

Maciej Krzywda,
Inżynieria Obliczeniowa, IMiP
Modelowanie w Inżynierii
nr albumu: 293102

Sprawozdanie 2

Tytuł projektu:

Stymulacja przemiany ferrytu w austenit w stalach DP.

- **Cel projektu:**

Celem projektu jest opracowanie modelu przemiany fazowej ferrytu w austenit oraz wykonanie symulacji dla różnych cykli nagrzewania. (780°C , 800°C , 820°C) oraz różnych prędkości nagrzewania, ($0,5^{\circ}\text{C/s}$, 2°C/s , 3°C/s).

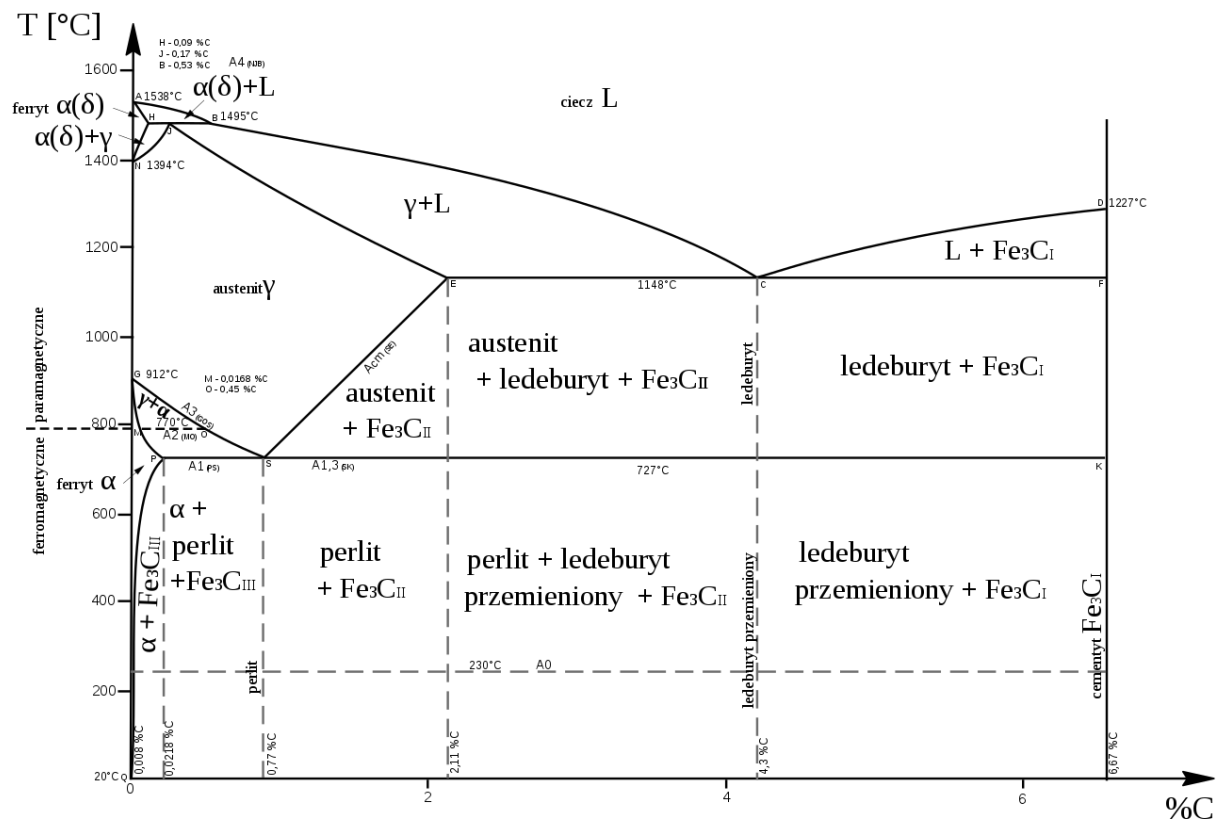
- **Zadania:**

1. Opracowanie wykresów rozkładu stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych dla każdej temperatury i każdej prędkości nagrzewania
2. Opracowanie wykresów zmiany ułamka objętości austenitu z czasem dla każdego z przypadków dla każdej temperatury i każdej prędkości nagrzewania

- **Część Teoretyczna**

Stale DP składają się z fazy miękkiej (ferrytu) oraz wysp twardego martenzytu lub mieszaniny martenzytu z bainitem, których udział wynosi 15–30%. Taka mikrostruktura zapewnia osiągnięcie wysokich własności wytrzymałościowych połączonych z bardzo dobrą ciągliwością i podatnością do kształtowania na zimno. Faza miękka (ferryt) dominuje w strukturze stali DP, co powoduje ich dużą ciągliwość. Podczas odkształcania takiej struktury początkowo następuje koncentracja płynięcia plastycznego w ferrycie. Występowanie w strukturze drugiej

fazy, hamującej ruch dyslokacji, daje lepszą charakterystykę umocnienia w porównaniu do innych charakterystyk. Wymagana relacja między udziałami objętości ferrytu i martenzytu dla uzyskania pożądanych właściwości mechanicznych stali DP jest osiągana na dwa sposoby – poprzez kontrolowane chłodzenie po walcowaniu na gorąco blach grubszych (powyżej 2 mm), albo w procesie ciągłego wyżarzania po walcowaniu na zimno blach cienkich.



Wykres fazowy żelazo-węgiel z zakresami występowania cementytów $Fe_3C_I - Fe_3C_{III}$

Zakres występowania stabilnego austenitu określa obszar opisany punktami G, S, E, J i N wykresu żelazo-węgiel. Najszerszym jego zakresem występowania w czystej postaci jest temperatura 1130 °C. W tej temperaturze struktura krystaliczna austenitu jest w stanie wchłonać do 2,11% węgla. W stopie o zawartości węgla powyżej 0,8% , wraz z nagrzewaniem do temperatury powyżej A_{c1} (około 727 °C) określanej przez krzywą SE z ferrytu znajdującego się w perlicie rozpoczyna się wydzielać austenit, lokując się na granicach płytek ferrytu i

cementytu. Podczas tej przemiany cementyt rozpuszcza się w austenicie aż do jego całkowitego wykorzystania i zakończenia austenitizowania.

Przy stopach o zawartości węgla poniżej 0,8% przy grzaniu powyżej temperatury opisanej krzywą GS, z ferrytu wydziela się austenit (zarówno z wolnego ferrytu, jak i ferrytu wchodzącego w skład perlitu). Podczas tego procesu również wykorzystywany jest cementyt do „zasilania” węglem austenitu (w austenicie rozpuszcza się więcej węgla niż w ferrycie). Całkowita przemiana zachodzi po wykorzystaniu cementytu i po osiągnięciu temperatury Ac3.

Podczas wyżej wspomnianego nagrzewania ferryt rekrytalizuje. W zależności od energii odkształcenia w ziarnach ferrytu i szybkości nagrzewania, podczas rekrytalizacji ferrytu może wydzielić się perlit, przed przemianą w austenit. Poprzez wytrzymanie izotermiczne otrzymana jest struktura dwufazowa austenit-ferryt. Następnie powolne chłodzenie część austenitu przemienia się w ferryt.

Późniejsze hartowanie powoduje powstanie austenitu szczałkowego i martenzytu. Procesy zachodzące podczas wyżarzania to między innymi przemiana perlitu w austenit, która ma charakter dyfuzyjny. Przebiega w trzech etapach:

- utworzenie austenitu niejednorodnego,
- utworzenie austenitu jednorodnego oraz,
- rozrost ziaren austenitu, przy czym im wyższa temperatura tym krótszy jest czas potrzebny do zajścia przemiany

Do modelowania procesu przemiany ferrytu w austenit wykorzystano drugie prawo Ficka :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

gdzie:
c - stężenie węgla,
D-współczynnik dyfuzji,
t-czas

Dla ułatwienia rozwiązania równania, drugie prawo Ficka zostało przedstawione za pomocą metody różnic skończonych:

Wykorzystując jawny schemat całkowania po czasie w którym zamiany pochodnej funkcji na iloraz różnicowy dokonuje się wprowadzając iloraz przedni dla pierwszej pochodnej oraz iloraz centralny dla drugiej pochodnej funkcji $c(x,t)$. W rezultacie otrzymałem równanie (zapisane kolorem czerwonym) które stanowi przybliżone równanie Ficka.

