

Odlewnictwo Współczesne

---

# Poradnik Odlewnika

---

Pod redakcją  
Jerzego J. Sobczaka

Wydawnictwo  
Stowarzyszenia Technicznego  
Odlewników Polskich

Tom 1  
MATERIAŁY

Redaktor naczelny: prof. dr hab. inż. Jerzy Józef Sobczak  
Redaktor techniczny: dr inż. Adam Tabor  
Patronat naukowy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Górny, mDHC  
Redaktor tomu pierwszego: prof. dr hab. inż. Jerzy Józef Sobczak

#### Zespół Autorów:

Balcer Elżbieta, mgr  
Baliński Andrzej, prof. dr hab. inż.  
Bartocha Dariusz, dr inż.  
Bonderek Zbigniew, prof. dr hab. inż.  
Brzeziński Maciej, dr inż.  
Dańko Józef, prof. dr hab. inż.  
Dańko Rafał, dr hab. inż.  
Darlak Paweł, mgr inż.  
Dudek Piotr, dr inż.  
Fajkiel Aleksander, dr inż.  
Fedoryszyn Aleksander, prof. dr hab. inż.  
Fraś Edward, prof. dr hab. inż.  
Garbacz-Klempka Aldona, dr inż.  
Gawlik Stanisław, dr inż.  
Gazda Andrzej, dr  
Głownia Jan, prof. dr hab. inż.  
Górny Zbigniew, prof. dr hab. inż., mDHC  
Guzik Edward, prof. dr hab. inż.  
Ignaszak Zenon, prof. dr hab. inż.  
Izdebska-Szanda Irena, dr inż.  
Jackowski Jacek, dr hab. inż., prof. PP  
Janerka Krzysztof, dr inż.  
Kalandyk Barbara, dr hab. inż.  
Kielczyk Ryszard, mgr inż.  
Kilarski Jerzy, dr inż.  
Klasik Adam, dr inż.  
Kondracki Marcin, dr inż.  
Konopka Zbigniew, prof. dr hab. inż.  
Kopyciński Dariusz, dr hab. inż., prof. AGH  
Kowalski Adam, dr inż.

Kozieł Stefan, mgr  
Krokosz Jacek, dr inż.  
Kryczek Agnieszka, mgr inż.  
Kurzydłowski Krzysztof Jan, prof. dr hab. inż., mDHC  
Lewandowska Małgorzata, dr hab. inż., prof. PW  
Lewandowski Jan Lech, prof. dr hab. inż., DHC  
Maj Maria, dr hab. inż.  
Naróg Piotr, mgr inż.  
Pabiś Rafał, mgr inż.  
Paul Władysław, mgr inż.  
Pirowski Zenon, dr inż.  
Reguła Tomasz, mgr inż.  
Rzadkosz Stanisław, dr hab. inż., prof. AGH  
Smorawiński Zdzisław, inż.  
Sobczak Jerzy Józef, prof. dr hab. inż.  
Sobczak Natalia, prof. dr hab. inż.  
Sobula Sebastian, dr inż.  
Stachurski Waclaw, dr hab. inż., prof. AGH  
Stawarz Marcin, dr inż.  
Studnicki Andrzej, dr hab. inż.  
Szajnar Jan, prof. dr hab. inż.  
Tchórz Adam, mgr inż.  
Tęcza Grzegorz, dr inż.  
Tybulczuk Jerzy, doc. dr inż.  
Warmuzek Małgorzata, dr inż.  
Wojciechowski Andrzej, dr hab. inż.  
Wróbel Tomasz, dr inż.  
Zapała Renata, dr inż.  
Zych Jerzy, dr hab. inż., prof. AGH

#### Zespół Recenzentów:

Astanowicz Maciej, mgr inż.  
Długosz Piotr, mgr inż.  
Dzik Stanisław, mgr inż.  
Fedoryszyn Aleksander, prof. dr hab. inż.  
Fraszek Tadeusz, mgr inż.  
Gajewski Mirosław, dr hab. inż., prof. PŚI  
Godlewski Tadeusz, mgr inż.  
Konopka Zbigniew, prof. dr hab. inż.  
Książek Marzanna, dr hab. inż., prof. IOd

Lewandowski Jan Lech, prof. dr hab. inż., DHC  
Sobczak Jerzy Józef, prof. dr hab. inż.  
Suchy Józef Szczepan, prof. dr hab. inż.  
Szymonik Daniel, mgr  
Tybulczuk Jerzy, doc. dr inż.  
Walczak Wiesław, mgr inż.  
Wójcik Artur, mgr inż.  
Wrzała Konrad, mgr inż.

Opracowanie redakcyjne: mgr inż. Agnieszka Jędrysko, lic. Mirela Motyka  
Koordynacja wydania – opieka organizacyjna: mgr inż. Tadeusz Franaszek  
Projekt okładki, opracowanie graficzne: mgr sztuki Jan Witkowski  
Multimedia: mgr inż. Paweł Darlak, mgr inż. Piotr Długosz, mgr inż. Krzysztof Saja

ISBN: 878-83-904306-9-0

Kraków: grudzień 2013

Wszelkie prawa zastrzeżone

Printed in Poland





**Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego**

Wydawnictwo sponsorowane  
w części ze środków Ministerstwa  
Nauki i Szkolnictwa Wyższego

# Spis treści

Przedmowa.....	15
----------------	----

## 0 – TECHNIKA ODLEWANIA I GŁÓWNE PROCESY TECHNOLOGICZNE

0.1. Wykonywanie odlewów .....	17
0.2. Metalurgia odlewnicza.....	33
0.3. Krzepnięcie i krystalizacja odlewów .....	48
0.3.1. Krzepnięcie .....	48
0.3.2. Krystalizacja.....	55
0.4. Tendencje i prognozy rozwojowe odlewnictwa .....	75
0.4.1. Statystyka .....	75
0.4.2. Tendencje rozwojowe odlewnictwa.....	80

## I – ŻELIWO

I.1. Struktura i klasyfikacja.....	83
I.1.1. Układy równowagi fazowej stopów Fe-C.....	83
I.1.2. Podstawowe składniki mikrostrukturalne żeliwa.....	85
I.1.3. Kształtowanie mikrostruktury żeliwa podeutektycznego według układu stabilnego .....	86
I.1.4. Kształtowanie mikrostruktury żeliwa podeutektycznego według układu metastabilnego .....	92
I.1.5. Kształtowanie mikrostruktury żeliwa nadeutektycznego .....	94
I.1.6. Kształtowanie mikrostruktury żeliwa połowicznego .....	94
I.1.7. Kształtowanie osnowy ferrytyczno-perlitycznej.....	95
I.1.8. Eutektyka fosforowa.....	95
I.1.9. Kształtowanie mikrostruktury żeliwa podczas obróbki cieplnej .....	96
I.1.10. Mikrostruktura żeliwa z dodatkami stopowymi.....	97
I.1.11. Klasyfikacja mikrostruktury żeliwa według normy PN-EN ISO 945-1 .....	98
I.1.11.1. Klasyfikacja według cech grafitu .....	98
I.1.11.2. Klasyfikacja według cech osnowy żeliwa .....	100
I.1.12. Wpływ czynników technologicznych na mikrostrukturę żeliwa .....	101
I.1.12.1. Wpływ szybkości chłodzenia odlewu .....	101
I.1.12.2. Wpływ fizykochemiczny stanu ciekłego żeliwa .....	102
I.2. Materiały wsadowe, dodatki, paliwo, obliczanie wsadów .....	105
I.2.1. Paliwa stosowane w odlewnictwie żeliwa .....	112
I.2.2. Zasady obliczania wsadu metalowego do wytopu żeliwa .....	113
I.3. Piece do wytapiania.....	117
I.3.1. Żeliwiaki.....	117
I.3.2. Piece elektryczne.....	128
I.3.3. Budowa i działanie pieców obrotowych .....	131
I.4. Pozapiecowa obróbka metalurgiczna ciekłego żeliwa.....	134
I.4.1. Dobór składu chemicznego .....	135
I.4.2. Materiały wsadowe.....	139
I.4.3. Topienie żeliwa wyjściowego do sferoidyzacji .....	141
I.4.4. Technologia żeliwa sferoidalnego.....	142
I.4.4.1. Odsiarczanie żeliwa .....	143
I.4.4.2. Zaprawy stosowane do sferoidyzacji .....	145
I.4.4.3. Modyfikacja grafityzująca żeliwa.....	145
I.4.4.4. Zanik efektu sferoidyzacji i modyfikacji.....	147
I.5. Właściwości odlewnicze.....	149
I.5.1. Wstęp .....	149
I.5.1.1. Lejność.....	149
I.5.1.2. Skłonność do zabielen .....	151
I.5.1.3. Skurcz odlewniczy .....	154
I.5.1.4. Skłonność do tworzenia jam skurczowych i porowatości.....	156
I.5.1.5. Skłonność do powstawania naprężeń własnych w odlewie.....	159
I.5.1.6. Wrażliwość na szybkość chłodzenia.....	161
I.5.1.7. Skłonność do tworzenia w odlewach pęcherzy gazowych i wtrąceń niemetalicznych .....	163
I.5.1.7.1. Gazy w żeliwie.....	163
I.5.1.7.2. Wtrącenia niemetaliczne .....	165
I.5.2. Właściwości mechaniczne i cieplno-fizyczne .....	165
I.5.2.1. Żeliwo szare .....	166
I.5.2.2. Żeliwo ciągliwe .....	168
I.5.2.3. Żeliwo wermikularne .....	169

I.5.2.4. Żeliwo sferoidalne .....	170
I.5.2.5. Żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną .....	173
I.5.2.6. Żeliwo odporne na ścieranie .....	174
I.5.2.7. Żeliwo austenityczne .....	175
I.5.2.8. Niskostopowe żeliwo sferoidalne ferrytyczne .....	177
I.6. Zalewanie form, stygnięcie odlewów, konstrukcja układu wlewowego .....	181
I.6.1. Wprowadzenie .....	181
I.6.2. Elementy układu wlewowego – definicje .....	182
I.6.3. Identyfikacja konfiguracji i przekrojów kanałów układu wlewowego .....	183
I.6.4. Czasy zalewania form .....	185
I.6.5. Ciśnienie statyczne metalu w formie .....	190
I.6.6. Opory przepływu metalu przez układ wlewowy i formę .....	192
I.6.7. Zbiorniki wlewowe i filtry .....	194
I.6.8. Przykłady konfiguracji układów wlewowych dla odlewów żeliwnych .....	199
I.7. Żeliwo szare .....	206
I.7.1. Modyfikowanie żeliwa .....	208
I.8. Żeliwo z grafitem sferoidalnym i wermikularnym .....	216
I.8.1. Technologia wytwarzania żeliwa sferoidalnego i żeliwa z grafitem wermikularnym .....	216
I.8.1.1. Dobór składu chemicznego żeliwa .....	218
I.8.1.2. Metody sferoidyzowania żeliwa .....	220
I.8.1.3. Metody wermikularyzowania żeliwa .....	223
I.8.1.4. Zabieg modyfikowania grafitującego żeliwa sferoidalnego i żeliwa z grafitem wermikularnym .....	226
I.9. Żeliwo ADI i jego odmiany .....	229
I.9.1. Technologia wytwarzania żeliwa ADI i jego odmiany .....	229
I.9.1.1. Przygotowanie odlewów z żeliwa do zabiegu hartowania z przemianą izotermiczną .....	232
I.9.1.2. Zabieg hartowania izotermicznego żeliwa oraz kształtowania jego struktury .....	233
I.9.2. Charakterystyczne właściwości żeliwa ADI i jego odmian .....	237
I.9.3. Zastosowanie żeliwa ADI i jego odmian oraz porównanie ich z innymi materiałami .....	239
I.10. Żeliwo ciągliwe .....	244
I.10.1. Rys historyczny .....	244
I.10.2. Teoretyczne podstawy wytwarzania żeliwa ciągliwego .....	244
I.10.3. Podział i klasyfikacja żeliwa ciągliwego .....	245
I.10.4. Skład chemiczny żeliwa wyjściowego oraz jego wpływ na właściwości żeliwa ciągliwego .....	246
I.10.5. Wytapianie żeliwa ciągliwego .....	248
I.10.6. Wyżarzanie żeliwa ciągliwego .....	248
I.10.6.1. Wyżarzanie żeliwa ciągliwego białego .....	248
I.10.6.2. Wyżarzanie żeliwa ciągliwego czarnego .....	251
I.10.6.3. Wyżarzanie odlewów na żeliwo ciągliwe czarne o osnowie perlitycznej .....	252
I.10.7. Kontrola procesu wytwarzania żeliwa ciągliwego .....	253
I.10.8. Właściwości odlewnicze i technologiczne żeliwa ciągliwego .....	255
I.10.9. Wytyczne do konstrukcji odlewów z żeliwa ciągliwego i ich układów wlewowych .....	257
I.10.10. Właściwości fizyczne i mechaniczne żeliwa ciągliwego .....	261
I.10.11. Zastosowanie odlewów z żeliwa ciągliwego .....	263
I.11. Żeliwo z eutektyką węglkową oraz o specjalnych właściwościach użytkowych .....	266
I.11.1. Wstęp .....	266
I.11.2. System oznaczania żeliwa z eutektyką węglkową .....	266
I.11.3. Ogólne zasady krystalizacji żeliwa białego .....	266
I.11.4. Pierwiastki stopowe w żelwie białym .....	269
I.11.5. Ogólna charakterystyka struktury stopowego żeliwa białego .....	271
I.11.6. Żeliwo odporne na ścieranie .....	275
I.11.6.1. Żeliwo niestopowe lub niskostopowe .....	276
I.11.6.2. Żeliwo niklowo-chromowe (martenzytyczno-ledeburtyczne) .....	276
I.11.6.3. Żeliwo wysokochromowe .....	278
I.11.6.4. Żeliwo manganowe i wanadowe .....	280
I.11.7. Żeliwo kwasoodporne .....	281
I.11.8. Żeliwo odporne na działanie wysokiej (i niskiej) temperatury .....	281
I.11.8.1. Białe żeliwo wysokoaluminowe .....	281
I.11.8.2. Żeliwo austenityczne .....	284
I.11.8.3. Żeliwo sferoidalne krzemowo-molibdenowe typu SiMo .....	286
I.11.8.4. Białe żeliwo żaroodporne .....	287
I.12. Obróbka cieplna odlewów żeliwnych .....	290
I.12.1. Wyżarzanie odprężające .....	290
I.12.2. Wyżarzanie zmiękczające .....	291
I.12.3. Wyżarzanie normalizujące .....	295
I.12.4. Hartowanie i ulepszanie cieplne .....	295
I.12.5. Hartowanie z przemianą izotermiczną .....	298
I.12.6. Hartowanie powierzchniowe .....	299
I.12.7. Piece do obróbki cieplnej żeliwa .....	300

## II – STALIWO

II.1. Definicja staliwa.....	304
II.2. Różnice pomiędzy stałą a staliwem.....	304
II.3. Podział staliwa.....	306
II.3.1. Staliwo węglowe.....	306
II.3.2. Staliwo stopowe.....	311
II.3.2.1. Staliwo do pracy w temperaturze ujemnej.....	312
II.3.2.2. Staliwo żaroodporne.....	318
II.3.2.3. Staliwo do pracy w temperaturze podwyższonej.....	325
II.3.2.4. Staliwo odporne na korozję.....	329
II.3.2.5. Staliwo odporne na ścieranie.....	335
II.4. Materiały wsadowe i pomocnicze do wytapiania stali.....	341
II.4.1. Materiały metaliczne.....	341
II.4.2. Materiały do świeżenia kąpeli.....	343
II.4.3. Żelazostopy, odtleniacze i modyfikatory.....	343
II.4.4. Materiały nawęglające.....	345
II.4.5. Materiały żużlotwórcze.....	345
II.5. Materiały ogniotrwałe w odlewni staliwa.....	347
II.6. Metody wytapiania staliwa na odlewy.....	353
II.6.1. Piece do wytapiania staliwa na odlewy.....	353
II.6.2. Wytapianie stali niestopowej.....	355
II.6.3. Wytapianie stali stopowej.....	359
II.6.4. Wytapianie stali w piecu indukcyjnym.....	361
II.6.5. Obróbka pozapiecowa stali w odlewniach staliwa.....	361
II.7. Zasilanie odlewów staliwnych.....	368
II.8. Właściwości odlewnicze staliwa.....	375
II.9. Właściwości fizyczne staliwa.....	388
II.10. Obróbka cieplna odlewów staliwnych.....	397
II.10.1. Pojęcia ogólne.....	397
II.10.2. Wykresy równowagi Fe-Fe <sub>3</sub> C i Fe-C.....	399
II.10.3. Wykresy przemiany przechłodzonego austenitu $CTP_1$ i $CTP_c$ .....	404
II.10.4. Utwardzalność i hartowność staliwa.....	408
II.10.4.1. Czynniki wpływające na utwardzalność i hartowność.....	408
II.10.4.2. Przemiana martenzytyczna.....	410
II.10.4.3. Przemiana bainityczna.....	411
II.10.4.4. Odpuszczanie.....	412
II.10.5. Obróbka cieplna odlewów staliwnych.....	413
II.10.6. Charakterystyka poszczególnych rodzajów wyzarzania.....	414
II.10.7. Wadliwe struktury staliwa.....	416
II.10.8. Hartowanie staliwa.....	416
II.10.9. Główne parametry związane z nagrzewaniem przy hartowaniu odlewów staliwnych.....	421

## III – ODLEWNICZE STOPY METALI NIEŻELAZNYCH

III.1. Materiały wsadowe, dodatki stopowe.....	427
III.2. Topienie metalu.....	431
III.2.1. Procesy wytapiania i przetapiania.....	431
III.2.2. Zgar metali.....	435
III.2.3. Piece do topienia i przetrzymywania.....	436
III.2.3.1. Klasyfikacja pieców.....	436
III.2.3.2. Energochłonność procesu topienia, sprawność cieplna.....	437
III.2.3.3. Kryteria doboru pieców topialnych.....	438
III.2.3.4. Przegląd pieców konwencjonalnych.....	439
III.2.3.4.1. Piece tyglowe.....	439
III.2.3.4.2. Piece płomienne.....	445
III.2.3.4.3. Piece elektryczne.....	446
III.2.3.5. Piece niekonwencjonalne.....	453
III.3. Stopy metali lekkich.....	470
III.3.1. Stopy aluminium.....	470
III.3.1.1. Właściwości czystego aluminium.....	470
III.3.1.2. Aluminium hutnicze.....	470
III.3.1.3. Gatunki produkcyjne aluminium hutniczego.....	473
III.3.1.4. Złomy własne, poamortyzacyjne i poprodukcyjne.....	474
III.3.1.5. Przygotowanie odpadów do topienia.....	475
III.3.1.6. Proces topienia.....	478
III.3.1.6.1. Zasady racjonalnego topienia.....	479
III.3.1.6.2. Dodatki stopowe. Zaprawy.....	480

III.3.1.7. Typowe odlewnicze stopy aluminium.....	481
III.3.1.7.1. Stopy grupy Al-Si.....	482
III.3.1.7.2. Stopy grupy Al-Cu.....	485
III.3.1.7.3. Stopy grupy Al-Mg.....	486
III.3.1.7.4. Stopy grupy Al-Zn.....	488
III.3.1.8. Stopy aluminium do kontaktu z żywnością.....	494
III.3.1.9. Nieznormalizowane stopy aluminium.....	495
III.3.1.10. Stopy aluminium-lit.....	498
III.3.1.11. Technologia przygotowania ciekłego metalu.....	499
III.3.2. Stopy magnezu.....	501
III.3.2.1. Właściwości czystego magnezu.....	501
III.3.2.2. Odlewnicze stopy magnezu.....	501
III.3.2.3. Wpływ dodatków stopowych na właściwości stopów magnezu.....	501
III.3.2.4. Oznaczanie stopów magnezu.....	504
III.3.2.5. Znormalizowane odlewnicze stopy magnezu.....	505
III.3.2.6. Nowo opracowane stopy magnezu.....	507
III.3.2.7. Struktury stopów magnezu.....	508
III.3.2.8. Technologia topienia i odlewania stopów magnezu.....	509
III.3.2.9. Zastosowanie stopów magnezu.....	511
III.3.2.10. Ultralekkie stopy magnezu.....	512
III.3.3. Stopy tytanu.....	514
III.3.3.1. Właściwości czystego tytanu.....	514
III.3.3.2. Komercyjne stopy tytanu.....	515
III.3.3.2.1. Stopy o strukturze „ $\alpha$ ”.....	516
III.3.3.2.2. Stopy o strukturze „ $\alpha + \beta$ ”.....	516
III.3.3.2.3. Stopy o strukturze „ $\beta$ ”.....	516
III.3.3.2.4. Wpływ dodatków stopowych.....	517
III.3.3.3. Znormalizowane stopy tytanu.....	517
III.3.3.4. Topienie i odlewanie stopów tytanu.....	517
III.3.3.5. Zastosowanie stopów tytanu.....	518
III.4. Stopy metali ciężkich.....	521
III.4.1. Stopy miedzi.....	521
III.4.1.1. Wprowadzenie.....	521
III.4.1.2. Brązy cynowe.....	522
III.4.1.3. Brązy aluminiowe.....	529
III.4.1.4. Brązy krzemowe.....	531
III.4.1.5. Brązy ołowiowe.....	532
III.4.1.6. Brązy specjalne.....	532
III.4.1.7. Mosiądze.....	532
III.4.1.8. Bezołowiowe stopy miedzi.....	536
III.4.1.9. Technologia stopów miedzi.....	540
III.4.2. Stopy cynku.....	545
III.4.3. Stopy cyny i ołowiu.....	549
III.4.4. Stopy niklu.....	556
III.4.4.1. Nikiel i jego stosowanie.....	556
III.4.4.2. Ogólna systematyka.....	557
III.4.4.3. Topienie i odlewanie.....	561
III.4.4.3.1. Metody topienia.....	561
III.4.4.3.2. Indukcyjne topienie stopów niklu.....	562
III.4.4.3.3. Technologia odlewania.....	563
III.4.4.4. Nadstopy.....	568
III.4.4.4.1. Charakterystyka nadstopów.....	568
III.4.4.4.2. Nadstopy niklu.....	569
III.4.4.5. Obróbka cieplna stopów niklu.....	573
III.4.4.5.1. Polikrystaliczne stopy odlewnicze – stopy odlewane konwencjonalnie.....	573
III.4.4.5.2. Stopy poddane krystalizacji kierunkowej oraz monokrystaliczne.....	573
III.4.4.6. Odlewnicze stopy niklu odporne na korozję.....	575
III.4.4.7. Odlewnicze stopy niklu żaroodporne i żarowytrzymałe.....	576
III.4.5. Stopy specjalnego zastosowania.....	581
III.4.5.1. Metale szlachetne.....	581
III.4.5.1.1. Złoto.....	582
III.4.5.1.1.1. Stopy złota.....	583
III.4.5.1.1.2. Topienie złota.....	586
III.4.5.1.2. Srebro.....	586
III.4.5.1.2.1. Stopy srebra.....	587
III.4.5.1.2.2. Technologia odlewania srebra.....	589
III.4.5.1.3. Platynowce.....	589
III.4.5.1.3.1. Platyna.....	589

III.4.5.1.3.2. Pallad .....	591
III.4.5.1.3.3. Osm .....	591
III.4.5.1.3.4. Iryd .....	591
III.4.5.1.3.5. Rod .....	592
III.4.5.1.3.6. Ruten .....	592
III.4.5.2. Beryl .....	592
III.4.5.2.1. Występowanie berylu .....	592
III.4.5.2.2. Właściwości berylu .....	593
III.4.5.2.3. Stopy berylu z aluminium .....	593
III.4.5.2.4. Stopy miedzi z berylem .....	594
III.4.5.2.5. Stopy niklu z berylem .....	594
III.4.5.2.6. Stale berylowe .....	594
III.4.5.2.7. Stopy aluminium-beryl i magnez-beryl .....	594
III.4.5.2.8. Inne zastosowanie berylu .....	595
III.4.5.2.9. Toksyczność berylu .....	595
III.4.5.3. Stopy żarowytrzymałe .....	595
III.4.5.3.1. Stopy na osnowie żelazowo-niklowej .....	597
III.4.5.3.2. Stopy na osnowie niklu .....	597
III.4.5.3.3. Stopy na osnowie kobaltu .....	598
III.4.5.3.4. Stopy na osnowie metali wysokotopliwych .....	598
III.4.5.4. Stopy z pamięcią kształtu .....	599
III.4.5.5. Stopy dla zastosowań w medycynie .....	601
III.4.5.5.1. Biostopy na bazie metali szlachetnych .....	603
III.4.5.5.2. Austenityczne stale kwasoodporne .....	603
III.4.5.5.3. Stopy kobaltu do zastosowań w medycynie .....	604
III.4.5.5.4. Tytan i stopy tytanu do zastosowań w medycynie .....	604
III.4.5.6. Stopy o podwyższonej zdolności tłumienia drgań .....	605
III.4.5.6.1. Ogólna charakterystyka zjawisk wewnętrznego tłumienia w metalach i stopach .....	605
III.4.5.6.2. Wpływ składu chemicznego i struktury stopów na właściwości mechaniczne i zdolność tłumienia drgań .....	605
III.4.5.6.3. Żeliwo szare .....	605
III.4.5.6.4. Stopy mangan-miedź .....	606
III.4.5.6.5. Magnez i jego stopy .....	606
III.4.5.6.6. Tłumienie drgań w stopach aluminium .....	607
III.4.5.6.7. Zdolność tłumienia drgań w czystym aluminium .....	607
III.4.5.6.8. Wpływ składników stopowych na zdolność tłumienia drgań aluminium .....	608
III.4.5.6.9. Stop aluminium-cynk .....	609
III.4.5.7. Uran i jego stopy .....	609
III.4.5.8. Stopy cyrkonu .....	611
III.4.5.8.1. Cyrkon i jego właściwości fizyczne .....	611
III.4.5.8.2. Przeróbka koncentratu cyrkonowego $ZrSiO_4$ .....	611
III.4.5.8.3. Otrzymywanie litego cyrkonu .....	612
III.4.5.8.4. Stopy cyrkonu .....	612
III.4.5.8.4.1. Stopy cyrkon-cyna .....	612
III.4.5.8.4.2. Stopy cyrkon-uran .....	613
III.4.5.8.4.3. Stopy cyrkon-miedź .....	614
III.4.5.8.4.4. Stopy cyrkon-molibden .....	614
III.4.5.8.4.5. Stopy cyrkon-żelazo .....	615
III.4.5.8.4.6. Cyrkon w stali .....	615
III.4.5.8.4.7. Stopy magnezu z cyrkonem .....	615
III.4.5.8.4.8. Zastosowanie cyrkonu i jego stopów .....	616
III.4.5.9. Stopy niskotopliwe .....	616
III.4.5.10. Metale ziem rzadkich .....	617
III.5. Właściwości technologiczne .....	621
III.5.1. Lejność i zdolność do wypełnienia formy .....	621
III.5.2. Skurcz odlewniczy .....	625
III.5.3. Skłonność do pęknięcia na gorąco .....	626
III.5.4. Skłonność do tworzenia porowatości skurczowej .....	631
III.6. Układy wlewowe i zasilające .....	637
III.6.1. Wprowadzenie .....	637
III.6.2. Odlewanie stopów metali nieżelaznych .....	637
III.6.3. Układy wlewowe dla stopów metali lekkich .....	637
III.6.3.1. Przepływ metalu w układach wlewowych i jego specyfika .....	638
III.6.3.2. Dynamika przepływu w poszczególnych elementach układów wlewowych .....	638
III.6.3.3. Sprawność przepływu w układach wlewowych .....	643
III.6.3.4. Charakter przepływu ciekłego metalu w kanałach formy odlewniczej .....	647
III.6.3.5. Szybkość (czas) zapełniania wnętrza formy .....	648
III.6.3.6. Zasykanie powietrza w układzie wlewowym .....	653



III.6.3.7. Nierównomierny wydatek wlewów doprowadzających.....	654
III.6.4. Zasady projektowania i obliczania układów wlewowych dla stopów metali lekkich.....	655
III.6.4.1. Projektowanie układów wlewowych przy zalewaniu do form piaskowych.....	661

#### IV – METALOWE MATERIAŁY KOMPOZYTOWE, MATERIAŁY WYSOKOPOROWATE, NANOMATERIAŁY

IV.1. Kompozyty metalowe.....	668
IV.1.1. Wprowadzenie.....	668
IV.1.1.1. Pojęcia tradycyjne.....	668
IV.1.1.2. Klasyfikacja.....	669
IV.1.1.3. Interpretacja pojęcia kompozytu z zastosowaniem teorii systemów.....	671
IV.1.2. Dobór składników.....	676
IV.1.2.1. Dobór osnowy.....	676
IV.1.2.2. Wybór kombinacji komponentów.....	678
IV.1.2.2.1. Wskaźniki funkcjonalności.....	678
IV.1.2.2.2. Wykresy doboru.....	679
IV.1.2.2.3. „Pola okalające”.....	686
IV.1.2.2.4. Projektowanie.....	688
IV.1.2.2.5. Przykłady zastosowań praktycznych.....	693
IV.1.3. Metody wytwarzania.....	697
IV.1.3.1. Kompozyty <i>in vitro</i> .....	697
IV.1.3.1.1. Odlewanie zawieszinowe ( <i>slurry casting</i> ).....	697
IV.1.3.1.2. Sposoby odlewania z zastosowaniem ciśnienia zewnętrznego.....	701
IV.1.3.1.3. Inne sposoby wytwarzania.....	705
IV.1.3.2. Kompozyty <i>in situ</i> .....	708
IV.1.4. Wybrane aspekty krystalizacji kompozytów.....	711
IV.1.4.1. Wprowadzenie.....	711
IV.1.4.2. Krystalizacja kierunkowa kompozytów.....	711
IV.1.4.3. Oddziaływanie fazy zbrojącej w kompozycie na krystalizację osnowy.....	714
IV.1.4.4. Wpływ frontu krystalizacji na strukturę odlewu kompozytowego.....	718
IV.1.4.5. Metody aktywowania powierzchni.....	721
IV.1.5. Praktyka odlewanych kompozytów metalowych.....	725
IV.1.5.1. Topienie i odlewanie.....	725
IV.1.5.2. Oczyszczanie, obróbka wykańczająca i obróbka cieplna.....	733
IV.1.6. Właściwości kompozytów metalowych.....	736
IV.1.7. Zastosowanie kompozytów.....	749
IV.1.7.1. Lotnictwo i przemysł kosmiczny.....	749
IV.1.7.2. Przemysł motoryzacyjny.....	755
IV.1.7.3. Elektronika, sport, rekreacja, inne dziedziny.....	768
IV.1.8. Ocena jakości.....	772
IV.1.8.1. Struktura tworzyw kompozytowych.....	773
IV.1.8.2. Etapy kształtowania się struktury kompozytowej.....	774
IV.1.8.3. Cechy opisujące strukturę.....	777
IV.1.8.4. Kryteria oceny jakości tworzyw kompozytowych.....	782
IV.1.9. Recykling kompozytów.....	785
IV.1.9.1. Wprowadzenie.....	785
IV.1.9.2. Recykling metalowych materiałów kompozytowych.....	786
IV.1.9.2.1. Odzysk produktowy.....	786
IV.1.9.2.2. Odzysk materiałowy.....	787
IV.1.9.2.3. Separacja składników komponentów kompozytów.....	787
IV.1.9.2.4. Metoda degradacji zawiesziny kompozytowej.....	789
IV.1.9.2.5. Oddzielanie osnowy metalowej od fazy zbrojącej w kompozytach wytworzonych przez infiltrację preform.....	790
IV.1.9.2.6. Metoda wypychania osnowy metalowej ze stopionego kompozytu.....	791
IV.1.9.2.7. Bezpośredni przetop jako jedna z metod odzysku produktowego.....	792
IV.1.9.2.8. Odzysk materiałowo-produktowy.....	797
IV.2. Materiały wysokoporowate.....	801
IV.2.1. Piany monolityczne.....	801
IV.2.2. Piany kompozytowe.....	805
IV.2.2.1. Piany zbrojone cząsteczkami.....	805
IV.2.2.2. Piany zbrojone gazem.....	806
IV.2.2.3. Piany syntaktyczne.....	817
IV.3. Nanomateriały.....	822
IV.3.1. Wprowadzenie.....	822
IV.3.2. Konsekwencje nanowymiarów.....	823
IV.3.3. Wyjątkowe właściwości nanomateriałów.....	824
IV.3.4. Zastosowanie techniczne i przemysłowe nanomateriałów.....	826

IV.4. Ciecze metalowe na podłożu stałym .....	829
IV.4.1. Podstawy teoretyczne .....	829
IV.4.2. Aspekty badawcze .....	830
IV.4.3. Specyfika oddziaływania wzajemnego w wybranych układach .....	831
IV.4.3.1. Układ Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	831
IV.4.3.2. Układ Al/SiO <sub>2</sub> .....	834
IV.4.3.3. Układ Al/C .....	835
IV.4.3.4. Układ Al/SiC .....	836
IV.4.3.5. Układ Al/AlN .....	836
IV.4.3.6. Układ Al/Me <sub>x</sub> N <sub>y</sub> .....	837
IV.4.3.7. Układ Ni/tlenki .....	838
IV.4.3.8. Układ Ti/tlenki .....	841

## V – METODY KONTROLI JAKOŚCI METALU I ODLEWU

V.1. Ocena składu chemicznego .....	845
V.1.1. Pobieranie próbek do analizy .....	845
V.1.2. Przygotowanie próbek do analizy .....	845
V.1.3. Metody klasyczne oceny składu chemicznego .....	845
V.1.4. Metody fizyczne oceny składu chemicznego .....	847
V.1.4.1. Metoda spektrometrii optycznej emisyjnej .....	847
V.1.4.1.1. Możliwości analityczne optycznych spektrometrów emisyjnych .....	848
V.1.4.2. Analizatory pierwiastkowe .....	849
V.1.4.2.1. Analizatory węgla i siarki .....	849
V.1.4.2.2. Analizatory gazów w metalach .....	850
V.1.5. Zasada działania przenośnego analizatora i krótki opis analizy rentgenowskiej .....	850
V.2. Badania struktury (makro- i mikro-) .....	853
V.2.1. Definicja pojęcia makro- i mikrostruktury .....	853
V.2.2. Pobieranie próbek do badań makrostruktury i mikrostruktury .....	854
V.2.3. Badania makrostruktury odlewu .....	855
V.2.3.1. Cel badań makrostruktury odlewu .....	855
V.2.3.2. Przygotowanie powierzchni próbek do badań makroskopowych .....	856
V.2.3.2.1. Szlifowanie i polerowanie .....	856
V.2.3.2.2. Trawienie .....	856
V.2.3.3. Techniki obserwacji makroskopowych .....	857
V.2.4. Badania mikrostruktury stopu .....	857
V.2.4.1. Mikroskop metalograficzny .....	857
V.2.4.2. Przygotowanie próbki metalograficznej do obserwacji mikrostruktury .....	859
V.2.4.2.1. Inkludowanie próbek .....	859
V.2.4.2.2. Wykonanie zglądu metalograficznego .....	860
V.2.4.3. Mikroskopowe obserwacje mikrostruktury metali i stopów odlewniczych .....	861
V.2.4.3.1. Obraz mikrostruktury w mikroskopie świetlnym .....	861
V.2.4.3.2. Obserwacje mikrostruktury w zmodyfikowanym oświetleniu próbki .....	862
V.2.4.3.3. Obserwacje mikrostruktury na trawionych zglądach metalograficznych .....	863
V.2.4.4. Badania mikrostruktury za pomocą skanującej mikrowiązki elektronów .....	865
V.2.4.4.1. Obserwacje mikrostruktury w skaningowym mikroskopie elektronowym .....	865
V.2.4.4.2. Komplementarne techniki analityczne .....	866
V.2.5. Metalografia ilościowa .....	869
V.3. Badania właściwości mechanicznych, w tym wytrzymałości postaciowej odlewów .....	873
V.3.1. Próbkę indywidualnie odlewane, przylane i pobierane z odlewów .....	873
V.3.2. Zagadnienie trwałości zmęczeniowej .....	882
V.3.3. Wyznaczanie wytrzymałości na zginanie, skręcanie i na ścinanie oraz udarności .....	895
V.3.4. Kształtowanie wytrzymałościowe odlewów .....	897
V.4. Metody kontroli jakości ciekłego metalu i odlewu .....	913
V.4.1. Badania nieniszczące odlewów .....	913
V.4.1.1. Istota i trendy w wykorzystywaniu nieniszczących badań odlewów .....	913
V.4.2. Unormowania i klasyfikacja metod badań nieniszczących odlewów .....	914
V.4.3. Badania nieniszczące – metody powierzchniowe .....	916
V.4.4. Badania nieniszczące – metody objętościowe .....	921
V.4.4.1. Metody ultradźwiękowe ( <i>Ultrasonic testing</i> – UT) .....	921
V.4.4.2. Metody radiograficzne ( <i>Radiographic testing</i> – RT) .....	926
V.5. Wybrane właściwości fizyczne .....	938
V.5.1. Wstęp .....	938
V.5.2. Rozszerzalność cieplna .....	941
V.5.3. Gęstość .....	942
V.5.4. Ciepło właściwe .....	945
V.5.5. Przewodność cieplna .....	946

V.6. Ocena zawartości wtrąceń niemetalowych (gazowych i stałych).....	950
V.6.1. Główne wtrącenia i zanieczyszczenia metaliczne i niemetaliczne występujące w stopach aluminium.....	950
V.6.2. Ocena stopnia zagazowania .....	952
V.7. Ocena krzywej stygnięcia w metodzie analizy termicznej i derywacyjno-gradientowej ATDG.....	964
V.7.1. Wprowadzenie.....	964
V.7.2. Metody analizy termicznej.....	964
V.7.3. Aparatura pomiarowa stosowana w analizie termicznej.....	966
V.7.4. Ocena składu chemicznego i właściwości mechanicznych żeliwa .....	972
V.7.5. Prognozowanie struktury żeliwa.....	978
V.7.6. Analiza termiczna żeliwa sferoidalnego.....	980
V.7.7. Analiza termiczna stopów Al-Si.....	981

## VI – MASY FORMIERSKIE I RDZENIOWE

VI.1. Materiały osnowy piaskowej.....	986
VI.2. Materiały wiążące i inne materiały formierskie .....	995
VI.3. Klasyfikacja procesów przerobu mas formierskich i rdzeniowych, urządzenia, sterowanie procesami .....	1005
VI.4. Ocena właściwości mas i aparatura kontrolno-pomiarowa .....	1015
VI.4.1. Ocena właściwości mas klasycznych.....	1015
VI.4.2. Ocena właściwości mas ze spoiwami .....	1026
VI.4.3. Ocena właściwości mas dla technologii <i>hot-box</i> .....	1031
VI.5. Powłoki ochronne i oddzielające stosowane dla form i rdzeni .....	1035
VI.5.1. Charakterystyka powłok ochronnych i oddzielających .....	1035
VI.5.2. Stosowanie powłok ochronnych oraz oddzielających .....	1045
VI.5.3. Kontrola jakości powłok ochronnych .....	1055
VI.6. Regeneracja osnowy mas.....	1059
VI.6.1. Wprowadzenie.....	1059
VI.6.2. Rodzaje mas zużytych i typowe sposoby ich zagospodarowania .....	1059
VI.6.2.1. Zagospodarowanie zużytych mas formierskich poza odlewnictwem.....	1060
VI.6.2.2. Odzyskiwanie osnowy z zużytych mas formierskich i rdzeniowych w procesach regeneracji... ..	1060
VI.6.3. Czynniki decydujące o regenerowalności zużytych mas formierskich .....	1061
VI.6.4. Charakterystyka typowych sposobów i urządzeń do regeneracji.....	1061
VI.6.4.1. Regeneracja osnowy mas zużytych w środowisku wodnym .....	1061
VI.6.4.2. Suche metody regeneracji .....	1062
VI.6.4.2.1. Regeneracja sucha mechaniczna lub pneumatyczna .....	1062
VI.6.4.2.2. Systemy regeneracji mechanicznej przeznaczone dla małych odlewni.....	1067
VI.6.4.3. Regeneracja termiczna.....	1069
VI.6.4.4. Regeneracja kombinowana i wielostopniowa.....	1070
VI.6.4.5. Niekonwencjonalne systemy i urządzenia do regeneracyjnych procesów obróbczych.....	1071
VI.6.5. Dobór efektywnych procesów regeneracji wstępnej i właściwej.....	1072
VI.6.6. Metody oceny jakości regeneratu .....	1072
VI.7. Zasady doboru mas.....	1075
VI.7.1. Zasady ogólne wyboru procesu technologicznego.....	1075
VI.7.2. Wytyczne doboru technologii formowania dla konkretnych stopów odlewniczych .....	1077
VI.7.2.1. Formowanie w masie naturalnej.....	1077
VI.7.2.2. Formowanie w masach z bentonitem (masy syntetyczne).....	1077
VI.7.2.3. Wykonywanie form i rdzeni w masach wiązanych chemicznie.....	1079
VI.7.2.3.1. Procesy utwardzania w temperaturze otoczenia .....	1079
VI.7.2.3.2. Procesy z utwardzaniem czynnikiem gazowym .....	1082
VI.7.2.3.3. Proces z utwardzaniem w wysokiej temperaturze.....	1084
VI.7.2.4. Specjalne techniki formowania.....	1086
VI.7.2.4.1. Formowanie próżniowe (proces-V).....	1086
VI.7.2.4.2. Odlewanie z zastosowaniem modeli spienionych .....	1086
VI.7.2.5. Odlewanie form ceramicznych.....	1087
VI.7.2.5.1. Metoda Shawa .....	1087
VI.7.2.5.2. Metoda wytapianych modeli.....	1087

## Przedmowa

Po pięciu latach od podjęcia przez Zarząd Główny Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich decyzji o rozpoczęciu prac organizacyjnych, merytorycznych i wydawniczych (a było to 30 stycznia 2009 roku), oddajemy w ręce Czytelnika pierwszy tom tryptyku odlewniczego zatytułowanego „Odlewnictwo Współczesne. Poradnik Odlewnika”. Dany tom poświęcony jest z założenia materiałom stosowanym w odlewnictwie, tom drugi będzie dedykowany technologiom odlewniczym, natomiast tom trzeci – zagadnieniom utrzymania ruchu.

