

MODELOWANIE PRZEPIYU CIEPŁA W CZASIE PRZECINANIA BLACH STALOWYCH NA GILOTYNIE

JAROSŁAW KACZMARCZYK

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych nagrzewania się blach ułożonych w pakiety w trakcie przecinania ich nożem o zdefiniowanej geometrii na gilotynach. 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++ na podstawie metody różnic skończonych, która zdaniem wielu specjalistów jest najbardziej wygodną i efektywną metodą przybliżonego rozwiązywania zadań związanych z przepływem ciepła. Wyniki obliczeń numerycznych zestawiono graficznie w postaci wykresów przedstawiających krzywe nagrzewania w funkcji temperatury dla wybranych węzłów znajdujących się na linii cięcia przecinanego pakietu blach.

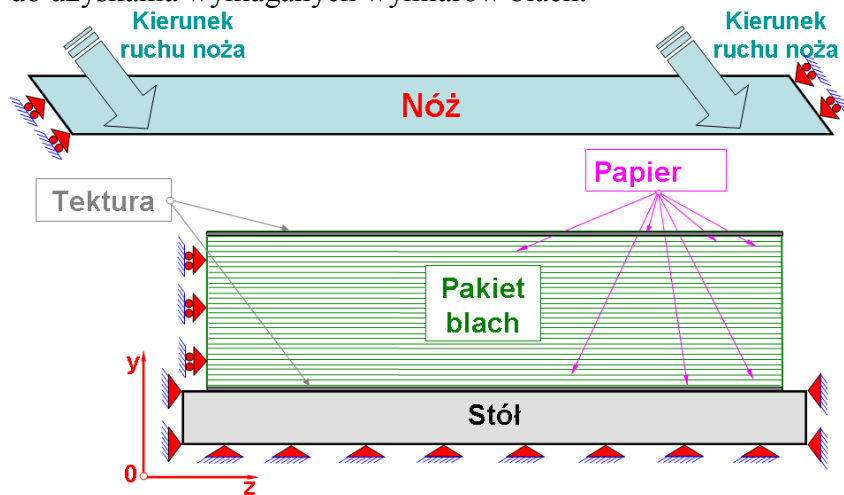
1. WSTĘP

Obecnie coraz częściej w przemyśle krajowym stosuje się gilotyny do przecinania pakietów blach z uwagi na ich dużą wydajność w procesie cięcia w porównaniu z wydajnością przecinania pojedynczych blach na nożycach. Należą one zatem do efektywnych nowoczesnych maszyn i są szeroko stosowane do przecinania pakietów blach. 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 wydzielą 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. W przypadku przecinania arkuszy kartonowych lub papierowych nie obserwuje się występowania problemów w porównaniu z przecinaniem pakietów blach. W tym ostatnim przypadku proces ten często wiąże się z powstawaniem uszkodzeń na krawędzi blach; szczególnie powszechne jest zagięcie ich krawędzi, znaczna chropowatość powierzchni oraz powstawanie zadziórów. Pojawia się zatem pytanie o charakter powstających defektów, przyczyny ich powstawania i sposoby ich unikania. Przyczyny powstawania wyżej wspomnianych defektów mogą być wielorakie i wiązać się z nożem, z przecinanym materiałem, albo z parametrami opisującymi stan cięcia. Trudno jest ustalić, który z parametrów jest odpowiedzialny za wywołany defekt. Należy również rozważyć czy problem nie jest uzależniony od większej liczby parametrów i w jakim stopniu wpływają one na wielkość i rodzaj defektu. Obserwacja wzrokowa procesu cięcia w zakładach

