

## The characteristics of microstructure and properties of different types of cast steel

### Charakterystyka mikrostruktury i własności wybranych gatunków staliw

#### Streszczenie

W pracy wykazano jak ważną grupę materiałów inżynierskich stanowią staliwa. Przedstawiono główne sektory, w których stosuje się wyroby staliwne. Omówiono najważniejsze zalety oraz wady staliw. Przedstawiono ogólny podział stopów żelaza ze szczególnym uwzględnieniem staliw. Omówiono technologię wytwarzania wyrobów staliwnych. Scharakteryzowano najczęściej występujące w wyrobach staliwnych wady odlewnicze. Omówiono wpływ składu chemicznego staliw na mikrostrukturę oraz własności. Dokonano podziału staliw na poszczególne grupy, takie jak: staliwa narzędziowe, niestopowe (węglowe), żaroodporne, żarowytrzymałe, odporne na korozję oraz na ścieranie. Scharakteryzowano każdą z grup pod kątem zastosowania, składu chemicznego oraz własności. Część badawcza pracy obejmuje charakterystykę mikrostrukturalną wybranych gatunków staliw niestopowych (węglowych) oraz odpornych na ścieranie. Analizie mikrostrukturalnej poddano próbki następujących gatunków staliw niestopowych (węglowych): GS52 oraz 270-480W, oraz próbki następujących gatunków staliw odpornych na ścieranie: L45G oraz L35GSM. Przeprowadzona analiza mikrostruktur wykazała duże różnicowanie pomiędzy staliwami należącymi do grupy staliw niestopowych (węglowych), a grupą staliw odpornych na ścieranie. W strukturze badanych gatunków staliw niestopowych (węglo-

#### Abstract

A theme of the paper emphasizes the importance of cast steel. It also presents the major sectors in which cast steel products are used. Main advantages and disadvantages of cast steel were described in the paper. It also presents a general iron alloys classification including a cast steel classification. The paper characterizes the technologies of cast steel generation. The most common defects of cast steel products were also indicated. The impact of chemical composition on cast steel microstructure and properties was discussed. What is more, the paper shortly describes the division of cast steel groups which include tool steel, non-alloy (carbon) cast steel, heat resistant steel, creep-resisting steel, wear resistant and nonweathering steel. Each of them has been characterized in terms of its application, chemical analysis and properties. The theoretical part of the paper focuses mainly on non-alloy (carbon) cast steel and wear resistant steel, whereas the research concerns the microstructural characteristic of particular types of non-alloy (carbon) cast steel. The specimens of non-alloy (carbon) cast steel, such as GS52, 270-480W, and wear resistant cast steel, such as L45G and L35GSM were analyzed. The analysis showed great differences between groups of non-alloy (carbon) cast steel and wear resistant cast steel. The structure of analyzed non-alloy (carbon) cast steel indicated the presence of Widmanstätten ferrite. An observation of the specimens of

<sup>1</sup> amaruszczyk@gmail.com, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska

<sup>2</sup> klaudia.klima93@gmail.com, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska

<sup>3</sup> kolan@wip.pcz.pl, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska

wych) zauważono obecność ferrytu Widmanstättena. Obserwacja mikrofotografii próbek staliw odpornych na ścieranie pozwoliła stwierdzić, iż posiadają one znaczenie bardziej drobną strukturę, niż badane staliwa niestopowe (węglowe). Co więcej, zestawiono również skład chemiczny założony w normach przedmiotowych dla danych gatunków staliw z rzeczywistym składem chemicznym badanych próbek. Przedstawiono wyniki pomiarów twardości badanych gatunków staliw. W pracy wykazano bezpośredni związek pomiędzy mikrostrukturą badanych staliw, a ich twardością.

**Słowa kluczowe:** stopy żelaza, staliwo, wytwarzanie staliwa

wear resistant cast steel proved that they have significantly finer structure than non-alloy (carbon) cast steel. Moreover, the chemical analysis assumed for particular types of cast steel was collated with the actual chemical analysis of specimens. The paper presents the results of hardness testing of different types of cast steel and collates them with the standard values for particular steel types. It also portrays a direct relationship between the microstructure and hardness of analyzed types of cast.

**Keywords:** iron alloys, cast steel, cast steel generation

## 1. Wstęp

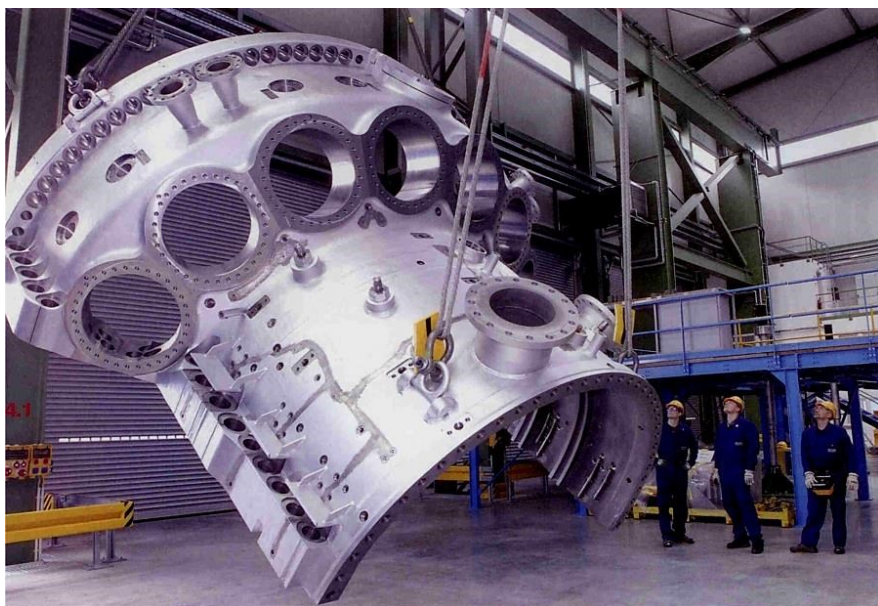
Techniczne stopy żelaza można podzielić na kilka grup. Najważniejsze z nich to stale, staliwa, żeliwa oraz surówki. Techniczny stop żelaza z węglem oraz pierwiastkami stopowymi, zawierający do 2% węgla, w zależności od metody wytwarzania nazywa się stalą bądź staliwem. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na technologii wytwarzania. Staliwo po otrzymaniu ciekłego metalu w procesie stalowniczym odlewa się do form odlewniczych, a krzepnący w nich odlew stanowi gotowy produkt. Natomiast ze stali wytwarza się półprodukty m.in. wlewki ciągłe oraz kęsy, które następnie poddaje się przeróbce plastycznej celem nadania kształtu gotowego wyrobu [1]. Odlewanie stali do form odlewniczych pozwala uzyskać ogromne oszczędności materiałowe wynikające ze znacznie mniejszych nakładów na obróbkę mechaniczną przy wytwarzaniu części maszyn, w porównaniu z wytwarzaniem poprzez obróbkę skrawaniem. Obecnie ok. 80% wszystkich części maszyn wykonuje się ze staliwa. Wyroby staliwne charakteryzują się dobrymi własnościami mechanicznymi oraz dobrą spawalnością, szczególnie przy niskiej zawartości węgla i dodatków stopowych [2]. Największe zapotrzebowanie na elementy staliwne zauważa się w następujących sektorach: przemysł wydobywczy, metalurgiczny, przetwórczy oraz energetyka. W Polsce w 2009 roku wyprodukowano 920 tys. ton odlewów, co sprawia, iż nasz kraj pod tym względem plasuje się na 6 miejscu w Unii Europejskiej [3, 4].

