

Symulacja numeryczna obróbki cieplnej odlewu ze staliwa i jej weryfikacja doświadczalna

Szymon Żołyńia¹, Sebastian Sobuła² 

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Koło Naukowe ZGAREK, Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, Kraków

Streszczenie: Zagadnienie technologii obróbki cieplnej staliwa z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi symulacyjnych ma istotne znaczenie dla współczesnego inżyniera. Zasadniczym celem pracy była weryfikacja doświadczalna wyników symulacji obróbki cieplnej staliwa węglowego L500-II. Zgodnie z założeniem przeprowadzono symulację komputerową procesu hartowania z wykorzystaniem oprogramowania Visual-Weld (Sysweld). Równolegle wykonano badania doświadczalne, w czasie których zarejestrowano krzywe chłodzenia. Po hartowaniu przeprowadzonym w wodzie badano rozkład twardości na przekroju próbki, a także mikrostrukturę w wybranych obszarach z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego oraz oprogramowania ImageJ. Weryfikację wyników symulacji komputerowej wykonano, zestawiając ze sobą dane, takie jak rozkład temperatury w próbce podczas chłodzenia, rozkład twardości oraz udział składników fazowych. Wykazano, że wyniki z przeprowadzonej symulacji numerycznej odbiegają od uzyskanych w doświadczeniu, szczególnie w obszarze blisko powierzchni stygnięcia.

Słowa kluczowe: obróbka cieplna, symulacja numeryczna, staliwo, Visual-Weld, Sysweld

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TREATMENT OF STEEL CASTING AND ITS EXPERIMENTAL VALIDATION

Abstract: The problem of the heat treatment technology of cast steel with use of modern simulation tools is important to the today's engineer. The main purpose of thesis was experimental verification of the numerical simulation results of L500-II carbon cast steel heat treatment. In accordance to the assumption, a computer simulation of the heat treatment process was carried out using the Visual-Weld (Sysweld) software. Experimental tests, during which the cooling curves were recorded, were carried out simultaneously. After conducted quenching in water, the hardness distribution on the cross-section of the sample was examined, as well as the microstructure in selected areas, using a light microscope and ImageJ software. It was shown, that the results of the numerical simulation are different from those obtained in the experiment.

Keywords: heat treatment, numerical simulation, cast steel, Visual-Weld, Sysweld

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-74-6_9

1. Wprowadzenie

W celu zapewnienia wyrobom stalowym wytrzymałości oraz odporności na czynniki środowiskowe niezbędne jest poddanie ich obróbce cieplnej. Pozwala ona zmaksymalizować korzystne właściwości materiału, co umożliwia m.in. redukcję gabarytów odlewu przy zachowaniu dobrych parametrów technicznych, ponieważ odlewy ze staliwa charakteryzują się bardzo niekorzystną, gruboziarnistą strukturą oraz naprężeniami odlewniczymi w stanie lanym (Głownia 2002). Obróbka cieplna jest definiowana jako odpowiednio dobrane zabiegi cieplne prowadzące do zmiany własności stopu przez zmiany struktury wywołane przemianami fazowymi zachodzącymi w stanie stałym (Adrian 2011). Rosnące wymagania odbiorców wyrobów przy jednoczesnym dążeniu do redukcji kosztów skłaniają technologów do poszukiwania metod optymalizacji procesu produkcyjnego. Nieocenioną pomocą w tym zakresie są programy inżynierskie pozwalające wykonać symulację, która umożliwia ocenę oraz doskonalenie wdrażanych rozwiązań z pominięciem czasochłonnych i kosztowanych badań empirycznych. Zagadnienie symulacji numerycznej procesów przemysłowych jest poruszane w wielu publikacjach naukowych. W branży przetwórstwa metali popularne są programy symulujące procesy odlewania, krystalizacji i stygnięcia metalu w formach (Magma, Procast, Flow-3D, NovaFlow&Solid, QuickCAST, AnyCasting), programy symulujące procesy spajania i obróbki cieplnej (Sysweld, Simufact Welding) i inne, np. Ansys, Abaqus, które również mogą symulować procesy łączenia, ale na podstawie modułu cieplno-mechanicznego, nieuwzględniającego naprężenia powstającego podczas przemian fazowych w stanie stałym. W niniejszym opracowaniu do przeprowadzenia obliczeń numerycznych procesu obróbki cieplnej wykorzystano kompleksowe środowisko symulacyjne ESI Visual-Weld (dawniej Sysweld).

2. Charakterystyka środowiska Visual-Weld

Dziejąca się na naszych oczach czwarta rewolucja przemysłowa jeszcze mocniej integruje procesy produkcyjne z oprogramowaniem inżynierskim, które już teraz odgrywa kluczową rolę we wszystkich obszarach działalności produkcyjnej, konstrukcyjnej i technologicznej. Algorytmy komputerowe w znaczący sposób ułatwiają wszelkie procesy, pozwalają zaoszczędzić czas i zasoby. W oprogramowaniu inżynierskim, w zależności od przeznaczenia, można wyróżnić trzy główne grupy (Stanisławski 2008); są to programy do komputerowego:

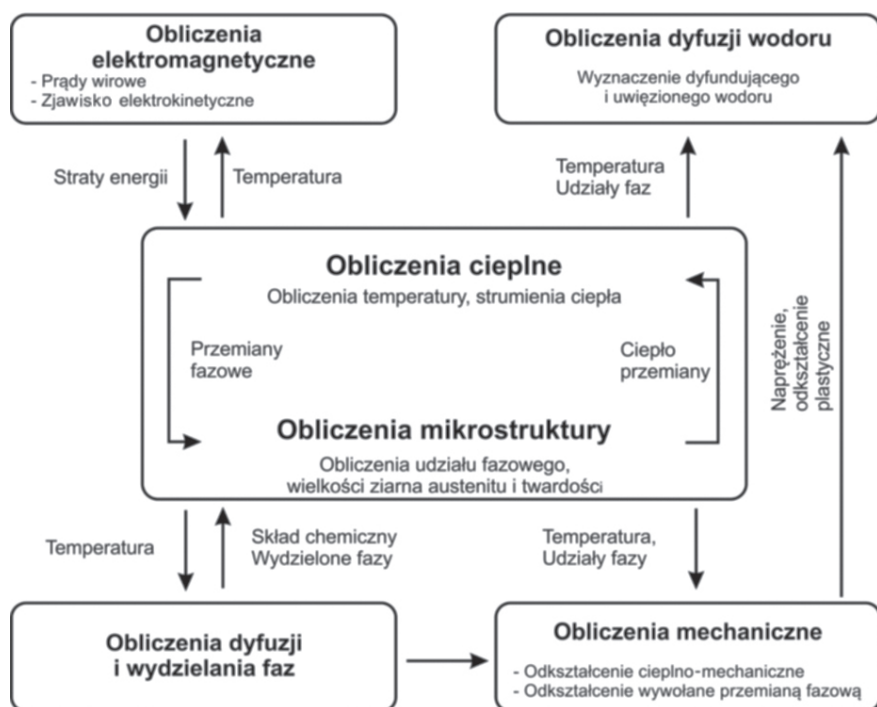
- projektowania (*computer-aided design*, CAD),
- wytwarzania (*computer-aided manufacturing*, CAM),
- analizowania i obliczeń inżynierskich (*computer-aided engineering*, CAE).

