

Ćwiczenie 4

ODLEWANIE KOKILOWE. BADANIE ZMIAN TEMPERATURY ODLEWU I KOKILI W CYKLU ODLEWANIA Z WYKORZYSTANIEM SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA

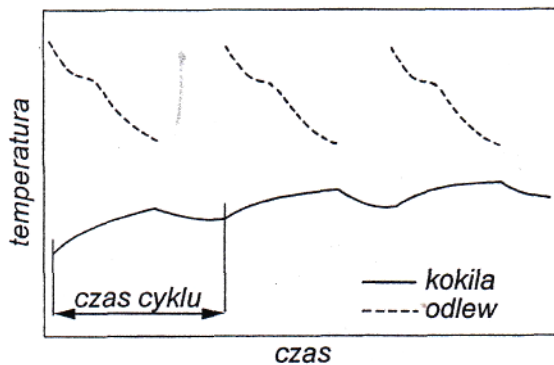
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z procesem odlewania kokilowego, ze szczególnym uwzględnieniem procesów wymiany ciepła w układzie odlew--forma-otoczenie. W ćwiczeniu dokonuje się doświadczalnego wyznaczenia zależności temperatury odlewu od czasu oraz ocenia słuszność niektórych przybliżonych zależności teoretycznych dotyczących tego zagadnienia.

2. WPROWADZENIE

Przy projektowaniu i realizacji procesów odlewania do form metalowych ilościowa analiza wymiany ciepła pomiędzy odlewem, formą i otoczeniem nabiera szczególnie istotnego znaczenia z dwóch następujących, zasadniczych powodów:

1. Forma jest trwała (wielokrotnego użytku), co sprawia, że nie jest obojętne, co dzieje się z nią po zalaniu, jak w przypadku form jednorazowych, np. piaskowych. Chodzi zwłaszcza o to, ażeby w czasie, który jest niezbędny dla ostygnięcia odlewu do zadanej temperatury usuwania oraz następującego po nim ciągu czynności obsługowych, koniecznych dla przygotowania jej do następnego zalania, forma osiągnęła pożądaną dla danego przypadku temperaturę. Temperatura ta jest wynikiem bilansu ciepła dostarczanego do formy przez odlew i odbieranego od niej na drodze stygnięcia naturalnego oraz ewentualnego chłodzenia sztucznego. Na rys. 4.1 pokazano schematycznie przykładowe wykresy średniej temperatury kokili wraz z towarzyszącymi im

wykresami stygnięcia odlewu w funkcji czasu, dla kilku kolejnych cykli odlewania. Widoczne jest, że w okresie, kiedy forma jest bez odlewu, nie jest ona



Rys. 4.1. Średnia temperatura kokili oraz średnie temperatury kolejnych odlewów w funkcji czasu

w stanie wystygnąć do założonej na początku temperatury; w takim przypadku mówimy o braku równowagi lub, poprawniej, stabilizacji cieplnej formy w cyklu produkcyjnym. Ilościowa analiza zjawisk cieplnych, przeprowadzona przed wykonaniem kokili, powinna dać odpowiedź na pytanie, jaki jest niezbędny czas stygnięcia formy przed kolejnym zalaniem bądź też, jaka musi być wydajność układu chłodzenia sztucznego, aby czas ten nie musiał być nadmiernie wydłużany.

2. Szybkość stygnięcia odlewów w formach metalowych jest istotnie wyższa niż w formach piaskowych, a ponadto może być w znacznie większym zakresie i w stosunkowo łatwy sposób regulowana (to ostatnie dotyczy zwłaszcza kokili). Właściwa intensywność odbierania ciepła od odlewu pozwala na osiągnięcie odpowiedniej jego struktury; na przykład dla odlewów ze stopów lekkich korzystne jest otrzymanie rozdrobnionych ziarn, dających wyższą wytrzymałość stopu. Odpowiednio wysoka szybkość studzenia pozwala na krótszy czas przebywania odlewu w formie, a więc krótszy czas cyklu odlewania i, w konsekwencji, wyższą wydajność procesu. Z drugiej strony zbyt szybkie studzenie może powodować ograniczenie leju stopu, powodujące powstanie braków w postaci niedolewów lub niespawów.

Proces wymiany ciepła w układzie odlew-kokila-otoczenie jest bardzo złożony. Na kształt pola temperatury i jego zmienność w czasie mają wpływ czynniki konstrukcyjne (ukształtowanie odlewu i formy), właściwości materiałów oraz początkowe wartości temperatury kokili i metalu.