Decyzją ZG STOP niżej podpisanemu powierzono pełnienie obowiązków redaktora naczelnego, co było nie tylko zaszczytem i przywilejem, ale także żmudnym, czasochłonnym i trudnym nadaniem wieloletniego zmierzania się z niezwykle ambitnym wyzwaniem, jakim bez wątpienia było i jest spełnienie oczekiwań środowiska względem zawartości, treści i formy tego swoistego kompendium wiedzy praktycznej i teoretycznej, jakim bez wątpienia powinien być „Poradnik”.

Na początku prac podjęliśmy założenia, istotne nie tylko dla dotychczasowego stylu działania naszego Stowarzyszenia, ale także uwzględniające specyfikę i wyzwania dnia dzisiejszego i jutra ojczystej branży odlewniczej. Założyliśmy przeto, że to, co wspólnie tworzymy, ma bezwzględnie łączyć środowisko krajowych odlewników, skupiać życzliwą uwagę Koleżanek i Kolegów. Nie dziwi więc fakt, że do zespołu autorów i recenzentów zaproszono szerokie grono wybitnych specjalistów z całej Polski, zarówno z uczelni, ośrodków badawczych i naukowych, jak i wiodących zakładów odlewniczych, ekspertów z zakresu zarówno odlewniczych nauk teoretycznych jak i działań użytecznych i organizacyjnych, praktyków odlewnictwa, pojmowanego jako szlachetna sztuka wytwarzania wyrobów kształtowych o z góry zadanych właściwościach.

Drugie z założeń dotyczyło chęci uczynienia z wydania „Poradnika” swoistego wydarzenia w środowisku, służącego wzmocnieniu i zwielokrotnieniu wzajemnych kontaktów, zwłaszcza w relacjach partnerzy przemysłowi (w tym łańcuchach poddostawców) – instytucje naukowo-badawcze – stowarzyszenia techniczne i organizacje samorządowe.

Trzecie z założeń – życzeń stanowiło o tym, że pod względem treści i formy nasze opracowanie powinno być zwięzłe, jasno, czytelnie i profesjonalnie napisane i podane na wzór najlepszych światowych wydawnictw tego typu. Do tego doszedł wymóg nowoczesności, stąd też w wydanie „Poradnika”, oprócz wspomnianego zespołu wybitnych osobistości z kręgu nauki i praktyki odlewniczej, zaangażowaliśmy grupę młodych adeptów zawodu celem zapewnienia wysokiej jakości części ilustracyjnej, percepcyjnej a nawet informatycznej. Staraliśmy się także, aby w treści umieścić znaczną ilość zdjęć z ośrodków badawczych i zakładów produkcyjnych, pracujących na rzecz polskiego odlewnictwa a także stosowne *gros* opisów rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i organizacyjnych, które mogą stanowić wzór dla pracowników krajowego przemysłu odlewniczego.

Niezwykle pieczołowicie staraliśmy się odnosić do poszanowania praw autorskich, w tym zwłaszcza spełnienia wymogu stosowanych cytowań i powoływania się na źródła literaturowe, do wykreowania właściwej kultury korzystania z dostępnych zasobów wiedzy.

Taki sposób podejścia, z zachowaniem całej palety wysokich wymagań, szczególnie merytorycznych – z natury swej trudnych do spełnienia *ad hoc* – mógł spowodować, że pojawi się uzasadniona obawa przed właściwym i trafnym odbiorem treści, niosących ze sobą duży ładunek nowości, niekiedy o charakterze zbyt polemicznym. Innymi słowy, że zaistnieje niebezpieczeństwo nietrafienia w gusta Czytelnika, zwłaszcza w obliczu rozbudzonych nadziei, związanych z procesem integracji Polski ze strukturami Unii Europejskiej i zmianami, zachodzącymi także w sposobie postrzegania odlewnictwa krajowego na tle Europy i całego świata.

Ryzyko zostało podjęte – niektóre fragmenty „Poradnika” w rzeczy samej wyprzedzają standardowe pojmowanie istoty zagadnień; sam styl prezentacji wiedzy niekiedy odbiega od sposobu podawania informacji typowego dla opracowań typu podręcznego, w formacie *handbook*. Proponowane opracowanie ma aspiracje bycia czymś na kształt przewodnika, wręcz kreatora innowacyjnego sposobu nie tylko serwowania informacji, ale także trybu kształtowania samego sposobu myślenia o odlewnictwie współczesnym. To była świadoma decyzja, która znalazła odzwierciedlenie nawet w samym tytule niniejszego wydawnictwa, wzbogaconym o człon „Odlewnictwo Współczesne”. Pozostaje mieć nadzieję, że intensywnie rozwijające się nauka i praktyka odlewnicza pozytywnie zweryfikują poczynione ambitne przesłanki i coś, co dzisiaj wydaje się odległe od powszechnego pojmowania natury omawianych pojęć i rzeczy, rychło przestanie budzić kontrowersje.

Struktura pierwszego tomu „Poradnika” została sprowadzona do siedmiu rozdziałów, segregujących zasób zgromadzonej informacji począwszy od skrótowego opisu technik odlewania, poprzez cztery główne metalowe grupy materiałowe: żeliwo, staliwo, stopy metali nieżelaznych oraz materiały zaawansowane (kompozyty, media wysokoporowate i nanomateriały – z wyszczególnieniem podstaw specyfiki oddziaływania wzajemnego w układzie ciekły metal – ciało stałe), na metodach kontroli jakości metalu i odlewu oraz zagadnieniach materiałów formierskich kończąc. Tam, gdzie było to wskazane i możliwe, zamieszczono odnośniki do łączy interaktywnych, służących pomocą w dokonywaniu potrzebnych oszacowań bądź obliczeń warsztatowych.

Z uwag natury technicznej wypada poinformować, że język, którym posługiwaliśmy się w „Poradniku” uwzględnia powszechność stosowanych terminów z intencją wszelako unikania określeń slangowych, stąd też chociażby wprowadzony wszędzie termin „procent wagowy” (zamiast bardziej poprawnego pojęciowo „procentu masowego”; chyba, że jest przedmiotowo inaczej, wówczas w tekście znajduje się stosowna adnotacja do procentu objętościowego bądź atomowego), czy też kontrowersyjny termin „cząsteczka” (*versus* „cząstka”) na określenie dyspersyjnej fazy zbrojącej w kompozytach metalowych. Uważny Czytelnik znajdzie tutaj również sporo terminów i określeń zupełnie nowych i nieznanymi, nie stosowanymi dotychczas szerzej w dostępnej rodzimej literaturze specjalistycznej. Część zawartości opracowania była już uprzednio publikowana z przeznaczeniem najczęściej dla ograniczonego zasięgu odbiorców – w takich przypadkach staraliśmy się proponowane ponownie treści dostosować do wymogów dnia dzisiejszego i odświeżyć je do oczekiwanego poziomu.

Każdy z rozdziałów był po trzykroć krytycznie analizowany przez redaktora naczelnego w aktywnym porozumieniu z autorem (autorami), zanim trafiał do recenzentów, z założenia jednego ze sfery naukowo-badawczej, drugiego ze sfer produkcyjnych. Wydawać by się mogło, że tak starannie i szczerze zaproponowany sposób dopracowania i wręcz „szlifowania” treści zaowocuje praktycznie wyeliminowaniem lapsusów, potknięć, powtórzeń czy nieścisłości...

Pragnę serdecznie podziękować wszystkim tym, którzy przyczynili się do wydania naszego wspólnego dzieła „Odlewnictwo Współczesne. Poradnik Odlewnika”. Podziękowania przede wszystkim należą się autorom i recenzentom, faktycznym twórcom całości opracowania. Wyrazy wdzięczności kieruję do patrona naukowego, prof. Zbigniewa Górnego, który twórczo i odważnie współrealizował kształt „Poradnika”, w tym także jako autor rozdziałów. Słowa uznania należą się doktorowi Adamowi Taborowi, który podjął się wraz z zespołem niełatwej sztuki technicznej redakcji całości pracy. Nie można tutaj nie wspomnieć z wdzięcznością o wykonanej z pietyzmem pracy edytorskiej i korektorskiej przez mgr inż. Agnieszkę Jędrysko i lic. Mirelę Motykę. Od strony organizacyjnej wysoki stopień zaangażowania wykazał prezes Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich mgr inż. Tadeusz Franaszek, któremu w imieniu całego kolegium wydawniczego niezmiernie dziękuję.

Proszę pozwolić mi oto wyrazić nadzieję, że pojawienie się niniejszej pracy nie pozostanie bez echa w środowisku odlewników polskich a treści tutaj zawarte okażą się interesujące i pomocne także dla specjalistów z innych dziedzin.

*Jerzy J. Sobczak*

# 0. Technika odlewania i główne procesy technologiczne

## 0.1. Wykonywanie odlewów [39]

*Zbigniew Górny*

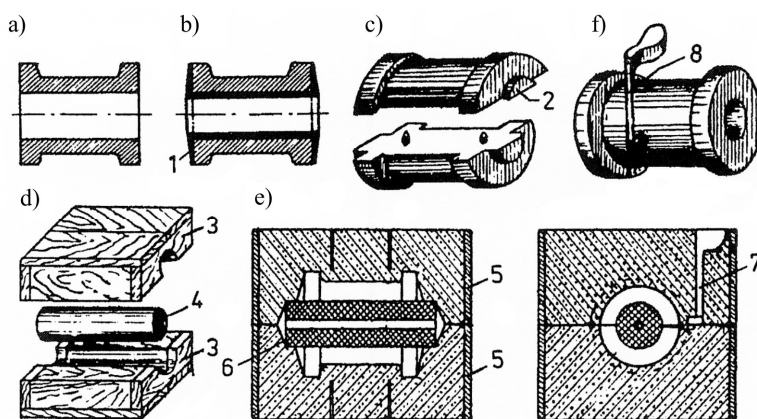
Techniki wytwarzania elementów metalowych (części maszyn, pojazdów, urządzeń czy broni) – poza odlewnictwem – obejmują: przeróbkę plastyczną (kucie, walcowanie, ciągnięcie, prasowanie), łączenie (spawanie, spajanie, sklejanie, dawniej nitowanie czy łączenia śrubowe), obróbkę ubytkową (toczenie, wiercenie, frezowanie, szlifowanie, polerowanie oraz elektrodrążenie) czy też metalurgię proszków.

Wszystkie techniki, czyli całość czynności związanych z produkcją dóbr materialnych, prowadzą do, mniej lub bardziej, dokładnego kształtowania elementu, a niektóre z nich występują łącznie, np. odlewanie (wlewków, kęsów) i przeróbka plastyczna, metalurgia proszków i odlewnictwo (metale i stopy wysokotopliwe), łączenie (a przede wszystkim spawanie) z odlewnictwem dla uzyskiwania konstrukcji lano-spawanych. Najszerzej występującą techniką wytwarzania elementów jest obróbka ubytkowa, stanowiąca często ostatni etap ich kształtowania.

Wykonanie odlewu obejmuje szereg czynności, które przy klasycznym odlewaniu w formach piaskowych można zgrupować w następujących etapach:

- 1) przygotowanie dokumentacji technologicznej (w ramach projektowania odlewu),
- 2) wykonanie modelu i rdzennicy,
- 3) przerób (przygotowanie i sporządzenie) mas formierskich i rdzeniowych,
- 4) wykonywanie form i rdzeni oraz składanie formy (z uwzględnieniem ewentualnych, ochładzalników), nanoszenie powłok czy też uszczelnianie formy,
- 5) przygotowanie ciekłego metalu,
- 6) wypełnienie formy ciekłym metalem (zalewanie formy),
- 7) stygnięcie (krzepnięcie i krystalizacja),
- 8) usuwanie odlewu z formy i rdzeni z odlewów (wybijanie formy),
- 9) oczyszczanie (w tym usunięcie układu wlewowego),
- 10) wykańczanie odlewów (w tym obróbka cieplna, cieplno-chemiczna, cieplno-mechaniczna oraz ewentualne nanoszenie powłok dekoracyjnych lub zwiększających odporność na zużycie, korozję czy erozję),
- 11) kontrola odlewu pod kątem zgodności z WTO (Warunkami Technicznymi Odbioru), w tym ewentualnie: składu chemicznego, właściwości mechanicznych, struktury, przeprowadzenie badań defektoskopowych i innych (jak np. konduktywności dla odlewów z miedzi i jej stopów).

Każdy z tych etapów obejmować może szereg czynności, częściowo o charakterze technologicznym, które w uproszczeniu określa się mianem procesów technologicznych, takich jak np. sporządzanie mas, topienie i przegrzewanie ciekłego metalu, ulepszanie ciekłego metalu (jak np. rafinowanie – w tym odtlenianie i odgazowanie, modyfikowanie, sferoidyzacja czy wermikularyzacja) i inne.



Rys. 0.1.1. Etapy wykonywania odlewu; (a) rysunek gotowego wyrobu, (b) rysunek surowego odlewu, (c) model, (d) rdzennica, (e) złożona forma, (f) usunięty z formy odlew; 1 – naddatek, 2 – znaki rdzeniowe, 3 – półowki rdzennicy, 4 – rdzeń, 5 – skrzynka formierska, 6 – gniazda rdzeniowe, 8 – układ wlewowy [29]

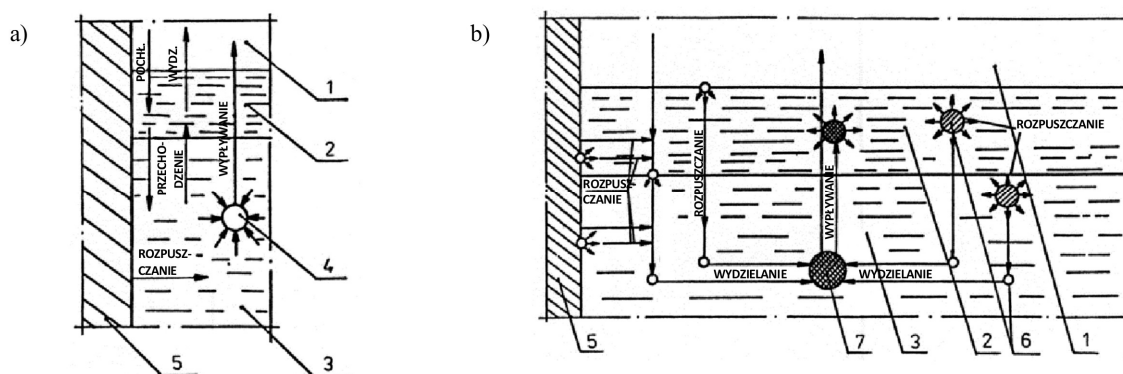
## 0.2. Metalurgia odlewnicza

### Zbigniew Górny

Wsad metalowy, a następnie ciekły metal, zajmuje określone miejsce w obszarze pieca lub tygla odlewniczego i znajduje się w kontakcie z tygłem lub wymurówką pieca, żużlem oraz atmosferą – jest to układ czterofazowy [10].

Żużel może być pochodzenia naturalnego (zawiera związki, takie jak: tlenki, siarczany, siarczki i in.) wydzielane z ciekłego metalu i pochodzące z zanieczyszczeń niemetalicznych wsadu, reakcji chemicznych i procesów fizycznych, związanych z rafinowaniem metalu oraz reakcjami zachodzącymi między metalem, żużlem i wyłożeniem pieca. Stosuje się również żużle sztuczne (syntetyczne) ze sproszkowanych materiałów, takich jak: tlenki, krzemiany, chlorki, fluorki siarczany, a także węgiel i inne. Żużle te stosuje się w celu wywołania procesów rafinacyjnych oraz w celu odizolowania metalu od wpływów atmosferycznych. W szczególnych przypadkach stosuje się atmosfery ochronne (azot, argon, hel a także próżnię, powstałą z azotu, argonu czy helu).

Pomiędzy fazami układu występować mogą reakcje chemiczne (wewnątrz lub na granicy faz) między reagentami, które dostarczają produktów reakcji. Reakcjom chemicznym towarzyszą często procesy fizyczne, takie jak rozpuszczanie, wydzielanie, dyfuzja czy unoszenie (rys. 0.2.1).



Rys. 0.2.1. Schemat procesów fizycznych zachodzących między częściami układu (a) oraz reakcji chemicznych pomiędzy składnikami układu (b); 1 – atmosfera, 2 – żużel, 3 – ciekły metal, 4 – pęcherz, 5 – wymurówka, 6 – stały składnik wprowadzany do ciekłego metalu lub żużla, 7 – produkt reakcji stanowiąca inną (obcą) fazę zanurzoną w ciekłym metalu [3]

Stan termodynamiczny układu określają takie czynniki, jak [36]: ciśnienie  $p$ , temperatura  $T$ , objętość  $V$ , gęstość  $\rho$  oraz termodynamiczne funkcje stanu układu – energia wewnętrzna  $U$ , entalpia  $H$ , entropia  $S$ , potencjał termodynamiczny (energia swobodna Gibbsa)  $G$ , energia swobodna Helmholtza  $Z$ , oraz potencjał chemiczny  $\mu$ . Pomiędzy tymi wielkościami zachodzą zależności określane mianem równań stanu:

$$pV = nRT \quad (0.2.1)$$

$$U = Z + RS = H - pV \quad (0.2.2)$$

$$G = U - TS + pV = Z + pV = H - TS \quad (0.2.3)$$

$$H = U + pV \quad (0.2.4)$$

$n$  – ilość moli substancji,  
 $R$  – uniwersalna stała gazowa.

Gdy znana jest postać równania stanu, właściwości układu (zmienne niezależne) noszą miano parametrów stanu układów. Gdy wartość parametrów zależy od ilości materii w układzie, to występują parametry ekstensywne; parametry te mogą być sumowane. Są też parametry intensywne, niezależne od ilości materii ( $T$ ,  $p$ , ciepło właściwe  $c$ ), które nie mogą być sumowane.

## 0.3. Krzepnięcie i krystalizacja odlewów

Zbigniew Górny

### 0.3.1. Krzepnięcie

Od początku wypełniania formy ciekłym metalem rozpoczyna się jego stygnięcie w kanałach formy odlewniczej i w jej wnętrzu, a następnie krzepnięcie i stygnięcie całego odlewu. Te procesy cieplne w formie występują w wyniku wymiany ciepła pomiędzy ciekłym i krzepnącym metalem, a później stygnącym odlewem i formą oraz pomiędzy formą i otoczeniem; następuje również zakumulowanie pewnej ilości ciepła w formie. Na intensywność wymiany i zakumulowania ciepła wpływa materiał formy; formy metalowe, ułatwiają (z racji ich właściwości termofizycznych) i przyspieszają odprowadzanie ciepła, szczególnie w pierwszej fazie krzepnięcia.

Mechanizm krzepnięcia związany jest z właściwościami ciekłego metalu (powinny być brane pod uwagę: zakres temperatur krzepnięcia, właściwości termofizyczne ciekłego i krzepnącego metalu oraz morfologia krzepnięcia), właściwościami termofizycznymi formy oraz geometrią odlewu i formy [21].

Do opisu analitycznego procesów stygnięcia i krzepnięcia ciekłego metalu w formie odlewniczej stosowane może być równanie różniczkowe Fouriera-Kirchhoffa, opisujące pola temperatur metalu wypełniającego formę, ciekłego metalu we wnętrzu, zakrzepłej części ciekłego metalu we wnętrzu zakrzepłej części odlewu oraz samej wreszcie formy.

Ponadto do opisu ruchu ciekłego metalu w formie stosowane jest hydromechaniczne równanie Naviera-Stokesa i równanie ciągłości strugi (Bernoulliego).

Równanie Fouriera-Kirchhoffa jest jedną z analitycznych postaci prawa zachowania energii, przy czym wyodrębnia się dwa człony zmian temperatury: w czasie (zmiana lokalna) i podczas przemieszczania się (unoszenia).

Rozwiązanie przytoczonego zespołu równań wymaga uproszczenia modelu fizykalnego i matematycznego. Uczynić to można przykładowo poprzez:

- 1) analizę sposobu krzepnięcia,
- 2) podział krzepnięcia na okresy,
- 3) ocenę intensywności odprowadzania ciepła,
- 4) uproszczenie kształtu geometrycznego,
- 5) uproszczenie układu odlew–forma.

Przez mechanizm procesu krzepnięcia rozumie się sposób tworzenia się warstwy skrzepłego metalu w odlewie, przy czym odróżnia się krzepnięcie liniowe (powierzchniowe) od objętościowego. Warunki odniesione do sposobu krzepnięcia określa kryterium temperaturowe [37]:

$$K = \frac{\Delta T_{kr}}{\Delta T_k} \quad (0.3.1)$$

$\Delta T_{kr}$  – zakres temperatur krzepnięcia metalu (początku i końca krzepnięcia, likwidus, solidus), T,

$\Delta T_k$  – spadek temperatury w przekroju ścianki odlewu, T:

$$\Delta T_{kr} = T_{lik} - T_{sol} \quad (0.3.2)$$

Przy krzepnięciu liniowym  $K \ll 1$ , a przy objętościowym  $K \gg 1$ . Przy krzepnięciu liniowym można pominąć zakres temperatur krzepnięcia, a dla objętościowego spadek temperatury w przekroju ścianki.

Cały proces wymiany ciepła metal–forma–otoczenie można podzielić na charakterystyczne okresy (rys 0.3.1):

- I – stygnięcie ciekłego metalu podczas zalewania z temperatury  $T_{zal}$ ,
- II – odprowadzenie ciepła przegrzania (ponad likwidus) z ciekłego metalu zalanego formy,
- III – krzepnięcie metalu,
- IV – stygnięcie odlewu w formie (po skrzepnięciu),
- V – stygnięcie odlewu po usunięciu go z formy.

Podział procesu wymiany ciepła ułatwia przybliżone obliczenia dla poszczególnych okresów oraz możliwość skorzystania ze stałych lub uśrednionych właściwości termofizycznych, takich jak ciepło właściwe oraz współczynniki przewodzenia ciepła czy temperatury.



## 0.4. Tendencje i prognozy rozwojowe odlewnictwa

Zbigniew Górny, Elżbieta Balcer, Agnieszka Kryczek

### 0.4.1. Statystyka

Na podstawie danych statystycznych z 40 krajów świata, w tym oczywiście największych producentów odlewów, w 2010 roku wielkość produkcji odlewów osiągnęła 92 mln ton, o wartości ok. 190 mld euro; w roku 2010 w Polsce wykonano 903,4 tys. ton odlewów o wartości 6,4 mld zł, przy średniej produkcji 2,26 tys. ton/odlewnię, a w 2011 produkcja już przekroczyła 1mln ton odlewów.

Rysunki 0.4.1 i 0.4.2 przedstawiają odpowiednio zestawienie wydajności produkcji odlewów ze stopów żelaza i metali nieżelaznych w Europie. W tym zakresie wydajność naszych odlewni stopów metali nieżelaznych, a przede wszystkim stopów aluminium jest znacznie korzystniejsza niż ze stopów żelaza. Na szczególną uwagę zasługuje produkcja żeliwa sferoidalnego (w tym ADI) oraz stopów aluminium i magnezu. Są to tworzywa stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, który rzutuje zasadniczo na wielkość produkcji odlewów oraz ich seryjność.

Na podstawie danych *American Foundry Society* za 2010 rok w skali światowej produkcja żeliwa sferoidalnego i ciągliwego wyniosła ok. 23,5 mln ton, stopów aluminium ok. 11 mln ton, stopów magnezu blisko 200 tys. ton, wobec ponad 43 mln ton żeliwa szarego i stopowego (z grafitem płatkowym), 10,2 mln ton staliwa, 1,7 mln ton stopów miedzi, ponad 530 tys. ton stopów cynku oraz ponad 500 ton odlewów z innych stopów metali nieżelaznych.

W odlewnictwie światowym znaczącą rolę odgrywają Chiny (z produkcją 39,6 mln ton/rok), USA (8,24), Indie (9,05), Rosja (4,2), Japonia (4,76), Niemcy (4,79), Brazylia (3,24), Korea Płd. (2,23), Francja (1,96), Włochy (1,97), Meksyk (1,65) czy Turcja (1,29). Kryzys gospodarczy i jego skutki powodują przeważnie spadek produkcji odlewów (w 2009 w relacji do 2008 od ok. 18 do nawet 38 %). Wyjątek stanowią Chiny, Indie i Korea Płd., gdzie wystąpił kilkuprocentowy wzrost. Natomiast w roku 2010 wystąpił znaczący wzrost produkcji odlewów o ok. 14 %.

Udział żeliwa sferoidalnego, stopów aluminium oraz magnezu w wybranych krajach podano w tabeli 0.4.1. Analiza tych danych wskazuje na nadal mały udział w polskim odlewnictwie odlewów z żeliwa sferoidalnego, ale już znaczący udział odlewów ze stopów aluminium. Odlewy ze stopów magnezu nie były dotąd rejestrowane.

Tabela 0.4.1. Produkcja odlewów z niektórych stopów w 2010 [40]

Lp.	Kraj	Żeliwo sferoidalne		Stopy aluminium		Stopy magnezu	
		mln ton	% <sup>1)</sup>	mln ton	% <sup>1)</sup>	mln ton	% <sup>1)</sup>
1.	Chiny	9,900	25,0	3,800 <sup>3)</sup>	9,6	brak danych	–
2.	USA	2,753	33,4	1,234	15,0	0,106	1,3
3.	Indie	1,053	11,6	0,750 <sup>4)</sup>	8,3	brak danych	–
4.	Japonia	1,350	28,4	0,926	19,5	0,006	0,1
5.	Rosja <sup>2)</sup>	1,260	30,0	0,340	8,1	0,035	0,8
6.	Niemcy	1,487	31,1	0,798	16,6	0,015	0,3
7.	Brazylia	0,786	24,3	0,248	7,7	0,005	0,1
8.	Korea Płd.	0,653	29,2	0,345	15,4	brak danych	–
9.	Francja	0,916	46,8	0,287 <sup>3)</sup>	14,7	brak danych	–
10.	Włochy	0,405	20,6	0,731	37,1	0,007	0,3
11.	Polska	0,142	15,7	0,246	27,2	0,003	0,3

<sup>1)</sup> W stosunku do ogółu stopów.  
<sup>2)</sup> Za 2009 rok.  
<sup>3)</sup> Zawiera stopy Mg.  
<sup>4)</sup> Zawiera wszystkie stopy metali nieżelaznych.

Wielkość produkcji odlewów w skali światowej zależy od zapotrzebowania na nie, czyli popytu. To nie zdolność produkcyjna decyduje o wielkości produkcji. Prognoza zapotrzebowania na odlewy wyrażone prognozą sprzedaży jest wnikliwie analizowana. Prognozy amerykańskie (NAICS) do roku 2019 przewidują praktycznie biorąc stagnację sprzedaży odlewów z żeliwa szarego (z grafitem płatkowym) przy rocznym tempie wzrostu 0,3 % i krótkoterminowym 4,1 %, z wartości sprzedaży w 2007 roku 4,3 mld USD do ok. 4,0 mld w 2010. W zakresie odlewów z żeliwa sferoidalnego wartość rośnie z 6,093 mld USD do 6,570 w analizowanych latach (2007–2019), przy rocznym tempie wzrostu 7,0 % i krótkoterminowym rocznym tempie wzrostu 10,7 %.

# I. Żeliwo

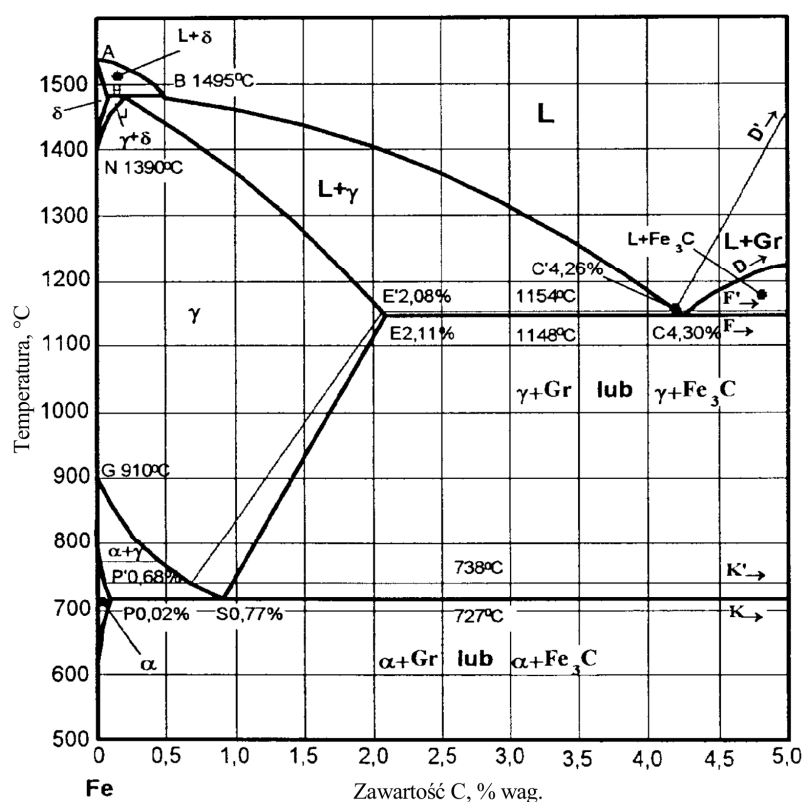
## I.1. Struktura i klasyfikacja

*Edward Fraś*

### I.1.1. Układy równowagi fazowej stopów Fe-C

Podstawą stopów żelaza z węglem są dwa układy równowagi fazowej obejmujące:

- 1) układ żelazo-grafit, przedstawiający równowagę trwałą (stabilną) między żelazem i węglem w postaci wolnej tj. grafitu,
- 2) układ żelazo-cementyt  $Fe_3C$ , przedstawiający równowagę nietrwałą (metastabilną) między żelazem i węglem związanym w cementyt  $Fe_3C$ .



Rys. I.1.1. Wykresy równowagi fazowej stopów Fe-C<sub>gr</sub> (linie cienkie) oraz stopów Fe-Fe<sub>3</sub>C (linie grube) [1]

Układy te dla czystych stopów Fe-C pokazuje rysunek I.1.1 Wprowadzenie do tych stopów innych pierwiastków, powoduje liczbowe zmiany w układach równowagi, które można obliczyć z wystarczającym przybliżeniem następująco: Równowagowa temperatura przemiany eutektycznej [2-4]:

$$T_{C'} = 1154 + 5,25Si - 14,88P, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (układ stabilny)} \quad (\text{I.1.1})$$

$$T_C = 1148,0 - 13,3Si - 50,3P, \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (układ metastabilny)} \quad (\text{I.1.2})$$

Zawartość węgla w eutektykach

$$C_{C'} = 4,26 - 0,3Si - 0,36P, \text{ } \% \text{ (układ stabilny)} \quad (\text{I.1.3})$$

$$C_C = 4,30 - 0,30(Si + P), \text{ } \% \text{ (układ metastabilny)} \quad (\text{I.1.4})$$

## I.2. Materiały wsadowe, dodatki, paliwo, obliczanie wsadów

*Jerzy Kilarski, Jan Szajnar, Dariusz Bartocha*

**Wsadem** nazywamy ogół materiałów przeznaczonych (niezbędnych) do prowadzenia procesu topienia w określonym piecu w celu uzyskania ciekłego metalu o zadanym składzie chemicznym. W zależności od rodzaju pieca (żeliwiak, piec obrotowy, piec indukcyjny, piec łukowy itp.) dla wytopienia tego samego gatunku żeliwa materiały wsadowe z reguły różnią się ilością składników podstawowych, ich proporcjami i wielkościami kawałków możliwych do załadowania. W skład materiałów wsadowych wchodzi: składniki podstawowe metaliczne oraz materiały pomocnicze zarówno niemetaliczne jak i metaliczne, a w przypadku topienia w żeliwiaku koksowym materiałem wsadowym i jednocześnie paliwem jest koks. Do składników metalicznych podstawowych zalicza się: surówkę, złom żeliwny, złom stalowy, żelazostopy, metale technicznie czyste. Do materiałów pomocniczych zalicza się: topniki, nawęglacze, odtleniacze, środki odsiarczające, modyfikatory, sferoidyzatory itp.

**Surówka** jest najważniejszym składnikiem wsadowym w wytapianiu żeliwa. Jej udział wynosi od 20 do 50 % masy całego wsadu. Jest to przeważnie produkt wielkiego pieca o zawartości węgla 3,0÷4,5 %. Rozróżnia się surówkę wielkopieczową odlewniczą (LH, LN, LF, LW) i przeróbczą (P1, P2). Surówki dostarczane są do odlewni w postaci gąsek. Składy chemiczne surówki wielkopieczowej odlewniczej wraz z ich odmianami ujmuje norma krajowa (tab. I.2.1). Odmiany surówek związane są z różną zawartością Si, Mn, P i S, co oznaczone jest dodatkowo wyróżnikiem cyfrowym np.: LH5213 oznacza surówkę hematytową o zawartości średnio: 2,0 % Si, 0,4 % Mn, max. 0,10 % P i 0,05 % S. Na odlewy z żeliwa sferoidalnego i wermikularnego stosowane są surówki specjalne o ogólnej symbolice LS wytapiane w piecach łukowych, wśród których na specjalne wyróżnienie zasługują bardzo czyste surówki Sorelmetal (tab. I.2.2), czy norweskie OB. Surówki odlewnicze jak i specjalne nie są wytwarzane w kraju. Importerem ich, jak i całej gamy żelazostopów, modyfikatorów, sferoidyzatorów i innych materiałów jest wiele firm współpracujących z odlewniami. Materiały te sprowadzane są z Ukrainy, Rosji, Niemiec, Litwy, Szwecji, Czech, Norwegii, Słowacji, Węgier, Kanady, Francji. Gatunki i odmiany niektórych importowanych surówek zestawiono w tab. I.2.3.

Tabela I.2.1. Skład chemiczny surówki wielkopieczowej odlewniczej [1]

Znak gatunku <sup>1)</sup>	Skład chemiczny, %								
	C %	Si		Mn		P		S	
		a	Zawartość, %	b	Zawartość, %	c	Zawartość, %	d	Zawartość max., %
LH	3,6÷4,3	1	do 0,75	1	max. 0,30	1	max. 0,10	1	0,03
		3	0,76÷1,25	2	0,31÷0,50			2	0,04
		4	1,26÷1,75	4	0,51÷0,75			3	0,05
		5	1,76÷2,25	5	0,76÷1,00				
		6	2,26÷2,75						
		7	2,76÷3,25						
		8	3,26÷3,75						
LN	3,6÷4,3	3	1,00÷1,25	2	0,31÷0,50	2	0,11÷0,20	3	0,05
		4	1,26÷1,75	4	0,51÷0,75	3	0,21÷0,35	2	0,04
		5	1,76÷2,25	5	0,76÷1,00			1	0,03
		6	2,26÷2,75						
		7	2,76÷3,25						
		8	3,26÷3,75						
LF	3,6÷4,3	3	1,00÷1,25	2	0,31÷0,50	4	0,36÷0,50	3	0,05
		4	1,26÷1,75	4	0,51÷0,75	6	0,51÷0,75	2	0,04
		5	1,76÷2,25	5	0,76÷1,00	7	0,76÷1,25	1	0,03
		6	2,26÷2,75						
		7	2,76÷3,25						
		8	3,26÷3,75						
LW	3,6÷4,3	0	do 0,70	3	max. 0,60	5	0,40÷0,60	2	0,04
		2	0,70÷1,00						

a, b, c, d – wyróżniki cyfrowe odmian surówek.

Zawartość Cu w wszystkich gatunkach surówki odlewniczej – max. 0,20 %, a Cr max. 0,10 %.

W uzgodnieniu stron dopuszcza się zawartość Mn do 1,50 % w gatunkach LH, LN, LF.

We wszystkich odmianach surówek odlewniczych mogą być uzgodnione inne górne zawartości Si, Mn, P, S.

<sup>1)</sup> Poszczególne gatunki surówki odlewniczej mają następujące nazwy:

LH – hematytowa, LN – zwyczajna (normalna), LF – fosforowa, LW – na walcu.

Surówki są dostarczane w postaci gąsek bez przewężenia (9÷15 kg), z jednym przewężeniem (30 kg) bądź z dwoma przewężeniami (45 kg).

