

#### 4.1 Wprowadzenie

W ramach realizacji zadania nr 4 prowadzono badania właściwości technologicznych żeliwa sferoidalnego do pracy w niskiej temperaturze, które z punktu widzenia rodzaju osnowy metalograficznej jest żeliwem ferrytycznym, najkorzystniej, jeśli jest „czysto” ferrytyczne, a jego struktura jest uzyskiwana w stanie lanym. W innych wypadkach, jeśli w strukturze pojawia się perlit zachodzi konieczność prowadzenia procesu wyżarzania ferryt żującego, najczęściej w temperaturze powyżej 900°C przez okres kilku godzin. W ramach tej części zadania określano:

- kinetyki skurczu odlewniczego,
- wielkości skurczu objętościowego,
- skłonności do zabieleni,
- wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia.

Poznanie tych właściwości żeliwa z technologii z podwójną rafinacją jest niezbędne dla prawidłowego opracowania i przygotowania technologii odlewania elementów do pracy w niskiej temperaturze. Odlewy, z uwagi na ich przeznaczenie, powinny mieć właściwą strukturę, ale ponadto powinny charakteryzować się dużą zwięzłością budowy i powinny być pozbawione wad wewnętrznych, które najczęściej powiązane są ze zjawiskami skurczowymi. Podobnie jest pozostałymi właściwościami, szczególnie wrażliwością na szybkość stygnięcia. Ta ostatnia cecha decyduje o tym, jaką strukturę będzie się uzyskiwać w odlewach o zróżnicowanej grubości ścianek.

W ramach drugiej części zadania badania zogniskowano na właściwościach fizycznych i mechanicznych i użytkowych. Obejmowały one:

- Ocenę gęstości pozornej żeliwa, a ściślej ocenę stopnia jej zwiększenia po rafinacji, która prowadzi do usuwania wtrąceń i obniżenia zagazowania żeliwa,
- określenie właściwości mechaniczne ( $R_m$ ,  $R_{02}$ ,  $A_5$ , HB) w temp. otoczenia,
- określenie znormalizowanej udarności ( $U_v$ ) w obniżonej temperaturze,
- badania zmęczenia mechanicznego, niskocyklowego.

Właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego, podobnie jak innych tworzyw są ze sobą sprzężone, zmiana jednej z nich generuje zmiany pozostałych. W wypadku gatunków żeliwa sferoidalnego do pracy w niskiej temperaturze oczekuje się przede wszystkim wysokiej plastyczności i udarności, właściwości osnowy ferrytycznej lub austenitycznej. Przy takich rodzajach struktury osnowy zarówno wytrzymałość  $R_m$  jak i twardość HB utrzymują się na niskich poziomach,  $R_m < 450\text{MPa}$ , a twardość HB  $< 170$  jednostek. Poniżej prezentowane są wyniki badań zarówno tych wymienionych na początku, jak i tych powyżej.

#### **4.1 . Określenie właściwości technologicznych żeliwa wytwarzanego w nowej technologii**

#### **4.2. Badania kinetyki skurczu żeliwa**

W grupie właściwości odlewniczych żeliwa ważną rolę w opracowywaniu technologii wykonania ogrywa zarówno skurcz liniowy jak i skurcz objętościowy. Skurcz liniowy, zwany także skurczem odlewniczym ważny jest przy projektowaniu technologii i budowie omodelowania. Wymiary modeli są każdorazowo dostosowane do wielkości skurczu liniowego stopu, z którego wytwarzane są odlewy. Żeliwo sferoidalne przeznaczone do pracy w warunkach obciążeń dynamicznych zaliczane jest do grupy żeliw o składzie lekko nadeutektycznym. Duża ilość grafitu wydzielająca się podczas krystalizacji eutektyki silnie wpływ na kinetykę skurczu i ogólnie sprzyja zmniejszeniu wartości skurczu liniowego do poziomu poniżej 1,0%. Ferrytyczne żeliwo sferoidalne, a takie jest przedmiotem badań w ramach projektu, ma praktycznie najniższy skurcz spośród wszystkich gatunków żeliwa.

W Ramach projektu wykonano badania skurczu i badania jego kinetyki z zastosowaniem opracowanej na Wydziale Odlewnictwa (Katedra Technologii Form) metodyki pomiarowej, z wykorzystaniem nowego stanowiska pomiarowego. Budowę stanowiska pomiarowego przedstawiono na kolejnych rysunkach. Na rysunku 4.1 została przedstawiona koncepcję nowego stanowiska do badań przebiegów skurczu liniowego stopów. W nowej wersji wnętrza formy odlewanego pręta zostaje zamykana od strony pomiarowej cienkościennym żeliwnym „korkiem” (14). W trakcie zalewania formy metalem „korek” zostaje zespolony z odlewem pręta próbnego (3) na początku tworzenia się naskórka odlewniczego. Tulejowy kształt korka z odwrotną zbieżnością na wewnętrznych ściankach ułatwia pełne jego zespolenie z odlewem. W trakcie pomiarów zmian długości wlewka próbnego podczas stygnięcia rejestrowany jest ruch zewnętrznej powierzchni „korka” przy pomocy laserowego czujnika przemieszczeń (16). Pomiar ma charakter ciągły, w tzw. czasie rzeczywistym. Istnieje możliwość wizualizacji przebiegu skurczu. Nieruchomy koniec wlewka utwierdzony jest krótkim prętem (11), który jest zespolony ze skrzynią formierską (1) i ramą (18). Laserowy czujnik (16) jest przytwierdzony do ramy (18) i pozostaje oddzielony od skrzyni. Ewentualne zmiany wymiarów nagrzewanej skrzyni formierskiej nie wpływają na rejestrowane zmiany wymiarów. Dzięki opisanemu rozwiązaniu ograniczono do minimum

efekty rozszerzania się niezbędnych dla wykonania pomiarów elementów układu pomiarowego. Długie (kilku, kilkunastocentymetrowe) pręty stalowe (3) stosowane w dotychczasowych badaniach zostały zastąpione krótkimi elementami o długości zaledwie kilku milimetrów. Niestety, tych elementów nie można całkowicie wyeliminować z układu pomiarowego.

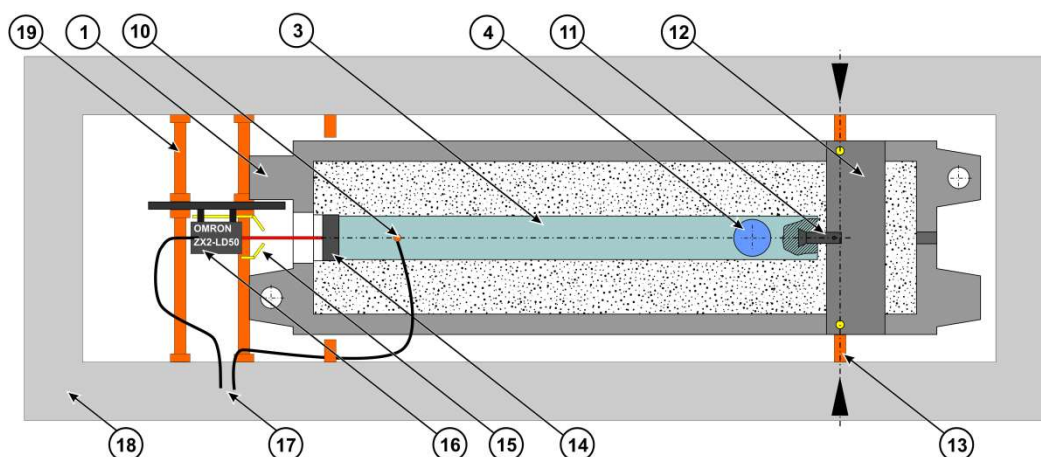
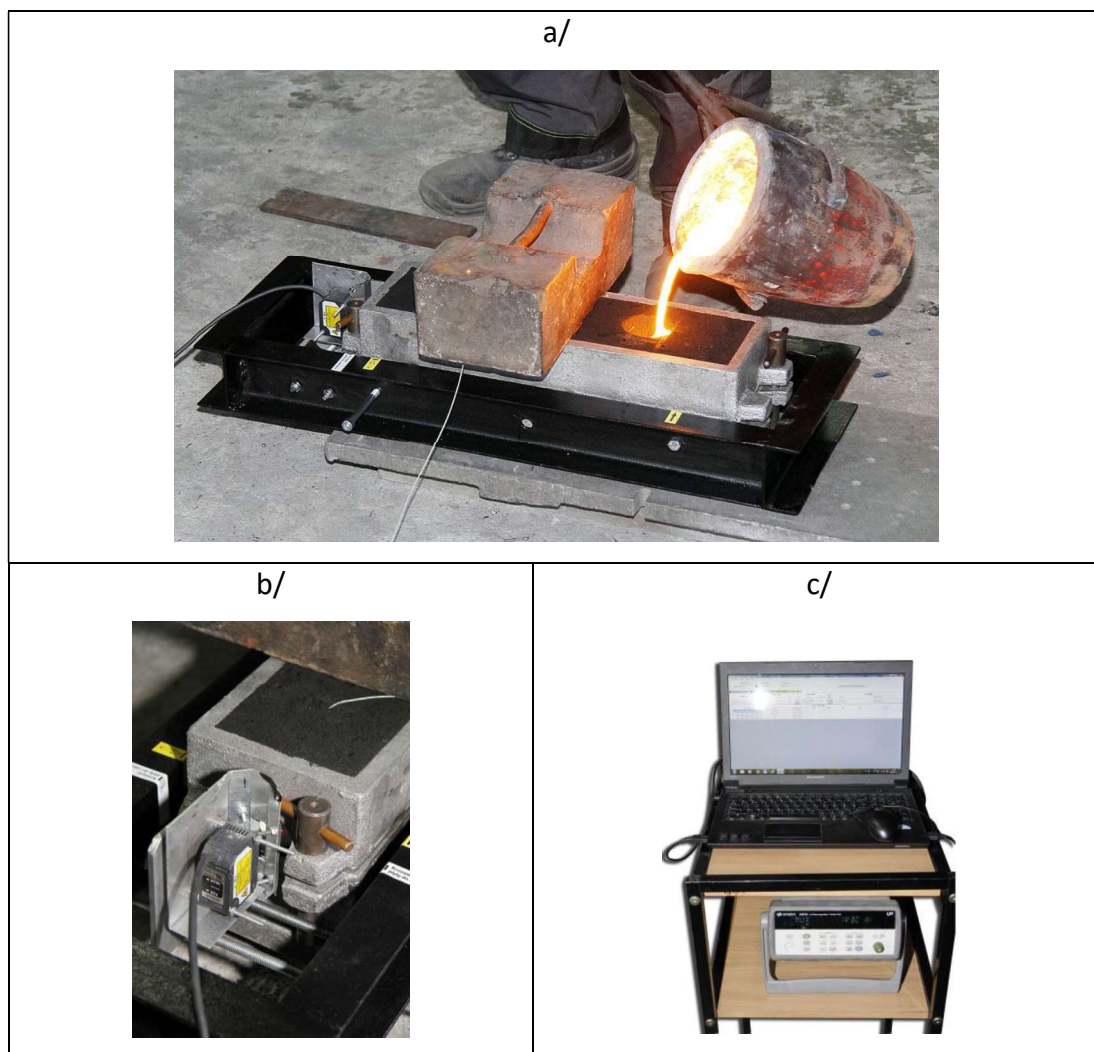


Fig. 4.1. Schemat stanowiska do badań kinetyki skurczu stopów odlewniczych techniką laserową: 1 - skrzynka formierska; 2 - rama, 3 – odlew pręta; 4 – wlew główny; 5 - ciągnio nieruchome (stałe); 6 – blokada ciągną; 7 – połączenie nieruchomego końca próbki ze skrzynią i ramą; 8 – termopara; 9 – „korek” metalowy na ruchomym końcu próbki; 10 – osłona lasera ze szczeliną; 11 – laserowy czujnik przemieszczeń.

Fotografia stanowiska pomiarowego podczas realizacji pomiaru wykonywanego w badaniach skurczu żeliwa pokazano na rysunku 4.2. Forma wykonana została z bentonitowej masy wilgotnej, podobnie jak to jest w Odlewni, gdzie stosowana jest technologia form oparta o masy bentonitowe. Rodzaj masy formierskiej ma wpływ na przebieg i wielkość skurczu, co oznacza, iż badania skurczu należy realizować w takiej samej masie jak i wykonywane są odlewy. Badany jest przebieg skurczu liniowego niehamowanego, tzw. swobodnego skurczu. Odlewny jest pręt o średnicy  $\phi$  30mm i długości 350mm. Po zalaniu formy żelawem wykonywany jest pomiar przemieszczania się tzw. swobodnego końca pręta, które wywołane jest kurczeniem się metalu podczas stygnięcia. Pomiar laserowy pozwala na kontrolę przemieszczenia z dokładnością  $\Delta l = 0,02\mu m$  i częstotliwością próbkowania co pół

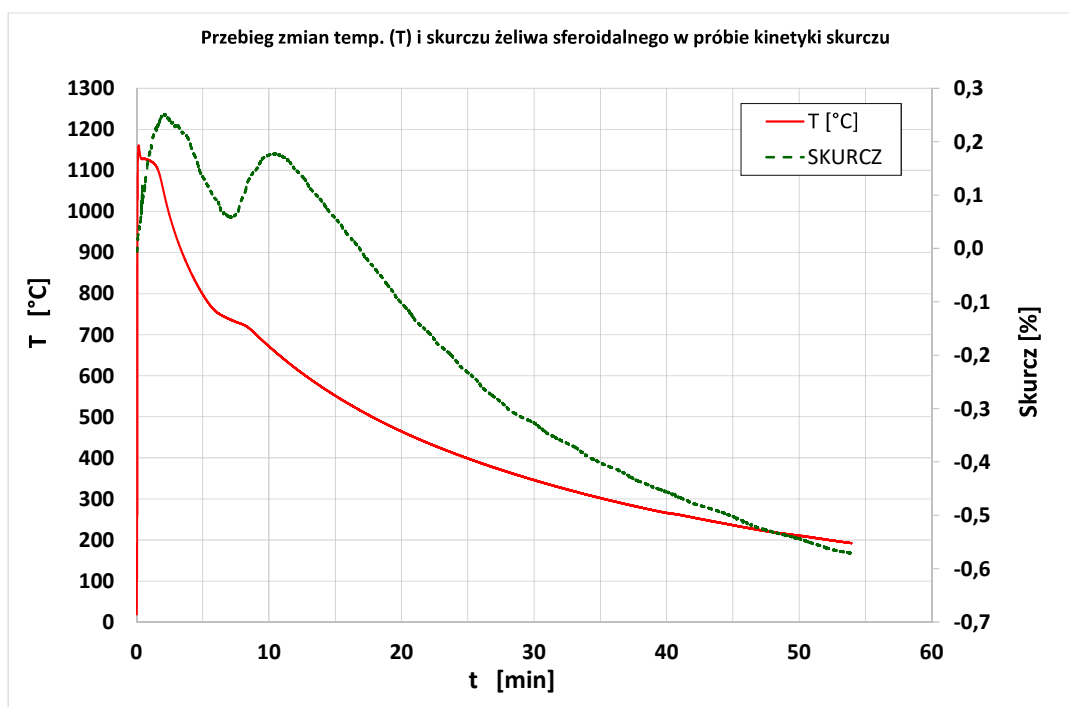
sek. (0,50 sek.) . Dzięki tak precyzyjnym pomiarom uzyskuje się rzeczywisty obraz przebiegu zmian wymiarów próbki podczas krzepnięcia i stygnięcia.



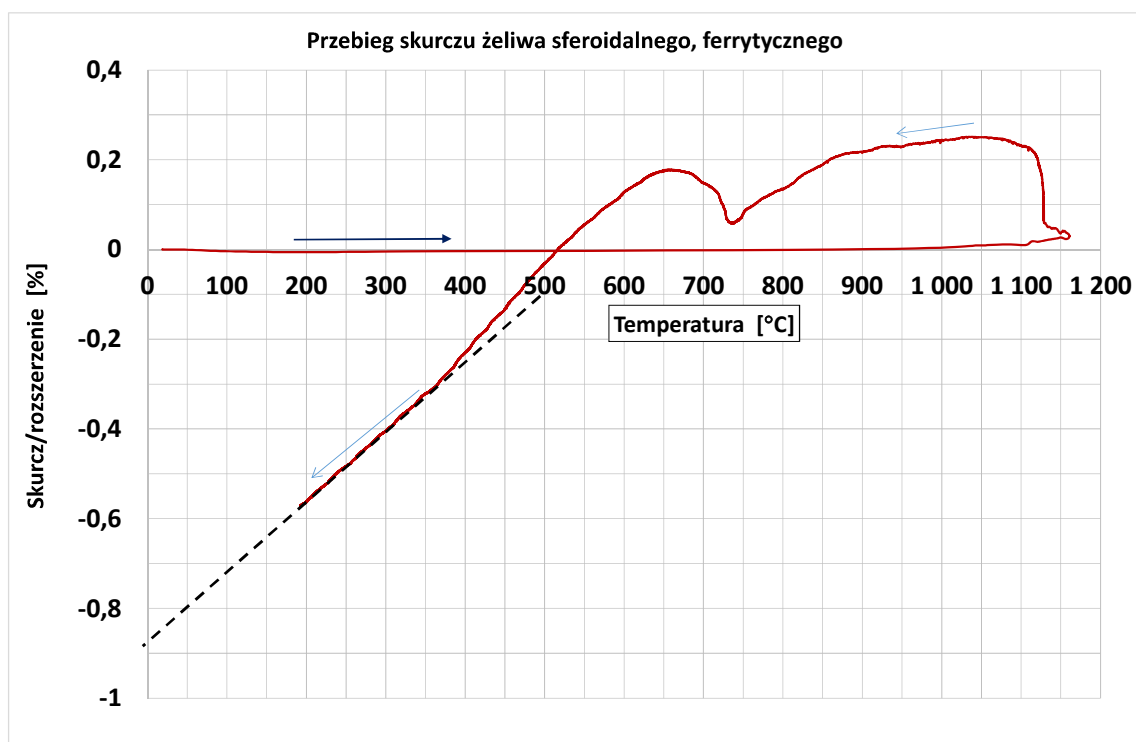
Rys.4.2. Wykonywanie próby skurczu i zapis jego kinetyki

Zarejestrowany przebieg skurczu żeliwa o składzie: C = 3,70; Si=2,73; Mn = 0,029; P = 0,045; S = 0,006; i Mg =0,034 % przedstawiono na rysunkach 4.3 ÷ 4.4. Rysunek 4.3 przedstawia przebiegi zmian temperatury i skurczu liniowego zarejestrowane podczas badań żeliwa. Można zauważyć, że na krzywej skurczu pojawiają się dwa maksima, które oznaczają chwilowy przyrost długości krzepnącej próbki (żeliwa w próbie pręta).