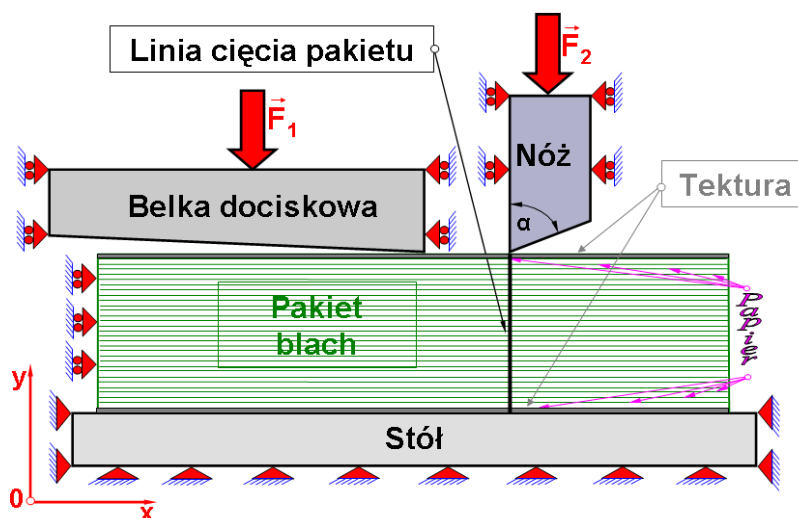
przemysłowych na liniach produkcyjnych nie pozwala na rozwiązanie wyżej postawionego problemu, ze względu na znaczne szybkości przecinania. Pomiary cech dynamicznych procesu cięcia i ewentualne ich modyfikacje bezpośrednio na linii produkcyjnej są zupełnie niemożliwe. Nagrzewanie się pakietów w trakcie 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 nieustalonego przepływu ciepła.

2. MODEL FIZYCZNY

Na stole gilotyny układu się pakiety blach (rys. 5), a belka dociskowa obciąża je z pewną siłą (rys. 2). Pakiet blach jest następnie przecinany jest 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.



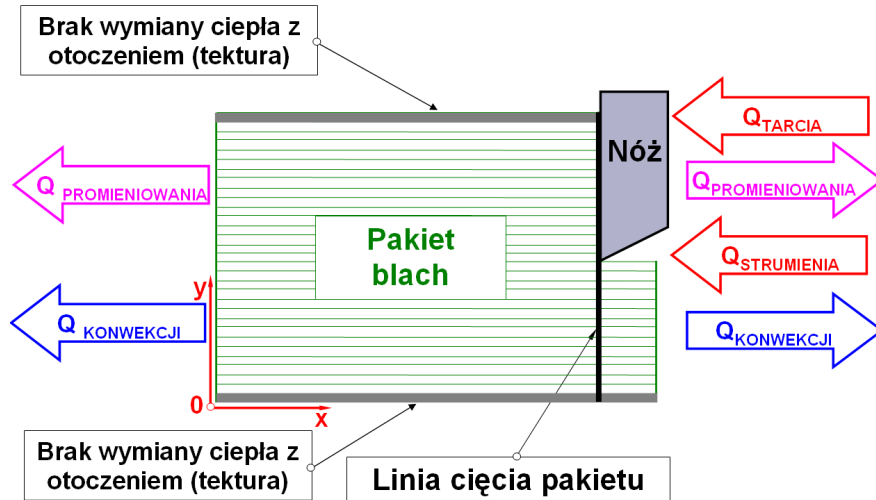
Rys. 1. Model fizyczny przecinania pakietu blach – widok z przodu



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 powierzchnia pakietu

oddzielona jest teksturą, która stanowi dobry izolator. W związku z powyższym przyjęto założenie o braku wymiany ciepła pomiędzy górną i dolną powierzchnią pakietu, a otoczeniem (rys. 3).

