

ZNANOST I TEHNOLOGIJA MATERIJALA S OSVRTOM NA PRIMJENU

Material Science and Engineering with Application Overview

UDK 656.03
Pregledni članak
Review

Sažetak

Tema rada – znanost i tehnologija materijala s osvrtom na primjenu - obuhvaća jako široko područje. Osnovne sastavnice znanosti i tehnologije materijala – sastav, prerada, struktura, svojstva i uporabne karakteristike - definiraju strukturu i metodologiju izrade ovog rada, te se nadovezuju jedna na drugu, povezujući fundamentalne znanosti, s jedne, s društvenim potrebama, tj. inženjerstvom kao primijenjenom znanosti, s druge strane. U fokusu svih razmatranja su željezo i njegove slitine kao temeljni i danas najrasprostranjeniji materijali, zahvalni i zbog jednostavnosti promatranja utjecaja ugljika na međudnose sastava, strukture i prerade, na svojstva i uporabne karakteristike. Pregled materijala obuhvaća ugljične i legirane čelike, s težištem na materijalima prijeko potrebnima u pomorstvu i brodogradnji. Široka uporaba svih vrsta ugljičnih čelika razlog je podjednako opširnog pregledu, s prikazanim sastavima, strukturama, svojstvima, postupcima prerade i primjenama. Skromniji udio legiranih čelika, uzrokovan prije svega ekonomskim razlozima, usmjerio je pregled na posebnu skupinu, tzv. superslitine, pa su one posebno i detaljno obrađene.

Svrha je rada na jednostavan način prikazati sinergiju sastava, strukture, postupaka prerade, svojstava i uporabnih karakteristika, u znanosti i tehnologiji materijala.

Ključne riječi: znanost i tehnologija materijala, ARMCO-željezo, čelik za kotlove, brodograđevni čelik, željezni lijevovi, legirani čelik, superslitina, lopatica turbine

Summary

Paper's subject – Material Science & Engineering with Application Overview – encloses a wide area. Basic elements of material science and engineering – composition, structure, processing, features and application characteristics – define paper's subject, structure and work methodology, thus connecting fundamental sciences on one side to society needs, i.e. engineering as an applied science on the other. Iron and its alloys are in the focus of all consideration, as basic materials with the widest use, well suited due to the simple carbon influence correlation of composition, structure, and processing to features and application characteristics. Material overview includes carbon and alloyed steels, with an accent on materials used in application in shipbuilding and seafaring. Wide application of all carbon steels for ship hull, engine, boiler and larger portion of ship equipment manufacture is the reason for an equally broad overview containing compositions, structures, features, processing and applications. Modest of application of alloyed steels, caused by economic reasons alone, has directed their overview at a special group – super alloys, shown and described separately and thoroughly.

In this paper a synergy between fundamental sciences and engineering, as an applied science, i.e. composition, structure, processing, features and application characteristics, in material science & technology is given in a simple and illustrative manner.

Key words: material science and engineering, ARMCO iron, boiler steel, shipbuilding steel, cast iron, alloyed steel, super alloy, turbine blade

*mr. sc. Jadran Šundrica, dipl. ing., Sveučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, Dubrovnik

** Nataša Jurjević, dipl. ing., Sveučilište u Dubrovniku, Ćira Carića 4, Dubrovnik

***Mato Prčan, dipl. ing., Dubrovnik

1. Uvod

Introduction

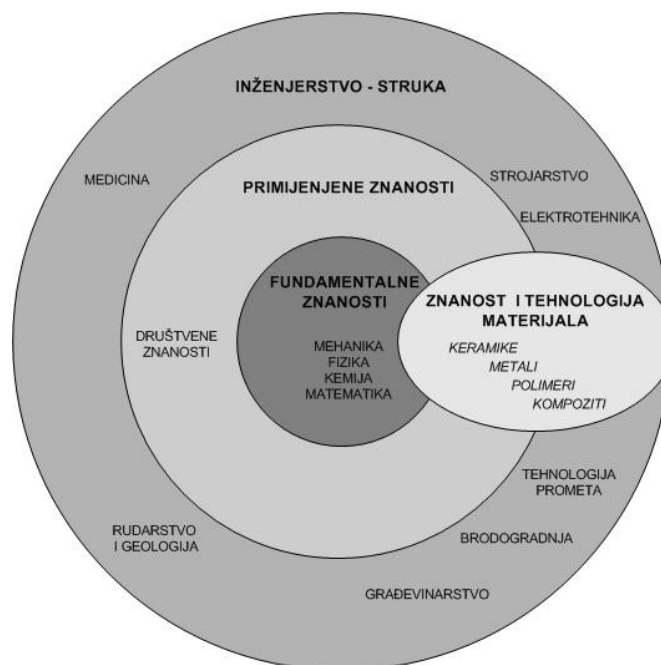
Materijali, čvrste tvari od kojih je nešto izrađeno ili sastavljeno, svuda su oko nas. Njihovo poznavanje i iskorištavanje temelj su našeg postojanja, razvoja i napretka. Isprepletenost razvoja ljudske civilizacije i materijala nemoguće je razdvojiti. Tako nas povijest, učiteljica života, zapravo uči o materijalima, što se najbolje ogleda u imenima pridjenutima pojedinima povijesnim razdobljima, kao što su kameno, brončano i željezno doba. Posebnu skupinu materijala čine tehnički materijali. Danas se taj pojam odnosi na tvari koje su zbog svojih svojstava korisne u primjeni. Povijesni razvoj ovu je skupinu s keramika proširio na metale, potom na polimere i, naposljetku, kompozite. Jasno je da se, zbog porasta potreba i područja primjene, broj materijala u

ovoj skupini neprestano povećava. Ovim se radom dopunjuje i proširuje prikaz tehničkih materijala u pomorstvu dan u časopisu "Naše more" [1]. Rad obuhvaća sva područja povezana sa znanostu i tehnologijom materijala.

