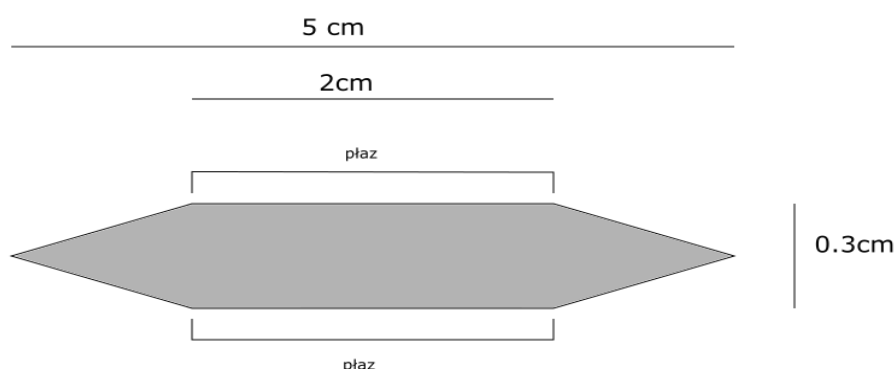


Obróbka cieplna głowni dwustronnej z płazem

Część 1. Teoria

Dzięki praktycznemu użyciu metody elementów skończonych w formie programu symulacyjnego można między innymi przewidzieć przebieg procesów obróbki cieplnej metali oraz ich stopów. Badaniu symulacyjnemu poddano głownię dwustronnego ostrza o szerokości 5 cm, na środku której znajduje się dwustronny płaz o szerokości 2 cm. Grubość ostrza w płazie wynosi 0.3 cm. Dokładne wymiary przedstawia rysunek poglądowy:



Przekrój głowni dwustronnej z płazem

Ostrze zostało wykonane ze stali stopowej CPM ® 3V ®, która dzięki wysokiej zawartości chromu (7.5%) oraz wanadu (2.75%) posiada wysoką twardość, przy jednoczesnym zachowaniu odporności na ścieranie. Dzięki tym właściwościom, stal często używana jest do wykonywania replik broni białej różnego typu, w tym także głowni dwustronnych z płazem. Odpowiednie właściwości fizyczne tego materiału użyte w obliczeniach, znajdują się w danych technicznych podawanych przez Crucible Industries^{1 2} czy Crucible Service Center³. Wartość współczynnika konwekcyjnego przyjmowania ciepła przybliżono za pomocą tabeli transferu ciepła pomiędzy ośrodkami technicznymi, w tym wypadku dla wymiany ciepła stali z powietrzem⁴.

1 <https://www.crucible.com/eselector/prodbyapp/tooldie/cpm3vt.html>

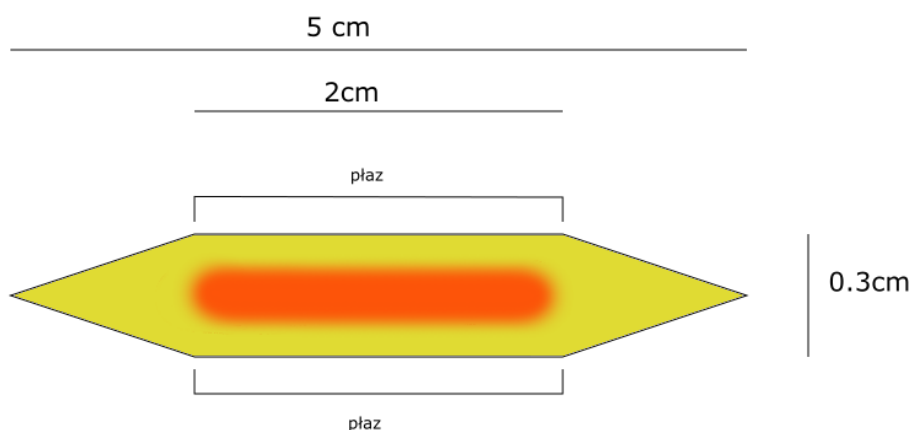
2 https://www.carttech.com/globalassets/datasheet-pdfs/cpm_3v.pdf

3 <https://www.alphaknifesupply.com/Pictures/Info/Steel/CPM3V-DS.pdf>

4 https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html

Tabele danych technicznych⁵ przewidują kilka rodzajów obróbki cieplnej, jednak dla przeprowadzanej symulacji wybrano trzy procesy mające na celu zwiększyć twardość:

1. Podgrzewanie – w ramach przygotowanie do hartowania zalecane jest rozgrzać stal CPM ® 3V ® do temperatury 815-845 stopni Celsjusza i wyrównać temperaturę wewnątrz całego nagrzewanego materiału. W tej części problem polega na znalezieniu czasu potrzebnego do uzyskania minimalnej temperatury 815 stopni Celsjusza we wszystkich węzłach siatki MES.
2. Austenitizowanie – aby dla danej stali uzyskać strukturę austenityczną należy rozgrzać ją od początkowej temperatury podgrzewania tj. 815 stopni Celsjusza do temperatury pomiędzy 1025 a 1120 stopni Celsjusza. Jednak aby głownia mogła być prawidłowo używana bez narażenia na uszkodzenia, nie należy utwardzać całego materiału; zewnętrzne krawędzie powinny być twardsze, natomiast rdzeń powinien być elastyczny. Poszukiwany jest więc czas nagrzania węzłów zewnętrznych elementów siatki MES do temperatury co najmniej 1025 stopni, zachowując wewnętrzne węzły siatki poniżej tej temperatury. Przybliżony rozkład temperatur przedstawia poniższy rysunek, gdzie czerwony kolor przedstawia niższą temperaturę, natomiast żółty temperaturę austenitizowania:

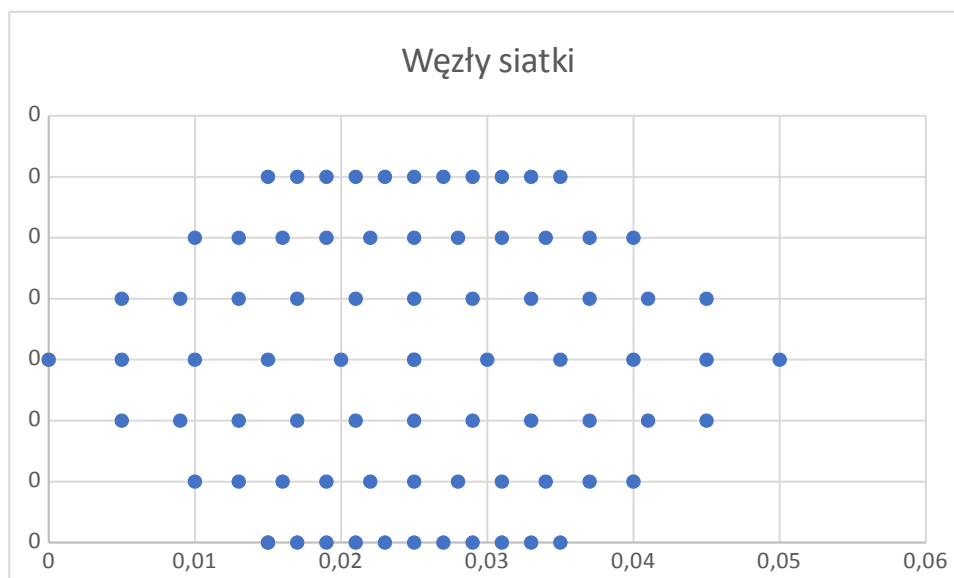


Wizualizacja hartowania głowni dwustronnej

3. Odpuszczanie – dla zmniejszenia naprężeń wewnątrz obiektu, należy przeprowadzić proces odpuszczania, polegający na trzykrotnym rozgrzaniu materiału 550 stopni Celsjusza. Symulacja powinna znaleźć czas jednorazowego nagrzewania głowni do tej temperatury.

⁵ <https://www.alphaknifesupply.com/Pictures/Info/Steel/CPM3V-DS.pdf>

Do odpowiedniego działania symulacji potrzebna jest także odpowiednia siatka MES. Z racji nieproporcjonalności obiektu, w którego przekroju jeden wymiar jest o rząd wielkości większy, starano się dopasować siatkę. Przyjęto siatkę o wymiarach 6x10 czworobocznych elementów. Rozkład węzłów został przedstawiony na wykresie poniżej; podane wielkości wyrażone są w metrach:



Kolorami oznaczono węzły przedstawione na późniejszych wykresach:

Pomarańczowy – węzeł nr 0 (lewy dolny)

Żółty – węzeł nr 3 (skrajnie lewy)

Szary – węzeł nr 38 (środkowy)

Dzięki takiemu rozmieszczeniu można porównać temperaturę nagrzewania dla różnych części główni.