Jednym z takich programów jest Sysweld będący częścią większego pakietu narzędzi inżynierskich Visual-Weld grupy Engineering Systems International (ESI). Oprogramo-

wanie zostało stworzone jako specyficzne, zaawansowane narzędzie służące do analizy numerycznej procesów spawania oraz obróbki cieplnej (Kik i in. 2020).

Program ma budowę wielopoziomową, tzn. wyniki obliczeń przekazywane są do kolejnych modułów i służą jako dane wejściowe do dalszych obliczeń. Na rysunku 1 przedstawiono generalną architekturę i schemat działania programu Sysweld (Pont i Guichard 1995, ESI Group 2017). Symulacja jest prowadzona w następujących krokach:

1. obliczenia cieplne i przemian w stanie stałym (mikrostruktury), w których identyfikuje się występujące przemiany na podstawie zmiany temperatury i wyznacza udział fazowy w odniesieniu do czasu i przestrzeni, a jeśli występuje proces nagrzewania, np. indukcyjnego, dane zmian temperatury przekazywane są do modułu obliczeń elektromagnetycznych i po przetworzeniu odbierane z powrotem;
2. obliczenia mechaniczne, w których wyznaczane jest naprężenie i odkształcenie, powstałe w wyniku różnicy temperatury, a także przemian fazowych;
3. obliczenia dyfuzji pierwiastków i wydzielania faz, w których wyznaczane są składniki mikrostruktury powstające w założonym przedziale temperatury i czasu;
4. obliczenia dyfuzji wodoru (spawanie), które łączą wpływ temperatury, naprężenia, a także defektów i przewidują miejsca, w których gromadzi się wodor.



Rys. 1. Struktura i schemat procedury obliczeń w programie Sysweld

Źródło: opracowanie własne na podstawie Pont i Guichard (1995), ESI Group (2017)

Wyznaczenie przemian fazowych w warunkach nieustalonego przepływu ciepła, który występuje w procesach spawania i obróbki cieplnej, jest zagadnieniem złożonym i niezbędnym do prawidłowej oceny właściwości obrabianych przedmiotów. Właściwości cieplne i fizyczne poszczególnych faz w stopach oraz ich wzajemne przemiany istotnie wpływają na stan naprężenia, dlatego główny moduł programu, obliczeń cieplnych i mikrostrukturalnych, realizuje trzy typy zadań:

- 1) wyznacza przemiany zgodnie z kierunkiem zmian temperatury w czasie,
- 2) w zależności od występujących przemian modyfikuje pole temperatury, uwzględniając wpływ ciepła przemiany,
- 3) wyznacza właściwości cieplne i fizyczne (np. współczynnik przewodzenia ciepła) na podstawie aktualnych udziałów objętościowych faz.

Obliczenia cieplne bazują na rozwiązaniu równania przewodzenia ciepła Fouriera (1) dla nieustalonego przepływu ciepła (Lee 2018), za pomocą metody elementów skończonych (MES):

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_V \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho \cdot c$ – objętościowe ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$],
- T – temperatura [K],
- t – czas [s],
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],
- Q_V – objętościowa szybkość wydzielania ciepła [W/m^3].

Należy pamiętać, że w równaniu (1) objętościowe ciepło właściwe zmienia się z temperaturą, a Q_V ujemne ciepło wydzielające się podczas przemian fazowych w czasie chłodzenia.

Do obliczenia właściwości termofizycznych w zakresie wielofazowym autorzy programu zastosowali regułę mieszanin. Oznacza to, że dana właściwość mieszaniny faz jest wyznaczana jako suma tej właściwości w poszczególnych fazach. W ten sposób są wyznaczone gęstość, ciepło właściwe i inne niezbędne parametry termofizyczne. Udziały (proporcje) faz powstających podczas przemian w stanie stałym wyznaczone są metodą zaproponowaną przez Leblonda i Devaux (1984).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = c_L (X_{\text{eq}}(T) - X) \quad (2)$$

gdzie:

- X_{eq} – równowagowy udział fazy w funkcji temperatury,
- c_L – stała empiryczna przyjmująca wartości dodatnie, wyznaczona na podstawie czasu trwałości fazy w danej temperaturze,
- X – udział fazy.

Kinetyka wydzielania faz w procesach dyfuzyjnych wyznaczana jest na podstawie układów czas – temperatura – przemiana (CTT) z uwzględnieniem modelu JMAK (Johson–Mehl–Avrami–Kołmogorow).

$$X_F = 1 - e^{-(K \cdot t)^n} \quad (3)$$

gdzie:

X_F – udział fazy,

K – stała zależna od temperatury,

n – stała materiałowa (zwykle bliska jedności).

Ponadto program wyznacza udziały martenzytu na podstawie równania podanego przez Koistinena i Marburgera (1959).

$$X_M(T) = 1 - e^{-b(M_s - T)} \quad (4)$$

gdzie:

b – parametr materiałowy (bliski 0,011) (Babu 2014, Bhadeshia 2014),

X_M – udział martenzytu,

M_s – temperatura martenzytu start [K].

Obliczenia mechaniczne również są realizowane za pomocą MES, a dane wejściowe są pobierane z modułu obliczeń cieplnych i mikrostrukturalnych. Aby uprościć, w module tym przyjęto, że naprężenia nie wpływają na temperaturę i udziały składników fazowych. Przemiany w stanie stałym mają znaczący wpływ na generowane naprężenia ze względu na istotne zmiany w objętości poszczególnych faz, a także na fakt, że w jednostce czasu może istnieć wiele faz (Pont 1995).

Model dyfuzji bazuje na drugim prawie Ficka. Ponieważ jest wykorzystywany głównie w procesach obróbki cieplno-chemicznej, jego działanie nie zostanie szerzej opisane.

Program Visual-Weld, jako nowoczesne narzędzie służące do analizy numerycznej procesów spawania i obróbki cieplnej, pomaga rozwiązywać problemy dotyczące analizy nieliniowej przewodzenia ciepła w każdej przestrzeni, geometrii nieliniowej odkształceń, izotropowego i kinematycznego umocnienia materiału oraz przemian fazowych itp. (Kik i in. 2020). Wielopoziomowa struktura obejmuje następujące podprogramy (Swacha i in. 2021):

- Visual-Mesh – preprocesor pozwalający na tworzenie elementów (1D, 2D, 3D) oraz generowanie siatki,
- Visual-Weld – program wykorzystywany do modelowania procesów spawania,
- Visual-Heat Treatment – program wykorzystywany do modelowania procesów obróbki cieplnej,
- Sysweld Solvers – program zawierający zespół funkcji numerycznych realizujących właściwe obliczenia,
- Visual-Viewer – postprocesor pozwalający na analizę wyników.

Dla uzyskania wyników jak najbardziej odzwierciedlających rzeczywiste procesy kluczowe jest odpowiednie przygotowanie danych wejściowych, w tym parametrów materiałowych, którymi dysponuje program. Najczęściej właściwości mechaniczne są obliczane z wykorzystaniem algorytmów uwzględniających udziały poszczególnych faz oraz temperatury. Oprócz danych cieplno-mechanicznych, wśród których należałoby wyróżnić m.in. współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość, moduł Younga, równie istotne są dane metalurgiczne. Uwzględnienie przemian fazowych oraz ich kinetyki ma znaczący wpływ na informacje zwrotne otrzymywane na etapie analizy cieplnej i strukturalnej oraz wynikającej z niej analizy mechanicznej (Kik i in. 2020).