2. Znanost i tehnologija materijala

Material science and engineering

Znanost o materijalima je interdisciplinarna primijenjena znanost koja ujedinjuje spoznaje iz fundamentalnih znanosti kao što su fizika, kemija, matematika i mehanika s inženjerskim vještinama (strukom) iz područja elektrotehnike, strojarstva, tehnologije prometa, brodogradnje i građevinarstva, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Prikaz položaja znanosti o materijalima i tehnologije materijala [8], [10]

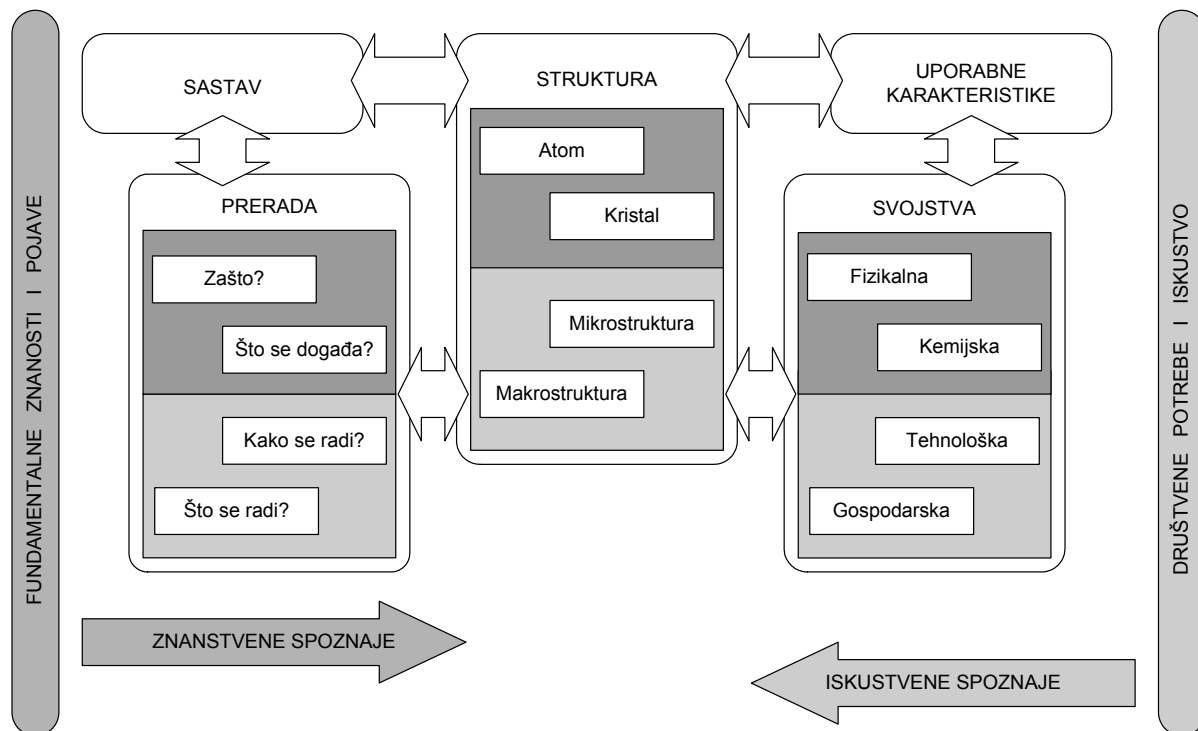
Figure 1. Material science and engineering overview [8], [10]

Njezin je cilj definiranje odnosa između sastava, strukture, svojstava i ponašanja u primjeni i definiranje zajedničkih zakonitosti tih međuođenosa kod keramičkih, kompozitnih, polimernih i metalnih materijala.

Tehnologija materijala ujedinjuje teorijske i iskustvene spoznaje poradi razvoja novih i poboljšanja postojećih

materijala, sukladno specifičnim zahtjevima primjene, kako bi se pronašao optimalni način proizvodnje.

Znanost i tehnologija materijala na jedinstven način ujedinjuju osnovne znanosti, fundamentalna i primijenjena istraživanja, te društvene potrebe i iskustvo, kako je predočeno na slici 2.



Slika 2. Prikaz i odnos osnovnih sastavnica znanosti o materijalima i tehnologije materijala [1]

Figure 2. Material science & engineering basis elements overview and correlation [1]

Kemijski sastav materijala određuje strukturu i načine prerade. Međutim, raznovrsnim postupcima prerade moguće je dobiti tehničke materijale istovjetnog sastava, a različite strukture. Tip strukture određuje osnovna svojstva, koja omogućuju primjenu materijala.

Zahtjevi primjene, s druge strane, definiraju uporabne karakteristike, kojima su određena i svojstva materijala. Također, uporabne karakteristike određuju i strukturu, dobivanje koje omogućuje određena tehnologija prerade. Međutim, dobivanje potrebne strukture može zahtijevati izmjene u kemijskom sastavu materijala. S jedne strane su znanstvene spoznaje koje idu u smjeru primjene, dok s druge strane iskustvene spoznaje usmjeravaju proučavanje i poboljšavanje u praksi primijenjenih materijala. Znanost o materijalima i tehnologija materijala promatraju istu materiju s različitih gledišta, međusobno se preklapajući. U svijetu je, zbog toga, općeprihvaćeni zajednički naziv Znanost tehnologija materijala – ZTM. [2]

3. Sustav željezo – ugljik

Iron - carbon system

Željezo (Fe) pripada skupini metala, kemijski mu je broj 26. U prirodi se rijetko nalazi u čistom stanju; uglavnom je feritne strukture sastavljene od kubno centriranih rešetki. Njegovo dobivanje iz tehničkog željeza elektrolizom je skupo.

Malene je čvrstoće ($120-220 \text{ N/mm}^2$) i tvrdoće (45-55 HB), a ima veliku rastezljivost (50-40%) i otpornost prema koroziji. Posebno mu je svojstvo iznimna sposobnost magnetiziranja, koja mu je omogućila široku primjenu u elektrotehnici.

Ugljik se smatra prijelaznim elementom jer pokazuje svojstva metala i nemetala; kemijski mu je broj 6. U prirodi se susreće u kristalnom i amorfnom obliku. Od kristalnog oblika najpoznatije su dvije alotropske modifikacije: dijamant i grafit. Značajnu primjenu ugljik ima kao dodatak željezu, gdje se veže u željezni karbid, cementit (Fe_3C), ili se izlučuje u obliku grafita.