## I.3. Piece do wytapiania

*Jerzy Kilariski, Jan Szajnar, Andrzej Studnicki*

Do bezpośredniego wytapiania żeliwa obecnie zastosowanie znajdują piece szybowe (żeliwiaki), piece elektryczne (indukcyjne tyglowe, rzadziej łukowe) oraz piece płomienne obrotowe. Oprócz tego żeliwo wytapiane jest w procesach podwójnych, tzw. „duplex”, w których biorą udział jeszcze piece indukcyjne rdzeniowe lub tyglowe sieciowej częstotliwości. Proces „duplex” umożliwia zarówno intensyfikację procesów topienia, zmniejszenie jednostkowego zużycia energii, jak i wykorzystanie tego systemu do produkcji żeliwa sferoidalnego i wermikularnego. Najstarszy i do dzisiaj spotykany system „duplex” to: żeliwiak koksowy w różnych odmianach – piec indukcyjny rdzeniowy (kanałowy). Oprócz tego szeroko rozpowszechniony w kraju jest układ: piec indukcyjny tyglowy – piec indukcyjny rdzeniowy, a w najnowszych rozwiązaniach w miejsce pieca rdzeniowego jest piec zalewowy. Spotyka się jeszcze sporadycznie układ: piec łukowy – piec indukcyjny tyglowy lub rdzeniowy.

Z kolei poza granicami kraju, głównie w Europie Zachodniej, duże zainteresowanie budzi żeliwiak bezkoksowy zintegrowany z piecem indukcyjnym rdzeniowym lub piecem płomiennym. Ponadto, coraz szerzej są stosowane do wytopu żeliwa nowoczesne piece płomienne obrotowe (jest ich ponad 200) i związane z tym systemy podwójne zwiększające wydajność, np.: piec płomienny – piec indukcyjny rdzeniowy lub zalewowy [10].

W odlewniach przy doborze pieców i systemów uwzględnia się następujące kryteria:

- 1) rodzaj wytapianego żeliwa i wymaganą temperaturę jego przegrzania,
- 2) zapotrzebowanie metalu (produkcja jednostkowa, seryjna, masowa),
- 3) koszt energii, materiałów wsadowych i ogniotrwałych,
- 4) wymagania w zakresie ochrony środowiska i warunków bezpieczeństwa i higieny pracy.

Obecnie w kraju wyraźnie zauważalne jest, zarówno w odlewniach nowych jak i w ramach modernizacji starszych zakładów, instalowanie pieców indukcyjnych średniej częstotliwości, co ma sprostać potrzebom związanym z coraz większym zamówieniem na odlewy z żeliwa sferoidalnego i wermikularnego, jak i z wymogami dotyczącymi ochrony środowiska. Małe zainteresowanie jest piecami obrotowymi (jest ich zaledwie dwa) [3]. Podobnie sytuacja wygląda z żeliwiakami bezkoksowymi, których jak na razie nikt w kraju nie zainstalował. Z kolei w ramach modernizacji topialni coraz częściej stosowane jest dotlenianie żeliwiaków zarówno z zimnym jak i podgrzanym dmuchem. Zdarza się też, że w miejscach zwykłych żeliwiaków instalowane są żeliwiaki kampanijne.

### I.3.1. Żeliwiaki

Żeliwiak koksowy jest najstarszym i jeszcze dość popularnym w kraju piecem szybowym, w którym naboje wsadu metalowego na przemian z nabojami paliwa (koks) i topnika opuszczają się w dół szybu, a gorące gazy żeliwiakowe unoszą się do góry nagrzewając i topiąc wsad metalowy. Podstawową zaletą żeliwiaków jest ich duża wydajność godzinowa, a argumentem dodatkowym, przemawiającym za stosowaniem żeliwiaków, jest dostępność i relatywnie niski koszt paliwa jakim jest koks odlewniczy. Żeliwiaki koksowe mogą pracować na zimnym lub podgrzanym dmuchu oraz na dmuchu wzbogaconym w tlen. Ponadto żeliwiaki mogą mieć dodatkowe wyposażenie zarówno poprawiające proces, jak i wydłużające czas pracy żeliwiaka czy spełnianie wymagań odnośnie do ochrony środowiska. Coraz częściej stosowana bywa automatyzacja procesów żeliwiakowych ukierunkowana nie tylko na utrzymanie stałej temperatury przegrzania żeliwa (system komputerowy pomiaru i kontroli procesu topienia), ale również uwzględniająca system namiarowania wsadu czy system kontroli i wizualizacji instalacji oczyszczającej. Oprócz żeliwiaków koksowych coraz większe zainteresowanie (głównie za granicą) znalazły żeliwiaki opalane gazem, zwane bezkoksowymi; stanowią one bardzo interesującą alternatywę typowych żeliwiaków koksowych.

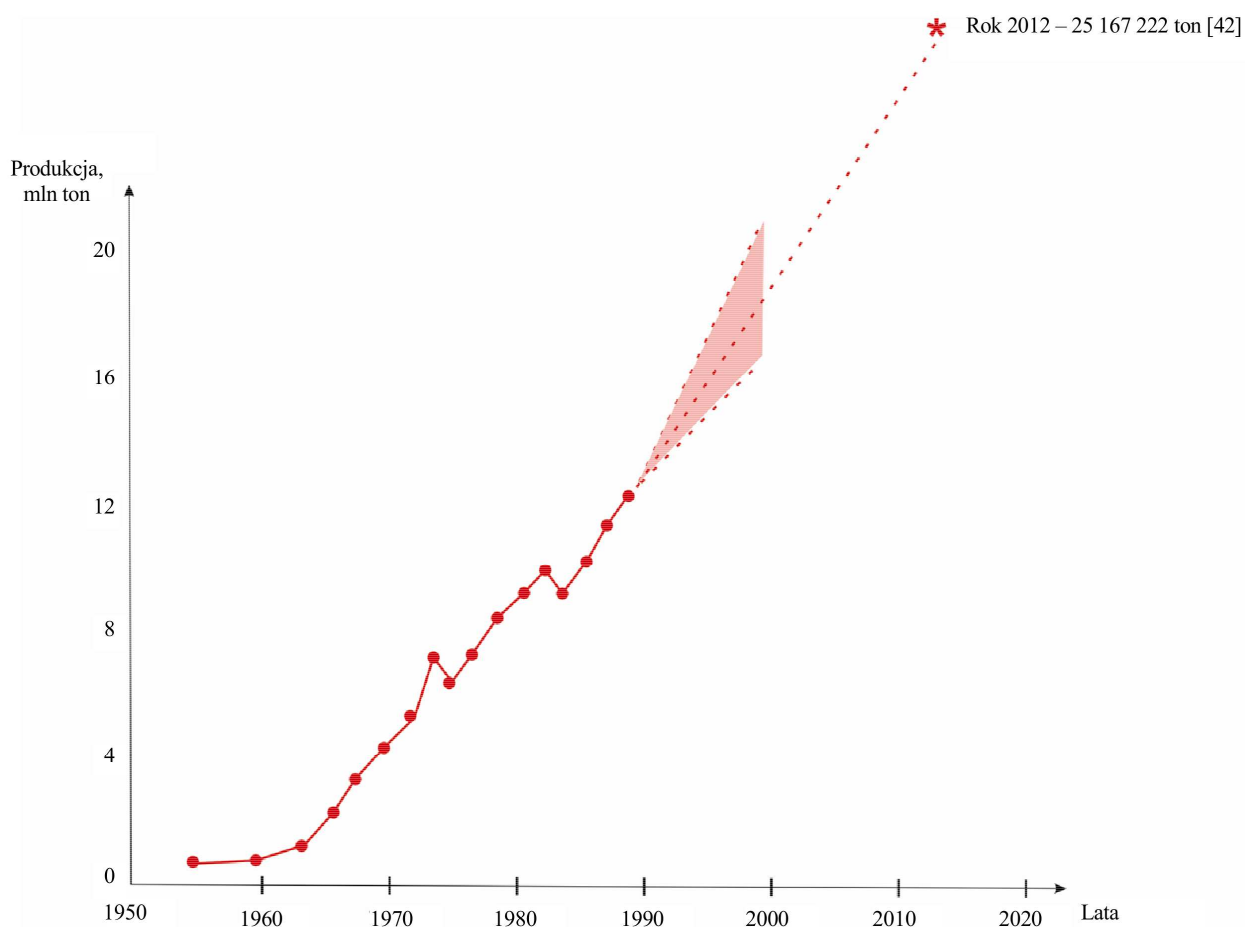
#### **Żeliwiaki z zimnym dmuchem**

Żeliwiaki z zimnym dmuchem to piece zarówno bez zbiornika (rys. I.3.1a), jak i ze zbiornikiem stałym (rys. I.3.1b) lub przechylnym, którego przedstawicielem dzisiaj są przede wszystkim żeliwiaki małe o średnicy 500 i 600 mm mogące zapewnić otrzymanie żeliwa handlowego najniższych klas (bez specjalnych zabiegów). Piece te wyposażone są w proste urządzenia odpylające, tzw. chwytacze isker pracujące na sucho lub mokro.

## I.4. Pozapiecowa obróbka metalurgiczna ciekłego żeliwa

*Marcin Stawarz, Jerzy Tybulczuk, Krzysztof Janerka*

Przedstawione w danym rozdziale informacje dotyczące obróbki pozapiecowej ciekłego żeliwa, poza procesem modyfikacji istotnym również dla żeliwa szarego modyfikowanego, obejmują głównie proces wytwarzania żeliwa sferoidalnego. Główny powód takiego podejścia to fakt, że właśnie żeliwo sferoidalne należąc do największych wynalazków w dziedzinie odlewnictwa, wykazuje ciągle dynamiczny wzrost produkcji (rys. 1.4.1), oraz przy stosunkowo niskim jego udziale w produkcji odlewów w Polsce (średni udział ok. 15 %) w relacji do średniego w Europie – ok. 30 % – stanowi w dalszym ciągu szansę dla polskiego odlewnictwa.



1.4.1. Ewolucja produkcji żeliwa sferoidalnego w świecie [40]

Technologia żeliwa sferoidalnego obejmuje kilka etapów obróbki metalurgicznej ciekłego metalu. Najistotniejszym elementem technologii produkcji jest sferoidyzacja, czyli wprowadzenie do ciekłego żeliwa odpowiedniego reagenta w postaci technicznie czystego magnezu lub jego stopów oraz pierwiastków ziem rzadkich, najczęściej w postaci miszmetalalu (50÷56 % Ce, 18÷25 % La, 10÷15 % Nd, 7 % Pr, resztę stanowią inne lantanowce; dodatek ten stosowany jest głównie w celu neutralizacji szkodliwego działania pierwiastków śladowych na grafit sferoidalny). Ogólny schemat procesu wytwarzania żeliwa sferoidalnego przedstawiono na rysunku I.4.2.

Według danych literaturowych [2÷4] a także praktyki odlewniczej możliwe jest wytworzenie żeliwa sferoidalnego z pominięciem zabiegu odsiarczania ciekłego metalu, jeżeli zawartość siarki w żeliwie wyjściowym jest niższa niż 0,02 %. Większe zawartości siarki, np. powyżej 0,04 % wymagają większej ilości sferoidyzatora i mogą być przyczyną wad w odlewie, dlatego w takich przypadkach zalecane jest odsiarczanie.

## I.5. Właściwości odlewnicze

*Adam Kowalski*

### I.5.1. Wstęp

Do właściwości odlewniczych zalicza się te wszystkie cechy charakteryzujące metal w stanie ciekłym i stałym, które wywierają zasadniczy wpływ na otrzymanie odlewów bez wad. Są to: lejność, skłonność do grafityzacji, skurcz odlewniczy, skłonność do tworzenia jam skurczowych i porowatości, skłonność do powstawania naprężeń własnych w odlewie, skłonność do powstawania w odlewach pęcherzy gazowych i porowatości oraz wrażliwość na szybkość stygnięcia (wrażliwość na grubość ścianki w odlewie). Właściwości te są funkcją stanu fizycznego i chemicznego metalu.

#### I.5.1.1. Lejność

Jest to zdolność ciekłego metalu do wypełniania wnęki formy odlewniczej i do dokładnego odtworzenia jej kształtu (konturów).

Na lejność żeliwa wpływają:

- czynniki związane ze składem chemicznym, a więc temperatura początku krzepnięcia, zakres temperatury krzepnięcia, ciepło właściwe, przewodność i pojemność cieplna, gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe, ilość i rodzaj rozpuszczonych w metalu tlenków oraz innych wtrąceń niemetalicznych,
- czynniki związane z formą odlewniczą, a więc ukształtowanie układu wlewowego i wnęki formy, rodzaj i właściwości materiału formy, jej temperatura i jakość powierzchni itp.,
- czynniki związane z warunkami odlewania, a mianowicie temperatura odlewania, stopień, przegrzania, szybkość i czas zalewania, formy odlewniczej.

Z wymienionych czynników do najistotniejszych zalicza się skład chemiczny żeliwa, stopień przegrzania i temperaturę zalewania, tj. temperaturę żeliwa w chwili zalewania do formy odlewniczej.

Największy wpływ na lejność żeliwa wywierają węgiel, krzem i fosfor. Ich łączny wpływ można scharakteryzować za pomocą równoważnika węglowego  $C_e$  lub stopnia nasycenia eutektycznego  $S_c$ , ze wzrostem których lejność ulega polepszeniu.

Ilościowy wpływ składu chemicznego można przedstawić za pomocą tzw. równoważnika lejnościowego węgla  $C_{e,l}$ :

$$C_{e,l} = C + 0,35 \text{ Si} + 0,5 \text{ P}, \% \quad (\text{I.5.1})$$

W praktyce wyznaczanie lejności odbywa się za pomocą odpowiednich prób technologicznych, których cechą wspólną jest pomiar długości drogi strugi metalu w kanale o małym przekroju poprzecznym w okresie całkowitej ciekłości metalu. Najpowszechniej stosowanym rodzajem próby technologicznej lejności jest próbka typu spiralnego, której kształt zgodnie z BN-80/4051-17 podaje rys. I.5.1a, model spirali i układ wlewowy – rys. I.5.1b a zbiornik wlewowy wraz z filtrem z jednym otworem wlewowym o średnicy 10 mm – rys. I.5.1c.

Stosując przedstawioną wyżej próbkę technologiczną, w *Zakładzie Odlewnictwa AGH*, stwierdzono, że dla zakresu temperatur odlewania 1230÷1400°C oraz dla zakresu równoważnika lejnościowego węgla  $C_{e,l} = 3,7\div 4,6\%$  lejność  $L$  mierzona liczbą dokładnie odtworzonych występów na próbce technologicznej spirali (wg BN-80/4051-17) – jest funkcją liniową, którą można wyrazić równaniem empirycznym, wyprowadzonym metodą analizy statystycznej:

$$L = \frac{p+1}{16} \quad (\text{I.5.2})$$

przy czym stopień przegrzania żeliwa w chwili jego zalewania do formy:

$$p = t_o - t_l \text{ K} \quad (\text{I.5.3})$$

$t_o$  – temperatura zalewania, °C,

$t_l$  – temperatura likwidus, °C.

## I.6. Zalewanie form, stygnięcie odlewów, konstrukcja układu wlewowego

*Zenon Ignaszak*

### I.6.1. Wprowadzenie

W rozdziale tym nawiązuje się do wiedzy, która stanowi podstawy zjawisk towarzyszących przepływowi w układach wlewowych form odlewniczych, nie wchodząc w jej szczegóły i zawitości. Te Czytelnik znajdzie w podręcznikach i monografiach poświęconych mechanice płynów.

Praktyczne, uproszczone podejście do układu wlewowego sprowadza się do spełnienia kilku wymogów. Najistotniejszy z nich, to racjonalne zminimalizowanie czasu wypełniania wnęki, co prowadzi do minimalizacji spadku temperatury i minimalizacji utlenienia czoła strugi i rejonu swobodnej powierzchni wpływającego do wnęki formy metalu. Także unikanie warunków powstawania znacznej ilości wtrąceń niemetalicznych (zwanymi niekiedy z angielska „*drosses*”) oraz niedopuszczanie do wprowadzenia do wnęki formy zanieczyszczeń już istniejących w wypływającej z kadzi strudze, są kolejnymi zadaniami. Dokładając kwestie ekonomiczne, czyli spełnienie warunku maksymalizacji uzysku, otrzymuje się dość kompletny obraz postulatów, jakim sprostać powinien technolog. Najistotniejsze z tych zagadnień zostaną rozwinięte w dalszej części rozdziału. Obejmują one praktyczne informacje dotyczące konfiguracji układów wlewowych oraz optymalnych warunków wypełniania wnęki formy.

Wykonanie wnęki formy jednorazowej, najczęściej z masy na osnowie piasku kwarcowego, wiązanego na sposób odtwarzalny (bentonitowe formy wilgotne) lub na sposób nieodtwarzalny, głównie za pomocą spoiw chemoutwardzalnych i termoutwardzalnych (olejowych, szkła wodnego, żywic), wymaga jednocześnie wykonania systemu kanałów, zwanego układem wlewowym, które umożliwią wprowadzenie do wnęki formy ciekłego metalu.

Projekt koncepcji odlewania zawierający celowo wprowadzone deformacje w odlewanej części (naddatki na obróbkę, naddatki technologiczne, pochylenia), w sposób jednoznaczny powinien definiować odpowiednie wypełnienie wnęki formy przez układ wlewowy, którego celem jest dostarczenie ciekłego stopu zmagazynowanego w kadzi rozlewniczej, w określonym czasie i w określonej ilości, aby otrzymać prawidłowy pod względem kształtowo-wymiarowym odlew.

Badania doświadczalne zjawisk towarzyszących przepływowi metalu przez układ wlewowy, wiążą się z odniesieniem do hydrauliki, z obserwacjami rzeczywistego przepływu metalu, poszerzonymi szczególnie o zjawiska eliminowania wtrąceń nie tylko na drodze ich filtrowania, ale także na drodze ich dekantacji, rozumianej jako gromadzenie i izolowanie wtrąceń, przed wprowadzaniem ich do wnęki formy [1].

Należy także dodać, że zagadnienia konfiguracji i wymiarów układu wlewowego są nadal przedmiotem optymalizacji. Ma to związek z wielkością i kształtem odlewów, a także z rodzajem odlewanej stopu czy kompozytu metalowego [2]. Niezwykle pomocne są tutaj możliwości jakie dają systemy symulacyjne, które pozwalają w geometrii trójwymiarowej (3D) zobrazować na drodze wirtualizacji proces wypełniania wnęki formy przez wizualizację jego parametrów (dynamiczne mapy temperatury, prędkości przepływu, prędkości ruchów konwekcyjnych po wypełnieniu, itp.). Wyniki symulacji wypełniania formy (za pomocą takich odlewniczych systemów symulacyjnych, jak np. *MagmaSoft*, *NovaFlow&Solid*, *Procast*) z wykorzystaniem nowoczesnego sprzętu komputerowego, stanowią dzisiaj bezdyskusyjnie nie tylko podstawę do analizy zjawisk podczas wypełniania, ale także decydują o początkowym stanie cieplnym (wyjściowym) do kontynuowania obliczeń symulacyjnych procesów krzepnięcia. Opis modelowania i symulacji tych procesów oraz bazy danych do tych obliczeń można znaleźć m.in. w [3÷5].

W niektórych tłumaczeniach z języków obcych używa się pojęcia zasilanie w sposób niejednoznaczny: zalewanie i zasilanie, ang. *pouring and feeding*, franc. *coulee (remplissage) et alimentation*. W polskim piśmiennictwie wypełnianie wnęki formy odróżnia się od zasilania odlewu w niej powstającego, jako procesu niezbędnego do skompensowania zmienności objętości (zwanej sumarycznym skurczem objętościowym) w stanie ciekłym i podczas transformacji ze stanu ciekłego w stały (krzepnięcia).

Można przy tym zauważyć, że oba wymienione okresy mogą zachodzić na siebie, tzn. pod koniec okresu zalewania stop znajdujący się we wnęce stygnie, podlega już skurczowi i „korzysta” ze świeżego metalu wprowadzanego jeszcze do wnęki formy. Wtedy układ wlewowy spełnia częściowo funkcję zasilającą, w kwestii funkcjonalności zbliżoną do działania nadlewu. Takie zasilanie może być kontynuowane poza koniec krzepnięcia odlewu, kiedy układ wlewowy pełni jednocześnie funkcję górnego nadlewu.

Usytuowanie układu wlewowego w odniesieniu do wnęki formy jest jednym z kryteriów jego klasyfikacji:

## I.7. Żeliwo szare

*Edward Fraś*

Żeliwo szare z grafitem płatkowym przeznaczone na odlewy, wykonywane w formach piaskowych dzieli się na sześć gatunków według wytrzymałości na rozciąganie (tab. I.7.1) i sześć gatunków według twardości Brinella (tab. I.7.2).

Tabela I.7.1. Wytrzymałość na rozciąganie żeliwa szarego według PN-EN 1561:2011 (E)

Oznaczenie materiału		Reprezentatywna grubość ścianki, mm		Wytrzymałość na rozciąganie (wartości obowiązujące)	
Znak	Numer	>	≤	Na próbce z wlewka próbnego oddzielnie odlewanej, MPa	Na próbce z wlewka próbnego przylanego, MPa
EN-GJL-100	5.1100	5	40	100	–
EN-GJL-150	5.1200	2,5	50	150	135
		50	100	130	120
		100	200	110	110
EN-GJL-200	5.1300	2,5	50	200	180
		50	100	180	160
		100	200	160	145
EN-GJL-250	5.1301	5	50	250	225
		50	100	220	200
		100	200	200	185
EN-GJL-300	5.1302	10	50	300	270
		50	100	260	245
		100	200	240	220
EN-GJL-350	5.1303	10	50	350	320
		50	100	310	290
		100	200	280	260

Tabela I.7.2. Twardość Brinella odlewów z żeliwa szarego według PN-EN 1561:2011 (E)

Oznaczenie materiału		Reprezentatywna grubość ścianki, mm		Twardość Brinella HBW	
Znak	Numer	>	≤	Min.	Max.
EN-GJL-HB155	5.1101	2,5	50	–	155
EN-GJL-HB175	5.1201	2,5	50	115	175
		50	100	105	165
EN-GJL-HB195	5.1304	5	50	135	195
		50	100	125	185
EN-GJL-HB215	5.1305	5	50	155	215
		50	100	145	205
EN-GJL-HB235	5.1306	10	50	175	235
		50	100	160	220
EN-GJL-HB255	5.1307	20	50	195	255
		50	100	180	240

W normie określono charakterystyczne właściwości żeliwa szarego wyrażone za pomocą:

- 1) wytrzymałości na rozciąganie, wyznaczonej na próbkach pobieranych z wlewków próbnych oddzielnie odlewanych lub jeśli tak uzgodniono między wytwórcą a zamawiającym przed przyjęciem zamówienia, na próbkach z wlewków przyłanych lub na próbkach pobieranych z odlewu albo
- 2) twardości materiału mierzonej na odlewach, jeśli tak uzgodniono między wytwórcą a zamawiającym przed przyjęciem zamówienia lub na próbkach z wlewków przyłanych.

Wlewki próbne oddzielnie odlewane, przeznaczone do określenia gatunku materiału, powinny być odlewane pionowo (rys. I.7.1a), w formach piaskowych. W jednej formie można odlewać jednocześnie kilka próbek. Wlewki próbne przyłane (rys. I.7.1b) stosuje się tylko wtedy, gdy odlew ma grubość ścianki większą od 20 mm i masę ponad 200 kg. Z wlewków oddzielnie odlewanych lub przyłanych metodą obróbki mechanicznej otrzymuje się próbki do badań wytrzymałościowych, przy czym ich kształt i wymiary określa norma PN-EN 1561:2011.

Właściwości mechaniczne znormalizowanych gatunków żeliwa szarego w próbkach osobno odlewanych o średnicy 30 mm podaje tabela I.7.3, a ich orientacyjny skład chemiczny – tabela. I.7.4.



## I.8. Żeliwo z grafitem sferoidalnym i wermikularnym

*Edward Guzik*

Żeliwo, dzięki korzystnym właściwościom odlewniczym, użytkowym, mechanicznym i technologicznym, pozostaje nadal najbardziej rozpowszechnionym tworzywem, z którego wykonuje się odlewy i nadal znajduje uznanie w poszerzającej się grupie jego użytkowników. Dominującym stopem w krajowej i światowej produkcji odlewów żeliwnych pozostaje nadal żeliwo szare z grafitem płatkowym, w tym żeliwo modyfikowane. Jednak na szczególnie podkreślenie zasługuje żeliwo wysokojakościowe z wydzieleniami grafitu kulkowego (żeliwo sferoidalne standardowe oraz żeliwo ausferytyczne – ADI i jego odmiany) bądź wermikularnego (grafit o kształcie robaczkowym, od terminu z ang. „vermicular”, znanym także w literaturze amerykańskiej jako grafit „compacted” – zwarty). Udział produkcji tych rodzajów żeliwa w ogólnej produkcji odlewów ze stopów żelaza jest obecnie traktowany jako niewątpliwy wskaźnik nowoczesności odlewnictwa w danym kraju oraz tych gałęzi przemysłu, dla których odlewy są istotnymi elementami wyrobów końcowych, przede wszystkim zaś przemysłu maszynowego i motoryzacyjnego.

### I.8.1. Technologia wytwarzania żeliwa sferoidalnego i żeliwa z grafitem wermikularnym

W warunkach krajowych żeliwo sferoidalne standardowe ujęto w obowiązującej normie europejskiej PN-EN 1563:2011 (E) (tab. I.8.1a i I.8.1b) przewidującej 9 gatunków żeliwa: od żeliwa EN-GJS-350-22 o osnowie ferrytycznej, dużej plastyczności ( $A \geq 22\%$ ) i dość znacznej wytrzymałości ( $R_m \geq 350$  MPa), w osobno odlewanym wlewk, poprzez żeliwo o osnowie perlitycznej i perlityczno-ferrytycznej do żeliwa gatunku EN-GJS-900-2 o dużej wytrzymałości ( $R_m \geq 900$  MPa) i niewielkiej plastyczności ( $A_5 \geq 2\%$ ), charakteryzującego się osnową bainityczną lub martenzytyczną.

Tabela I.8.1a. Właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego określone na próbkach pobieranych z wlewków próbnych oddzielnie odlewanych wg PN-EN 1563:2011 (E)

Oznaczenie materiału		Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ min., MPa	Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ min., MPa	Wydłużenie A min., %
Symbol (gatunek)	Numer			
EN-GJS-350-22-LT <sup>1)</sup>	5.3100	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT <sup>2)</sup>	5.3101	350	220	22
EN-GJS-350-22	5.3102	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT <sup>1)</sup>	5.3103	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT <sup>2)</sup>	5.3104	400	250	18
EN-GJS-400-18	5.3105	400	250	18
EN-GJS-400-15	5.3106	400	250	15
EN-GJS-450-10	5.3107	450	310	10
EN-GJS-500-7	5.3200	500	320	7
EN-GJS-600-3	5.3201	600	370	3
EN-GJS-700-2	5.3300	700	420	2
EN-GJS-800-2	5.3301	800	480	2
EN-GJS-900-2	5.3302	900	600	2

<sup>1)</sup> LT dla niskiej temperatury.  
<sup>2)</sup> RT dla temperatury pokojowej.

Tabela I.8.1b. Minimalne wartości udarności czterech gatunków żeliwa określonej na próbkach pobieranych z wlewków próbnych oddzielnie odlewanych wg PN-EN 1563

Oznaczenie materiału		Minimalne wartości udarności, J					
Symbol (gatunek)	Numer	w temperaturze pokojowej		w (-20±2)°C		w (-40±2)°C	
		A	B	A	B	A	B
EN-GJS-350-22-LT <sup>1)</sup>	5.3100	–	–	–	–	12	9
EN-GJS-350-22-RT <sup>2)</sup>	5.3101	17	14	–	–	–	–
EN-GJS-400-18-LT <sup>1)</sup>	5.3103	–	–	12	9	–	–
EN-GJS-400-18-RT <sup>2)</sup>	5.3104	14	11	–	–	–	–

A – wartość średnia z 3 prób.  
B – wartość pojedyncza.  
<sup>1)</sup> LT dla niskiej temperatury.  
<sup>2)</sup> RT dla temperatury pokojowej.

Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym) ujęto w 2012 roku w krajowej normie PN-EN 16079, pt. Odlewnictwo – Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym), która wyróżnia 5 gatunków tego rodzaju żeliwa oznaczone

## I.9. Żeliwo ADI i jego odmiany

*Edward Guzik*

Możliwość nadawania żeliwu większej wytrzymałości oraz kilkakrotnie większego wydłużenia wyłącznie dzięki zmianie postaci grafitu z płatkowej na kulkową (sferyczną) stanowiła przyczynę rezygnacji, przez długi okres po rozpoczęciu wytwarzania odlewów z tego tworzywa, z jego obróbki cieplnej. Było to niewątpliwie spowodowane głównie także względami ekonomicznymi. Obecnie jednak, w związku z poszukiwaniami sposobów dalszego zwiększania wytrzymałości i plastyczności odlewów żeliwnych, a także nadawania im specjalnych właściwości, niemożliwych do osiągnięcia przy stosowaniu innych odlewniczych stopów żelaza, obróbka cieplna żeliwa staje się istotnym czynnikiem rozwoju w zakresie wytwarzania odlewów żeliwnych. Tylko bowiem przy kulkowej postaci grafitu można w maksymalnym stopniu wykorzystać właściwości osnowy; oznacza to, że poprawa jakości osnowy przyczynia się wówczas w istotnym stopniu do poprawy jakości odlewów żeliwnych, aczkolwiek obecnie poddaje się także obróbce cieplnej inne rodzaje żeliwa szarego z wydzieleniami grafitu płatkowego i wermikularnego.

Takie zabiegi obróbki cieplnej, jak normalizowanie, hartowanie i ulepszanie cieplne służą zwiększeniu wytrzymałości i odporności na zużycie. Efektem pierwszego jest uzyskanie osnowy złożonej z perlitu o małej odległości międzyplątkowej (o dużej dyspersji perlitu). Stosuje się je głównie przy wytwarzaniu wyższych gatunków niestopowego żeliwa sferoidalnego. Stosując np. zabiegi normalizowania i ulepszania cieplnego żeliwa sferoidalnego, do którego wprowadzono (pojedynczo lub wspólnie w ilościowej kombinacji) niewielkie ilości takich pierwiastków jak nikiel, miedź, czy cyna, uzyskuje się możliwość wyraźnej poprawy właściwości wytrzymałościowych, w stosunku do wartości odpowiadających żeliwu niestopowemu nieobrobionemu cieplnie.

Efektom hartowania jest martenzytyczna osnowa odlewów, nadająca odlewom dużą odporność na ścieranie. Gdy warunki odbioru odlewów z żeliwa sferoidalnego przewidują – przy danej wytrzymałości – większe od standardowych wartości umownej granicy plastyczności  $R_{p0,2}$  i wydłużenia  $A_5$ , poddaje się je ulepszaniu cieplnemu. W ten sposób realizuje się np. wymagania stawiane żeliwu sferoidalnemu gatunku EN-GJS-800-2 (wg normy PN-EN 1563).

Szczególnym rodzajem żeliwa z grafitem kulkowym jest żeliwo sferoidalne poddawane hartowaniu z przemianą izotermiczną, w literaturze zagranicznej i krajowej występujące zazwyczaj pod nazwą *Austempered Ductile Iron* (ADI). Temu rodzajowi żeliwa sferoidalnego poświęca się coraz więcej uwagi w prasie technicznej i w praktyce odlewniczej, dzięki możliwości uzyskania w ten sposób tworzywa o wyjątkowo korzystnych właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych. Żeliwo takie, o osnowie metalowej składającej się zwykle z rozgałęzionych płytek ferrytu i wysokowęglowego austenitu, zwanej ausferrytem (bez wydzielen martenzytu bądź węgla  $\epsilon$ - $Fe_{2,2}C$ ) [1, 2], jest przedmiotem licznych publikacji. Poświęca się mu specjalne konferencje w obsadzie międzynarodowej, a także konferencje krajowe np.: „Żeliwo ADI – oferta odlewnictwa dla konstruktorów i użytkowników odlewów” (2000), „Żeliwo sferoidalne XXI wieku” (2003), „Rozwój technologii żeliwa ADI w Polsce” (2009), organizowanych w *Instytucie Odlewnictwa* – Kraków. W publikacjach oraz na konferencjach przedstawiano wyniki badań laboratoryjnych, opisywano technologię otrzymywania odlewów z żeliwa ADI i innych jego odmian, od strony metalurgicznej i obróbki cieplnej, wyliczano właściwości i podawano możliwości zastosowania odlewów z ADI, szczególnie jako substytutów innych tworzyw konstrukcyjnych.

Warto zaznaczyć, że żeliwo ADI otrzymane w wyniku hartowania z przemianą izotermiczną charakteryzuje się około dwukrotnie większą wytrzymałością niż standardowe żeliwo sferoidalne, wykazuje przy tym lepsze od tego ostatniego właściwości plastyczne. Jego wytrzymałość jest porównywalna z wytrzymałością stali przerobionej plastycznie i obrobionej cieplnie, wykazuje wyjątkową odporność na zużycie i wytrzymałość zmęczeniową, a także zdolność do utwardzania się przez zgniot. Jest materiałem uniwersalnym, nieporównywalnie korzystniejszym (jak zresztą w ogóle żeliwo sferoidalne) pod względem przewodzenia ciepła i tłumienia drgań, a w tych dwóch ostatnich przypadkach bardzo korzystnie prezentują się dwa inne rodzaje wysokojakościowego żeliwa poddane zabiegowi hartowania z przemianą izotermiczną; żeliwo AGI (*Austempered Gray Iron*) z wydzieleniami grafitu płatkowego i AVCI (*Austempered Vermicular Cast Iron*) z wydzieleniami grafitu wermikularnego.

### I.9.1. Technologia wytwarzania żeliwa ADI i jego odmiany

W literaturze fachowej prezentuje się w ostatnim okresie wyniki wielu badań poświęconych żeliwu z grafitem kulkowym, wermikularnym i płatkowym, poddanych zabiegowi hartowania z przemianą izotermiczną, oznaczone jako żeliwo typu [3, 4]:

## I.10. Żeliwo ciągliwe

*Ryszard Kielczyk*

### I.10.1. Rys historyczny

Żeliwo ciągliwe jest jednym z pierwszych żeliw wysokojakościowych, które odmieniły sposób myślenia o odlewach żeliwnych i ich zastosowaniu.

Już w XVIII wieku opracowano podstawy teoretyczne i praktyczne wytwarzania żeliwa ciągliwego. Technologia wytwarzania żeliwa ciągliwego obejmuje proces wytapiania materiału wyjściowego, jakim jest żeliwo białe a następnie obróbkę cieplną tego żeliwa dla nadania mu wymaganej struktury wewnętrznej oraz właściwości wytrzymałościowych. W zależności od zastosowanej atmosfery w komorze pieca żarzalniczego i sposobu wyżarzania rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje żeliwa ciągliwego. Pierwszym z nich jest białe żeliwo ciągliwe, zwane w dawnych latach „żeliwem europejskim” ze względu na pochodzenie twórców tej technologii – Anglików, lub też „żeliwem ciągliwym o białym rdzeniu”, które uzyskuje się przez wyżarzanie żeliwa białego w atmosferze utleniającej. Drugim gatunkiem żeliwa ciągliwego jest czarne żeliwo ciągliwe, które ze względu na swoje pochodzenie ze Stanów Zjednoczonych, gdzie po raz pierwszy w 1826 roku wyprodukowano ten gatunek tworzywa, określano mianem „żeliwo amerykańskie” lub też „żeliwem ciągliwym o czarnym rdzeniu”, wytwarzanym drogą obróbki cieplnej żeliwa białego w atmosferze obojętnej [35]. W Polsce produkcję na szeroką skalę podjęto dopiero w końcu XIX i na początku XX wieku. W Odlewni w Drawskim Młynie w 1934 roku uruchomiono również produkcję odlewów z żeliwa ciągliwego czarnego. W najlepszych latach 1976–1979 produkowano w Polsce rocznie około 70 tys. ton odlewów z żeliwa ciągliwego.

### I.10.2. Teoretyczne podstawy wytwarzania żeliwa ciągliwego

Podstawą rozważań jest analiza zachowań żeliwa podczas krzepnięcia i krystalizacji, prowadzona głównie w oparciu o stabilny układ równowagi Fe-C bądź układ metastabilny Fe-Fe<sub>3</sub>C [16].

W produkcji żeliwa ciągliwego wykorzystuje się możliwości wykonania odlewów z żeliwa wyjściowego zwanego żeliwem białym. Stop ten znajduje się w stanie równowagi nietrwałej i poza wysoką twardością i odpornością na ścieranie nie wykazuje innych korzystnych cech decydujących o jego wykorzystaniu. Dopiero w procesie obróbki cieplnej z twardego i kruchego żeliwa białego uzyskuje się materiał o wysokich właściwościach (w tym wytrzymałość, wydłużenie, ale też ciągliwość i obrabialność). Decydujący wpływ na to, czy żeliwo krzepnie jako żeliwo szare czy jako białe ma: skład chemiczny, temperatura przegrzania, czas przetrzymania żeliwa w piecu, w wysokiej temperaturze, grubość ścianek odlewu, szybkość chłodzenia w formie, temperatura odlewu po wybicciu z formy [1]. Z powyższych względów należałoby oczekiwać, że żeliwo o niskiej zawartości węgla i krzemu będzie najkorzystniejszym stopem wyjściowym do produkcji żeliwa ciągliwego. Stop taki nie będzie miał jednak odpowiednich właściwości odlewniczych (lejność) jak i niemożliwe będzie uzyskanie żeliwa ciągliwego podczas obróbki cieplnej (proces byłby wówczas bardzo długi). Przyjęto więc zasadę uwzględniającą zachowanie żeliwa podczas krzepnięcia i grafityzacji, mówiącą o tym, że skład chemiczny jest bliski (różny dla różnych grubości ścianek) uzyskania żeliwa szarego, ale krzepnącego w układzie Fe-Fe<sub>3</sub>C (cementytu), a więc żeliwa białego. W trakcie wieloletnich doświadczeń zaczęto stosować różne dodatki np. bizmut, bor (Bi, B), które stosowane w odpowiednich ilościach stabilizują cementyt podczas krzepnięcia, a nie utrudniają grafityzacji przy wyżarzaniu. Dzięki temu proces produkcji stał się stabilniejszy i mniej wrażliwy na wahania składu chemicznego jak i zmienności grubość ścianek.

Żeliwo białe, będąc tworzywem wyjściowym w procesie produkcji żeliwa ciągliwego jest stopem znajdującym się w stanie metastabilnym. Stan równowagi trwałej uzyskuje się podczas obróbki cieplnej, prowadzącej do wypalenia węgla znajdującego się przy powierzchni, a następnie przemieszczającego się w wyniku dyfuzji z wewnątrz na zewnątrz odlewu, co ma miejsce w żeliwie ciągliwym białym, bądź też do jego wydzielania się w osnowie stopu w postaci węgla żarzenia w żeliwie ciągliwym czarnym. Podczas obróbki cieplnej odlewów z żeliwa ciągliwego czarnego można pozostawić część węgla związanego w eutektoidzie, co pozwoli na uzyskanie perlitycznej struktury osnowy. Uzyskuje się to poprzez skrócenie czasu drugiego okresu cyklu żarzenia. Strukturę perlityczną osnowy można też uzyskać doprowadzając proces żarzenia na żeliwo ciągliwe czarne ferrytyczne do końca, a następnie nagrzewając ponownie wsad do temperatury przemiany eutoktoidalnej i wytrzymaując go w niej kilka godzin (praktycznie nagrzewa się wsad do temperatury około 800°C), należy go po wyjęciu z pieca intensywnie chłodzić.