Rys. 4.3. Przebiegi zmian temperatury i skurczu żeliwa sferoidalnego, przeznaczonego do pracy w warunkach niskiej temp. i dynamicznych obciążeń



Rys. 4.4. Kinetyki skurczu (przebieg) żeliwa sferoidalnego, przeznaczonego do pracy w warunkach niskiej temp. i dynamicznych obciążeń

Jeszcze wyraźniej widać te zmiany na rysunku 4.4, na którym przedstawiono przebieg zmian wymiarowych próbki w funkcji chwilowej wartości temperatury wlewka (próbki prętowej do badań skurczu). Pierwszy przyrost pojawia się przy temperaturze z zakresu  $1120 \div 1150^{\circ}\text{C}$ , drugi w pobliżu temperatury  $\sim 725^{\circ}\text{C}$ , która odpowiada przemianie eutektoidalnej. Ten dwukrotny przyrost długości, wynoszący sumarycznie około 0,50% powoduje, że wartość końcowego skurczu, zwanego odlewniczym jest w przypadku **tego żeliwa poniżej 1,0% ( $\alpha = 0,90\%$ )** i jest jednym z najmniejszych dla stopów odlewniczych.

Należy dodać, iż pojawianie się zwiększeń długości próbki podczas krzepnięcia (pierwszy garb) jest skutkiem wydzielania się grafitu z fazy ciekłej, co prowadzi do przyrostu objętości (grafit ma kilkakrotnie większą objętość właściwą niż żeliwo w stanie ciekłym (i stałym tym bardziej)). Krzepnący odlew (pręt) zwiększa w tym okresie swoją objętość, a zatem i długość. Formy wilgotne, a dla takich opracowywana jest technologia są formami podatnymi, który podczas „puchnięcia” żeliwa są rozpychane, stosownie do przyrostu objętości żeliwa. Im więcej wydziela się grafitu, tym rozepchniecie (przyrost) jest większe i tym mniejszy jest wynikowy (końcowy) żeliwa. Wytwarzane w ramach projektu żeliwo jest żeliwem ferrytycznym, a zatem zawiera dużo grafitu, co skutkuje małym skurczem liniowym.

Zjawisko rozpychania form (zwiększania objętości żeliwa) opisane przy okazji będzie mieć istotny wpływ na przebieg zasilania odlewów. Formy bentonitowe wilgotne utrudniają zasilania odlewów żeliwnych głównie ze względu na ich wysoką podatność, małą wytrzymałość na ściskania.

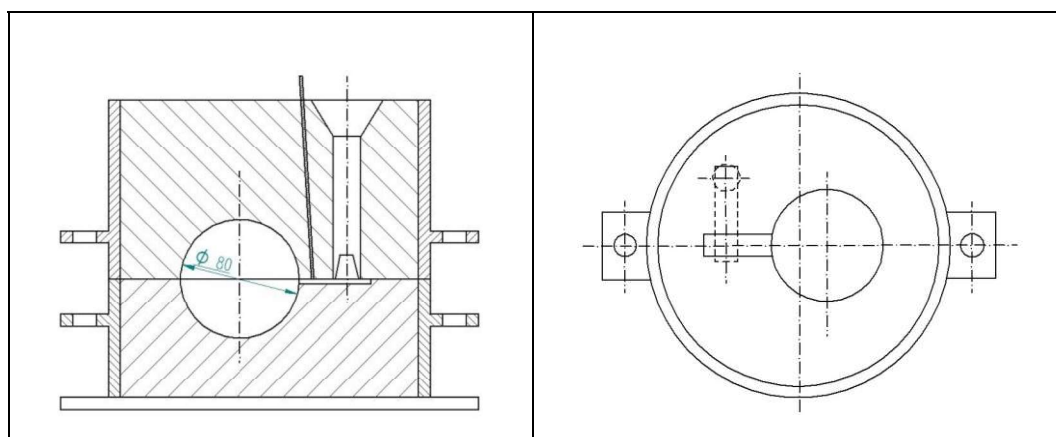
### 3. Badania skurczu objętościowego żeliwa

Ocena skurczu objętościowego stopów związana jest z koniecznością jego kompensowania z nadlewów dla ograniczenia porowatości i jam skurczowych w odlewach. Istnieje wiele metod określania skurczu objętościowego stopów, często dana metoda jest zalecana do badania skurczu określonych stopów. W Polsce dla żeliwa zaleca się wg normy branżowej BN – 65/4051 - 03 odlewania sześcianu o boku 125 mm, a następnie mierzy się sumaryczną objętość jamy zewnętrznej i wewnętrznej. Dla pomiarów wewnętrznej jamy

odlew kostki należy „rozłupać” wzdłuż technologicznych nacięć, co jest możliwe dla żeliwa szarego z grafitem płatkowym, trudne dla żeliwa sferoidalnego.

Żeliwo sferoidalne, z uwagi na przyrosty objętości podczas krzepnięcia eutektyki grafitowej, jest stopem, w którym niekiedy obserwuje się zjawisko samo zasilania. Niestety zjawisko to występuje jedynie wtedy, gdy formy odlewnicze charakteryzują się dużą sztywnością i posiadają zdolność stawiania oporu ciśnienia metalu na ich powierzchnię podczas krzepnięcia eutektyki. Z wielu prac badawczych i praktyki wynika, iż w przypadku form wilgotnych skłonność do powstawania wad skurczowych w odlewach z żeliwa sferoidalnego jest duża.

Do wykonania badań skłonności żeliwa sferoidalnego po rafinacji wybrano metodę odlewania kuli o znormalizowanej średnicy  $d = 80$  mm. Metoda odlewania kuli jest stosowana w Wielkiej Brytanii i USA do oceny skłonności do tworzenia jam skurczowych i rzadzisz. Forma zastosowana w badaniach zrealizowanych w ramach projektu została wykonana wg koncepcji przedstawionej na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Rysunek formy zastosowanej w próbie wyznaczenie skłonności żeliwa sferoidalnego do tworzenia jam skurczowych

Wygląd formy zastosowanej do odlewania kuli pokazano na rysunku 4.6. Forma została wykonana w dwóch wersjach masy formierskiej, tj. masy wilgotnej z bentonitem (masy klasyczne) i masy ze szkłem wodnym. Celem dodatkowo wykonanej próby z zastosowaniem masy ze szkłem wodnym było uzyskanie oceny skłonności do tworzenia wad skurczowych (jamy skurczowej) żeliwa sferoidalnego ferrytycznego w przypadku stosowania

form sztywnych. Jakkolwiek technologia form wilgotnych nie daje możliwości uzyskiwania form sztywnych, to przy małej wilgotności masy oraz wysokim stopniu zagęszczenia zwiększa się ich sztywność. Wykonanie badania w dwóch różnych masach ma na celu zweryfikowanie tezy o wpływie sztywności form na wielkość jam skurczowych w odlewach z żeliwa sferoidalnego.



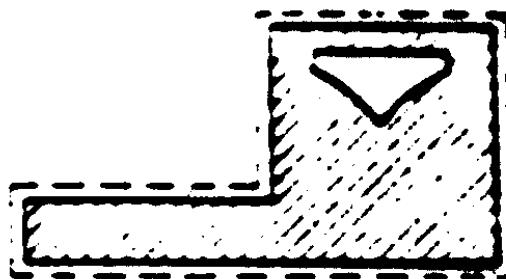
Rys. 4.6. Wykonywanie formy dla oceny skłonności żeliwa do tworzenia jam skurczowych, metoda z zastosowaniem modelu w kształcie kuli ( $d = 80\text{mm}$ )



Rys. 4.7. Zestaw prób wykonywanych podczas wytopów doświadczalnych w odlewni Wydziału Odlewnictwa AGH: 1 – forma odlewu doświadczalnego, 2 – forma próby Y, 3 – próba schodkowa (wrażliwość na szybkość stygnięcia), 4 – formy do badań skłonności do tworzenia jam skurczowych, 5 – próby klinowe – zdolność do grafityzacji, 6 – analiza termiczna, 7 – próbki do badań spektrometrycznych.

Na rysunku 4.7 pokazano zestaw prób technologicznych, które wykonywano podczas kolejnych wytopów żeliwa sferoidalnego w technologii z użyciem podwójnej rafinacji. Dla uzyskania pełnej oceny jakości i parametrów wytwarzanego żeliwa wykonywano: odlew testowy wybrany przez Odlewnię Drawski (1), próbę klinową Y (2), próbę wrażliwości na szybkość stygnięcia (3), ocenę skłonności do tworzenia jam skurczowych (4), próbę klinową do oceny skłonności do grafityzacji (5), odlewano próbki do analizy termicznej (6) oraz próbki do analizy spektrometrycznej (7). W niektórych wytopach, zamiast próbek dla oceny skłonności do tworzenia jam skurczowych odlewano inne próby np. do badania skurczu liniowego.

Wyznaczenie wielkości skurczu objętościowego na podstawie próby kuli pokazanej na rysunkach 4.5 i 4.6 sprowadza się do określenia procentowej różnicy pomiędzy objętością wnętrza formy, a objętością żeliwa wypełniającego wnękę po jego zakrzepnięciu i wystygnięciu. Idea wyznaczania całkowitego ubytku ciekłego metalu, występującego podczas stygnięcia i krzepnięcia w formie zostało zobrazowane na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Schemat podziału na części składowe całkowitego ubytku ciekłego metalu w czasie stygnięcia i krzepnięcia.

W realnych warunkach, szczególnie przy złożonych kształtach odlewów mamy do czynienia z następującymi składowymi skurczu objętościowego: 1- obciągnięcia, 2- jamy skurczowe zewnętrzne, 3 - rzadziny, 4 – skurcz w stanie stałym. Wiodącą rolę w sumowaniu deficytu odgrywają trzy pierwsze składowe.

Sumaryczną objętość jamy skurczowej (skurczu objętościowego) wyznacza się z zależności:



$$V_{j.s} = V_{js.z} + V_{js.w.} = \frac{V_1 - V_3}{V_1} \cdot 100\%$$

gdzie:

$V_1$  – objętość wnęki formy (lub modelu)

$V_1$  – objętość metalu wypełniającego wnękę

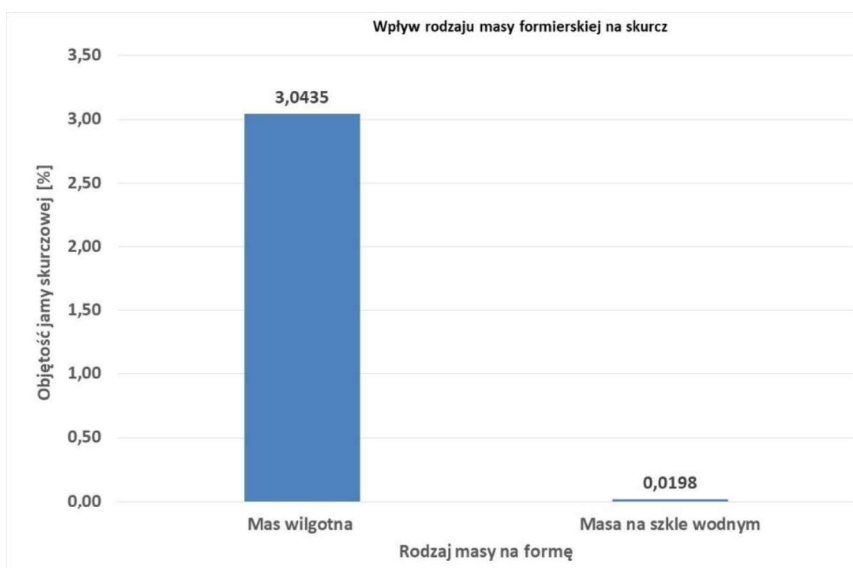
Wyznaczanie objętości metalu wypełniającego wnękę wylicza się dzieląc masę kuli uzyskaną na drodze jej ważenie, przez gęstość właściwą stopu użytego do badań (żeliwa). Gęstość właściwą wyznaczano w opisywanych badaniach na próbkach wyciętych z układu wlewowego metodą zanurzeniową (pomiar gęstości w cieczy).

Na rysunku 4.9 pokazano wygląd dwóch testowych odlewów kuli, wykonanych z tego samego żeliwa (z tej samej kadzi zalane), z tym, że jedna z nich odlana została w formie z masy klasycznej (wilgotna z bentonitem) a druga w masie ze szkłem wodnym. Można zauważyć, iż jedynie odlew kuli wykonanej w masie klasycznej posiada zewnętrzną jamę skurczową. Wysoka podatność mas wilgotnych sprzyja ich rozpychaniu, co prowadzi do zwiększania wielkości jam skurczowych.



Rys. 4.9. Wygląd odlewów kul wykonywanych w teście oceny skłonności żeliwa sferoidalnego ferrytycznego do tworzenia jam skurczowych: z lewej model kuli, kula z masy klasycznej, z prawej – kula uzyskana w masie ze szkłem wodnym.

**Wyniki badań:** badania przeprowadzono dla żeliwa uzyskanego z wsadu złożonego z: surówki (40%), złom żeliwa sferoidalnego z wcześniejszych wytopów poddanego sferoidyzacji w kadzi ze szczelną pokrywą (Tundish). Skład końcowy uzyskanego żeliwa był następujący: C = 3,70; Si=2,73; Mn = 0,029; P = 0,045; S = 0,006; i Mg =0,034 %.



Rys. 4.2. Wpływ rodzaju masy formierskiej na wielkość skurczu (jamy skurczowej)

Po wykonaniu opisanych powyżej pomiarów masy odlewów kuli oraz wyznaczeniu gęstości właściwej obliczono wielkość jamy skurczowej dla obu technologii form. Wyniki są następujące:

$$V_{js.bentonit} = 3,40\%$$

$$V_{js.szkło\ wodne} = 0,20\%$$

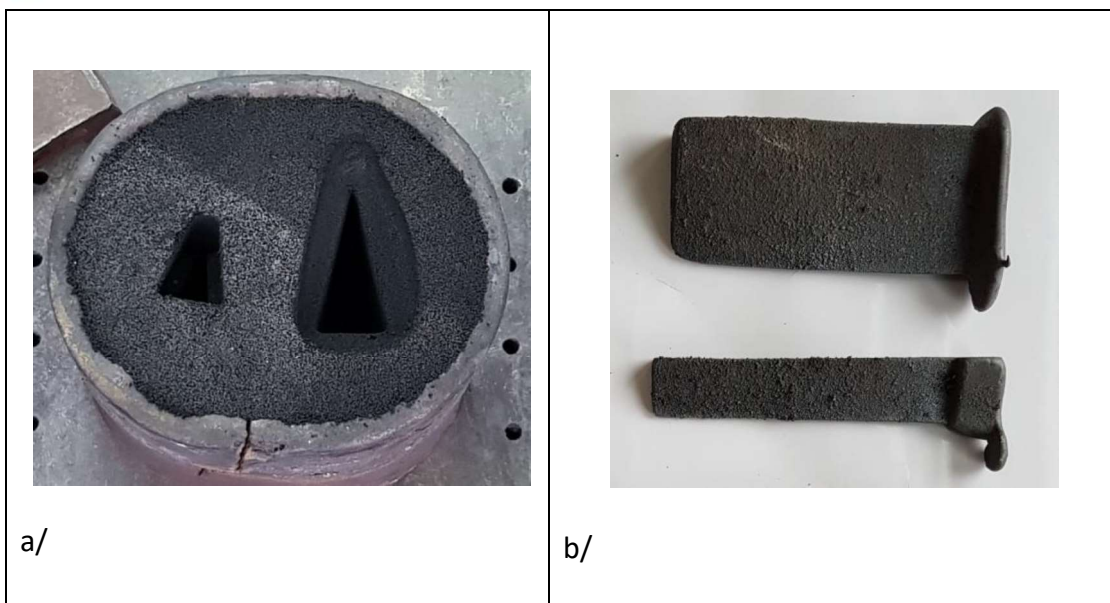
Żeliwo sferoidalne ferrytyczne, a takie wytwarzane jest z przeznaczeniem do pracy w warunkach niskiej temperatury i dynamicznych obciążeniach, z uwagi na wysokie rozszerzenie podczas krystalizacji eutektyki grafitowej, podczas ferrytyzacji charakteryzuje się ogólnie niezbyt dużą skłonnością do tworzenia jam skurczowych na tle innych stopów. Ponadto, jak wykazała próba wykonana w masie ze szkłem wodnym, żeliwo to ma dużą zdolność do samozasilania wtedy, gdy forma jest sztywna. Z tego porównania wynika, iż w technologii form stosowanych do wytwarzania odlewów z tych gatunków żeliwa (sferoidalne ferrytyczne), dla ograniczenia skłonności do powstawania wad pochodzenia skurczowego (rzadzin i jam skurczowych) powinno dążyć się do nadawania formom wysokiej sztywności. W przypadku form z masą bentonitową wilgotną sztywność można podwyższyć na drodze silnego zagęszczenia i obniżania wilgotności masy.