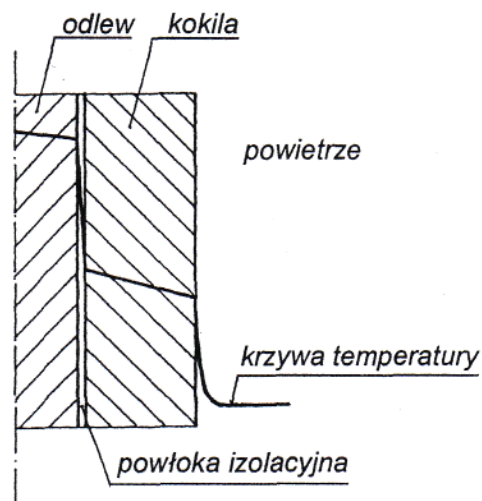
Ścisłe rozwiązanie analityczne tego typu zagadnienia brzegowego jest niemożliwe, zaś rozwiązanie numeryczne, pomimo istnienia zaawansowanych technik komputerowych, nadal bardzo trudne [2]. Stąd dla potrzeb praktycznych stosuje się różnego typu zależności uproszczone, których dwa przykłady omówione zostaną poniżej, w zakresie odpowiadającym celowi niniejszego ćwiczenia, tj. dotyczącym sposobu wyznaczenia krzywej stygnięcia odlewu (zależności jego temperatury od czasu).

2.1. Inżynierska metoda obliczeń stosowana bez wykorzystania techniki komputerowej

U podstaw tej metody [1] leżą następujące założenia upraszczające: — temperatura w odlewie lub w formie jest jednakowa w całej objętości danego elementu w dowolnej chwili;

- intensywność wymiany ciepła pomiędzy odlewem i kokilą oraz kokilą i otoczeniem jest proporcjonalna nie do aktualnej, chwilowej różnicy temperatury pomiędzy tymi ciałami, lecz do różnicy pomiędzy ich temperaturą uśrednioną w czasie przebywania odlewu w formie;
- właściwości cieplne materiałów oraz geometria obu ciał nie zależą od temperatury.

Zasadność przyjęcia powyższych *założeń* należy ocenić w sposób zróżnicowany. Pierwsze z nich opiera się na spostrzeżeniu, popartym obliczeniami, że ze względu na obecność izolacyjnych pokryć ochronnych na powierzchni wnęki kokili oraz tworzenie się szczeliny powietrznej pomiędzy odlewem a kokilą, intensywność odbierania ciepła na powierzchni odlewu jest niewielka w stosunku do szybkości przepływu ciepła w obrębie samego odlewu. To samo dotyczy porównania intensywności stygnięcia kokili na jej zewnętrznej powierzchni na drodze konwekcji naturalnej i promieniowania z szybkością przepływu ciepła w ścianie kokili [3]. W konsekwencji obniżenie temperatury, proporcjonalne do oporów cieplnych, jest znaczne na granicy ciał (w przypadku odlewu, ściślej mówiąc, w obrębie cienkich



Rys. 4.2. Rozkład temperatury na przekroju kokili z odlewem

warstw izolujących), natomiast niewielkie na przekrojach, zarówno odlewu, jak i formy. Schematyczny rozkład temperatury na przekroju odlewu i kokili dla określonej chwili czasu pokazano na rys. 4.2.

Zasadność drugiego z powyższych *założeń* należy ocenić bardziej krytycznie. Zgodnie z prawem Fouriera [2] strumień cieplny (stanowiący w tym przypadku wielkość definiującą intensywność odbierania ciepła od odlewu do kokili) jest proporcjonalny do chwilowej, rzeczywistej różnicy temperatury pomiędzy obu ciałami. Gdyby zależność temperatury obu ciał od czasu miała charakter liniowy, to przyjęcie średniej arytmetycznej temperatury dla chwili początku zalewania i dla momentu usunięcia odlewu z formy byłoby w *znacznym* stopniu poprawne. Jednakże wobec bardzo wyraźnej nieliniowości krzywych stygnięcia czy nagrzewania ciał, zbliżonych w praktyce do krzywych typu wykładniczego (patrz np. rysunki w niniejszym rozdziale), założenie to może być obarczone znacznym błędem.

Trzecie wspomniane wyżej założenie upraszczające jest, w większości rozwiązań stosowanych w różnych dziedzinach techniki, dość często, przyjmowane, jeśli chodzi o stałość własności materiałowych. W omawianym przypadku zmiany, np. ciepła właściwego czy przewodności cieplnej właściwej w zakresie temperatury odpowiadającym przebywaniu odlewu w formie, nie są duże, a ponadto zbliżone do liniowych (względem temperatury); ich wartości mogą być z powodzeniem uśrednione.

Nieco inne zagadnienie stanowi stałość geometrii obu ciał. Zasadniczą sprawą jest tutaj skurcz odlewu i jego powiększanie się w wyniku szczeliny powietrznej pomiędzy nim i kokilą. Ze względu na bardzo dobre właściwości izolacyjne powietrza wzrost oporu cieplnego na granicy obu ciał, jak wykazują obliczenia, może być istotnie znaczący dla procesu wymiany ciepła.