$$\frac{C_{j,k+1} - C_{j,k}}{\Delta t} = D \frac{C_{j+1,k} - 2C_{j,k} + C_{j-1,k}}{\Delta x^2}$$

$$C_{j,k+1} - C_{j,k} = D\Delta t \frac{C_{j+1,k} - 2C_{j,k} + C_{j-1,k}}{\Delta x^2}$$

$$C_{j,k+1} - C_{j,k} = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j+1,k} - 2 \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j,k} + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j-1,k}$$

$$C_{j,k+1} = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j+1,k} - 2 \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j,k} + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} C_{j-1,k} + C_{j,k}$$

$$C_{j,k+1} = C_{j,k} \left(1 - 2 \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \right) + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} (C_{j-1,k} + C_{j+1,k})$$

gdzie:

- j - krok liniowy
- k - krok czasowy

Współczynnik dyfuzji C w austenicie:

- temp=727,
- Q = 140000
- R = 8.3144
- temp_kelvin = temp + 273
- d0 = 0.000041
- D=d0*exp(-Q / (R * temp_kelvin))*1E10

Kryterium stabilności Neumanna:

- (D*dt)/dx^2<=0.5

- Listing programu:

```
close all; clear all; clc;
% Ustawienie wartości do obliczeń
T=820;
T_k=T+273;
Q=140000;
R=8.3144;
d0=0.000041;
dx=0.1;
dt=3;
C=zeros(2,100);
tab=zeros(99,100);
dT=0;
gr=6;
```

```

for i=1:99
    C(1,i)=0.02;
end
C(1,1)=0.47;
C(1,2)=0.47;
C(1,3)=0.47;
C(1,4)=0.47;
C(1,5)=0.47;
austenit=zeros(1,100);

%Wykonywanie obliczeń
for i=1:100
    D=d0*exp(-Q/(R*(T_k+(dT*i))))*1E10;
    Cgr=((912-T+(dT*i))/240.26);
    for j=1:100
        if j==1
            C(2,j)=(1-2*(D*dt/dx*dx))*C(1,j)+(D*dt/dx*dx)*(C(1,j)+C(1,j+1));
        elseif j==100
            C(2,j)=(1-2*(D*dt/dx*dx))*C(1,j)+(D*dt/dx*dx)*(C(1,j-1)+C(1,j));
        else
            C(2,j)=(1-2*(D*dt/dx*dx))*C(1,j)+(D*dt/dx*dx)*(C(1,j-1)+C(1,j+1));
        end
        if C(2,gr) > Cgr
            break;
        end
    end

    %(
    W celu wyznaczenia wykresu zmiany objętości austenitu od czasu wykorzystuję
    sprawdzenie prostego warunku. Jeżeli stężenie węgla > 2,18%C to jest to
    austenit, w przeciwnym razie -ferryt
    %)

        if C(1,j) > 0.0218
            austenit(i) = austenit(i)+1;
        end

    end
    tab(i,:)=C(1,:);
    C(1,:)=C(2,:);
end

% Wyświetlanie wykresów
figure(1);
title('Wykres zmiany objętości austenitu w stali w funkcji czasu');
ylabel('Ułamek objętości');
xlabel('Krok');
axis([1 100 0 30]);
hold on;
plot(austenit,'red-');
hold off;
figure(2);
title('Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach');
xlabel('element');

```

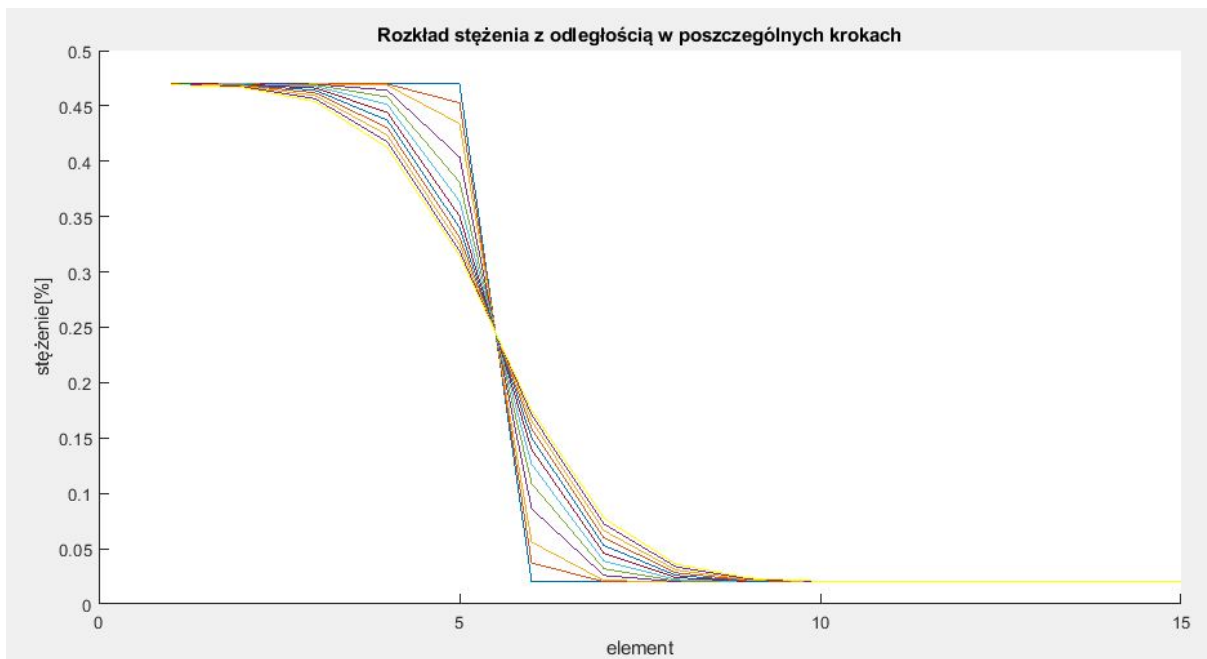
```

ylabel('stężenie[%]');
hold on;
plot(tab(1,1:15));
plot(tab(5,1:15));
plot(tab(10,1:15));
plot(tab(20,1:15));
plot(tab(30,1:15));
plot(tab(40,1:15));
plot(tab(50,1:15));
plot(tab(60,1:15));
plot(tab(70,1:15));
plot(tab(80,1:15));
plot(tab(90,1:15));
plot(tab(99,1:15));

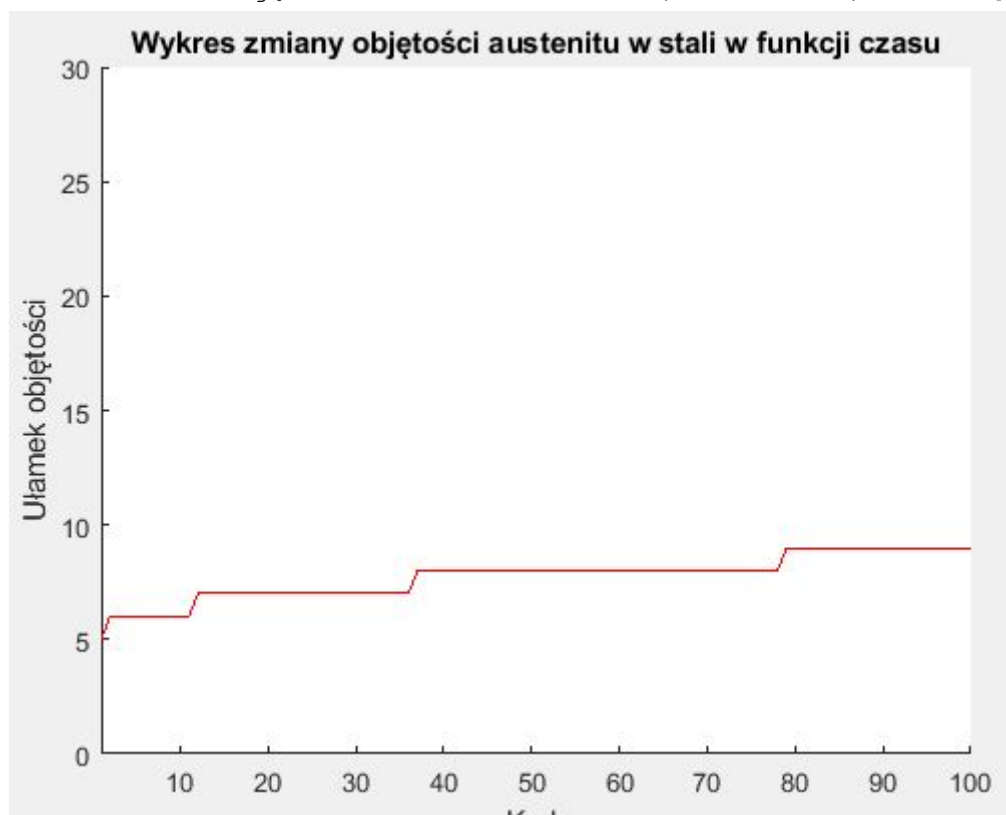
```