Celem pracy jest scharakteryzowanie technologii wytwarzania staliw. W pracy przedstawiono podstawowy podział staliw. Część badawcza pracy obejmuje charakterystykę mikrostruktur oraz własności wybranych gatunków staliw niestopowych (węglowych) oraz odpornych na ścieranie. W pracy dokonano zestawienia rzeczywistego składu chemicznego badanych próbek ze składem zawartym w przewidzianych dla nich normach przedmiotowych.

## 2. Wytwarzanie odlewów stalowych

Produkcja odlewów zarówno stalowych, jak i odlewów innych metali polega na nadaniu przedmiotowi kształtów poprzez doprowadzenie do uprzednio przygotowanej formy ciekłego metalu. W wyniku wypełnienia wnęki formy uzyskuje się element o kształtach odpowiadających modelowi, który posłużył do wykonania formy. Wewnętrzne kształty odlewane go przedmiotu zostają odtworzone przez rdzenie.

Odlewnictwo stanowi dzisiaj jedną z najważniejszych gałęzi przemysłu metalowego. Wynika to m.in. z możliwości otrzymywania poprzez odlewanie elementów o dużych wymiarach i skomplikowanych kształtach. Wykonywanie takich wyrobów technikami wiórowymi wiąże się z dużo wyższymi nakładami na robociznę oraz dużymi stratami materiałowymi. Przykład wielkogabarytowego wyrobu o skomplikowanych kształtach, otrzymanego poprzez odlewanie przedstawiono na rys. 1. Odlewnictwo pozwala również na wytwarzanie wyrobów charakteryzujących się poprawnością wymiarową oraz stosunkowo dobrym stanem powierzchni [2].



Rysunek 1. Stalowy odlew obudowy turbiny [5]

Proces produkcji odlewu można umownie podzielić na kilka etapów, tj. przygotowanie ciekłego metalu, przygotowanie formy odlewniczej, zalewanie uprzednio przygotowanej formy, krzepnięcie odlewu, a także wybicie odlewu z formy oraz obróbkę wykańczającą [1].

## 2.1. Wytop stali na odlewy

Obecnie w większości krajowych odlewni produkujących odlewy stalowe wykorzystuje się elektryczne piece łukowe jako podstawowe medium topiące. Nieco mniejszym uznaniem cieszą się piece indukcyjne. Piece do wytopu stali muszą być w stanie osiągnąć temperaturę rzędu 1600°C. W przemyśle odlewniczym wykorzystuje się najczęściej piece o pojemności wsadu do 15 Mg.

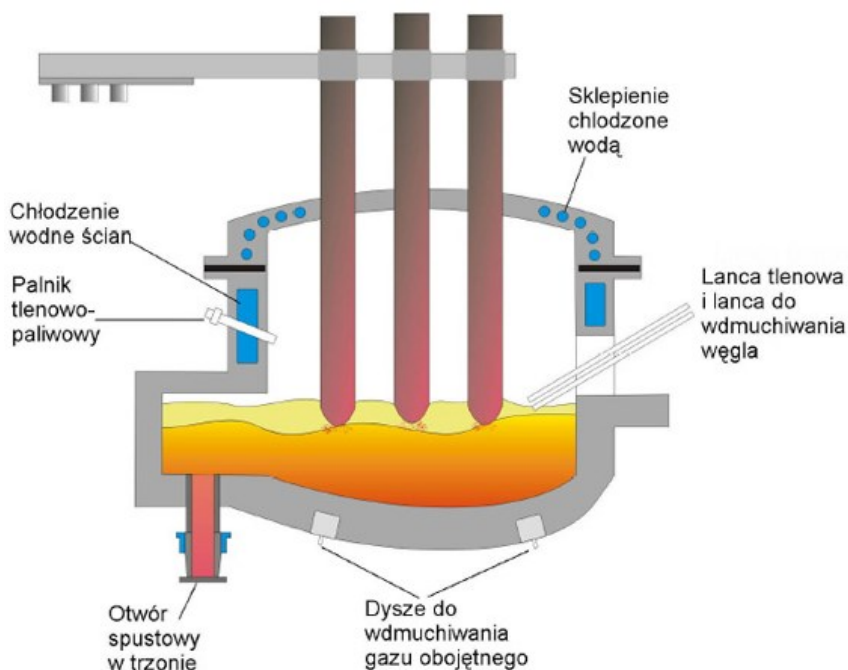
W elektrycznym piecu łukowym źródło ciepła stanowi łuk elektryczny, płonący pomiędzy elektrodami bądź pomiędzy elektrodami a wsadem. Piece wykorzystywane w krajowych odlewniach charakteryzują się zasadowym wyłożeniem, co pozwala na odsiarczanie oraz odfosforowanie ciekłego metalu [6]. Fotografie elektrycznego pieca łukowego przedstawiono na rys. 2.



Rysunek 2. Elektryczny piec łukowy [7]

Piec łukowy zbudowany jest z pancierza składającego się ze stalowej blachy. W pancerzu ulokowane są otwory na okno robocze i otwór spustowy. Okno robocze jest stosowane do wykonywania zabiegów technologicznych, tj. wprowadzanie dodatków stopowych, ściąganie żużła, ładowanie dodatków żuzłotwórczych oraz pomiaru temperatury. Ciekły metal z pieca jest spuszcany do kadzi za pomocą rynny spustowej, która znajduje się po prze-

ciwej stronie okna roboczego. Trzon pieca stanowi warstwowy układ mający za zadanie izolować ciekły metal od otoczenia. Sklepienie pieca jest zbudowane z pierścienia stalowego, chłodzonego wodą oraz materiałów ogniotrwałych. Sklepienie elektrycznego pieca łukowego musi być wykonane z materiałów najwyższej jakości, gdyż jest silnie narażone na oddziaływanie łuku elektrycznego. Elektrody w piecu łukowym dostarczające energię elektryczną do wnętrza pieca, zamocowane są na uchwycie i wprowadzane do pieca otworami w sklepieniu. Elektrody najczęściej wykonane są z grafitu [8]. Uproszczony schemat budowy elektrycznego pieca łukowego przedstawiono na rys. 3.



Rysunek 3. Budowa elektrycznego pieca łukowego [9]

Wsad w elektrycznym piecu łukowym składa się z [10]:

- złomu stalowego;
- topników;
- nawęgla czy;
- dodatków stopowych;
- odtleniaczy;
- pniaczy żużla.