## 4. Badania skłonności do grafityzacji

### 4.1 Metodyka badań

Skłonność do grafityzacji żeliwa, czyli zdolność żeliwa do krzepnięcia w układzie stabilnym (z eutektyką grafitową) jest kolejną właściwością technologiczną. Zbyt mała zdolność do grafityzacji prowadzi do powstawania zabielen w odlewach, szczególnie z cienkimi ściankami. Żeliwo sferoidalne ferrytyczne charakteryzuje się składem chemicznym nadeutektycznym, co sprawia, iż posiada dużą zdolność do grafityzacji. Wprowadzanie do żeliwa dodatku Mg dla nadania zdolności do krystalizacji grafitu w postaci kulek, skokowo obniża zdolność żeliwa do grafityzacji i krzepnięcia w układzie metastabilnym. Dopiero proces modyfikacji, w którym do ciekłego żeliwa wprowadza się heterogeniczne zarodki krystalizacji komórek eutektycznych przywraca temu gatunkowi żeliwa zdolność do grafityzacji do poziomu niezbędnego do wytwarzania odlewów bez zabieleni. Z uwagi na występowanie niepewności, co do skuteczności procesu modyfikacji zachodzi konieczność kontrolowania zdolności do grafityzacji żeliwa sferoidalnego.

Ocenę zdolności żeliwa do grafityzacji, która jest niekiedy postrzegana jako cecha odwrotna do skłonności do zabielen żeliwa, prowadzi się na próbach klinowych. Istnieją branżowe (lub krajowe) normy opisujące procedurę wykonywania oceny żeliwa z punktu widzenia jego skłonności do zabieleni. W próbach tych odlewane są próbki w postaci klina, który po zakrzepnięciu poddawany jest łamaniu dla stworzenia możliwości wizualnej oceny przełomu. Na przełomie występują obok siebie dwie strefy: tam gdzie ścianka klina jest najcieńsza występuje struktura zabilona (węgiel związany jest w strukturze w cementycie) oraz w strefie wolniejszego krzepnięcia – struktura z węglem w postaci grafitu (strefa szara). Im większy obszar zajmuje strefa zabilona tym oceniane żeliwo ma większą skłonność do tworzenia zabieleni i mniejszą skłonność do grafityzacji. Forma, w której odlewano próby klinowe oraz same odlane próby pokazano na rysunku 4.10.



Rys. 2.10. Forma (a) i próbki do oceny skłonności do zabieleni wykonane wg zaleceń normy żeliwa Meehanite.

Zdolność do zarodkowania żeliwa sferoidalnego oceniano w stanie „po sferoidyzacji” i po modyfikacji, w trakcie rozlewania go do pozostałych form. Badania zdolności do grafityzacji (skłonności do zabieleni) objęto końcowej serii wytopów żeliwa w technologii z podwójną rafinacją. Była to faza prac badawczych, kiedy zostały już określone niezbędne parametry technologii w takich obszarach jak: optymalnej struktury wsadu metalowego, technologii topienia oraz wykonywania takich zabiegów jak: dwustopniowa rafinacja, sferoidyzacja na dwa sposoby (metodą PE i z użyciem kadzi ze szczelną pokrywą (technologia Tundish) oraz zostały określone sposoby (technologia) wykonywania modyfikacji żeliwa. Oceniano zatem żeliwo uzyskiwane w technologii z aplikacją podwójnej rafinacji, którą zaproponowała (opracowała wstępnie) Odlewnia „Drawski S.A. W tabeli 2.1 zestawiono składy chemiczne żeliwa uzyskane w kolejnych wytopach

| Nr<br>wytoku | Skład chemiczny           |       |      |         |         |          |        |         |          |         |         |        |
|--------------|---------------------------|-------|------|---------|---------|----------|--------|---------|----------|---------|---------|--------|
|              | Zawartość pierwiastka [%] |       |      |         |         |          |        |         |          |         |         |        |
|              |                           | C     | Si   | Mn      | P       | S        | Cr     | Ni      | Cu       | Al.     | Mg      | Fe     |
| R1           | ////                      |       |      |         |         |          |        |         |          |         |         |        |
| R2.1         | surówka                   | 3,40  | 0,74 | 0,00470 | 0,0962  | <0,00050 | 0,0359 | 0,0291  | 0,00877  | 0,00363 | 0,00149 | 95,62  |
|              |                           | 3,44  | 0,73 | 0,00539 | 0,0961  | <0,00050 | 0,0367 | 0,0303  | 0,00884  | 0,00353 | 0,00179 | 95,58  |
| R2.2         | po sfero. Przed mod.      | 3,51  | 1,53 | 0,00920 | 0,0724  | <0,00050 | 0,0385 | 0,0243  | 0,00705  | 0,01870 | 0,00286 | 94,73  |
|              |                           | 3,42  | 1,53 | 0,00929 | 0,0681  | <0,00050 | 0,0396 | 0,0251  | 0,00460  | 0,01850 | 0,00230 | 94,82  |
| R2.3         | po wszystkim              | 3,45  | 2,49 | 0,03460 | 0,0529  | <0,00050 | 0,0408 | 0,0234  | 0,00860  | 0,01970 | 0,02630 | 93,80  |
|              |                           | 3,66  | 2,49 | 0,03420 | 0,0449  | <0,00050 | 0,0386 | 0,0204  | 0,02340  | 0,01850 | 0,02110 | 93,60  |
| R3.1         | z pieca                   | 3,72  | 1,72 | 0,01340 | 0,0724  | <0,00050 | 0,0407 | 0,0303  | 0,00681  | 0,01980 | 0,00355 | 94,31  |
| R3.2         | po sfero. Przed mod.      | >6,75 | 2,65 | 0,01730 | <0,0012 | <0,00050 | 0,0338 | 0,0288  | 0,12355  | 0,02590 | 0,04885 | <90,11 |
| R3.3         | po wszystkim              | 3,99  | 2,85 | 0,04260 | 0,0565  | <0,00050 | 0,0398 | 0,0310  | 0,01580  | 0,03270 | 0,04320 | 92,83  |
| R4.1         | z pieca                   | 3,86  | 1,61 | 0,01220 | 0,0713  | <0,00050 | 0,0386 | 0,0282  | 0,00508  | 0,01710 | 0,00147 | 94,29  |
| R4.2         | po wszystkim              | 3,74  | 2,54 | 0,04050 | 0,0685  | <0,00050 | 0,0389 | 0,0248  | <0,00619 | 0,02670 | 0,03020 | 93,42  |
| R5.1         | z pieca                   | 3,90  | 1,52 | 0,01340 | 0,0663  | <0,00050 | 0,0381 | 0,0244  | <0,00636 | 0,01070 | 0,00149 | 94,35  |
| R5.2         | po wszystkim              | 4,19  | 2,58 | 0,04530 | 0,0394  | <0,00050 | 0,0370 | 0,0216  | 0,01490  | 0,02610 | 0,02710 | 92,95  |
| R6.1         | z pieca                   | 4,30  | 1,78 | 0,01370 | 0,0566  | <0,00050 | 0,0428 | 0,0263  | <0,00624 | 0,02140 | 0,00135 | 93,60  |
| R6.2         | po wszystkim              | >6,75 | 3,50 | 0,03830 | <0,0012 | <0,00050 | 0,0393 | 0,0245  | 0,13500  | 0,02740 | 0,02250 | <89,31 |
| R7.1         | z pieca                   | 4,12  | 1,69 | 0,02400 | 0,0520  | 0,0063   | 0,0190 | <0,0025 | 0,00590  | 0,01200 | <0,0010 | 94,00  |
| R7.2         | po wszystkim              | 3,70  | 2,73 | 0,02900 | 0,0600  | 0,0058   | 0,0210 | <0,0025 | 0,00850  | 0,03400 | 0,01800 | 93,30  |



|       |               |       |      |         |          |          |        |         |          |         |         |        |
|-------|---------------|-------|------|---------|----------|----------|--------|---------|----------|---------|---------|--------|
| R8    | 1             | 4,12  | 2,73 | 0,03300 | 0,0480   | 0,0059   | 0,0250 | <0,0025 | 0,01200  | 0,02300 | 0,03400 | 92,90  |
| R8    | 2             | 3,79  | 2,74 | 0,03300 | 0,0540   | 0,0068   | 0,0250 | 0,0028  | 0,01300  | 0,02200 | 0,03100 | 93,20  |
| R9.1  | z pieca       | 4,31  | 1,68 | 0,01160 | 0,0289   | <0,00050 | 0,0045 | <0,0014 | <0,00400 | 0,02050 | 0,00142 | 93,82  |
| R9.2  | po wszystkich | 4,23  | 2,98 | 0,02190 | 0,0163   | <0,00050 | 0,0071 | <0,0014 | <0,00408 | 0,03410 | 0,03360 | 92,56  |
| R10.1 | z pieca       | 5,24  | 1,69 | 0,01330 | 0,0173   | 0,00289  | 0,0011 | <0,0014 | <0,00400 | 0,00398 | 0,00078 | 92,92  |
| R10.2 | po wszystkich | 4,11  | 2,89 | 0,02450 | 0,0194   | <0,00050 | 0,0040 | <0,0014 | <0,00400 | 0,01120 | 0,00846 | 92,81  |
| R10.3 | po wszystkich | 4,07  | 2,83 | 0,02650 | 0,0263   | <0,00050 | 0,0054 | <0,0014 | <0,00400 | 0,01080 | 0,01060 | 92,90  |
| R11.1 | z pieca       | 4,45  | 1,81 | 0,01760 | 0,0283   | 0,00494  | 0,0027 | <0,0014 | <0,00400 | 0,00394 | 0,00096 | 93,56  |
| R11.2 | po wszystkich | >6,75 | 3,16 | 0,01980 | <0,00120 | <0,00584 | 0,0135 | <0,0157 | 0,11600  | 0,02020 | 0,05380 | <89,72 |
| R11.3 | po wszystkich | >6,36 | 3,45 | 0,01900 | <0,00457 | <0,00369 | 0,0129 | <0,0048 | <0,0570  | 0,01380 | 0,03270 | <89,93 |
| R12.1 | z pieca       | 4,04  | 1,61 | 0,01130 | 0,0328   | 0,00801  | 0,0026 | <0,0014 | <0,00400 | 0,00303 | 0,00104 | 94,17  |
| R12.2 | po wszystkich | 3,92  | 2,90 | 0,01990 | 0,0190   | <0,00050 | 0,0054 | <0,0014 | <0,00400 | 0,01230 | 0,02120 | 92,98  |
| R13.1 | z pieca       | 4,03  | 1,67 | 0,04120 | 0,0503   | 0,00452  | 0,0164 | 0,0083  | <0,0233  | 0,00306 | 0,00163 | 94,05  |
| R13.2 | po wszystkich | 3,98  | 2,87 | 0,04510 | 0,0411   | <0,00236 | 0,0188 | 0,0091  | <0,00615 | 0,02080 | 0,03900 | 92,90  |
| R14.1 | z pieca       | 3,70  | 1,61 | 0,04070 | 0,0368   | 0,00624  | 0,0114 | 0,0119  | <0,00400 | 0,00363 | 0,00180 | 94,45  |
| R14.2 | po wszystkich | 4,18  | 2,79 | 0,07430 | 0,0138   | <0,00191 | 0,0107 | 0,0071  | <0,00651 | 0,01310 | 0,02850 | 92,80  |
| R15.1 | z pieca       | 3,90  | 1,64 | 0,03140 | 0,0246   | 0,00629  | 0,0041 | 0,0080  | 0,01120  | 0,00324 | 0,00110 | 94,25  |
| R15.2 | po wszystkich | 3,68  | 2,76 | 0,06440 | 0,0219   | <0,00076 | 0,0056 | 0,0083  | <0,00400 | 0,01470 | 0,03590 | 93,29  |
| R16.1 | z pieca       | 4,10  | 1,61 | 0,04220 | 0,0321   | 0,00584  | 0,0062 | 0,0065  | <0,00400 | 0,00300 | 0,00159 | 94,07  |
| R16.2 | po wszystkich | 3,80  | 2,86 | 0,02850 | 0,0005   | 0,00802  | 0,0080 | 0,0074  | 0,00702  | 0,01890 | 0,02470 | 93,02  |

**a. Próby klinowe**

Tab. 4.2. Widok przełamów żeliwa po sferoidyzacji

| Nr<br>wytopu | Klin M mały (3)                                                                     | Klin M duży (4)                                                                     | Klin wg PN                                                                          | Uwagi |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| R.21         |   |   |  |       |
| R.20         |  |  |  |       |

Próby klinowe żeliwa wskazują na wysoką zdolność do grafityzacji, zabielenia klinów mają bardzo małą długość lub w ogóle nie występują, co jest potwierdzeniem wysoką zdolność do grafityzacji żeliwa opartego na surówce jak i złomie żeliwa tego samego gatunku. Naturalnie ta wysoka zdolność do grafityzacji konieczna dla uzyskania żeliwa sferoidalnego o osnowie ferrytycznej wynika zarówno ze składu chemicznego (żeliwo nadeutektyczne) jak i silnej modyfikacji realizowanej w trzech etapach.

Z drugiej strony widać, iż ocena zdolności do grafityzacji tych gatunków żeliwa metodą technologicznych prób klinowych jest mało przydatna, nie pozwala na wykazania różnic występujących pomiędzy żeliwem uzyskiwanym w kolejnych wytopach. Badania innych właściwości pokazują, iż są to każdorazowo nieco inne żeliwa.

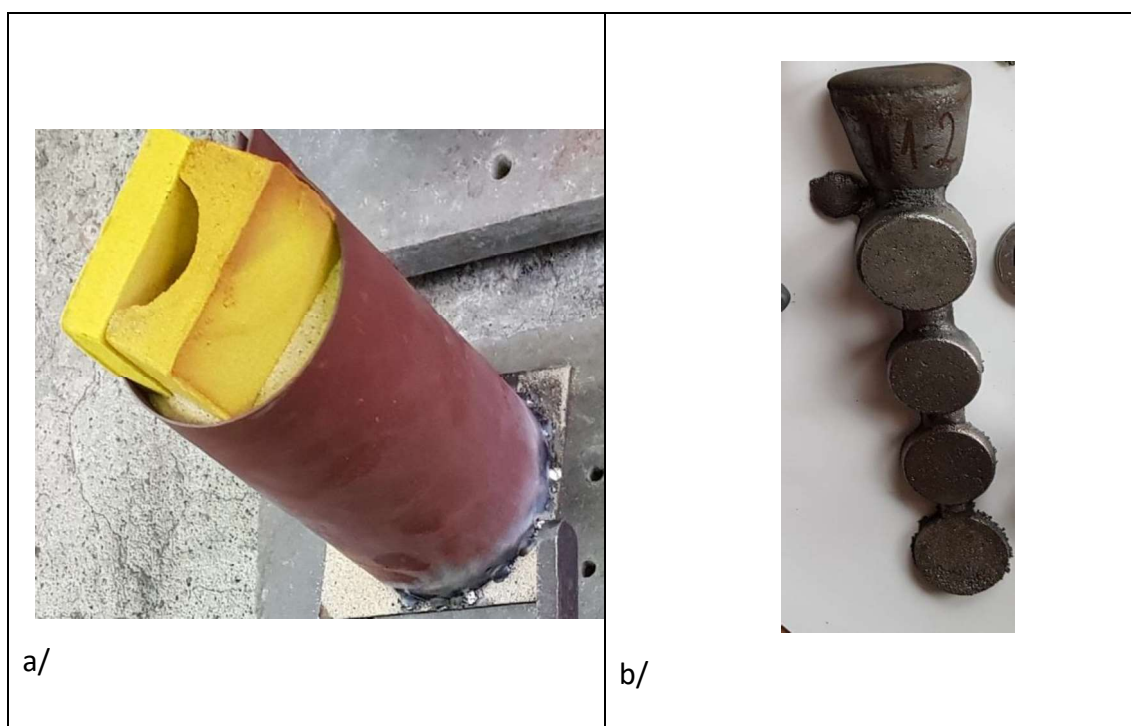
#### **4.5. Badania wrażliwości na szybkość stygnięcia żeliwa**

Programem oceny właściwości technologicznych żeliwa sferoidalnego uzyskiwanego w technologii z zastosowaniem podwójnej rafinacji objęto również jego wrażliwość na szybkość stygnięcia. Stopy posiadające wysoką wrażliwość na szybkość stygnięcia nie pozwalają na osiąganie jednakowej (zblizonej do siebie) struktury w ściankach odlewów o zróżnicowanej grubości. Najczęściej jest to wada stopu. W przypadku żeliwa, w większości jego gatunków występuje duża wrażliwość na szybkość stygnięcia. Stopy eutektyczne i okołoeutektyczne, w których eutektyka jest dominującym składnikiem struktury są nieco mniej wrażliwe na szybkość stygnięcia. Dla oceny tej cechy (właściwości) technologicznej najczęściej wykonuje się odlewy o budowie „schodkowej”, a więc mające ścianki o stopniowo zwiększanej grubości. Po odlaniu takiej próby ocenia się strukturę w poszczególnych ściankach, w których proces stygnięcia przebiegał z różną prędkością.