3.1. Tehničko željezo

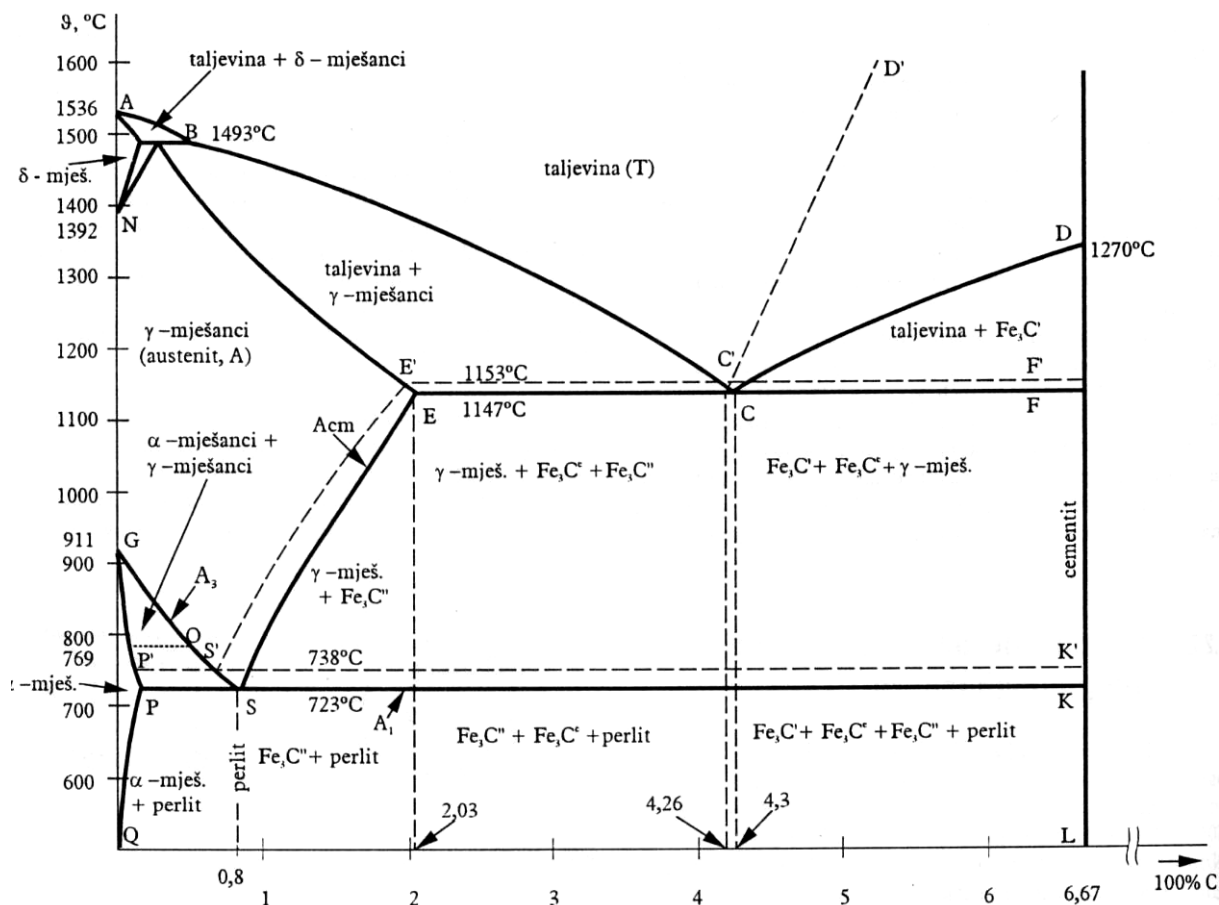
Iron

Ova skupina obuhvaća slitine željeza i ugljika s neznatnim primjesama materijala koji ostaju nakon izradbe - tzv. stalni pratioci: mangan (Mn) i silicij (Si); te nečistoćama: fosforom (P) i sumporom (S).

Najveći utjecaj na svojstva željeznih slitina ima sadržaj ugljika. Prema tehnologiji dobivanja, željezne se slitine dijele na: čelik i lijevove. Lijevovi u najvećem broju primjera sadrže znatno više ugljika nego čelik.

Kemijski sastav i brzina hlađenja prilikom skrutnjavanja određuju strukturu, tj. sustav slijevanja željeza, prikazan na slici 3. [3], koji se može podijeliti na:

- metastabilni (željezo-cementit $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$),
- stabilni (željezo-grafit Fe-C).



Slika 3. Sustav željezo – ugljik [2]

— metastabilni (brzo hlađen) sustav - - - - stabilni (sporo hlađen) sustav

Figure 3. Iron – carbon system [2]

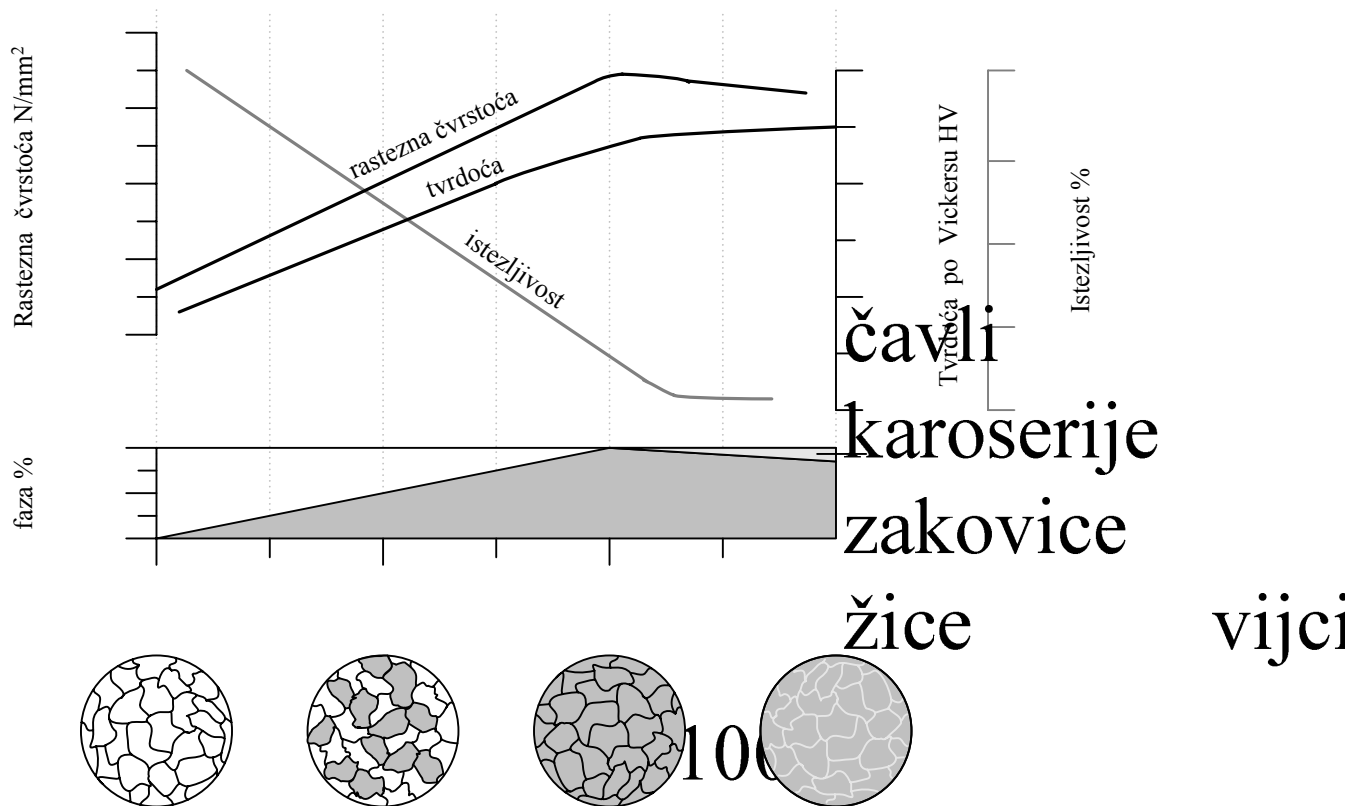
— metastabile (quickly cooled) system - - - - stabile (slowly cooled) system