Ładowanie wsadu do dużych jednostek topiących przeprowadza się za pomocą koszy załadowniczych, po uprzednim usunięciu sklepienia. Roztopianie wsadu rozpoczyna się w momencie nałożenia na kocioł sklepienia, opuszczeniu elektrod oraz włączeniu prądu. Następnie do kąpeli metalowej wprowadza się dodatki stopowe oraz przeprowadza odtlenianie, najczęściej żelazokrzemem, po czym następuje spust ciekłego metalu do kadzi [6].

Wytapianie stali, bazując na złomie, jest istotnym elementem racjonalnej gospodarki surowcami naturalnymi. Wykorzystywanie złomu stalowego w procesach metalurgicznych stawia przed odlewniami bardzo trudne zadanie, jakim jest wyjątkowo skrupulatny dobór złomu pod kątem składu chemicznego, wymagane dla danego gatunku otrzymywanej stali [11].

## **2.2. Zalewanie formy i krzepnięcie odlewu**

Formy odlewnicze dzieli się na jednorazowe oraz trwałe. Formy jednorazowe dominują w przypadku wytwarzania odlewów ze stopów żelaza [2, 12].

Ciekły metal spuszcza się z pieca do kadzi odlewniczej, która jest urządzeniem służącym do transportu ciekłego metalu na terenie odlewni. Struga ciekłego metalu jest wlewana poprzez wlew główny do wnętrza formy. Wlewanie metalu do formy przeprowadza się w sposób zapobiegający dostaniu się żużla do formy. Aby uniknąć zaciągnięcia do wnętrza formy powietrza mogącego spowodować powstanie pęcherzyków wewnątrz metalu, formę zalewa się ze stałą prędkością. Ciekły metal przepływa przez układ wlewowy wypełniając całkowicie wnękę formy ciekłym metalem [2,13].

Sposób wypełniania formy, a właściwie błędy popełnione na etapie projektowania odlewu, są przyczyną powstania ok. 85% problemów związanych z zalewaniem formy. Do najważniejszych czynników decydujących o prawidłowym wypełnieniu formy zalicza się: odpowiednio dobrane elementy układu wlewowego, temperaturę zalewania oraz prędkość zalewania. Proces zalewania formy jednorazowej ciekłym metalem wprost z kadzi odlewniczej przedstawiono na rys. 4 [2, 10].



Rysunek 4. Zalewanie formy ciekłym metalem w jednej z krajowych odlewni [14]

Proces krzepnięcia odlewu, z fizykochemicznego punktu widzenia, jest niezwykle złożony. Warunki krzepnięcia mają bardzo duże znaczenie dla własności oraz struktury odlewanej materiału. Zasadniczym czynnikiem decydującym o prawidłowym przebiegu krzepnięcia odlewu jest prawidłowe zaprojektowanie odlewu, w sposób zapewniający m.in. odpowiednie warunki do odprowadzenia ciepła z wnętrza formy [8]. Krzepnięcie odlewu można podzielić na kilka etapów [12]:

- stygnięcie metalu będącego w ruchu;
- odprowadzenie ciepła ze znajdującego się w formie nieruchomego metalu;
- krzepnięcie metalu;
- stygnięcie zakrzepłego odlewu w formie;
- stygnięcie odlewu po wybicciu z formy.

Podczas krzepnięcia odlewu zachodzą zmiany objętości materiału. Zjawisko takie nazywa się skurczem odlewniczym. Zjawiska związane ze skurczem odlewniczym, przy złym zaprojektowaniu technologii odlewniczej, mogą doprowadzić do najczęstszych wad odlewów, tj. jam skurczowych oraz rzadzisz [10, 12]. Przykład jamy skurczowej, ujawnionej w odlewie po obróbce mechanicznej przedstawiono na rys. 5.

Nieodpowiednie odprowadzenie ciepła od krzepnącego odlewu może doprowadzić do niejednorodności składu chemicznego w obrębie odlewu, a co

za tym idzie, miejscowej anizotropii własności. Zbyt niska gazoprzepuszczalność masy formierskiej może być przyczyną powstania pęcherzów powietrznych w odlewie [15, 16].



Rysunek 5. Przykład jamy skurczowej ujawnionej w odlewie po głębokiej obróbce mechanicznej [17]

### 2.3. Wykańczanie odlewów

Do zabiegów wykańczających odlewy zalicza się wszystkie czynności wykonywane od momentu wydostania formy wraz z odlewem ze skrzyni formierskiej. W dalszej kolejności następuje oddzielenie resztek masy od odlewu. W celu usunięcia masy z odlewu stosuje się tzw. kraty wibracyjne.

Po oddzieleniu masy formierskiej od odlewu oczyszcza się powierzchnię odlewu oraz usuwa układ wlewowy. Oczyszczaniem odlewu nazywa się czynności mające na celu usunięcie z jego powierzchni zanieczyszczeń niemetalicznych, w tym przywierających resztek masy oraz warstw tlenkowych. W większości krajowych zakładów odlewniczych do oczyszczania powierzchni małych i średnich odlewów stosuje się metodę oczyszczania wirnikowo-śrutową. Metoda ta polega na bombardowaniu powierzchni odlewu metalowym śrutem z prędkością  $40\div 75\text{m/s}$ . Podczas wykańczania odlewów wykonuje się również naprawy wad odlewniczych, które można sklasyfikować następująco [1,2]:



- prostowanie;
- czopowanie;
- spawanie.

Na etapie wykańczania, odlewy poddawane są obróbce cieplnej, która ma na celu polepszenie ich własności. Obróbka cieplna odlewów jest zabiegiem koniecznym, gdyż tylko w ten sposób można ulepszyć charakterystyczną dla odlewów niejednorodną i gruboziarnistą strukturę. W celu ujednorodnienia struktury odlewów przeprowadza się tzw. wstępne operacje obróbki cieplnej, które składają się z nagrzania odlewu do określonej temperatury i utrzymania go w tej temperaturze przez określony czas, a następnie chłodzeniu zapewniającym równowagowe warunki dla przemian fazowych. Inne operacje obróbki cieplnej, tj. hartowanie czy przesycanie, są wykonywane w celu nadania wyrobowi określonych cech, np. wyższej twardości [18, 19].

### 3. Podział staliw

Staliwa to odlewnicze stopy żelaza z węglem i innymi pierwiastkami stopowymi o zawartości węgla do ok. 2%. Zawartość poszczególnych pierwiastków niewątpliwie wpływa na własności wytrzymałościowe oraz strukturę.

Do podstawowych pierwiastków wchodzących w skład staliw nie-stopowych, oprócz węgla, zalicza się: Mn, Si, P, S. Natomiast dopuszczalna jest również zawartość Cr, Ni, Cu, Mo, V. Maksymalne stężenia tych pierwiastków wg PN-ISO3755-1994 wynoszą odpowiednio: Cr (max. 0,35%), Ni (max. 0,40%), Cu (max. 0,40%), Mo (max. 0,15%) oraz V (0,05%). Staliwa mają szerokie spektrum zastosowań. Z tego względu dzieli się je na: narzędziowe, węglowe, żaroodporne, żarowytrzymałe, odporne na korozję i odporne na ścieranie oraz niestopowe [20].