Sysweld umożliwia symulację różnych zabiegów obróbki cieplnej, m.in. hartowania, odpuszczania, wyżarzania, nawęglania i azotowania (Swacha i in. 2021). W myśl zasady, że jakość wyników może być co najwyżej tak dobra jak jakość zadanych parametrów wejściowych, można stwierdzić, że decydujący wpływ ma poprawne określenie warunków początkowych, w tym utworzenie odpowiednio dopasowanej siatki powierzchniowej 2D oraz objętościowej 3D. Visual-Weld pozwala generować siatkę w układzie *quad* (sześciennym), *tria* (tetragonalnym) oraz *quad-tria* (mieszanym), co w połączeniu z funkcją lokalnego zagęszczania znacząco usprawnia obliczenia, a także korzystnie wpływa na dokładność wyników. Niewątpliwym atutem programu firmy ESI są rozbudowane bazy materiałowe, które są ciągle wzbogacane o kolejne pozycje, ale też mają możliwość samodzielnego aktualizowania. Wymienione atuty aplikacji Sysweld czynią z niej czołowe rozwiązanie w zakresie symulacji obróbki cieplnej oraz procesów spawania (Swacha i in. 2021).

3. Modelowanie procesów spawania i obróbki cieplnej z wykorzystaniem środowiska Visual-Weld

Analiza źródeł literaturowych wskazuje na popularność narzędzi do symulacji procesów spawania i obróbki cieplnej. Wielu autorów wykorzystuje własne programy, ale często bazują one na komercyjnych aplikacjach (środowiskach) wymienionych we wprowadzeniu. Środowisko Visual-Weld znajduje zastosowanie do symulacji pola temperatury, stanu naprężenia, a także obróbki cieplnej – przewidywania udziału faz i twardości obrabianych przedmiotów.

Tak na przykład oprogramowanie inżynierskie wykorzystane zostało do weryfikacji wyników symulacji spoiny wykonanej metodą GTA (spawania łukowego elektrodą wolframową) na stali P91 przez Zubairuddina i in. (2023). W pracy porównano ze sobą wyniki symulacji z programów Sysweld oraz FlexPDE, przy szybkości spawania wynoszącej 1,6 mm/s, sprawności 75% oraz całkowitym dopływie ciepła 424 J/s. Autorzy wykazali, że analiza spoiny przy użyciu modelu podwójnej elipsoidy wykazuje dobrą zgodność

z profilem eksperymentalnym, ponieważ błąd wyników symulacji wyniósł kolejno 7% dla Sysweld oraz 14% dla FlexPDE.

Oprogramowanie może być wykorzystywane do projektowania nowych technik wytwarzania. Tak na przykład Lu i in. (2014) zaproponowali wykorzystanie programu Sysweld do symulacji pola naprężeń powstających podczas napawania powierzchni wielkogabarytowej matrycy do kucia, wykonanej ze staliwa niskostopowego.

Zagadnienie modelowania obróbki cieplnej ma istotne znaczenie w pracy współczesnego inżyniera. Ze względu na moc obliczeniową obecnych komputerów proces ten jest relatywnie szybki i może być stosowany już na etapie planowania produkcji.

W pracach Ryzhkova i in. (2015, 2018) przedstawiono wyniki symulacji hartowania na powietrzu i w oleju stali Mn-Si-Ni-Mo wykonanej z zastosowaniem programu Sysweld, a także wyniki uzyskane na komercyjnej linii produkcyjnej. Autorzy wykazali dobrą zgodność wyników doświadczalnych z symulacją dzięki aktualizacji danych termofizycznych, które pozyskali, przeprowadzając dodatkowe badania.

W pracy Kika i in. (2015) przedstawiono symulację procesu obróbki cieplnej stali 10GN2MFA z wykorzystaniem pakietu Visual-Weld. Badania hartowania i normalizowania prowadzono na prostopadłościanach o wymiarach 50 mm × 40 mm × 20 mm. Wykazano dobrą zbieżność wyników symulacji twardości na przekroju z wynikami hartowania w oleju i normalizowania. Wyniki doświadczalnego badania twardości próbek hartowanych w wodzie charakteryzowały się dużą rozbieżnością w porównaniu z wynikami symulacji.

Oprócz klasycznej obróbki cieplnej rozwijane są także niekonwencjonalne sposoby prowadzenia tego procesu. Nieszablonowe podejście do obróbki cieplnej stali węglowej, polegające na wykorzystaniu wiązki lasera, zaprezentował Evdokimov i in. (2022). W swej pracy badacze przeprowadzili symulację procesu spawania stali C45 z zastosowaniem autorskiego algorytmu numerycznego źródła ciepła, opartego na metodzie elementów skończonych. Zaproponowany algorytm pozwolił wyznaczyć natężenie promieniowania świetlnego na powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji parametrów wiązki lasera. Wykazano, że oprogramowanie *open source* FEniCSx może być używane do laserowej obróbki cieplnej, jeśli w obliczeniach wykorzysta się odpowiednie równanie nieustalonego przepływu ciepła w funkcji czasu.

Symulacja procesów obróbki cieplnej pozwala przewidzieć mikrostrukturę i właściwości obrabianych przedmiotów stalowych. W przypadku odlewów należy pamiętać, że w zależności od grubości ścianki mają inną mikrostrukturę (wielkość ziarna, udział składników fazowych), dlatego symulacja może nie odzwierciedlać ich rzeczywistych właściwości. Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy skuteczność omawianego oprogramowania została wykazana głównie w kontekście spawania, a także w znacznie bardziej ograniczonym zakresie w odniesieniu do modułu obróbki cieplnej stali. Badania symulacji obróbki cieplnej odlewanych stopów żelaza (staliwa) nie są publikowane. Z tego powodu oraz ze względu na fakt, że symulacja obróbki cieplnej może mieć realny wpływ na ekonomikę

w przemyśle odlewniczym, postanowiono rozwinąć obszar wiedzy związany z obróbką cieplną staliwa. Przeprowadzono doświadczalną weryfikację wyników symulacji procesu na próbce wyciętej z odlewu staliwnego (gatunek L500II / 270-480), która została poddana hartowaniu zwykłemu w wodzie. Porównano ze sobą dane uzyskane doświadczalnie z otrzymanymi w symulacji.

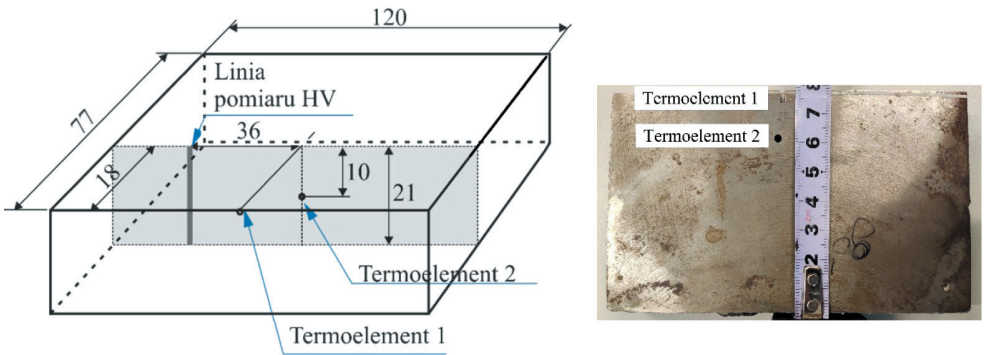
4. Metodyka

Do badań własnych wykorzystano próbkę o kształcie płyty wyciętej z wlewka ze staliwa L500-II. Symulację numeryczną przeprowadzono, przyjmując geometrię identyczną jak geometria próbki poddanej badaniom doświadczalnym. Ze względu na brak w bazie danych programu staliwa przewidzianego do badań do symulacji wybrano stal CF35 o zbliżonym składzie chemicznym (tab. 1).