## I.11. Żeliwo z eutektyką węglkową oraz o specjalnych właściwościach użytkowych

*Dariusz Kopyciński*

### I.11.1. Wstęp

W niniejszym rozdziale omówiono żeliwo białe odporne na ścieranie oraz na działanie wysokiej bądź niskiej temperatury i żeliwo białe kwasoodporne. Przyjęto, że w zależności od wielkości dodatku stopowego, żeliwo białe można podzielić na następujące grupy [1, 2]:

- 1) niestopowe – zawiera tylko podstawowe pierwiastki: C, Si, Mn, P i S, bez innych dodatków stopowych,
- 2) niskostopowe – zawiera poniżej 2 % wag. dodatków stopowych,
- 3) średnio- i wysokostopowe – które zawiera powyżej 2 % dodatków stopowych.

Powyższa klasyfikacja obejmuje gatunki żeliwa, w strukturze których występuje znaczny udział węglików. Żeliwo to jest szeroko stosowane w urządzeniach dla przemysłu wydobywczego i budowlanego, w urządzeniach mielących i urządzeniach przemysłu wytwórczego, w których wymagana jest duża odporność na ścieranie na działanie minerałów i innych materiałów stałych. Drugim obszarem zastosowania tego żeliwa są urządzenia pracujące dla przemysłu chemicznego, metalurgicznego i szeroko rozumianej energetyki, od których wymaga się bezawaryjności w trudnych warunkach wysokiej lub niskiej temperatury oraz odporności na korozję, w tym działanie kwasów.

### I.11.2. System oznaczania żeliwa z eutektyką węglkową

Żeliwo białe, w tym z wydzieleniami eutektyki cementytowej (ledeburytu) jest sklasyfikowane w normie PN-EN1560 jako EN-GJN-X, gdzie N – oznacza strukturę nie zawierającą grafitu (utwardzoną), a litera X – oznacza pierwiastki, np. gatunek EN-GJN-X300CrNiSi9-5-2. W tym przypadku po literze X podaje się symbole chemiczne istotnych pierwiastków stopowych w kolejności malejącej, co do zawartości tych pierwiastków. Zawartości podanych pierwiastków oddziela się od siebie łącznikiem i zapisuje w procentach zaokrąglonych do liczby całkowitej. Zawartość węgla (jeżeli jest wymagana) wyraża się liczbą równą 100-krotnej procentowej zawartości węgla i zapisuje po literze X. W przypadku, gdy żeliwo białe klasyfikowane jest na podstawie twardości, literę X zastępuje się literami HV (dla twardości Vickersa) oraz trzema cyframi odpowiadającymi wartościom danej twardości, np. EN-GJN-HV350.

### I.11.3. Ogólne zasady krystalizacji żeliwa białego

Rysunek I.11.1a [3] wskazuje, że istnieje pewna krytyczna temperatura krystalizacji  $T_{kr}$  poniżej której prędkość wzrostu eutektyki cementytowej  $\gamma(\text{Fe}) + \text{Fe}_3\text{C}$  jest większa od prędkości wzrostu eutektyki grafitowej  $\gamma(\text{Fe}) + \text{C}_{\text{grafit}}$ . Krytyczna temperatura krystalizacji  $T_{kr}$  znajduje się poniżej temperatury krystalizacji eutektyki cementytowej zgodnie z układem równowagi fazowej stopów Fe-C, co pokazano na rys. I.11.1b.

Widoczne na rys. I.11.1a zwiększenie prędkości eutektyki cementytowej  $\gamma(\text{Fe}) + \text{Fe}_3\text{C}$  w porównaniu do analizowanej prędkości wzrostu eutektyki grafitowej  $\gamma(\text{Fe}) + \text{C}_{\text{grafit}}$  w zakresie poniżej krytycznej temperatury krystalizacji  $T_{kr}$  [3] prowadzi do otrzymania struktury żeliwa białego, którą to pokazano na rys. I.11.2. Innymi słowy, poniżej krytycznej temperatury krystalizacji  $T_{kr}$  wzrasta eutektyka grafitowa  $\gamma(\text{Fe}) + \text{C}_{\text{grafit}}$  oraz eutektyka cementytowa  $\gamma(\text{Fe}) + \text{Fe}_3\text{C}$ , jednak w miarę obniżania temperatury krystalizacji eutektyki, dominująca pod względem objętości staje się eutektyka cementowa (ledeburyt) charakterystyczna dla struktury żeliwa białego.

Można przyjąć, że żeliwo białe krystalizuje według układu metastabilnego i w jego strukturze występuje węgiel wyłącznie w stanie związanym – w postaci cementytu  $\text{Fe}_3\text{C}$ . W obrębie stałego składu chemicznego struktura żeliwa białego jest zdeterminowana wrażliwością żeliwa na szybkość chłodzenia odlewu wyrażoną między innymi grubością ścianki odlewu (modułem odlewu). Na rysunku I.11.2a i I.11.2b przedstawiono wpływ grubości ścianki odlewu na mikrostrukturę żeliwa białego.

W zakresie temperatury pomiędzy równowagową temperaturą przemiany eutektycznej według układu stabilnego  $T_{st}$  a równowagową temperaturą przemiany eutektycznej według układu metastabilnego  $T_{mst}$  (patrz oznaczenia na rys. I.11.1), otrzymuje się strukturę żeliwa szarego. Natomiast strukturę żeliwa połowicznego z przeważającą objętością

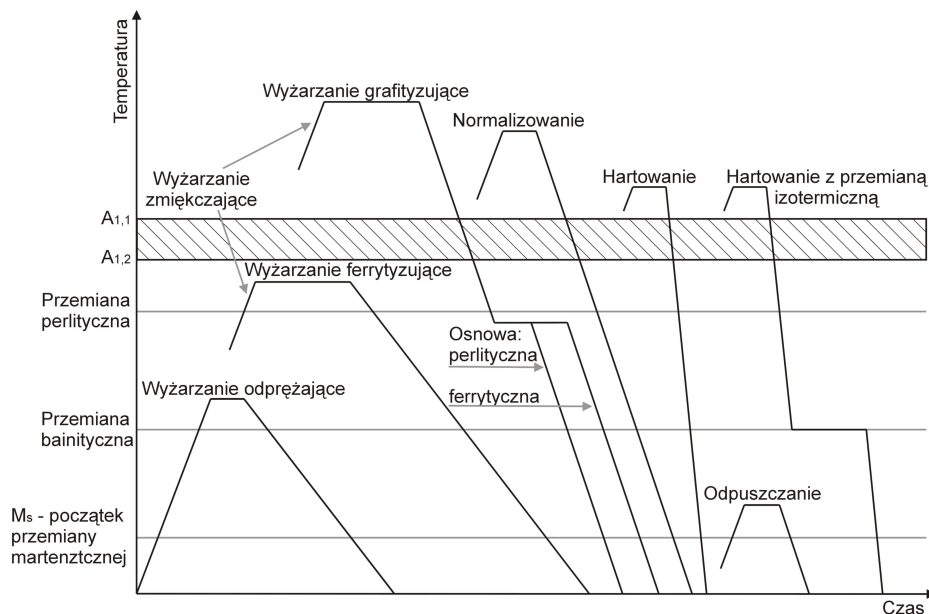
## I.12. Obróbka cieplna odlewów żeliwnych

*Jan Szajnar, Tomasz Wróbel*

Technologia obróbki cieplnej stanowi skuteczny sposób poprawy właściwości użytkowych odlewów zarówno z żeliwa niestopowego, jak i stopowego. Ponadto szczególną rolę, obróbka cieplna spełnia w procesie produkcyjnym odlewów z żeliwa sferoidalnego, w tym także żeliwa ADI. Wiąże się to ze znacznie silniejszym w porównaniu do żeliwa szarego z grafitem płatkowym, oddziaływaniem osnowy na właściwości mechaniczne odlewów.

Na rys. I.12.1 przedstawiono schematycznie rodzaje zabiegów obróbki cieplnej przeznaczonych dla odlewów żeliwnych. W ogólności należą do nich [1÷7]:

- 1) wyżarzanie odprężające stosowane w celu ograniczenia lub usunięcia naprężeń odlewniczych bez zmiany mikrostruktury i właściwości mechanicznych,
- 2) wyżarzanie zmiękczające ferrytyzujące lub grafityzujące, stosowane w celu zmniejszenia twardości i zwiększenia skrawalności oraz poprawy właściwości plastycznych,
- 3) wyżarzanie normalizujące stosowane w celu ujednorodnienia mikrostruktury i poprawy właściwości wytrzymałościowych,
- 4) hartowanie i ulepszanie cieplne stosowane w celu poprawy odporności na zużycie ścierne oraz zwiększenia właściwości mechanicznych,
- 5) hartowanie z przemianą izotermiczną stosowane głównie w technologii żeliwa sferoidalnego ADI oraz żeliwa szarego z grafitem płatkowym AGI i z grafitem wermikularnym AVCI,
- 6) hartowanie powierzchniowe stosowane w celu zwiększenia twardości i odporności na zużycie ścierne warstwy wierzchniej odlewu.



Rys. I.12.1. Schematy zabiegów obróbki cieplnej żeliwa [1, 2]

### I.12.1. Wyżarzanie odprężające

Obecność w odlewie naprężeń odlewniczych, nazywanych także naprężeniami własnymi wynika bezpośrednio z jego procesu technologicznego, a szczególnie ze zjawiska nierównomiernego i niejednoczesnego przebiegu procesu stygnięcia poszczególnych jego części. Wartość naprężeń odlewniczych niejednokrotnie przekracza wartość granicy wytrzymałości w wyniku czego odlewy pękają lub odkształcają się po wybiciu z formy lub w czasie obróbki mechanicznej, gdy określone przekroje odlewu zostaną w dostatecznym stopniu osłabione [1, 2 i 4].

Ponadto odlewy wykazujące znaczne naprężenia własne mogą łatwo pęknąć lub odkształcać się podczas eksploatacji, gdyż wówczas z naprężeniami odlewniczymi sumują się naprężenia pochodzące od obciążeń zewnętrznych [1].

## II. Staliwo<sup>1</sup>

### II.1. Definicja staliwa

*Jan Głownia*

Zgodnie z wykresem Fe-C, staliwo to stop żelaza z węglem (teoretycznie do zawartości 2 % C), zalewany w większości do form ceramicznych (z mas kwarcytowych, ale także korundowych), metalowych (odlewanie odśrodkowe rur) i nie podlegający dalszej przeróbce plastycznej. Oznacza to, że kształt części maszyny odtwarzany jest przez odlewanie do form o zróżnicowanej grubości ścianek, w której zachodzi proces krzepnięcia i stygnięcia stali. Ponieważ w czasie krzepnięcia zachodzą procesy segregacji wszystkich pierwiastków, stal przeznaczona na odlewy nie może być nieuspokojona czy półuspokojona (np. jak do walcowania), ale musi być bardzo dobrze odtleniona.

Dalsze etapy technologiczne, a zwłaszcza obróbka cieplna staliwa oparta jest na tych samych procesach co stal (wyżarzanie, hartowanie czy odpuszczanie). Różnice polegają na większej skłonności staliwa do pęknięć, ponieważ odlew ma zazwyczaj ścianki o różnej grubości, a stal (kęsisko, slab) ma grubość równomierną.

Ze względu na różnice w stężeniu węgla i pozostałych pierwiastków (najczęściej Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V) na grubości ścianki odlewu, uzyskuje się zróżnicowane właściwości użytkowe odlewów, co uwidacznia się w szerokim zakresie ich zastosowania.

### II.2. Różnice pomiędzy stalą a staliwem

Określenie staliwo można odnieść jedynie do stali uspokojonej. Zazwyczaj porównania takiego dokonuje się w stosunku do podobnych grubości ścianek lub stopnia przeróbki plastycznej [96, 102].

W stalach, ze względu na rozdrobnienie i ukierunkowanie ziaren oraz wtrąceń niemetalicznych wzdłuż kierunku walcowania, różnice właściwości mechanicznych w stosunku do staliwa odnoszą się tylko do parametrów plastycznych (wydłużenia, przewężenia oraz udarności). Parametry wytrzymałościowe (wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności) są praktycznie niezależne od stopnia przeróbki plastycznej i zbliżone do staliwa. Właściwości plastyczne stali są izotropowe. Ogólnie przyjmuje się, że wydłużenie wzdłuż kierunku walcowania jest trzykrotnie większe od wydłużenia w kierunku prostopadłym do walcowania. Podobnie jest z przewężeniem.

W przeciwieństwie do stali, właściwości mechaniczne staliwa są anizotropowe (podobne we wszystkich kierunkach wyciętych próbek – wzdłuż grubości ścianek czy prostopadle do danej powierzchni odlewu). Różnice pomiędzy stalą a staliwem w poszczególnych parametrach mechanicznych są następujące, rys. II.2.1a,b:

- 1) granica plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie są bardzo podobne i praktycznie nie zależą od grubości ścianki [96, 102],
- 2) w stali walcowanej, wydłużenie wzdłuż kierunku przeróbki plastycznej jest zawsze około 20 % większe od tej wielkości dla staliwa, niezależnie od grubości ścianek odlewu. Podobne różnice występują w przypadku przewężenia i udarności,
- 3) w przypadku porównywania próbek wyciętych prostopadle do kierunku walcowania, staliwo charakteryzuje się większymi wartościami wydłużenia, przewężenia i udarności niż stal. Wartościowo jest to około 20 % na korzyść staliwa, przy czym im większa grubość ścianek tym różnice te są większe.

Na uwagę zasługuje fakt, że wytrzymałość na zmęczenie stali zależy również od sposobu wycięcia próbek. W przypadku próbek wyciętych wzdłuż kierunku walcowania, wytrzymałość na zmęczenie w stosunku do wytrzymałości na rozciąganie jest o 50 % większa natomiast w przypadku próbek wyciętych prostopadle do kierunku walcowania tylko o 35 %. Ma to istotne znaczenie w przypadku wykonywania elementów maszyn z materiału przerabianego plastycznie.

Korzyści wynikające z procesu odlewania stali:

- 1) konstruktor projektujący dany element maszyny czy urządzenia, ma w przypadku staliwa bardziej swobodny wybór odnośnie kształtu tegoż elementu,

---

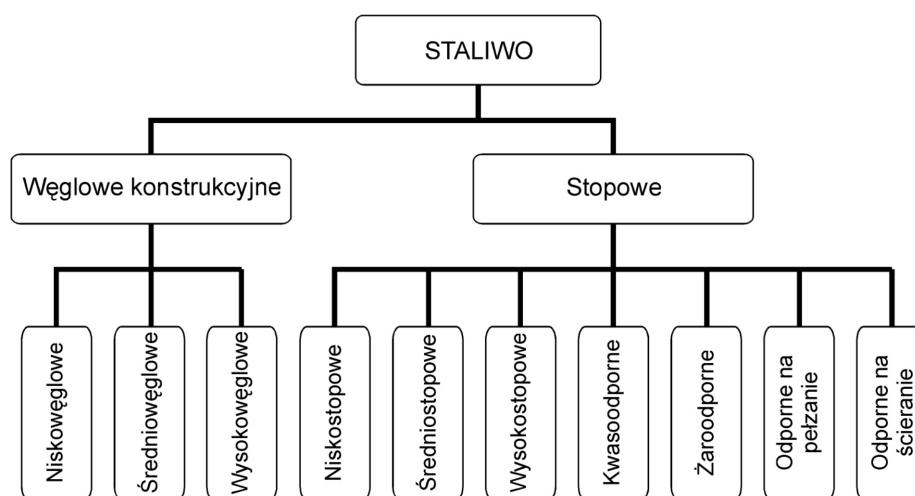
<sup>1</sup> Rozdział opracowany pod redakcją Jana Głowni.

## II.3. Podział staliwa

Klasyfikacji staliwa można dokonać na podstawie:

- 1) składu chemicznego,
- 2) właściwości wytrzymałościowych ( $R_e$ ,  $R_m$ ) – z przeznaczeniem na konstrukcje i urządzenia,
- 3) właściwości plastycznych ( $A_5$ ,  $Z$ ,  $KC$  – jako kryterium do pracy w temperaturach ujemnych czy odporności na kruche pękanie),
- 4) właściwości chemicznych (odporności na korozję np. w stężonym kwasie siarkowym, solnym czy wodach kopalnianych czy geotermalnych),
- 5) zachowania w wysokich temperaturach (odporności na środowisko, środowisko + naprężenie i naprężenie + czas).

Ze względów praktycznych, najbardziej dogodny jest podział staliwa według zastosowania, przedstawiony na rys. II.3.1.



Rys. II.3.1. Schemat podziału staliwa według zastosowania (opracowanie własne)

Taka klasyfikacja umożliwi dobór różnych gatunków staliwa przeznaczonego do pracy np. w niskich temperaturach (staliwo niskowęglowe, węglowe czy wysokostopowe). Podobny wgląd można mieć w gatunki staliwa pracujące w innych warunkach np. działanie wysokiej temperatury czy środowiska korozyjnego.

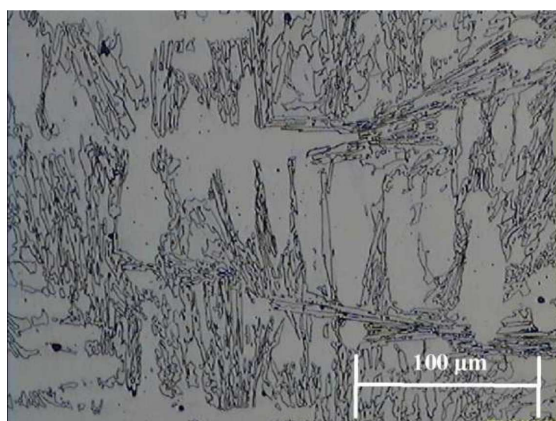
### II.3.1. Staliwo węglowe

Skład chemiczny i parametry wymaganych właściwości mechanicznych przedstawiono w tabeli II.3.1.

Tabela II.3.1. Skład chemiczny gatunków staliwa węglowego według PN-ISO 3755:1994 i jego odpowiedniki według ASTM

Gatunek staliwa	ASTM	Skład chemiczny, % wag.				
		C	Mn	Si	P	S
200-400	~N1 (ASTM A-27)	–	–	–	0,035	0,035
200-400W	~N1 (ASTM A-27)	0,25	1,00	0,60	0,035	0,035
230-450	~WCA (ASTM A-216)	–	–	–	0,035	0,035
230-450W	~WCA (ASTM A-216)	0,25	1,20	0,60	0,035	0,035
270-480	–	–	–	–	0,035	0,035
270-480W	–	0,25	1,20	0,60	0,035	0,035
340-550	–	–	–	–	0,035	0,035
340-550W	–	0,25	1,50	0,60	0,035	0,035

Maksymalna zawartość pozostałych pierwiastków wynosi Ni, Cu – max. 0,4 % wag., Cr – max. 0,35 % wag., Mo – max. 0,15 % wag. oraz V – max. 0,05 % wag. Ich suma nie powinna przekraczać 1 %, ponieważ stosowanie do wytopów staliwa węglowego złomu stali(wa) niskostopowej(ego) wpływa na możliwość spawania odlewów. Stąd też



Rys. II.3.31. Mikrostruktura staliwa GX260Cr27, stan lany, pow. 800x

Tabela II.3.25. Skład chemiczny wybranych gatunków staliwa odpornego na ścieranie

Znak gatunku	Skład chemiczny, % wag.				Twardość HRC
	C	Cr	Ni	Mo	
GX300CrMo15 3	2,3÷3,6	14÷17	do 0,7	1,0÷3,0	62
GX300CrMoNi15 2 1	2,3÷3,6	14÷17	0,8÷1,2	1,8÷2,2	62
GX260CrMoNi20 2 1	2,3÷2,9	18÷22	0,8÷1,2	1,4÷2,0	62
GX260Cr27	2,3÷2,9	24÷28	do 1,2	do 1,0	62
GX300CrMo27 1	3,0÷3,5	23÷28	do 1,2	1,0÷2,0	62

Odporność na ścieranie zależy od stosunku C/Cr i obróbki cieplnej. Przy 24÷28 % Cr w odlewach o grubości ścianek 50 mm stosunek Cr/C  $\approx$  9 prowadzi do struktury austenitycznej (bez perlitu). Obecność molibdenu zwiększa hartowność staliwa (odlewy grubościennne), a jednocześnie stabilizuje austenit w najmniejszym stopniu (obok Ni, Mn i Cu) dla poprawy plastyczności, kosztem zmniejszenia twardości i odporności na ścieranie.

## II.4. Materiały wsadowe i pomocnicze do wytapiania stali

*Władysław Paul*

Do materiałów wsadowych zaliczamy materiały metaliczne – złom stalowy i surówki<sup>2</sup>, materiały do świeżenia kąpieli, żelazostopy, materiały nawęglające, materiały żuźlotwórcze oraz odtleniacze i modyfikatory. Wszystkie materiały wsadowe mają istotny wpływ na efektywność procesu wytapiania oraz na jakość otrzymanego staliwa.

### II.4.1. Materiały metaliczne

W procesach wytapiania staliwa jako wsad metalowy stosuje się złom stalowy, węglowy i stopowy, sklasyfikowany normą PN/H-15000. Norma ta klasyfikuje złomy według składu chemicznego, kawałkowości i stopnia skorodowania.

Złom stalowy obcego pochodzenia dostarczany jest do odlewni w stanie przygotowanym do użycia. Przygotowanie złomu polega na jego posegregowaniu na gatunki, przygotowaniu odpowiedniej kawałkowości, pocięciu lub sprasowaniu celem uzyskania odpowiedniego ciężaru nasypowego. Wymagania dotyczące wsadu metalowego są cechą indywidualną każdej odlewni i są uwarunkowane rodzajem zastosowanego procesu. Powinny być tak dobrane, aby pozwalały najbardziej ekonomicznie wykorzystać używany proces. Zbyt grube kawałki wsadu mogą uszkadzać wymurówkę pieców, natomiast wsad o niskim ciężarze nasypowym powoduje konieczność doładowania wsadu, co z kolei zwiększa zużycie energii i przedłuża wytopy. Kawałki wsadu powinny być w szczególności pozbawione elementów zamkniętych (które grożą wybuchem), wilgoci, pokryć chroniących przed korozją (farb, lakierów, substancje te zawierają Pb, S, P). Wsad nie może być pokryty olejami i smarami oraz nie powinien być ocynkowany<sup>3</sup>. Stosowanie złomu skorodowanego i zanieczyszczonego może spowodować nawodorowanie kąpieli oraz, w konsekwencji, wzrost zawartości gazów w odlewie, co może doprowadzić do zabrakowania wytopu.

<sup>2</sup> Surówkę wprowadza się do stali lub używa jako materiału nawęglającego kąpiel. Jednak w procesie wytapiania stali konieczne jest stosowanie surówek o bardzo niskiej zawartości P i S. Warunek ten pozwala na wykorzystanie surówek o bardzo wysokiej cenie. Z tego powodu obecnie bardzo rzadko jest ona stosowana w procesach wytapiania stali.

<sup>3</sup> Pary cynku wpływają bardzo niekorzystnie na zużycie wymurówki pieca, zwłaszcza jego sklepienie.



w następujących granicach: O<sub>2</sub> max. 2 ppm, N<sub>2</sub> max. 5 ppm, CO<sub>2</sub> max. 0,5 ppm, CH<sub>4</sub> max. 0,5 ppm, oraz max. 2 ppm H<sub>2</sub>O. Ilość argonu, jaką należy przepuścić przez metal, aby argonowanie przyniosło oczekiwane rezultaty nie powinna być niższa niż 75 dm<sup>3</sup>/tonę stali. Ponadto do argonowania należy odpowiednio przegrzać metal, gdyż prowadzić je należy przez około 6+8 minut, natomiast spadek temperatury w czasie argonowania waha się w przedziale 4+5 K na minutę (dla kadzi o pojemności 8 Mg). Argonowanie przynosi wymierne rezultaty w zakresie: ujednorodnienia składu chemicznego i temperatury kąpieli metalowej, zmniejszenia zawartości gazów w stali (tlenu, częściowo azotu), zmniejszenie ilości i zmianę morfologii tlenkowych wtrąceń niemetalicznych, co skutkuje znaczną poprawą lejułości i właściwości plastycznych argonowanej stali. W przypadku argonowania stali pod żużłami syntetycznymi możliwe też jest odsiarczenie metalu.

Tabela II.4.7. Skład chemiczny materiałów żużlotwórczych i żużli syntetycznych [4, 76, 105]

Nazwa	Składniki, % wag.					Granulacja, mm	Wilgotność, % max.
Wapno palone	CaO + MgO min. 91	MgO max. 1,5	SO <sub>3</sub> max. 0,5	CO <sub>2</sub> max. 5	–	2 20	–
Wapno palone kawałkowe	CaO + MgO min. 94,1	–	–	CO <sub>2</sub> max. 1,33	–	5 30	–
Kamień wapienny	CaCO <sub>3</sub> min. 95	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> max. 0,05	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> max. 3	–	CaSO <sub>4</sub> max. 0,5	–	–
Floryt	CaF <sub>2</sub> min. 87	SiO <sub>2</sub> max. 6	–	–	–	20 60	–
Boksyt	–	SiO <sub>2</sub> min. 2,1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min. 37	–	–	–	–
Żużel syntetyczny 1	CaO min. 48	SiO <sub>2</sub> min. 4,5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min. 38,4	–	–	0 2	–
Żużel syntetyczny 2	CaO min. 33	SiO <sub>2</sub> min. 4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min. 53	–	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min. 0,6	0 10	1
Żużel syntetyczny 3	CaO min. 69	SiO <sub>2</sub> min. 7	MgO 0,5	–	Al <sub>met</sub> min. 6,5	0 10	1
Żużel syntetyczny 4	CaO min. 53	SiO <sub>2</sub> min. 8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min. 47	–	Al <sub>met</sub> min. 2	0 5	1

## II.5. Materiały ogniotrwałe w odlewni staliwa

*Maciej Brzeziński*

Materiały ogniotrwałe pozostające w kontakcie z ciekłym metalem (szczególnie wyłożenia ogniotrwałe pieców, kadzi) oraz stosowane w piecach grzewczych muszą się charakteryzować, w przypadku odlewni staliwa, szczególnie wysokimi właściwościami.

Poniżej przedstawiono charakterystykę takich materiałów dla wybranych urządzeń odlewni staliwa.

### Piece do wytapiania staliwa

Staliwo jest wytapiane w piecach przy zastosowaniu materiałów ogniotrwałych dobieranych w zależności od:

- 1) rodzaju topionego metalu (skład chemiczny staliwa),
- 2) typu i wielkości pieca,
- 3) temperatury pracy,
- 4) kalkulacji ekonomicznej (koszt materiałów ogniotrwałych/tonę wytopionego metalu).

### Piece indukcyjne tyglowe

Schematyczne rozmieszczenie materiałów ogniotrwałych oraz izolacyjnych w piecu indukcyjnym tyglowym przedstawia rys. II.5.1.

### Materiał roboczy (kwarcyt, materiał korundowo-spinelowy lub zasadowy)

Materiały ogniotrwałe na warstwę roboczą do wytapiania staliwa w piecach indukcyjnych tyglowych:

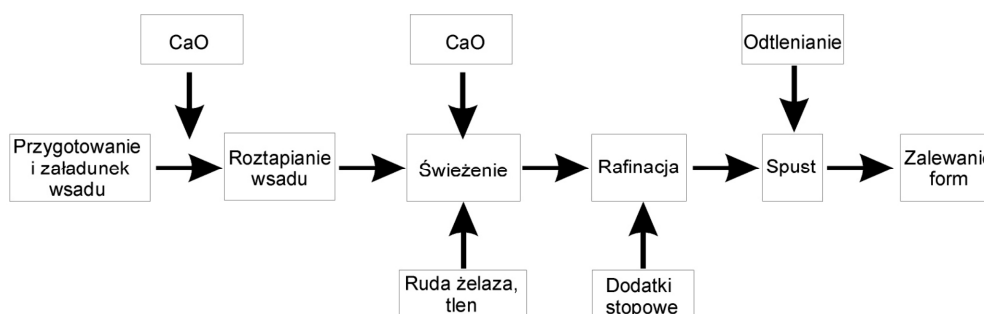
1. Materiały ogniotrwałe kwarcytowe (konwencjonalne lub ze specjalnymi dodatkami), Zastosowanie: staliwo węglowe, staliwo niskostopowe (Mn < 1,5 %, Cr < 2,5 %, Mo < 1,2 %), staliwo wysokochromowe oraz chromowo-niklowe (warunkowo). Materiały kwarcytowe z minimalną zawartością środka spiekającego są najtańszym materiałem, charakteryzującym się dobrymi właściwościami. W praktyce większość polskich odlewni staliwa stosuje ten typ wyłożenia. Zastosowanie ich jest ograniczone charakterystyką kwarcytu tzn. maksymalna temperatura zastosowania 1680°C oraz intensywnymi reakcjami kwarcytu z niektórymi pierwiastkami i ich tlenkami (np. mangan).

## II.6. Metody wytapiania stali na odlewy

*Sebastian Sobula*

### II.6.1. Piece do wytapiania stali na odlewy

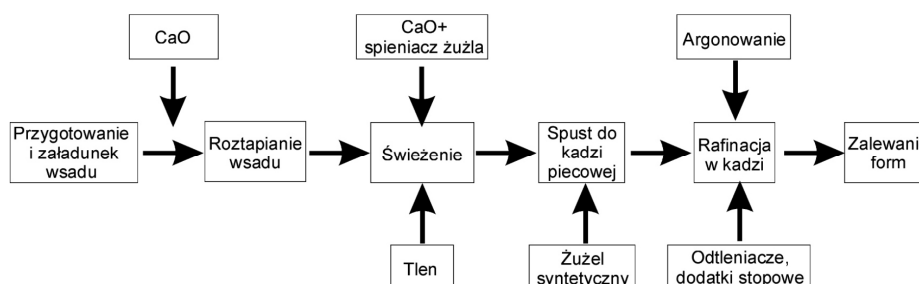
W krajowych odlewniach staliwa dominują piece: elektryczne łukowe (EAF) oraz indukcyjne (IF). W kilku odlewniach zainstalowane są piecokadzie (LF). Typowy proces produkcyjny staliwa w zasadowym elektrycznym piecu łukowym polega na przygotowaniu wsadu i załadunku do pieca, roztopieniu, świeżeniu, odtlenianiu wstępnym, redukcji, uzupełnianiu składu a następnie spuszczeniu stali do kadzi, w czasie którego przeprowadza się odtlenianie końcowe. Tak przygotowaną stal odlewa się do form piaskowych przy pomocy kadzi zatyczkowych. Tego typu proces jest stosowany powszechnie, ale często jest uzupełniany przez współczesne osiągnięcia w dziedzinie metalurgii stali, takie jak obróbka pozapiecowa. Schemat procesu wytapiania przedstawiono na rys. II.6.1. Każdy z pojedynczych okresów wytapiania obejmuje szereg procesów cząstkowych, decydujących o jakości stali a później staliwa.



Rys. II.6.1. Schemat procesu wytapiania stali w zasadowym elektrycznym piecu łukowym (opracowanie własne)

Tak na przykład, okres świeżenia obejmuje: odfosforowanie, usuwanie gazów (H, N) i utlenianie C, Si, Mn, Cr i innych pierwiastków, których powinowactwo chemiczne do tlenu jest większe od żelaza. W piecach elektrycznych łukowych o wyłożeniu kwaśnym, nie można prowadzić odfosforowania i odsiarczenia stali. Jednak w krajach o zaawansowanej technologii wykorzystuje się je, ponieważ złom z procesu zasadowego jest segregowany (a w nim S i P są poniżej 0,04 %). Zastosowanie procesu kwaśnego skraca wytop i wprowadza oszczędności ekonomiczne

Nowoczesne odlewnie europejskie i polskie stosują do wytapiania stali inną technologię, opartą o obróbkę pozapiecową. W tej metodzie etap odtleniania, rafinacji i uzupełniania składu chemicznego przejmuje urządzenie nazywane piecem kadziowym, lub piecokadzią (LF). Piec łukowy jest zatem używany tylko do roztopienia wsadu stałego i jego świeżenia, w celu odfosforowania. Schemat takiego procesu przedstawiono na rys. II.6.2.



Rys. II.6.2. Schemat procesu wytapiania z zastosowaniem piecokadzi (opracowanie własne)

Zastosowanie takiego sposobu wytapiania pozwala osiągnąć korzyści w postaci:

- 1) skrócenia czasu wytapiania – zwiększenia możliwości produkcyjnych stalowni i odlewni,
- 2) otrzymania stali o większej czystości (odgazowanie),
- 3) ścisłej kontroli temperatury i składu chemicznego stali,
- 4) zmniejszenia zgaru składników stopowych,
- 5) zwiększenia ciężaru jednostkowego produkowanych odlewów,

Dla uzyskania stali o zawartości około 0,005 % P (trudne do uzyskania w elektrycznych piecach łukowych), podczas spustu do kadzi wprowadza się żużel (40 % CaO + 45 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 15 % CaF<sub>2</sub>) i argonuje stal lancą od góry (lepsze efekty mieszania, większa powierzchnia reakcji metal-żużel). Następnie żużel ten jest ściągany i naprowadza się żużel syntetyczny i odtleniacz (Al). Te nowe warunki prowadzenia procesu ułatwiają odsiarczenie (końcowe zawartości siarki 0,005÷0,008 %).

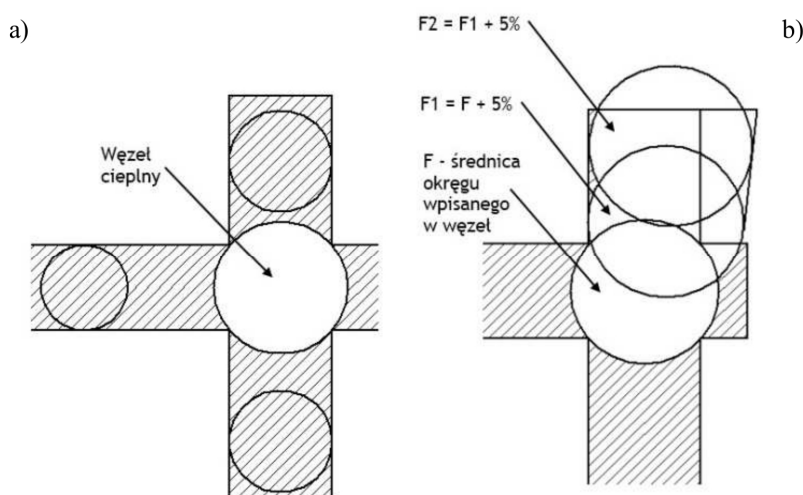
Procesy obróbki pozapiecowej stanowią obecnie istotę wytapiania stali, także stali na odlewy [41, 52, 54, 103]. Rozwój nowych technologii czy usprawnienie danej metody jest tak szybkie, że należy kontrolować na bieżąco postępy w tej dziedzinie.

## II.7. Zasilanie odlewów stalowych

*Piotr Naróg*

Uzyskanie wysokojakościowego odlewu stalowego wymaga zaprojektowania takiego układu zasilającego odlew, który zapewni jego krzepnięcie kierunkowe. Wynika to z faktu, że w trakcie stygnięcia i krzepnięcia staliwa następuje znaczna redukcja objętości metalu określana jako skurcz. Krzepnięcie odlewu zaczyna się w momencie kontaktu ciekłego metalu z zimną formą tworząc na zewnątrz pierwsze kryształy dendrytów w zetknięciu z ciekłą stalą. Ponieważ współczynnik skurczu ciekłego metalu jest większy niż metalu w stanie stałym, w czasie dalszego krzepnięcia odlewu powstaje nieciągłość materiału nazywana jamą skurczową. Wady odlewu wynikające ze skurczu objętościowego w większości przypadków usytuowane są w tych miejscach odlewu gdzie występują zgrubienia jego ścian np. w miejscach przenikania się lub łączenia ścian. Miejsca te określane są jako węzły cieplne. Uniknięcie skutków skurczu, wymaga zrekompensowania ubytku metalu. Realizowane jest to poprzez zapewnienie dodatkowej porcji ciekłego metalu dostępnej w czasie krzepnięcia. Zbiornik, który zaopatruje odlew w ciekły metal nazywany jest nadlewem. Najważniejszym zadaniem nadlewu jest, aby ciekły metal znajdujący się w jego wnętrzu zakrzepł później niż zasilany przez niego odlew.

Do wyznaczenia węzłów cieplnych stosuje się metodę kół wpisanych [91, 112, 118]. Metoda ta pozwala określić czy krzepnięcie odlewu będzie kierunkowe czy też powstanie odizolowany węzeł cieplny (rys. II.7.1a). Polega ona na wpisaniu w określony przekrój odlewu maksymalnie dużego koła. Im większe koło można wpisać w dany przekrój tym dłużej metal będzie krzepł w tym przekroju, co zmniejsza ryzyko powstania wady. Uniknięcie potencjalnej wady skurczowej wiąże się z zaprojektowaniem w miejscach węzłów cieplnych odpowiednich nadlewów. Jeżeli nie jest możliwe bezpośrednie zasilanie węzła cieplnego przez nadlew należy „wyprowadzić” węzeł przez zastosowanie odpowiedniego naddatku technologicznego zapewniając jego kierunkowe krzepnięcie. Do „wyprowadzania” węzłów cieplnych również używana jest metoda kół wpisanych. Sposób wyprowadzania węzłów cieplnych metodą kół wpisanych obrazuje rys. II.7.1b.

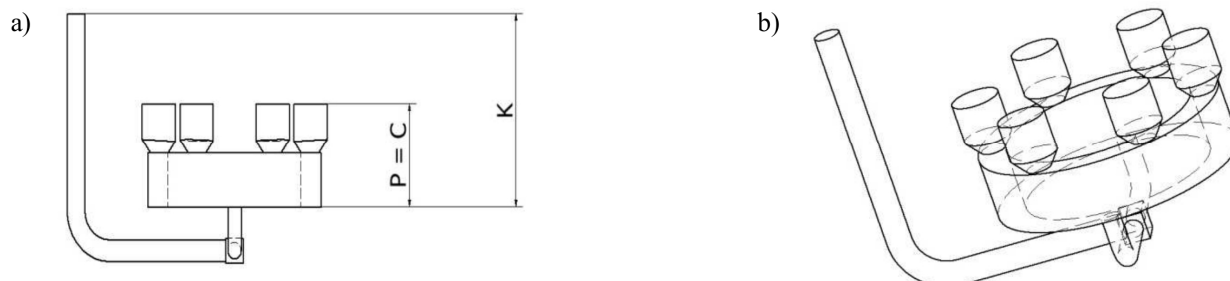


Rys. II.7.1. Węzeł cieplny określony metodą kół wpisanych (a), wyprowadzony węzeł cieplny metodą kół wpisanych (b)

Na system zasilający odlewu oprócz nadlewów składają się również ochładzalniki i układ wlewowy. Ochładzalniki służą do przyspieszania krzepnięcia tych węzłów cieplnych, których zasilanie przez nadlew jest utrudnione. Są to wkładki z materiału o dużej przewodności cieplnej, umieszczane w formie, a pozwalające na lokalne kierowanie krzepnięciem odlewu w miejscach trudnych do zasilania nadlewem.

$$H_{sr.} = K - \frac{P^2}{C} \quad (\text{II.7.12})$$

- $K$  – początkowe maksymalne ciśnienie ferrostatyczne, cm,  
 $P$  – wysokość odlewu nad poziomem wlewów doprowadzających, cm,  
 $C$  – całkowita wysokość wnęki formy, cm.