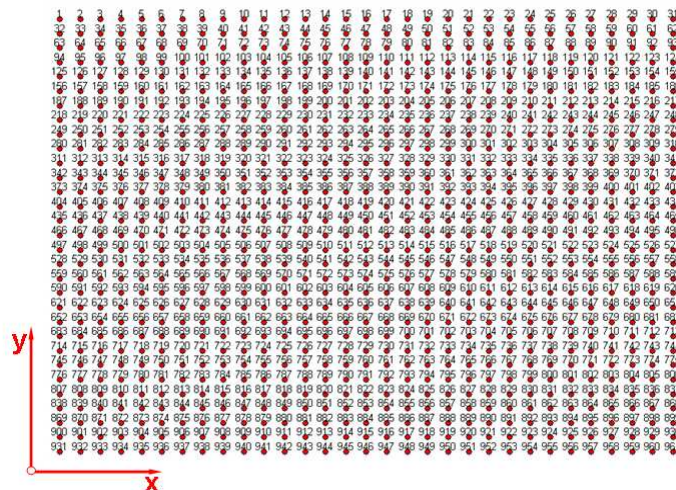


Rys. 3. Model fizyczny przecinania pakietu blach z warunkami brzegowymi

3. ZAŁOŻENIA I DANE PRZYJĘTE W OBLICZENIACH

Po lewej stronie pakietu blach założono wymianę ciepła pakietu z otoczeniem przez konwekcję i promieniowanie. Po prawej stronie pakietu zamodelowano strumień ciepła przemieszczający się z prędkością odpowiadającą prędkości ostrza noża. Założono, że strumień ciepła rozdziela się symetrycznie względem linii cięcia (rys. 3) na dwa strumienie, z których jeden jest przekazywany do pakietu znajdującego się po lewej stronie linii cięcia (rys. 3), a drugi następnie rozdziela się na kilka strumieni po prawej stronie linii cięcia. W związku z powyższym w procesie modelowania przepływu ciepła w trakcie cięcia uwzględniono połowę wartości wyjściowego strumienia ciepła. Następnie wartość tę pomniejszono o 10% 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 obrane, aby ich kierunki pokrywały się z głównymi osiami anizotropii przecinanego pakietu.



Rys. 4. Podział modelowanego pakietu na węzły

Do prowadzenia obliczeń numerycznych w trakcie symulacji przepływu ciepła w procesie cięcia pakietów blach stalowych na gilotynie (rys. 5) przyjęto poniższe założenia. Ze względu na duże koszty związane z zakupem profesjonalnej aparatury do pomiaru strumienia ciepła w strefie cięcia zdecydowano się na przyjęcie literaturowej wartości strumienia ciepła wynoszącej 900 W [3] w bezpośredniej strefie skrawania przy toczeniu dla stali 40H zmierzonej przy zachowaniu ustalonych wartości parametrów skrawania takich jak: prędkość skrawania, posuw i głębokość skrawania równych odpowiednio: $v_c=100$ m/min, $f=0,12$ mm/obr, $a_p=1,5$ mm. Przyjętą wartość połowy strumienia ciepła odniesiono do pola powierzchni odpowiadającego szerokości cięcia wynoszącej 15 cm i łącznej grubości pojedynczego arkusza blachy stalowej i papieru równej 0,4 mm. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla prędkości cięcia $v=0,01$ m/s.



Rys. 5. Widok gilotyny [5]

Blachy w pakietach przekładane są papierem. Obszar obliczeniowy modelowany jest jako jednorodny, zakłada się przy tym, że w poziomie występuje równoległość, a w pionie szeregowe łączenie oporów cieplnych. Przyjęte wartości własności termofizycznych dla papieru i stali zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Własności termofizyczne papieru i stali [2]

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. 3) oszacowano jako bliski współczynnikowi przewodności cieplnej dla stali (48 W/(m·K)), natomiast na kierunku osi y (rys. 3) przybliżono go średnią harmoniczną [1] współczynników przewodności cieplnej dla papieru i stali (0,52 W/(m·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 odpowiednio: $x_1=25\%$ i $x_2=75\%$. Odpowiadające im procentowe udziały wagowe wynoszą: $x'_1=3,8\%$ i $x'_2=96,2\%$. Ciepło właściwe i gęstość dla pakietu obliczono jako średnią arytmetyczną procentowych udziałów wagowych ($\rho = 6120$ kg/m³, $c_p = 512,5$ J/(kg·K)). Założono wymianę ciepła pomiędzy modelowanym obszarem, a otoczeniem jednocześnie przez konwekcję i promieniowanie. Przyjęto współczynnik konwekcji ($\alpha=10$ W/(m²·K)), współczynnik emisyjności $\epsilon=0,5$ i temperaturę otoczenia $T_0=20$ °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 określono 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):