Tabela 1
Skład chemiczny staliwa L500-II i stali CF35 [% mas.]

Stop	C	Si	Mn	P	S	Ti	Fe
L500-II	0,32	0,48	0,85	0,015	0,011	0,065	reszta
CF35	0,33–0,39	0,15–0,35	0,50–0,80	<0,025	<0,035	–	reszta

Za materiał do badań doświadczalnych posłużyła próbka o wymiarach 120 mm × 77 mm × 21 mm (rys. 2), wycięta z prostokątnego wlewka przylanego o wymiarach 300 mm × 300 mm × 120 mm. W próbce zamontowano dwa termoelementy typu K, tj. NiCr-NiAl – pierwszy z nich na powierzchni próbki, drugi w odległości 18 mm od krawędzi płytki, na głębokości 10 mm. W odległości 36 mm od termoelementu 2 znajdowała się linia pomiaru twardości (rys. 2).

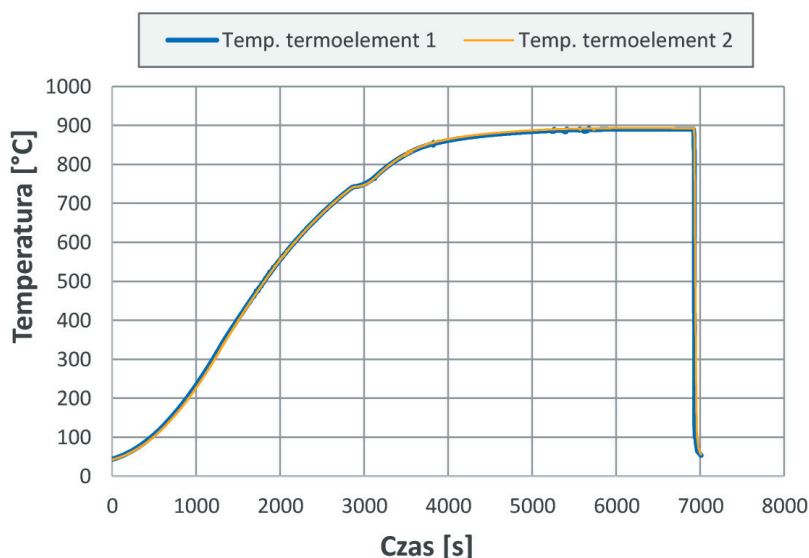


Rys. 2. Model przestrzenny próbki z zaznaczonymi kluczowymi wymiarami oraz widok próbki wykorzystanej do badań rzeczywistych

Próbkę poddano obróbce cieplnej o parametrach tożsamych z zadanymi w symulacji, a więc hartowaniu zwykłemu. Procedura składała się z następujących kroków:

1. nagrzanie próbki do temperatury 890°C,
2. wygrzewanie próbki w zadanej temperaturze przez 30 minut,
3. chłodzenie w wodzie (pojemnik o objętości 8 dm³).

Obróbkę cieplną przeprowadzono w elektrycznym piecu oporowym, o objętości komory roboczej 7 dm³, typu FCF7. Zarejestrowane za pomocą termoelementów zmiany temperatury podczas obróbki cieplnej zostały zobrazowane na wykresie (rys. 3).



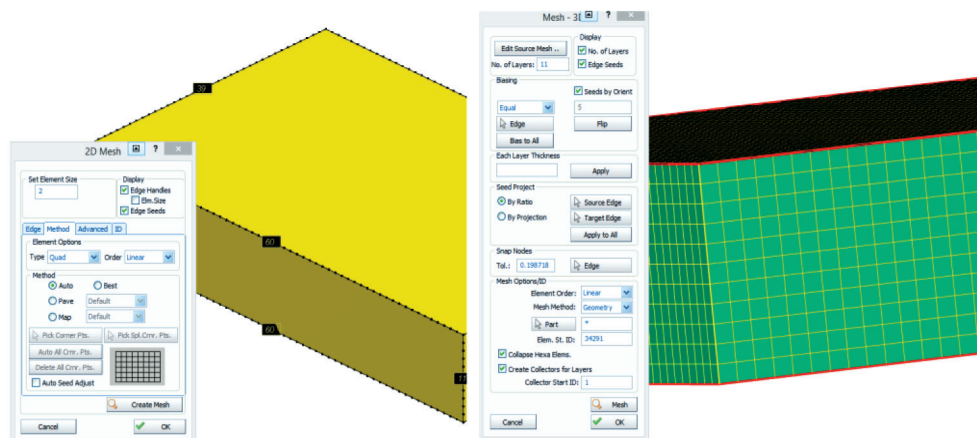
Rys. 3. Zmiany temperatury w trakcie obróbki cieplnej

Następnie przygotowano próbkę do badań metaloznawczych. Płytkę została przecięta w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni, która przechodziła przez punkt mocowania termoelementu 2, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2. Powierzchnię próbki wyrównano i wykonano dwie serie pomiarów twardości w punktach znajdujących się w jednakowych odstępach od siebie. Z wyników wyznaczono średnią. Badania wykonywano pod obciążeniem 30 kg. Po zakończonych badaniach twardości wykonano zgład metalograficzny, który został wytrawiony nitałem. Następnie z zastosowaniem mikroskopu świetlnego LEICA poddano analizie mikrostrukturę tak przygotowanego materiału. Wykonano po pięć zdjęć w dwóch powiększeniach, tj. 100× i 500×, dla każdego z charakterystycznych punktów: na krawędzi próbki (na powierzchni zahartowanej), 5 mm od krawędzi oraz 10 mm od krawędzi (w środku przekroju). Analizę obrazu wykonano za pomocą aplikacji ImageJ.

W celu przeprowadzenia symulacji utworzono projekt w programie Visual-Weld. Kolejno wykonano następujące operacje:

– W module Mesh:

Przygotowano model wirtualny odzwierciedlający geometrię badanej próbki. Najpierw wygenerowano siatkę powierzchniową 2D, a na jej podstawie siatkę objętościową 3D. Rozmiar elementów siatki powierzchniowej ustalono na 2 mm, zaś typ jako sześcienny (*quad*), o stałym zagęszczeniu w każdym kierunku, tj. liniowym. Utworzono kolektory VOLUME (objętość bryły reprezentowana przez model 3D) oraz QUENCHED (powierzchnia, na którą działa medium robocze, tworzona przez elementy siatki 2D). Zdefiniowano klamry, będące pojedynczymi węzłami siatki, służące do unieruchamiania próbki podczas chłodzenia. Na końcu sprawdzono poprawność siatek, upewniono się, że projekt nie zawiera wolnych węzłów, niepożądanych zbieżności oraz nieciągłości siatki, i oceniono jakość elementów (sprawdzano m.in. wartość wyznacznika macierzy Jacobiego siatki 2D). Uzyskany model przedstawiono na rysunku 4.