- Wyniki

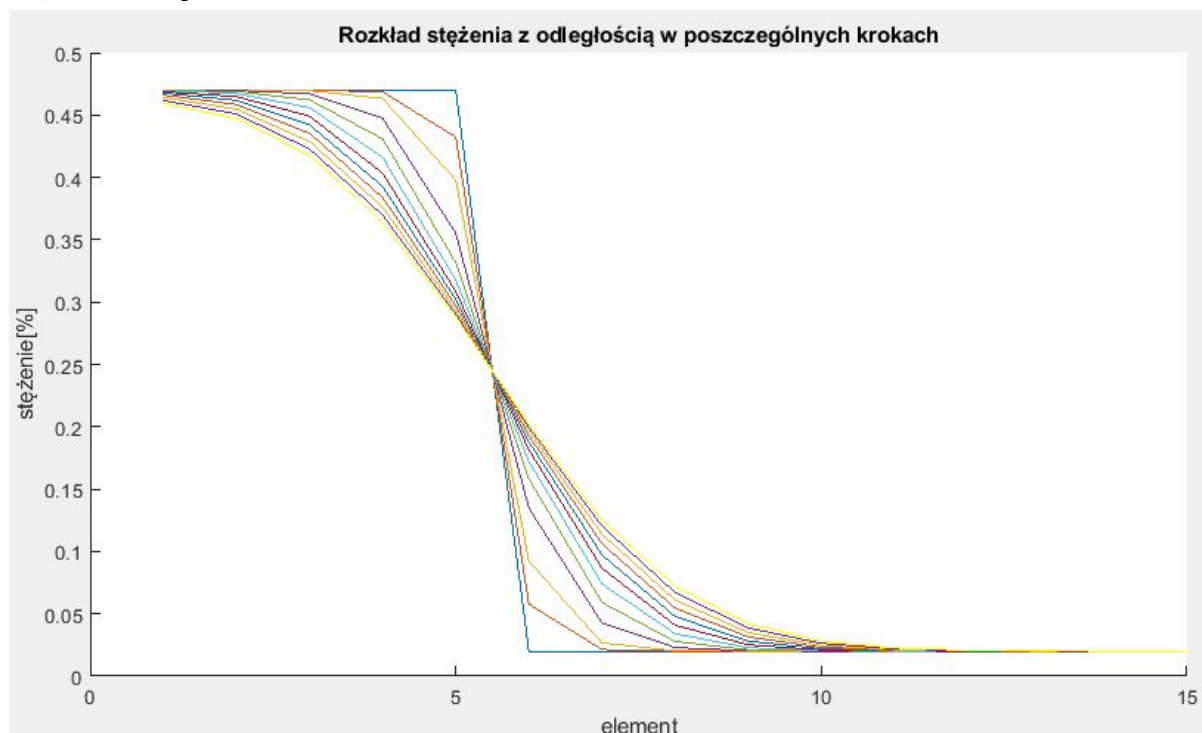
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T=727^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 0,5 [^{\circ}\text{C/s}]$



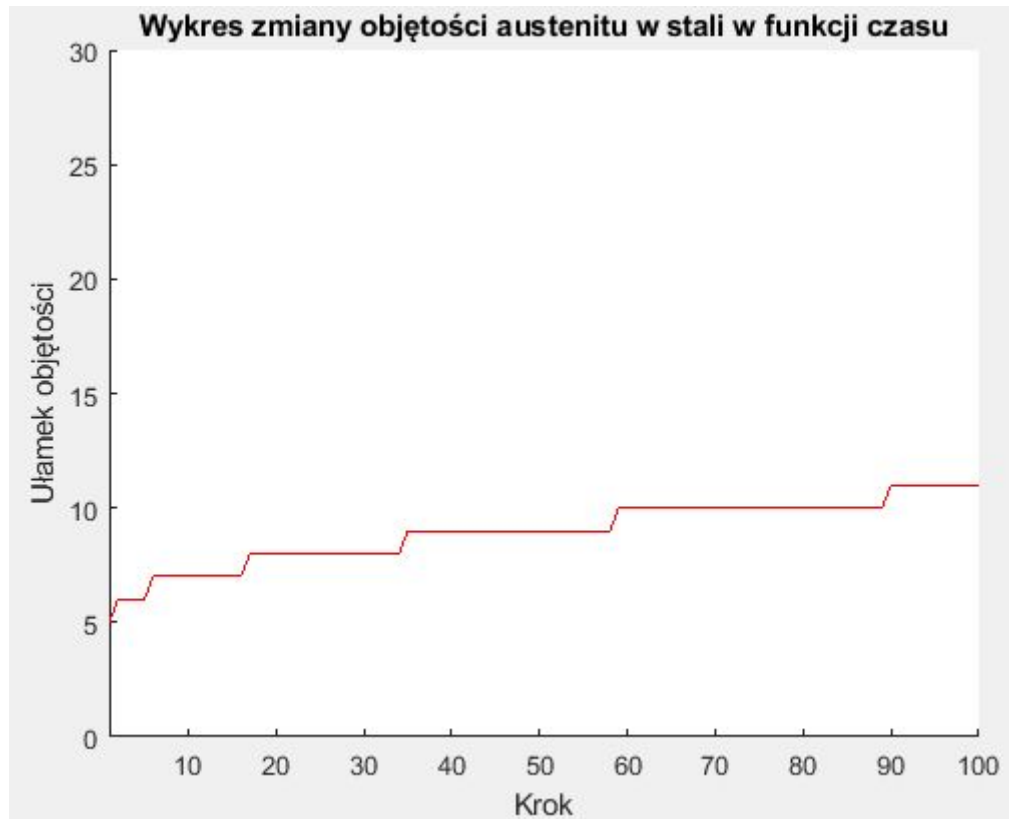
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 727\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 0.5\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



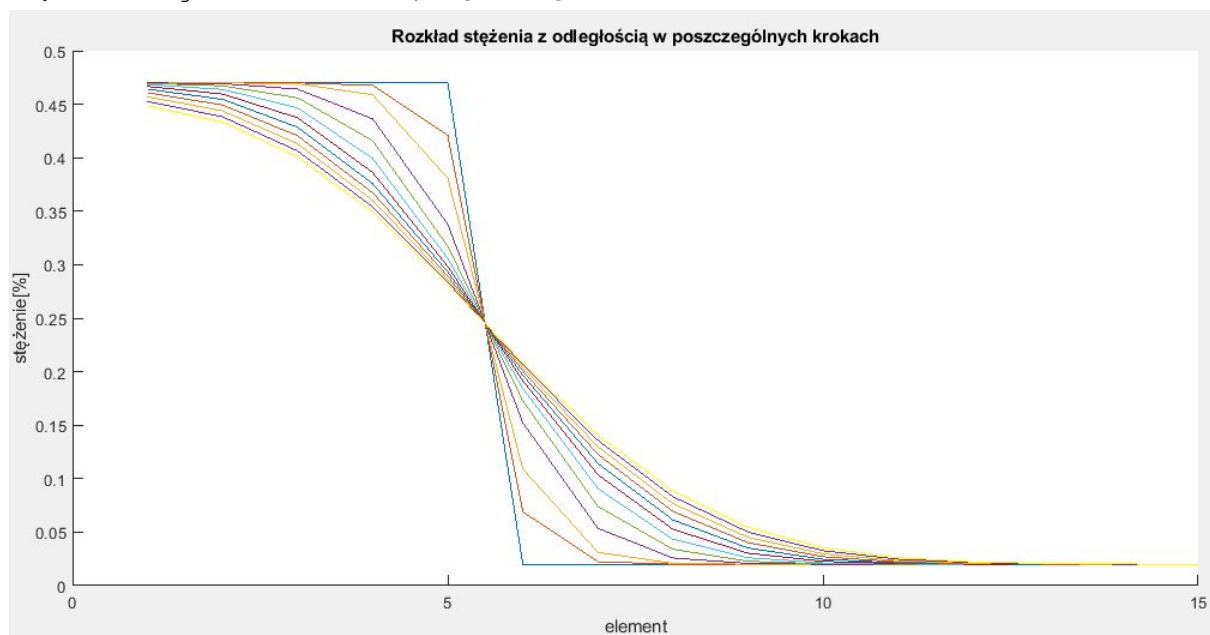
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T=780^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 0,5\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