Podstawowe zależności omawianej metody obliczeniowej otrzymuje się w następujący sposób. Oznaczając indeksami 'o' i 'k' wielkości odnoszące się, odpowiednio, do odlewu i kokili, zaś 'z' do chwili początkowej (zalewania), możemy napisać: — średnia temperatura odlewu:

$$T_{os} = \frac{T_{oz} + T_o}{2}, \quad (4.1)$$

— średnia temperatura kokili:

$$T_{ks} = \frac{T_{kz} + T_{kmax}}{2}, \quad (4.2)$$

ilość ciepła oddana przez odlew:

$$Q = M_o [c_{wo}(T_{oz} - T_o) + c_s], \quad (4.3)$$

gdzie: M_o — masa odlewu, c_{wo} — średnie ciepło właściwe materiału odlewu (obliczone z wartości w stanie ciekłym i stałym), zaś c_s — ciepło krzepnięcia tego materiału. Powyższa ilość ciepła przepływa do kokili w czasie t (w momencie początku zalewania przyjmujemy $t = 0$) przez warstwę pokrycia kokilowego o grubości δ i efektywnej przewodności cieplnej właściwej A według podstawowego równania przewodnictwa cieplnego dla stanu ustalonego (zgodnie z przyjętym założeniem przyjmuje się tu niezależność temperatury obu ciał (niezależną) od czasu):

$$Q = (\lambda/\delta)F(T_{os} - T_{ks})t, \quad (4.4)$$

gdzie F — powierzchnia styku odlewu z formą.

Porównując równania (4.3) i (4.4), po podstawieniu do nich wartości danej wzorem (4.1) i po przekształceniach otrzymuje się wzór na temperaturę usuwania odlewu w funkcji czasu t , liczonego od początku zalewania (może to

$$T_o = \frac{At + B}{Ct + D}, \quad (4.5)$$

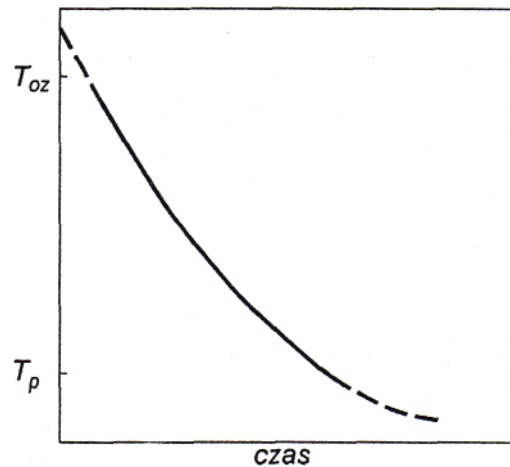
gdzie literami A , B , C , i D oznaczono stałe wyrażenia:

$$A = -\left(\frac{\lambda}{\delta}\right)F\left(\frac{T_{oz}}{2 - T_{ks}}\right), \quad B = M_o(c_w T_{oz} + c_s),$$

$$C = \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)\left(\frac{F}{2}\right), \quad D = M_o c_w.$$

być na przykład czas usuwania odlewu):

Równanie (4.5) przedstawia krzywą (hiperbole) pokazaną schematycznie na rys. 4.3. Należy zwrócić uwagę na jej przebieg i związany z nim ograniczony zakres zastosowania przedstawionej metody obliczeń.



Rys. 4.3. Schematyczna krzywa stygnięcia odlewu wynikająca z uproszczonej, inżynierskiej metody obliczeń (równanie (4.5)); T_{oz} – temperatura zalewania, T_p – temperatura otoczenia

2.2. Zaawansowana metoda obliczeń z wykorzystaniem techniki komputerowej

Metoda została opracowana w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Warszawskiej na podstawie klasycznych prac Wiejnika dotyczących termodynamiki form odlewniczych [3]. Polega ona na symulacji procesów wymiany ciepła w układzie odlew-kokila-otoczenie z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Praktycznie jedynym istotnym założeniem upraszczającym jest przy tej metodzie założenie o izotermiczności odlewu i kokili w dowolnej chwili czasowej, omówione jako pierwsze w metodzie poprzedniej.

Pełny cykl odlewania do kokili podzielono na 5 okresów, w których warunki wymiany ciepła różnią się nieco między sobą:

- I — zalewanie formy,
- II — stygnięcie ciekłego metalu do temperatury likwidusu,
- III — krzepnięcie w stałej lub zmiennej temperaturze,
- IV — stygnięcie odlewu do temperatury usuwania,
- V — stygnięcie pustej formy przed następnym zalaniem.

Zasada budowy równań różniczkowych opisujących tę wymianę ciepła pokazana zostanie na przykładzie okresu II. W nieskończenie małym przedziale czasu dt można założyć, że zmiana temperatury ciał wymieniających ciepło nieznacznie wpływa na intensywność tej wymiany. W takim czasie metal traci ilość ciepła:

$$dQ_1 = M_o c_{wl} dT_o, \quad (4.6)$$

(c_{wl} — ciepło właściwe metalu), które przepływa przez warstwę pokrycia kokilowego zgodnie z równaniem:

$$dQ_1 = \left(\frac{\lambda}{\beta} \right) F (T_o - T_k) dt. \quad (4.7)$$

Przyrównanie wyrażen (4.6) i (4.7) po przekształceniach daje równanie różniczkowe dla odlewu:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{\lambda F}{\delta M c_{wl}} (T_o - T_k). \quad (4.8)$$

W celu określenia temperatury formy można przeprowadzić następujące rozumowanie. W czasie dt forma otrzymuje od odlewu ilość ciepła daną równaniem (4.7), zaś oddaje do otoczenia:

$$dQ_2 = \alpha F_k (T_k - T_p) dt, \quad (4.9)$$

gdzie F_k oznacza zewnętrzną powierzchnię kokili, T — temperaturę otaczającego powietrza, zaś α — zastępczy współczynnik przejmowania ciepła u-względniający konwekcję i promieniowanie, zależny od aktualnej temperatury kokili.