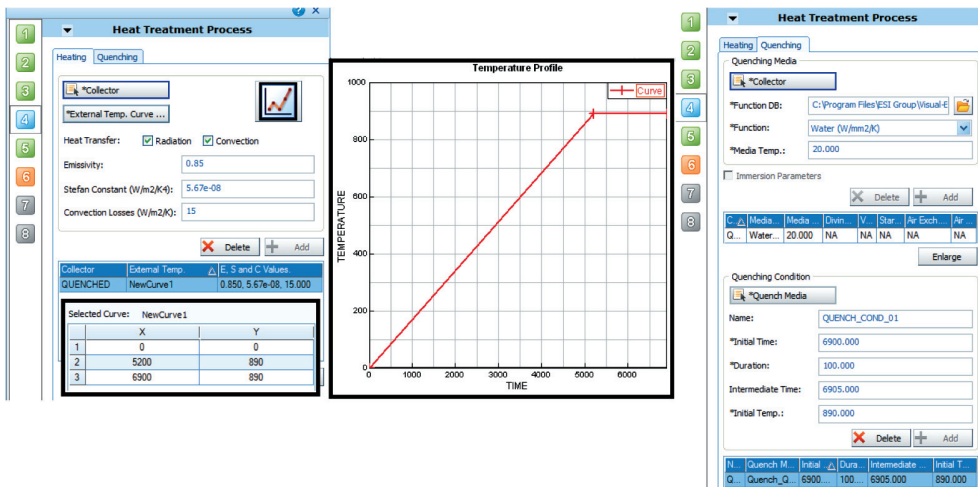


Rys. 4. Model oraz parametry siatek 2D i 3D

– W module Heat-Treatment (H-T):

Uruchomiono narzędzie Advisor, zaznaczono zabiegi obróbki cieplnej, które program ma uwzględnić w obliczeniach. Celem niniejszej pracy było porównanie wyników hartowania, zatem zadano nagrzewanie (*heating*) oraz chłodzenie (*quenching*). Z bazy materiałowej programu wybrano stop, z którego wykonana jest próbka (stal CF35). Krzywą temperaturową nagrzewania oraz parametry chłodzenia zadano na podstawie zmian temperatur zarejestrowanych podczas obróbki cieplnej (rys. 3). Nagrzewanie, trwające łącznie 6900 sekund, odbywało się dwuetapowo: przez 5200 sekund próbka była nagrzewana do temperatury 890°C, następnie wytrzymywana w takich warunkach przez kolejne 1700 sekund. Do chłodzenia zastosowano wodę o początkowej temperaturze wynoszącej 20°C. Czas zanurzenia w wodzie ustalono na

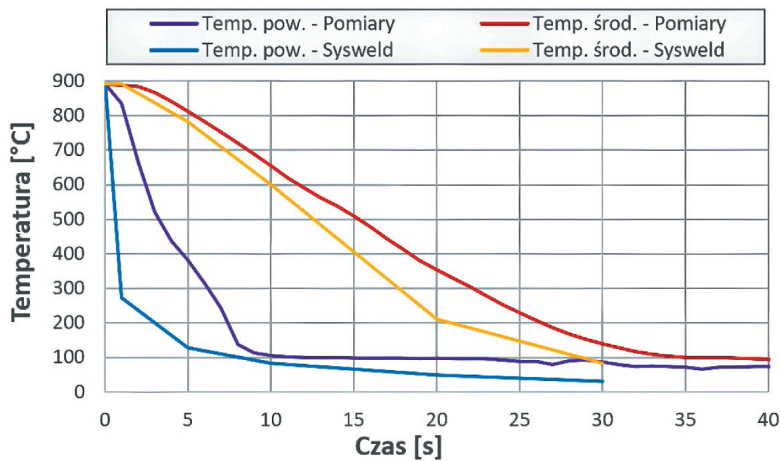
100 sekund, zaś maksymalną różnicę czasową między wyjęciem próbki z pieca a zanurzeniem w medium chłodzącym na 5 sekund. Za pomocą przygotowanych klamer zablokowano stopnie swobody próbki. W panelu funkcyjnym zaznaczono opcję obliczeniową twardości, po czym uruchomiono symulację. Ustalone parametry procesu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Parametry procesu: nagrzewania (po lewej) i chłodzenia (po prawej)

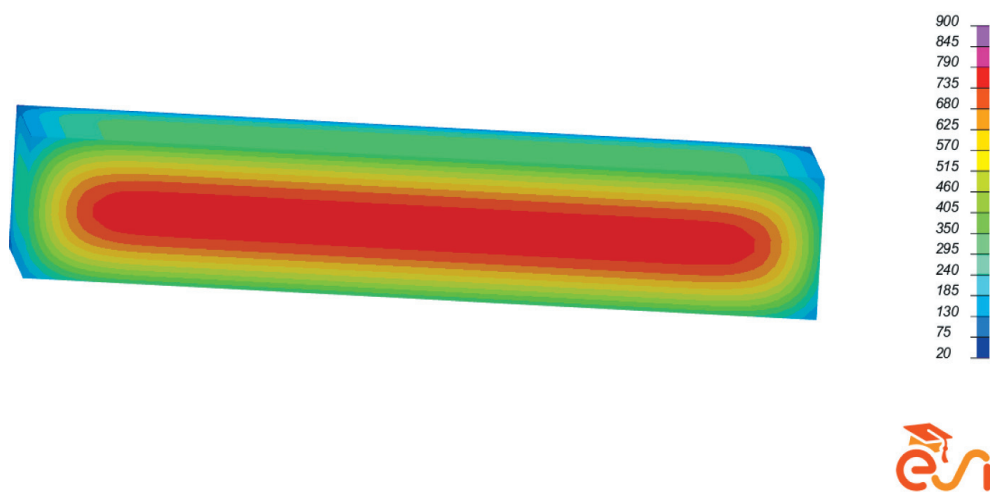
5. Wyniki badań

Na rysunku 6 przedstawiono krzywe stygnięcia zmierzone doświadczalnie i uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych w kilku wybranych krokach czasowych (1 s, 5 s, 10 s, 20 s, 30 s).