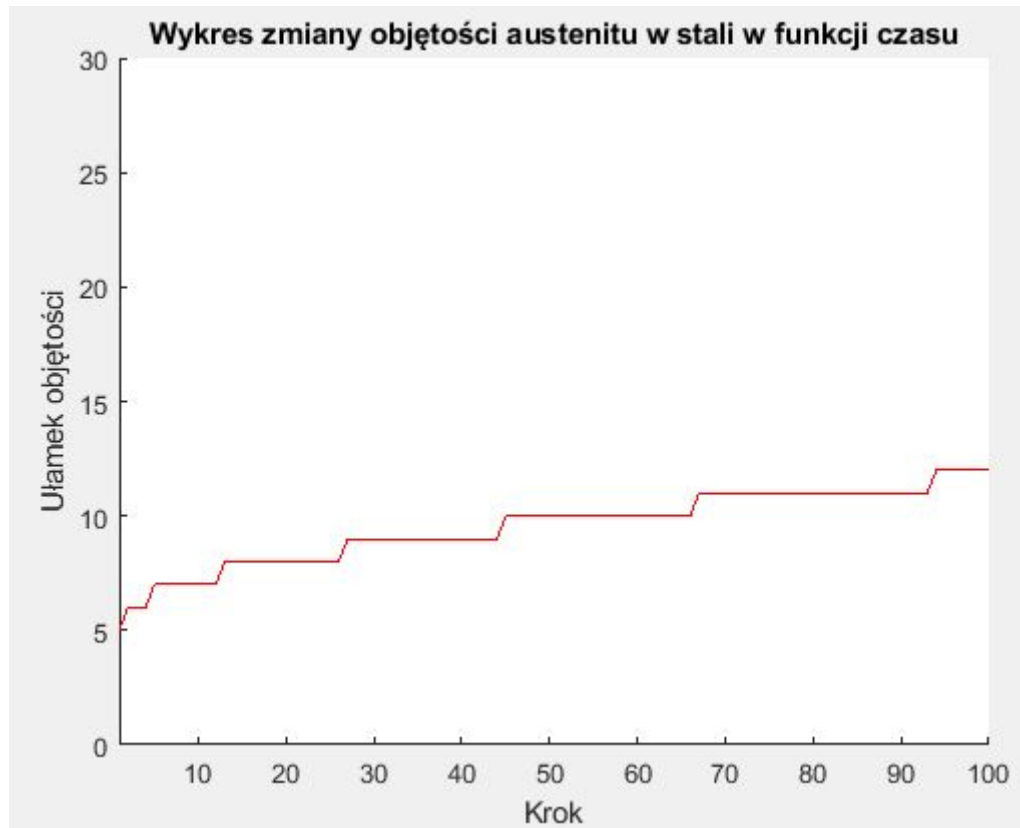
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 780^{\circ}\text{C}$, $dt = 0.5$ [$^{\circ}\text{C/s}$]



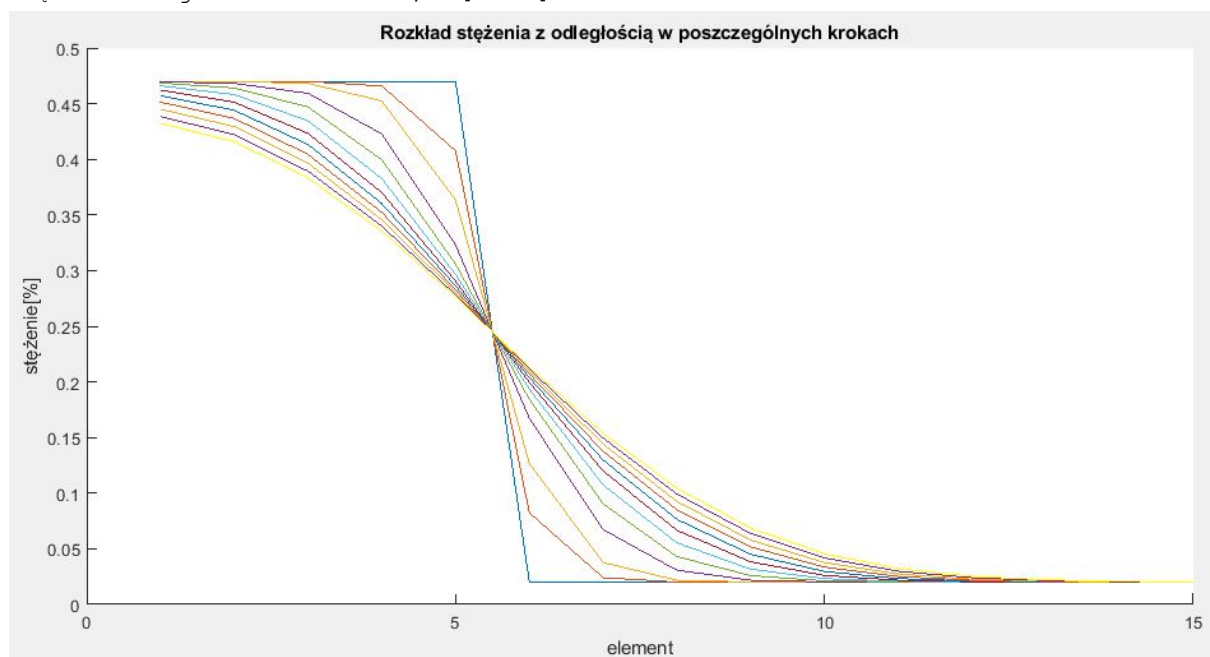
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T=800^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 0,5$ [$^{\circ}\text{C/s}$]



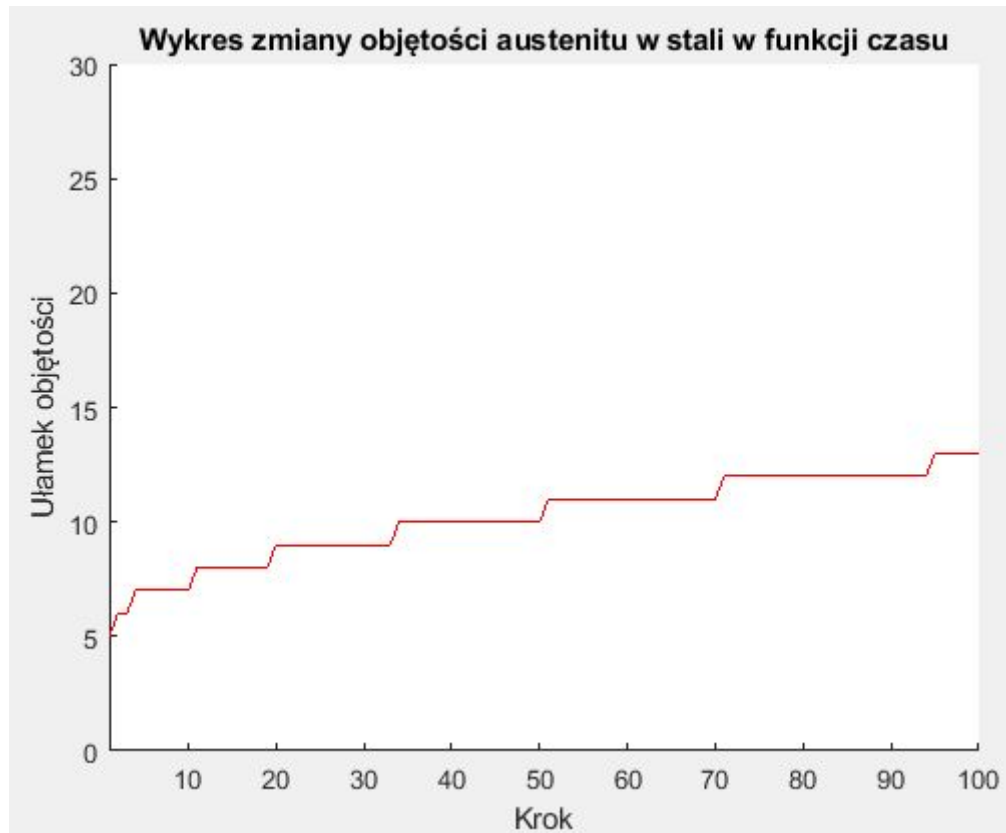
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 0.5\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