Kokila nagrzewa się (lub ochładza) wskutek otrzymania ciepła będącego różnicą pomiędzy ciepłem dostarczonym a oddanym, wg równania:

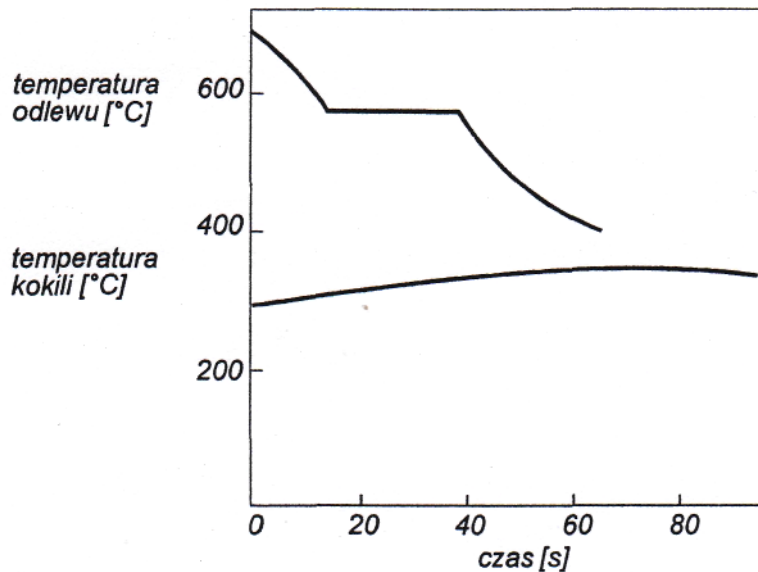
$$dQ_1 - dQ_2 = M_k c_{wk} dT_k, \quad (4.10)$$

gdzie: M_k , c_{wk} — odpowiednio masa i ciepło właściwe kokili. Wstawiając wyrażenia (4.7) i (4.9) do równania (4.10), otrzymuje się po przekształceniach równanie różniczkowe dla kokili, mające budowę analogiczną do równania dla odlewu:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\lambda F}{\delta M_k c_{wk}} (T_o - T_k) - \frac{\alpha F_k}{M_k c_{wk}} (T_k - T_p). \quad (4.11)$$

Oba równania stanowią dość prosty układ równań różniczkowych zwyczajnych z dwiema niewiadomymi wartościami temperatury (odlewu i kokili), w których występują pierwsze pochodne tych wielkości po czasie oraz różnego typu funkcje samej temperatury. W pozostałych okresach odlewania obowiązują równania o podobnej budowie, w których jednakże uwzględniono szereg dodatkowych zjawisk. Na przykład, w okresie zalewania — zmienną masę metalu w formie oraz dodatkowe ilości ciepła wprowadzane wraz ze strugą ciekłego metalu; w okresie krzepnięcia w stałej temperaturze — zmienną nie jest temperatura odlewu, lecz zakrzepła masa stopu; w okresie stygnięcia do temperatury usuwania — zamiast stałego oporu cieplnego pokrycia (wynoszącego ó/A) wprowadzono dodatkowy jego składnik zwiększający się liniowo ze spadkiem temperatury, odzwierciedlający powiększanie się szczeliny powietrznej wskutek skurczu odlewu (dylatacji liniowej stopu).

Otrzymane układy równań rozwiązano metodą numeryczną i ujęto w formie programu komputerowego, działającego w formie interakcyjnej na komputerach typu PC. Program ma dość szerokie możliwości, jednak w ćwiczeniu wykorzysty-



Rys. 4.4. Przykład krzywej stygnięcia odlewu i zależności temperatury kokili od czasu, otrzymanych zaawansowaną metodą obliczeń z wykorzystaniem komputera

wany jest tylko do przewidywania zależności temperatury odlewu od czasu w trakcie jednego cyklu odlewania. Przykładowy wykres pokazano na rys. 4.4.

Otrzymane układy równań rozwiązano metodą numeryczną i ujęto w formie programu komputerowego, działającego w formie interakcyjnej na komputerach PC w środowisku Microsoft Excel z wykorzystaniem języka VBA (Visual Basic for Applications).