3.2. Čelik

Steel

Čelik je slitina željeza i ugljika, s maksimalnom primjesom ugljika do 1,7%. Različiti sastav značajno utječe na mogućnost prerade, strukturu, svojstva, a time i primjenu, pa se čelik dijeli na:

- niskougljični (meki) ($\text{C} < 0,2\%$),
- srednjougljični ($\text{C} 0,2-0,5\%$),
- visokougljični ($\text{C} 0,5-1,7\%$).



Slika 4. Prikaz utjecaja sadržaja ugljika na strukturu i mehanička svojstva čelika [9], [11], [15]

Figure 4. Overview of carbon influence onto steel structure and mechanical properties [9], [11], [15]

Niskougljični čelici imaju uglavnom feritnu strukturu, a svojstvima su bliski čistom željezu, što se ogleda u mogućnostima njihova zavarivanja, dok im je glavni nedostatak nemogućnost postizanja visoke tvrdoće kaljenjem. Primjenjuju se za izradbu konstrukcija, pa se za njih upotrebljava i naziv konstrukcijski čelici.

Srednjougljični čelici imaju miješanu, perlitno–feritnu strukturu. Nasuprot niskougljičnim čelicima, imaju veću čvrstoću i tvrdoću, te manju žilavost i istezljivost. Veća količina ugljika otežava zavarivanje, no omogućuje kaljenje. Uglavnom se primjenjuju za izradbu konstrukcijskih elemenata.

Viskougljični čelici imaju perlitno–cementitnu strukturu, koja je glavni uzrok povećanoj i tvrdoći, ali i smanjenoj žilavosti i istezljivosti. Široku primjenu imaju u izradbi alata, zbog iznimno dobre kaljivosti, nauštrb rastezljivosti, a samim time i u izradbi konstrukcija.

3.3. Lijevano željezo

Cast iron

Lijevano željezo dobiva se lijevanjem sirova željeza ($C > 2,06\%$). Sadržaj je ugljika između 2,5 i 3,5%. Ovisno o strukturi lijevano željezo dijeli se na:

- sivi lijev (ugljik je izlučen kao grafit u obliku ljesaka),
- nodularni lijev (ugljik je izlučen kao grafit u obliku kuglica).

Struktura lijevova može biti feritna, feritno–perlitna i perlitna, zbog čega je sivom lijevu čvrstoća u rasponu od 100 N/mm² za feritnu strukturu do 400 N/mm² za perlitnu strukturu, tj. od 380 do 700 N/mm² kod nodularnog lijeva. Nodularni je lijev legiran i manganom (Mn) poradi dezoksidacije taljevine, te cjepivom na bazi magnezija (Mg), koji osigurava izlučivanje grafita u obliku kuglica,

što mu uz povoljnu čvrstoću i tvrdoću daje i zadovoljavajuću žilavost.

4. Primjena željeza i njegovih slitina *Iron and iron alloys application*

Široka tehnička primjena željeza i njegovih slitina temelji se na povoljnom odnosu cijene i kvalitete, tj. svojstava. Najbolji je primjer jeftini sivi lijev, čija je najšira primjena ograničena jedino njegovim svojstvima. Ograničenja kod primjene čelika su puno manja, pa se njime i najviše koristi u tehničkoj praksi.

4.1. ARMCO-željezo *ARMCO Iron*

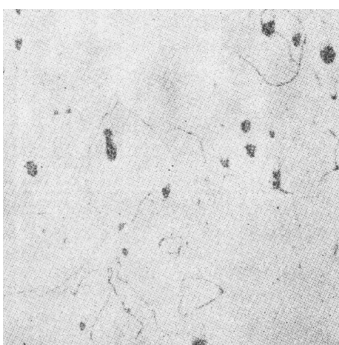
ARMCO-željezo je relativno čisto željezo koje se dobiva u pećima s otvorenim ložištem, na sličan način kao i čelik. Visoka se čistoća postiže na visokim temperaturama, oksidacijom nečistoća zbog dodavanja željezne rude visoke čistoće za vrijeme postupka rafinacije. U tablici 1. prikazan je sastav ARMCO-željeza i, za usporedbu, elektrolitskog i niskougličnog čelika.

Tablica 1. Sastavi elektrolitskog i ARMCO-željeza te niskougličnih čelika [11]

Table 1. Low carbon steel, electrolytic and ARMCO Iron compositions [11]

MATERIJAL	C	Mn	P	S	Si
elektrolitsko željezo	0,006	-	0,005	0,005	0,005
ARMCO-željezo	0,015	0,020	0,005	0,025	u tragovima
niskouglični čelik	0,06	0,40	0,012	0,035	0,009

Svojstva ARMCO-željeza ovise o malenim promjenama sastava, veličini i obliku zrna, a koji su posljedica mehaničke ili toplinske obrade. Struktura ARMCO-željeza predočena je na slici 5.



Slika 5. Struktura ARMCO-željeza

Figure 5. ARMCO iron structure

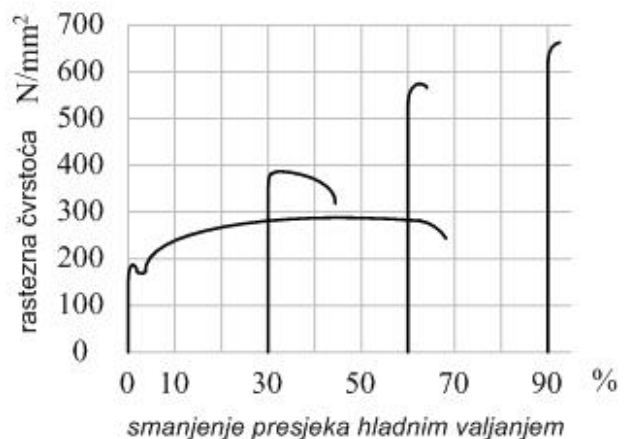
U tablici 2. srednje su vrijednosti mehaničkih svojstava nakon različitih vrsta obrade.