Rys. 6. Zestawienie krzywych stygnięcia z symulacji oraz pomiarów rzeczywistych

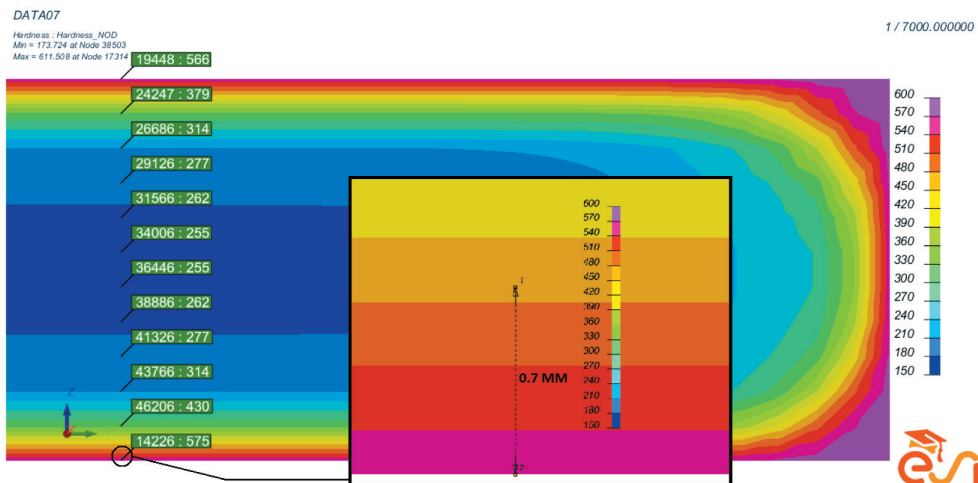
Odnotowuje się różnicę w szybkościach stygnięcia w przypadku danych z programu Sysweld oraz danych empirycznych. Obie krzywe z symulacji wykazują znacznie większą dynamikę chłodzenia (5–10 s) w porównaniu z krzywą opartą na danych pomiarowych. W przypadku termoelementu 1 umieszczonego na krawędzi próbki stwierdzony eksperymentalnie spadek temperatury w pierwszej sekundzie chłodzenia wynosi niewiele ponad 55°C, zaś w symulacji aż 618°C. Inaczej jest w środku przekroju, gdzie różnice są znacznie mniejsze. Po 5 sekundach odnotowano w symulacji 783°C, zaś w pomiarach rzeczywistych 812°C. Szczególny wpływ na twardość powierzchni zahartowanej mają pierwsze sekundy procesu chłodzenia. Niestety dyferencja wyników jest największa w tym zakresie pomiarowym i ma kluczowy wpływ na ilość utworzonego martenzytu, a zatem i na twardość elementu po obróbce cieplnej, co znajduje swoje potwierdzenie w uzyskanych rozkładach twardości. W obu przypadkach odprowadzenie ciepła z powierzchni próbki było znacznie szybsze niż z wewnętrznej jej części. Czas potrzebny do osiągnięcia temperatury 100°C wyniósł 8 sekund w przypadku symulacji oraz 12 sekund w doświadczeniu rzeczywistym. Rozbieżności w szybkości chłodzenia istotnie wpłynęły na niezgodność wyników dotyczących składu fazowego oraz twardości na przekroju próbki w symulacji i w eksperymencie. Na rysunku 7 przedstawiono uzyskany w wyniku symulacji rozkład temperatury na przekroju próbki po 5 sekundach od rozpoczęcia chłodzenia.



Rys. 7. Rozkład temperatury na przekroju próbki po 5 sekundach chłodzenia

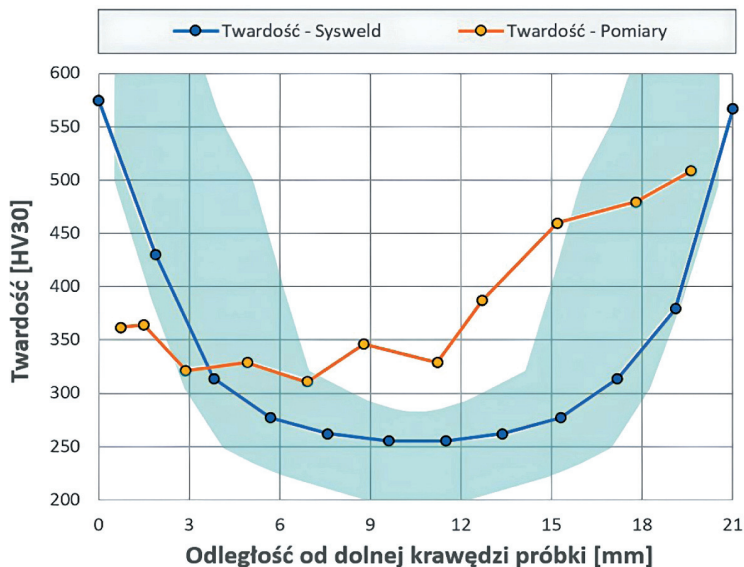
Powierzchnia próbki po tym czasie osiągnęła temperaturę niższą od M_s (400°C dla stali CF35) i w tym obszarze rozpoczęła się przemiana martenzytyczna. W wewnętrznej części próbki temperatura przekracza 700°C, co umożliwia rozpad dyfuzyjny austenitu i rozpoczęcie się przemiany perlitycznej.

Na rysunku 8 przedstawiono zmiany twardości na przekroju próbki uzyskane w wyniku symulacji numerycznej. Wyszczególniono obszar pomiarowy w odległości 0,7 mm od powierzchni hartowanej, gdzie zaobserwowano wyniki twardości z zakresu 480–510 HV30.



Rys. 8. Rozkład twardości na przekroju z zaznaczonym obszarem na głębokości 0,7 mm

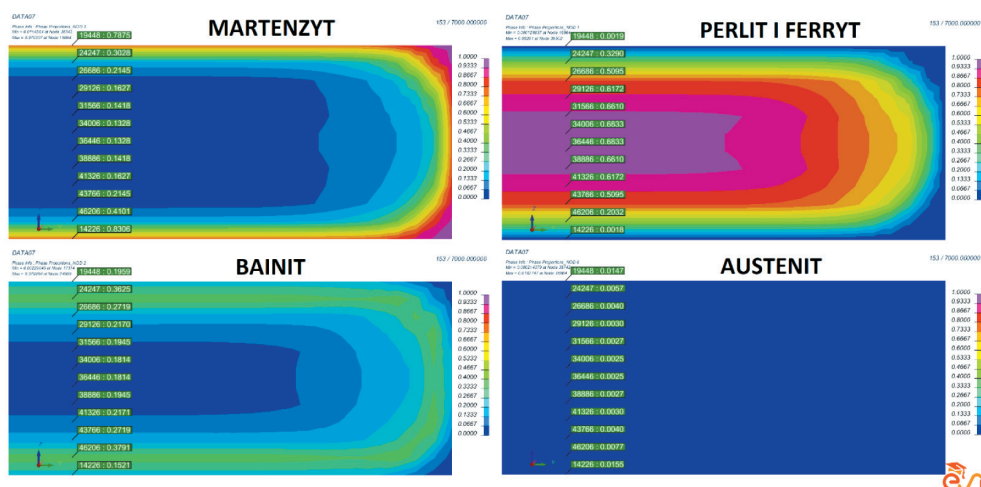
Na rysunku 9 zestawiono wyniki symulacji twardości z danymi uzyskanymi podczas doświadczenia. Dodatkowo na wykresie zacieniowano kolorem turkusowym zakres twardości podawany dla stali CF35 w normie (PN-EN ISO 683-1:2018-09).



Rys. 9. Zestawienie wyników symulacji twardości z wynikami jej pomiarów rzeczywistych

Można wskazać rozbieżności w wynikach w całym przekroju, a zwłaszcza w zakresach od powierzchni do 3 mm oraz od 6 mm do 18 mm. Dyferencja jest znaczna, niejednokrotnie przekracza 300 HV30. Na podstawie zestawienia można wysnuć wniosek, że w praktyce próbka zahartowała się w inny sposób, niż wskazywałaby symulacja numeryczna. Rozkład twardości jest równomierny od jednej powierzchni w kierunku rdzenia, a następnie twardość zwiększa się w kierunku drugiej powierzchni. Dane literaturowe wskazują, że w odniesieniu do badanego stopu można się spodziewać maksymalnych twardości na powierzchni – w zakresie 390–746 HV30, a w odległości 6 mm od krawędzi – w przedziale 227–393 HV30. W związku z tym można stwierdzić, że rozkład twardości z symulacji jest w pełni zgodny z normą, a uzyskany doświadczalnie – tylko częściowo.