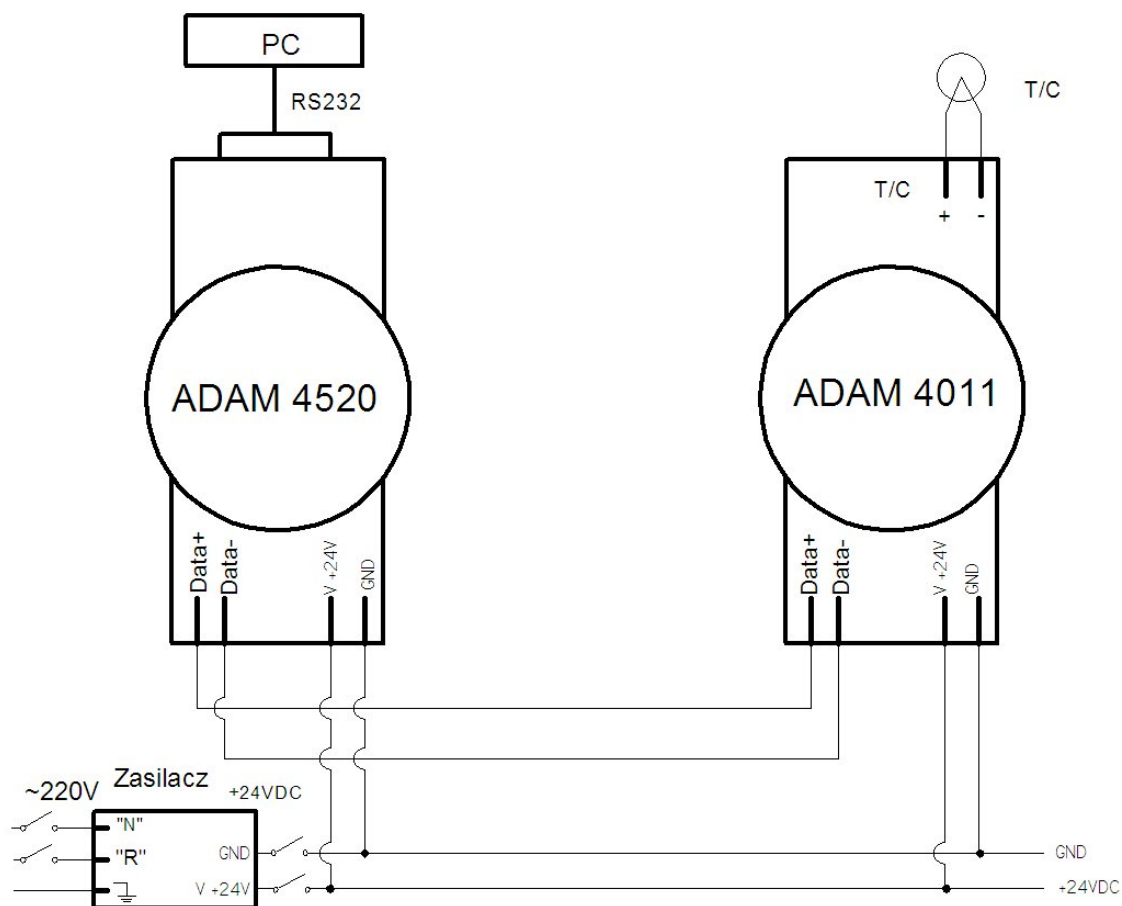
3. STANOWISKO POMIAROWE

W skład stanowiska laboratoryjnego do odlewania kokilowego wchodzi kokila umieszczona w kokilarce zamykanej ręcznie, piec do topienia metalu, kadź do jego przelewania oraz układ pomiarowy do pomiaru temperatury kokili. Schemat układu pokazano na rys. 3.1.

3.1. Budowa układu pomiarowego

Do pomiaru temperatury wykorzystany został moduł kontrolno pomiarowy serii ADAM-4011 firmy Advantech (Advantech Data Acquisition Module) połączony z komputerem PC poprzez konwerter do portu RS 232 za pomocą kabla z końcówkami męsko-żeńskimi 9-pinowymi (zwykły kabel COM). Moduły te są zdalnie sterowane za pomocą prostego zbioru komend wydawanych w formacie ASCII i przesyłanych zgodnie z protokołem komunikacyjnym RS-485. Nie zawierają potencjometrów regulacyjnych i zwór konfiguracyjnych. Za pomocą wysyłanych z komputera nadrzędnego komend, istnieje możliwość ustawienia wszystkich parametrów konfiguracyjnych

modułu, dotyczących między innymi: adresu modułu, parametrów komunikacji (prędkość, kontrola parzystości, itd.), rodzaju i zakresów pomiarowych wejść analogowych, alarmów. Zdalnie ustawione mogą być także parametry kalibracyjne. Zdalna konfiguracja może być przeprowadzona za pomocą dostarczonego przez producenta oprogramowania lub bezpośrednio przy użyciu dostępnych dla danego modułu komend konfiguracyjno-kalibracyjnych. Dzięki przechowywaniu parametrów konfiguracyjnych i kalibracyjnych w nieulotnej pamięci EEPROM, urządzenia są w stanie zachować te parametry w przypadku zaniku napięcia zasilającego. Zawarty w modułach licznik czuwający (watchdog timer) nadzoruje pracę modułu i w przypadku nieprawidłowości powoduje jego natychmiastowe zerowanie. Wszystkie te cechy pozwalają na znaczne ograniczenie czynności związanych z obsługą sprzętu pomiarowego. Pomiar dokonywany jest przy pomocy termoelementu składającego się z dwóch drutów, którego końce umieszczone są w trakcie pomiaru we wnęce kokili, co



Rysunek 3.1 Schemat układu pomiarowego

daje doskonały styk cieplny eliminuje błędy pomiarowe związane z bezwładnością układu.