Rys. II.7.6. Schemat ilustrujący doprowadzenie metalu do wnęki formy (ze zbiorów autora)

Wymiary pozostałych elementów układu wlewowego oblicza się ze stosunku przekroju wlewów doprowadzających ( $F_d$ ) do przekroju belki wlewowej ( $F_w$ ) do przekroju wlewu głównego ( $F_g$ ):

$$F_d : F_w : F_g = 2 : 2 : 1 \quad (\text{II.7.13})$$

Kształt i wymiary poszczególnych elementów układu wlewowego dobiera się z tablic. W praktyce, do obliczania układów wlewowych używa się najczęściej nomogramów lub korzysta z technik komputerowych.

Należy pamiętać, że w przypadku kadzi zatoryczkowych wielkość wlewu głównego zależy od wielkości wylewu z kadzi.

W przypadku układów wlewowych budowanych z gotowych kształtek dostępne są typoszeregi wymiarów zapewniające dotrzymanie powyższych zależności.

## II.8. Właściwości odlewnicze staliwa

*Grzegorz Tęcza*

Do odlewniczych właściwości staliwa należą:

- 1) lejność,
- 2) skurcz,
- 3) skłonność do tworzenia jam skurczowych,
- 4) skłonność do pęknięć na gorąco.

### Lejność staliwa

Lejność definiowana jest jako zdolność ciekłego metalu do:

- 1) płynięcia przez kanały układu wlewowego i wnęki formy,
- 2) wypełnienia wnęki formy oraz do dokładnego odtwarzania kształtu wnęki formy odlewniczej.

Optymalna zdolność do płynięcia często nie pokrywa się z optymalną zdolnością do odtwarzania kształtu wnęki formy.

W literaturze wyróżnia się: lejność zerową, rzeczywistą i praktyczną [55, 73].

### Lejność zerowa

Lejność zerowa występuje w zakresie temperatury pomiędzy temperaturą likwidus a temperaturą solidus. Jest to stan metalu, w którym na skutek wydzielenia się pierwotnych kryształów dendrytów, metal przestaje płynąć. Oprócz ilości wydzielenych pierwotnych dendrytów na temperaturę lejności zerowej mają wpływ: ilość wtrąceń niemetalicznych, wę-

## II.9. Właściwości fizyczne staliwa

### Jan Głownia

W przeważającej większości właściwości fizyczne staliwa są podobne do właściwości fizycznych stali. Ze względu na niewielką ilość danych pomiarowych (w stosunku do stali), w wielu przypadkach wartości dla staliwa przyjmuje się z istniejących danych dla stali.

Wartościami wyjściowymi do poznania właściwości fizycznych staliwa są dane odnoszące się do czystego żelaza. Wprowadzone dodatki podstawowe (C, Si, Mn, P, S, O, N, H) jak również stopowe (Cr, Ni, V, W, Nb i inne) wpływają zasadniczo na właściwości fizyczne. W staliwie dochodzi jeszcze proces segregacji pierwiastków, związany z różnymi szybkościami stygnięcia ścianek odlewu o odmiennych grubościach. Uzyskana w nich struktura oraz rodzaj przeprowadzonej obróbki cieplnej wpływają istotnie na wartości poszczególnych właściwości fizycznych.

Do właściwości fizycznych zalicza się najczęściej:

- 1) parametry plastyczne (np. moduł sprężystości  $E$ , moduł ścinania  $G$ , moduł ściśliwości  $K$ ),
- 2) gęstość  $\rho$ ,
- 3) zmiany objętości (współczynnik rozszerzalności cieplnej, właściwości cieplne),
- 4) właściwości elektryczne (np. opór elektryczny),
- 5) właściwości magnetyczne (np. przenikliwość magnetyczna).

Materiały konstrukcyjne charakteryzują się dużymi wartościami modułu sprężystości  $E$  (dla większości zastosowań, trwałe odkształcenie nie jest pożądane z wyjątkiem sprężyn, resorów i podkładek). Moduł  $E$  jest miarą oporu materiału podczas sprężystego odkształcania. Stąd znajomość ich wartości (zwłaszcza modułu  $E$ ) ma duże znaczenie w doborze materiału (stopu) na elementy maszyn (odlewy).

Moduł sprężystości  $E$  staliwa węglowego i niskostopowego jest niewiele zależny od składu chemicznego i mikrostruktury (tab. II.9.1), ale zmienia się silnie wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze otoczenia, wartość  $E$  wynosi około 200 GPa i wraz ze wzrostem temperatury maleje. Dane te oparte są o pomiary dla stali, ponieważ dla staliwa brak takich danych. Zmniejszenie modułu  $E$  ze wzrostem temperatury jest liniowe do około 460÷470°C, po czym następuje gwałtowny spadek wartości  $E$ . Zachowanie takie jest charakterystyczne tak dla stali węglowych, niskostopowych jak i kwasoodpornych [64].

Tabela II.9.1. Porównanie modułu sprężystości  $E$ , gęstości  $\rho$  różnych grup staliwa z czystym żelazem [2, 10, 16, 29, 58]

Materiał	Skład chemiczny, %									Gęstość w 20°C, g/cm <sup>3</sup>	$E$ , MPa · 10 <sup>3</sup>	Obróbka cieplna
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe			
Czyste żelazo	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,87	196	–
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,86	205	–
	0,06	0,38	0,01	–	–	–	–	–	R	7,87	–	W
Stal/stalwo węglowe	0,15	0,80	0,36	0,027	0,029	0,04	0,05	0,01	R	7,81	207,7	N
	0,23	0,64	0,11	–	–	–	–	–	R	7,86	–	W
	0,29	1,27	0,44	0,031	0,024	–	–	–	R	7,82	207,5	NH <sub>w</sub> O
	0,32	0,45	0,20	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,40	0,90	0,50	< 0,03	< 0,03	–	–	–	R	7,85	212	–
	0,40	0,64	0,36	0,019	0,019	–	–	–	R	7,84	–	NH <sub>w</sub> O
Staliwo niskostopowe	0,40	0,56	0,46	0,030	0,025	–	–	–	R	7,90	203,9	W
	0,25	1,38	0,51	0,021	0,026	0,43	0,71	0,40	R	7,84	209,9	NH <sub>w</sub> O
	0,32	0,76	0,40	0,013	0,015	0,69	1,65	0,32	R	7,81	201,9	NH <sub>w</sub> O
	0,34	0,51	0,47	–	–	0,74	2,82	0,42	R	7,84	208,2	NH <sub>w</sub> O
	0,30	0,40	0,20	< 0,03	< 0,03	0,9	< 0,30	0,2	R	7,84	215	–
	0,40	0,90	0,40	< 0,03	< 0,03	1,1	< 0,4	0,3	R	7,84	215	–
Stal 18Cr–9Ni	0,3	0,9	0,5	< 0,03	< 0,03	0,3	< 0,4	V ≤ 0,13	R	7,80	215	–
	0,4	1,3	0,7	< 0,03	< 0,03	0,6	< 0,4	V ≤ 0,13	R	7,80	215	–
Staliwo wysokostopowe	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,9	195	100
	0,18	0,3	0,2	< 0,025	< 0,025	12	–	–	R	7,74	222	–
	0,25	0,8	0,8	< 0,025	< 0,025	14	–	–	R	7,74	222	–
	< 0,12	1,0	0,2	< 0,025	< 0,025	17	8,0	–	R	–	194	–
	< 0,12	2,0	1,0	< 0,025	< 0,025	20	11,0	–	R	–	194	–
Staliwo wysokostopowe	0,13	< 0,7	1,0	< 0,025	< 0,025	23,5	12	Ti = 0,1÷0,2	R	7,90	–	–
	0,20	< 0,7	1,5	< 0,025	< 0,025	26,0	14	N = 0,08÷0,18	R	7,90	–	–
	0,9	11,5	0,4	< 0,05	< 0,12	–	–	–	–	7,87	165	–
	1,3	14,5	0,9	< 0,05	< 0,12	–	–	–	–	7,87	207	–

R – reszta, N – normalizowanie, W – wyzarzanie, NH<sub>w</sub>O – normalizowanie, hartowanie w wodzie i odpuszczanie

Tabela II.9.12. Wartość oporności różnych gatunków staliwa temperaturze z zakresu 20÷900°C [16, 36, 39]

Materiał	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) $\cdot 10^{-8}$ w temperaturze ( $^{\circ}C$ )					
	20	200	400	600	800	900
L20	17,0	29,4	49,0	76,1	110,1	113,9
L35	17,2	30,1	49,7	77,1	111,5	115,4
L50	19,1	–	–	–	–	–
L40H	23,3	33,5	54,0	81,5	111,5	119,4
L35HM	24,2	33,7	54,9	83,0	112,0	120,1
L35HGS	31,1	–	–	–	–	–
L12H18N9T	75,0	87,9	100,6	108,2	115,2	118,4
L110G13	66,0÷67,0	84,0	99,0	110,0	121,0	–
L40H24N12S	86,0	–	–	–	–	–

Tabela II.9.13. Wartość oporności różnych materiałów w temperaturze z zakresu 20÷900°C [16, 36, 39]

Materiał	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) $\cdot 10^{-8}$ w temperaturze ( $^{\circ}C$ )					
	20	200	400	600	800	900
Fe	9,61	~ 23,0	44	~ 51,0	–	–
Cu	1,678	3,09	4,514	~ 5,5	–	–
Al	2,65	4,99	7,35	10,1	–	–
Stop Fe-Ni10	25,5	~ 35,0	–	–	–	–
Stop Fe-Ni30	33,9	~ 44,0	–	–	–	–
Stal węglowa 0,2÷0,4 %C	16	–	–	–	–	–
Stal Cr-Mo 0,4C-1Cr-0,3Mo	22	–	–	–	–	–
Stal 19Cr-9Ni	72	–	–	–	–	–
Stal 18Cr-12Ni-2Mo	74	–	–	–	–	–
Żeliwo sferoidalne 80-55-06	62	–	–	–	–	–
Żeliwo szare G3000	95	–	–	–	–	–

Znajomość wartości  $\rho$  wykorzystywana jest podczas wytapiania stali np. w piecu indukcyjnym. Duże wartości  $\rho$  powodują lepsze wykorzystanie ciepła (np. w stalach austenitycznych kwasoodpornych), co zmniejsza ilość energii koniecznej do roztopienia 1 Mg metalu.

## II.10. Obróbka cieplna odlewów staliwnych

*Stanisław Gawlik*

### II.10.1. Pojęcia ogólne

#### Obróbka cieplna

Obróbka cieplna jest jednym z etapów procesu wytwarzania części maszyn i urządzeń wykonywanych ze stopu żelaza oraz innych stopów metali. Jest to proces technologiczny, w wyniku, którego uzyskuje się korzystne zmiany właściwości mechanicznych i fizykochemicznych metali i stopów w stanie stałym. Są one wynikiem zmian strukturalnych wywołanych przemianami fazowymi pod wpływem działania temperatury, czasu i ośrodka.

W obróbce cieplnej stopów żelaza zasadniczą rolę odgrywa zjawisko przemian alotropowych żelaza tj. występowania jego krystalicznych odmian, które są trwałe w określonych zakresach temperatur i różnią się szeregiem właściwości. Odmiany alotropowe żelaza pokazano na rys. II.10.1.

W uproszczeniu, obróbkę cieplną można przedstawić jako szereg zabiegów i operacji w czasie, których wsad w stanie stałym podlega cykлом cieplnym w celu uzyskania zmian właściwości i struktury. Cykl ten skrótowo składa się z następujących działań praktycznych:

- 1) nagrzewanie z określoną szybkością do wymaganej temperatury,
- 2) wygrzewanie w danej temperaturze w określonym czasie,
- 3) chłodzenie tj. obniżanie temperatury wsadu z wykorzystaniem wymaganego ośrodka (np. piec, powietrze, strumień powietrza, roztwory polimerowe, olej, woda)

#### Cykl cieplny

Cykl cieplny to wszystkie działania obejmujące całość danego rodzaju procesu technologicznego obróbki cieplnej. Przykładem cyklu cieplnego jest ulepszanie cieplne stopów żelaza. Składa się on z operacji obróbki cieplnej tj. hartowania i odpuszczania.

# III. Odlewnicze stopy metali nieżelaznych<sup>1</sup>

## III.1. Materiały wsadowe, dodatki stopowe

*Zbigniew Górny*

Podstawowym materiałem wsadowym w odlewnictwie stopów metali nieżelaznych są gąski stopów znormalizowanych, dostarczane przez zakłady rafinacyjne lub hutnicze. Zawierają składniki stopów z uwzględnieniem niewielkich zmian składu chemicznego spowodowanego zgiarem.

Gąski metali i stopów o różnej masie zbliżone kształtem i przeważnie mają przewężenia dla ułatwienia kawałkowania. Przy topieniu w piecach tyglowych stosuje się też gąski o kształcie odpowiadającym wielkości tygla z uchwytami do transportu. Takie wlewki-gąski mają masę 200÷600 kg, a wyjątkowo nawet 1600 kg [2] i zapewniają mniejsze zużycie energii przy przetapianiu, ale również powstawanie różnic składu chemicznego.

Istnieje również możliwość stosowania metali oraz zapraw (stopów wstępnych, ligatur) z ewentualnymi dodatkami złomu własnego, czystego i o kawałkowatości drobnej lub średniej. Zaprawy (tab. III.1.1) służące do sporządzania stopów oraz ewentualnie do rozdrabniania lub modyfikowania stopów są przeważnie stopami podwójnymi czy potrójnymi o składzie często odpowiadającym składowi faz międzymetalicznych lub związków chemicznych dla łatwiejszego oddzielenia części gąski (łamanie). Zaprawy dobierane są również pod kątem niskiej temperatury topnienia (eutektyki) lub z ograniczoną ilością składników łatwo utleniających. Zaprawy dostarczane są również w postaci wafli (40x220x440 mm, masa 6÷8 kg), płatków (grubość 6,4 mm, szerokość długość losowa, masa 0,028÷0,280 kg), tabletki  $\varnothing$  60x32 mm, masa 0,25 kg), kostki (28x50x64 mm, masa 0,14÷0,23 kg) małe gąski zwane „świnkami” (40x55x110 mm, masa 0,3÷0,6 kg) drut okrągły ( $\varnothing$  9,5 mm, dostarczany w kręgach), pręty ( $\varnothing$  9,5x500÷1000 mm, masa 100 lub 200 kg) oraz pręty trapezowe o wymiarach boków dolnego i górnego odpowiednio 45 i 25 mm, cięte na kawałki); są to przykładowe postaci dostawy zapraw produkowane przez firmę *Anglo Black Wells*.

W sporadycznych przypadkach (przeważnie stopy Al) stosuje się wsad ciekły dowożony transportem kołowych lub rzadziej kolejowym, w izolowanych pojemnikach, a napełnianie kadzi i jej opróżnianie odbywa się grawitacyjnie (różnica poziomów) lub z użyciem pomp do ciekłego metalu. Przeciętna prędkość transportu samochodowego wynosi ok. 40 km/h, a spadek temperatury 20÷30°C na trasach liczących nawet kilkaset km [2]. Od 1990 roku prowadzony jest transport ciekłych stopów aluminium z Kęt do Bielska Białej [1].

Złom obiegowy (własny) obejmuje części układu wlewowego i zasilającego oraz odlewy zabrakowane. Wykorzystywany może być również złom obcy w postaci wyeksploatowanych odlewów oraz odpady powstałe w czasie obróbki skrawaniem poza odlewnią (np. wióry). Wykorzystywanie we wsadzie złomu, a szczególnie obcego wymaga starannej rafinacji, a niekiedy również podwójnego topienia – ze względu na trudne do usunięcia w stanie stałym zanieczyszczenia i konieczność korekty składu chemicznego. Złom obcy przeważnie przetapiany jest w rafineriach (poza odlewnią), a uzyskane stopy nazywane są wtórnymi. Ten obszar przetwórstwa metali nieżelaznych ma znaczenie ekonomiczne (tańsze stopy wtórne oraz ekologiczne (skuteczny recykling)).

Obecnie zniknęło pojęcie stopów wtórnych, a stopy sporządzone ze złomów podlegają rygorom stopów ze składników pierwotnych.

Złom klasyfikuje się pod względem wielkości kawałków na drobny, średni i kruchy.

Postać odpadów zależy od rodzaju odpadów (odlewnicze, walcownicze kuzienne, obróbkowe itp.)

Zaprawy wprowadzane w postaci drutu zezwalają np. na pełną automatyzację procesu np. modyfikowania. W tabeli III.1.1 przedstawiono spotykane zaprawy, a w tab. III.1.2 przykładowe stopnie czystości składników metalowych wsadu.

Tabela III.1.1. Przykładowe zaprawy stosowane przy topieniu stopów Cu oraz Al

Stop osnowy / Nazwa zaprawy	Dodatek składnika stopu, %	Temperatura topienia, °C
Miedź:		
Fosforowa	7,0÷8,5	700÷800
	10	1850
	15	1000
Aluminiowa	20	–
	33	700÷800
	55	575÷600

<sup>1</sup> Rozdział opracowany pod redakcją Stanisława Rzadkosza.

## III.2. Topienie metalu

Zbigniew Górny

### III.2.1. Procesy wytapiania i przetapiania

Wytapianie to topienie wsadu złożonego z składników metalowych (metali i zapraw oraz złomu), a więc przygotowanie stopu we własnym zakresie. Natomiast przetapianie, dominujące w odlewnictwie metali nieżelaznych, to przetapianie gąsek przygotowanych i dostarczanych z zakładów rafinacyjnych z ewentualnym udziałem złomu własnego.

Właściwa metalurgia odlewnicza dotyczy wytapiania obejmującego różne procesy fizyko-chemiczne i chemiczne.

Topienie prowadzone może być jako utleniające, obojętne lub redukujące w zależności od atmosfery wewnątrz pieca oraz stosowanych preparatów (topniki, rafinatory w tym odtleniacze, modyfikatory) oraz jakości wsadu. W przypadkach wsadu zanieczyszczonego, prowadzi się topienie utleniające z późniejszym odtlenianiem.

Najkorzystniejszą atmosferę tworzy argon lub droższy i rzadko stosowany hel.

Przy topieniu w próżni należy liczyć się ze stratami w wyniku parowania, niejednakowego dla różnych składników stopowych.

W przypadku stopów miedzi, pierwiastki usuwane z kąpeli metalowej dzieli się na następujące grupy:

- 1) Zn, Cd, Ag, Mg, Pb, Bi, As, Sb,
- 2) Mn, Ag, In,
- 3) Fe, Sn, Ni, Co,
- 4) Ti, Si, Au.

Kinetyka usuwania tych składników zależy od intensywności obróbki próżniowej lub parametrów procesu przedmuchiwania gazem obojętnym. Metale grupy 1 i 2 usuwane są przy ciśnieniu 1÷10 kPa, grupy 3 przy 1 kPa, a grupy 4 nie są usuwalne w ten sposób, tzn. obróbką próżniową.

W warunkach standardowych rozpuszczalność tlenu w metalach można określić korzystając z definicji zmiany potencjału termodynamicznego [1]:

$$\Delta G_r^o = C + DT \quad (\text{III.2.1})$$

$\Delta G_r^o$  – zmiana potencjału termodynamicznego, kJ/mol,

$C, D$  – stałe (por. tab. III.2.1),

$T$  – temperatura, K.

Tabela III.2.1. Zmiany termodynamicznego potencjału  $\Delta G^o$  wolnych tlenków i roztworu tlenu w metalach w warunkach znormalizowanych ( $\Delta G_r^o = C + DT$ ) [2]

Tlenek	Swobodny tlenek			Roztwór tlenu w ciekłym metalu		
	Temperatura, K	C, kJ/mol O <sub>2</sub>	D, kJ/mol·K O <sub>2</sub>	Temperatura, K	C, kJ/mol O	D, kJ/mol·K O
Ag <sub>2</sub> O	298÷500	-62	0,132	1250÷1500	-15	0,044
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	900÷2300	-1126	0,217	–	–	–
CO	298÷2000	-230	-0,172	–	–	–
CO <sub>2</sub>	298÷2000	-297	0,085	–	–	–
Cu <sub>2</sub> O	1350÷1500	-405	0,184	1350÷1450	-73	0,009
CaO	1120÷1760	-1285	0,221	–	–	–
FeO	1800÷3000	-480	0,992	1890÷2000	-117	0,025
H <sub>2</sub> O	400÷3000	-502	0,114	–	–	–
MgO	950÷1350	-1220	0,233	–	–	–
NiO	1250÷2250	-508	0,191	1800÷1950	-71	0,030
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1000÷2000	-663	0,195	–	–	–
PbO	600÷1150	-438	0,197	600÷850	-123	0,057
SiO <sub>2</sub>	1700÷2000	-950	0,199	–	–	–
SnO <sub>2</sub>	550÷1900	-582	0,205	800÷1300	-181	0,066
TiO <sub>2</sub>	1950÷2150	-953	0,183	–	–	–

$C$  – ciepło molowe;  $D$  – entropia molowa



### III.3. Stopy metali lekkich

*Stanisław Rządkosz, Zbigniew Bonderek, Zdzisław Smorawiński,*

*Aleksander Fajkiel, Piotr Dudek, Tomasz Reguła*

Jednym ze wskaźników rozwoju gospodarczego i zmian strukturalnych w przemyśle odlewniczym jest udział odlewów metali nieżelaznych, głównie ze stopów metali lekkich (Al i Mg) w ogólnej produkcji odlewów. Jednocześnie stosunek wielkości produkcji odlewów ze stopów metali lekkich do produkcji odlewów z żeliwa szarego jest wskaźnikiem określającym konkurencyjność pomiędzy tymi tworzywami.

Prognozy produkcji na lata 2010÷2019 przewidują tendencje wzrostowe, co wynika z zapotrzebowania na lekkie konstrukcje szczególnie w przemyśle środków transportu – samochodowym i lotniczym, gdzie ograniczenie zużycia paliwa jest podyktowane nie tylko względami ekonomicznymi, ale i ekologicznymi. Już obecnie w wielu przypadkach następuje zamiana żeliwa i staliwa na stopy lekkie, które dzięki dobrym właściwościom odlewniczym i mechanicznym mogą być wykorzystywane w sposób bardzo efektywny [1].

Również stopy tytanu z uwagi na unikalne właściwości chemiczne, mechaniczne i fizyczne w ostatnim okresie czasu znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, takich jak: lotniczy, kosmiczny, chemiczny, petrochemiczny, medyczny, zbrojeniowy i samochodowy [2].

#### III.3.1. Stopy aluminium

##### III.3.1.1. Właściwości czystego aluminium

Aluminium krystalizuje w sieci Al, a więc cechuje się dużą plastycznością. Ma parametr sieci  $a = 0,40409$  nm, temperaturę topnienia  $660,4^{\circ}\text{C}$ , temperaturę wrzenia  $2060^{\circ}\text{C}$  [3]. To mała gęstość  $2,70$  g/cm<sup>3</sup> (3 razy mniejsza niż żelaza), kwalifikuje ten metal do grupy metali lekkich. Dzięki niskiej gęstości i stosunkowo bogatemu występowaniu w przyrodzie (ok. 7 %) jest szeroko stosowany w różnych gałęziach przemysłu, głównie w samochodowym i lotniczym. Aluminium cechuje się dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym (gorszym jednak niż miedź), stąd jego zastosowanie na przewody elektryczne. Na powietrzu pokrywa się cienką warstwą Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, która chroni je przed dalszym utlenianiem (pasywacja). Jest odporne na działanie wody, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, wielu kwasów organicznych, związków azotowych. Natomiast nie jest odporne na działanie wodorotlenków (np. NaOH, KOH), kwasów beztlenowych (HF, HCl), wody morskiej i jonów rtęci. Wytrzymałość czystego wyżarzonego aluminium jest niska i wynosi  $R_m = 70\div 120$  MPa. Pozostałe właściwości mechaniczne to:  $R_e = 20\div 40$  MPa, wydłużenie  $A_{10} = 30\div 45$  %, przewężenie  $Z = 80\div 95$  %, twardość  $15\div 30$  HB.

##### III.3.1.2. Aluminium hutnicze

Aluminium hutniczym (technicznym) nazywamy takie aluminium, którego sieć krystalograficzna utworzona jest w przeważającej części z atomów glinu. W czystym technicznie aluminium struktura krystaliczna jest jednorodna, co oznacza, że skład chemiczny i wszystkie właściwości są w całej objętości dla każdego kryształu jednakowe.

Aluminium techniczne, podobnie jak inne metale, w praktyce zawiera zawsze pewną ilość metalicznych, niemetalicznych i gazowych zanieczyszczeń. Produkcja aluminium technicznego oparta jest na procesie elektrolizy tlenku glinu w stopionych solach fluorowych. Otrzymane aluminium posiada czystość  $99,0\div 99,8$  % Al.

Proces produkcji aluminium metodą elektrolizy w stopionych solach fluorowych opracował równocześnie w 1886 r. C.M. Hall (USA) i Héroult (Francja). W późniejszym okresie sposób ten otrzymał nazwę metody Halla-Héroult'a.

Elektroliza – jest procesem, w którym na skutek przepływu prądu stałego przez elektrolit (przewodnik elektroli-tyczny) następuje jego rozkład połączony z wydzieleniem się substancji na elektrodach.

Proces elektrolizy przebiega w temperaturze  $940\div 960^{\circ}\text{C}$ . Na dnie katody powstaje ciekłe aluminium ( $d = 2,30$  g/cm<sup>3</sup>), nad którym znajduje się warstwa elektrolitu ( $d = 2,15$  g/cm<sup>3</sup>). Anoda jest zanurzona w warstwie elektrolitu na taką głębokość, aby stopa anody (spód anody) był w odległości 4 do 6 cm od powierzchni ciekłego aluminium. Odległość ta nosi nazwę odległości międzybiegunowej.

Pod wpływem przepływającego prądu następuje rozkład tlenku glinu rozpuszczonego w elektrolicie na tlen i aluminium według reakcji:

## III.4. Stopy metali ciężkich

### III.4.1. Stopy miedzi

*Marcin Kondracki*

#### III.4.1.1. Wprowadzenie

Miedź jest pierwiastkiem stosunkowo rzadkim. Jej udział w skorupie ziemskiej jest szacowany na ok. 55÷70 g/t [1, 2]. Pod względem występowania zajmuje 25. miejsce spośród wszystkich pierwiastków. Miedź może występować w postaci rodzimej, częściej jednak jest spotykana w postaci związków siarczkowych i węglanowych. Podstawowe rudy miedzi stanowią minerały: chalkopiryt, chalkozyn, bornit, azuryt i malachit. Podstawowymi producentami tego surowca są: Chile, Peru, Chiny, USA, Australia, Indonezja, Zambia, Rosja, Kanada, Polska i Kazachstan. Czysta miedź ma szereg korzystnych właściwości, które decydują o jej szerokim stosowaniu (tab. III.4.1). Najważniejszą właściwością czystej miedzi jest jej wysoka przewodność elektryczna (konduktywność) oraz przewodność cieplna. Pod tym względem ustępuje tylko srebru. Uzyskanie wysokiej przewodności związane jest z odpowiednim oczyszczeniem metalu. Większość zanieczyszczeń wpływa negatywnie na przewodność elektryczną miedzi (rys. III.4.1). Wyjątek stanowi tlen, który do 0,06 % wag. nieznacznie poprawia przewodność miedzi, jednak po przekroczeniu tej wartości wpływa negatywnie. Po rafinacji ogniowej odlewane są płyty (anody miedziane, czystość 98,7 %), które następnie poddaje się rafinacji elektrolitycznej uzyskując czystość na poziomie 99,99 % (katody, PN-EN 1978:2000). Największa część produkowanej na świecie miedzi jest wykorzystywana przez przemysł elektrotechniczny i elektroniczny. Kolejne miejsca zajmują stopy miedzi charakteryzujące się szerokim zakresem właściwości użytkowych, wynikających głównie z rodzaju wprowadzonych dodatków stopowych. Odlewy z miedzi w postaci czystej są objęte normą PN EN 1976:2012, zawierającą specyfikację dopuszczalnych zanieczyszczeń (tab. III.4.2).

Podstawowymi dodatkami stopowymi miedzi są: Sn, Zn, Pb, Al, Si, Ni, Mn, Be. Jako dodatki pomocnicze mogą być stosowane również P, Fe, As, Cd, Cr, Co, Bi, Se, Te i inne [3]. Tradycyjnie stopy miedzi nazywa się brązami, dodając do nazwy określenie wynikające z rodzaju wprowadzonego składnika (np. brązy cynowe, aluminiowe, ołowiowe). Wyjątek stanowią stopy Cu-Zn nazywane mosiądzami oraz stopy miedzi z niklem (miedzionikle). W przypadku stopów, w których ilość dodatku stopowego nie przekracza 2 % wag. stosuje się często określenie miedź stopowa. Są to stopy, w których celem jest przede wszystkim zachowanie wysokiej przewodności elektrycznej przy znaczącej poprawie innych właściwości użytkowych i trwałości. Przykładem może być miedź chromowa CuCr1 stosowana na elektrody stosowane przy zgrzewaniu; chrom zwiększa odporność na działanie podwyższonej temperatury występującej podczas procesu zgrzewania, przy zachowaniu przewodności elektrycznej powyżej 45 MS/m.

Tabela III.4.1. Podstawowe właściwości czystej miedzi [3, 4]

Właściwość	Wartość liczbową	Jednostka
Masa atomowa	63,54	
Budowa krystaliczna, typ A1 – parametr sieci	3,6075	Å
Gęstość w temp. 20°C, wyliczona dla miedzi – elektrolitycznej – przerobionej plastycznie – odlanej	8,923 8,8895 8,87÷8,89 8,0÷8,9	g/cm <sup>3</sup>
Ciepło właściwe, w temp. 20°C	0,385	kJ/(kg·K)
Ciepło topnienia	211,9	kJ/kg
Ciepło parowania	4798,1	kJ/kg
Temperatura topnienia	1083	°C
Temperatura wrzenia	2600	°C
Współczynnik rozszerzalności liniowej	16,5 · 10 <sup>-6</sup>	1/K
Współczynnik przewodzenia ciepła	393,6	W/(m·K)
Przewodność elektryczna w temp. 20°C	59,77	MS/m
Wytrzymałość na rozciąganie, $R_m$	227	MPa
Granica plastyczności, $R_{02}$	57	MPa
Wydłużenie (przewężenie)	52,7 (93,1)	%
Twardość, $HB$	32,7	–
Udarność	1,08	J/mm <sup>2</sup>
Moduł Younga	127	GPa

## III.5. Właściwości technologiczne

*Stanisław Rządkosz*

### III.5.1. Lejność i zdolność do wypełnienia formy

Lejność ciekłego metalu, określana długością odlewu próbnego, jest zdolnością do płynięcia w formie odlewniczej. Stosując próbę technologiczną lejności (spiralną, węzową, gwiazdzistą, prętową-pionową i inne) ocenić można dwie cechy ciekłego metalu:

- 1) zdolność do płynięcia,
- 2) zdolność do wypełniania wnęki formy, ocenianej dokładnym odwzorowaniem tej wnęki.

Zdolność do płynięcia jest oceniana bezpośrednio z długości (ewentualnie wysokości) odlewu próbnego (próby technologicznej). Jest to przeważnie próba spiralna (rys. III.5.1), która, zgodnie z BN-65/4051-08, powinna być wykonywana w wilgotnej masie formierskiej (wilgotność do 5 %) stosowanej w odlewni, w skrzynce formierskiej usuwalnej, zaopatrzonej w wlew z jednym otworem w środku ( $\phi$  10 mm) z masy rdzeniowej. Stosowane bywają również formy graficzne, skorupowe (również wykonane z piasku otaczanego) lub kokile z możliwością regulacji ich temperatury. Lejność oceniana jest długością spirali, mierzoną ilością występów odległych od siebie o 50 mm, a znajdujących się w górnej części spirali; często lejność podaje się w jednostkach długości.

Na lejność wpływają:

- 1) właściwości i cechy ciekłego metalu (lepkość, napięcie powierzchniowe, zawartość tlenków i gazów, rozpuszczalność tlenków itp.),
- 2) właściwości formy (zdolność do przejmowania ciepła, przewodnictwo cieplne, chropowatość powierzchni kanałów),
- 3) warunki odlewania (temperatura, ciśnienie); najsilniejszy jest wpływ temperatury przegrzania.

Wzrost lejności z temperaturą ma przeważnie charakter liniowy w interesującym obszarze temperatury topienia i odlewania. Zwiększenie ciśnienia metalostatycznego powoduje nieznaczne zwiększenie lejności. Poza strukturą ciekłego, a w konsekwencji zakrzepłego metalu (czyste metale, eutektyki itp.) na lepkość wpływa również rafinacja, modyfikacja i inne zabiegi mające na celu rozdrobnienia struktury (np. modyfikacja powoduje wzrost lejności).

Nie stwierdzono korelacji między lejnością a lepkością; występuje natomiast związek lejności z napięciem powierzchniowym, które przeważnie maleje z temperaturą (wyjątek stanowią np. Cu czy Cu-Sn).

Oczywiście lejność maleje ze wzrostem napięcia powierzchniowego. Obecność wtrąceń stałych, w tym tlenkowych, powoduje zmniejszenie lejności.

Na zdolność do płynięcia wywierają wpływ: pojemność, przewodnictwo cieplne, prędkość zalewania i warunki krzepnięcia. Płynięcie czystych metali zostaje zatrzymane wskutek krzepnięcia od strony powierzchni formy, podczas gdy płynięcie stopów zostaje zahamowane przez endogeniczne krzepnięcie na czole poruszającego się frontu krzepnięcia. Polepszenie przepływu uzyskuje się przez zmniejszenie szybkości odprowadzania ciepła (np. stosowanie pokryć). Wibracja jest korzystna, jeżeli w bardzo wąskich przekrojach napięcie powierzchniowe ogranicza możliwość płynięcia [1].

Do pomiarów lejności i zdolności wypełniania formy, poza klasyczną próbą spirali, może służyć podłużna kokila do odlewania pręta (o przekroju prostokątnym), wykonana z aluminium lub stali. Długość zabiegania ciekłego metalu lub stopu, najczęściej proporcjonalna do temperatury, zależy również od stosunku odprowadzanego ciepła do powierzchni, przez którą to ciepło jest odprowadzane. Zdolność do wypełniania formy (zdolność odtwarzania konturów) jest określana przez wielkość promieni zaokrąglenia ostrych krawędzi. Istnieje również korelacja między promieniem zaokrąglenia krawędzi i wielkością ziarna ( $\text{mm}^2$ ) [2]. Iloczyn zdolności do wypełniania formy i zdolności do płynięcia (lejności) jest stały [3].

Oryginalną metodą pomiaru możliwości przepływowych ciekłych stopów jest metoda próżniowa (rys. III.5.2), przy wykorzystaniu pionowego lub poziomego odcinka rury ssącej. Długości przepływu w zastosowanych rurach szklanych są określone na podstawie korelacji między energią mechaniczną i termiczną oraz przebiegami krzepnięcia. Obie energie wpływają wzajemnie na siebie i mogą się znacząco zmieniać. Możliwe jest sformułowanie matematyczne przebiegu płynięcia, która umożliwi uzyskanie wyników z symulacji komputerowej; występuje wówczas dobra zgodność z danymi uzyskanymi doświadczalnie. Jako wielkości charakterystyczne stosuje się indeks lejności, będący ilorazem wysokości wypełniania do wysokości ciśnienia metalostatycznego, który jest mniejszy od jedności. Zwiększając ciśnienie metalostatyczne uzyskuje się dłuższe odcinki przepływu. We wszystkich przypadkach (zmiana średnicy przewodu, ciśnienia i tem-

## III.6. Układy wlewowe i zasilające

*Jerzy Zych*

### III.6.1. Wprowadzenie

Stopy metali nieżelaznych obejmują grupę stopów metali ciężkich (stopy miedzi, niklu, cynku, ołowiu i cyny), grupę stopów metali lekkich (aluminium, magnezu i tytanu) oraz grupę metali i stopów o specjalnym zastosowaniu (metale szlachetne, kobalt, wysokotopliwe, szkła metaliczne). Specyfika właściwości stopów poszczególnych grup powoduje, iż wymagają one niekiedy całkowicie odmiennych technologii topienia, obróbki w stanie ciekłym (w piecu i poza piecem), odmiennych technologii i metod odlewania. Dla poszczególnych grup i niekiedy poszczególnych stopów należy stosować odmienne podejście w zakresie projektowania układów wlewowych i zasilających.

W technice najszerzej wykorzystywane są stopy metali nieżelaznych, w tym głównie stopy aluminium i coraz szerzej stopy magnezu. Stopy tej grupy charakteryzują się silnym powinowactwem do tlenu oraz małą gęstością. Te dwie cechy powodują, iż w zakresie odlewania i projektowania układów wlewowo zasilających zachodzi konieczność stosowania odmiennego podejścia niż przy projektowaniu tych samych systemów dla pozostałych stopów odlewniczych. Szczególną trudność stanowi projektowanie technologii dla odlewów wykonywanych przy grawitacyjnym wypełnianiu form. Małe gabarytowo odlewy tej grupy wykonywane są w technologii odlewnia ciśnieniowego, w formach metalowych. Ta specyficzna technologia nie jest rozpatrywana w niniejszym rozdziale tak w odniesieniu dla stopów metali lekkich, jak i dla innych stopów np. stopów cynku.

### III.6.2. Odlewanie stopów metali nieżelaznych

Stopy metali nieżelaznych odlewa się przeważnie do form piaskowych klasycznych, do form metalowych grawitacyjnie zalewanych i odlewa się pod ciśnieniem. Stopy metali lekkich (Al, Mg) z uwagi na stosunkowo duży skurcz i małą wytrzymałości powinno odlewać się, w przypadku form piaskowych – do form o zwiększonej podatności, natomiast przy odlewaniu do form metalowych odlewy muszą być usuwane z form (wypychane) możliwie najwcześniej, aby uniknąć pęknięcia [3]. Z tych samych powodów stopy metali nieżelaznych zalewane są przy utrzymaniu niewielkiego przegrzania. W formach piaskowych przy odlewaniu stopów metali lekkich często stosuje się nadlewy i ochładzalniki umieszczone w sąsiedztwie węzłów cieplnych. Ochładzalniki – stosowane dla zapobiegania porowatości skurczowej, pęknięciom na gorąco, w celu rozdrobnienia struktury, zwiększenia właściwości wytrzymałościowych i poprawy szczelności – powinny dobrze współpracować z nadlewami, powinny wspomagać zachowanie kierunkowego krzepnięcia. Programy symulacyjne procesów krzepnięcia pozwalają aktualnie weryfikować poprawność rozwiązań w opisanym zakresie zasilania.