#### 3.1. Staliwa niestopowe

Staliwa niestopowe to stopy żelaza z węglem o maksymalnej zawartości węgla do 2%. W praktyce zawartość ta może się wahać od 0,1÷0,6%. Natomiast zawartość tego pierwiastka ma istotny wpływ na własności staliw. Wzrost zawartości węgla do 0,8% objawia się występowaniem charakterystycznej struktury ferrytyczno-perlitycznej. W przypadku, gdy zawartość węgla jest większa niż 0,8%, w strukturze, oprócz perlitu, obecny jest również cementyt wtórny. Zmiana zawartości węgla znacznie wpływa na własności mechaniczne oraz plastyczne, a przede wszystkim pogarsza spawalność staliw [20, 21].

### 3.2. Domieszki i dodatki stopowe w staliwach

Dodatki stopowe to metale lub inne substancje dodawane w niewielkich ilościach w celu zmodyfikowania właściwości staliwa. Jako domieszki występują najczęściej mangan, krzem, fosfor, siarka, a także wodór, azot i tlen [8].

Siarka należy do pierwiastków praktycznie nierozpuszczalnych w żelazie, tworząc z nim siarczek żelaza. Związek ten jest łatwo topliwy, a temperatura, w której przechodzi ze stanu stałego w ciekły wynosi 1193°C. FeS (zawiera ok. 58% siarki) ze względu na niższą plastyczność wydzieleni powoduje kruchość stali na gorąco, dlatego dąży się aby siarka występowała w postaci związku z manganem tworząc siarczek manganu MnS, który jest znacznie mniej szkodliwy. Dopuszczalna zawartość siarki w staliwie nie może przekraczać 0,035%, a jej obecność znacznie wpływa na:

- obniżenie własności plastycznych;
- występowanie kruchości na gorąco;
- polepszenie obrabialności staliw.

Fosfor, podobnie jak siarka, występuje w postaci rud żelaza i w znacznych ilościach przyczynia się do pogorszenia własności staliw. Przyjmuje się, że maksymalna zawartość fosforu nie może przekraczać 0,035%, gdyż obecność fosforu powyżej 0,1% może powodować tzw. kruchość na zimno. Dodatkowo, wzrost stężenia tego pierwiastka może silnie obniżać plastyczność i powodować segregację. Należy jednak zauważyć, że w szczególnych przypadkach wyższa zawartość fosforu może być korzystna. W stalach automatowych zawartość fosforu powyżej 0,1% znacznie przyczynia się do poprawy skrawalności, zaś powyżej 0,35% zwiększa odporność na korozję i zużycie ścierne [4,8]. Do korzystnych domieszek występujących w staliwach zalicza się przede wszystkim: Mn (do 0,7%), Si (do 0,4%), P (do 0,05%) oraz Cu, Mo, Ni, V, Cr.

Mangan wprowadzany jest do staliw, aby zainicjować proces odtlenienia, czyli usunięcia szkodliwego tlenku żelaza, powodującego znaczne pogorszenie właściwości, a także zneutralizować szkodliwe działanie siarki. Natomiast zawartość krzemu w staliwie wynosi maksymalnie 0,4%, a jego obecność zapobiega segregacji siarki i fosforu oraz niewątpliwie wpływa na:

- zwiększenie lejności staliwa;
- zwiększenie twardości i wytrzymałości na rozciąganie;
- pogorszenie spawalności;
- zmniejszenie zawartości tlenu.

Wymienione wcześniej gazy: tlen (max. zawartość 70 ppm), azot (max. 120 ppm) i wodór (max. 2 - 4 ppm) występują w znikomych ilościach, mimo to ich obecność silnie wpływa na pogorszenie plastyczności staliw. Tlen w czasie krystalizacji przyczynia się do segregacji siarki i fosforu, wskutek

czego w pewnych miejscach zawartość P i S będzie dość znaczna, co będzie powodować kruchość materiału. Z kolei azot może występować w postaci azotków, które mają zdolność do przesuwania progu kruchości do wyższej temperatury, co jest przyczyną powierzchniowych mikropęknięć [8].

Maksymalna zawartość miedzi jest ograniczona do 0,2%, a obecność tego pierwiastka znacznie zwiększa odporność materiału na korozję atmosferyczną oraz prowadzi do umocnienia wydzieleniowego.

Należący do pierwiastków stopowych molibden przyczynia się do polepszenia właściwości staliw: zwiększa hartowność, podnosi wytrzymałość i odporność na pełzanie oraz zmniejsza kruchość. Wzrost jego zawartości wpływa negatywnie na spawalność staliw.

Nikiel w małych ilościach (0,5÷1%) ma na celu polepszenie hartowności. Przy zawartości 3÷9% powoduje obniżenie temperatury przejścia staliw w stan kruchy. Natomiast wzrost obecności do ponad 8% w staliwach odpornych na korozję i żaroodpornych ma na celu stabilizację austenitu.

Wanad dodawany jest do staliw w celu zwiększenia hartowności oraz umacniania wydzieleniowego przy zawartości do 0,2%. Dodanie większych ilości powoduje zwiększenie odporności na zużycie ścierne.

Chrom, podobnie jak wanad, dodawany jest w celu uzyskania wyższej hartowności staliw. Natomiast przy większych ilościach (ponad 2%) zwiększa odporność na ścieranie. Zawartość chromu powyżej 10,5% powoduje lepszą odporność na korozję oraz utlenianie. Dlatego jest jednym z podstawowych pierwiastków występujących w staliwach: odpornych na korozję, żaroodpornych i żarowytrzymałych [21].

### 3.3. Staliwa stopowe

Staliwa stopowe to takie, które w swoim składzie chemicznym zawierają przede wszystkim węgiel oraz inne dodatki stopowe, których zawartość waha się od kilku do kilkudziesięciu procent. Obecne w materiale dodatki stopowe wprowadza się w celu uzyskania odpowiednich właściwości, m.in. podwyższenie hartowności oraz uzyskania pożądanych właściwości fizycznych, wytrzymałościowych oraz określonych zmian w strukturze.

Podział staliwa stopowego, w zależności od zawartości pierwiastków stopowych [12,20] :

- niskostopowe, w których łączny udział pierwiastków stopowych wynosi max. 2,5%;
- średniostopowe, w których łączny udział pierwiastków stopowych waha się w przedziale 2,5÷5%;
- wysokostopowe, w których łączny udział pierwiastków stopowych wynosi powyżej 5%.

Najszerze zastosowanie mają staliwa stopowe narzędziowe, które cechują się wyższą zawartością węgla i dodatków stopowych. Głównymi składnikami strukturalnymi staliwa są węgliki chromu, wolframu i molibdeny. Polska Norma PN-90/H-83161 obejmuje występowanie 18 gatunków staliw narzędziowych do pracy na zimno i na gorąco. Staliwa te charakteryzują się znacznie wyższą twardością, kruchością oraz zapewniają dużą odporność na zużycie ściernie. Główne zastosowanie stali narzędziowych to matryce kuźnicze, formy i wkładki do odlewania stopów Al i Cu oraz walce hutnicze.

Kolejną grupę staliw charakteryzujących się wysoką zawartością chromu (ok. 7÷28%) to staliwa żaroodporne i żarowytrzymałe. Dodatek Cr nadaje wysoką odporność na działanie gazów utleniających przy wysokich temperaturach oraz wytrzymałość na pełzanie [2, 20].