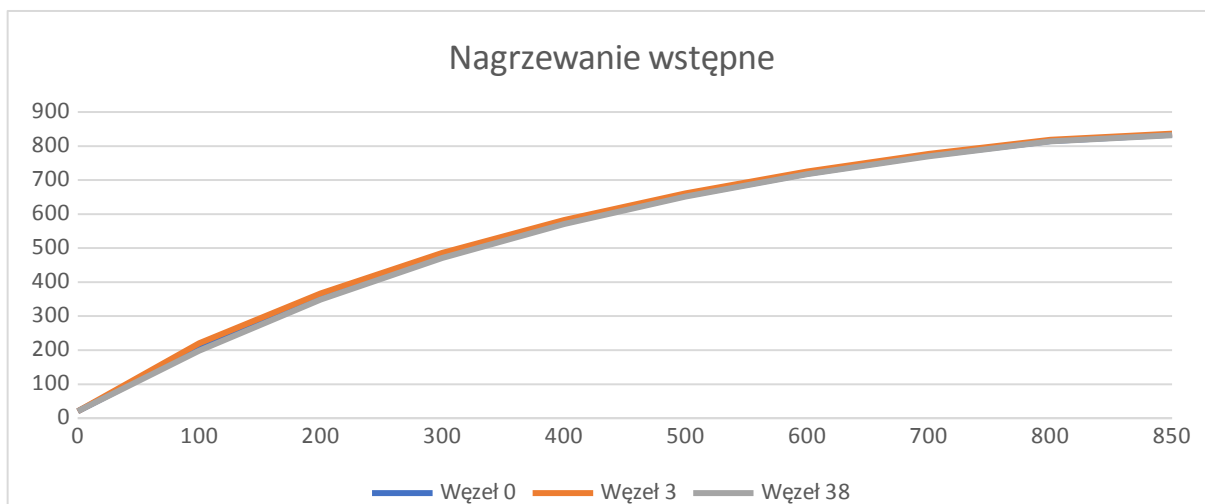
Część 2. Wyniki

Symulacja, oprócz wartości fizycznych materiału i otoczenia, posiada także czas jednego kroku obliczeń ustalony na 10 sekund.

2.1 Rozgrzewanie

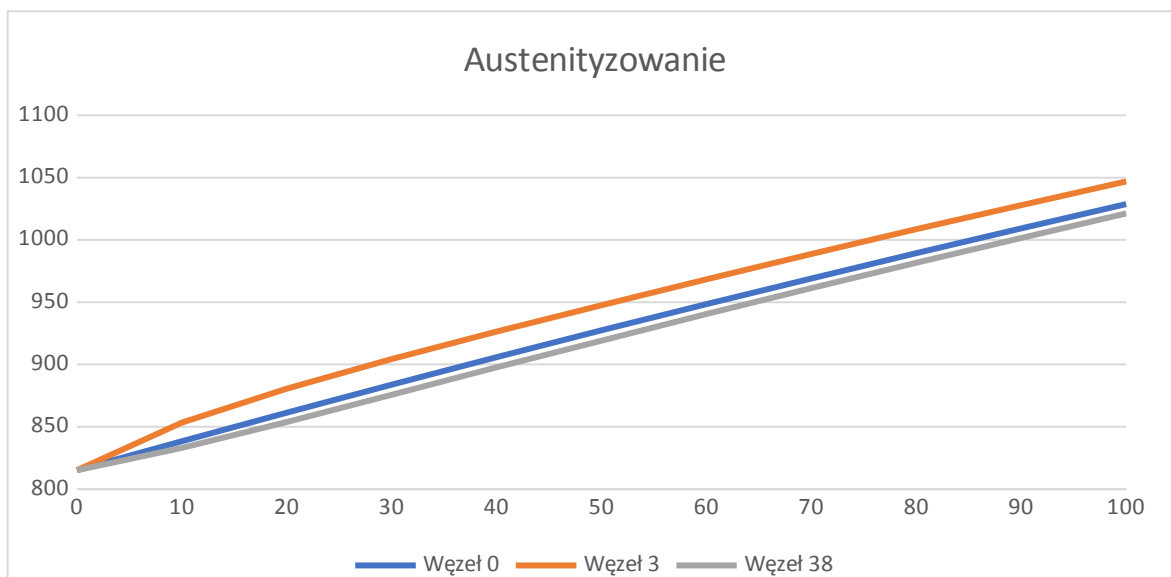
Aby poprawnie przeprowadzić symulację rozgrzewania wstępnego, prócz współczynników fizycznych stali oraz wymiany konwekcyjnej, należy dobrać odpowiednie warunki otoczenia. Logicznie założono że przechowywany w temperaturze pokojowej materiał będzie miał początkową temperaturę ok 20 stopni Celsjusza, natomiast temperatura pieca powinna być wyższa niż docelowa, dlatego założono że piec nagrany jest do tysiąca stopni. Analizując kolejne otrzymywane wektory temperatur, zauważono że odpowiednią temperaturę głównia uzyskała po 81 iteracjach, co odpowiada 810 sekundom lub 13 minutom i 30 sekundom. Ciągłe przetrzymywanie w piecu o wyższej temperaturze spowodowałoby

dalszy wzrost temperatury, więc uznano że po tym czasie można przenieść głównię do kolejnego pieca, aby przeprowadzić dalsze kroki.