Skłonność metali lekkich do utleniania i powstawania zażużeń wymaga stosowania zalewania od dołu, unikania zbyt dużych prędkości przepływu metalu w kanałach układu wlewowego, szczególnie we wlewach doprowadzających. Również przepływ we wnęce formy powinno być duże. Konieczność stosowania wysokich nadlewów prowadzi do budowania wysokich układów wlewowych. Dlatego, dla zmniejszenia szybkości przepływu metalu stosuje się układy wlewowe o rozszerzającym się przekroju, od wlewu głównego aż do wnęki formy. Taka konstrukcja układów wlewowych jest typowa dla wszystkich stopów metali lekkich. Szczegółowe zasady budowy układów wlewowych przedstawiono w dalszej części rozdziału.

### III.6.3. Układy wlewowe dla stopów metali lekkich

Grupa stopów metali lekkich, do której należą stopy Al, Mg i Ti charakteryzuje się niewielkim ciężarem właściwym, dużym powinowactwem do tlenu i stosunkowo niskimi temperaturami topnienia (stopy Al i Mg). Z tych też powodów łatwo ulegają utlenianiu, co utrudnia technologie wytwarzania z nich odlewów pozbawionych wtrąceń niemetalicznych, a niskie gęstości tych stopów utrudniają proces zasilania węzłów cieplnych, co staje się główną przyczyną wad pochodzenia skurczowego, w tym rzadzizn i porowatości. Specyfiką tych stopów jest również skłonność do rozpuszczania gazów (głównie wodoru), co dodatkowo utrudnia technologię wytwarzania odlewów, ogranicza możliwość podwyższania temperatury zalewania, która niekiedy jest konieczna dla stworzenia możliwości wytwarzania cienkościennych odlewów.

Układ wlewowy w ogólnym ujęciu to system połączonych ze sobą kanałów w elementach formy odlewniczej służący do doprowadzenia metalu do wnęki formy, wypełnienia jej ciekłym stopem w odpowiednim czasie, ułatwiający zasi-

# IV. Metalowe materiały kompozytowe, materiały wysokoporowate, nanomateriały<sup>1</sup>

## IV.1. Kompozyty metalowe

*Jerzy J. Sobczak*

Istnieją tworzywa konstrukcyjne, w tym na bazie metalowej, które nieczęsto występują w opracowaniach typu poradnikowego a należą do nich materiały heterogeniczne: kompozyty metalowe, media o wysokim stopniu porowatości oraz nanomateriały. Grupa materiałów heterogenicznych obejmuje także materiały funkcjonalnie gradialne (*FMG – Functionally Graded Materials*), włączając w nie struktury warstwowe [1, 2]. Te nowoczesne tworzywa niosą ze sobą podwyższony stopień nowatorstwa i zaawansowania poznawczego (a nawet kontrowersji), a towarzyszące im zagadnienia należą na dzień dzisiejszy do wyższych rejestrów nauk odlewniczych.

Zainteresowanie nowymi tworzywami, ich podstawami teoretycznymi i potencjalnymi możliwościami aplikacyjnymi wynika z okoliczności, trudnej dzisiaj do wykluczenia, że w nieodległej przyszłości te dzisiaj jeszcze nie do końca rozpoznane i należycie opisane materiały mogą znaleźć zastosowanie w praktyce odlewniczej, na początek chociażby w niszowej skali.

### IV.1.1. Wprowadzenie

Stosowane intuicyjnie przez ludzkość od wieków w postaci struktur wytworzonych przez naturę, kompozyty ogółem, a kompozyty metalowe w szczególności, jak dotąd nie doczekały się ogólnie akceptowanej i jasnej definicji. W dostępnych źródłach literaturowych trudno jest znaleźć wyczerpującą i w pełni akceptowalną definicję pojęcia „kompozyt”.

#### IV.1.1.1. Pojęcia tradycyjne

Można przyjąć, że słowo *kompozyt* pochodzi z języka łacińskiego od *componō* – złożyć, składać, bądź *compositiō* – połączenie, związek. Encyklopedyczne pojmowanie kompozytu zawiera się w następującym określeniu: „...*tworzywo złożone z co najmniej 2 składników (zwanymi komponentami, fazami) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma właściwości lepsze i (lub) nowe (dodatkowe) w porównaniu z właściwościami poszczególnych składników lub w porównaniu z sumą właściwości tych składników; kompozyt jest materiałem zewnętrze monolitycznym, jednakże z makroskopowo widocznymi granicami między składnikami...*” [6].

W Polsce proponowane są różne definicje, zawarte w wielu monografiach i publikacjach [np. 7÷17]. Są to definicje oddające w sposób ogólny cel wytwarzania kompozytu i dostatecznie szerokie, aby ogarnąć liczne materiały złożone, które są uważane za kompozyty. Jednym z najczęściej cytowanych określeń jest czteroczłonowa definicja kompozytu według L.J. Broutman’a i R.H. Krock’a [18, 19], zgodnie z którą:

- 1) kompozyt jest materiałem wytworzonym przez człowieka,
- 2) kompozyt musi składać się z co najmniej dwóch różnych (pod względem chemicznym) materiałów z wyraźnie zaznaczonymi granicami rozdziału między tymi komponentami (fazami),
- 3) komponenty kompozytu tworzą go przez udział w całej objętości,
- 4) kompozyt powinien posiadać właściwości różne od jego komponentów (lepsze lub zupełnie nowe w stosunku do użytych komponentów, lub też wynikających z prostego sumowania tych właściwości).

Powyższa definicja wyklucza tzw. kompozyty naturalne, np. drewno, a także materiały warstwowe i platerowane. Według [8], z powołaniem się na L. Berghezana, kompozytami można nazywać materiały złożone, różniące się od stopów tym, że poszczególne komponenty zachowują swoje właściwości i są tak dobrane i połączone, aby mogły być wykorzystane ich zalety, a nie ujawniały się ich potencjalne wady (głównie z uwagi na planowaną funkcję wyrobu).

Uważa się, że praktycznie każdy rodzaj dwóch lub więcej materiałów może być połączony w kompozyt (rys. IV.1.1). Dotyczy to zarówno metali, materiałów ceramicznych, jak i materiałów organicznych (polimerów, elastomerów i szkła).

---

<sup>1</sup> Rozdział opracowany pod redakcją Jerzego J. Sobczaka.

## IV.2. Materiały wysokoporowate

*Jerzy J. Sobczak, Paweł Darlak*

W dostępnych źródłach literaturowych często można spotkać określenie „piana (pianka) metalowa”, które jest stosowane do opisu materiału, nie spienionego w sensie dosłownym [1]. Aby uniknąć niejednoznaczności, materiały o wysokim stopniu nieciągłości strukturalnej, zwłaszcza w skali makro- i mikro- mogą być nazwane „metalowymi materiałami (mediami) wysokoporowatymi”. Takie struktury generują szereg unikalnych właściwości, dzięki którym z powodzeniem mogą być wykorzystane w projektowaniu technicznym. Ich niska gęstość czyni z nich idealny materiał wypełniający dla paneli typu *sandwich*, niska przewodność cieplna zapewnia możliwość zastosowania w charakterze materiału izolacyjnego, zdolność do tłumienia dźwięku może być wykorzystana w budowie barier i mat tłumiących, skłonność do znacznych deformacji pod wpływem niewielkich obciążeń czyni z nich świetny materiał do produkcji opakowań

Nieciągła struktura materiałów wysokoporowatych może być opisana wieloma parametrami. Do najważniejszych, determinowanych sposobami wytwarzania, należą:

- 1) gęstość względna  $\Delta_f = \frac{\rho_f}{\rho_s}$ , czyli stosunek gęstości materiału wysokoporowatego  $\rho_f$  do gęstości materiału  $\rho_s$ , z którego został wykonany,
- 2) porowatość  $P$  (względny udział pęcherzy, czyli por, w całej objętości piany).
- 3) Parametr ten można wyrazić prostym wzorem  $P = 1 - \Delta_f$  lub  $P\% = (1 - \Delta_f)100$ ,
- 4) średni rozmiar pęcherza, jego kształt i orientacja,
- 5) stopień wzajemnego łączenia się pęcherzy,
- 6) rozkład pęcherzy (m.in. ich powierzchnia właściwa).

Metalowe materiały wysokoporowate można umownie podzielić na trzy grupy:

- 1) piany „monolityczne” (typowy układ dwufazowy typu metal-gaz, materiały komórkowe, gąbki),
- 2) piany kompozytowe (włączając układy zbrojone cząsteczkami lub gazem, czyli gazary, określane również mianem „struktury typu lotus”),
- 3) piany syntaktyczne (zawierające puste sfery, określane mianem „mikrosfery” bądź „cenosfery”).

W dostępnej literaturze technicznej wymienione są następujące metody wytwarzania materiałów wysokoporowatych (rys. IV.2.1) [2]:

- 1) metalurgia proszków [3÷10],
- 2) osadzanie chemiczne lub elektrochemiczne [11],
- 3) naparowywanie próżniowe [12],
- 4) metody ciekło-fazowe (w tym metody wytwarzania gazarów – struktur typu „lotus”).

### IV.2.1. Piany monolityczne

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych ciekło-fazowych metod wytwarzania monolitycznych pian metalowych jest proces Alporas®, opracowany przez *Shinko Wire Co.*, Amagasaki, Japonia, polegający na spienianiu ciekłego aluminium (jego stopów) wodorem pochodzącym z termicznego rozpadu wodoru tytanu (lub cyrkonu) według reakcji:



i stabilizacji powstałych pęcherzy drogą kontroli lepkości cieczy metalowej poprzez wprowadzanie wapnia (rys. IV.2.2).

Teoretyczne i praktyczne aspekty pian monolitycznych są w wystarczającym stopniu opisane w literaturze technicznej i Internecie (<http://www.metalfoam.net>). Piany tego rodzaju charakteryzują się strukturą komórkową (z komórkami zamkniętymi lub otwartymi o rozmiarach 2÷10 mm) a ich właściwości, zwłaszcza zdolność do tłumienia energii mechanicznej i pochłaniania dźwięku pozwalają na zastosowanie głównie w przemyśle samochodowym na części nadwozia i konstrukcje typu „*sandwich*”, nawet w podzespołach nośnych (rys. IV.2.3).

Do firm, które intensywnie pracują nad przemysłowym zastosowaniem monolitycznych pian, zwłaszcza aluminiowych należą m.in.: *FBM Marin*, *GEC Marconi*, *Thermacore Europe Ltd.*, *Federal Mogul*, *Jaguar Cars Ltd.*, *Ford Motor Company*, *Rover Group*, *Ahis Vehicles Ltd.*, *Transtec Cast Products* [13].

## IV.3. Nanomateriały

*Małgorzata Lewandowska, Krzysztof J. Kurzydłowski*

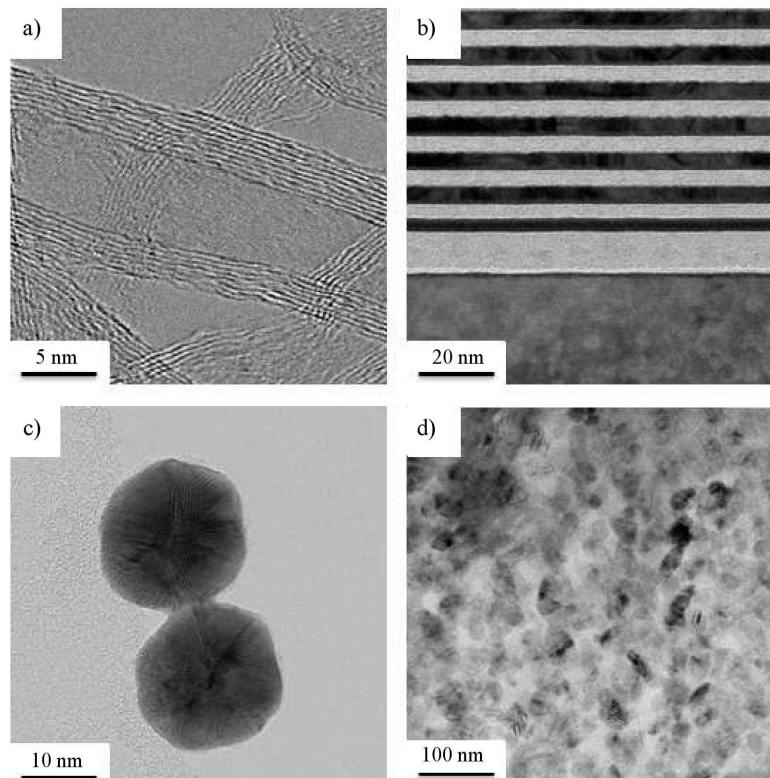
### IV.3.1. Wprowadzenie

Nanomateriały stanowią względnie nową grupę materiałów, której intensywny rozwój obserwuje się od lat 80-siątych XX wieku. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna zdefiniowała termin „nanomateriał” jako „materiał, którego jeden z wymiarów zewnętrznych nie przekracza nanoskali lub którego struktura lub struktura powierzchniowa mieści się w nanoskali” [1]. Termin „nanoskala” zdefiniowano jako zakres od około 1 do 100 nm.

Taka definicja oznacza, że jest to pojęcie niezwykle szerokie i obejmuje szeroką gamę materiałów. Granica 100 nm może dotyczyć wielkości domen/ziaren/kryształitów jako podstawowej jednostki mikrostruktury, czy grubości warstw wytworzonych lub nałożonych na podłożu. Dodatkowo, w pojęciu tym zawierają się zarówno pojedyncze nano-objekty (nanocząstki) jak i materiały objętościowe o strukturze nanometrycznej. Nanomateriały przyjęto zatem sklasyfikować pod względem wymiarów spełniających warunek nanoskali następująco:

- 1) nanoobjekty:
  - 1.1) 1 wymiar  $< 100$  nm (nanopłatki),
  - 1.2) 2 wymiary  $< 100$  nm (nanorurki, nanowłókna, nanodruty, nanopłytki),
  - 1.3) 3 wymiary  $< 100$  nm (nanocząstki, kropki kwantowe, nanocenosfery – puste w środku kuleczki (np. fullereny)),
- 2) nanometryczne materiały objętościowe:
  - 2.1) 1 wymiar  $< 100$  nm (nanometryczne warstwy naniesione na materiały lite),
  - 2.2) 2 wymiary  $< 100$  nm (materiały kompozytowe zbrojone np. nanorurkami, nanowłóknami, nanowłóknami),
  - 2.3) 3 wymiary  $< 100$  nm (materiały kompozytowe zbrojone nanocząstkami; lite materiały zbudowane z równoosiowego, nanometrycznego ziarna).

Przykładowe obrazy wybranych nanomateriałów przedstawiono na rys. IV.3.1.



Rys. IV.3.1. Przykładowe nanomateriały: (a) nanorurki węglowe, (b) nanowarstwy Mo/Si, (c) nanocząstki złota, (d) stop Al-Si o strukturze nanometrycznej (ze zbiorów autorów)

## IV.4. Ciecze metalowe na podłożu stałym

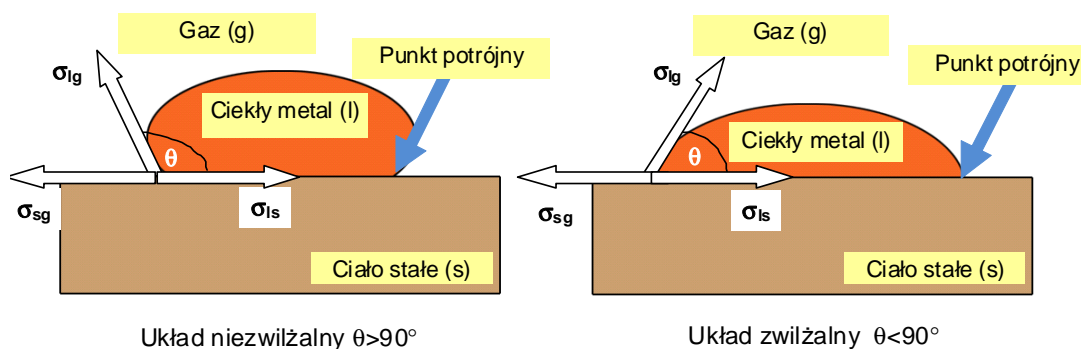
Natalia Sobczak, Jerzy J. Sobczak

Zjawisko zwilżania materiałów w stanie stałym (szczególnie materiałów ceramicznych) przez ciekłe metale odgrywa ważną rolę w wielu procesach odlewniczych. Wymaga istotnej uwagi zarówno wówczas, kiedy jest korzystne (w przypadku wytwarzania połączeń metalowo-ceramicznych metodami spajania, otrzymywania materiałów kompozytowych, nanoszenia warstw metalicznych, usuwania wtrąceń niemetalowych czy wręcz w analizie procesu zarodkowania), jak i wtedy, kiedy zjawisko to nie jest pożądane (dla zwiększenia trwałości użytkowej materiałów ogniotrwałych, stosowanych na tygle i inne oprzyrządowanie metalurgiczne).

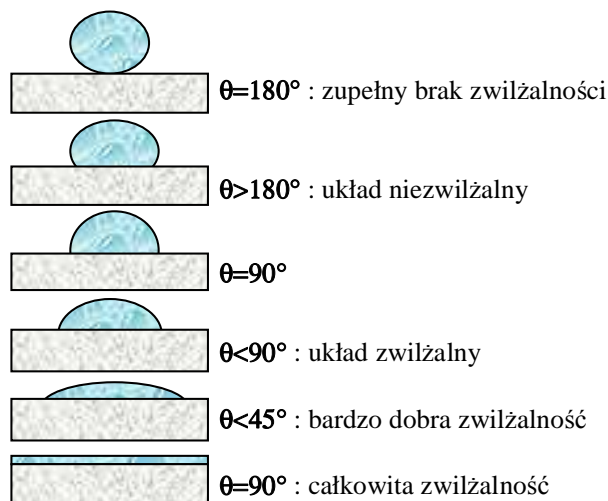
Stąd też w odlewnictwie współczesnym niezbędna jest analiza czynników, które mają istotny wpływ na zjawisko zwilżania materiałów ceramicznych przez ciekłe metale wraz z ustaleniem znaczenia tego zjawiska w kształtowaniu struktury i właściwości granic rozdziału połączeń metalowo-ceramicznych [1].

### IV.4.1. Podstawy teoretyczne

Charakterystykę stopnia zwilżania stanowi kąt zwilżania  $\theta$ , utworzony pomiędzy fazą ciekłą i podłożem stałym w punkcie styku trzech faz – stałej (s), cieczy (l) i gazowej (g) [2, 3] (rys. IV.4.1). Punkt styku trzech faz nosi nazwę „punktu potrójnego” (*triple point*) (w przestrzeni dwuwymiarowej) czy też „linii potrójnej” (rys. IV.4.2) (w przestrzeni trójwymiarowej). Wielkość kąta zwilżania  $\theta = 90^\circ$  jest wielkością krytyczną, stosowaną do umownego podziału na układy zwilżalne ( $\theta < 90^\circ$ ) i układy niezwilżalne ( $\theta \geq 90^\circ$ ) [4, 5] (rys. IV.4.2). Dla eksperymentalnego określenia kąta zwilżania najczęściej stosuje się metodę kropli leżącej (*sessile drop*), której różne modyfikacje są opisane w literaturze [4÷8].



Rys. IV.4.1. Schemat ilustrujący definicję kąta zwilżania  $\theta$  według równania równowagi Younga (opracowanie własne)



Rys. IV.4.2. Charakterystyka układów metalowo-ceramicznych w zależności od wielkości kąta zwilżania [8]



## V. Metody kontroli jakości metalu i odlewu

### V.1. Ocena składu chemicznego

*Stefan Koziet*

W ocenie składu chemicznego materiałów odlewniczych laboratoria dysponują wieloma metodami analizy chemicznej, z których dobiera się metody odpowiednie dla danego zadania analitycznego.

Metody można podzielić na metody fizyczne, gdy oceny składu chemicznego dokonuje się bezpośrednio na dostarczonej próbce badanego materiału oraz metody analizy klasycznej („na mokro”), gdzie etap analizy poprzedzony jest etapem roztwarzania próbki. Są to metody czaso- i pracochłonne, jednak ich dokładność jest większa i zalecane są jako analizy rozjemcze. Metody te są ponadto metodami odniesienia dla metod fizycznych analizy.

#### V.1.1. Pobieranie próbek do analizy

Sposób pobierania próbki z badanej partii materiału musi zapewnić jej reprezentatywność. Jest to czynnik istotny przede wszystkim dla materiałów niejednorodnych i może wpływać na niepewność oznaczenia zawartości badanych składników. Opis pobierania próbek dla stopów żelaza i różnych metod analizy chemicznej zawiera norma PN-ISO 14284:1998, dla stopów aluminium PN-EN 14361:2005, dla stopów miedzi PN-ISO 1811-2:2001. Dla innych stopów należy również przy pobieraniu próbek do analizy stosować odpowiednie normy.

#### V.1.2. Przygotowanie próbek do analizy

W przypadku próbek do analizy na mokro przygotowanie polega na rozтворzeniu odpowiednio rozdrobnionej naważki w dobranym do badanej substancji rozpuszczalniku. Normy na metody analizy chemicznej badanych pierwiastków zamieszczają sposób rozpuszczania badanych materiałów.

Próbki stałe do metod fizycznych przygotowuje się bądź przez rozdrabnianie próbki (wiórka, granulki), bądź przez odpowiednie przygotowanie powierzchni badanej (szlifowanie, polerowanie).

#### V.1.3. Metody klasyczne oceny składu chemicznego

Są to w większości tzw. metody bezwzględne, gdzie wartość pomiarowa różni się od wielkości analitycznej (zawartości) tylko współczynnikiem stechiometrycznym (zwykle jest to stała fizyczna). Do metod klasycznych zalicza się m. in. metody grawimetryczne, miareczkowe, elektrochemiczne, spektrofotometryczne i absorpcji atomowej.

W analizie metali metody te są opisane w normach i dla każdego oznaczanego pierwiastka w danym stopie opisana jest procedura analityczna dla tej metody.

Poniżej podano listę norm dla oznaczania zawartości niektórych pierwiastków w stopach żelaza metodami klasycznymi:

- 1) oznaczanie krzemu: PN-EN ISO 439:2010 (metoda wagowa),  
PN-EN 2489-1:1999 (metoda spektrofotometryczna dla zawartości krzemu do 1 % wag.)
- 2) oznaczanie fosforu: PN-EN ISO 10714:2004 (metoda spektrofotometryczna)  
PN-EN 10184:2006 (metoda spektrofotometryczna)
- 3) oznaczanie manganu: PN-EN 10071:2000 (metoda miareczkowa)  
PN-EN 10700:2001 (metoda AAS),
- 4) oznaczanie węgla: PN-EN 10036:1999 (metoda wagowa),
- 5) oznaczanie siarki: PN-EN ISO 4934:2005 (metoda wagowa),
- 6) oznaczanie chromu: PN-EN 24937:1984 (metoda miareczkowa),  
PN-EN 10188:2000 (metoda AAS),
- 7) oznaczanie niklu: PN-EN 24938:1994 (metoda wagowa lub miareczkowa),  
PN-EN 10136:1999 (metoda AAS),

## V.2. Badania struktury (makro- i mikro-)

*Małgorzata Warmuzek*

### V.2.1. Definicja pojęcia makro- i mikrostruktury

Odlew może być przedstawiony jako polikryształ, powstający w wyniku krzepnięcia ciekłego metalu lub stopu w zróżnicowanym przestrzennie polu temperatury. Jest zbudowany z pojedynczych krystalitów (ziaren) faz skondensowanych, takich jak roztwory stałe ciągłe lub graniczne oraz fazy międzymetaliczne. Tworzą one konstrukcję, przenoszącą obciążenia i oddziaływania zewnętrzne, określaną jako struktura odlewu.

Celem badań metalograficznych jest ujawnienie, zidentyfikowanie i opisanie rodzaju kształtu, wielkości i usytuowania poszczególnych krystalitów w objętości odlewu. Lokalne zmiany pola temperatury występujące w odlewie podczas krzepnięcia powodują bowiem tak istotne zróżnicowanie morfologiczne i fazowe na jego przekroju (na grubości ścianki), że na podstawie makroskopowych stałych materiałowych nie można bezpośrednio ocenić zgodności uzyskanych parametrów wytrzymałościowych z warunkami technicznymi, które odlew musi spełniać.

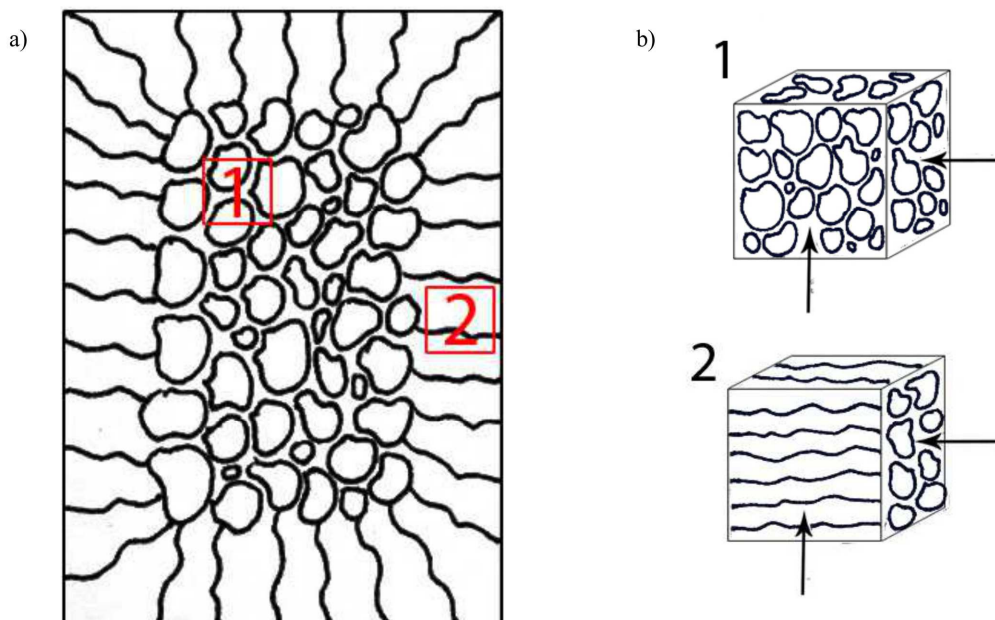
Pojęcia makro- i mikrostruktury zostały zdefiniowane na podstawie rozmiarów krystalitów poddawanych obserwacji.

Te krystality, które mogą być obserwowane okiem nieuzbrojonym lub przy niewielkim powiększeniu (maks. 25x), tworzą jego makrostrukturę (rys. V.2.1a) [1, 2].

Zazwyczaj obserwacje makrostruktury przeprowadzane są na przekroju odlewu, na przekrojach poszczególnych ścianek, w strefie lokalnych wpływów cieplnych i chemicznych (np. w strefie kontaktu z formą lub w strefie powierzchniowej, powstałej wskutek obróbki cieplno-chemicznej).

Obserwacje makrostruktury pozwalają uzyskać wstępne informacje o zróżnicowaniu mikrostruktury materiału w odlewie i usytuowaniu stref, w których należy wykonać szczegółowe badania.

Te krystality, które muszą być obserwowane przy powiększeniach większych niż 25x, tworzą mikrostrukturę [1, 2, 3]. Obraz mikroskopowy mikrostruktury reprezentuje ściśle określoną strefę odlewu, ukształtowaną lokalnie w jednorodnych warunkach krzepnięcia i na ogół charakteryzuje niewielką objętość materiału (rys. V.2.1b).



Rys. V.2.1. Zasady wyboru miejsca obserwacji mikrostruktury odlewu; a) obraz makrostruktury na przekroju odlewu; b) obraz mikrostruktury w zależności od wyboru miejsca wycięcia próbki i usytuowania płaszczyzny zglądu metalograficznego (opracowanie własne, wg [20])

W klasycznym ujęciu, prezentowanym przez Hornbogena i Josta, mikrostruktura zdefiniowana jest jako zespół elementów o jednorodnym rozmieszczeniu przestrzennym w objętości materiału [3]. Jest więc cechą materiału, determinującą bezpośrednio jego makroskopowe właściwości użytkowe [3, 4], co można wyrazić następującymi, najbardziej istotnymi zależnościami [4]:

## V.3. Badania właściwości mechanicznych, w tym wytrzymałości postaciowej odlewów

*Maria Maj, Wacław Stachurski*

Badania właściwości mechanicznych metali i stopów należą do jednej z grup oceny materiałowych charakterystyk metali i stopów, do których zalicza się również badania:

- 1) składu chemicznego,
- 2) metalograficzne, dotyczące ilości i rozmieszczenia wtrąceń niemetalicznych (służące do oceny czystości materiału) oraz mikrostruktury w stanie trawionym (do oceny poprawności procesu technologicznego),
- 3) fizyczne – określające gęstość, przewodnictwo cieplne i rozszerzalność, właściwości magnetyczne i elektryczne oraz inne,
- 4) radiograficzne, dotyczące wewnętrznych wad materiałowych,
- 5) specjalne dotyczące szczelności, ścieralności, odporności na działanie wysokiej temperatury.

Niektóre z wymienionych badań wykorzystuje się przy odbiorach technicznych, jak też obliczeniach teoretycznych czy symulacyjnych, przy czym badania właściwości mechanicznych stanowią zawsze podstawę tych czynności, gdyż określone są jednoznacznie, cyfrowo. Właściwości mechaniczne stanowią najczęściej kryterium odbioru półproduktów i gotowych wyrobów.

Badania właściwości mechanicznych metali i stopów należą do badań wytrzymałościowych, dostarczających ściśle dane liczbowe co do działania siły i jej skutków. Dane te służą wówczas do oceny jakości a także do porównywania wyników uzyskiwanych w poszczególnych etapach produkcji. Rozróżnia się badania statyczne (na rozciąganie, ściskanie, zginanie, skręcanie lub złożone), w których narastanie działającej siły jest powolne oraz badania dynamiczne, podczas których siły narastają od zera do maksimum w bardzo krótkim czasie (badanie udarności, odporności na zmęczenie).

Często odlewane części maszyn poddawane są różnorodnym obciążeniom eksploatacyjnym w środowisku gazów i cieczy, przy działaniu temperatury, nierzadko zmiennej w czasie. Przykładem może być tarcza hamulca samochodowego, która powinna wykazywać odporność na wszystkie wymienione czynniki środowiskowe oraz wykazywać właściwą dla danego zastosowania wytrzymałość zmęczeniową. Kompleksowe opracowanie technologii i techniki wytwarzania wymaga wówczas rozwiązania szeregu kwestii metalurgicznych, metaloznawczych, mechanicznych, w tym wytrzymałościowych, wśród których badaniom właściwości mechanicznych stopu należy przypisać pierwszorzędne znaczenie. Przykład może stanowić żeliwo szare, dla którego wartość doraźnej wytrzymałości na rozciąganie warunkuje jego nazwę.

W celu efektywnego wykorzystania odlewanej stopu, oprócz rodzaju obciążenia i środowiska niezbędne jest jeszcze kształtowanie wytrzymałościowe, dzięki któremu eliminuje się zbędny materiał i zwraca szczególną uwagę na strefy najbardziej obciążone. Do tych obszarów powinny być odnoszone wszelkie próby związane z badaniem właściwości mechanicznych i użytkowych stopu, stąd też wynika wielka ich różnorodność.

### V.3.1. Próbkki indywidualnie odlewane, przylane i pobierane z odlewów

#### **Badania właściwości mechanicznych – wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia**

Badania mechaniczne dzieli się według różnych kryteriów (np. statyczne i dynamiczne), w temperaturze pokojowej, podwyższonej i obniżonej, różnych środowiskach itp. Najczęściej przeprowadzane badania statyczne obejmują próby rozciągania, ściskania, zginania, skręcania, ścinania i badania twardości. Do badań dynamicznych należy próba udarności oraz próby zmęczeniowe. Wyniki prób wytrzymałościowych są silnie zależne od procedury pobierania próbek do badań i warunków przeprowadzania próby. Dlatego też, aby wyniki mogły być między sobą porównywane należy ściśle przestrzegać wymagań zawartych w odpowiednich normach. Obecnie obowiązujące są normy europejskie oznaczane jako EN, a w przypadku ich braku – normy polskie np. PN-91/H-04310. Dotyczą one kształtu i wielkości próbki, prędkości rozciągania, która zawarta jest w granicach 3÷30 MPa/s. Ze względu na bardzo zróżnicowane właściwości stopów żelaza i metali nieżelaznych, praktycznie do każdego stopu dobiera się najkorzystniejszy kształt i wielkość próbek, co uwarunkowane jest właściwościami sprężystymi i plastycznymi. Wyniki badań właściwości mechanicznych zależą od wielu ubocznych czynników, takich jak kształt i wielkość badanego odlewu i pobranej z niego próbki, od sposobu dokonywanych pomia-

## V.4. Metody kontroli jakości metalu i odlewu

*Zenon Ignaszak, Adam Tchórz*

### V.4.1. Badania nieniszczące odlewów

#### V.4.1.1. Istota i trendy w wykorzystywaniu nieniszczących badań odlewów

Definicja badań nieniszczących zawarta jest w ich nazwie. W żadnym przypadku badania te nie mogą powodować degradacji cech użytkowych odlewów lub powodować niebezpieczeństwo takiej degradacji w okresie eksploatacji wyrobu odlewanego. Normy, które dotyczą tych badań (wymienione będą dalej w treści kolejnego podrozdziału), stanowią rodzaj drogowskazu i wytycznych do realizacji poszczególnych metod badań. Podręcznikowy, skondensowany opis tych badań można znaleźć w poradnikach inżyniera wydawanych w wielu krajach. Na szczególną uwagę zasługuje wielotomowy poradnik *Techniques de l'Ingenieur* wydawany we Francji, z którego kilka tomów jest poświęconych odlewnictwu, a wśród nich kilka rozdziałów na temat badań nieniszczących ([www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)). Wiadomo, jak duża jest odpowiedzialność spoczywająca na dopuszczeniu odlewu do użytkowania i respektowaniu kryteriów jakości narzuconych przez twórcę-projektanta wyrobu. Klasyfikacja wad odbywa się przede wszystkim w odniesieniu do opublikowanych atlasów-katalogów [1, 2], ale także do opracowanych przez poszczególne odlewnie katalogów własnych (często z wprowadzeniem autorskiego nazewnictwa wad), z fotografiami wad, co ułatwia kontrolerom jakości badania i identyfikację.

Szerszy opis podstaw teoretycznych i aplikacji badań nieniszczących w technice znaleźć można w specjalistycznej literaturze [3÷5].

Wady odlewów, które mogą być dostrzegane z zewnątrz (wady kształtu i wady powierzchni) są relatywnie prostsze do identyfikacji i kwantyfikacji. Wady wewnętrzne, a więc wady nieciągłości, m.in. pochodzenia skurczowego lub/i gazowego, wymagają innych technik detekcji. Dotyczy to także wtrąceń i wad niezgodności lub anomalii struktury.

Mówiąc o nowoczesnych tworzywach i procesach technologicznych w odlewnictwie, ich projektowaniu, aplikacjach i sterowaniu jakością odlewów [6], nie sposób pominąć wykorzystanie metod nieniszczących (w Europie anglojęzycznej NDT – *Non Destructive Testing*, w USA NDE – *Non Destructive Estimation*) do badania odlewów, jako podstawowych komponentów niezliczonej ilości konstrukcji i obiektów technicznych. Należy przy tym wskazać na znaczenie tych metod nie jedynie jako sposobu arbitralnej oceny wybranych cech, świadczących o jakości odlewów, ale także w celu identyfikacji zjawisk odpowiedzialnych za wykryte anomalie przebiegu procesów wytwarzania, co służy ewidentnie optymalizacji i doskonaleniu stabilności parametrów procesu odlewania. Prowadzi to ewidentnie do rozwoju poszczególnych technologii odlewniczych.

Cykl publikacji [7÷16] zawiera wyniki autorskich prac i stanowi omówienie specyfiki, praktycznych szczegółów badań, aktualnego stanu i trendów w badaniach nieniszczących odlewów. Procedury i metodyka badań nieniszczących jakie są stosowane dla odlewów, różnią się niekiedy istotnie od dedykowanych do badań odkuwek, połączeń spawanych itp. Wynika to ze specyfiki gatunków stopów, map struktury wykonanych odlewów, ich wielkości oraz ze świadomości przeznaczenia odlewu i dopuszczenia tzw. „*tolerance of damage*” (dopuszczalna wadliwość) w odniesieniu do całej konstrukcji zawierającej dany wyrób odlewany.

Jest rzeczą zasadniczą, aby autor koncepcji konstrukcyjnej zamawianego odlewu lub firma składająca zamówienie oraz technolog w odlewni znaleźli kompromis między ceną i użytecznością wyrobu odlewanego w przewidywanych warunkach eksploatacji, z zachowaniem świadomie wybranych współczynników bezpieczeństwa. Nie należy mierzyć za wszelką cenę (także i tę sprzedaży) ponad wymaganą półkę jakości, oferując klientowi kosztowną „nadjakość”.

Należy przy tym podkreślić, że w ten sposób zmniejsza się margines potencjalnie możliwego błędu odlewni i podnosi poprzeczkę w dotrzymywaniu stabilności produkcji.

Opracowane prawidłowo zapytania ofertowe i zamówienia winny zatem zawierać [17]:

- 1) przeznaczenie odlewu, ciężar i wymiary, specyfikacje wymaganej jakości (wytężenie eksploatacyjne, strefy wytężenia i strefy jakości, poziom ponoszonego ryzyka, znaczenie odlewu w całości konstruowanego obiektu technicznego),
- 2) zdefiniowanie materiału (stopu) i gatunek odniesiony do obowiązującej normy lub gatunku narzuconego przez klienta,
- 3) ilość odlewów (długości serii, zamówienie bieżące i ewentualność powtórzenia zamówienia w przyszłości),
- 4) terminy i sekwencje dostaw,

## V.5. Wybrane właściwości fizyczne

*Andrzej Gazda*

### V.5.1. Wstęp

Właściwość fizyczną materiału można zdefiniować jako zależną od temperatury, mierzalną wielkość makroskopową, charakteryzującą zjawisko lub stan fizyczny substancji, w której nie zachodzą reakcje chemiczne. Niekiedy używa się terminu właściwości termofizyczne, aby zaakcentować funkcyjną zależność właściwości fizycznych od temperatury. Właściwości fizyczne określane jako intensywne (np. twardość lub temperatura) to wielkości lokalne, niezależne od rozmiarów i ilości materiału. Ekstensywne właściwości fizyczne (np. masa lub objętość) są to wielkości addytywne, proporcjonalne do ilości materiału w układzie. Stosunek dwóch ekstensywnych właściwości jest wielkością intensywną (np. gęstość = masa/objętość).

Dla każdej właściwości fizycznej można ustalić jednostkę miary, którą jest umownie wybrany stan tej właściwości. Wartość liczbową, ustalona za pomocą pomiaru, wyrażona w jednostkach miary wielkości (właściwości) określa jej stan fizyczny [1].

Pomiar każdej wielkości fizycznej obarczony jest niepewnością pomiarową – systematyczną, mającą swoje źródło w możliwościach aparaturowych i dominującą gdy nie występuje rozrzut statystyczny wyników pomiarów, lub przypadkową – gdy występuje statystyczny rozrzut wyników pomiarowych, a dokładność pomiarowa jest duża. Informacji o danych liczbowych wielkości fizycznych powinna towarzyszyć informacja o niepewności pomiarowej.