3.1.1. Możliwości i obsługa programu

Program został stworzony w ten sposób, aby jak najbardziej dopasować się do pomiaru temperatury odlewu w funkcji czasu w różnych trybach, tak, aby



Rysunek 3.1.1 Główny ekran programu do pomiaru temperatury

udział użytkownika był jak najmniejszy, a pomiar rozpoczynał się i kończył w odpowiednim momencie. Główny ekran programu pokazano na rys.3.1.1 Jak z niego wynika można odczytać bieżącą temperaturę jak i czas pomiaru (wyrażony w ms) jak również zmienić jego częstotliwość. Domyślnie ustawiona jest na 200 ms, czyli program wykonuje 5 pomiarów w ciągu 1 sekundy.

Program posiada również własne menu. Struktura menu przedstawia się następująco:

- Pomiar
 - Nowy – polecenie służące do utworzenia nowego pliku z pomiarem. Wyświetla okno dialogowe wyboru pliku. Wybranemu plikowi należy nadać dodatkowo rozszerzenie kończąc nazwę pliku frazą „.txt”. ponadto polecenie zeruje dotychczas zapisane w programie dane.
 - Ręczny Start/Stop – uruchamia polecenie odpowiedzialne za ręczny Start i Stop pomiaru. Rejestracja rozpoczyna jest i kończona jednym przyciskiem (rys. 21.). Przy uruchomieniu programu opcja ta jest niedostępna, uaktywnia się dopiero po wybraniu pliku poleceniem „Nowy”

- *A*utomatyczny Start/Stop – wywołuje okno ustawień pomiaru automatycznego (rys. 23).
- *K*oniec – wywołuje okno zakończenia programu
- *W*idok
 - *K*onfiguracja – wywołuje okno konfiguracji modułu kontrolno-pomiarowego ADAM-4011
 - *K*onsola – pokazuje/ukrywa pole do ręcznego wprowadzenia komendy ASCII służącej do komunikacji z urządzeniem ADAM-4011 oraz wyświetla pole zawierające odpowiedź urządzenia na daną komendę
- *P*omoc
 - *Q* Programie – wywołuje okno dialogowe z informacjami o programie, cel, autor...
 - *S*chemat układu pomiarowego – wyświetla okno ze schematem układu pomiarowego, kliknięcie na obrazie powoduje zamknięcie okna i powrót do programu

Przed wybraniem odpowiedniego trybu pomiaru (ręczny bądź automatyczny) należy najpierw wybrać plik, do którego zapisywane będą wyniki. Powinien być to plik tekstowy z rozszerzeniem *.txt. W tym celu należy wybrać pozycję z menu: *Pomiar* -> *Nowy*. Wówczas wyświetli się okno dialogowe wyboru pliku. Ścieżka dostępu do wybranego pliku, jak również



Rysunek 1. Program do pomiaru temperatury - ekran pomiaru ręcznego

aktualnie ustawiony tryb pomiaru pokazywane są na bieżąco w pasku stanu na dole głównego ekranu programu.

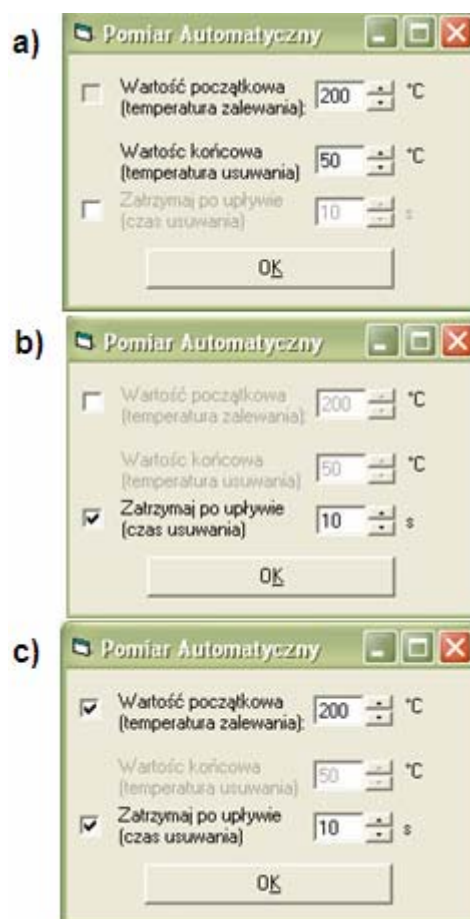
3.1.1.1. Pomiar w trybie ręcznym

W trybie ręcznym użytkownik sam decyduje o rozpoczęciu i zakończeniu pomiaru. Granice te wyznaczone są w momencie naciśnięcia przycisku START/STOP, który uaktywnia się po wybraniu odpowiedniej opcji z menu, mianowicie: *Pomiar* --> *Ręczny Start/STOP* (rys. 22). Po naciśnięciu przycisku START uruchomi się licznik czasu (w ms) oraz pojawi się wskazanie temperatury. W tym samym momencie napis na wspomnianym przycisku zmieni się na STOP, a jego naciśnięcie tym razem wywoła zatrzymanie pomiaru. Po kolejnym użyciu przycisku uruchomi się kolejny cykl pomiarowy i kolejne punkty pomiarowe będą się dopisywać we wcześniej wybranym pliku, aż do momentu, kiedy stworzony zostanie nowy plik z pomiarem (menu: *Pomiar* → *Nowy*).