Inną grupę staliw stopowych stanowią staliwa odporne na korozję, które w zależności od składu chemicznego, wykazują strukturę martenzytyczną, austenityczną lub austenityczno–ferrytyczną. Podstawowym dodatkiem stopowym jest chrom, natomiast w przypadku staliw charakteryzujących się strukturą austenityczną, nikiel. Znajdują zastosowanie głównie na odlewy odporne na: korozję atmosferyczną, działanie kwasów zarówno organicznych, jak i nieorganicznych. Wykorzystywane są także na wały turbin wodnych, parowych oraz w armaturze wodnej.

Stopowe staliwa konstrukcyjne charakteryzują się zawartością węgla w przedziale od 0,25 do około 0,5%. Natomiast udział dodatków stopowych: Si (max. 0,8%), Cr (max. 2,6%), Ni (max. 3,75%), Mo (max. 0,55%) i V (max. 0,3%). Odpowiedni dobór pierwiastków stopowych zapewnia dużą wytrzymałość i ciągliwość. Dzięki temu znajdują one zastosowanie m.in. wkołach elektrowozów, kołach jezdnych, linowych i łańcuchowych dźwigów.

Staliwa odporne na ścieranie mają wyższą zawartość węgla oraz Cr, Mo lub Ni. Materiały te charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, ok. 1000MPa, oraz wysoką ciągliwością w stosunku do niewielkiej twardości wynoszącej ok. 300 HBW. Odporność na ścieranie zależy nie tylko od właściwości mechanicznych samego materiału, ale także od mechanizmu procesu, który wywołuje to zużycie. Odporność staliw na zużycie ściernie jest wynikiem umacniania się austenitu oraz zachodzącej przemiany martenzytycznej. Dzięki takim właściwościom, staliwa te stosuje się m.in. na części kruszarek, łamaczy i młynów, czy koła jezdne suwnic i żurawi [20].

## 4. Charakterystyka mikrostruktury i własności wybranych gatunków staliw

### 4.1. Materiał i metodyka badań

Materiał badawczy stanowiły próbki czterech gatunków staliw:

- niestopowych (węglowych) GS52 oraz 270-480W;
- odpornych na ścieranie L45G oraz L35GSM.

Próbki zostały poddane badaniom w stanie surowym, bez obróbki cieplnej. Za pomocą spektrometru emisyjnego Spectrolab LavL7 przeprowadzono analizę składu chemicznego. Pomiar twardości został przeprowadzony używając twardościomierza firmy Future-Tech model FV-700. Pomiar wykonano metodą Vickersa, przy użyciu obciążenia 294,2N w czasie 10s. W celu przeprowadzenia analizy strukturalnej użyto mikroskopu optycznego Axiovert 25 firmy Carl Zeiss Jena.

### 4.2. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 1 oraz tabeli 2 przedstawiono składy chemiczne badanych staliw niestopowych (węglowych): GS52 i 270-480W, natomiast w tabeli 3 oraz tabeli 4 przedstawiono składy chemiczne badanych staliw odpornych na ścieranie: L45G oraz L35GSM. W tabeli 5 zamieszczono wyniki pomiarów twardości badanych gatunków staliw. W celu weryfikacji jednorodności własności materiału dla wykonanych pomiarów twardości, obliczono współczynnik zmienności. Mikrostruktury staliw GS52, oraz 270-480W przedstawiono na rys. 6÷9, natomiast mikrostruktury staliw odpornych na ścieranie L45G oraz L35GSM przedstawiono na rys. 10÷13.

Tabela 1. Skład chemiczny próbki staliwa GS52 [% wag.]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Fe
0,31	0,48	0,46	0,016	0,008	0,13	0,14	0,02	reszta

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 2. Skład chemiczny próbki staliwa 270-480W [% wag.]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Fe
0,23	0,57	1,38	0,022	0,004	0,16	0,09	0,01	reszta

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3. Skład chemiczny próbki staliwa L45G [% wag.]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Fe
0,43	0,36	1,41	0,026	0,006	0,18	0,11	0,03	reszta

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 4. Skład chemiczny próbki staliwa L35GSM [% wag.]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Fe
0,37	0,70	1,27	0,026	0,003	0,14	0,11	0,32	reszta

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 5. Zestawienie twardości badanych gatunków staliw

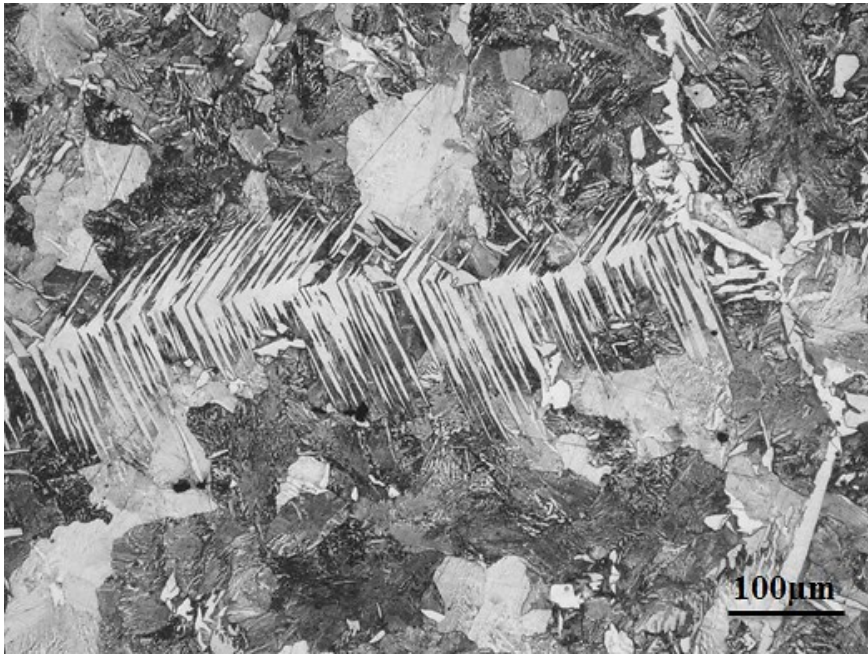
GATUNEK	GS52	270-480W	L45G	L35GSM
<b>HV30ŚREDNIE</b>	210	224	292	328
<b>ODCHYLENIE STANDARDOWE</b>	0,6	6	2,1	7
<b>WSPÓŁCZYNIK ZMIENNOŚCI [%]</b>	0,27	2,67	0,71	2,13