Wrażliwość na szybkość stygnięcia obniża się w żeliwie na drodze jego modyfikacji, niekiedy wielostopniowej. W badaniach realizowanych w ramach Projektu wykonywana jest kilkustopniowa modyfikacja: 1 – równoległe ze sferoidyzacją, 2 – po zabiegu sferoidyzacji i 3 – „na strugę” podczas zalewania form żeliwem. Żeliwo do pracy w warunkach wysokich obciążeń dynamicznych w niskiej temperaturze powinno (musi) mieć strukturę silnie

rozdrobnioną, z dużą ilością wydzielen kulek grafitu (komórek eutektycznych). Taką strukturę można osiągnąć na drodze wielokrotnej modyfikacji żeliw (dwu lub trzykrotnej).

Badania wrażliwości na szybkość stygnięcia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanej w AGH metody, która polega na odlewaniu próbki pokazanej na rysunku 4.11b. Próbkę składa się z czterech modułów, z których każdy ma inną grubość (inny moduł krzepnięcia). Próbkę wykonuje się odlewa w formie skorupowej pokazanej również na rysunku 4.11a. Następnie, po oczyszczeniu próbki, wykonuje się ocenę struktury metodą metalograficzną lub ultradźwiękową. Metoda ultradźwiękowa jest bardzo wygodna i skuteczna, ale szczególnie przydatna w przypadku żeliwa z grafitem płatkowym. Im drobniejsze wydzielения grafitu płatkowego tym większa prędkość. Podobnie jest w przypadku żeliwa sferoidalnego, chociaż różnice prędkości są tu dużo mniejsze i raczej zalecane jest stosowanie badań mikrostruktury w poszczególnych segmentach odlewu.



Rys. 4.11. Forma skorupowa i odlew próbki do badań ultradźwiękowych wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia

Badaniami wrażliwości na szybkość stygnięcia objęto żeliwo z tych wytopów, w których odlewano również testowe odlewy. W tabeli 4.1 zestawiono składy chemiczne żeliwa uzyskiwane w poszczególnych wytopach, również w tych, w których wykonywano

również próbę wrażliwości na szybkość stygnięcia. Żeliwo sferoidalne charakteryzuje się zdolnością do propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej z prędkością ponad 5600 m/s. W ściankach o grubości od 10 do 27,8 mm prędkość fali jest podobna, co oznacza iż i struktura (wskaźniki kształtu grafitu) jest do siebie podobna. Natomiast ocenę rodzaju osnowy należy opierać o pomiar twardości HB. Wyniki takich pomiarów zamieszczono w tabeli 4.3. Osnowa nie jest już jednorodna jak postać grafitu. W segmentach próbki o mniejszym module krzepnięcia twardość ma większą wartość, co oznacza iż jest w ich strukturze więcej perlitu.

Tab. 4.2. Wyniki oceny wrażliwości na szybkość stygnięcia żeliwa sferoidalnego

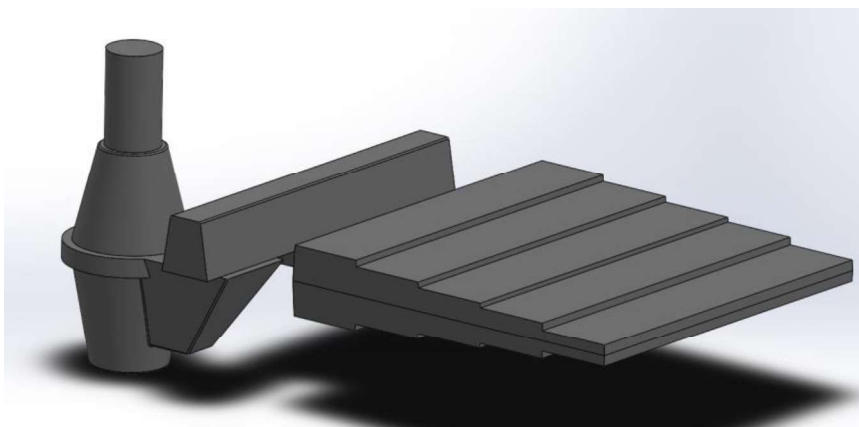
| Segmenty próby wrażliwości na szybkość stygnięcia |              |       |                      |  |  |
|---------------------------------------------------|--------------|-------|----------------------|--|--|
| Lp.                                               | Grubość [mm] | Wytop | Ultradźwięki V [m/s] |  |  |
| 1                                                 | 6,39         | R21   | 5544                 |  |  |
| 2                                                 | 9,86         |       | 5631                 |  |  |
| 3                                                 | 18,64        |       | 5653                 |  |  |
| 4                                                 | 27,80        |       | 5659                 |  |  |
|                                                   |              |       |                      |  |  |

Tab. 4.3. Pomiary wskaźnika wrażliwości oparty o wartość HB.

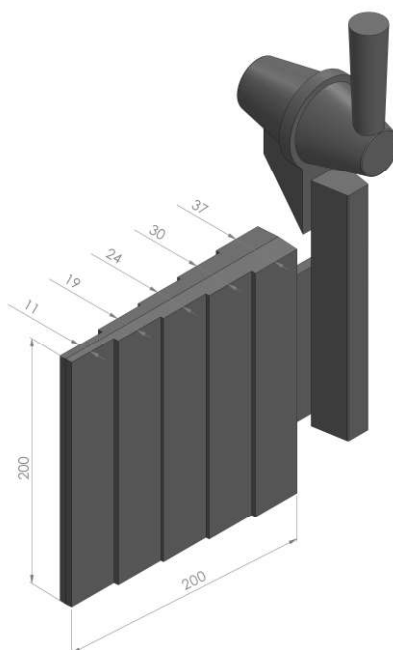
| Grubość ścianki | Odcisk kulek pomiarowych [mm] |                |                |                 |              |       |
|-----------------|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|-------|
|                 | lp.                           | d <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> | d <sub>sr</sub> | HB           |       |
| 6,39            | 1                             | 1,055          | 1,053          | 1,054           | <b>205,0</b> | 200,0 |
|                 | 2                             | 1,080          | 1,079          | 1,080           | <b>194,9</b> |       |
| 9,86            | 1                             | 1,040          | 1,026          | 1,033           | <b>213,8</b> | 219,6 |
|                 | 2                             | 1,010          | 1,005          | 1,008           | <b>225,3</b> |       |
| 18,64           | 1                             | 0,960          | 0,954          | 0,957           | <b>250,9</b> | 247,4 |
|                 | 2                             | 0,976          | 0,964          | 0,970           | <b>243,9</b> |       |
| 27,80           | 1                             | 0,900          | 0,896          | 0,898           | <b>286,3</b> | 279,2 |
|                 | 2                             | 0,917          | 0,924          | 0,921           | <b>272,0</b> |       |

Należy dodać, iż próbę opisana powyżej wykonywano bez trzeciego stopnia modyfikacji (na strugę) i być może z tego powodu jest podwyższona wrażliwość na szybkość stygnięcia.

Ocenę wrażliwości na szybkość stygnięcia prowadzono również przy zastosowaniu klasycznej próby schodkowej. Wygląd odlewanej próby pokazano na kolejnych rysunkach 4.12 ÷ 4.15. W tej próbie stosowano trzystopniowy sposób modyfikacji żeliwa, trzeci stopień realizowano techniką „na strugę” podczas zalewania formy.



Rys. 4.12. Koncepcja wykonywania próby schodkowej przy poziomym jej ułożeniu



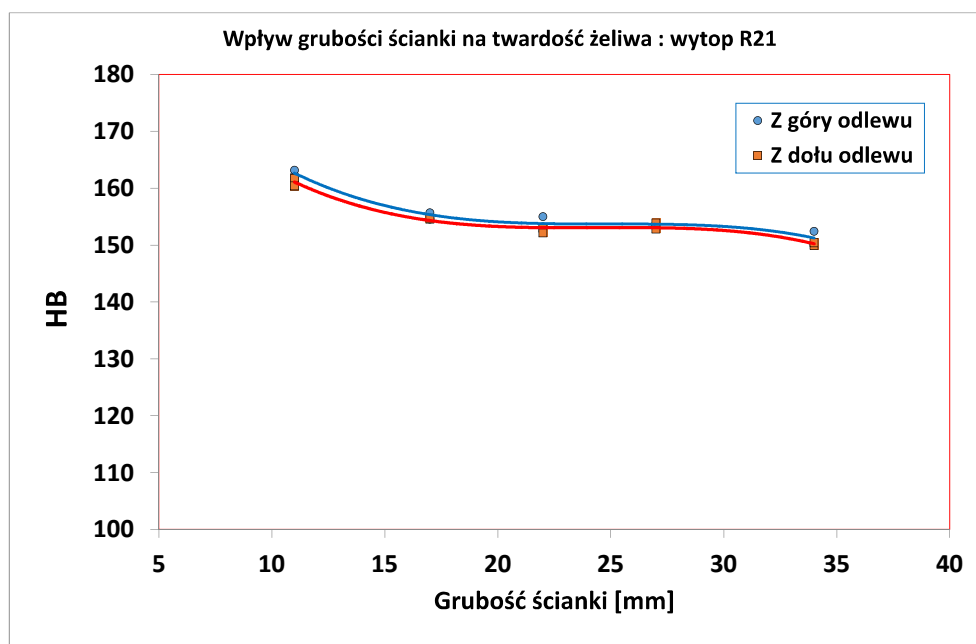
Rys. 4.13. Wykonanie próby schodkowej w pionowej pozycji zalewania (rozwiązania dla technologii Disa Matic).



Formy, w obu wypadkach miały układ wlewowy z komorą filtracji, w której umieszczano każdorazowo filtr 10ppi, dla zatrzymania potencjalnych zanieczyszczeń pochodzących z masy formierskiej i cząstek żużla. Na strugę metalu wlewanego do formy wprowadzano 0,2 % drobnoziarnistego modyfikatora w celu zwiększenia zdolności żeliwa do grafityzacji. Dobrze zmodyfikowane żeliwa jest mniej wrażliwe na szybkość stygnięcia, co skutkuje ujednorodnieniem struktury w ściankach o różnej grubości, w których żeliwo stygnie i krzepnie z różnymi szybkościami. Wykonywane odlewy schodkowe miały wygląd jak na rysunku 4.14. Badania, których celem była ocena wrażliwości na szybkość stygnięcia obejmowały ocenę trzech cech i parametrów żeliwa: jego twardości HB, zdolności do propagacji fali ultradźwiękowej ( $C_L$ ) i mikrostruktury. Na rysunku 4.15 pokazano wyniki badań twardości.

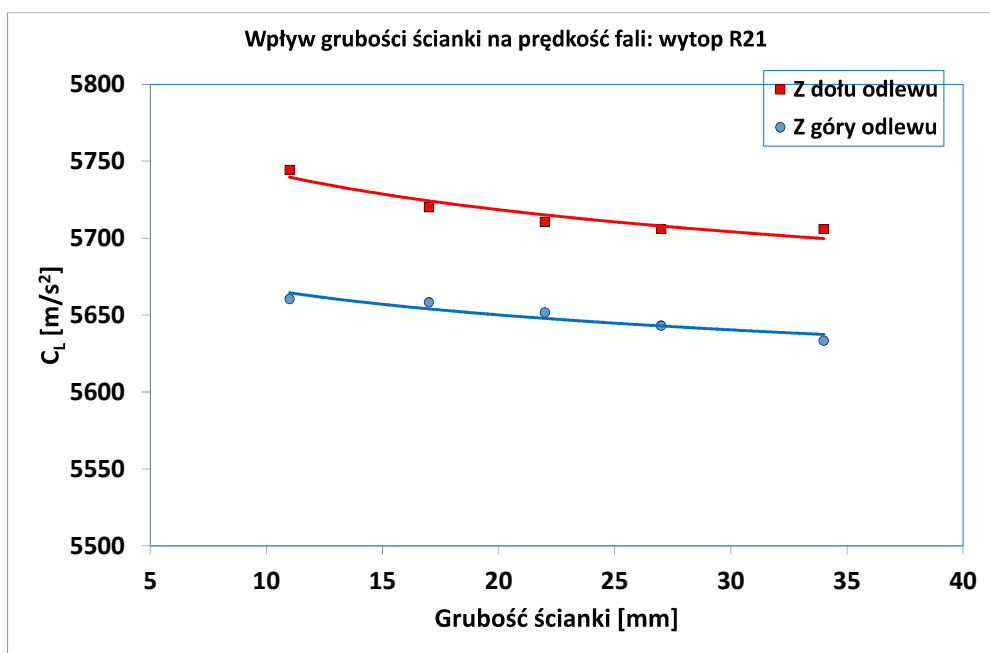


Rys. 4.14. Odlew próby schodkowej do oceny wrażliwości na szybkość stygnięcia (wytop R21)



Rys. 5.15. Wpływ grubości ścianki (szybkości krzepnięcia i stygnięcia) na twardość żeliwa ferrytycznego EN GIS 400 18LT

Dla każdego odlewu wykonywano dwie serie pomiarowe, jedna na wyciętej próbce z dolnej warstwy odlewu, druga – z górnej. Chodziło o dodatkową ocenę skłonności do tworzenia zróżnicowania struktury (zwięzłości struktury) na dole i u góry krzepnącego w pozycji pionowej odlewu. Jak można zauważyć na rysunku 4.16 wpływ grubości ścianki na twardość żeliwa jest bardzo niewielki, dla grubości ścianek od 11 do 37 mm zmiany twardości mieszczą się w przedziale 10 HB. Oznacza to, iż uzyskiwana osnowa jest jednorodna – ferrytyczna, jest bardzo podobna tak w cienkich jak i grubych ściankach. Jest to zasługa b. dobrej modyfikacji żeliwa.



Rys.4.16. Wpływ grubości ścianki (szybkości krzepnięcia i stygnięcia) na prędkość fali ultradźwiękowej żeliwa ferrytycznego

Drugi składnik mikrostruktury żeliwa jest grafit, który swoją postacią bardzo silnie oddziałuje na zdolność żeliwa do propagacji fali. Jeśli prędkość fali jest podobna („stała”) to i postać wydzielen grafitu również jest jednorodna. Wyniki badań prędkości fali w poszczególnych segmentach próby schodkowej przedstawiono na rysunku 4.16. W warstwach położonych na danej wysokości wnętrzy formy (dół, góra odlewu) obserwuje się niewielkie zmiany prędkości jako efektu zmiany szybkości stygnięcia, z przechodzeniem do grubszych części prędkość nieznacznie obniża się. W grubszych segmentach zarówno wydzielenia grafitu są nieco większe, jak i mogą się pojawiać mikroporowatości, które zmniejszają prędkość fali.

Większe różnice pojawiają się, jeśli porównuje się warstwy położone na różnych wysokościach. W dolnej warstwie prędkość fali w każdym segmencie jest wyższa o około 100 m/s. Żeliwo na dole odlewu charakteryzuje się większą zwięzłością, co skutkuje wyższą prędkością fali. U góry pojawia się efekt słabego zasilania, co prowadzi do tworzenia mikroporowatości. Jest to cecha wszystkich stopów odlewniczych, które krzepną w odlewach usytuowanych „na pionowo”.

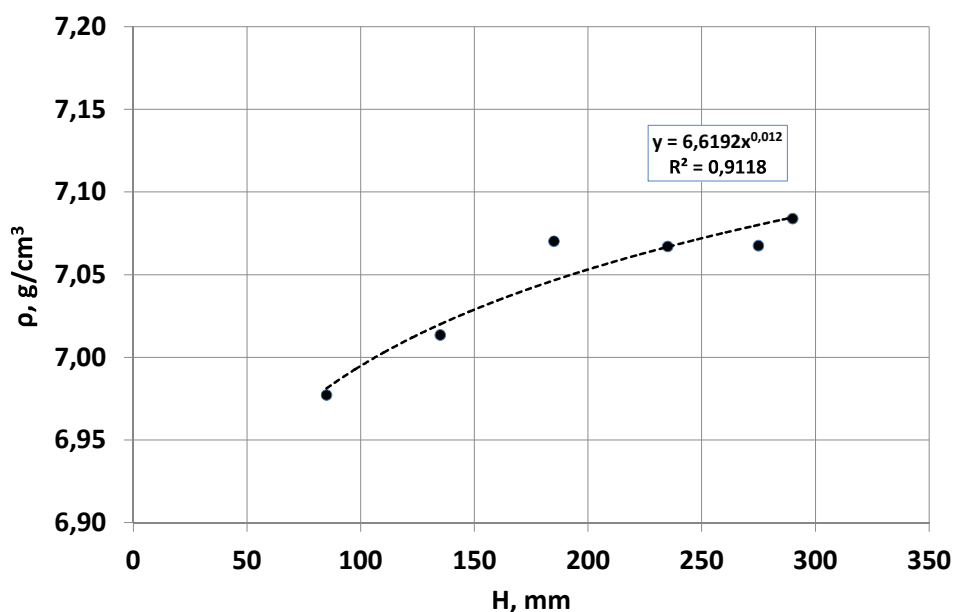
Wyniki tych badań powinny być wykorzystane w projektowaniu technologii odlewania, szczególnie w wypadku stosowania linii formowania z pionową powierzchnią podziału.