3.2.1.2. Pomiar w trybie automatycznym

Aktywacja pomiaru w trybie automatycznym następuje po wybraniu w menu: *Pomiar* → *Automatyczny START/STOP*. Wówczas wyświetli się okno konfiguracji pomiaru, gdzie użytkownik ma możliwość wyboru warunków rozpoczęcia startu i początku pomiaru (rys. 23). Dostępne są trzy możliwości:

- Wybór temperatury początku i końca pomiaru, czyli temperaturę zalewania i temperaturę usuwania odlewu z kokili; po potwierdzeniu ustawień przyciskiem *OK* rejestracja pomiaru rozpocznie się przy wartości większej lub równej temperaturze zalewania i zakończy przy temperaturze mniejszej lub równej temperaturze usuwania odlewu z kokili (rys. 3.2.1.2 a)
- Wybór temperatury początku pomiaru (temperatury zalewania) oraz czasu trwania pomiaru (czas usuwania odlewu z kokili) – rejestracja pomiaru rozpocznie się w momencie osiągnięcia temperatury większej lub równej temperaturze w polu *Wartość początkowa*



Rysunek 3.2.1.2 Możliwe warianty ustawień pomiaru automatycznego

(temperatura zalewania) i zakończy się po upływie czasu, którego wartość podana jest w polu *Zatrzymaj po upływie (czas usuwania)* [s] (rys. 3.2.1.2 c) Ustawienie czasu w [s] (czas usuwania), po upływie którego rejestracja pomiaru się zatrzyma – rejestracja rozpocznie się niezwłocznie po potwierdzeniu ustawień przyciskiem *OK*. (rys. 3.2.1.2 b)

W trakcie pomiaru automatycznego pokazany jest czerwony przycisk **STOP** umożliwiający w każdej chwili przerwanie rejestracji pomiaru (rys. 3.2.1.2. 3).



Rysunek 3.2.1.2. 3. Główny ekran programu w trakcie wykonywania pomiaru automatycznego

Po zakończeniu pomiaru wyświetli się komunikat informacyjny potwierdzający poprawne przeprowadzenie rejestracji temperatury.

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Ćwiczenie składa się z części doświadczalnej, podczas której wykonuje się odlew i rejestruje przebieg zmian jego temperatury w czasie oraz z części analitycznej, w której wyznacza się ten przebieg przy pomocy dwóch opisanych w pkt. 3 metod obliczeniowych. Następnie porównuje się otrzymane wyniki ze sobą, wyciągając wnioski dotyczące przyczyn zaobserwowanych rozbieżności.

4.1. Część doświadczalna

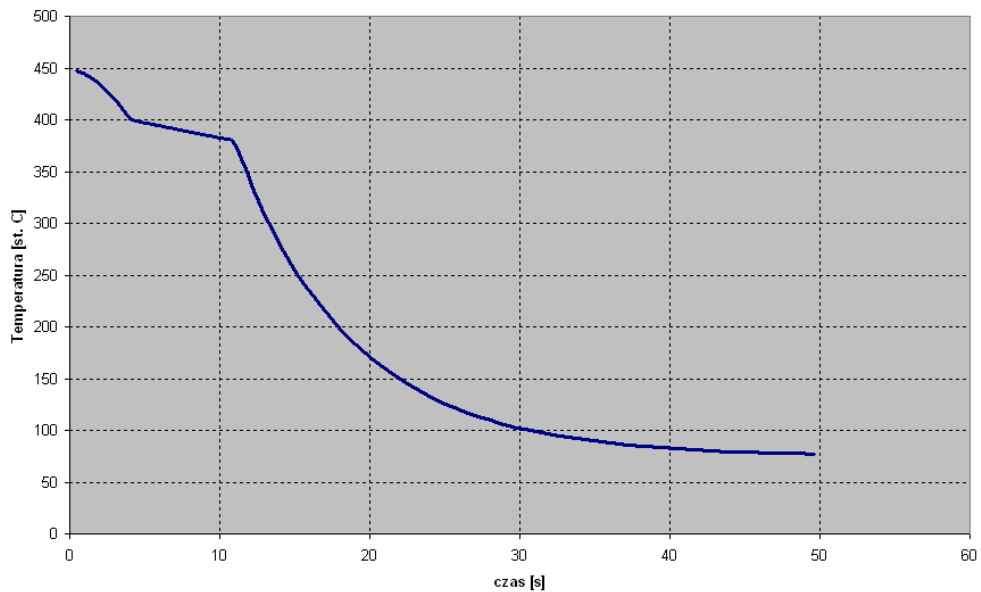
1. Stosując się do wskazówek prowadzącego, sprawdzić:
 - poprawność zamknięcia kokili,
 - temperaturę ciekłego stopu w piecu,
 - pewność połączeń przewodów termoelektrycznych,
2. Zmierzyć temperaturę kokili i ciekłego stopu i zanotować.
3. Uruchomić program rejestrujący temperaturę.
4. Zalać kokilę aż do pokazania się metalu w nadlewie.
5. Po upływie kilkudziesięciu sekund (na znak prowadzącego) wyłączyć rejestrator.
6. Zmierzyć temperaturę kokili i zanotować.
7. Wykonać wykresy krzywych stygnięcia.
8. Wyjąć odlew z kokili i zważyć go.