Tablica 2. Mehanička svojstva ARMCO-željeza nakon različitih vrsta obrade [11]

Table 2. ARMCO iron mechanical properties after processing [11]

	GRANICA TEČENJA (N/mm ²)	RASTEZNA ČVRSTOĆA (N/mm ²)	ISTEZLJIVOST (%)
sporo hlađenje	124	283	47
brzo hlađenje	207	324	36
vruće valjanje	179-221	290-331	22-28

Utjecaj hladnog valjanja na rasteznu čvrstoću, granicu tečenja, istezljivost i oblik krivulje naprezanje - produljenje prikazan je na slici 6.



Slika 6. Utjecaj hladnog valjanja na krivulju naprezanje - produljenje ARMCO-željeza [10], [11]

Figure 6. Cold rolling influence onto ARMCO iron stress - strain curve [10], [11]

ARMCO-željezo lako se i ravnomjerno zavaruje, boji i ima visoku magnetsku permeabilnost i nisku retentivnost. Široka primjena u gotovo svim područjima tehnike uključuje: galvanizirane limove, oplatu brodskih tankova, generatore pare, spremnike plina, cijevi velikih promjera, hladnjake, itd.

4.2. Čelici za kotlove *Boiler steels*

Specifična primjena zahtijeva od čelika za kotlove otpornost na visoke temperature. Čelici za kotlove su niskouglični čelici, feritno-perlitne strukture s određenim udjelom mangana (Mn) i silicija (Si) ili niskolegirani čelici legirani kromom (Cr) i molibdenom (Mo); prikaz je u tablici 3.

Tablica 3. Orijentacijske vrijednosti kemijskog sastava prema katalogu proizvođača [12]**Table 3. Chemical composition values according to manufacturer's catalogue [12]**

MATERIJAL	C %	Si %	Mn %	P max %	S max %
360	0,10	0,25	0,6	0,05	0,05
410	0,12	0,25	0,8	0,05	0,05
460	0,15	0,25	1,0	0,05	0,05
490	0,17	0,25	1,2	0,05	0,05

Svojstva čelika za kotlove, kao i AMCRO-željeza, ovise o malenim promjenama sastava, o veličini i obliku zrna, a koji su posljedica mehaničke ili toplinske obrade.

U tablici 4. srednje su vrijednosti mehaničkih svojstava nakon različitih vrsta obrade.

Tablica 4. Orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava prema katalogu proizvođača [12]**Table 4. Mechanical properties according to manufacturer's catalogue [12]**

MATERIJAL	DEBLJINA (mm)	GRANICA TEČENJA (N/mm ²)	RASTEZNA ČVRSTOĆA (N/mm ²)	ISTEZLJIVOST (%)
360	> 3 – 15	205	360 - 480	26
	>15 – 39	195		26
	>40 – 63	185		25
410	> 3 – 15	235	410 - 530	24
	>15 – 39	225		24
	>40 – 63	215		23
460	> 3 – 15	285	460 - 580	22
	>15 – 39	255		22
	>40 – 63	245		21
490	> 3 – 15	305	490 - 610	21
	>15 – 39	275		21
	>40 – 63	265		20

Tablica 5. Rezultati analize kemijskog sastava čeličnih elemenata kotlova**Table 5. Boiler steel parts chemical composition analysis results**

PRIMJENA	C %	Si %	Mn %	P %	S %
obične cijevi	0,08	0,25	0,46	0,027	0,023
kotvene cijevi	0,08	0,26	0,55	0,009	0,027
plašt podnica ložišta i plašt grla ložišta	0,11	0,23	0,62	0,006	0,023
plašt generatora i kompenzacijski prsten	0,12	0,27	1,06	0,024	0,015
podnica	0,15	0,21	0,87	0,012	0,019
kolčak	0,15	0,23	0,55	0,024	0,030
cijevne stijenke, plašt ulaznog otvora i provlake	0,18	0,215	0,71	0,016	0,024
plašt otvora gorionika	0,18	0,28	0,99	0,015	0,019
prirubnice	0,185	0,29	0,93	0,018	0,039

4.3. Brodograđevni čelici

Shipbuilding steels

Brodograđevni čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika, koji su najzastupljeniji u proizvodnji i primjeni za nosive, uglavnom zavarene konstrukcije.

Za konstrukciju broskog trupa rabe se toplo valjani limovi, široke trake, profili i šipke, opisani u pravilima o materijalima registara brodova. Proizvode se u konvertorima s kisikom, električnim pećima ili posebnim postupcima koje odobravaju registri. Dodatni zahtjevi registara brodova odnose se na dezoksidaciju čelika i postupak valjanja.

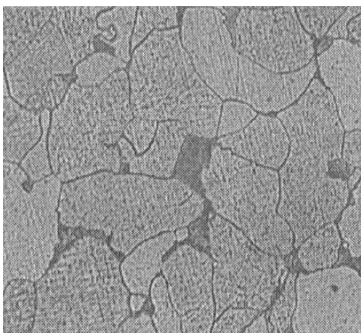
Pri izgradnji, popravcima i eksploataciji brodova, od iznimne je važnosti poznavanje sastava i svojstava brodograđevnih čelika.

Brodograđevni čelici dijele se na [13], [14]:

- čelike normalne čvrstoće,
- čelike povećane čvrstoće.

4.3.1. Brodograđevni čelici normalne čvrstoće Normal strength shipbuilding steels

Većina brodova gradi se od brodograđevnih čelika normalne čvrstoće, koji se ovisno o najnižoj temperaturi jamčene žilavosti dijele u sljedeće kategorije: A, B, D i E. Na slici 7. je struktura čelika s 0,18 % C, popraćena kemijskim sastavom u tablici 6., dezoksidacijom i stanjem isporuke u tablici 7., te mehaničkim svojstvima u tablici 8.



Slika 7. Struktura čelika s 0,18% ugljika

Figure 7. Steels structure (C=0,18%)

Tablica 6. Kemijski sastav brodograđevnih čelika normalne čvrstoće [13], [14]

Table 6. Normal strength shipbuilding steel chemical composition [13], [14]

SASTAV (%)						
KATEGORIJA	C max	Mn min	Si max	P max	S max	Al min
A	0,21	2,5 x C	0,5	0,035	0,035	-
B	0,21	0,8	0,35	0,035	0,035	-
D	0,18	0,6	0,35	0,035	0,035	0,015
E	0,18	0,7	0,35	0,035	0,035	0,015

Ugljik i 1/6 sadržaja mangana ne smiju biti veći od 0,40%.