## II. Określenie właściwości użytkowych żeliwa uzyskiwanego w nowej technologii

### 1. Badania zmian gęstości właściwej

Proces rafinacji żeliwa prowadzi do usunięcia wtrąceń niemetalowych oraz obniżenia stopnia zagazowania metalu, w tym obniżenia zawartości tlenu i wodoru. Aby ten efekt był widoczny żeliwo przed rafinacją musi być zanieczyszczone wtrąceniami ze wsadu metalowego. Taki stan panuje przy przemysłowej produkcji żeliwa, natomiast wytopy metalu prowadzone w Odlewni Doświadczalnej AGH, mające skalę mikro, bazują na stosunkowo czystych składnikach. Jedynie obróbka pozapiecowa żeliwa (sferoidyzacja) jest źródłem zanieczyszczenia. Badania opisane w zadaniu 1 i 2 wskazywały na wzrost gęstości żeliwa po procesie rafinacji, jakkolwiek ten wzrost nie był duży.

Gęstość żeliwa w odlewach zmienia się w zależności od tego, jak duże ciśnienie słupa metalu panuje w miejscu krzepnięcia. Dla tego w dolnych partiach odlewy mają większą gęstość (zwięzłość).

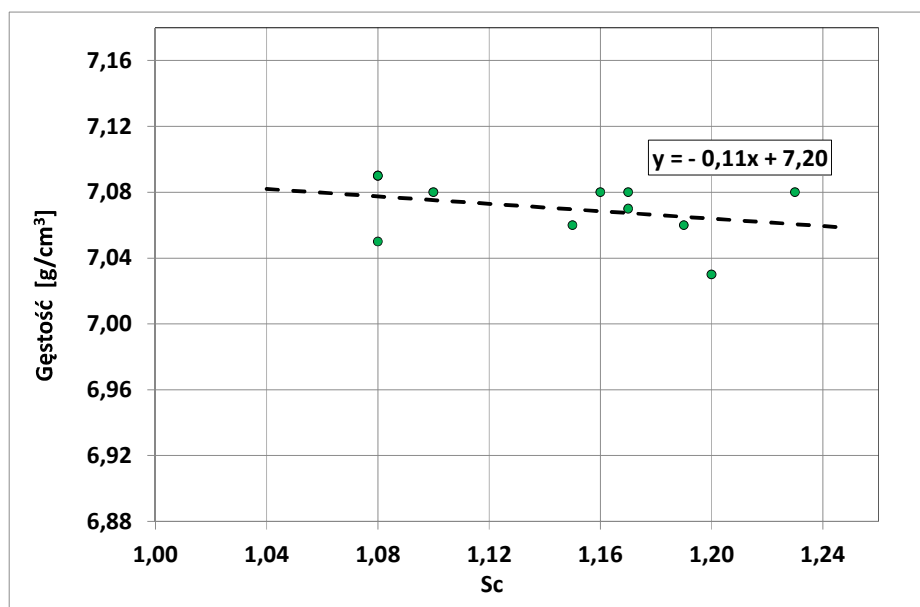


Rys. 4.17. Wpływ ciśnienia metalostatycznego na gęstość żeliwa EN GJS 400 – 18-LT

Aby określić, jak silnie wpływa ciśnienie metalostatyczne w przypadku wykonywania odlewów z ferrytycznego żeliwa sferoidalnego zostały odlane pręty próbne o wysokości  $H = 300\text{mm}$ .

W górnej części odlewu, w odległości około 75 mm od powierzchni górnej (lustra metalu w zbiorniku wlewowym). W podobnym zakresie zmienia się ciśnienie metalostatyczne w formie z pionową powierzchnią podziału, w technologii Disa Matic. Wyniki badań zmian gęstości pokazano na rysunku 4.17. Gęstość właściwa żeliwa w górnej partii wynosi  $\rho = 6,98 \text{ g/cm}^3$ , natomiast na dole formy ( $H = 300\text{mm}$ ) gęstość zwiększyła się do wartości  $\rho = 7,08 \text{ g/cm}^3$ , a więc o  $0,10 \text{ g/cm}^3$ . Oddziaływanie ciśnienia na zwężłość struktury odlewów powinna być wykorzystywana w opracowywaniu technologii wykonania odlewów.

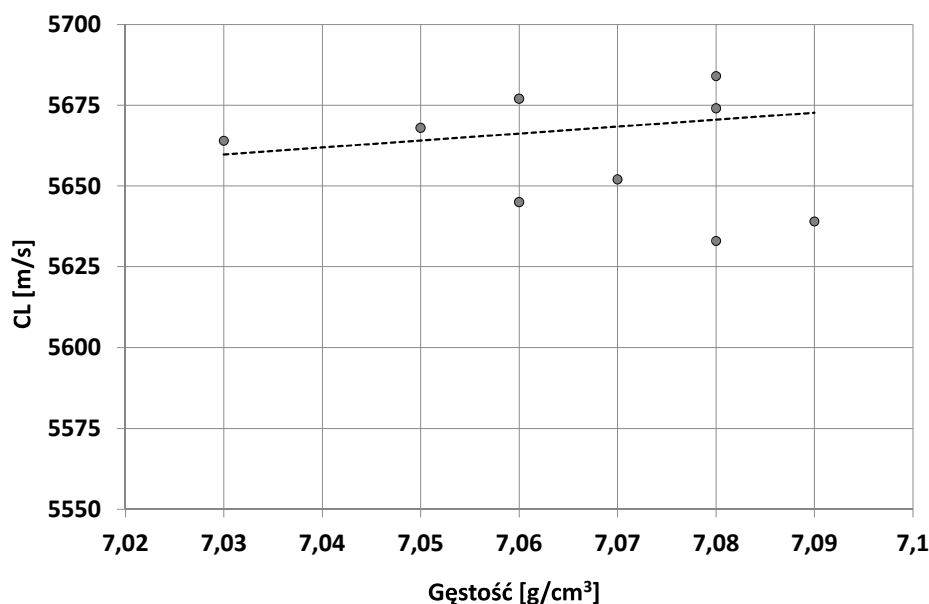
Drugim parametrem decydującym o rzeczywistej gęstości ferrytycznego żeliwa sferoidalnego jest jego skład chemiczny, a ściślej zawartość węgla. Węgiel w żeliwie ferrytycznym prawie w całości wydziela się w postaci grafitu, którego gęstość oscyluje wokół wartości  $\rho = 2,22 \text{ g/cm}^3$ . Jego obecność w mikrostrukturze odlewu obniża gęstość żeliwa tym mocniej im jest go więcej. Opracowano zależność wpływu stopnia nasycenia eutektycznego żeliwa  $Sc$ , który jest wskaźnikiem pośrednim zawartości węgla w żeliwie na jego gęstość, rys. 4.18. Im większa wartość  $Sc$ , tym niższa gęstość, i to jest powszechnie znana tendencja, natomiast badania pozwoliły określić przebieg tej zależności dla ferrytycznego żeliwa sferoidalnego.



Rys. 4.18. Wpływ stopnia nasycenia eutektycznego  $Sc$  na gęstość żeliwa EN GJS 400 – 18-LT

Struktura żeliwa sferoidalnego bardzo często kontrolowana jest techniką ultradźwiękową. Chodzi głównie o kontrolę postaci wydzielen grafitu, czy jest ona kulkowa.

Zwiększaniu zwężłości osnowy, której miarą jest gęstość towarzyszy przyrost prędkości fali ultradźwiękowej propagowanej w żeliwie, rys. 19. Technika ultradźwiękowa wspomaga ocenę jakości żeliwa sferoidalnego ferrytycznego z punktu widzenia jego gęstości.



Rys. 19. Wpływ gęstości żeliwa sferoidalnego ferrytycznego na prędkość fali ultradźwiękowej.

Wyniki badań gęstości żeliwa z większości wykonanych wytopów próbných żeliwa do pracy zostały zebrane w postaci tabeli ..., jako materiał źródłowy. W zdecydowanej większości wypadków gęstość żeliwa mieściła się w przedziale : $\rho_0 = 7,0 \div 7,1 \text{ g/cm}^3$ . Badania prowadzono na próbkach wycinanych w wlewków Y2, a więc odlewach „niskich”, w których podczas krzepnięcia ciśnienie metalostyczne jest małe. Ogólnie jednak trudno oczekiwać dużo wyższych gęstości żeliwa o składzie nadeutektycznym, w którym udział węgla zbliża się do 4,0%, a grafit na zgładach zajmuje często ponad 14%. Przy takim udziale węgla w postaci grafitu obniża gęstość stopu Fe – C, jakim jest żeliwo.



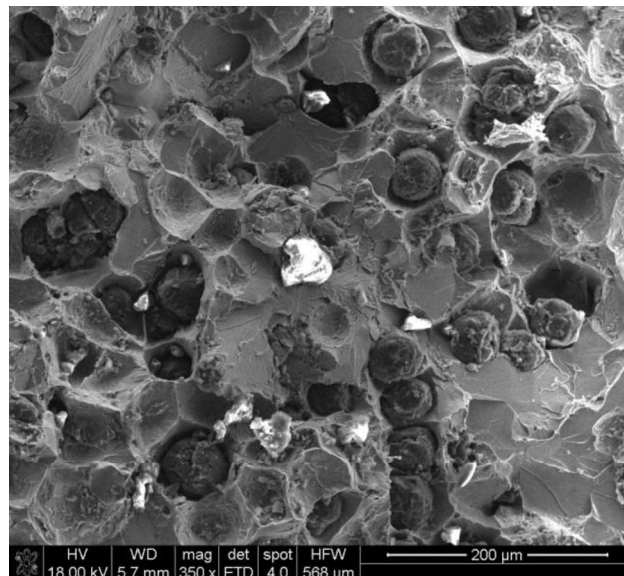
Tabela. 4.4. Wyniki pomiarów gęstości próbek pobieranych z poszczególnych wytopów

| Wytop nr 3           |         |                   | Wytop nr 4  |         |                   | Wytop nr 5           |         |                   | Wytop nr 6  |         |                   | Wytop nr 7  |         |                   | Wytop nr 8 |         |                   |
|----------------------|---------|-------------------|-------------|---------|-------------------|----------------------|---------|-------------------|-------------|---------|-------------------|-------------|---------|-------------------|------------|---------|-------------------|
| oznaczenie           | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie           | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie | próbka  | gęstość           |
|                      | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |                      | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |            | nr      | g/cm <sup>3</sup> |
| R3                   | 1       | 6,887907          | R4          | 1       | 7,089325          | R5                   | 1       | 7,109739          | R6          | 1       | 7,091586          | 7           | 1       | 6,955056          | W8         | 1       | 6,819001          |
|                      | 2       | 7,075103          |             | 2       | 7,092982          |                      | 2       | 7,091586          |             | 2       |                   |             | 2       | 7,084841          |            | 2       | 6,841708          |
|                      | 3       |                   |             | 3       |                   |                      | 3       |                   |             | 3       |                   |             | 3       | 6,903479          |            | 3       | 7,057321          |
|                      | 4       |                   |             | 4       |                   |                      | 4       |                   |             | 4       |                   |             | 4       | 6,97905           |            | 4       | 7,044829          |
|                      | 5       |                   |             | 5       |                   |                      | 5       |                   |             | 5       |                   |             | 5       | 6,966059          |            | 5       | 7,0711            |
|                      | 6       |                   |             | 6       |                   |                      | 6       |                   |             | 6       |                   |             | 6       | 7,083438          |            | 6       | 7,072785          |
|                      | średnia | 6,98151           |             | średnia | 7,09115           |                      | średnia | 7,10066           |             | średnia | #DZIEL/01         |             | średnia | 6,99532           |            | średnia | 6,98446           |
| R3 - obróbka cieplna | 1       | 7,038242          | R4          | 1       | 7,108649          | R5 - obróbka cieplna | 1       | 7,029599          | R6          | 1       | 7,091963          | W7 kliny    | 1       | 7,092099          | W8 kliny   | 1       | 7,088944          |
|                      | 2       | 7,045052          |             | 2       | 7,093762          |                      | 2       | 7,03145           |             | 2       | 7,090115          |             | 2       | 7,086916          |            | 2       | 7,082212          |
|                      | 3       | 7,036302          |             | 3       | 7,09122           |                      | 3       | 7,03619           |             | 3       | 7,082237          |             | 3       | 7,090296          |            | 3       | 7,081189          |
|                      | 4       | 7,03467           |             | 4       | 7,100839          |                      | 4       | 7,040236          |             | 4       | 7,091578          |             | 4       | 7,100279          |            | 4       | 7,077931          |
|                      | 5       | 7,038697          |             | 5       | 7,093766          |                      | 5       | 7,036575          |             | 5       | 7,08264           |             | 5       | 7,087648          |            | 5       | 7,083943          |
|                      | 6       | 7,044571          |             | 6       |                   |                      | 6       |                   |             | 6       |                   |             | 6       | 7,083995          |            | 6       | 7,076765          |
|                      | średnia | 7,03959           |             | średnia | 7,09765           |                      | średnia | 7,03481           |             | średnia | 7,08771           |             | średnia | 7,09021           |            | średnia | 7,08183           |
| Wytop nr 11          |         |                   | Wytop nr 12 |         |                   | Wytop nr 13          |         |                   | Wytop nr 14 |         |                   | Wytop nr 15 |         |                   | Wytop nr   |         |                   |
| oznaczenie           | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie           | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie  | próbka  | gęstość           | oznaczenie | próbka  | gęstość           |
|                      | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |                      | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |             | nr      | g/cm <sup>3</sup> |            | nr      | g/cm <sup>3</sup> |
| 11 kliny             | 1       | 7,07293           | 12 klin     | 1       | 7,060004          | 13 klin              | 1       | 7,07535           | 14 Klin     | 1       | 7,083667          | 15 Klin     | 1       | 7,0592            |            | 1       |                   |
|                      | 2       | 7,057159          |             | 2       | 7,065569          |                      | 2       | 7,060708          |             | 2       | 7,092782          |             | 2       | 7,064715          |            | 2       |                   |
|                      | 3       | 7,054833          |             | 3       | 7,060083          |                      | 3       | 7,059968          |             | 3       | 7,073745          |             | 3       | 7,052791          |            | 3       |                   |
|                      | 4       | 7,053105          |             | 4       | 7,055846          |                      | 4       | 7,075444          |             | 4       | 7,08199           |             | 4       | 7,053992          |            | 4       |                   |
|                      | 5       | 7,058566          |             | 5       | 7,068463          |                      | 5       | 7,0647            |             | 5       | 7,080708          |             | 5       | 7,056867          |            | 5       |                   |
|                      | 6       | 7,058023          |             | 6       |                   |                      | 6       | 7,05972           |             | 6       |                   |             | 6       |                   |            | 6       |                   |
|                      | średnia | 7,0591            |             | średnia | 7,06199           |                      | średnia | 7,06598           |             | średnia | 7,08258           |             | średnia | 7,0575            |            | średnia | #DZIEL/01         |
| 11 dół               | 1       | 6,974506          | 12 odlew    | 1       | 6,941621          | 13 odlew             | 1       | 7,070804          |             | 1       |                   | 15 odlew    | 1       | 7,05991           |            | 1       |                   |
|                      | 2       | 7,0344            |             | 2       | 6,952652          |                      | 2       | 7,077092          |             | 2       |                   |             | 2       | 7,017417          |            | 2       |                   |
|                      | 3       | 7,065607          |             | 3       | 7,0229            |                      | 3       | 6,965761          |             | 3       |                   |             | 3       | 7,0152            |            | 3       |                   |
|                      | 4       | 7,060267          |             | 4       | 7,058208          |                      | 4       | 6,919131          |             | 4       |                   |             | 4       | 6,978846          |            | 4       |                   |
|                      | 5       | 7,076714          |             | 5       | 7,053262          |                      | 5       | 6,903128          |             | 5       |                   |             | 5       | 6,983242          |            | 5       |                   |
|                      | 6       |                   |             | 6       | 7,083968          |                      | 6       | 6,963261          |             | 6       |                   |             | 6       |                   |            | 6       |                   |
|                      | średnia | 7,0423            |             | średnia | 7,02628           |                      | średnia | 6,9832            |             | średnia | #DZIEL/01         |             | średnia | 7,01092           |            | średnia | #DZIEL/01         |
| 11 góra              | 1       | 6,938481          |             | 1       |                   |                      | 1       |                   |             | 1       |                   |             | 1       |                   |            | 1       |                   |
|                      | 2       | 6,934336          |             | 2       |                   |                      | 2       |                   |             | 2       |                   |             | 2       |                   |            | 2       |                   |
|                      | 3       | 6,873023          |             | 3       |                   |                      | 3       |                   |             | 3       |                   |             | 3       |                   |            | 3       |                   |
|                      | 4       | 6,921904          |             | 4       |                   |                      | 4       |                   |             | 4       |                   |             | 4       |                   |            | 4       |                   |
|                      | 5       | 6,937845          |             | 5       |                   |                      | 5       |                   |             | 5       |                   |             | 5       |                   |            | 5       |                   |
|                      | 6       |                   |             | 6       |                   |                      | 6       |                   |             | 6       |                   |             | 6       |                   |            | 6       |                   |
|                      | średnia | 6,92112           |             | średnia | #DZIEL/01         |                      | średnia | #DZIEL/01         |             | średnia | #DZIEL/01         |             | średnia | #DZIEL/01         |            | średnia | #DZIEL/01         |