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

gdzie:

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

Dla powierzchni izolowanych cieplnie przyjęto:

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

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

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

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:

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

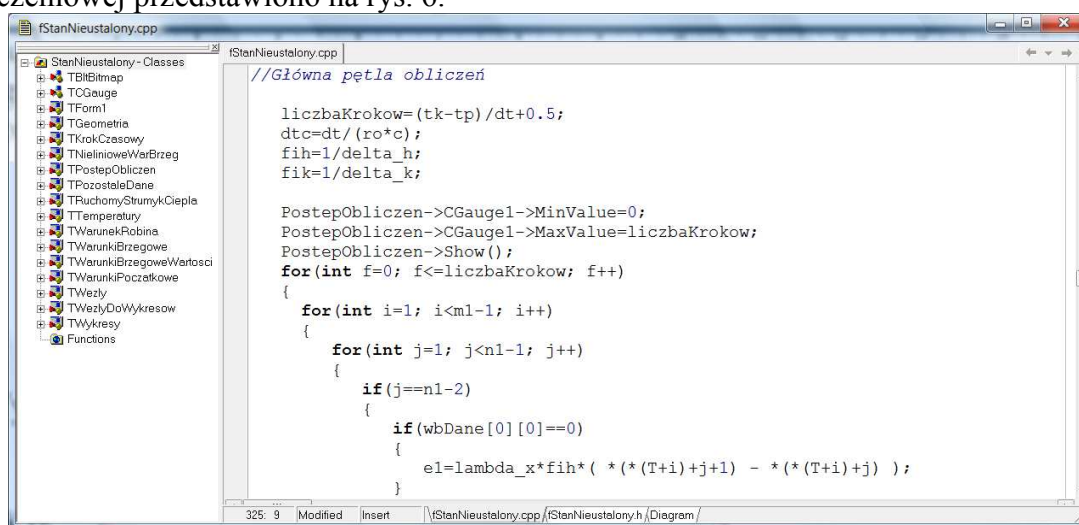
gdzie:

Δt – maksymalny krok czasowy s ,

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

5. PROGRAM KOMPUTEROWY

Przedstawiony algorytm rozwiązania modelu matematycznego posłużył do opracowania autorskiego programu komputerowego w języku C++. Wybrany fragment kodu głównej pętli obliczeniowej przedstawiono na rys. 6.



```

//Główna pętla obliczeń

liczbaKrokow=(tk-tp)/dt+0.5;
dte=dt/(ro*c);
fih=1/delta_h;
fik=1/delta_k;

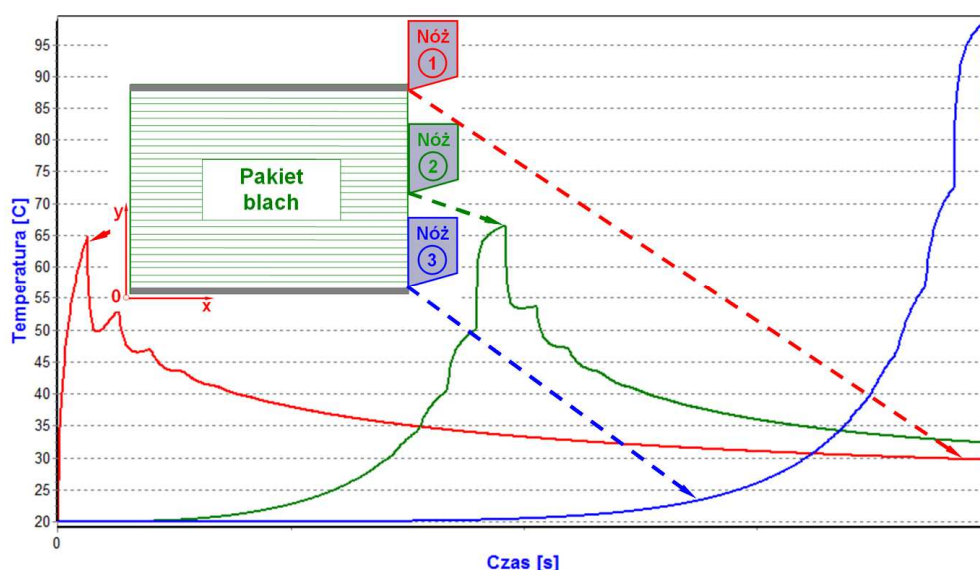
PostepObliczen->CGauge1->MinValue=0;
PostepObliczen->CGauge1->MaxValue=liczbaKrokow;
PostepObliczen->Show();
for(int f=0; f<=liczbaKrokow; f++)
{
    for(int i=1; i<=m1-1; i++)
    {
        for(int j=1; j<=n1-1; j++)
        {
            if(j==n1-2)
            {
                if(wbDane[0][0]==0)
                {
                    e1=lambda_x*fih*( *(T+i)+j+1) - *(T+i)+j );
                }
            }
        }
    }
}