Tablica 7. Dezoksidacija i stanje isporuke brodograđevnih čelika normalne čvrstoće [13], [14]

Table 7. Normal strength shipbuilding steel mechanical properties [13], [14]

KATEGORIJA		A	B	D	E
DEZOKSIDACIJA	t≤25	svaki postupak	svaki postupak	svaki postupak	umiren i obrađen na sitno zrno
	t≤50	svaki postupak	svaki postupak	svaki postupak	
	t>50	umiren	umiren	umiren i obrađen na sitno zrno	
STANJE ISPORUKE	t≤35	nije ograničeno	nije ograničeno	nije ograničeno	normalizirano ili termomehanički valjano
	t<50			normalizirano ili termomehanički valjano	
	t≤100	normalizirano ili termomehanički valjano	normalizirano ili termomehanički valjano	normalizirano ili termomehanički valjano	

Tablica 8. Mehanička svojstva brodograđevnih čelika normalne čvrstoće [13], [14]

Table 8. Normal strength shipbuilding steel mechanical properties [13], [14]

KATEGORIJA	GRANICA TEČENJA (N/mm ²)	RASTEZNA ČVRSTOĆA (N/mm ²)	ISTEZLJIVOST (%)	TEMPERATURA ISPITIVANJA ŽILAVOSTI (°C)
A	235	410/520	22	20
B				0
D				-20
E				-40

4.3.2. Brodograđevni čelici povećane čvrstoće Increased strength shipbuilding steels

- E (E32, E36, E40),
- F (F32, F36, F40).

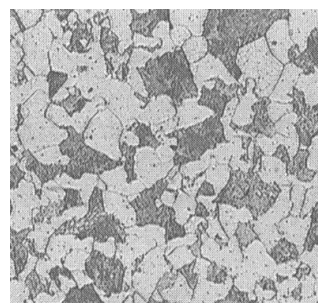
Trendovi smanjenja ukupnih troškova materijala i utroška pogonske energije potaknuli su razvoj čelika povišene čvrstoće. Primjenom tih čelika smanjuju se masa i volumen konstrukcije, te nosivi presjeci, zbog više granice tečenja i rastezne čvrstoće.

Porast čvrstoće nije rezultat povećanoga udjela ugljika, već tehnologije prerade, pa se čelici povećane čvrstoće dijele na:

- sitnozrnate normalizirane (firitno-perlitna struktura),
- poboljšane (mikrostruktura popuštenog martenzita),
- termomehaničke obrađene.

Pravilima registara [13], [14] brodograđevni se čelici povišene čvrstoće ovisno o najnižoj temperaturi jamčene žilavosti, dijele u četiri skupine s tri podskupine:

- A (A32, A36, A40),
- D (D32, D36, D40),



Slika 8. Struktura normaliziranog čelika s 0,18 % ugljika

Figure 8. Normalized steel structure (C=0,18%)

Na slici 8. prikazana je struktura čelika sa 0,18 % C, popraćena kemijskim sastavom u tablici 9., dezoksidacijom i stanjem isporuke u tablici 10., te mehaničkim svojstvima u tablici 11.

Tablica 9. Osnovni kemijski sastav brodograđevnih čelika povećane čvrstoće [13], [14]

Table 9. Increased strength shipbuilding steel basic chemical composition [13], [14]

SASTAV (%)												
KATEGORIJA	C max	Mn	Si max	P max	S max	Al min	Nb	V	Ti max	Cu max	Cr max	Ni max
A	0,18	0,9	0,5	0,035	0,035	0,015	0,02-0,05	0,05-0,10	0,02	0,35	0,20	0,40
D		-										
E		1,6										
F	0,16			0,025	0,025							0,80

Tablica 10. Stanje isporuke brodograđevnih čelika povećane čvrstoće [13], [14]

Table 10. Increased strength shipbuilding steel delivery status [13], [14]

KATEGORIJA		A			D			E			F					
PODGRUPA		A32	A36	A40	D32	D36	D40	E32	E36	E40	F32	F36	F40			
STANJE ISPORUKE	t≤12,5	svaki postupak			svaki postupak			normalizirano ili termomehanički valjano			normalizirano ili termomehanički valjano					
	t≤20	normalizirano ili termomehanički valjano			svaki postupak											
	t≤25													normalizirano ili termomehanički valjano		
	t≤35				normalizirano ili termomehanički valjano											
	t≤50															
	t≤100													normalizirano ili termomehanički valjano		

Tablica 11. Mehanička svojstva brodograđevnih čelika povišene čvrstoće [13], [14]

Table 11. Increased strength shipbuilding steel mechanical properties [13], [14]

KATEGORIJA	GRANICA TEČENJA (N/mm ²)	RASTEZNA ČVRSTOĆA (N/mm ²)	ISTEZLJIVOST (%)	TEMPERATURA ISPITIVANJA ŽILAVOSTI (°C)
A32	315	440/570	22	0
D32				-20
E32				-40
F32				-60
A36	355	490/630	21	0
D36				-20
E36				-40
F36				-60
A40	390	510/660	20	0
D40				-20
E40				-40
F40				-60

4.4. Željezni lijev

Cast iron

4.4.1. Sivi lijev

Grey cast iron

Od svih željeznih lijevova sivi i nodularni lijev ima najveću primjenu u brodogradnji, pa će biti posebno obrađeni.

Sivi lijev slitina je željeza i ugljika u kojoj je ugljik izlučen u obliku lamela grafita.

Tablica 12. Norme za sivi lijev
Table 12. Grey cast iron structure

NORMIRANO		SASTAV (%)				RASTEZNA ČVRSTOĆA (N/mm ²)	TVRDOĆA HB
DIN 17006	ISO 185 - 1988	C	Si	Mn	P		
GG-20	200	3,3-3,5	1,8-2,0	0,6-0,8	<0,5	200	170-220
GG-25	250	2,8-3,2	1,2-1,6	0,7-0,9	<0,3	250	180-240
GG-30	300	2,6-3,0	1,2-1,8	0,8-1,2	<0,2	300	200-260

Sivi lijev ima feritnu, perlitnu ili perlitno–feritnu matricu u kojoj je izlučen grafit. Stabilna se kristalizacija Fe-C legura postiže beskonačno sporim ohlađivanjem, a praktično se sporo ohlađivanje nadomješta elementom – grafitizatorom – silicijem (Si). Što je hlađenje sporije, izlučuje se više grafita u obliku lamela, a to smanjuje čvrstoću i žilavost. Nasuprot tomu, izlučeni grafit omogućuje prigušenje vibracija i podmazivanje pokretnih dijelova, sprječavajući time zaribavanje zbog intenzivnog adhezijskog trenja.