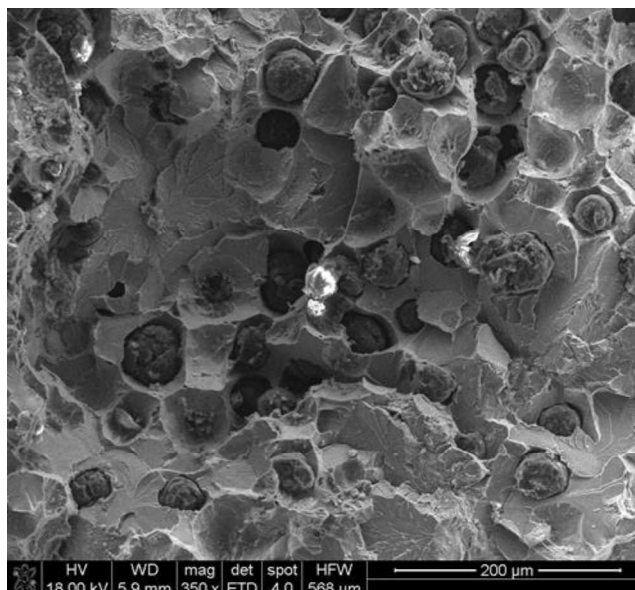
## 2. Badanie właściwości mechanicznych:

### a. Wytrzymałości $R_m$ , $A_5$

Wytrzymałość żeliwa sferoidalnego zależy od rodzaju osnowy, ilości i wielkości kulkowych wydzieleni grafitu, ich „stopnia sferoidalności” (ściślej współczynnika kształtu) oraz ilości niemetalicznych wtrąceń. O podobnych cech struktury zależą właściwości plastyczne żeliwa mierzone wydłużeniem w próbie rozciągania. W przypadku żeliwa ferrytycznego różnice w wytrzymałości będą wynikać ze stopnia rozdrobnienia grafitu, jego kulistości i czystości stopu. Rozdrobnienie uzyskuje się przez dobrą wielostopniową modyfikacją, o kulistości decyduje proces sferoidyzacji i ilość resztkowego Mg, natomiast czystość stopu jest uzyskiwana na drodze rafinacji. W podobny sposób można przeanalizować wpływ tych samych czynników na wydłużenie żeliwa, z tym, że ich wpływ jest jeszcze mocniejszy. Wszelkiego rodzaju wtrącenia niemetalowe, obniżony współczynnik kształtu wydzieleni grafitu silnie obniżają plastyczność, bardziej niż wytrzymałość. Na rysunkach rys.20 i 21 pokazano przełomy struktury żeliwa bez rafinacji (rys. 20) i po rafinacji (rys.21). Białe pola pokazują wtrącenia niemetalowe na przełomie próbki po jej zniszczeniu.



Rys. 20. Przełom próbki żeliw sferoidalnego z wytopu bez rafinacji



Rys. 4.21. Przekrój próbki żeliwa sferoidalnego z wytopu z wykonana podwójna rafinacją

Cechą charakterystyczną ferrytycznego żeliwa sferoidalnego o wysokiej czystości (bez wtrąceń niemetalowych) jest:

- po pierwsze uzyskiwania wysokiego wydłużenia w próbie rozciągania ( $A_5$ ),
- mały rozrzut wyników pomiarów na serii próbek z danego wytopu.

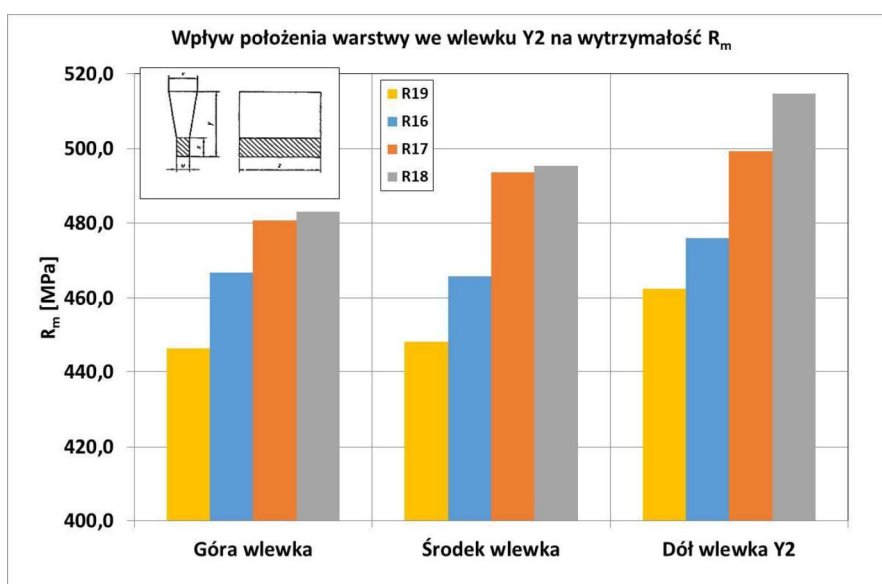
W tabeli 4.5 zebrano wyniki badań właściwości wytrzymałościowych z blisko 20 doświadczalnych prób wytwarzania żeliwa w procesie z zastosowaniem rafinacji gazowej, jako metody podwyższania jego jakości. Można zauważyć, że w poszczególnych, w których optymalizowano różne parametry procesu, ale zawsze stosowano rafinację, rozrzuty wyników wytrzymałości  $R_m$  jak i wydłużenia  $A_5$  utrzymują się w wąskich granicach. Należy to przypisywać procesowi rafinacji.

Zgodnie z PN próbki, do oceny właściwości mechanicznych wszystkich gatunków żeliwa, wycinane są z wlewków typu Y, najczęściej Y2. Dla weryfikacji tezy, iż miejsce wycięcia próbki z „roboczej” części wlewka może mieć wpływ na wartość wyznaczanej właściwości ( $R_m$ ,  $A_5$  czy udarności), z kilku wlewków pochodzących z różnych wytopów wycięto na trzech poziomach próbki do badań  $R_m$ .

Wyniki badań nad wpływem położenia warstwy we wlewkach próbnym na wytrzymałość pokazano na rysunku 4.22. Im bardziej oddalona jest warstwa od „dna” wlewka

tym ma mniejszą wytrzymałość żeliwa w tej warstwie. Dolna próbka znajduje się w tzw. strefie brzegowej odlewu, gdzie szybkość odprowadzenia jest dużo większa niż w pozostałych, natomiast próbka z górnej warstwy jest położona w strefie słabego zasilania i dlatego posiada mniej zwięzłą strukturę.

Uzyskane wyniki badań na wpływem położenia warstwy materiału we wlewkę próbnym na właściwości ma charakter ogólny, i dotyczy wszystkich właściwości mechanicznych żeliwa, w tym również uderzeniowości. Obróbka dodatkowa żeliwa, jaką jest wdrażana rafinacja może jedynie nieco spłaszczyć efekt niejednorodności, ale go nie wyeliminuje. Należy mieć to na uwadze przy prowadzeniu oceny jakości metalu – żeliwa sferoidalnego.



Rys. 4.22. Wpływ położenia warstwy do wykonania próbki na rozciąganie we wlewkę Y2 na wytrzymałość  $R_m$  żeliwa sferoidalnego.

Tabela. 4.5. Wyniki badań wytrzymałości  $R_m$  i wydłużenia  $A_5$ , żeliwa sferoidalnego

| Nr wytopu     | Wytrzymałość |                |       |              |
|---------------|--------------|----------------|-------|--------------|
|               | $R_m$ [Mpa]  | $R_m$ śr [Mpa] | A [%] | A śr [%]     |
| <b>R 3</b>    | 450,6        | <b>439,2</b>   | 10,85 | <b>10,88</b> |
|               | 427,7        |                | 10,90 |              |
| <b>R 3 oc</b> | 423,8        | <b>420,9</b>   | 8,91  | <b>9,81</b>  |
|               | 418,0        |                | 10,70 |              |
| <b>R 4</b>    | 515,4        | <b>517,8</b>   | 12,59 | <b>12,35</b> |
|               | 520,1        |                | 12,10 |              |



|               |        |              |       |              |
|---------------|--------|--------------|-------|--------------|
| <b>R 5</b>    | 519,0  | <b>518,6</b> | 13,47 | <b>13,37</b> |
|               | 518,2  |              | 13,26 |              |
| <b>R 5 oc</b> | 420,3  | <b>416,1</b> | 19,83 | <b>19,36</b> |
|               | 411,8  |              | 18,89 |              |
| <b>R 6</b>    | 503,6  | <b>500,4</b> | 9,96  | <b>9,49</b>  |
|               | 497,2  |              | 9,02  |              |
| <b>R 7</b>    | 469,0  | <b>468,5</b> | 13,03 | <b>14,49</b> |
|               | 467,9  |              | 15,95 |              |
| <b>R 8</b>    | 443,0  | <b>452,8</b> | 21,75 | <b>22,06</b> |
|               | 462,5  |              | 22,36 |              |
| <b>R 9</b>    | 475,6  | <b>481,3</b> | 14,17 | <b>16,41</b> |
|               | 486,9  |              | 18,65 |              |
| <b>R 11</b>   | 451,1  | <b>450,9</b> | 18,36 | <b>17,63</b> |
|               | 450,7  |              | 16,89 |              |
| <b>R12</b>    | 466,9  | <b>458,2</b> | 20,51 | <b>15,91</b> |
|               | 449,5  |              | 11,30 |              |
| <b>R13</b>    | 457,7  | <b>459,1</b> | 10,87 | <b>11,59</b> |
|               | 460,4  |              | 12,30 |              |
| <b>R14</b>    | 485,3  | <b>482,3</b> | 19,87 | <b>20,02</b> |
|               | 479,2  |              | 20,16 |              |
| <b>R15</b>    | 461,8  | <b>462,5</b> | 16,58 | <b>17,24</b> |
|               | 463,2  |              | 17,89 |              |
| <b>R16</b>    | 480,5  | <b>475,6</b> | 20,04 | <b>18,96</b> |
|               | 470,7  |              | 17,87 |              |
| <b>R16</b>    | 466,8  | <b>469,0</b> | 13,68 | <b>14,35</b> |
|               | 465,8  |              | 14,17 |              |
|               | 475,9  |              | 15,21 |              |
|               |        |              |       |              |
| <b>R17</b>    | 475,3  | <b>473,7</b> | 18,55 | <b>18,35</b> |
|               | 472,1  |              | 18,15 |              |
| <b>R17</b>    | 480,6  | <b>491,0</b> | 20,03 | <b>20,05</b> |
|               | 493,6  |              | 19,02 |              |
|               | 499,3  |              | 20,93 |              |
|               |        |              |       |              |
| <b>R18</b>    | 483,0  | <b>498,3</b> | 10,71 | <b>9,96</b>  |
|               | 495,4  |              | 7,77  |              |
|               | 514,6  |              | 11,40 |              |
|               |        |              |       |              |
| <b>R19</b>    | 446,2  | <b>452,2</b> | 10,91 | <b>12,20</b> |
|               | 448,1  |              | 9,83  |              |
|               | 462,43 |              | 15,84 |              |

**b. Udarności w temperaturze: 20, -20 i – 40°C**

Udarność żeliwa do pracy w niskiej temperaturze w warunkach dynamicznych obciążeń jest kluczowym parametrem (właściwością), która musi być określana, zarówno w temperaturze otoczenia jak i pracy (w  $T = -20$ ; lub  $T = -40^{\circ}\text{C}$ ). W ramach badań realizowanych w ramach Projektu, których celem było opanowanie techniki i technologii rafinowania żeliwa w wersji rafinacji dwustopniowe, optymalizowano, na drodze analiz teoretycznych, stanu literatury, ale przede wszystkim badań własnych, kilka podstawowych parametrów i czynników technologii, zrealizowano ponad 20 wytopów doświadczalnych. Każdorazowo określano udarność na próbkach wycinanych z wlewka próbnego Y2 lub z odlewu. Całość uzyskanych wyników badań udarności zestawiono w tabeli ... poniżej. Udarność określano na próbkach z karbem „V”, tak jak to zaleca Norma. Badania obejmowały testy nad optymalizacją:

- Składu wsadu metalowego, jego struktury, udziałów składników z uwzględnieniem docelowych warunków w Odlewni,
- Określeniem optymalnych składów żeliwa w piecu, przed pozapiecową obróbką,
- Określeniem i składu docelowego, w powiązaniu z gatunkiem żeliwa do pracy w  $T = -20^{\circ}$  i  $T = -40^{\circ}\text{C}$ ,
- Optymalizacją procesu sferoidyzacji w wariacie z użyciem kadzi ze szczelną pokrywą (technologia Tundish) i zastosowaniem technologii sferoidyzacji z użyciem przewodu elastycznego PE,
- Optymalizacji technologii wielostopniowej modyfikacji,
- Opracowaniem metod skutecznej kontroli procesu wytwarzania żeliwa i odlewów,
- Opracowanie zaleceń w zakresie stosowania filtrów w układach wlewowych,
- Inne

Stąd w zbiorczej tabeli są wyniki, które nie spełniają wymogów żeliwa do pracy w niskiej temperaturze, ale są również takie, które potwierdzają opanowanie technologii wytwarzania żeliwa do pracy w niskiej temperaturze. Analiza wyników, podobnie jak przy



badaniach wytrzymałościowych potwierdza, i żeliwo po procesie dwustopniowej rafinacji charakteryzuje się wysoką czystością. **Analiza danych zestawionych w tabeli pokazuje, że próbki z pojedynczego wytopu charakteryzują się bardzo bliskimi wynikami udarności. Ten brak rozrzutu wyników potwierdza, iż w żeliwie nie ma losowo rozłożonych wtrąceń niemetalowych, które powodują duży rozrzut wyników.** Pozostałe po rafinacji wtrącenia występują w tak małych ilościach, iż nie wpływają na obniżenie udarności w pojedynczych próbkach, co generowałoby duży rozrzut wyników.

Tabela: 4.6. Wyniki badań udarności żeliwa sferoidalnego uzyskiwanego w kolejnych wytopach.

| Nr wytopu       | Nr próbki | Udarność             | Udarność      | UWAGI                                       |
|-----------------|-----------|----------------------|---------------|---------------------------------------------|
|                 |           | kG.m/cm <sup>2</sup> | [J]           |                                             |
| R 3             | 3         | 1,70                 | <b>16,677</b> |                                             |
|                 | 3.4       | 0,85                 | <b>8,339</b>  | -40                                         |
|                 | 3,5       | 1,20                 | <b>11,772</b> | -20                                         |
|                 | 3,6       | 1,40                 | <b>13,734</b> | -20                                         |
|                 | 3.7       | 0,85                 | <b>8,339</b>  | -40                                         |
|                 | 3,8       | 0,70                 | <b>6,867</b>  | -40                                         |
| R 3 oc          | 31        | 1,95                 | <b>19,130</b> |                                             |
|                 | 32        | 1,95                 | <b>19,130</b> |                                             |
| R 4             | 4         | 1,15                 | <b>11,282</b> |                                             |
| R 5             | 5         | 1,30                 | <b>12,753</b> |                                             |
|                 | 5,6       | 0,55                 | <b>5,396</b>  | -40                                         |
|                 | 5,7       | 0,75                 | <b>7,358</b>  | -40                                         |
|                 | 5,8       | 0,55                 | <b>5,396</b>  | -40                                         |
| R 5 oc          | 51        | 2,10                 | <b>20,601</b> |                                             |
|                 | 52        | 2,35                 | <b>23,054</b> |                                             |
|                 | 5,4       | 1,05                 | <b>10,301</b> | -20                                         |
|                 | 5,5       | 1,25                 | <b>12,263</b> | -20                                         |
| R6              |           | 0,25                 | <b>2,453</b>  | -20                                         |
|                 |           | 0,25                 | <b>2,453</b>  | -20                                         |
|                 |           | 0,20                 | <b>1,962</b>  | -40                                         |
|                 |           | 0,20                 | <b>1,962</b>  | -40                                         |
|                 |           | 0,20                 | <b>1,962</b>  | -40                                         |
| R -7<br>(odlew) | 7.1       | 1,25                 | <b>12,263</b> | żeliwo nie w pełni<br>sfero, osnowa ferryt, |
|                 | 7.2       | 0,65                 | <b>6,377</b>  | próbki z odlewu                             |
|                 | 7.3       | 1,52                 | <b>14,911</b> | Nowa lanca                                  |