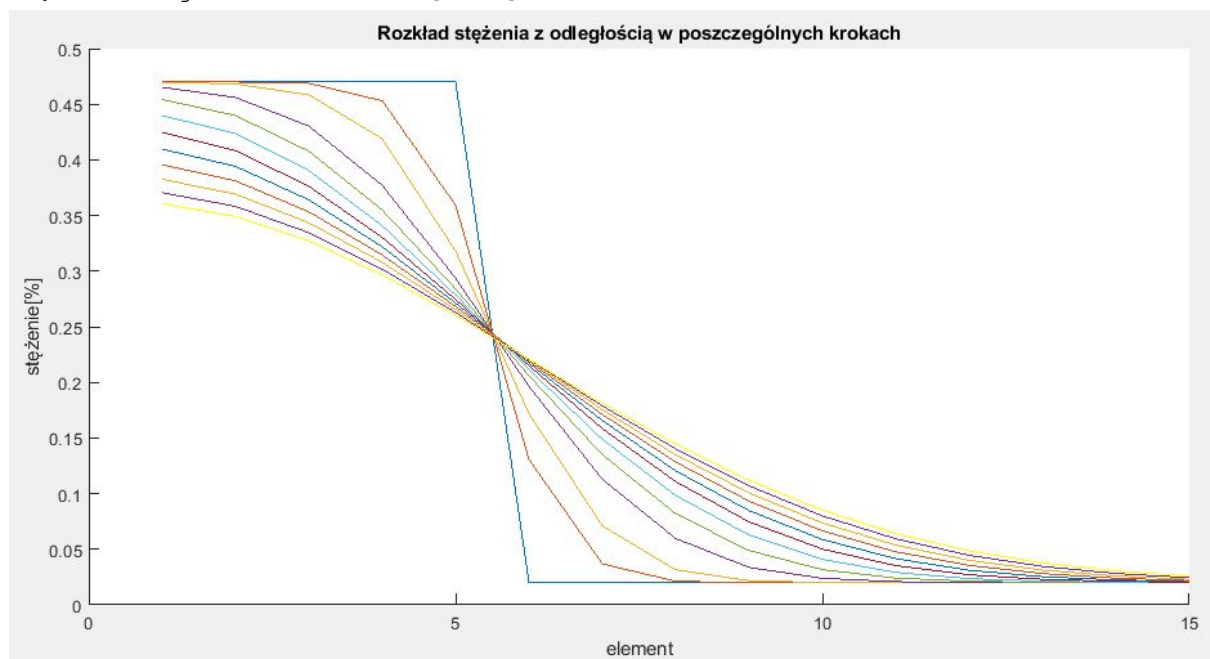
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T=820^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 0,5\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



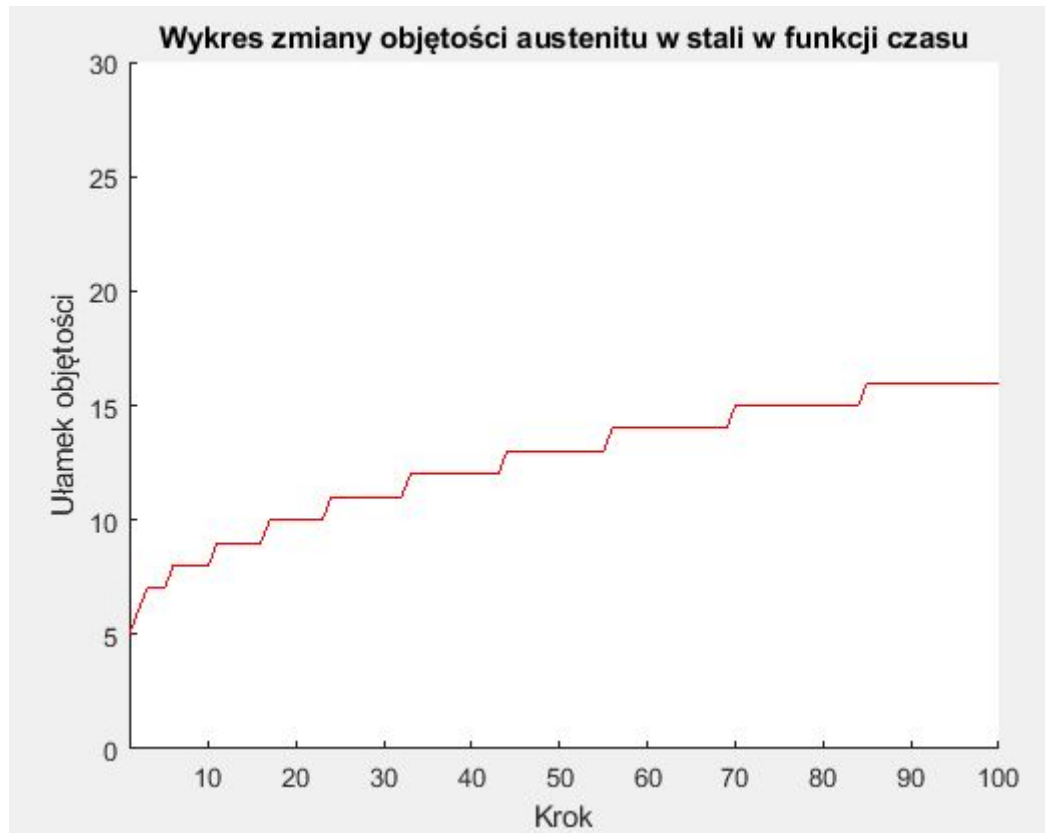
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 0.5\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



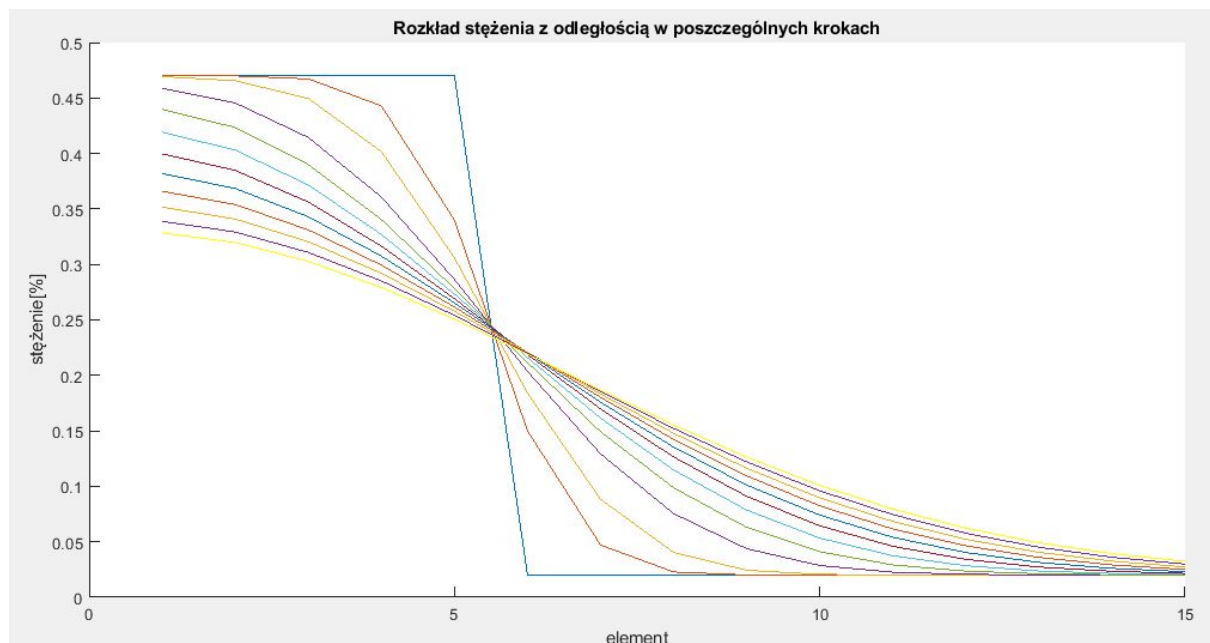
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T=780^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 2\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