Źródło: Opracowanie własne

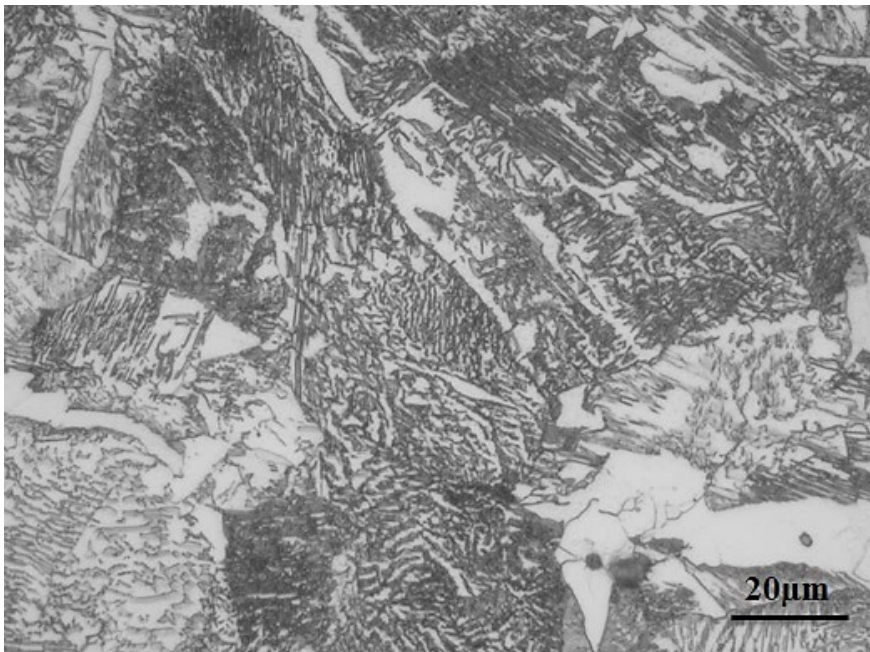
Analiza składu chemicznego staliwa GS52 wykazała zbliżoną zawartość węgla, natomiast niższą zawartość krzemu i manganu w stosunku do staliwa 270-480W. Różnice te mogły spowodować umocnienie roztworowe staliwa 270-480W, przez co nastąpiło zwiększenie twardości materiału.

Staliwo niskostopowe L45G w stosunku do staliwa L35GSM charakteryzuje się wyższą zawartością węgla i manganu, natomiast niższą zawartością krzemu. Stwierdzono, iż wszystkie badane gatunki staliw są zgodne z normami przedmiotowymi (PN-ISO 3755:1994, DIN 1681 1.0552 oraz PN-88/H-83160) w aspekcie składu chemicznego.

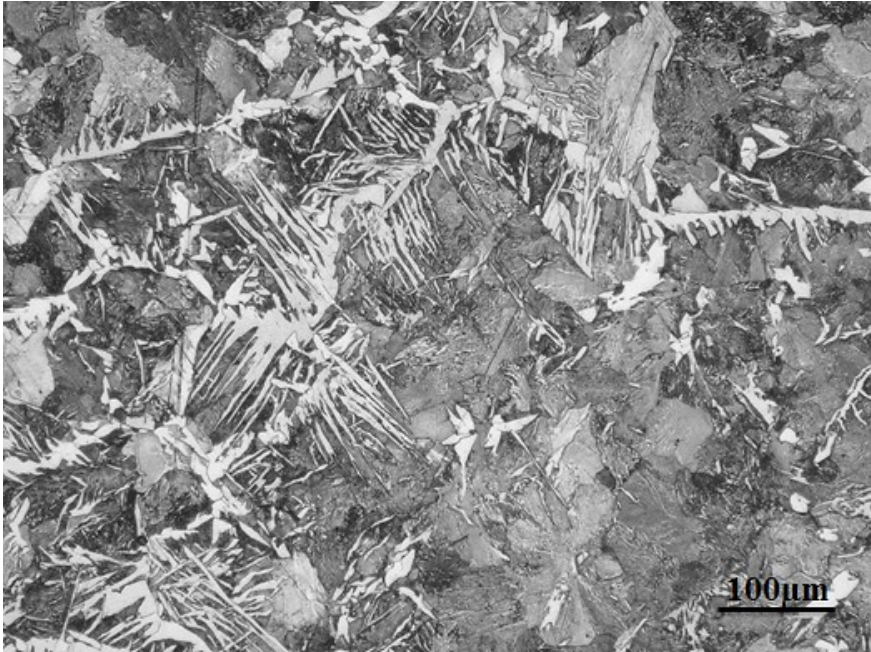
Twardość badanych gatunków staliw niskostopowych odpornych na ścieranie jest zdecydowanie wyższa w stosunku do staliw niestopowych (węglowych) i wynosi odpowiednio 292HV dla staliwa L45G oraz 328HV dla staliwa L35GSM. Najniższą wartość współczynnika zmienności twardości wykazało staliwo GS52, co świadczy o dużym stopniu jednorodności materiału.



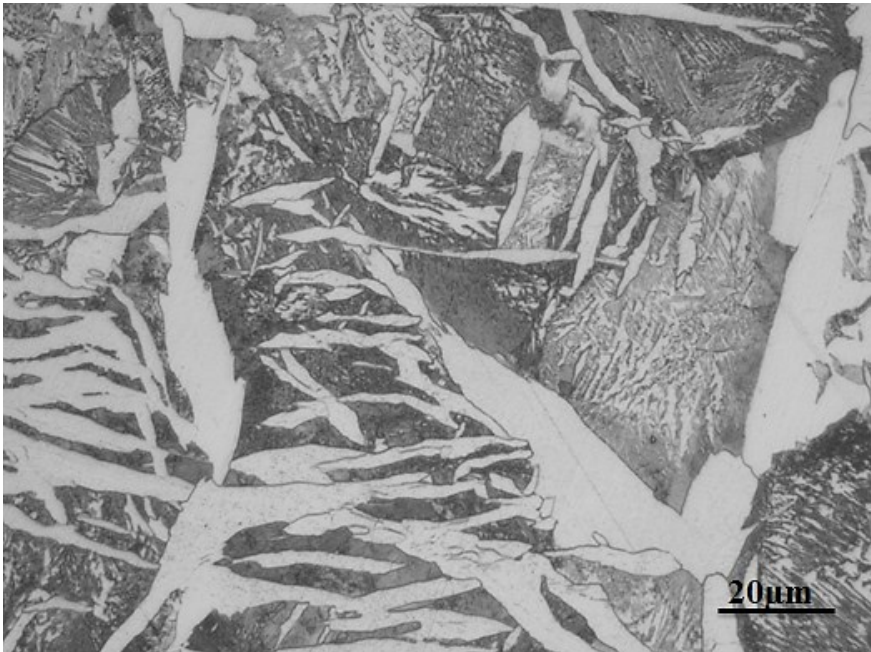
Rysunek 6. Mikrostruktura staliwa GS52, pow. 100x