```

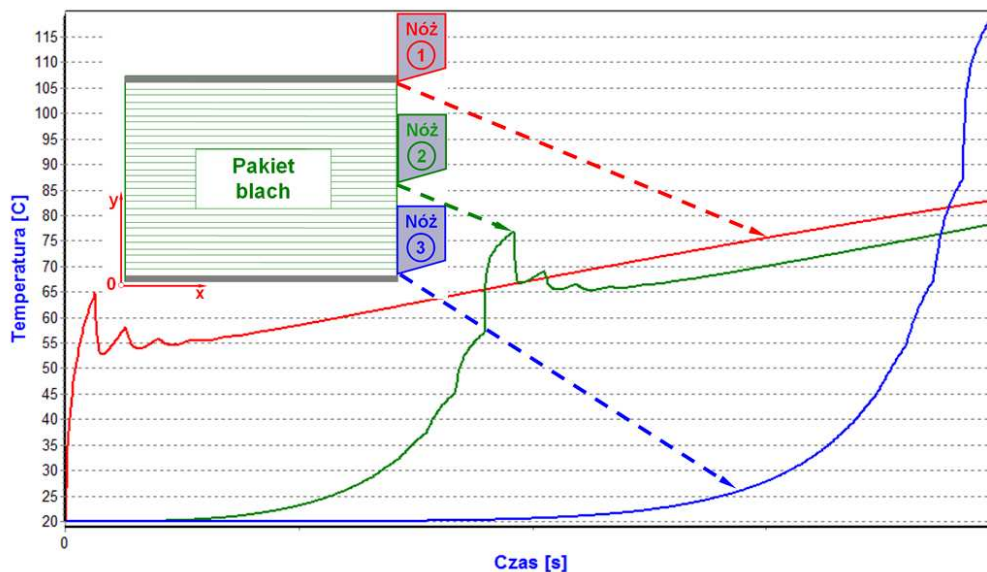
Rys. 6. Wybrany fragment kodu głównej pętli obliczeniowej przygotowanej w języku C++