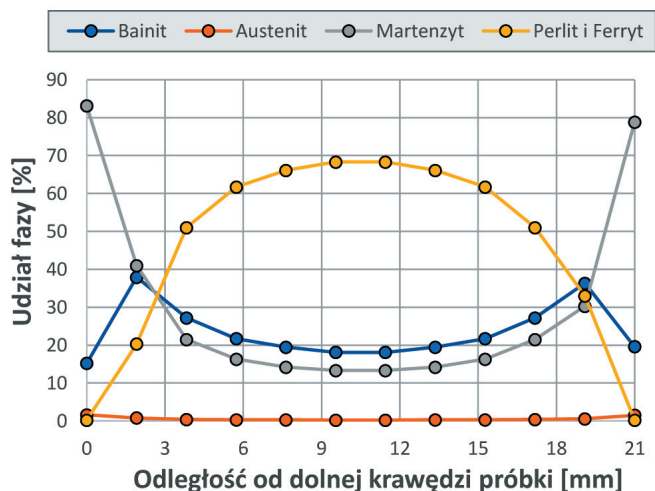
Na rysunku 10 przedstawiono otrzymane w wyniku przeprowadzonej symulacji w programie Sysweld zmiany ułamka objętości poszczególnych faz na przekroju próbki.



Rys. 10. Rozkład faz na przekroju próbki – symulacja Sysweld

Rysunek 11 przedstawia uzyskane dane dotyczące rozkładu faz w funkcji grubości ścianki badanej próbki, które zestawiono na wspólnym wykresie.

Szczególnie istotne w kontekście prowadzonych badań są składniki struktury powstające w wyniku obróbki cieplnej, tj. martenzyt oraz bainit. Największą ilość martenzytu obserwuje się przy samej powierzchni hartowanej, jest to 83%, po czym wraz ze wzrostem odległości od ścianki odnotować można zmniejszanie się jego udziału, aż do 13% w środku przekroju. Sytuacja jest odmienna w przypadku bainitu: jego największą ilość (niecałe 38%) obserwuje się w punktach pomiarowych oddalonych o ok. 1,5 mm od powierzchni hartowanej. Następnie, podobnie jak w przypadku poprzedniej fazy, udział bainitu maleje w kierunku środka przekroju – do 18%. Dane dotyczące perlitu oraz ferrytu potwierdzają poprzednie odczyty. Udział austenitu jest znikomy w całym przekroju.

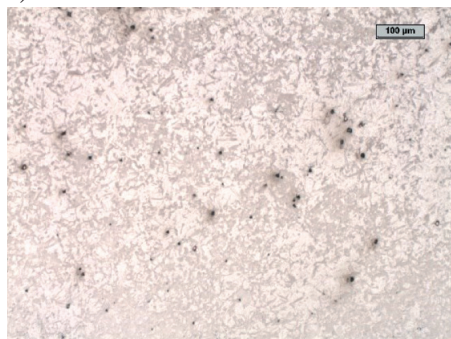


Rys. 11. Porównanie udziału poszczególnych faz na przekroju próbki – symulacja Sysweld

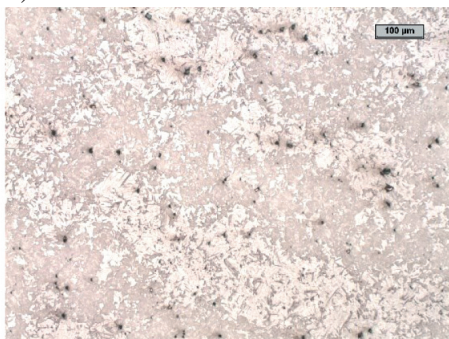
Wybrane wyniki badań metalograficznych zestawiono na rysunku 12. Zdjęcia wykonano w powiększeniach $100\times$. Odległość badanych obszarów od powierzchni stygnięcia wynosiła <1 mm, 5 mm i 10 mm. Analiza rysunku 12 wskazuje, że przy powierzchni chłodzenia udział martenzytu jest wyraźnie większy niż w osi symetrii próbki. Cyfrowe badania obrazu wykonane za pomocą programu ImageJ potwierdziły te obserwacje. Ich wyniki przedstawiono na rysunku 13.

Obserwuje się rozbieżne wartości udziału martenzytu w każdym z badanych punktów. Różnica między wynikiem symulacji a wynikami doświadczalnymi udziału martenzytu na krawędzi próbki, tj. w odległości <1 mm od powierzchni hartowanej, wynosi ponad 10%, a w odległości 5 mm od powierzchni – 14%. Trend utrzymuje się także w środku przekroju, gdzie odnotowuje się różnicę wynoszącą ok. 13%.

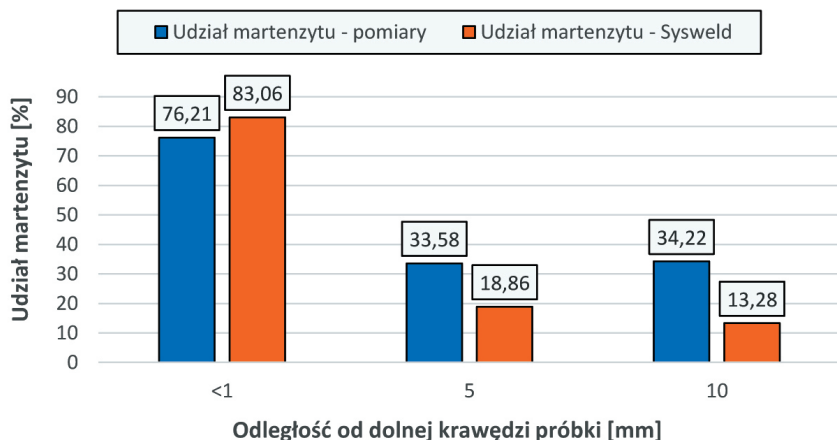
a)



b)



Rys. 12. Mikrostruktura badanych próbek w odległości do 1 mm (a) i 10 mm (b) od powierzchni chłodzenia



Rys. 13. Zestawienie wyników symulacji rozkładu martenzytu z wynikami doświadczalnymi

Pomimo porównywalnej hartowności staliwa L500-II i stali CF35 uzyskane twardości przy powierzchni są mniejsze. Zjawisko to można tłumaczyć mniejszą gęstością ziaren w staliwie w porównaniu ze stałą, a zgodnie z zależnością Halla–Petcha im większe ziarna, tym mniej wytrzymały i twardy jest materiał. Inną przyczyną mniejszej twardości staliwa w porównaniu ze stałą może być większa zawartość wtrąceń niemetalicznych (tlenków, siarczków, azotków), które są preferowanymi miejscami zarodkowania perlitu. Wydaje się, że próbka poddana badaniom empirycznym powinna także zostać poddana procesowi homogenizacji, jednak w warunkach produkcyjnych zabieg ten jest niezwykle rzadko przeprowadzany względem odlewów ze staliwa węglowego, toteż nie przeprowadzono go w opisywanych badaniach.