Właściwości fizyczne i mechaniczne wraz z charakterystykami materiałowymi takimi jak np. skład chemiczny, skład fazowy, mikrostruktura, rodzaj obróbki cieplnej itp. służą do projektowania i/lub optymalnego wyboru właściwego materiału do określonych zastosowań, przewidywania jego zachowania w podwyższonej temperaturze, optymalizacji warunków przebiegu procesów technologicznych, np. obróbki cieplnej, poprawy jakości oraz opracowania nowych materiałów i technik badawczych.

Wielkości fizyczne znajdują szczególne zastosowanie w dziedzinie projektowania odlewów metodą komputerowej symulacji procesów krzepnięcia i stygnięcia, z uwzględnieniem przemian fazowych, zachodzących w stanie ciekłym i stałym. Zmiana warunków początkowych, brzegowych oraz geometrii układu pozwala na testowanie i optymalizację energooszczędnych i materiałoszczędnych eksperymentów wirtualnych zamiast wykonywania realnych odlewów.

Programy symulacyjne są obecnie powszechnie stosowane i wspomagają skutecznie pracę konstruktorów i technologów. Dają wymierne korzyści, zarówno ekonomiczne jak i w zakresie zapewnienia dobrej jakości wyrobów, takie jak:

- 1) ograniczenie liczby wykonywanych prototypów i oszczędność materiału,
- 2) skrócenie czasu przygotowania odlewu i zmniejszenie liczby modyfikacji związanych z doбором parametrów procesu odlewania,
- 3) możliwość identyfikacji i analizy ewentualnych problemów, które mogą się pojawić oraz możliwość ich rozwiązywanie na etapie projektowania,
- 4) zmniejszenie liczby wadliwych odlewów,
- 5) zwiększenie dokładności i powtarzalności procesu technologicznego.

Symulacja komputerowa (modelowanie) procesów odlewniczych umożliwiającą określenie pól temperatury, ciśnienia i szybkości przepływu cieczy, stężenia składników stopowych, naprężeń oraz pola fazowego pozwala nie tylko na analizę i wizualizację procesu wypełnienia formy metalem, dobór układów zalewania i doprowadzenia metalu, projektowanie wielkości i rozmieszczenia nadlewów, działania otulin izolacyjnych i ochładzalników lecz również umożliwia prognozowanie miejsc występowania wad odlewniczych (porowatość), przewidywanie struktury, właściwości mechanicznych i kinetyki przemian fazowych zachodzących w stanie stałym [2].

Jakość i wiarygodność, tzn. stopień w jakim zależne od temperatury i niezbędne do numerycznego rozwiązywania równań wymiany masy i energii dane fizyczne odzwierciedlają realne materiały zastosowane w procesie odlewniczym, stanowią o sukcesie komputerowego modelowania procesów odlewniczych.

Źródłem danych fizycznych może być komercyjne oprogramowanie służące do obliczeń termodynamicznych i tworzenia wykresów fazowych dla układów wieloskładnikowych, oparte o bazy danych termodynamicznych (np. JMatPro, Pandat) lub bazy danych materiałowych, gdzie gromadzi się dane eksperymentalne – wartości właściwości

## V.6. Ocena zawartości wtrąceń niemetalowych (gazowych i stałych)

*Stanisław Rządkosz*

### V.6.1. Główne wtrącenia i zanieczyszczenia metaliczne i niemetaliczne występujące w stopach aluminium

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, występujące w aluminium i jego stopach stałe wtrącenia niemetaliczne można sklasyfikować w ośmiu grupach.

**Grupa 1** – błonki tlenkowe zbudowane z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  często występujące w powiązaniu z porowatością wodorową. Ze względu na źródło pochodzenia rozróżniamy cztery ich odmiany:

- tlenki pochodzące z procesu elektrolizy,
- tlenki powstające w wyniku naturalnego utleniania kąpieli metalowej w kontakcie z powietrzem,
- tlenki wprowadzone wraz z materiałami wsadowymi np. skorodowane gąski,
- tlenki pochodzące z materiału wymurówki pieca topielnego lub odstojowego.

Wymienione tlenki często zanieczyszczone są szeregiem pierwiastków jak: N, Na, Mg, Si, Zn, Fe, Ca, K, Cl i F.

**Grupa 2** – płatki tlenków zbudowane z  $\text{MgO}$  lub spineli typu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  $\text{MgO}$  o wymiarach zbliżonych do wtrąceń z grupy 1 są wynikiem nadmiernego przegrzania stopu zawierającego w swoim składzie podwyższoną zawartość Mg. Mogą również powstać na skutek reakcji ciekłego metalu z wymurówką pieca.



**Grupa 3** – kuliste tlenki, głównie  $\text{SiO}_2$ , o średnicy od 1 do 5  $\mu\text{m}$ , dostające się do ciekłego metalu z zewnątrz np. w wyniku zanieczyszczenia wsadu metalowego materiałami formierskimi lub też na skutek złej jakości krzemu metalicznego.

**Grupa 4** – wtrącenia soli łatwo rozpuszczalne w wodzie zawierające głównie Al, Mg, Ca, K, Cl, F i S. Stanowią pozostałość stosowanych topników. Obecność wtrąceń typu  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , a może być wynikiem reakcji przebiegających podczas rafinacji kąpieli metalowej pomiędzy chlorem a metalicznymi zanieczyszczeniami.

**Grupa 5** – węgliki, głównie  $\text{Al}_4\text{C}_3$  występujące w postaci heksagonalnych lub prostokątnych płytek o wielkości od 0,1 do 1  $\mu\text{m}$ . Węgliki te powstają przeważnie w procesie elektrolizy. W metalu pierwotnym to znaczy, w aluminium elektrolitycznym zawartość węglików waha się w przedziale 10÷30 ppm, natomiast w odlewach w zakresie 2÷12 ppm. Oprócz węglików glinu w ciekłym metalu mogą również występować węgliki typu  $\text{TiC}$  oraz  $\text{CaC}_2$ .

**Grupa 6** – azotki, występujące w postaci związku  $\text{AlN}$  w ilości 2÷12 ppm. Występuje on w postaci błonek o grubości 0,1÷3,0  $\mu\text{m}$  i długości 10÷50  $\mu\text{m}$ , bardzo często wraz z błonkami tlenkowymi. Azotki glinu mogą powstawać w trakcie intensywnego mieszania nadmiernie przegrzanej kąpieli metalowej lub też nieprawidłowo prowadzonego zabiegu rafinacji ciekłego metalu azotem. Przy bardzo niekorzystnych warunkach może wystąpić zanieczyszczenie azotem kąpieli metalowej do poziomu 200 ppm.

**Grupa 7** – borki typu  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{VB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$  i  $\text{CrB}_2$  stanowiące wynik przemodyfikowania stopu, zbyt długiego czasu odstawiania – zjawisko sedymentacji zarodków krystalizacji. Borki występują w postaci heksagonalnych lub prostokątnych płytek o wielkości 0,1 do 10  $\mu\text{m}$ , przy czym wtrącenia te mają tendencję do tworzenia skupisk – klasterów o wielkości dochodzącej do wartości 50  $\mu\text{m}$ . W aluminium pierwotnym zawartość borków wynosi około 1 ppm natomiast w materiale modyfikowanym zawartość ta wzrasta do wielkości 100 ppm. Ich obecność jest wynikiem celowego wprowadzenia boru podczas rafinacji aluminium w gatunku A1E w celu usunięcia pierwiastków takich jak Ti, V, Cr obniżających znacznie przewodność elektryczną aluminium.

**Grupa 8** – wydzielenia pierwotnych kryształów związków międzymetalicznych takich jak  $\text{Al}_3\text{Zr}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$  czy  $\text{Al}_6\text{Mn}$ . Obecność ich w ciekłych stopach aluminium ma zdecydowanie negatywny wpływ zarówno na własności technologiczne odlewanej kąpieli jak i na jakość finalnego produktu. Powstają one na skutek złej jakości zapraw lub też w wyniku zbyt niskiej temperatury ciekłego metalu w momencie wprowadzania zapraw.

Zanieczyszczeniami metalicznymi w stopach są:

- 1) pierwiastki alkaliczne takie jak Na i Li pochodzące z procesu elektrolizy względnie przechodzące do kąpieli metalowej z soli wchodzących w skład topników stosowanych przy topieniu i rafinacji aluminium i jego stopów. Zawartość tych pierwiastków w stopach aluminium może osiągać wartość do 60 ppm, przy czym jako

## V.7. Ocena krzywej stygnięcia w metodzie analizy termicznej i derywacyjno-gradientowej ATDG

*Jerzy Zych*

### V.7.1. Wprowadzenie

Analiza termiczna stopów polegająca na rejestracji i analizie przebiegu krzywych ich stygnięcia, znajduje coraz szersze zastosowanie w odlewnictwie. Przede wszystkim stosowana jest w odlewnictwie żeliwa do oceny składu chemicznego i właściwości mechanicznych [1, 27]. W odlewnictwie staliwa stosowana jest nieco rzadziej, głównie dla przybliżonego określenia zawartości węgla oraz oceny efektywności procesu odtlania [2]. Podobne ograniczone zastosowanie ma analiza termiczna w przypadku odlewania stopów metali nieżelaznych. Dla stopów aluminium wykorzystywana jest do oceny zawartości krzemu w siluminach, identyfikacji wydzielających się faz [20, 26], oceny efektów modyfikacji [3, 26] oraz oceny właściwości wytrzymałościowych [24].

Analiza, termiczna zaliczana jest do pośpiesznych metod oceny jakości ciekłego metalu. Obok niej znane są w tej grupie takie metody jak: metoda spektralna, potencjometryczna, elektrolityczna i inne. Aktualnie najszerzej stosowana jest w praktyce przemysłowej analiza termiczna (AT) i termiczno-derywacyjna (ATD), głównie z uwagi na ich niezawodność, prostotę pomiaru oraz stosunkowo niskie koszty aparatury. Prognozowane upowszechnienie tych metod [4] znajduje aktualnie realizację [7, 21, 24, 29, 30].

Przykładem może być ocena, poprzez pomiar przechłodzenia, zdolności żeliwa do zarodkowania, przez co można ustalić celowość zabiegu modyfikacji oraz podać dokładną ocenę jakości stosowanych modyfikatorów [19].

Stosowanie pośpiesznych metod oznaczania składu chemicznego jest niezbędne dla właściwego kierowania procesem technologicznym wytwarzania odlewów. Skład chemiczny stopów jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o końcowych właściwościach materiału uzyskanych w odlewach. Ponadto, ze składem chemicznym związane są praktycznie wszystkie właściwości technologiczne, których znajomość jest niezbędna do produkcji odlewów bez wad.

Kontrola metalu w stanie ciekłym, przy użyciu pośpiesznych metod, pozwala na wprowadzenie bieżących zmian w procesie, uzupełnianie lub poprawę składu chemicznego, modyfikację stopu, itp. Analiza termiczna pozwala w krótkim czasie, nie przekraczającym najczęściej trzech minut, na uzyskanie istotnych dla kierowania procesem technologicznym informacji o ciekłym stopie, np. żeliwie przygotowywanym do zalewania form. Zaliczyć tu należy przede wszystkim informacje, dotyczące składu chemicznego, a zwłaszcza wartości stopnia nasycenia eutektycznego  $S_e$ , równoważnika węgla  $CE$  oraz gatunku żeliwa (właściwości mechaniczne wyznaczonych w prętach próbnych), jak również informacje dotyczące oceny przydatności żeliwa wyjściowego do modyfikacji i oceny efektywności tego procesu. Wobec dużej różnorodności w jakości dostaw materiałów, nie da się, bez informacji o ciekłym metalu, produkować odlewów o stabilnych właściwościach. Takie właśnie informacje otrzymuje się stosując metodę analizy termicznej.

Praktycznie żadna inna z wymienionych wcześniej metod pośpiesznych nie daje tak dużej ilości informacji o stopach (żeliwie, stopach Al) w stanie ciekłym. Dlatego jest ona najczęściej stosowana. Kontrola stanu fizyko-chemicznego metalu w okresie, kiedy jest on w stanie ciekłym oraz wprowadzana na bazie tych informacji kontrolowana korekta tego stanu, pozwala na uniknięcie szeregu wad w odlewach. Chodzi tu głównie o takie wady jak: zabielenia (W-411), zaszarzenia (W-412), niedolew (W-102), obciążnięcia (W-206), jama skurczowa (W-403). Tak więc kontrola procesu przygotowania ciekłego metalu, jego pozapiecowej obróbki (modyfikacji, sferoidyzacji), jest jedną z najbardziej efektywnych metod eliminacji lub znacznego ograniczenia ilości wad odlewniczych.

### V.7.2. Metody analizy termicznej

Z punktu widzenia sposobu interpretacji wyników pomiarów, w praktyce stosowane są trzy metody analizy termicznej:

- 1) klasyczna metoda analizy termicznej (AT),
- 2) różniczkowa (derywacyjna) metoda analizy termicznej (ATD),
- 3) derywacyjno-gradientowa (ATDG).

## VI. Masy formierskie i rdzeniowe

### VI.1. Materiały osnowy piaskowej

*Jan Lech Lewandowski*

Osnowa piaskowa jest najważniejszym składnikiem mas formierskich i rdzeniowych. Panuje pogląd, że masa jest tym lepsza im mniej zawiera materiału wiążącego. Są stosowane metody, w których masę stanowi sama osnowa piaskowa, a czynnikiem wiążącym jest podciśnienie, czy pole magnetyczne, a także są masy, w których materiałem wiążącym jest sama woda (lód) [1].

Materiały wykorzystywane na osnowę mas są w zasadzie stosowane także na osnowę powłok ochronnych. Różnica występuje przede wszystkim w składzie ziarnowym.

Materiały na osnowę powinny charakteryzować się następującymi właściwościami: odpornością na działanie wysokiej temperatury, małą rozszerzalnością cieplną, brakiem przemian polimorficznych i odpowiednim składem ziarnowym. Wszystkie te wymagania spełniają tylko niektóre rodzaje osnowy, np. cyrkon (minerał) czy chromit (tab. VI.1.1). Ważny jest charakter chemiczny materiałów stosowanych na osnowę. Z głównych materiałów charakter kwaśny ma kwarc, lekko kwaśny mają: cyrkon, korund i szamot, lekko zasadowy ma chromit, a zasadowy mają: magnezyt, magnezyto-chromit i oliwin.

#### Piasek kwarcowy

Piasek kwarcowy, ze względu na dostępność surowca i stosunkowo niską cenę, ma największe zastosowanie jako osnowa piaskowa mas formierskich (i rdzeniowych). Niekiedy jest stosowany jako osnowa powłok ochronnych. Przepisy polskie, dotyczące piasku kwarcowego (PN-85/H-11001), przewidują 7 gatunków (1K÷7K) w zależności od zawartości lepiszcza (ziaren o wielkości  $\leq 0,02$  mm) (tab. VI.1.2) i 7 grup w zależności od wielkości ziaren frakcji głównej (tab. VI.1.3). W tych przepisach pod pojęcie kwarcowe piaski formierskie włączono piaski zawierające powyżej 2 % lepiszcza (5K÷7K) znane pod nazwą piaski naturalne [1]. Zawartość  $\text{SiO}_2$  w piasku kwarcowym powinna być możliwie największa, natomiast niekorzystnych domieszek jak najmniejsza (tab. VI.1.2). Domieszki występują przeważnie w postaci drobnych cząstek osadzonych na powierzchni ziaren, stąd istotne znaczenie ma płukanie piasków, szczególnie gatunków 1K i 2K. Płukanie piasków używanych jako osnowa ma także korzystne znaczenie dla zwilżalności powierzchni ziaren przez ciekłe spoiwo [2]. W piaskach 1K÷4K ograniczona jest zawartość  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  obejmująca różne związki żelaza ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), których zawartość przelicza się na  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i porównuje z wymaganiami obowiązujących przepisów. W piaskach dla staliwa szkodliwą domieszką jest również piryt  $\text{FeS}_2$ , którego zawartość nie powinna przekraczać 0,15 % [1].

Tabela VI.1.1. Niektóre właściwości materiałów stosowanych jako osnowa mas [1]

Osnowa-piasek	Zalecany skład ziarnowy piasku	Gęstość, $\text{g/cm}^3$	Gęstość pozorna (usypowa), $\text{g/cm}^3$	Temperatura topnienia, $^{\circ}\text{C}$	Rozszerzalność liniowa w $900^{\circ}\text{C}$ , %	Odporność na penetrację ciekłego stopu	Współdziałanie z materiałami wiążącymi
Kwarcowy	Różny	2,65	1,40÷1,60	1680÷1710	1,40÷1,56	Zadawalająca – zależy od wielkości ziaren	Dobre ze wszystkimi rodzajami materiałów wiążących
Cyrkonowy	Średni i drobnoziarnisty	4,30÷4,70	2,42÷2,84	2200÷2400	0,25	Zadawalająca – zależy od wielkości ziaren	Doskonałe ze wszystkimi rodzajami materiałów wiążących
Chromitowy	Średni i drobnoziarnisty	4,40÷4,60	2,60÷2,80	1850÷1900	0,65	Doskonała	Dobre – w zasadzie ze wszystkimi rodzajami materiałów wiążących
Oliwinowy	Średni i drobnoziarnisty	3,20÷3,60	1,80÷2,10	1760÷1800	1,02	Dobra	Zadawalające, oprócz mas z kwaśnymi utwardzaczami



## VI.2. Materiały wiążące i inne materiały formierskie

*Jan Lech Lewandowski*

### Gliny formierskie

Glina formierska jest odpowiednio przerobioną kopaliną zawierającą powyżej 50 % lepiszcza, czyli ziaren o wielkości  $\leq 0,02$  mm. Jest ona tym lepsza, im większa jest w niej zawartość lepiszcza i im w tym lepiszczu jest więcej (i o lepszej zdolności wiązania) minerałów ilastych. Ze względu na zdolność wiązania dla odlewnictwa najbardziej interesujące są montmorillonity (smektyty), których głównym przedstawicielem jest montmorillonit o wzorze tlenkowym  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Są to glinokrzemiany warstwowe, zbudowane z pakietów typu 2 : 1 (dwóch warstw krzemowotlenowych i warstwy gibbsytowej). W zależności od struktury pakietów wyróżnia się montmorillonity dioktaedryczne (montmorillonit, beidelit, nontronit) i trioktaedryczne (saponit), a w zależności od kationów wymiennych (międzypakietowych): sodowe, wapniowe, potasowe, amonowe i inne. Najcenniejszym dla odlewnictwa jest montmorillonit sodowy. Minerale grupy montmorillonitu są głównymi składnikami bentonitów, iłów bentonitowych i iłów montmorillonitowych. Największą zawartość tych minerałów ma bentonit (przyjmuje się, że co najmniej 70 %). Iły bentonitowe zawierają mniej minerałów tej grupy i stanowią utwory przejściowe od bentonitów do iłów illitowych, czy kaolinitowych. Iły montmorillonitowe zawierają zasobne w minerały mieszanki pakietowe typu montmorillonit/illit, montmorillonit/kaolinit i inne [1]. Wspólną cechą skał zasobnych w montmorillonity jest zdolność do pęcznienia, podatność na dyspergowanie wodą oraz zdolność do tworzenia zawiesin tiksotropowych. Średnia wielkość ziarna ( $D_{50}$ ) minerałów grupy montmorillonitu wynosi około 2  $\mu\text{m}$  [2]. Grubość blaszek montmorillonitu może wynosić nawet tylko 1 nm i jest 10÷20 razy mniejsza od grubości blaszek kaolinitu [3]. Dla odlewników jest ważna mała wielkość ziarna minerałów grupy montmorillonitu i duża powierzchnia właściwa blaszek, co istotnie wpływa na zdolność wiązania bentonitu i iłów, oraz duża pojemność sorpcyjna kationów (zdolność do wymiany jonów), wynosząca 70÷120 mval/100 g (kaolinit 3÷15 mval/100 g). Ta ostatnia właściwość umożliwia polepszenie jakości wapniowych bentonitów odlewniczych przez zastąpienie na pozycjach wymiennych kationów  $\text{Ca}^{+2}$  lub/i  $\text{Mg}^{+2}$  kationami  $\text{Na}^+$ . Jest to proces aktywacji, który przeprowadza się zwykle podczas przeróbki kopaliny na bentonit odlewniczy, a rzadziej podczas sporządzania (mieszania) masy dodając zwykle 1÷5 części wagowych  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  [2]. Uzyskany produkt, nazywany bentonitem aktywowanym, ma największe zastosowanie jako materiał wiążący syntetycznych mas formierskich. Bentonit aktywowany, a przede wszystkim bentonit sodowy (bentonit Na) ma – w stosunku do bentonitu wapniowego (bentonit Ca) – większą: zdolność pęcznienia, zdolność wiązania w zakresie wilgotności roboczej oraz odporność na działanie podwyższonej temperatury. Masy z takim bentonitem cechuje zwykle lepsza plastyczność i mniejsza wrażliwość na nawilżenie (w zakresie wilgotności roboczej) pod względem właściwości wytrzymałościowych.

Częściowe wytłumaczenie znaczenia procesu aktywacji bentonitów można uzyskać w wyniku analizy schematu (rys. VI.2.1) [29]. Na tym rysunku zawartość wilgoci w masie nie jest podana w procentach, ale przyjęto za jednostkę wilgotność, przy której występuje maksimum wytrzymałości (wilgotność optymalna pod względem wytrzymałości  $W_{ow}$ ) i odłożono na osi odciętych wielokrotności tej wilgotności ( $1W_{ow}$ ÷ $4W_{ow}$ ). Bentonit nie mający jonów wymiennych na powierzchni pakietów nadawałby masie wytrzymałość w stanie wilgotnym, zilustrowaną na rys. VI.2.1 krzywą  $O$ . Wytrzymałość takiej masy szybko spada wraz ze wzrostem zawartości wilgoci i już przy wilgotności  $3W_{ow}$  jest równa zero. Uzasadnienie takiego przebiegu krzywej  $O$  wynika z faktu, że wytrzymałość kształtują tylko wiązania powierzchniowe, w tym siły Van der Waalsa i Londona. Do zawartości wilgoci wynoszącej  $1W_{ow}$  występuje w zasadzie tylko woda sztywno związana, czyli zaadsorbowana na pakietach montmorillonitu w postaci błonki utworzonej przez dipolarne cząsteczki  $\text{H}_2\text{O}$ . Zwiększenie wilgotności powyżej punktu  $1W_{ow}$  (przy braku jonów wymiennych na powierzchni pakietów) powoduje szybki spadek wytrzymałości, gdyż same siły powierzchniowe mają mały zasięg oddziaływania i obok wody sztywno związanej zaczyna występować coraz grubsza warstewka coraz słabiej związanej wody, aż do warstewek wody zupełnie niezwiązanej (wody swobodnej). Stąd też wynika szybki spadek wytrzymałości zilustrowany krzywą  $O$  na rys. VI.2.1 po przekroczeniu wilgotności  $1W_{ow}$  i masa z taką gliną jest bardzo wrażliwa na przewilżenie (duży spadek wytrzymałości przy małym zwiększeniu wilgotności masy). Zbliżony do krzywej  $O$  na rys. VI.2.1 przebieg zmiany wytrzymałości mają masy z gliną kaolinitową, która charakteryzuje się małą pojemnością wymiany jonowej.

Spadek wytrzymałości ze wzrostem wilgotności, po przekroczeniu maksimum wytrzymałości, jest mniejszy, gdy większa jest pojemność wymiany jonowej gliny formierskiej oraz gdy na pozycjach są jony o mniejszej wartościowości, a najlepiej jednowartościowe kationy  $\text{Na}^+$ . Znajdujące się na powierzchni pakietów wymienne jony (zwykle kationy) zaczynają hydratować dopiero powyżej wilgotności  $1W_{ow}$  tworząc wiązania mostkowe, które zaczynają wpływać na kształt

## VI.3. Klasyfikacja procesów przerobu mas formierskich i rdzeniowych, urządzenia, sterowanie procesami

*Aleksander Fedoryszyn*

Masy klasyczne (syntetyczne, naturalne, półsyntetyczne i gliniaste) są podstawowym tworzywem do sporządzania form piaskowych. Ilość odlewów wykonywanych z udziałem tych mas wynosi 40÷80 % w zależności od kraju i poziomu przemysłu odlewniczego [1].

Technologia klasycznych mas syntetycznych ma zastosowanie w zasadzie do sporządzania form, zwłaszcza w odlewnictwie żeliwa. Technologie wytwarzania form i rdzeni są oparte na masach samoutwardzalnych: SMS z żywicami, ze szkłem wodnym, z cementem oraz spoiwami fosforanowymi [1].

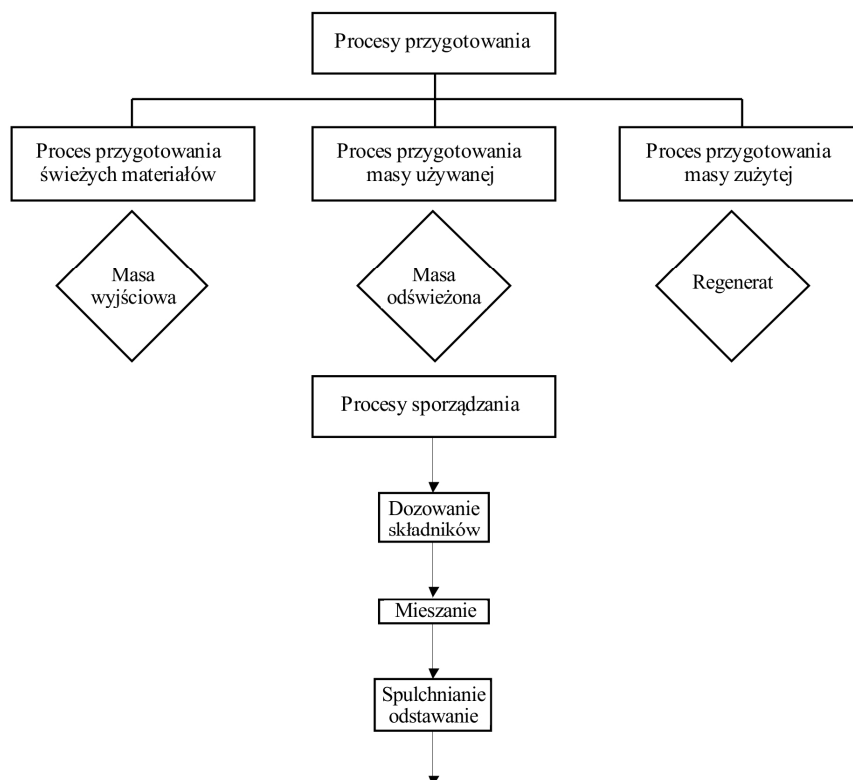
Technologia form piaskowych wykonywanych z masy syntetycznej z bentonitem dominuje i będzie dalej podstawową dzięki osiągnięciom mechanizacji i automatyzacji procesów formowania. Zaletą tej masy jest przede wszystkim duży stopień ponownego wykorzystania, wynoszący ponad 90 % [1, 2].

Procesy przerobu masy syntetycznej (i ogólnie mas klasycznych) obejmują jej przygotowanie i sporządzanie (rys. VI.3.1). Przygotowanie dotyczy składników masy wyjściowej, masy używanej i zużytej.

Sporządzanie mas odbywa się w mieszarkach, do których są podawane składniki poprzez dozowniki.

W przypadku mas klasycznych proces mieszania ma zapewnić, oprócz ujednoczenia składu, równomiernego rozprowadzenia substancji wiążącej na powierzchni ziaren osnowy i adhezyjnego związania.

Odstawanie masy klasycznej po wymieszaniu zwiększa jej wytrzymałość i przepuszczalność. Przed skierowaniem do formowania masa powinna być spulchniona w celu rozbicia grudek i zlepek oraz ujednorodnienia jej stanu (jej gęstości pozornej) [1, 4]. Operacja ta korzystnie wpływa przede wszystkim na przepuszczalność masy [4].



Rys. VI.3.1. Procesy przerobu masy formierskiej [3]

Poszczególne operacje przygotowania świeżych materiałów dla masy wyjściowej (rys. VI.3.2) są realizowane przy użyciu odpowiednich urządzeń, takich jak: suszarki i chłodziarki piasku, najczęściej suszarko-chłodziarki fluidyzacyjne, kruszarki oraz przesiewacze. Stosowane są kruszarki młotkowo-udarowe oraz przesiewacze obrotowe i wibracyjne. Urządzenia te charakteryzują się szerokim zakresem wydajności [5, 6].

## VI.4. Ocena właściwości mas i aparatura kontrolno-pomiarowa

*Jerzy Zych*

### VI.4.1. Ocena właściwości mas klasycznych

Za masy klasyczne przyjmuje się masy, w których głównymi składnikami są: osnowa piaskowa i glina formierska lub piaski naturalne same, bądź też z dodatkiem osnowy lub gliny formierskiej. Zależnie od tego, które z podanych materiałów wchodzi w skład masy, wyróżnia się: masy syntetyczne, masy naturalne, masy półsyntetyczne, masy gliniaste [1]. Masy syntetyczne to takie kompozycje, których głównymi składnikami są osnowa piaskowa i glina ogniotrwała. Spośród mas klasycznych mają one największe zastosowanie w praktyce odlewniczej.

W przypadku mas syntetycznych (i ogólnie klasycznych) przeznaczonych do wytwarzania form wilgotnych do podstawowych właściwości mas, które należy kontrolować w trakcie procesu technologicznego należą: zawartość wilgoci (wilgotność), płynność, zagęszczalność, wskaźnik właściwości formierskich (formowalność), przepuszczalność  $P^w$ , osypliwość (ścieralność), wytrzymałość na: ściskanie  $R_c^w$ , rozciąganie  $R_m^w$  i rozciąganie w strefie przewilżonej  $R_k$ . W masach przeznaczonych do formowania przy użyciu wysokiego nacisku, szczególnie przy nacisku powyżej 1,5 MPa, należy kontrolować wartość odkształcenia sprężystego.

#### Oznaczenie wilgotności

Przez pojęcie wilgotności rozumie się zawartość wody, która zostaje usunięta z materiału formierskiego w temperaturze 100÷110°C. Jest to woda adsorpcyjna, kapilarna i swobodna, usuwanie wody sieciowej wymaga zastosowania wyższej temperatury suszenia. Zawartość wilgoci w masie (materiale) podaje się najczęściej w stosunku do sumy mas składników wraz z wodą (w procentach wagowych) [1, 2].

Do oznaczenia wilgotności mas stosuje się wiele metod opartych na różnych zasadach, w tym: metody grawimetryczne (ubytek masy), chemiczne (np. reakcja wody z węglkiem wapnia i pomiar ilości wydzielanego gazu), fizyczne (zagęszczalność, propagacja fal ultradźwiękowych lub pochłanianie fal elektromagnetycznych, pochłanianie podczerwieni, itp.), elektryczne (przenikalność, stratność, rezystancja, przewodność właściwa) i elektrojądrowe (pochłanianie promieniowania  $\beta$  lub  $\gamma$ ). Najdokładniejsza jest klasyczna metoda grawimetryczna, polegająca na suszeniu materiału w temperaturze 105÷110°C do stałej masy. Wilgotność masy ocenia się na próbkach 50 g, podawanych suszeniu przez 15 min. Do oznaczania zawartości wilgoci metodą grawimetryczną stosuje się wago-suszarki wyposażone w program sterujący pracą suszarki, utrzymaniem stałej temperatury nagrzewania masy. Dokładność pomiarowa wago-suszarki powinna pozwalać mierzyć masę próbki z dokładnością do 0,01 g.



Rys. VI.4.1. Wago-suszarka stosowana do oznaczania wilgotności materiałów i mas formierskich [13]

## VI.5. Powłoki ochronne i oddzielające stosowane dla form i rdzeni

*Andrzej Baliński*

### VI.5.1. Charakterystyka powłok ochronnych i oddzielających

Proces technologiczny wytwarzania odlewów powinien zapewnić uzyskanie wyrobu o wymaganych, założonych właściwościach użytkowych, o których decyduje w dużym stopniu brak wad odlewniczych, w tym odpowiednia jakość jego powierzchni. Wymagania jakościowe w stosunku do odlewów stale wzrastają. Właściwości fizykochemiczne, w tym właściwości mechaniczne odlewów są uzależnione od wielu czynników, wpływających na proces tworzenia ich struktury. Istotny wpływ w tym aspekcie ma wyjściowy skład chemiczny stopu, stan ciekłego stopu przed jego krystalizacją, obecność w nim różnych domieszek, czy też warunki chłodzenia odlewów. Podczas zalewania form (często z układem rdzeni) ciekłym metalem mamy do czynienia z układem technologicznym, w którym występuje wzajemne oddziaływanie czynników fizykochemicznych na powierzchni rozdziału faz. Oddziaływanie to jest przeważnie związane z występowaniem szeregu zjawisk, takich jak zwilżalność powierzchni formy przez ciekły metal (w funkcji temperatury), a także zastosowanych materiałów formy i powłok ochronnych, czy też reaktywność ciekłego stopu w kontakcie z wybranymi materiałami, przejawiająca się w zachodzeniu reakcji chemicznych, generujących destrukcję powierzchni formy lub rdzenia.

Zastosowanie powłok ochronnych ma na celu uzyskanie odlewów pozbawionych powierzchniowych wad odlewniczych, o lepszej jakości powierzchni. Uzyskuje się to w wyniku:

- 1) zakrycia porów masy formierskiej i rdzeniowej, a tym samym zapobieżenia penetracji ciekłego stopu odlewniczego w głąb masy,
- 2) zmniejszenia wartości adhezji masy formierskiej i rdzeniowej do powierzchni odlewu,
- 3) przeciwdziałaniu powstawaniu fałd i pęknięć na powierzchni formy i rdzenia,
- 4) zwiększenia wartości wytrzymałości warstwy powierzchniowej formy lub rdzenia.

Aby możliwe było spełnienie powyższych warunków, powłoka ochronna musi spełniać następujące wymagania:

- 1) osnowa ziarnowa powłoki ochronnej musi charakteryzować się dużą wartością ogniotrwałości, większą od wartości temperatury odlewanego ciekłego stopu odlewniczego. W przypadku powłoki ciekłej wymagane jest, aby składała się z osnowy ziarnowej o dużej wartości ognioodporności oraz jak najmniejszej ilości materiału wiążącego i stabilizującego,
- 2) osnowa ziarnowa powłoki ochronnej, oprócz wymaganej ognioodporności musi posiadać odpowiednią spiekalność, ułatwiającą jej oddzielenie od powierzchni odlewu, W niektórych przypadkach stosowana jest regulacja temperatury spiekania przez zastosowanie specjalnych dodatków [1, 2, 3],
- 3) nie może reagować w podwyższonej temperaturze z tlenkami metali,
- 4) musi być odporna na erozję ciekłego stopu odlewniczego podczas zalewania form i rdzeni,
- 5) powinna posiadać odpowiednią wytrzymałość powierzchniową oraz być mocno związana z powierzchniową warstwą masy formy i rdzenia,
- 6) nie może pękać i łuszczyć się podczas suszenia lub utwardzania i nie może łuszczyć się pod wpływem erozyjnego oddziaływania strumienia ciekłego metalu,
- 7) powinna charakteryzować się małą wartością wydzielalności gazów w wyniku jej termicznej destrukcji. Powstające gazy generują bowiem wady powierzchniowe odlewów typu nakłucia, pęcherze oraz ospowość.

Stosowanie powłok ochronnych ma znaczący, a czasem decydujący wpływ na ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie takich wad odlewniczych, jak żyłki, przypalenia, penetracja metalu i strupy. Koszt wysokiej jakości powłoki o dobrych właściwościach użytkowych stanowi przeciętnie tylko około 2 % kosztu produkcji odlewu [4].

Badania metalograficzne odlewów wykazały, że początek penetracji ciekłego metalu w głąb formy lub rdzenia jest zainicjowany powstawaniem żyłek, a więc jest związany z rozszerzalnością termiczną masy formierskiej i rdzeniowej. Stwierdzono, że powłoki ochronne o lepszym działaniu izolacyjnym stanowią skuteczną ochronę i zapobiegają powstaniu wady żyłek i penetracji [5]. W miejscach form i rdzeni szczególnie obciążonych cieplnie (np. powierzchnie garbów form, krawędzie, naroża, itp.) występuje często wada penetracji. Dzięki zastosowaniu pokrycia impregnującego, wypełniającego szczeliny w masie formierskiej i rdzeniowej, za pomocą występujących w nim cząstek ceramicznych, poprawie ulega odporność termiczna formy i rdzenia, a tym samym uzyskuje się ograniczenie penetracji ciekłego metalu.

W przypadku wytwarzania ciężkich odlewów żeliwnych o masie powyżej kilkunastu ton, z zastosowaniem mas formierskich utwardzanych chemicznie, często występuje problem związany z penetracją ciekłego metalu w głąb masy

## VI.6. Regeneracja osnowy mas

*Józef Dańko, Rafał Dańko*

### VI.6.1. Wprowadzenie

Regeneracja zużytych mas formierskich i rdzeniowych może być zdefiniowana jako obróbka zużytych, ogniotrwałych materiałów formierskich, pozwalająca na odzysk co najmniej jednego ze składników o właściwościach zbliżonych do stanu świeżego tego składnika i jego ponowne użycie do wytwarzania form i rdzeni.

Obróbka regeneracyjna jest rozumiana jako kompleks czynności procesowych, którym jest poddawana masa zużyta, począwszy od wstępnego przygotowania, poprzez regenerację właściwą, aż do obróbki finalnej regeneratu, w wyniku którego odzyskuje się przynajmniej jeden najważniejszy komponent masy, któremu stawia się wymagania dotyczące jakości.

W tradycyjnych technologiach form i rdzeni sporządzanych na osnowie piasku kwarcowego z dodatkiem lepiszcza regeneracja sprowadza się do odzysku piasku i znacznie rzadziej piasku i bentonitu [1÷4]. W całej gamie mas ze spoiwami syntetycznymi w wyniku obróbki regeneracyjnej masy zużytej można odzyskiwać jedynie osnowę, stąd często używa się określenia regeneracja zużytej osnowy.

Systemy mas mieszanych w większości zawierają tzw. „masy klasyczne” z bentonitem oraz różne masy rdzeniowe z żywicami syntetycznymi. Głównie występują one w odlewniach żeliwa i staliwa, stanowiąc około 75 % odpadów odlewniczych.

Analiza wykonana w różnych krajach wskazuje, że udział piasku świeżego wprowadzanego do obiegu waha się od 600 do 1200 kg na tonę odlewów ze stopów żelaza [2]. W Polsce wartość tego wskaźnika wynosi 1000 kg piasku na tonę odlewów [3]. W tej wartości statystycznie około 20 % świeżego piasku jest używane do produkcji rdzeni, a pozostała ilość jest wykorzystywana do odświeżania masy formierskiej.