Slika 9. Struktura sivog lijeva

Figure 9. Grey cast iron structure

Uporaba sivog lijeva je jako široka (postolja alatnih strojeva, cijevi, rešetke, kućišta pumpa, ventila, motora i reduktora, košuljice cilindara, stapovi, prsteni stapova, klizni ležajevi, radijatorski članci, bubnjevi kočnica, papuče vagonskih kočnica, itd.), čemu pogoduje jeftina proizvodnja, a najveće su ograničenje njegova svojstva.

4.4.2. Nodularni lijev Ductile iron

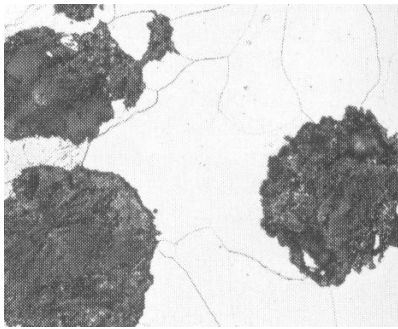
Nodularni lijev slitina je željeza i ugljika u kojoj je ugljik izlučen u obliku kuglastog (nodularnog) grafita.

Tablica 13. Norme za nodularni lijev
Table 13. Ductile iron standards

NORMIRANO		SASTAV (%)			ČVRSTOĆA (N/mm ²)	HB
DIN 17006	HRN	C	Si	Mn		
GGG-50	NL 500	3,2-3,8	2,4-2,8	<0,5	500	170 - 240
GGG-60	NL 600				600	190 - 270
GGG-70	NL 700				700	230 - 300

Nodularni lijev ima feritnu, feritno–perlitnu ili perlitnu strukturu. Sastav nodularnog lijeva nije propisan normom, ali dane su preporučene vrijednosti i zahtjev za potpunim uklanjanjem drugih legirnih elemenata (Ti, Al, Pb, itd.).

Nodularni grafit formira se cijepljenjem s 0,5% magnezija (Mg) ili 0,5% Cera (Ce), a omogućuje povoljniju raspodjelu naprezanja. Oblik nodularnog grafita također smanjuje urezno djelovanje, čime se povećava žilavost. [5]



Slika 10. Struktura nodularnog lijeva [3]

Figure 10. Ductile iron structure [3]

Nodularni se lijev upotrebljava za dinamički opterećene konstrukcije, kao što su: koljenaste i bregaste osovine, stapovi, stapajice, ojnice, pribornice, remenice, zupčanici, lančanici, brodska sidra, bitve, itd.

4.4.3. Izotermički poboljšani nodularni lijevovi

Austempered ductile iron

Izotermički poboljšani nodularni lijev danas je nova vrsta lijeva koja zamjenjuje konstrukcijske čelike ili čelični lijev za one dijelove kod kojih se zahtijeva visoka čvrstoća, istežljivost, žilavost, dinamička izdržljivost i otpornost na trošenje.



Slika 11. Struktura izotermički poboljšanoga nodularnog lijeva [4]

Figure 11. Austempered ductile iron structure [4]

Odljevci se austenitiziraju pri 900 °C, a zatim se brzo hlade do temperature između 200 i 400 °C, gdje držanjem dolazi do izotermičke pretvorbe u srednji ili donji bainit (svijetle površine na slici 11.).

Primjenjuje se za izradbu koljenastih osovine, zupčanika i stapajica motora.

4.5. Legirani čelik

Alloyed steel

Legirani čelici druga su skupina materijala na osnovi željeza kod kojih se uz ugljik za dobivanje željenih svojstava koristi legirnim elementima. S obzirom na količinu elemenata, legirani se čelici dijele na:

- niskolegirane (do 8% legirnih elemenata),
- visokolegirane (više od 8% legirnih elemenata).

Struktura legiranih čelika uvelike utječe na njihovo ponašanje i svojstva. Tako ih danas ima cijeli niz. Poboljšanje svojstava legiranih čelika moguće je postići uz primjenu novih načina prerade.

Posebna skupina legiranih čelika su čelici za turbinske lopatice, tzv. superslitine. Uvjeti rada zahtijevaju pritom otpornost na koroziju i na djelovanje visokih temperatura, te iznimno dobra mehanička svojstva.

Tablica 14. Osnovni kemijski sastav čelika za turbinske lopatice

Table 14. Turbine blade alloyed steel basic chemical composition

LEGIRNI ELEMENT %									
C	Cr	Co	Mn	Mo	Ni	No+Ta	N	Si	W
0,08 - 0,16	20 - 22,5	18,5 - 21	1 - 2	2,5 - 3,5	19 - 21	0,75 - 1,25	0,1 - 0,2	1	2 - 3

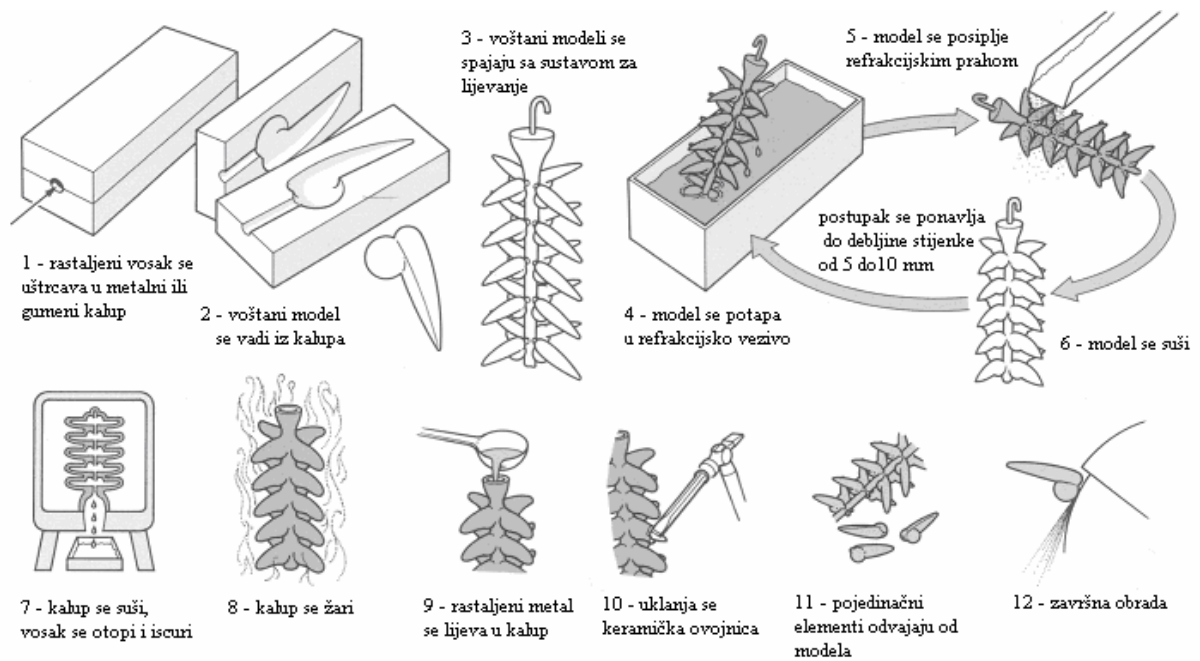
Napredak u postupku prerade ilustrirat će se na primjeru legiranog čelika za turbinske lopatice [4].

