prędkości przecinania, które nie powodują powstawania defektów zastosowano metody optymalizacji rozumianej w sensie minimalizacji maksymalnych wartości temperatur w bezpośredniej strefie cięcia.

Rozważono dwa przypadki. W pierwszym przypadku pakiet potraktowano jako monolit (Rys. 5), a w drugim założono, że składa się on z dwudziestu pięciu oddzielnych blach z papierowymi przekładkami (Rys. 6).



Rys. 5. Przebiegi temperatur w funkcji czasu względnego dla $\lambda_x = \lambda_y = 48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ z uwzględnieniem tarcia (pakiet potraktowano jako monolit). Rozwiązanie znalezione w dwudziestej ósmej populacji dla: $\vartheta = 0,0495 \text{ m/s}$ i $\max[T(\vartheta)] = 150^\circ \text{C}$



Rys. 6. Przebiegi temperatur w funkcji czasu względnego dla $\lambda_x = 48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_y = 0,52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ z uwzględnieniem tarcia (pakiet potraktowano jako składający się z dwudziestu pięciu oddzielnych blach stalowych z przekładkami papierowymi). Rozwiązanie znalezione w dwudziestej drugiej populacji dla: $\vartheta = 0,121 \text{ m/s}$ i $\max[T(\vartheta)] = 150^\circ \text{C}$

Powierzchnie blach stalowych często pokrywane są cienkimi warstwami ochronnymi wrażliwymi na wysoką temperaturę. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwala na wyznaczanie maksymalnych wartości temperatur w bezpośredniej strefie cięcia, a zastosowany proces optymalizacji umożliwia wyznaczanie pożądanych parametrów procesu cięcia, przy których nie wystąpi uszkodzenie naniesionych warstw ochronnych.

Z przedstawionych wykresów wynika, że dowolnie wybrany punkt materialny na linii cięcia, w kierunku którego przemieszcza się z dużą prędkością ostrze noża, jest gwałtownie nagrzewany i osiąga maksymalną temperaturę w chwili, w której jego położenie pokryje się z położeniem ostrza noża.

7. WNIOSKI

W bezpośredniej strefie cięcia zwiększające się wartości temperatur mogą w istotny sposób wpływać na lokalne zmiany własności mechanicznych przecinanego pakietu blach.

Opracowane metody i algorytmy służące do modelowania i wyznaczania maksymalnych dopuszczalnych prędkości cięcia niepowodujących defektów ze względu na przekroczenie maksymalnych wartości temperatury w bezpośredniej strefie cięcia mogą być zastosowane w dynamicznej - sprzężonej mechaniczno-termicznej symulacji procesu cięcia.

Opracowany własny autorski program komputerowy pozwala na numeryczną symulację anizotropowego nieustalonego przepływu ciepła w trakcie cięcia na gilotynie i może być wykorzystany do wyznaczania pożądanych parametrów procesu cięcia, redukujących do minimum ilość odpadów, ze względu na nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości temperatur w napylanych warstwach ochronnych, którymi pokryte są powierzchnie blach stalowych.

Zastosowany algorytm genetyczny sprzężony z równaniem różniczkowym przepływu ciepła pozwala na sterowanie parametrami procesu cięcia w zależności od: rodzaju przecinanego materiału, wymiarów geometrycznych arkuszy blach, jak również od rodzaju i wymiarów zastosowanych przekładek.

Badania są realizowane w ramach projektu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, grant nr *N N503 326435*.

LITERATURA

1. Kaczmarczyk J.: Modelowanie przepływu ciepła w czasie przecinania blach stalowych na gilotynach. „Modelowanie Inżynierskie” 2008, t. 5, nr 36, . 159÷166.
2. Kucypera S.: Wyznaczanie charakterystyk termofizycznych materiałów stałych za pomocą rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła wykorzystującego dane pomiarowe. „Modelowanie Inżynierskie” 2006, t. 1, nr 32, s. 317 – 322.
3. Michalewicz Z.: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. Warszawa : WNT, 1996.
4. Mochnacki B., Suchy J. S.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. Warszawa : PWN, 1993.
5. Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Warszawa : WNT, 2003.
6. Wit G.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. Warszawa : WNT, 1998.
7. Shaw M. C.: Metal Cutting Principles. Oxford University Press 2005.
8. <http://www.schneider-engineering.ch/english/produkte/index.htm>.

OPTIMISATION OF HEATING PROCESS OF BUNDLE OF SHEETS MADE OF STEEL DURING CUTTING ON A GUILLOTINE

Summary. In the paper, the methods and algorithms serving for optimisation of the heating process of steel sheets arranged in bundles during cutting them by a knife with the defined geometry on guillotines have been introduced. The optimisation has been conducted by using the genetic algorithms. As an objective function the maximum values of temperatures occurring in the direct cutting zone of the sheet bundles was assumed and as a design variable the cutting velocity was established. The results of numerical calculations are set up graphically in charts showing the heating curves versus relative time for the chosen nodes located on a cutting line of a sheet bundle before optimisation and after optimisation.