Rysunek 7. Mikrostruktura staliwa GS52, pow. 500x



Rysunek 8. Mikrostruktura staliwa 270-480W, pow. 100x

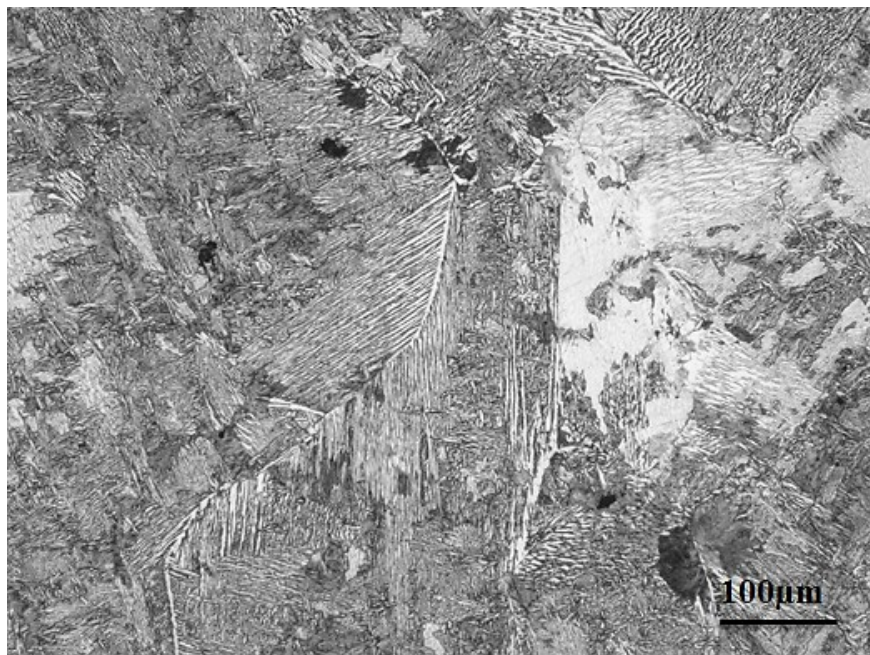


Rysunek 9. Mikrostruktura staliwa 270-480W, pow. 500x

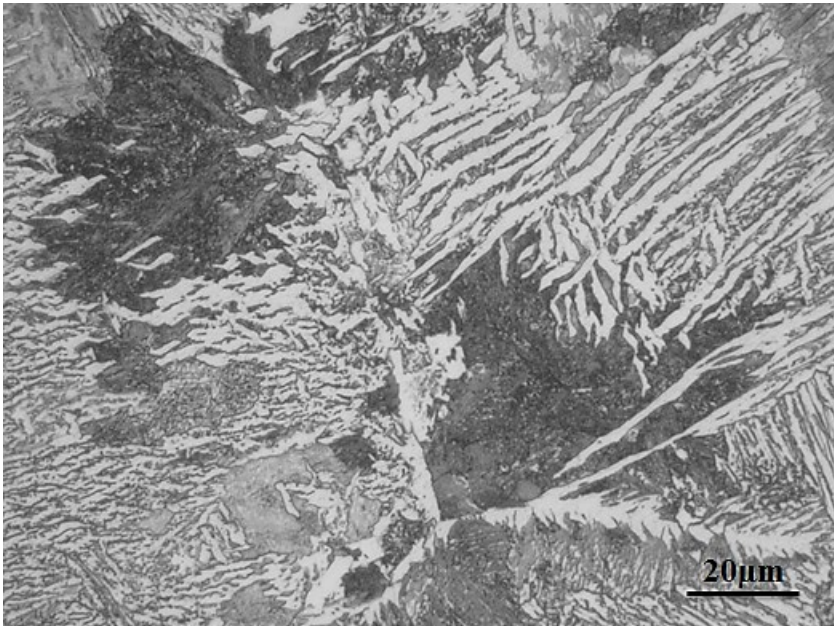


Mikrostruktura staliwa węglowego GS52 widoczna na rysunkach 6 oraz 7 przedstawia ferryt i perlit. Ferryt w układzie Widmannstättena rozmieszczony jest po granicach ziaren byłego austenitu. Przyspieszone chłodzenie spowodowało powstanie struktur perlitu nierównowagowego (quasi perlitu). Mikrostruktura obserwowana przy powiększeniu 500x (rys.7) wykazuje różnice w dyspersji płytek cementytu w perlicie. Widoczne są wtrącenia siarczków oraz ferryt po granicach kolonii perlitycznych.

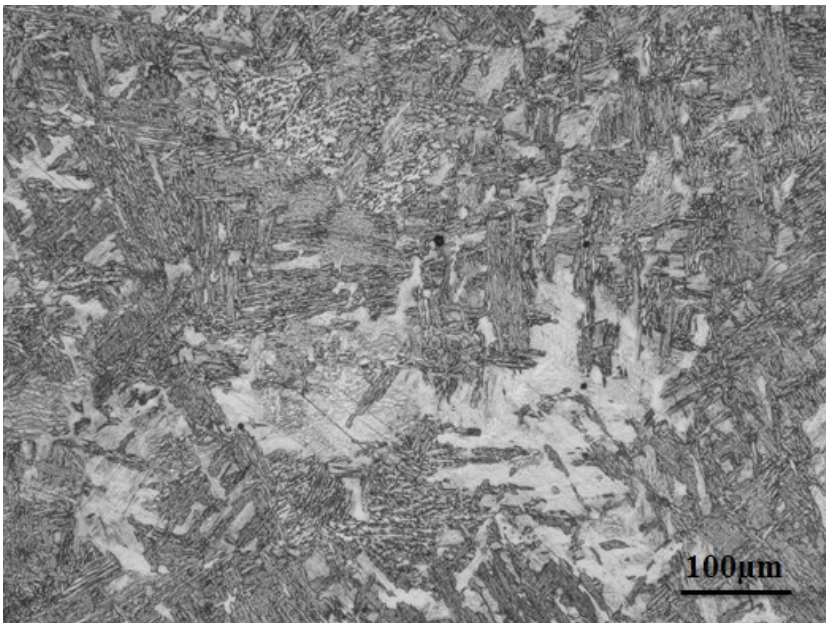
Przedstawiona na rysunku 8÷9 mikrostruktura staliwa 270-480W posiada podobny charakter jak staliwo GS52. Obserwuje się perlit oraz ferryt w układzie Widmannstättena.



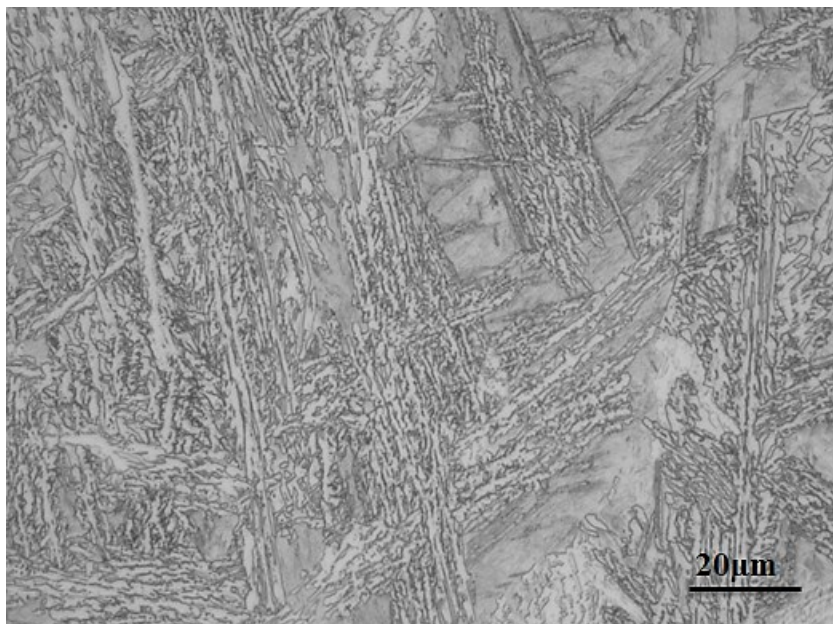
Rysunek 10. Mikrostruktura staliwa L45G, pow. 100x