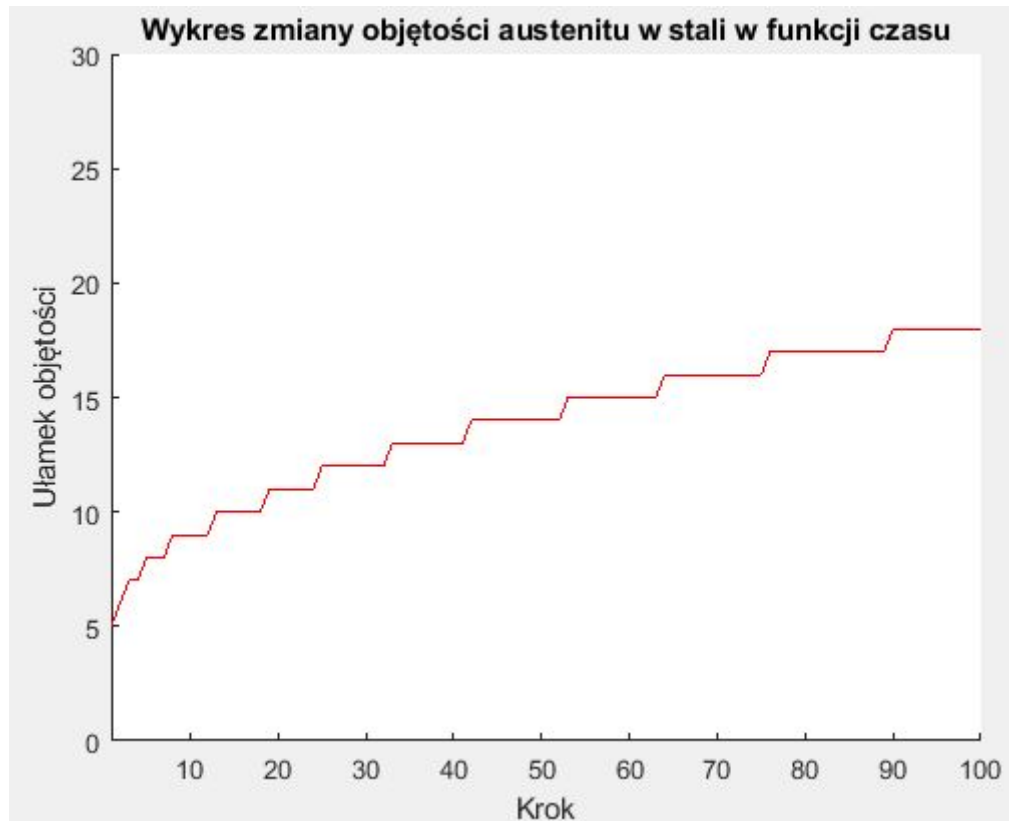
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 780^{\circ}\text{C}$, $dt = 2[^{\circ}\text{C/s}]$



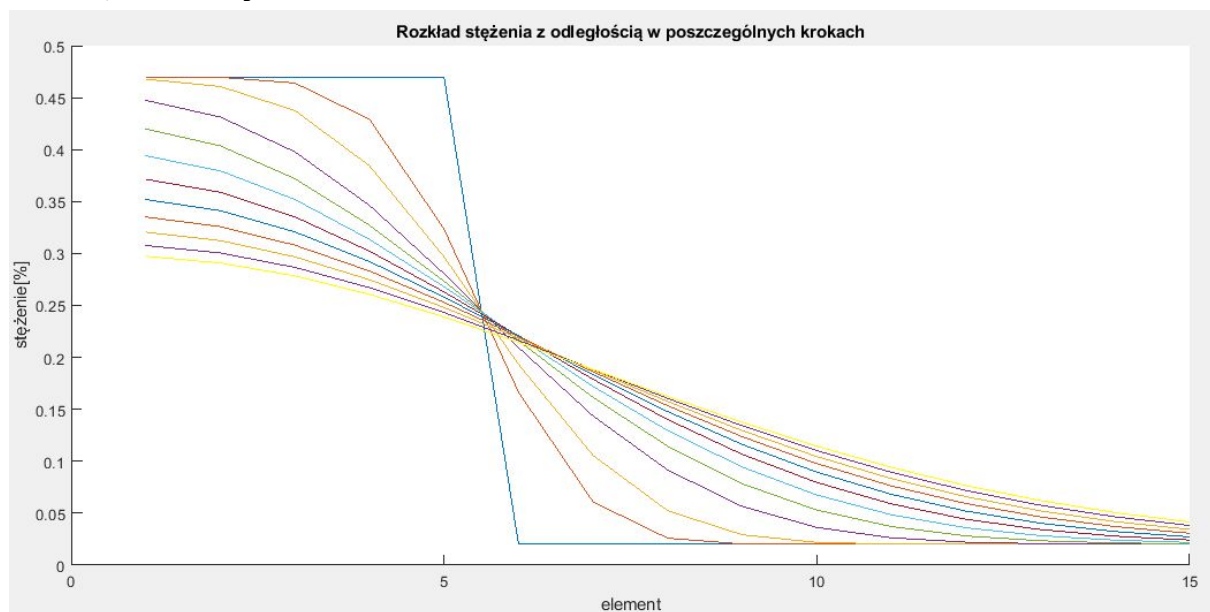
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T = 800^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt = 2[^{\circ}\text{C/s}]$



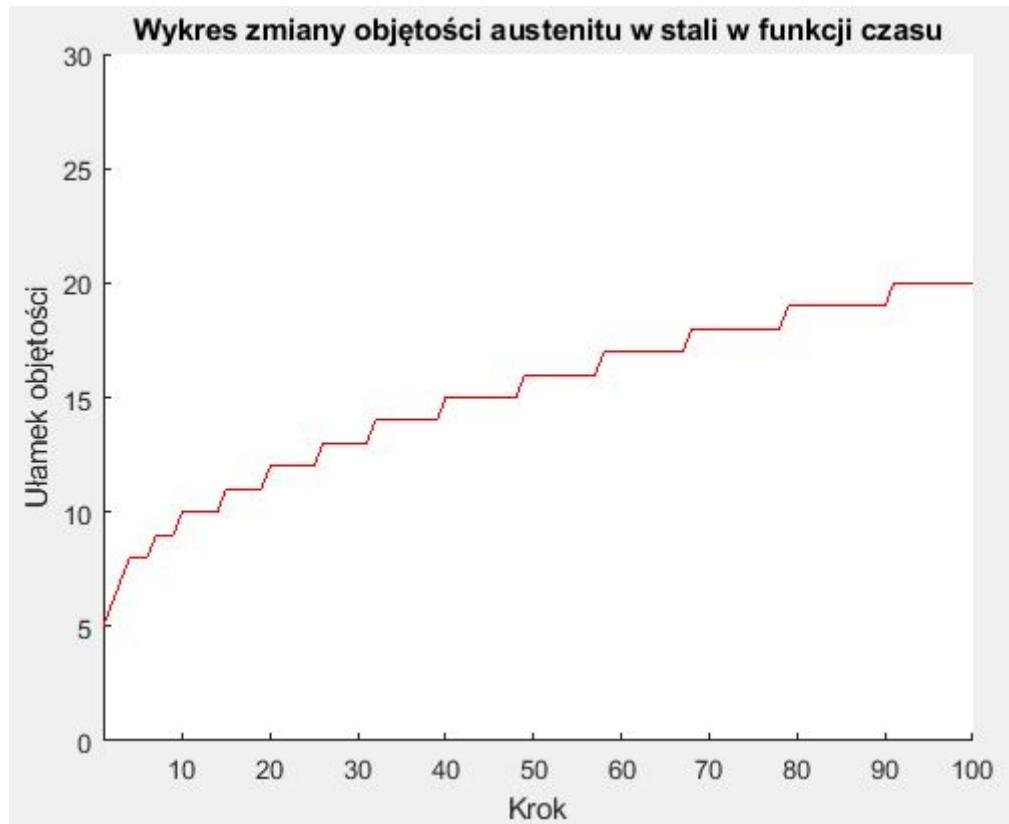
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 2\text{ }[^{\circ}\text{C} / \text{s}]$