Wprowadzenie procesu regeneracji do odlewnictwa jest uzasadnione następującymi czynnikami [4]:

- 1) poprawą gospodarki materiałowej w odlewni przez zmniejszenie zużycia świeżych piasków formierskich, obniżenie kosztów ich zakupu i wyeliminowanie suszenia,
- 2) ograniczeniem nadmiernej eksploatacji złóż nadających się dla odlewnictwa, bardzo ważnym ze względu na wyczerpywanie się zasobów tych surowców,
- 3) ograniczeniem dewastacji krajobrazu przez coraz większe wyrobiska zajmowane przez kopalnie piasku oraz poprawą stanu ochrony środowiska,
- 4) ograniczeniem terenów składowisk zajmowanych przez wysypiska masy zużytej, przenikaniem substancji toksycznych z wysypisk do środowiska w wyniku ich wymywania przez deszcze,
- 5) wzrostem kosztów opłat za korzystanie z wysypisk, a także zmniejszeniem kosztów eksploatacyjnych i ograniczeniem transportu.

### VI.6.2. Rodzaje mas zużytych i typowe sposoby ich zagospodarowania

W skład znanej, stosowanej w kraju klasyfikacji mas formierskich [5, 6] wchodzi kryterium uwzględniające stopień zużycia. Według tego kryterium wyróżnia się masy:

- 1) wyjściowe – sporządzone z samych świeżych materiałów formierskich, przy czym do świeżych materiałów zalicza się również regenerat, czyli odzyskaną osnowę piaskową,
- 2) używane – przynajmniej raz wykorzystane do sporządzenia formy, w której został wykonany odlew,
- 3) odświeżone – masy używane, do których dodano odpowiednią ilość świeżych materiałów formierskich, przy czym do świeżych materiałów zalicza się tak regenerat, jak i wodę. Proces odświeżania może być przeprowadzony tylko w przypadku mas trwałych, czyli tych, w których podczas wiązania nie zachodzi nieodwracalna reakcja.
- 4) zużyte – nie nadające się do dalszego użytkowania.

Po wybicciu odlewu z formy, jako produkt uboczny produkcji pojawia się zużyta masa formierska i rdzeniowa. Możliwe sposoby postępowania z tą masą przedstawiono schematycznie na rysunku VI.6.1.

## VI.7. Zasady doboru mas

*Irena Izdebska-Szanda*

### VI.7.1. Zasady ogólne wyboru procesu technologicznego

Wybór metody technologicznej odlewania nie jest łatwy, ponieważ takie same jakościowo odlewy można otrzymać przez zastosowanie kilku różnych sposobów formowania. Formy są klasyfikowane i dzielone na dwie grupy:

- 1) formy nietrwałe (jednokrotnego użycia – „jednorazowe”),
- 2) formy trwałe (wielokrotnego użycia).

Odlewanie do form nietrwałych „jednorazowych” obejmuje wytwarzanie form z mas wilgotnych lub wiązanych spoiwami chemicznymi i rdzeni wiązanych spoiwami chemicznymi. Formy tego typu są zwykle wykonane z piasku jako osnowy i są wiązane chemicznie, gliną lub są nawet nie wiązane. Formy do odlewania precyzyjnego mogą być również zaliczone do tej grupy.

Odlewanie do form trwałych obejmuje wlewanie/wtryskiwanie ciekłego metalu do formy metalowej, często z rdzeniami metalowymi lub solnymi. Tego typu formy są wykonywane do odlewania grawitacyjnego i niskociśnieniowego, odlewania ciśnieniowego i odśrodkowego. W ograniczonym zakresie są stosowane rdzenie z mas wiązanych chemicznie.

W przypadku odlewów z metali nieżelaznych, około 30 % odlewów jest wykonywanych w formach piaskowych. W przypadku odlewów z lekkich stopów metali nieżelaznych tylko 10 % z nich jest wykonywanych w formach nietrwałych [1].

Możliwości zastosowania różnych technik formierskich i technik odlewniczych, w zależności od odlewanych stopów przedstawiono w tabelach VI.7.1 i VI.7.2.

Poniżej omówione zostaną szerzej możliwości i warunki stosowania poszczególnych technologii wykonywania form jednorazowych dla konkretnych stopów odlewniczych.

Podjętą decyzję o wyborze odpowiedniej technologii do wytwarzania form i rdzeni należy wziąć pod uwagę wiele czynników, które ostatecznie prowadzą do stworzenia warunków produkcji umożliwiających uzyskanie odlewu o wymaganej jakości, przy jak najmniejszych kosztach produkcji, przy równoczesnym zapewnieniu wymaganych warunków BHP i ochrony środowiska.

Jednym z czynników, jaki należy brać pod uwagę jest rodzaj odlewanej stopu i wielkość odlewu oraz seryjność produkcji.

Większość technologii umożliwia uzyskanie form i rdzeni o dobrych właściwościach technologicznych, a szczególnie wytrzymałościowych w temperaturze otoczenia. Ich wytrzymałość w temperaturze otoczenia musi zapewnić przeprowadzenie właściwych operacji związanych z transportem rdzenia lub formy. Forma i rdzeń muszą zachować swój pierwotny kształt aż do momentu zakrzepnięcia odlewu.

Przy wykonywaniu form jednorazowych stosowane mogą być technologie mas wiązanych mechanicznie i chemicznie. Utwardzanie może zachodzić w temperaturze otoczenia, pod wpływem czynnika gazowego lub pod wpływem ciepła.

Rdzenie zwykle produkowane są w tej samej technologii co formy; rdzenie małe i średnie są najczęściej wykonywane przez nadmuchiwanie lub wstrzeliwanie do rdzennicy.

W przypadku wykonywania rdzeni stosuje się najczęściej technologie wykorzystujące chemiczne materiały wiążące. Rdzenie muszą wytrzymać duże obciążenia, które mogą pojawić się w momencie zapełniania formy odlewniczej ciekłym metalem i często muszą być później usuwane z małych przestrzeni w zakrzepłym odlewie. Oznacza to, że materiał wiążący musi pozwolić na wytworzenie wystarczająco wytrzymałego rdzenia, który rozpadnie się i pozwoli się łatwo usunąć po zakrzepnięciu odlewu. Z tego powodu rdzenie są zwykle wykonywane z piasku kwarcowego (czasami z piasku oliwinowego, cyrkonowego lub chromitowego) i silnych materiałów wiązających. Utwardzanie jest wynikiem reakcji chemicznej bądź katalitycznej lub następuje pod wpływem ciepła.

Niezależnie od zastosowanego materiału wiążącego, istotna jest jakość głównego składnika mas formierskich i rdzeniowych, jakim jest osnowa ziarnowa. W większości technologii stosowane są piaski suszone, klasyfikowane, o wysokiej jednorodności. Jediną technologią, w której dopuszcza się stosownie piasku wilgotnego, jest technologia mas z bentonitem. Wielkość ziarn osnowy piaskowej wpływa na właściwości technologiczne mas i na przebieg zjawisk zachodzących na powierzchni wnętrza formy lub rdzenia po zetknięciu się z ciekłym metalem.

Wyższa temperatura ciekłego metalu i grubsza ścianka odlewu wymagają zastosowania masy o większej przepuszczalności, a co za tym idzie, osnowy o grubszych ziarnach, co orientacyjnie zilustrowano danymi, zawartymi w tabeli VI.7.3.

## Skorowidz

- aluminium hutnicze – 470
  - gatunki produkcyjne – 473
- ausferyt – 85, 231
- ausferrytyzacja – 96, 942
- austenit – 30, 85
  - przedeutektyczny – 86÷87
- austenityzacja – 96
- badania nieniszczące – 913÷914
  - powierzchniowe – 916
    - – wizualne – 916
    - – penetracyjne – 917
    - – magnetyczno-proszkowe – 918
    - – za pomocą prądów wirowych – 921
  - objętościowe – 921
    - – ultradźwiękowe – 921
    - – radiograficzne – 926
- bainit – 231
- biopolimery – 1002
- brązy – 522÷532
  - aluminiowe – 529÷531
  - cynowe – 522÷528
  - krzemowe – 531÷532
  - ołowiowe – 532
  - specjalne – 532
- cementyt – 85
  - wtórny – 93
  - pierwotny – 94
- ciecze metalowe na podłożu stałym – 829÷842
- ciepło właściwe – 945
- ciśnienie metalu w formie – 190
  - statyczne – 190÷191
  - dynamiczne – 190
  - metalostatyczne – 645
- cykl – 244
  - żarzenia – 244
  - cieplny – 397
  - wyżarzania – 293
    - – długi – 293
    - – skrócony – 293÷294
- cyklony – 124
- czas – 103
  - krzepnięcia – 369
  - przetrzymywania ciekłego żeliwa – 103
  - zalewania – 187÷190, 373
    - – optymalny 187
- czynniki technologiczne żeliwa – 101
- dendryt – 61, 64
- diamastic (maszyna formierska) – 213
- dioksyny – 476
- dobór składników kompozytów metalowych – 676÷695
- dotatki – 110
  - odsiarczające – 110
  - stopowe – 429
    - – metali nieżelaznych – 429÷430
    - – – stopów aluminium – 480
- dyfuzja – 43
- energochłonność procesu topienia – 437
- entalpia – 34÷35, 38÷41
- entropia – 34
- eutektyka – 87
  - cementytowa (ledeburyt) – 92÷93
  - fosforowa – 95
  - grafitowa – 87
  - węglkowa – 94
- fale ultradźwiękowe – 922
  - płytowe – 922
  - podłużne – 922
  - poprzeczne – 922
  - powierzchniowe – 922
- faza zbrojąca – 790÷791
- feryt – 85, 92
- filtry – 195÷199
- filtry tkaninowe – 124÷125
- formowanie – 1077÷1086
  - reaktywne formowanie natryskowe – 709
  - w masie naturalnej – 1077
  - w masach z bentonitem (masy syntetyczne) – 1077
  - w masach wiązanych chemicznie – 1079
    - – specjalne techniki – 1086
    - – – formowanie próżniowe – 1086
    - – – odlewanie z zastosowaniem modeli spienionych – 1086
- formy odlewnicze – 18
  - cementowe – 20
  - ciśnieniowe – 22
  - grafitowe – 20
  - metalowe – 21
  - piaskowe – 18
  - półtrwałe – 20
- front krystalizacji – 718÷721
- gazy żeliwne – 163÷165
- geopolimery – 1002
- gęstość – 942
- gliny formierskie – 995÷997

- grafit – 85
  - kulkowy – 91
  - pierwotny – 94
  - płatkowy – 225, 226
  - rozbity – 145, 223
  - sferoidalny nieregularny – 145
  - wtórny – 91÷92
  - zdegradowany – 145
    - – *chunky* – 223
- granica – 880÷891
  - akomodacji – 890
  - plastyczności – 879÷881
    - – dolna – 880÷881
    - – górna – 880÷881
    - – umowna – 881÷891
  - proporcjonalności – 880, 881
  - sprężystości – 880, 891
- hartowanie – 223, 259÷279, 416÷421
  - powierzchniowe – 299÷300, 418
    - – płomieniowe – 299, 418÷419
    - – indukcyjne – 299÷300, 419÷421
  - z przemianą izotermiczną – 233÷237, 298÷299
    - – *squeeze casting* – 237
- heksachlorobenzen – 477
- induktor – 299
- infiltracja wstępna – 698
- inkludowanie próbek – 859
- izoentanty – 903
- jamy skurczowe – 156÷159
  - rozproszone – 156
  - skupione – 156
  - tworzenie w odlewach stalowych – 383÷385
- klasyfikacja – 245
  - kompozytów metalowych – 669÷671
  - pieców do topienia i przetapiania – 436
  - staliwa – 306, 312
  - żeliwa – 245
    - – ciągliwego – 245÷246
    - – odpornego na korozję – 331÷335
    - – odpornego na ścieranie – 275
- kokilarki – 25
- komory filtracyjne – 124
- kompozyt – 668
  - metalowy – 668÷798
    - – *in vitro* – 697÷708
    - – *in situ* – 708÷709
- kontrola – 253
  - jakości powłok ochronnych – 1055÷1057
  - procesu wytwarzania – 253÷255
- konwertory tlenowe – 354
- korozja – 318
  - czynniki wpływające na korozję – 330÷331
  - międzykrystaliczna – 329
    - staliwa – 329÷331
    - staliwa żaroodpornego – 318
    - wżerowa – 329
- krystalizacja – 55
  - kompozytów metalowych – 711÷21
    - – osnowy fazy zbrojącej – 714÷718
  - mikrostruktury żeliwa – 98÷101
  - żeliwa białego – 266÷269
- krzepnięcie – 48÷54
- lejność – 149
  - praktyczna – 376
  - rzeczywista – 376
  - staliwa – 375
    - – pomiar lejności staliwa – 377÷379
      - – – próba prętowa – 377
      - – – próba spiralna – 377
    - zerowa – 375
    - żeliwa – 149÷151
- makrostruktura – 853
  - kompozytów metalowych – 672
- martenzyt – 96
- masy formierskie – 19
  - klasyczne – 1015
    - – syntaktyczne – 1015
  - ogniotrwałe – 23
  - sypkie szybkowiązujące – 1031
  - ze spoiwami – 1026
- materiały – 139
  - do świeżenia kąpieli – 343
    - – nawęglające – 345
    - – żużlotwórcze – 345÷347
      - – metaliczne – 341÷343
  - na osnowę piaskową – 986÷994
  - ogniotrwałe – 347÷352, 451÷453
  - wiążące – 995
  - wsadowe – 139
    - – metali nieżelaznych – 427÷430
    - – żeliwa – 139÷140
      - – do wytapiania stali – 341÷347
- materiały wysokoporowate – 801÷820
- metale ziem rzadkich – 617
- metoda – 368
  - aktywowania powierzchni – 721÷723
  - bezpośredniego przetopu – 792÷797
  - degradacji zawiesiny kompozytowej – 789÷790
  - kół wpisanych – 368
  - kropli leżącej – 830÷831
  - oceny składu chemicznego – 845
    - – klasyczna – 845
      - – – absorpcji atomowej – 846
      - – – fizyczna – 847
      - – – spektrometria optyczna emisyjna – 847, 848
      - – – analizatory pierwiastkowe – 849



- wypychania osnowy metalowej ze stopionego kompozytu – 791÷792
- wytwarzania kompozytów metalowych – 697÷709
- mikroskop – 857
  - elektronowy skaningowy – 865
  - metalograficzny – 857
- mikrostruktura – 274, 853
  - białego żeliwa chromowego – 275
  - kompozytów metalowych – 673
  - podeutektycznego żeliwa wysokochromowego – 274
  - staliwa węglowego – 307
- mieszmetal – 145
- modele odlewnicze – 21
- moduł – 370
  - nadlewu – 370
  - odlewu – 369
- modyfikacja – 102
  - żeliwa – 102, 208÷215
- modyfikatory – 111, 343
- modyfikowanie grafityzujące – 226÷227
  - wtórne – 227
  - zasadnicze – 227
- mosiądze – 532÷536
- nadlew – 26, 368
- nadstopy – 568
  - niklu – 569÷572
- nanomateriały – 822÷827
- nanostruktura kompozytów metalowych – 673
- naprawianie wad odlewów – 29
- naprężenia odlewnicze – 159
  - cieplne – 159
  - fazowe – 159÷160, 901
  - rozrywające – 881
  - skurczowe – 160÷161, 900
- napylenie plazmowe – 708
- nawęglacze – 110
- obliczanie – 113
  - nadlewów – 369, 370
  - przekroju wlewów doprowadzających – 665
  - przekroju wlewów rozprowadzających – 665
  - szyjki nadlewów – 371
  - układu wlewowego odlewów stalowych – 374÷375
  - wsadu metalowego do wytopu żeliwa – 113÷116
- obróbka – 96
  - cieplna – 96
    - kompozytów metalowych – 733÷735
    - odlewów stalowych – 397÷413
    - żeliwa – 96÷97, 290÷302
  - pozapiecowa w odlewniach staliwa – 361
    - AOD – 366÷367
    - AP – 364÷366
    - LF – 367÷368
    - VD – 362÷363
  - VOD – 363÷364
- ocena jakości kompozytów metalowych – 722÷783
- ochładzalniki – 372÷373
- oddzielacze – 1044÷1045
- odlewanie – 1087
  - form ceramicznych – 1087
    - metodą Shawa – 1087
    - metodą wytapianych modeli – 1087
  - kompozytów metalowych – 730÷731
  - niskociśnieniowe – 24÷25
  - odśrodkowe – 24÷25
  - precyzyjne – 18
  - próżniowe – 24
  - stopów metali nieżelaznych – 637
  - z zastosowaniem ciśnienia zewnętrznego – 701÷705
  - zastosowaniem ciśnienia zewnętrznego – 701÷705
  - zawiesinowe (*slurry casting*) – 697÷701
- odlewnicze stopy metali nieżelaznych – 427÷618
  - metali ciężkich – 521÷618
    - cynku – 545÷548
    - cyny i ołowiu – 549÷553
      - miedzi – 521
        - beżolowiowe stopy miedzi – 536÷540
    - metali lekkich – 470÷519
      - aluminium – 470
        - Al-Cu – 485
        - Al-Li – 498÷499
        - Al-Mg – 486
        - Al-Si – 482
        - Al-Zn – 488
          - do kontaktu z żywnością – 494
          - nienormalizowane stopy aluminium – 495
          - magnezu – 501
            - ultralekkie – 512
            - znormalizowane stopy magnezu – 505
        - tytanu – 514
          - komercyjne – 515
            - o strukturze „ $\alpha$ ” – 516
            - o strukturze „ $\alpha + \beta$ ” – 516
            - o strukturze „ $\beta$ ” – 516
              - znormalizowane stopy tytanu – 517
        - specjalnego zastosowania – 581÷618
          - berylu – 592
            - berylu i aluminium – 593
            - miedzi z berylem – 594
            - niklu z berylem – 594
              - do zastosowań w medycynie – 601÷605
              - austeniczne stale kwasoodporne – 603
              - biostopy na bazie metali szlachetnych – 603
              - kobaltu – 604
              - tytanu – 604
          - metali szlachetnych – 581÷592
            - irydu – 591÷592

- osmu – 591
- palladu – 591
- platyny – 589÷591
- rodu – 592
- rutenu – 592
- srebra – 586÷589
- złota – 582÷586
- niklu – 556÷578
- o podwyższonej zdolności tłumienia drgań – 605
- cyrkonu – 611
- cyrkon-cyna – 612
- cyrkon-miedź – 614
- cyrkon-molibden – 614
- cyrkon-żelazo – 615
- magnezu z cyrkonem – 616
- uranu – 609
- stopy niskotopliwe – 616
- stopy z pamięcią kształtu – 599
- stopy żarowytrzymałe – 595
- na osnowie kobaltu – 598
- na osnowie niklu – 597
- stopy żarowytrzymałe na osnowie metali  
wysokotopliwych – 598
- na osnowie żelazowo-niklowej – 597
- odpuszczanie – 412÷413
- odpyłacze – 125÷126
- z dezintegratorami – 126
- ze zwężkami Venturi’ego – 125
- odsiarczanie – 143÷145
- metoda *gazal* – 143
- przy użyciu reaktora HTM – 144÷146
- przy użyciu reaktora HTM duo – 144÷145
- za pomocą lancy – 143÷144
- odtleniacze – 109, 343
- odzysk – 786÷798
- materiałowo-produktowy – 797÷798
- materiałowy – 787
- produktowy – 786
- okres – 357
- rafinacji – 357÷359
- świeżenia – 356
- operacje obróbki cieplnej – 398
- opory przepływu – 192÷194
- we wnęce formy – 646
- osnowa – 95
- ferrytyczno-perlityczna – 95
- piaskowa – 986
- oznaczanie – 1015
- mas ze spoiwami w podwyższonej temperaturze – 1031
- odkształcalności i odkształcenie sprężyste – 1019÷1020
- osypliwości i ścieralności – 1020÷1021
- płynności – 1016÷1018
- przepuszczalności – 1021÷1023
- skłonności do deformacji cieplnej (*hot disortion*) – 1031
- grubości skorupy – 1032÷1033
- temperatury mięknięcia pisaków powleczonych żywicą – 1032
- wytrzymałości w stanie nasyconym – 1033÷1034
- wilgotności – 1015÷1016
- właściwości mas ze spoiwami – 1026÷1031
- gazo twórczości – 1028÷1029
- gęstości – 1027
- higroskopijności – 1028
- płynności – 1027
- przepuszczalności – 1029
- wybijałości – 1029÷1031
- żywotności – 1027
- wytrzymałości – 1024
- na rozciąganie – 1024
- na ścinanie – 1024
- na ściskanie – 1023
- na zginanie – 1024÷1025
- rozciąganie w strefie przewilżonej – 1025
- rozszczepianie – 1025
- w podwyższonej temperaturze – 1026
- zagęszczalności – 1018÷1019
- parametry – 421
- nagrzewania przy hartowaniu odlewów stalowych – 421
- osnowy piaskowej – 987÷989
- pełzanie materiału – 291
- perlit – 85
- perlityzacja – 93
- pęcherze gazowe – 163÷165
- pękanie na gorąco – 385÷387
- pękanie na gorąco – 626
- piana grafitowa – 218
- piany – 805÷820
- kompozytowe – 805÷820
- syntaktyczne – 817÷820
- zbrojone cząsteczkami – 805÷806
- zbrojone gazem – 806÷817
- piasek – 986÷994
- chromitowo-magnezytowy – 993
- chromitowy – 991÷992
- cyrkonowy – 991
- kwarcowy – 986÷991
- magnezytowo-chromitowy – 993
- magnezytowy – 992÷993
- mullitowy – 994
- oliwinowy – 992
- silimanitowy – 993÷994
- szamotowy – 993

- piece do wytapiania – 22, 117  
 – elektryczne – 128÷131, 445  
 – – indukcyjne – 128÷131  
 – – – tyglowe – 128÷130, 439÷ 444  
 – – – sieciowej częstotliwości – 130÷131  
 – – kanałowe – 448÷451  
 – – oporowe – 448  
 – do obróbki cieplnej żeliwa – 300÷302  
 – – podział wg sposobu nagrzewania – 300  
 – – – elektryczne – 300÷301  
 – – – gazowe – 300  
 – – – z kąpielą – 300  
 – – podział wg sposobu pracy – 301  
 – – – do pracy ciągłej – 303  
 – – – do pracy półciągłej – 302  
 – – – o pracy okresowej – 301  
 – do wytapiania stali – 347, 353÷355  
 – – łukowe – 353  
 – – – w zakrzepłym tyglu – 456  
 – – piec kadziowy – 351  
 – – piece grzewcze – 352  
 – – piece płomienne – 445÷446  
 – – piece próżniowe – 354  
 – – pieco-kadzie – 353  
 – obrotowe – 131÷133  
 – żeliwiaki – 23, 117  
 – – koksowe – 117÷123  
 – – – dwurzędowe – 122  
 – – – kampanijne – 122÷123  
 – – – plazmowe – 122  
 – – – z dmuchem wzbogaconym w tlen – 120÷121  
 – – – z podgrzanym dmuchem – 118÷120  
 – – – z zimnym dmuchem – 117÷118  
 pierwiastki – 219  
 – stopowe – 269  
 – śladowe – 219  
 płuczki wieżowe (skrubery) – 125  
 pola okalające – 686÷688  
 polichlorowane difenole – 477  
 pompy próżniowe – 464÷468  
 potencjał termodynamiczny – 431  
 powłoki ochronne – 1035÷1044  
 proces – 998  
 – *Alphaset* – 998  
 – *Ashland* – 998÷999, 1002, 1013  
 – *cold-box* – 998÷1000  
 – *hot-box* – 998÷999  
 – *in situ* 708÷709  
 – – w układzie ciecz-gaz – 708  
 – – w układzie ciecz-ciało stałe – 708  
 – – w mieszaninach solnych – 709  
 – – bezpośrednie reakcje utleniania/azotowania – 709  
 – – w układzie ciecz-ciecz – 709  
 – – reaktywna synteza plazmowa – 709  
 – *Nishiyamy* – 1000  
 – przerobu masy formierskiej – 1005÷1013  
 – *red-set* – 998, 1054  
 – *Rutapox* – 1000  
 – *thetmoshock* – 999, 1031  
 – utwardzania – 1079, 1085  
 – *warm air* – 998÷999  
 projektowanie – 688  
 – kompozytów – 689÷692  
 – – o podwyższonej sztywności i zminimalizowanej gęstości – 689  
 – – o podwyższonej wytrzymałości i zminimalizowanej gęstości – 690  
 – – o specyficznych właściwościach cieplnych – 690  
 – układów wlewowych dla stopów lekkich – 655÷661  
 – układów wlewowych przy zalewaniu do form piaskowych – 661÷666  
 próba zmęczeniowa – 883  
 – niskocyklowa – 886, 889  
 – wysokocyklowa – 883÷884  
 – zmodyfikowana – 890  
 przemiana – 410÷412  
 – bainityczna – 411÷412  
 – martenzytyczna – 410÷411  
 przepływy – 638÷647  
 – dynamika przepływu metalu – 638÷643  
 – – przy przejściu z wlewu głównego do wlewu rozprzodającego – 640  
 – – w zbiorniku wlewowym – 638  
 – – we wlewach rozprzodających i doprowadzających – 641  
 – – we wlewie głównym – 639  
 – – we wnęce formy – 642  
 – – z kadzi do zbiornika wlewowego – 638  
 – metalu w układach wlewowych – 638  
 – sprawność w układach wlewowych – 643  
 – – kryteria przepływu laminarnego i turbulentnego – 647  
 przewodność cieplna – 946  
 puomag (automat rozlewniczy) – 213  
 pył – 1002  
 – grafitowy – 1003  
 – węglowy – 1002÷1003  
 rafinacja – 46  
 – fizyczna – 46  
 – – ekstrakcyjna – 46  
 – – filtracyjna – 46  
 – – separacyjna – 46  
 – – termiczna – 46  
 – chemiczna – 46  
 – – gazowa – 46  
 – – kombinowana – 46

- próżniowa – 46
- złożona – 46
- żuźlowa – 46
- rdzeń – 21
- recykling – 785
  - metalowych materiałów kompozytowych – 786÷798
- regeneracja – 1059
  - czynniki – 1061
  - mas formierskich i rdzeniowych – 1059÷1061
  - regeneracja wstępna i właściwa – 1072
  - metody oceny jakości reagenta – 1072÷1073
  - sposoby – 1061
    - kombinowana i wielostopniowa – 1070
    - metody suche – 1062÷1069
      - mechaniczna lub pneumatyczna – 1062÷1067
      - dla małych odlewni – 1067÷1069
    - regeneracja termiczna – 1069÷1070
    - w środowisku wodnym – 1061÷1062
- rentgenografia – 931
- reologia – 203÷204
- rozszerzalność cieplna – 941
- równowaga fazowa Fe-C – 83
- równowagowa temperatura przemiany – 83
  - eutektoidalnej – 84
  - eutektycznej – 83
- rzadziżna – 156
- schemat – 290
  - procesu wytapiania stali – 353
  - zabiegów obróbki cieplnej żeliwa – 290
- separacja składników kompozytów – 787÷789
- sferoidyzacja – 134÷147, 221
  - metody – 143
    - autoklaw (kadź ciśnieniowa) – 143
    - drut magnezowy – 143
    - *flotret* – 143
    - *inmould* – 143, 221
    - konwertor – 143
    - przewodu elastycznego PE – 221÷223
    - *sandwich* – 143, 221
    - *tundish* – 143, 221
    - zanurzenie – 143
- skurcz odlewniczy – 154÷156, 625
  - hamowany – 155
    - cieplny – 155÷156
  - krzepnięcia – 154
  - staliwa – 379÷382
    - z w stanie ciekłym – 379÷380
    - w zakresie temperatury krzepnięcia – 380÷381
    - w stanie stałym – 381÷382
  - swobodny – 155
  - w stanie ciekłym – 154
  - w stanie stałym – 154
- spoiwa – 19
  - fosforanowe – 1001
  - krzemianowe – 1000÷1001
  - nieorganiczne – 19
  - organiczne – 19
- sprawność cieplna – 438
- spust metalu – 359
- staliwo – 304÷423
  - stopowe – 311÷341
    - do pracy w temp. ujemnej – 312
    - żaroodporne – 318÷324
      - żelazowo-chromowe Fe-Cr – 319
      - żelazowo-chromowo-niklowe Fe-Cr-Ni – 319÷320
      - żelazowo-niklowo-chromowe Fe-Ni-Cr – 321÷322
    - do pracy w podwyższonej temperaturze – 325÷329
    - odporne na korozję – 329
    - odporne na ścieranie – 335÷341
      - Hadfielda – 340
      - wysokochromowe staliwo odporne na ścieranie – 340÷341
    - węglowe – 306÷311
- stopień relaksacji (odprężenia) – 291
- stopień zużycia – 1059
- stopy – 61, 595÷604
  - dla zastosowań w medycynie – 601
    - biostopy na bazie metali szlachetnych – 603
    - austenityczne kwasoodporne – 603
    - kobaltu do zastosowań w medycynie – 604
  - jednofazowe – 61
  - z pamięcią kształtu – 599
  - żarowytrzymałe – 595
    - na osnowie kobaltu – 598
    - na osnowie metali wysokotopliwych – 598
    - na osnowie niklu – 597
    - na osnowie żelazowo-niklowej – 597
- struktura – 85
  - tworzyw kompozytowych – 733÷774
  - żeliwa – 85÷98
    - stopowego białego – 271
    - odpornego na korozję – 332÷335
- substruktura kompozytów metalowych – 673
- surówka – 105
- szybkość – 161
  - chłodzenia – 161÷163
    - odlewu – 110
  - zapełniania wnęki formy (czas) – 648
- technika modyfikacji – 212÷215
- techniki wytwarzania – 17
- technologia – 509
  - stopów cyny i ołowiu – 552
  - stopów miedzi – 540
  - technologia przygotowania ciekłego metalu – 499
  - technologia stopów cynku – 546
  - topienia i odlewania – 509, 563÷568

- wytwarzania żeliwa z grafitem sferoidalnym i wermikularnym – 216÷227
- wytwarzania żeliwa ADI – 229÷237
- temperatura – 314
  - odlewania staliwa – 377÷379
  - kruchości – 314
  - likwidus – 84
  - austenitu – 84
  - perlitu – 84
  - przegrzania
  - ciepłego żeliwa – 103
  - żeliwa szarego – 210
- tłumienie – 605÷607
  - drgań w stopach aluminium – 607
  - drgań w czystym aluminium – 607
- topienie – 22, 43, 517
  - kompozytów metalowych – 726÷730
  - metalu – 431÷468
  - odpadów aluminium – 475÷476
  - plazmowe 461÷464
  - stopów aluminium – 478÷480
  - stopów niklu – 561
  - stopów tytanu – 517
  - żeliwa wyjściowego – 141÷142
- topniki – 109÷110
- trawienie – 863
  - chemiczne – 863
  - elektrolityczne – 863
  - termiczne – 863
- tygle – 23
- udarność – 315
- udarność staliwa – 315÷318
  - wpływ fosforu – 316
  - wpływ krzemu – 316
  - wpływ manganu – 315÷316
  - wpływ niklu – 316
  - wpływ obróbki cieplnej – 316÷317
  - wpływ odtleniania – 317÷318
  - wpływ struktury – 316÷317
  - wpływ węgla – 315
- układ – 246, 831÷842
  - układ Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 831÷834
  - układ Al/AlN – 836
  - układ Al/C – 835÷836
  - układ Al/Me<sub>x</sub>N<sub>y</sub> – 837÷838
  - układ Al/SiC – 836
  - układ Al/SiO<sub>2</sub> – 834÷835
  - układ Ni/tlenki 838÷841
  - układ Ti/tlenki 841÷842
  - duplex – 246
- układy wlewowe – 24, 181÷205
  - dla odlewów – 199÷204
  - staliwnych – 373÷375
  - z żeliwa – 199÷202
  - białego/ciągliwego – 201
  - sferoidalnego – 202
  - szarego – 199
  - dla stopów metali lekkich – 637
  - kompozytów metalowych – 731÷733
- ultrastruktura kompozytów metalowych – 673
- urządzenia odpylające – 124÷126
  - mokre – 125÷126
  - suche – 124÷125
- usuwanie nadmiaru metalu w odlewie – 28
- utwardzalność i hartowność odlewów staliwnych – 408÷413
- utwardzanie – 1079÷1085
  - czynnikiem gazowym – 1082
  - w temperaturze otoczenia – 1079
  - alkilowe – 1081
  - fenolowe katalizowane kwasem – 1079
  - furanowe katalizowane kwasem – 1079
  - krzemianowo-estrowe (*foster*) – 1081
  - poliuretanowe (fenolowo-izocyjanianowe) – 1080
  - rezolowo-estrowe (*alfaset*) – 1081
  - w procesie alkalicznym fenolowym utwardzanym CO<sub>2</sub> – 1084
  - w procesie epoksydowym utwardzanym SO<sub>2</sub> – 1083
  - w procesie furanowym utwardzanym SO<sub>2</sub> – 1083
  - w procesie krzemianowym utwardzanym CO<sub>2</sub> – 1083
  - w procesie rezolowo-estrowym (*betaset*) – 1082÷1083
  - w procesie zimnej rdzennicy (*cold-box*) – 1082
  - w wysokiej temperaturze – 1084
  - w procesie alkilowym, suszonym – 1085
  - w procesie ciepłej rdzennicy (*warm-box*) – 1084
  - w procesie gorącej rdzennicy (*hot-box*) – 1084
  - w procesie skorupowym (*Croninga*) – 1085
  - w procesie z olejem lnianym – 1085
- wadliwe struktury staliwa – 416
- wermikularyzowanie – 223÷226
  - metody – 223÷225
  - pierwiastkami ziem rzadkich – 223
  - regulowaną ilością magnezu – 223
  - *sinter-cast* – 224÷225
  - z użyciem desferoidyzatorów – 223
  - zaprawą magnezowo-cerową – 223
  - zaprawą magnezowo-cyrkonową – 223
- węzeł cieplny – 368
- wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne – 477
- wlewki próbne – 206
- właściwości – 165
  - aluminium – 470
  - berylu – 593
  - cieplne – 390
  - fizyczne – 938÷939

- klasycznych mas formierskich – 1015÷1026
- kompozytów metalowych – 736÷748
- magnetyczne – 393÷395
- mas ze spoiwami – 1026÷1031
- mechaniczne – 165, 939
  - – staliwa odpornego na ścieranie – 336
  - – żeliwa – 165
    - – – ciągliwego – 255÷257, 261÷263
    - – – z grafitem sferoidalnym i wermikularnym – 237÷238
- metalu – 501
- nanomateriałów – 824÷826
- odlewnicze staliwa – 375
- odlewnicze żeliwa – 149÷165
- staliwa – 388÷397
- szybkowiążących sypkich mas – 1031÷1034
- tytanu – 514
- weksel – 934
- wsad – 105
- wskaźniki funkcjonalności – 678÷679
- wtrącenia niemetaliczne – 165
- wtryskiwanie gazowe – 697
- wykańczanie odlewów – 31
- wykonywanie odlewów – 17
- wykres – 679
  - doboru materiałów – 679÷686
  - przemiany przechłodzonego austenitu *CTPi* i *CTPc* – 404÷408
  - równowagowy Fe-Fe<sub>3</sub>C i FeC – 399÷403
- wypełnienie formy – 621
- wytapianie – 126
  - metalu – 431
  - stali niestopowej – 355
  - stali stopowej – 359
    - – metodą odzyskową – 359
    - – metodą odzyskowo-tlenową – 359÷361
  - w piecu indukcyjnym – 361
  - żeliwa – 126÷128
    - – ciągliwego – 248
- wyżarzanie – 248
  - żeliwa ciągliwego – 248
    - – czarnego – 251÷252
      - – – osnowie perlitycznej – 252
      - – białego – 248÷251
    - wyżarzania odprężające – 290÷291
    - wyżarzanie zmiękczające – 291÷295
      - – wyżarzanie ferrytyzujące – 291÷292
      - – wyżarzanie grafityzujące – 291÷292
    - wyżarzanie normalizujące – 295
    - wyżarzanie odlewów staliwnych – 414÷415
      - – normalizujące – 414
      - – odprężające – 415
      - – sferoidyzujące – 415
  - – ujednorodniające (dyfuzyjne) homogeniczne – 414
    - – zupełne – 414
  - wzory weryfikacyjne – 187
    - Sobolewa – 187
    - Dieterta – 187
  - zaprawy – 145
    - do sferoidyzacji – 145
    - – z dodatkiem miszmetalów – 145
  - zarodkowanie – 56÷60
    - katalityczne – 60
  - zasady doboru mas – 1075÷1088
    - ogólne – 1075
    - wg technologii formowania – 1077
  - zasilanie odlewów staliwnych – 368÷375
  - zastosowanie – 238
    - kompozytów – 749÷769
    - nanomateriałów – 826÷827
    - oddzielaczy – 1044÷1045
    - odlewów z żeliwa ciągliwego 263÷264
    - powłok ochronnych – 1045÷1054
    - stopów tytanu – 518
    - żeliwa z grafitem sferoidalnym i wermikularnym – 238÷242
  - zbiorniki wlewowe – 194÷195
    - dla stopów metali lekkich – 660
  - zdolność do zabielenia – 151÷154
  - zgar metali – 435÷437
  - złom – 105
    - złom stalowy – 105, 341÷343
    - złom żeliwny – 106
      - – własny (obiegowy) – 106
      - – kupny – 106
  - zużycie ściernie – 336÷340
    - adhezyjne – 338
    - erozyjne – 339
    - erozyjno-korozyjne – 339
    - kawitacyjne – 339
    - przez utlenianie – 338
    - w warunkach dużych naprężeń – 338
    - w warunkach niewielkich naprężeń – 338
    - zmęczeniowe – 338
  - zwilżanie materiałów – 829
  - żelazostopy – 107, 343÷344
  - żeliwo – 87
    - ADI – 229÷242
      - – AADI – 230÷231
      - – AGI – 230, 239, 242
      - – AVCI – 230, 238
      - – CADI – 230, 238÷239
      - – DADI – 230÷231, 236÷237
      - – SiSSADI – 230
    - austenityczne – 175÷177, 284÷286
    - ciągliwe – 96, 168÷169, 244

- 
- białe – 168, 244, 266, 293÷294,
  - kwasoodporne – 266
  - odporne na ścieranie oraz działanie wysokiej i niskiej temperatury – 266
  - żaroodporne – 287
  - czarne – 169, 244, 293
  - żeliwo perlityczne – 293÷295
  - kwasoodporne – 281
  - nadeutektyczne – 94
  - niestopowe lub niskostopowe – 276
  - niklowo-chromowe (martenzytyczno-ledeburytyczne) – 276÷280
  - wysokochromowe – 278÷280
  - manganowe i wanadowe – 280÷281
  - perlityczno-ledeburytyczne – 276
  - odporne na działanie wysokiej i niskiej temperatury – 281÷287
  - odporne na ścieranie – 174÷175, 275÷281
  - podeutektyczne – 86÷93
  - połowiczne – 94
  - sferoidalne – 89, 134÷147, 170÷174, 286
  - z przemiana izotermiczną – 173÷174
  - niskostopowe żeliwo sferoidalne ferrytyczne – 177÷179
  - stopowe – 97÷98
  - szare – 166÷168, 206÷215
  - wermikularne – 169÷170
  - z grafitem kulkowym – 229
  - z grafitem płatkowym – 87
  - żeliwo z grafitem sferoidalnym i wermikularnym – 216÷227
  - z grafitem wermikularnym – 90
  - żywice – 997
  - żywice syntaktyczne – 997