Rysunek 11. Mikrostruktura staliwa L45G, pow. 500x



Rysunek 12. Mikrostruktura staliwa L35GSM, pow. 100x



Rysunek 13. Mikrostruktura staliwa L35GSM, pow. 500x

Widoczna na rysunku 10 mikrostruktura staliwa L45G przedstawia ferryt w układzie Widmannstättena po granicach byłych ziaren austenitu. Igły Widmannstättena są znacznie drobniejsze w porównaniu do obserwowanych w staliwach niestopowych (węglowych). Zaobserwowano wyraźny charakter bainityczno-perlityczny struktury. Na rys. 11 widoczne są duże obszary bainityczno-perlityczne oraz igły ferrytu.

Przedstawiona na rys. 12 mikrostruktura staliwa L35GSM wykazuje iglasty charakter, typowy dla struktur bainitycznych. Na rys. 13 widoczny jest bainit w całej objętości struktury.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły dostrzec znaczące różnice pomiędzy badanymi gatunkami staliw. Staliwa niestopowe (węglowe) posiadają obniżoną zawartość węgla w stosunku do badanych staliw odpornych na ścieranie. Podwyższona zawartość krzemu oraz manganu w staliwie 270-480W, mogła spowodować umocnienie roztworowe, co potwierdził pomiar twardości, wykazując wyższą o 14 jednostek HV30 twardość staliwa 270-480W w stosunku do staliwa GS52. Staliwo L35GSM charakteryzuje się najwyższą twardością spośród badanych materiałów, co może być spowodowane podwyższoną zawartością molibdenu. Należy zwrócić uwagę, iż pierwiastek ten charakteryzuje się silnym działaniem węglilotwórczym.

Zauważono, iż struktura badanych gatunków staliw niestopowych (węglowych) wykazuje charakter zbliżony do równowagowego, natomiast badane staliwa odporne na ścieranie charakteryzują się iglastą, częściowo bezdyfuzyjną strukturą.

Wyższa zawartość manganu w staliwach odpornych na ścieranie, w połączeniu z nierównowagowymi warunkami chłodzenia, spowodowała powstanie iglasto-bainitycznej struktury, wykazującej znacznie wyższą twardość w stosunku do badanych gatunków staliw niestopowych (węglowych).

Wyniki przeprowadzonych badań oraz analiza studium literaturowego pozwalają stwierdzić, iż ze względu na różne własności oraz aspekty ekonomiczne, badane materiały powinny być aplikowane w miejscach odpowiadających charakterem obciążenia ich indywidualnym predyspozycjom. Z punktu widzenia projektowania materiałowego, staliwo GS52 stanowi dobry materiał na wszelkiego rodzaju obudowy nie poddane działaniu zbyt dużych naprężeń. Natomiast staliwo 270-480W, ze względu na nieco lepsze własności, może być stosowane na umiarkowanie obciążone elementy konstrukcji maszyn. Badane staliwo niskostopowe odporne na ścieranie L45G ze względu na stosunkowo wysoką twardość (292HV30), a co za tym idzie, podwyższoną odporność na działanie obciążenia o charakterze tribologicznym, stanowi odpowiedni materiał do produkcji wszelkiego rodzaju średnio obciążonych kół jezdnych. Staliwo L35GM ze względu na twardość na poziomie 328HV oraz podwyższoną zawartość molibdenu, który tworzy bardzo twarde węgliki, powinno być stosowane do wytwarzania silnie obciążonych tribologicznie części maszyn m.in. kół zębatych. Należy zwrócić uwagę, iż własności wszystkich badanych gatunków staliw można polepszyć poprzez operacje obróbki cieplnej bądź cieplno-chemicznej, które w przypadku większości odlewów staliwnych stanowią standard w procesach wykańczania odlewów.

## Literatura

1. Sakwa W. (red) *Poradnik inżyniera- odlewnictwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986
2. Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A. *Odlewnictwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000
3. Stradomski Z. *Mikrostruktura w zagadnieniach zużycia staliw trudnościeralnych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010
4. Głowacka M., Zieliński A. *Podstawy materiałoznawstwa*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2014
5. <https://iod.krakow.pl/pl/galeria-odlewow/1/> (dostęp 28 luty 2015)
6. Cholewa M., Gawroński J., Przybył M. *Podstawy procesów metalurgicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004
7. <http://hsjsa.pl> (dostęp 3 marzec 2015)

8. Głownia J., Kalandyk B., Zapała R., Sobuła S., Tęcza G., Malatyńska P., Tu-  
lejko I., Brzeziński M. *Charakterystyka stali na odlewy*, Wydawnictwa AGH,  
Kraków 2010
9. <http://bamax.com.pl/elektrody-grafitowe/elektrody-grafitowe/> (dostęp 1 ma-  
rzec 2015)
10. Pater Z. *Podstawy metalurgii i odlewnictwa*, Politechnika Lubelska, Lublin 2014
11. Blicharski M. *Inżynieria Materiałowa- Stal*, Wydawnictwa Naukowo- Tech-  
niczne, Warszawa 2004
12. Kniagin G. *Staliwo – metalurgia i odlewnictwo*, Wydawnictwo Śląsk, Kato-  
wice 1977
13. Pawełek, Wala T. *Misy ceramiczne układu zalewowego form odlewniczych*,  
Prace Instytutu Szkła i Ceramiki Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych,  
(5) 2009, s.89÷100
14. <http://www.sta-odlewnie.com.pl/galeria.html> (dostęp 6 marzec 2015)
15. Suchym J. , Król S. *Analiza wybranych wad w krzepnącym odlewie staliwnym*,  
Krzepnięcie metali i stopów, 1995 (22), s.130÷133
16. Kozakowski S., *Badanie odlewów- technologie odlewnicze, typowe dla nich*  
*wady i metody ich ujawniania*, Wydawnictwo Biuro Gamma, Warszawa 2001
17. <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6944> (dostęp 27 luty 2015)
18. Krawczyk J. *Rola mikrostruktury w tribologicznym zużyciu stopów żelaza*,  
Wydawnictwo AGH, Kraków 2013
19. Luty W. (red) *Poradniki inżyniera- obróbka cieplna stopów żelaza*, Wydaw-  
nictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977
20. [http://www.labmat.pw.plock.pl/metal/stal\\_wegl/stal\\_wegl.htm](http://www.labmat.pw.plock.pl/metal/stal_wegl/stal_wegl.htm) (dostęp 28 luty  
2015 r.)
21. Kniagin G. *Odlewnictwo staliwa*, Staliwo węglowe, Państwowe Wydawnic-  
two Techniczne, Warszawa 1956
22. Staub F. *Metaloznawstwo*, Wydawnictwo Politechnik Śląskiej, Gliwice 1966