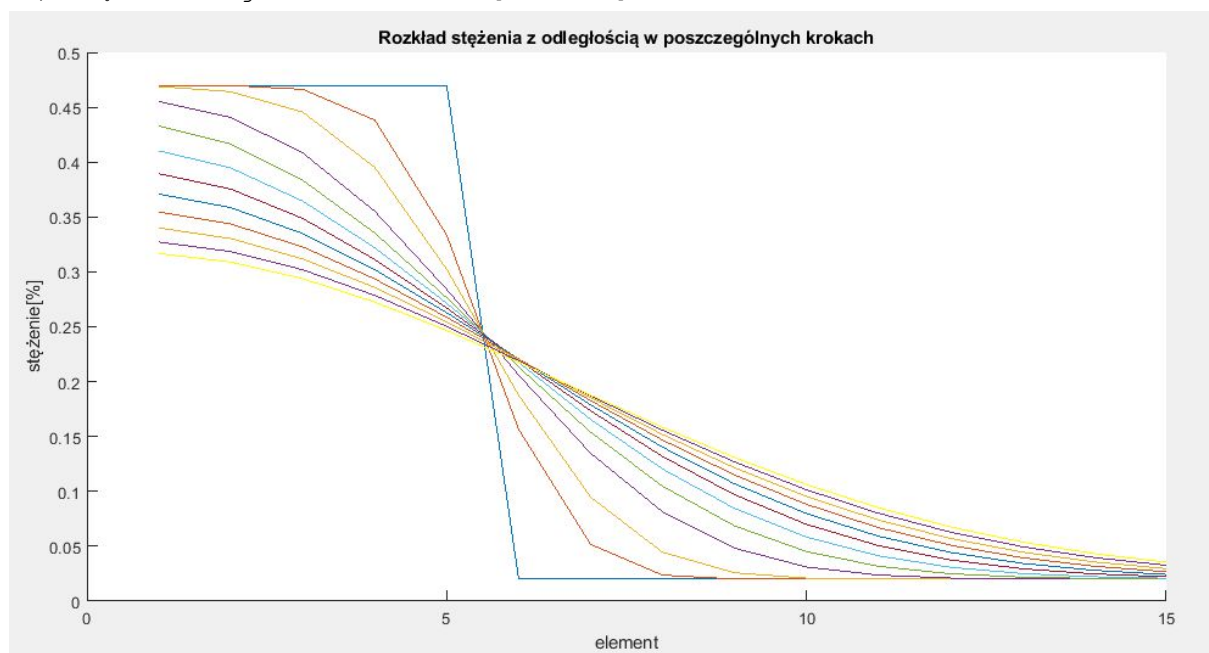
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, Prędkość nagrzewania $dt: 2\text{ }[^{\circ}\text{C} / \text{s}]$



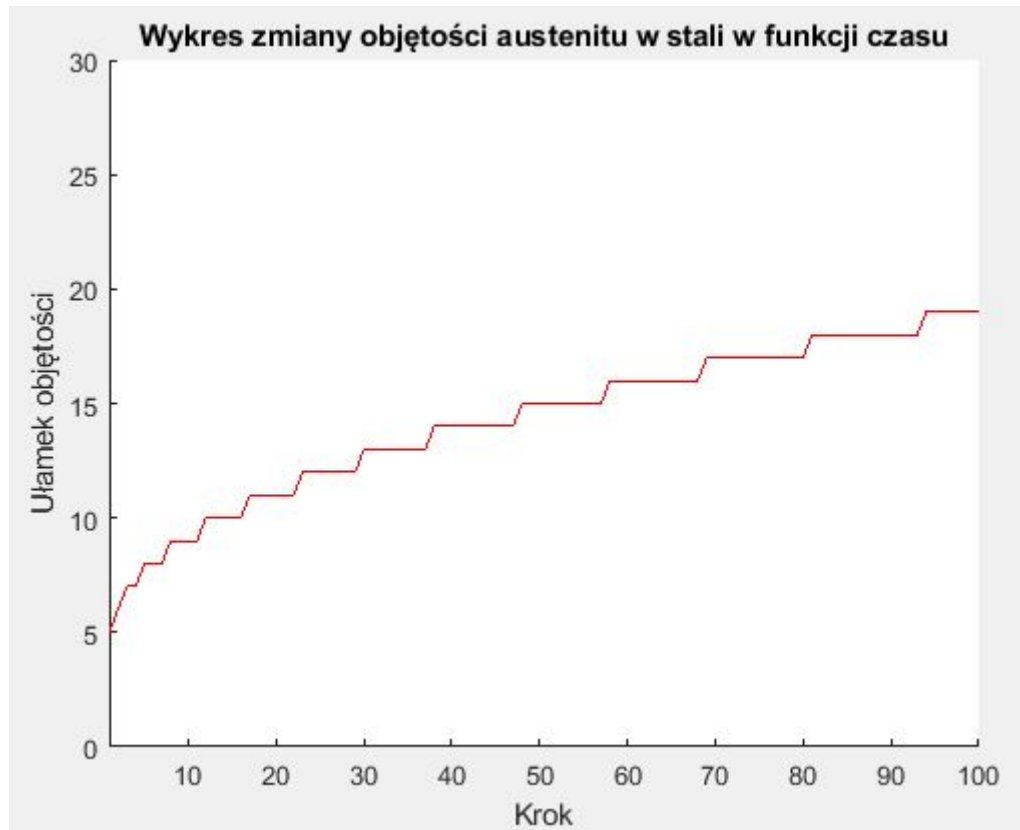
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 2\text{ }[^{\circ}\text{C} / \text{s}]$



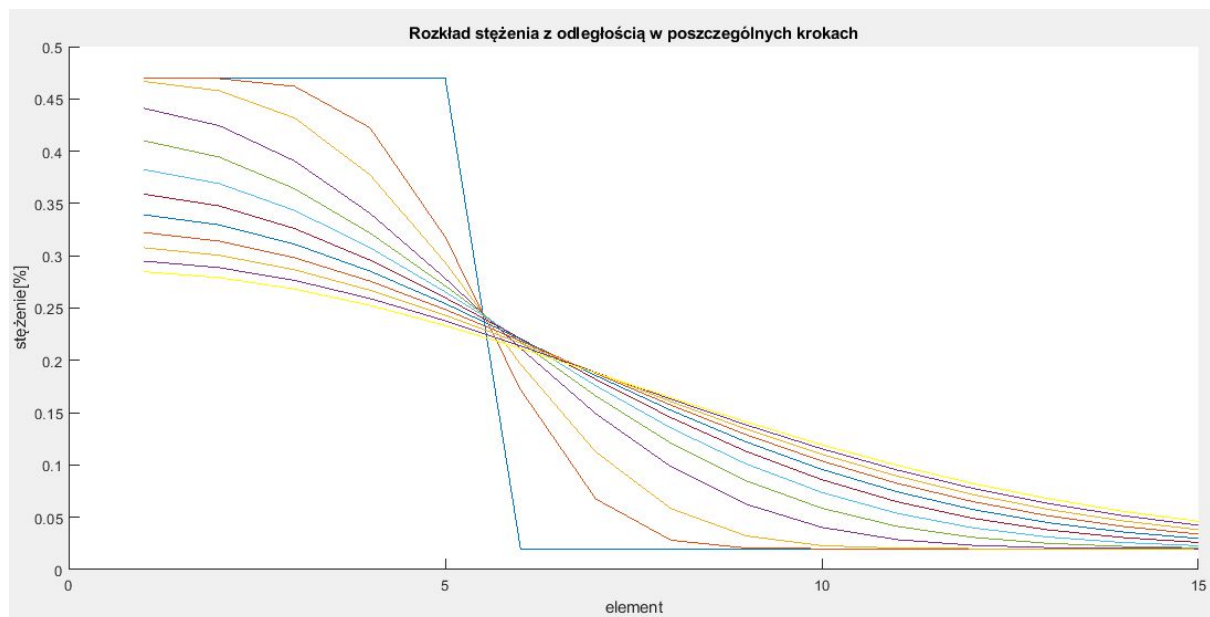
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T = 780\text{ }^{\circ}\text{C}$, Prędkość nagrzewania $dt: 3\text{ }[^{\circ}\text{C} / \text{s}]$



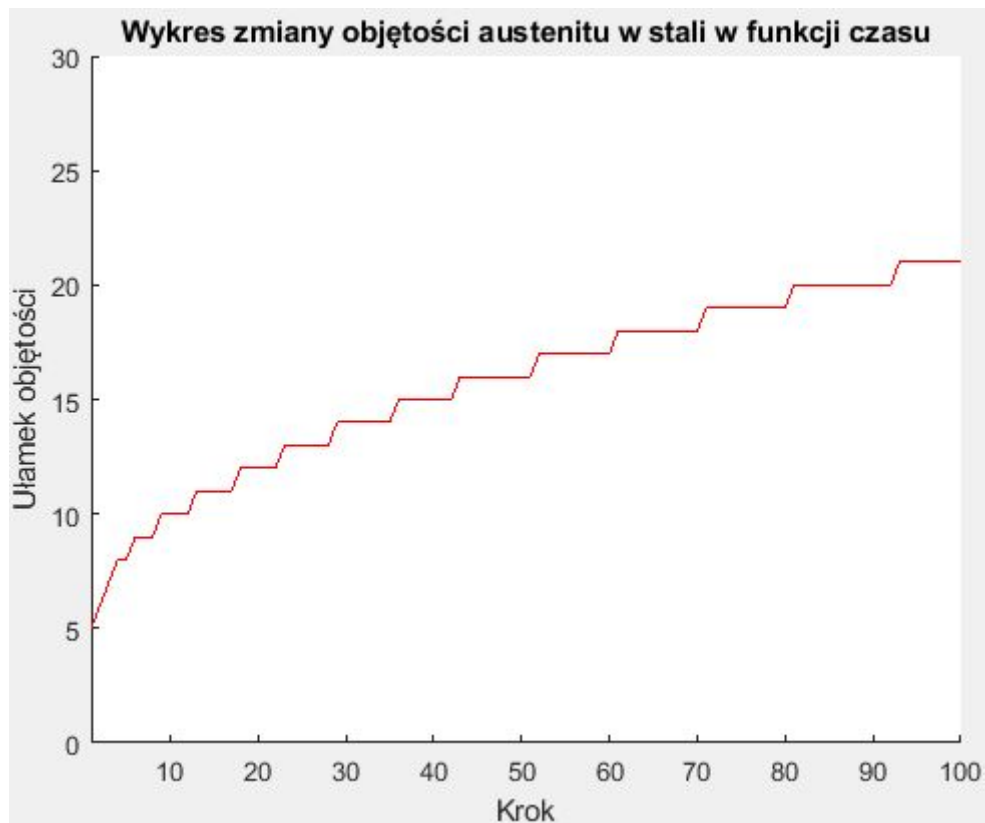
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 780^{\circ}\text{C}$, $dt = 3 [^{\circ}\text{C/s}]$