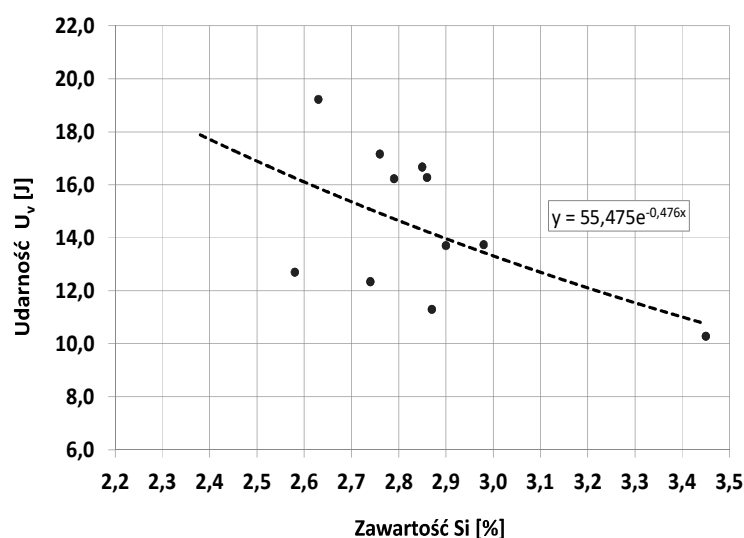
|             |      |      |               |                                          |
|-------------|------|------|---------------|------------------------------------------|
| R -7 Klin)  | 7.1  | 1,96 | <b>19,228</b> | żeliwo nie w pełni sfero, osnowa ferryt, |
|             | 7.2  | 1,75 | <b>17,168</b> | próbki z klina Y (bez modyf. W zbiorn.)  |
|             | 7.3  | 1,74 | <b>17,069</b> | Nowa lanca                               |
|             | 7,4  | 0,99 | <b>9,712</b>  | -20                                      |
| R7          | 7,2  | 0,45 | <b>4,415</b>  | -20                                      |
|             | 7,1  | 0,45 | <b>4,415</b>  | -20                                      |
|             | 7    | 0,45 | <b>4,415</b>  | -40                                      |
| R -8(odlew) | 8,1  | 2,49 | <b>24,427</b> | żeliwo w pełni sfero, osnowa ferryt,     |
|             | 8,2  | 2,85 | <b>27,959</b> | próbki z odlewu , rafinacja              |
|             | 8,3  | 2,54 | <b>24,917</b> | Nowa lanca                               |
|             | 8,4  | 2,58 | <b>25,310</b> |                                          |
| R -8 (Klin) | 8,1  | 1,16 | <b>11,380</b> | żeliwo w pełni sfero, osnowa ferryt,     |
|             | 8,2  | 1,27 | <b>12,459</b> | próbki z klina Y (bez modyf. W zbiorn.)  |
|             | 8,3  | 1,06 | <b>10,379</b> | Nowa lanca                               |
|             | 8    | 0,95 | <b>9,320</b>  | -20                                      |
| R8          | 8,6  | 0,40 | <b>3,924</b>  | -40                                      |
|             | 8,7  | 0,65 | <b>6,377</b>  | -20                                      |
|             | 8,8  | 0,80 | <b>7,848</b>  | -20                                      |
| R-9 (D)     | 9.1  | 1,40 | <b>13,734</b> | 20°C                                     |
|             | 9.2  | 1,35 | <b>13,244</b> | 20°C                                     |
|             | 9.3  | 0,40 | <b>3,924</b>  | -40                                      |
| R-9 (G)     | 9.1  | 0,80 | <b>7,848</b>  | 20°C                                     |
|             | 9.2  | 0,85 | <b>8,339</b>  | 20°C                                     |
|             | 9.3  | 0,50 | <b>4,905</b>  | -40                                      |
| R-9 (Klin)  | 9.1  | 1,75 | <b>17,168</b> | 20°C                                     |
|             | 9.2  | 1,60 | <b>15,696</b> | 20°C                                     |
|             | 9.3  | 1,15 | <b>11,282</b> | -20                                      |
|             | 9.4  | 0,45 | <b>4,415</b>  | -40                                      |
| R11 D       | 11,1 | 1,20 | <b>11,772</b> |                                          |
|             | 11,2 | 0,80 | <b>7,848</b>  |                                          |
|             | 11,3 | 0,90 | <b>8,829</b>  | -20                                      |
| R11 G       | 11,1 | 0,45 | <b>4,415</b>  |                                          |
|             | 11,2 | 0,45 | <b>4,415</b>  |                                          |
|             | 11,3 | 0,55 | <b>5,396</b>  | -20                                      |
| R11 klin    | 11,1 | 1,15 | <b>11,282</b> | 20                                       |
|             | 11,2 | 1,18 | <b>11,576</b> | 20                                       |
|             | 11,3 | 1,05 | <b>10,301</b> | -20                                      |
|             | 11,4 | 1,05 | <b>10,301</b> | -20                                      |



|           |       |      |                |     |
|-----------|-------|------|----------------|-----|
| R12 odlew | 12,1  | 1,25 | <b>12,263</b>  | 20  |
|           | 12,2  | 1,40 | <b>13,734</b>  | 20  |
|           | 12,3  | 0,75 | <b>7,358</b>   | -20 |
|           | 12,4  | 0,65 | <b>6,377</b>   | -20 |
|           | 12,5  | 0,35 | <b>3,434</b>   | -40 |
|           | 12,6  | 0,35 | <b>3,434</b>   | -40 |
| R12 klin  | 12,1k | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|           | 12,2k | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|           | 12,3k | 1,23 | <b>12,0663</b> | -20 |
|           | 12,4k | 0,60 | <b>5,886</b>   | -40 |
| R13 odlew | 13,1  | 1,15 | <b>11,282</b>  | 20  |
|           | 13,2  | 1,00 | <b>9,810</b>   | 20  |
|           | 13,3  | 1,05 | <b>10,301</b>  | 20  |
|           | 13,4  | 0,98 | <b>9,614</b>   | -20 |
|           | 13,5  | 0,65 | <b>6,377</b>   | -20 |
|           | 13,6  | 0,65 | <b>6,377</b>   | -40 |
| R13 klin  | 13,1k | 1,00 | <b>9,81</b>    | 20  |
|           | 13,2k | 1,15 | <b>11,2815</b> | 20  |
|           | 13,3k | 0,99 | <b>9,7119</b>  | -20 |
|           | 13,4k | 0,80 | <b>7,848</b>   | -40 |
| R14       | 14,1  | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|           | 14,2  | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|           | 14,3  | 0,95 | <b>9,3195</b>  | -20 |
|           | 14,4  | 0,55 | <b>5,3955</b>  | -40 |
| R15 odlew | 15,1  | 1,50 | <b>14,715</b>  | 20  |
|           | 15,2  | 1,50 | <b>14,715</b>  | 20  |
|           | 15,3  | 1,55 | <b>15,206</b>  | 20  |
|           | 15,4  | 1,17 | <b>11,478</b>  | -20 |
|           | 15,5  | 1,21 | <b>11,870</b>  | -20 |
|           | 15,6  | 1,05 | <b>10,301</b>  | -40 |
| R15 klin  | 15,1k | 1,75 | <b>17,1675</b> | 20  |
|           | 15,2k | 1,75 | <b>17,1675</b> | 20  |
|           | 15,3k | 1,45 | <b>14,2245</b> | -20 |
|           | 15,4k | 1,25 | <b>12,2625</b> | -40 |
| R16       | 16,1  | 1,68 | <b>16,481</b>  | 20  |
|           | 16,2  | 1,75 | <b>17,168</b>  | 20  |
|           | 16,3  | 1,66 | <b>16,285</b>  | 20  |
|           | 16,4  | 1,13 | <b>11,085</b>  | -20 |
|           | 16,5  | 1,00 | <b>9,810</b>   | -20 |
|           | 16,6  | 0,98 | <b>9,614</b>   | -20 |
|           | 16,7  | 0,70 | <b>6,867</b>   | -40 |
|           | 16,8  | 0,75 | <b>7,358</b>   | -40 |
| R17       | 17,1  | 1,65 | <b>16,187</b>  | 20  |

|     |          |      |               |     |
|-----|----------|------|---------------|-----|
|     | 17,2     | 1,66 | <b>16,285</b> | 20  |
|     | 17,3     | 1,69 | <b>16,579</b> | 20  |
|     | 17,4     | 0,75 | <b>7,358</b>  | -20 |
|     | 17,5     | 0,75 | <b>7,358</b>  | -20 |
|     | 17,6     | 0,45 | <b>4,415</b>  | -40 |
|     | 17,7     | 0,45 | <b>4,415</b>  | -40 |
|     | 17,8     | 0,48 | <b>4,709</b>  | -40 |
| R19 | 19.1     | 1,40 | <b>13,734</b> | 20  |
|     | 19.2     | 1,25 | <b>12,263</b> | 20  |
|     | 19.3     |      | <b>0,000</b>  | -20 |
|     | 19.4     | 0,80 | <b>7,848</b>  | -40 |
|     | 19.5     | 1,15 | <b>11,282</b> | 20  |
|     | 19.6     | 0,95 | <b>9,320</b>  | 20  |
|     | 19.7     | 1,00 | <b>9,810</b>  | -20 |
|     | 19.8     | 0,80 | <b>7,848</b>  | -40 |
|     | 19.III.1 | 1,10 | <b>10,791</b> | 20  |
|     | 19.III.2 | 1,10 | <b>10,791</b> | 20  |
|     | 19.III.3 | 0,95 | <b>9,320</b>  | -20 |
|     | 19.III.4 | 0,70 | <b>6,867</b>  | -40 |

Poszukując optymalnego składu chemicznego, w wypadku ferrytycznego żeliwa do pracy w warunkach niskiej temperatury i przy dynamicznych obciążeniach, na uwagę zasługują zarówno te pierwiastki, które uniemożliwiają uzyskanie struktury ferrytycznej (Mn), czy nadają kruchość (P), ale również dwa główne: węgiel (C) i krzem (Si).



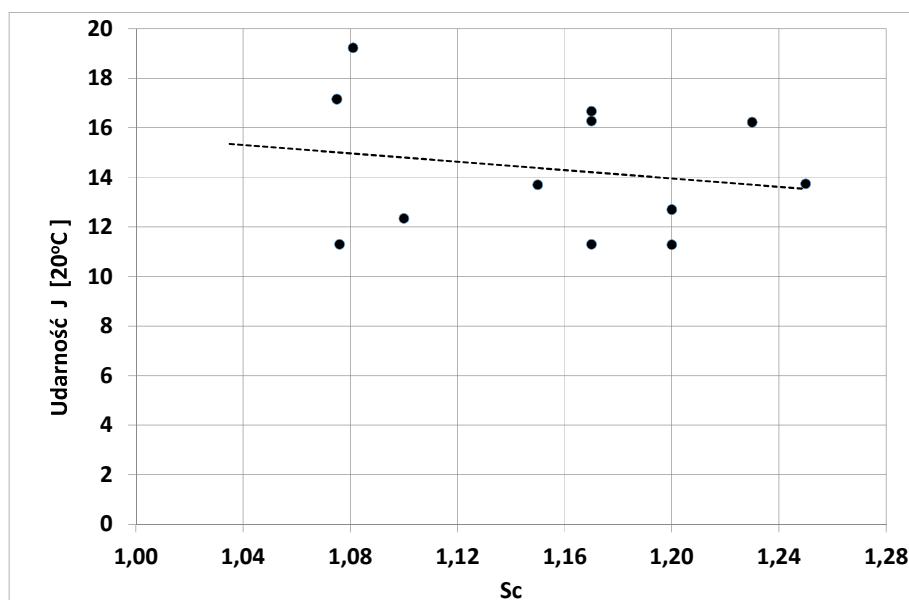
Rys.4.24. Wpływ zawartości krzemu na udarność żeliwa sferoidalnego ferrytycznego w temperaturze otoczenia.

Oba pierwiastki sprzyjają ferrytyzacji i z tego tytułu zaleca się ich dość wysokie zawartości. Jednak krzem sprzyjając ferrytyzacji sprzyja powstawaniu umocnionego (i mało plastycznego) ferrytu krzemowego.

Jakkolwiek powszechnie uważa się, że ferryt krzemowy tworzy się od około 3,0%Si, to jednak efekty jego działania jako pierwiastka umacniającego ferryt są widoczne już przy niższych zawartościach. **Podwyższania zawartości krzemu w żeliwie ferrytycznym prowadzi do umacniania ferrytu i podwyższania  $R_m$  żeliwa, ale równolegle obniża udarność.** Zasadą tą potwierdzają wyniki badań zrealizowane w Projekcie, rys. 4.24.

Obok zawartości krzemu, którą należy ograniczać do niezbędnej dla uzyskania osnowy ferrytycznej, ważnym jest wskaźnik nasycenia eutektycznego żeliwa. Na rysunku 4.25 przedstawiono jego wpływ na udarność. Wpływ ten nie jest jednoznaczny, co prawda pewną tendencję spadkową obserwuje się przy podwyższaniu  $Sc$ , jednak jest to wpływ słaby.

**W takiej sytuacji wydaje się uzasadnione podwyższanie wartości  $Sc$  (dla utrzymania ferrytycznej osnowy w odlewie) na drodze podnoszenia zawartości węgla przy zachowaniu umiarkowanie wysokiej zawartości Si ( $Si < 2,50\%$ ).**



Rys. 4.25. Wpływ stopnia nasycenia eutektycznego na udarność ferrytycznego żeliwa sferoidalnego.

**c. Badania wytrzymałości zmęczeniowej, niskocyklowej****d. Badania wytrzymałości zmęczeniowej, niskocyklowej**

Materiały do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń powinny charakteryzować się dobrą odpornością na zmęczenie w warunkach próby niskocyklowej, tj. takiej, w której liczba cykli do pojawienia się pęknięcia próbki nie przekracza  $1 \times 10^5$ .

Zmęczenie niskocyklowe (niszczenie krucho-ciągłe obserwowane przy liczbie cykli  $N < 10^5$ ), wystąpi podczas cyklicznego powstawania lokalnych, jednostronnych deformacji plastycznych, wskutek kumulowania odkształceń plastycznych w rytm kolejnych pętli histerezy, obserwowanych przy kolejnych cyklach obciążenia. Występuje współdziałanie i wzajemne wzmacnianie mechanizmu ziszczenia plastycznego na skutek narastania dużych odkształceń pełzania i mechanizmu kruchego na skutek propagacji defektów strukturalnych, powodujących rozluźnienie materiału z powodu powstawania mikropęknięć. Równoległe zachodzenie tych obu zjawisk powoduje, że wytrzymałość zmęczeniowa zależy zarówno od okoliczności, wpływających na kruche pękanie, jak i cech wpływających na zniszczenie pełzające.

Dla wykonania porównawczej oceny wytwarzanych gatunków żeliwa do pracy w niskiej temperaturze (w tym żeliwa EN GJS 400 – LT) przeprowadzono badania zmęczeniowe w warunkach jednostronnego zginania ( $Z_{g.o.}$ ) przy zachowaniu stałej strzałki ugięcia. Badania prowadzono na prototypowym stanowisku zbudowanym w Katedrze Technologii Form na Wydziale Odlewnictwa AGH.

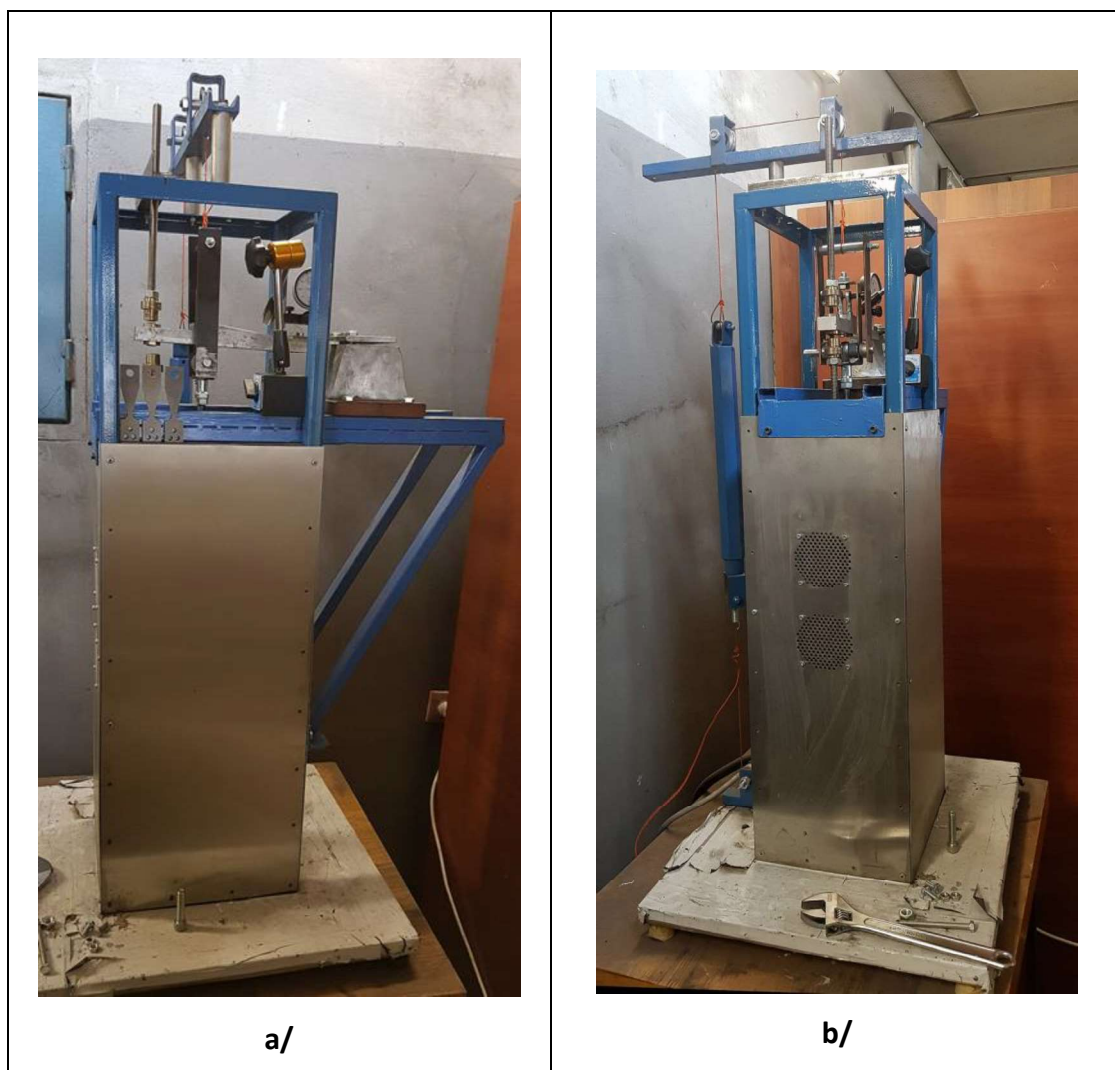
Na zdjęciach 4.26a i 4.26b pokazano widok ogólny stanowiska natomiast na zdjęciach 4.27a pokazano wygląd monitora sterowania warunkami badań i rejestracji ich wyników, a na zdjęciu 4.27b pokazano uchwyt mocowania próbki. Próbka jest jednym końcem mocowana na stałe (nieruchomo) natomiast drugi koniec jest zginany. W procesie zginania naprzemiennie wokół osi zerowej wywoływane są symetryczne stany naprężenia w próbce w jej warstwach zewnętrznych: raz ściskanie raz rozciąganie. Zachowywana jest symetria uginania próbki: raz w dół raz do góry z taką samą wartością wychylenia. Niekiedy taki charakter układu naprężenia w trakcie badań zmęczeniowych nazywany jest układem wahadłowym (naprzemiennie jednakowe naprężenie: raz ujemne – raz dodatnie o przebiegu