Należy zauważyć, że przyczyną rozbieżności może być również model matematyczny wykorzystywany w oprogramowaniu Visual-Weld. Z powodów praktycznych tego typu oprogramowanie zwykle zawiera pewne uproszczenia niezbędne do przyspieszenia obliczeń. W badaniach prezentowanych w niniejszej pracy potwierdziły się obserwacje Kika i in. (2015), którzy wskazali na rozbieżność pomiędzy wynikami symulacji w środowisku Visual-Weld oraz wynikami rzeczywistymi uzyskanymi podczas hartowania w wodzie. Otrzymane dane wskazują, że program ma trudności z prawidłowym wyznaczeniem kinetyki powstawania martenzytu, za co może odpowiadać przyjęty model Koistinen i Marburgera (1959). Obecnie w literaturze dostępny jest model Li i in. (1998), który dodatkowo uwzględnia wielkość ziarna austenitu w obliczeniach szybkości powstawania martenzytu. Wydaje się, że na potrzeby symulacji procesów przemian fazowych w odlanych stopach żelaza należałoby dodatkowo wprowadzić parametr opisujący liczbę wtrąceń niemetalicznych, które także mają niebagatelny wpływ na hartowność staliwa.

6. Wnioski

Wyniki symulacji obróbki cieplnej w programie Visual-Weld są rozbieżne z uzyskanymi w doświadczeniu rzeczywistym, natomiast odpowiadają literaturowym, co skłania do wniosku, że zastosowanie oprogramowania grupy ESI w przemyśle odlewnictwa staliwa jest zasadne. Za przyczynę znacznych rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi doświadczalnie i w symulacji, zwłaszcza w obszarze bliskim powierzchni zahartowanej, można uznać następujące czynniki:

- staliwo w przeciwieństwie do stali charakteryzuje się niejednorodną i gruboziarnistą mikrostrukturą, która powstaje łatwo szczególnie w odlewach grubościennych; owa niejednorodność w połączeniu z segregacją składników stopowych mogła mieć wpływ na otrzymane wyniki doświadczalne;
- zaimplementowany w oprogramowaniu Visual-Weld model nie uwzględnia niektórych czynników wpływających na hartowność, należą do nich: wielkość ziarna, stopień jednorodności składu chemicznego austenitu, obecność obcych faz takich jak tlenki i siarczki, których udział objętościowy w staliwie zwykle przekracza 0,1%, a które ułatwiają rozpad dyfuzyjny austenitu;
- niższa twardość próbek przy powierzchni chłodzenia jest wynikiem istotnie mniejszej szybkości chłodzenia uzyskanej w doświadczeniu, ponadto wykorzystany zbiornik wody, z powodu stosunkowo niedużej objętości, nie zapewnił stabilnej temperatury podczas chłodzenia.

Literatura

- Adrian H., 2011, *Numeryczne modelowanie procesów obróbki cieplnej*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Babu K., Prasanna Kumar T.S., 2014, *Comparison of austenite decomposition models during finite element simulation of water quenching and air cooling of AISI 4140 steel*, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 45, s. 1530–1544. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0069-0>.
- Bhadeshia H.K.D.H., 2014, *Physical Metallurgy of Steels*, [w:] Laughlin D.E., Hono K. (eds.), *Physical Metallurgy*, 5th ed., Elsevier, s. 2157–2214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53770-6.00021-6>.
- ESI Group, 2017. *ESI SYSWELD: Welding and Heat Treatment Simulation Solution*. <http://www.cef3d.fr/COSS/wp-content/uploads/2018/04/Heat-Treatment-ESI-solution.pdf> [dostęp: 4.08.2023].

- Evdokimov A., Jasiewicz F., Doynov N., Ossenbrink R., Michailov V., 2022, *Simulation of surface heat treatment with inclined laser beam*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 81, s. 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.051>.
- Głównia J., 2002, *Odlewy ze stali stopowej*, Fotobit, Kraków.
- Kik T., Slovacek M., Moravec J., Vanek M., 2015, *Numerical simulations of heat treatment processes*, [w:] *Applied Mechanics and Materials*, vols. 809–810, Trans Tech Publications, s. 799–804. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.809-810.799>.
- Kik T., Moravec J., Nováková I., 2020, *Wsparcie numeryczne badań procesów obróbki cieplnej*, [w:] Górka J. (red.), *Symposium Katedr i Zakładów Spawalnictwa „Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych”: Brenna 15–17 czerwca 2020 r.*, Archives of Foundry Engineering, Katowice – Gliwice, s. 25–36.
- Koistinen D., Marburger R., 1959, *A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels*, Acta Metallurgica, vol. 7, s. 59–60. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(59\)90170-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(59)90170-1).
- Leblond J.B., Devaux J., 1984, *A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size*, Acta Metallurgica, vol. 32(1), s. 137–146. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90211-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90211-6).
- Lee S.H., Kim E.S., Park J.Y., Choi J., 2018, *Numerical analysis of thermal deformation and residual stress in automotive muffler by MIG welding*, Journal of Computational Design and Engineering, vol. 5(4), s. 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.05.001>.
- Li M.V., Niebuhr D.V., Meekisho L.L., Atteridge D.G., 1998, *A computational model for the prediction of steel hardenability*, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 29, s. 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11663-998-0101-3>.
- Lu S., Zhou J., Zhang J., 2015, *Optimization of welding thickness on casting-steel surface for production of forging die*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 76, s. 1411–1419. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6371-9>.
- PN-EN ISO 683-1:2018-09, *Stale do obróbki cieplnej, stale stopowe i stale automatowe – Część 1: Stale niestopowe do hartowania i odpuszczania*.
- Pont D., Guichard T., 1995, *Sysweld®: Welding and Heat Treatment Modelling Tools*, [w:] Atluri S.N., Yagawa G., Cruse T. (eds.), *Computational Mechanics '95*, Springer, Berlin, Heidelberg, s. 248–253. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79654-8_41.
- Ryzhkov M.A., Maisuradze M.V., Yudin Y.V., Khuppeev A.V., Ajeet Babu K.P., 2015, *Experience in improving silicon steel component heat treatment quality*, Metallurgist, vol. 59, s. 401–405. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0117-2>.
- Ryzhkov M., Maisuradze M., Kaletin A., 2018, *Heat Treatment Technology Adjustment Using Experimental and Simulation Methods*, [w:] Syngellakis S., Connor J. (eds.), *Advanced Methods and Technologies in Metallurgy in Russia*, Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering, Springer, Cham, s. 69–75. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66354-8_9.

- Stanisławski M., 2008, *Oprogramowanie CAD, CAM, CAE dla inżynierów projektantów branży mechanicznej*, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, nr 7/8 (10/11), s. 9–10.
- Swacha P., Kotyk M., Stachowiak R., Ziółkowski W., 2021, *Analizy numeryczne procesów spawania i obróbki cieplnej z wykorzystaniem oprogramowania SYSWELD*, Developments in Mechanical Engineering, vol. 17(9), s. 47–60. <https://doi.org/10.37660/dme.2021.17.9.4>.
- Zubairuddin M., Albert S.K., Reddy M.S., Baharin Ali, Varaprasad B., Mishra A., Das P.K., Elumalai P.V., 2023, *Thermal analysis of thin P91 steel using FlexPDE and SYSWELD*, Materials Today: Proceedings, vol. 72(part 3), 2023, s. 1550–1555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.385>.