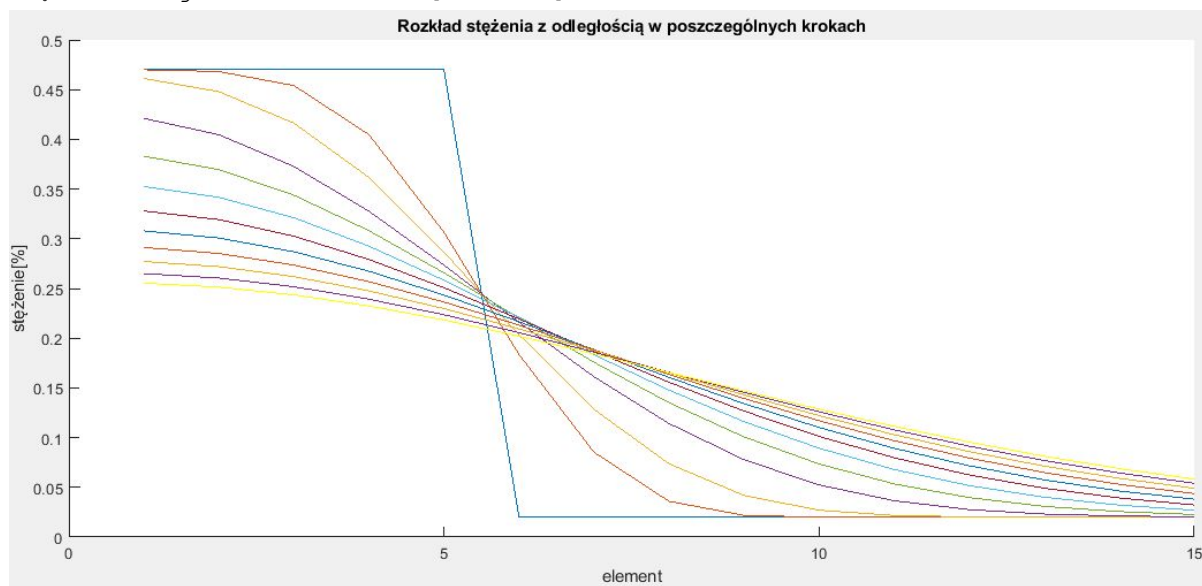
Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T = 800^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt = 3 [^{\circ}\text{C/s}]$



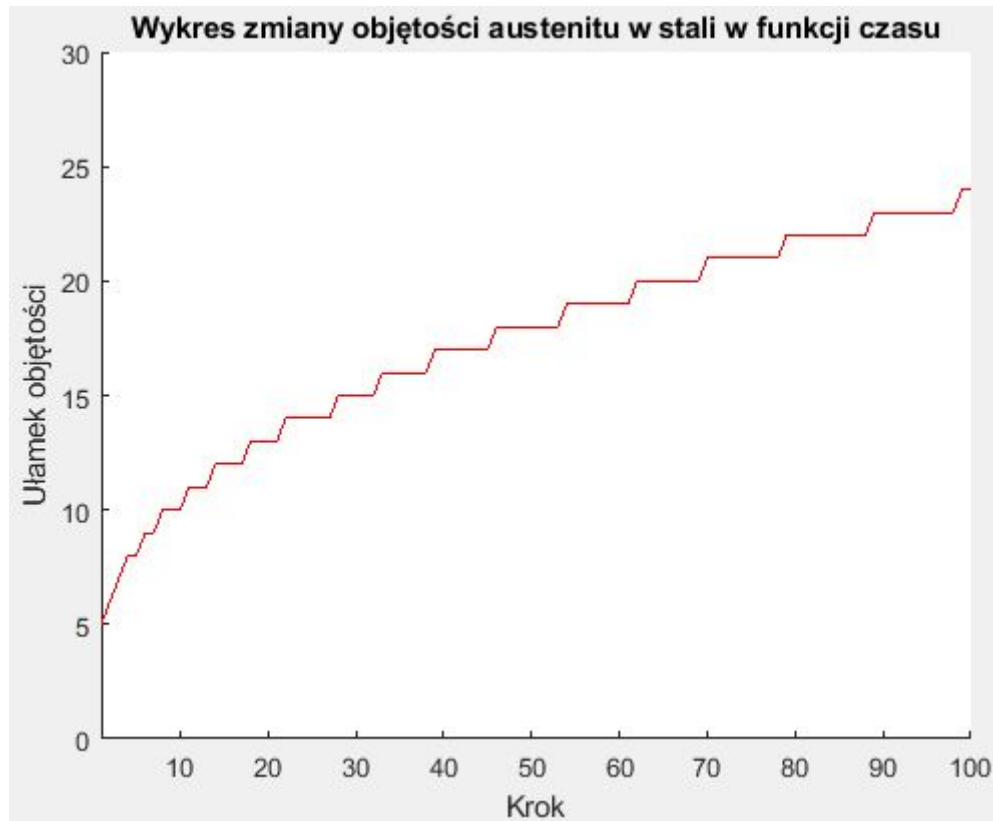
Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 3\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



Rozkład stężenia z odległością w poszczególnych krokach czasowych, $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$,
Prędkość nagrzewania $dt: 3\text{ }[^{\circ}\text{C} / \text{s}]$



Zmiana ułamka objętości austenitu z czasem, $T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, $dt = 3\text{ }[^{\circ}\text{C/s}]$



- **Wnioski**

1. W celu wyznaczenia wykresu zmiany objętości austenitu od czasu wykorzystuję sprawdzenie prostego warunku. Jeżeli stężenie węgla $> 2,18\%C$ to jest to austenit, w przeciwnym razie -ferryt (Poniżej zastosowane w Kodzie)

```
if C(1,j) > 0.0218  
austenit(i) = austenit(i)+1;
```

2. Wszystkie wytyczne projektu zostały pomyślnie zrealizowane a symulacja przemiany ferrytu w austenit przyniosło satysfakcjonujące wyniki. Rezultaty jakie uzyskane zostały w zależności od prędkości nagrzewania są do siebie zbliżone. W każdym z wykresów ułamka objętości ferrytu i austenitu można zaobserwować proporcjonalny spadek ułamka objętości ferrytu wraz z postępującym krokiem, natomiast w przypadku austenitu sytuacja jest odwrotna. Następuje stopniowe zwiększanie ułamka. Skok o którym mowa jest tym większy i rozmieszczony z większą częstotliwością im temperatura i prędkość nagrzewania są większe.

3. Lepsze wyniki uzyskano podczas przeprowadzania symulacji dla nagrzewania stali. Wzrost prędkości nagrzewania wpływa znacząco na uzyskane wyniki. Większa prędkość zwiększa zarówno obszar dyfuzji jak również udział austenitu w stali. Proces przebiega także zdecydowanie szybciej. Przy niższych prędkościach nagrzewania można jednak uzyskać dokładniejszą objętość przemiany.
4. Symulacja dla stali w stałej temperaturze pokazuje podobną zależność. Im wyższa temperatura stali, tym dyfuzja zachodzi szybciej oraz głębiej. A także udział austenitu nieznacznie się zwiększa.
5. Poddając obróbce stal (chcąc osiągnąć określone dla niej własności) warto znać czynniki, mające wpływ na zmianę parametrów tego surowca, ponieważ skład i struktura stali ma ogromny wpływ na jej własności mechaniczne, a wiedza ta pozwoli zwiększyć jej użyteczność.