4.2. Część obliczeniowo-analityczna

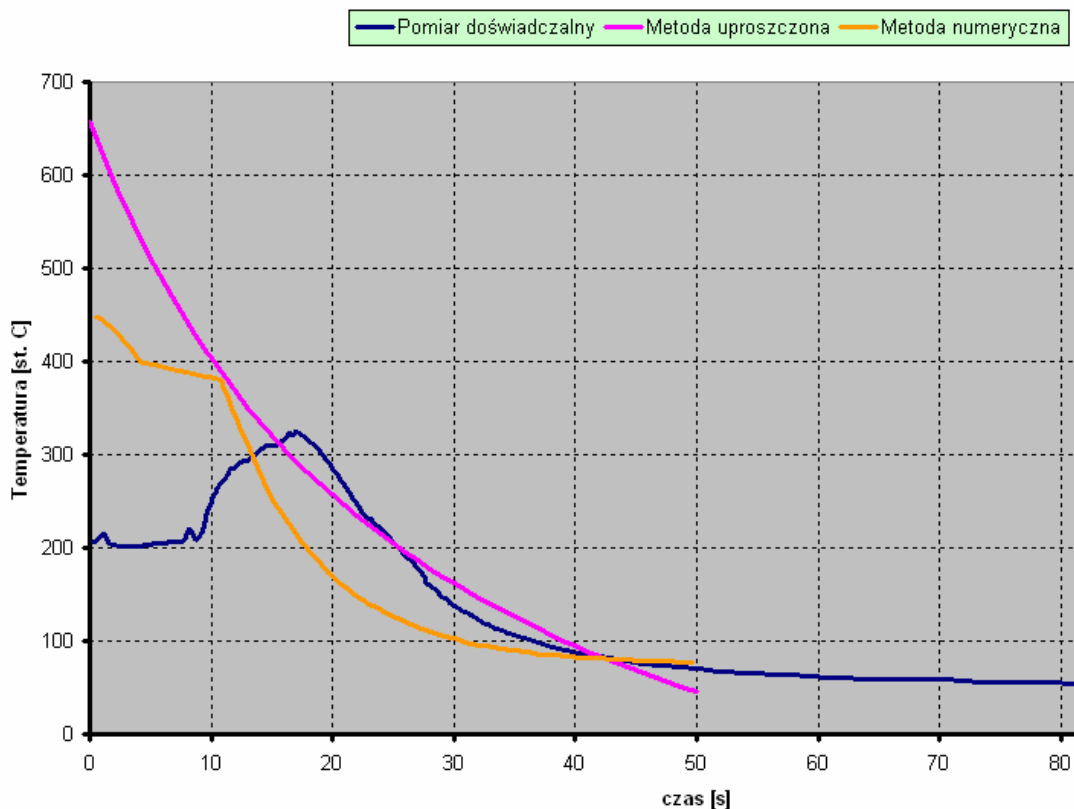
Za wyświetlanie wyników pomiarów oraz wykresów odpowiadają makra uruchamiane opcjami w menu *Wykresy* i *Wyniki*. Wyświetlany jest również arkusz DaneObl() z danymi do obliczeń. Dodatkowo przy wybraniu opcji *Obliczenia* → *Krzywa stygnięcia metodą numeryczną* wyświetli się arkusz DaneObl, na którym dodatkowo jeszcze pokazany jest przycisk OK, potwierdzający dane i wywołujący odpowiednią procedurę obliczeń – makro: pokaz_dane_OK(). W przypadku opcji *Plik* → *Pokaż dane wejściowe* wyświetla się arkusz DaneObl bez przycisku OK, za pomocą makra pokaz_dane().



Krzywa stygnięcia wyznaczona metodą numeryczną



Wykres zbiorczy. Porównanie



Porównanie otrzymanych wyników i sformułowanie wniosków. Należy porównać przebiegi otrzymanych krzywych stygnięcia, zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym. Przeprowadzić próbę wyjaśnienia przyczyn wszystkich zaobserwowanych różnic, mając na uwadze z jednej strony założenia upraszczające przyjmowane w obliczeniach, a z drugiej możliwości popełnienia błędów pomiarowych.

5. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać wszystkie uzyskane wyniki pomiarów, wykresy i dokonane obliczenia. Po ustnym omówieniu wniosków z prowadzącym ćwiczenie najważniejsze z nich należy także umieścić w sprawozdaniu.

Literatura

1. Skarbiński M.: Oprzyrządowanie odlewnicze dla produkcji seryjnej. WNT, Warszawa 1964.
2. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.
3. Wiejnik A. I.: Tieplowyje osnovy tieorii litja. Maszgiz. Moskwa 1953.