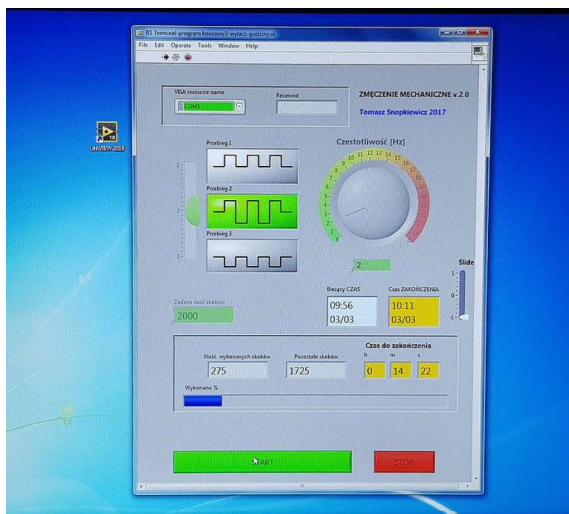
sinusoidalnym). Wywoływane są więc symetryczne naprężenia ściskające i rozciągające w warstewkach testowanej próbki.

Wymiary i kształt próbki mogą być dostosowane do celu realizacji badań. W badaniach deklarowanym parametrem była amplituda zginania próbek (strzałkę ugięcia), wtórnym parametrem były zatem naprężenia i siła wymuszająca dane ugięcie. Badania porównawcze prowadzono przy następujących parametrach

- Częstotliwość zginania:  $f = 2,0 \text{ Hz}$
- Amplituda zginania:  $A = 0,8 \div 1,0 \text{ mm}$



Rys. 4.26. Widok ogólny urządzenia do badań zmęczenia mechanicznego materiałów i tworzyw konstrukcyjnych w warunkach jednostronnego zginania



a/



b/

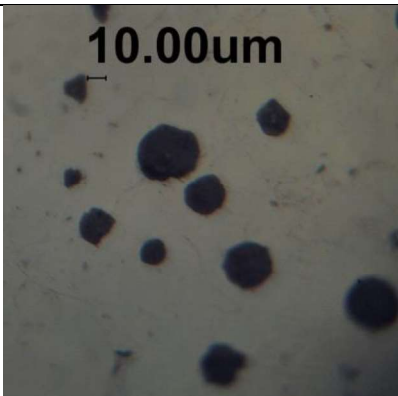
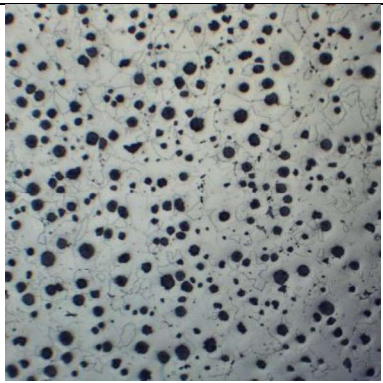
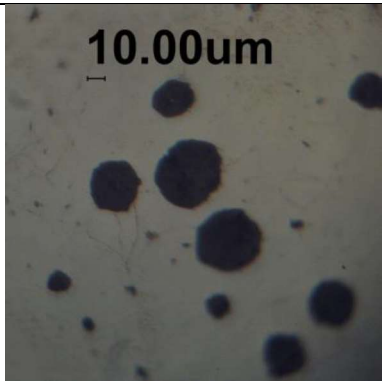
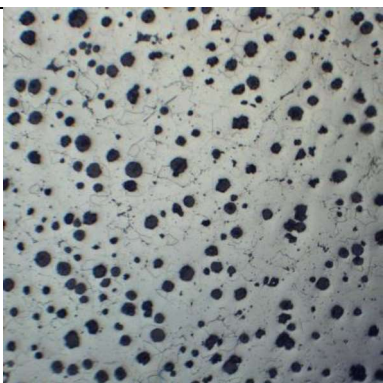
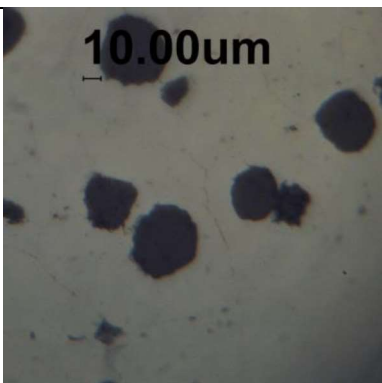
Rys. 4.27. Widok urządzenia do badań zmęczenia mechanicznego materiałów i tworzyw konstrukcyjnych w warunkach jednostronnego zginania: a/- ekran tablicy starowania, b/ - głowica mocowania próbek

Badania porównawcze wykonano na próbkach z wytopów R14 i R15, które charakteryzowały się składami chemicznymi podanymi w tabeli 4.7 poniżej.

Tab. 4.7. Składy chemiczne żeliwa z wytopów R14 i R15

| Nr wytopu    | Uwagi        | C           | Si          | Mn           | P            | S                | Mg           |
|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------------|--------------|
| <b>R14.1</b> | z pieca      | 3,70        | 1,61        | 0,041        | 0,037        | 0,006            | 0,002        |
| <b>R14.2</b> | po wszystkim | <b>4,18</b> | <b>2,79</b> | <b>0,074</b> | <b>0,017</b> | <b>&lt;0,002</b> | <b>0,029</b> |
| <b>R15.1</b> | z pieca      | 3,90        | 1,64        | 0,031        | 0,025        | 0,006            | 0,001        |
| <b>R15.2</b> | po wszystkim | <b>3,68</b> | <b>2,76</b> | <b>0,064</b> | <b>0,022</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>0,036</b> |

Tab.4.8. Struktury uzyskane w wytopach 14 i 15

| Nr<br>wytopu | Pow. x 100                                                                          | Pow. x 500                                                                           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| R14          |    |    |
| R14          |   |   |
| R15          |  |  |



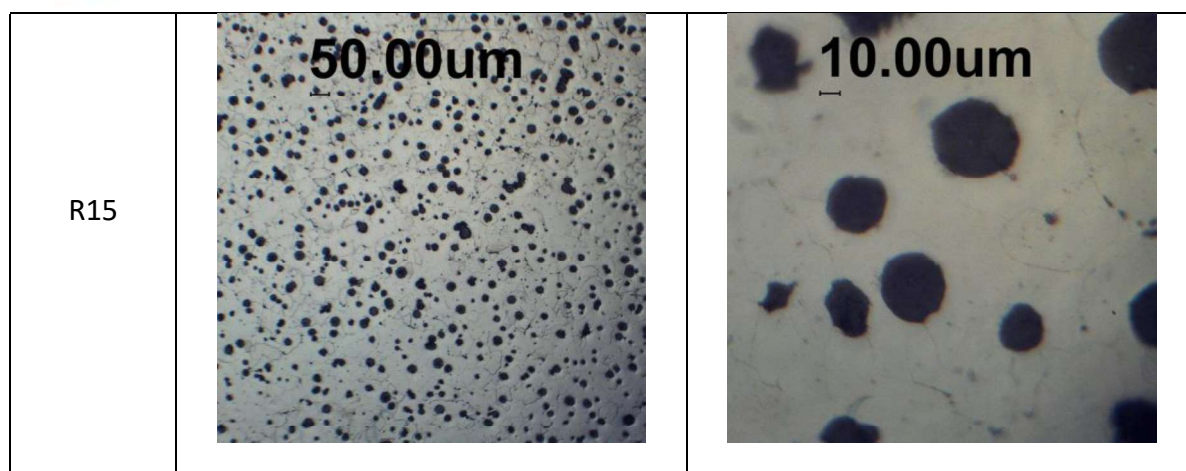


Tabela 4.9. Wyniki badań udarności żeliwa

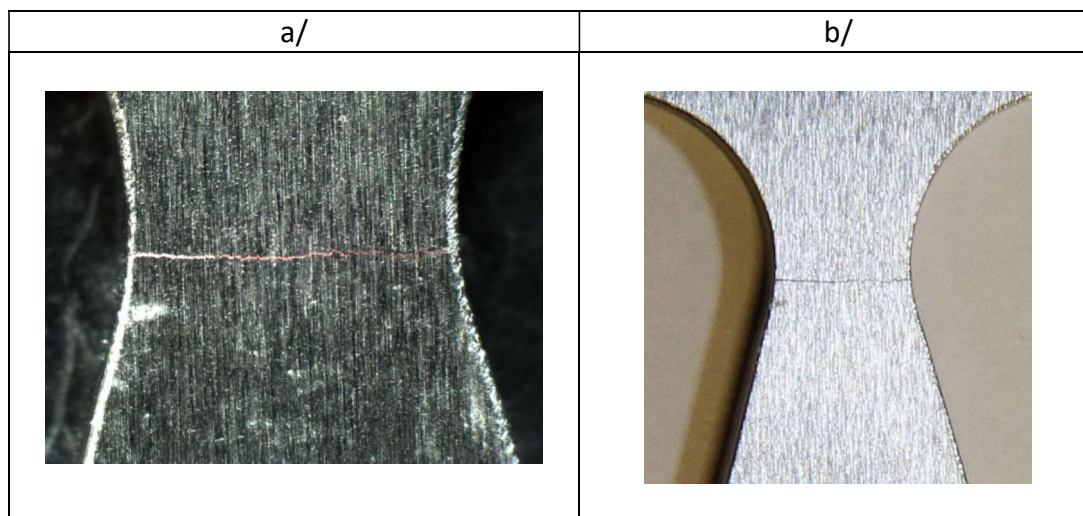
|     |       |      |                |     |
|-----|-------|------|----------------|-----|
| R14 | 14.1  | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|     | 14.2  | 1,65 | <b>16,1865</b> | 20  |
|     | 14.3  | 0,95 | <b>9,3195</b>  | -20 |
|     | 14.4  | 0,55 | <b>5,3955</b>  | -40 |
| R15 | 15.1k | 1,75 | <b>17,1675</b> | 20  |
|     | 15.2k | 1,75 | <b>17,1675</b> | 20  |
|     | 15.3k | 1,45 | <b>14,2245</b> | -20 |
|     | 15.4k | 1,25 | <b>12,2625</b> | -40 |

#### Wyniki badań zmęczenie niskocyklowego

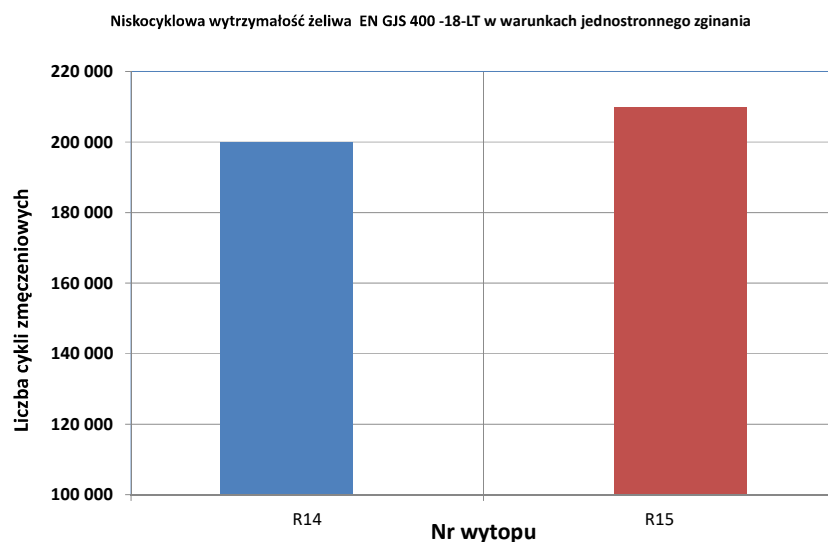
Badania niskocyklowego zmęczenia prowadzono na płaskich próbkach o grubości 4,0mm i kształcie jak na rysunku 4.28. W wyniku zmęczenia mechanicznego powstawało pęknięcie pokazane na rysunku 2.29.



Rys. 4.28. Wygląd próbki do badań niskocyklowego zmęczenia w warunkach jednostronnego zginania



Rys. 4.29. Widok zmęczeniowego pęknięcia próbki: a/ w świetle spolaryzowanym; b/ bez oświetlenia dodatkowego



Rys. 4.30. Porównanie wytrzymałości zmęczeniowej żeliwa z dwóch wytopów.

Wyniki badań niskocyklowego pokazują dużą odporność tych gatunków żeliwa o strukturze ferrytycznej i graficie kulkowym. W dotychczasowej ocenie przydatności materiałów do pracy w warunkach dynamicznych obciążeń badania niskocyklowe nie były zbyt często realizowane. Brakuje skali odniesienia (porównań), dlatego rozpoczęte badania należy kontynuować, a ich wyniki powinny być powiązane z analizą struktury jak i analizą udarności, która jest miarą odporności materiału na obciążenia dynamiczne.

## PODSUMOWANIA

W ramach zadania 4 zostały określone właściwości technologiczne żeliwa wytwarzanego w nowej technologii w tym:

- kinetyki skurczu odlewniczego,
- wielkości skurczu objętościowego,
- skłonności do zabielen,
- wrażliwości na szybkość stygnięcia.

Wyznaczono również właściwości użytkowe, takie jak:

- gęstości właściwej,
- właściwości mechaniczne  $R_m$ ,  $R_{02}$ ,  $A_5$ , HB
- Udarność w niskiej temperaturze ( $U_v$ )
- wytrzymałości zmęczeniowej niskocyklowej.

W raporcie zabrano wyniki tych badań i przedstawiono w tabelach bądź w postaci graficznej. Wyniki uzyskane w skali „mikro”, żeliwo wytwarzane w warunkach odlewni doświadczalnej nie przemysłowej, może do pewnych granic różnić od wytwarzanego w warunkach przemysłowych. Nie należy jednak spodziewać się dużych różnic. W badaniach wyznaczono podstawowe parametry procesu topienia żeliwa i jego pozapiecowej obróbki niezbędne do uzyskiwania, w stabilny i powtarzalny żeliwa sferoidalnego o strukturze „czysto” ferrytycznej koniecznej dla osiągnięcia koniecznych wartości udarności, ale i wytrzymałości oraz wydłużenia żeliwa opisanych normą.

W badaniach wykazano korzystny wpływ dwuetapowej rafinacji żeliwa, która pozwala uzyskiwać wysoką stabilność i powtarzalność w uzyskiwanych wynikach badań właściwości mechanicznych. Ograniczenie liczby wtrąceń, ujednolicanie składu żeliwa w wyniku rafinacji w kadzi prowadzi do osiągania dużej jednorodności w osiąganych właściwościach.

Wyznaczone właściwości technologiczne, w tym skurcz liniowy i objętościowy żeliwa po rafinacji pozwala Odlewni projektowanie technologii odlewów z tych gatunków żeliwa.

Opracowano ponadto kryteria oceny jakości żeliwa, które również zostaną wykorzystane przez Odlewnię przy badaniach w warunkach makro i przy opracowywaniu technologii wytwarzania odlewów z tych gatunków żeliwa.

Jednym z ważniejszych efektów prowadzenia badań nad właściwościami było określenie warunków technologicznych, przy zachowaniu których możliwe jest osiągnięcie założonych celów: właściwości mechanicznych. Zdefiniowany został podstawowy skład chemiczny żeliwa, technologia topienia i pozapiecowej obróbki (w tym rafinacji), które po weryfikacji w skali makro powinny być wdrożone do instrukcji wykonywania odlewów w nowej technologii.

Opracował

Kraków.07.01.2020

.....

Prof. dr hab. inż. Jerzy S. Zych