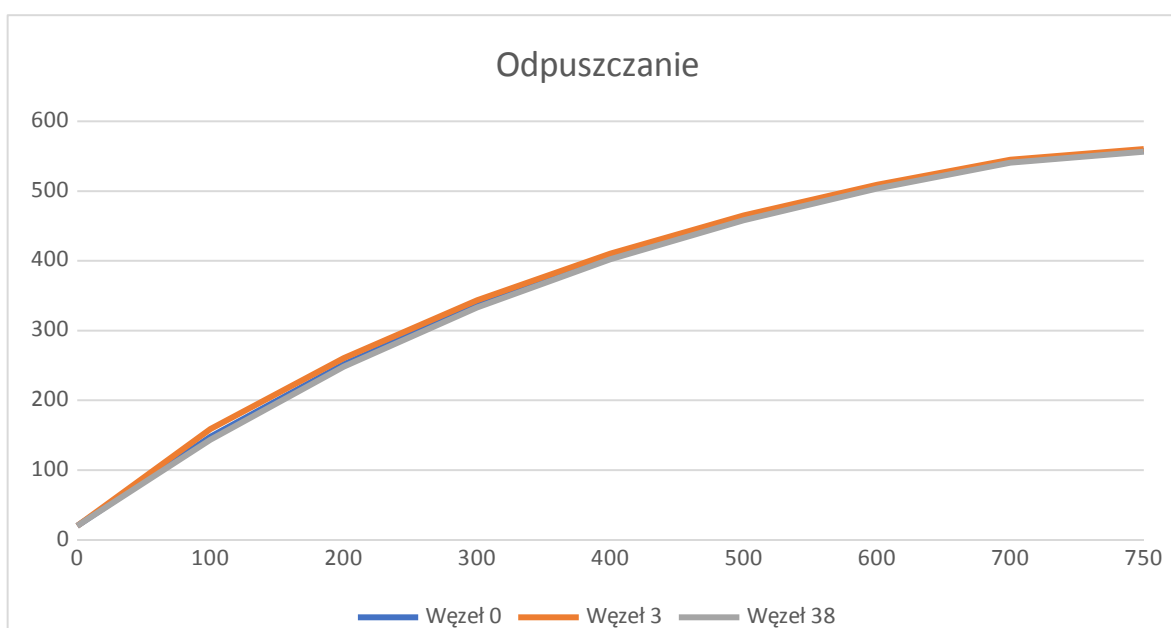
2.2 Austenityzowanie

Po wstępnym nagrzaniu główki, kolejnym krokiem jest rozgrzanie zewnętrznej części, jednocześnie nie rozgrzewając rdzenia. Za rdzeń przyjęto węzły elementów 21,22,27,28,33,34,39,40, rozpoczynając numerację od 1. Aby osiągnąć taki efekt, należy wprowadzić obiekt do pieca nagrzanego do o wiele wyższej temperatury niż docelowa. Dla główki uprzednio rozgrzanej do 815 stopni Celsjusza założono temperaturę pieca równą 1950 stopni. Nagrzanie zewnętrznej części, nie przegrzewając rdzenia należy prowadzić bardzo uważnie, o czym świadczy wynik programu, który w 9 iteracji podał wektor temperatur nie spełniający założeń, w 10 iteracji podał wektor odpowiedni, natomiast w 11 zasygnalizował przegrzanie rdzenia. Oznacza to że dla zadanych warunków, głównię należy przetrzymać w piecu dokładnie 100 sekund.



2.3 Odpuszczanie

Odpuszczanie główki ze stali CPM ® 3V ® polega na trzykrotnym nagrzaniu do 550 stopni Celsjusza i schłodzeniu materiału. Zadaniem obliczeniowym w tym przypadku jest znalezienie czasu nagrzewania. Dla założonej temperatury pieca równej 700 stopni czas nagrzewania od temperatury pokojowej wynosi 730 sekund. Podczas powtarzania procesu warunki nie zmieniają się, więc każdorazowe nagrzewanie od wyjściowej temperatury 20 stopni będzie wynosiło 12 minut i 10 sekund.



Część 3. Wnioski

Analizując wyniki otrzymane przez symulacje MES, widać wyraźnie że dla przygotowanej siatki, bardzo łatwo nagrzać wewnętrzne elementy. Największy wpływ na takie zachowanie ma prawdopodobnie kształt głowni: duża szerokość w porównaniu do grubości pozwala o wiele szybciej nagrzać rdzeń. Łatwość nagrzewania sprawia, że chcąc uzyskać specyficzne parametry, czyli np. uzyskać pewną temperaturę tylko w części węzłów, cały proces musi być bardzo dokładnie kontrolowany.

Posiadając wiedzę o programie rozwiązującym układ MES, można go bez problemu dostosowywać kod źródłowy do obliczania zadanych parametrów, bez potrzeby liczenia iteracji przekraczających spełnienie warunków. Dzięki temu można przyspieszyć czas obliczeń, skupiając się na poszukiwanych przez nas danych.