6. WYNIKI

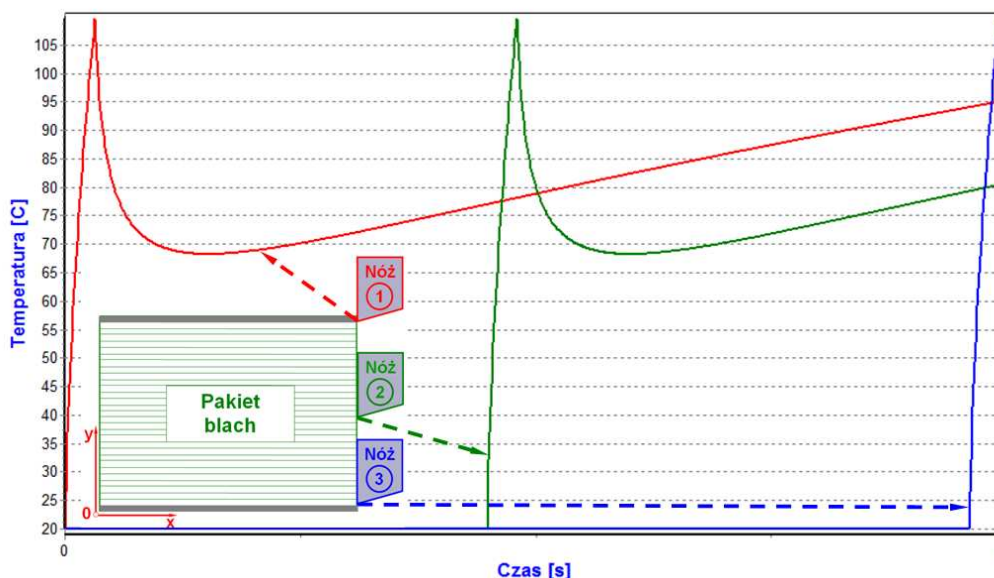
Dla przyjętego strumienia ciepła i dla wybranych trzech przypadków uzyskano następujące krzywe nagrzewania się pakietu blach stalowych w funkcji czasu (rys. 7÷9).



Rys. 7. Przebieg temperatury w funkcji czasu dla $\lambda_x = \lambda_y = 48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ z pominięciem tarcia



Rys. 8. Przebieg temperatury w funkcji czasu dla $\lambda_x = \lambda_y = 48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ z uwzględnieniem tarcia



Rys. 9. Przebieg temperatury w funkcji czasu dla $\lambda_x = 48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_y = 0,52 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ z uwzględnieniem tarcia

Powierzchnie blach stalowych często są pokrywane cienkimi warstwami ochronnymi wrażliwymi na wysoką temperaturę, a następnie są przecinane na gilotynach. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwala na wyznaczanie maksymalnych wartości temperatur w bezpośredniej strefie cięcia, a więc i na 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 temperatury mogą w istotny sposób wpływać na lokalne zmiany własności mechanicznych przecinanego pakietu blach.

Przygotowany program komputerowy może być wykorzystany do wyznaczenia pożądaných parametrów procesu cięcia redukujących do minimum liczbę odpadów, ze względu na nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości temperatur w napylanych warstwach ochronnych, którymi pokryte są powierzchnie blach stalowych.

Opracowane metody i algorytmy do modelowania nagrzewania się pakietów blach w bezpośredniej strefie cięcia mogą być zastosowane w dynamicznej - sprzężonej mechaniczno-termicznej symulacji procesu cięcia.

Opracowany własny autorski program komputerowy pozwala na symulacje anizotropowego nieustalonego przepływu ciepła w trakcie cięcia na gilotynie.

LITERATURA

1. Mochnacki B., Suchy J. S.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. Warszawa : PWN, 1993.
2. Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Warszawa : WNT, 2003.
3. Wit G.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. Warszawa : WNT, 1998.
4. Shaw M. C.: Metal Cutting Principles. Oxford University Press 2005.
5. <http://www.schneider-engineering.ch/english/produkte/index.htm>.
6. Kucypera S.: Wyznaczanie charakterystyk termofizycznych materiałów stałych za pomocą rozwiązania odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła wykorzystującego dane pomiarowe. „Modelowanie Inżynierskie” 2006 nr 32, t. 1, s. 317 – 322.

MODELLING OF HEAT TRANSFER DURING CUTTING PROCESS OF STEEL SHEETS BUNDLES ON A GUILLOTINE

Summary. In the paper the results of numerical calculations of heating sheets arranged in bundles during cutting them by a knife of the defined geometry on guillotines were shown. The physical models and corresponding to them the mathematical models taking into account a transient heat flow and anisotropic thermophysical properties of material were elaborated. The numerical calculations were conducted using an author's computer program prepared in the object oriented language C++ based on the finite difference method, which in opinion of many specialists is the most convenient and effective one of approximate task solution connected with a heat flow. The results of numerical calculations are set up graphically in charts showing the heating curves versus temperature for the chosen nodes located on a cutting line of a sheet bundle being cut.