4.5.1. Lopatice dobivene konvencionalnim lijevanjem

Turbine blade manufactured by conventional casting

Konvencionalno lijevanje uključuje precizni ili

mikroljev, koristeći se keramičkim kalupima, kako je prikazano na slici 12. [9]. Rastaljeni se metal lijeva u keramički kalup, gdje se skrutnjava. Dobivena je struktura polikristalna s jasno definiranim granicama između zrnaca, što je čini podložnom puzavosti i lomu pri velikim naprezanjima zbog učinka centrifugalnih sila na povišenim temperaturama.



Slika 12. Shematski prikaz konvencionalnog lijevanja [7]

Figure 12. Conventional casting overview [7]



Slika 13. Lopatica proizvedena konvencionalnim lijevanjem sa shematskim prikazom strukture

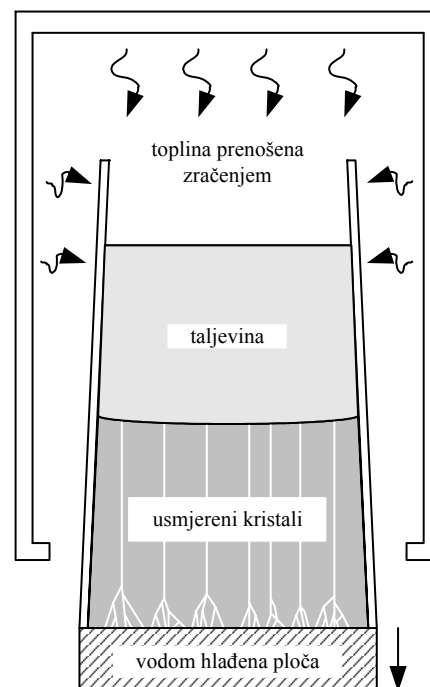
Figure 13. Turbine blade manufactured by conventional casting with structure schematics

4.5.2. Lopatice dobivene usmjerenim skrutnjavanjem

Turbine blade manufactured by single crystal growing

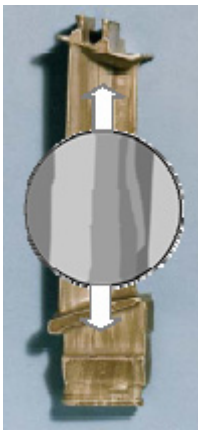
Usmjerenom skrutnjavanju poboljšani je postupak konvencionalnog lijevanja. Rastaljeni se metal lijeva u keramički kalup, smješten u zagrijani spremnik, pa se polako hladi pomicanjem kalupa prema dolje.

Kristali počinju rasti u smjeru izvlačenja kalupa, čime se stvaraju granice između zrnaca u smjeru opterećenja, kako je prikazano na slici 14. [7]



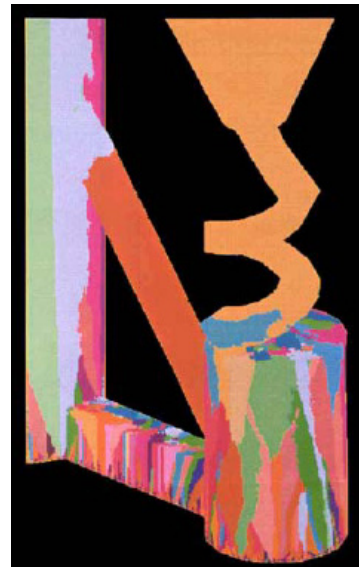
Slika 14. Shematski prikaz usmjerenog skrutnjavanja [7]

Figure 14. Directional solidification schematics [7]



Slika 15. Lopatica proizvedena usmjerenim skrutnjavanjem sa shematskim prikazom strukture

Figure 15. Turbine blade manufactured by directional solidification with structure schematics



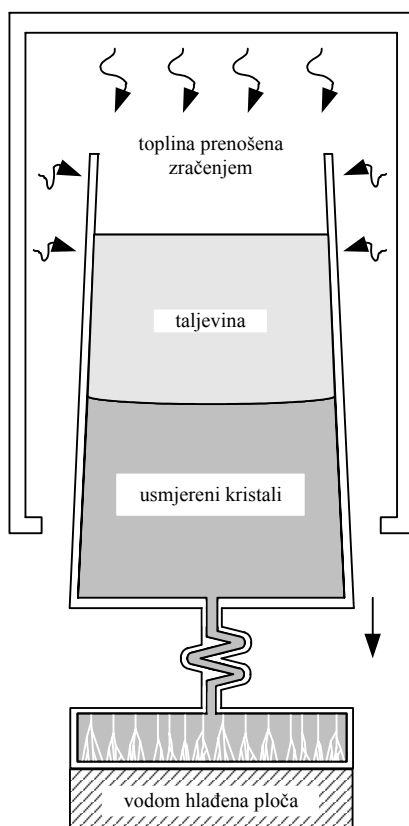
Slika 17. Računalni CAD/CAM model rasta monokristala

Figure 17. Single crystal growing computer CAD/CAM model

4.5.3. Lopatice dobivene rastom monokristala

Turbine blade manufactured by single crystal growing

Rast monokristala poboljšani je postupak usmjerenog skrutnjavanja nakon lijevanja rastaljenog metala u keramički kalup smješten u zagrijani spremnik. Kalup je podijeljen u dva dijela, povezana spiralnim kanalom. Kako se kalup pomiče prema dolje, u njegovu se donjem dijelu formira kristal u smjeru izvlačenja. Samo jedan od formiranih kristala uspijeva proći kroz spiralni kanal. Strogo kontroliranom brzinom izvlačenja, u gornjem dijelu kalupa nastaje monokristal, kako je prikazano na slici 16. [7]



Slika 16. Shematski prikaz postupka proizvodnje monokristalne lopaticice [7]

Figure 16. Single crystal growing schematics [7]



Slika 18. Lopatica proizvedena rastom monokristala sa shematskim prikazom strukture

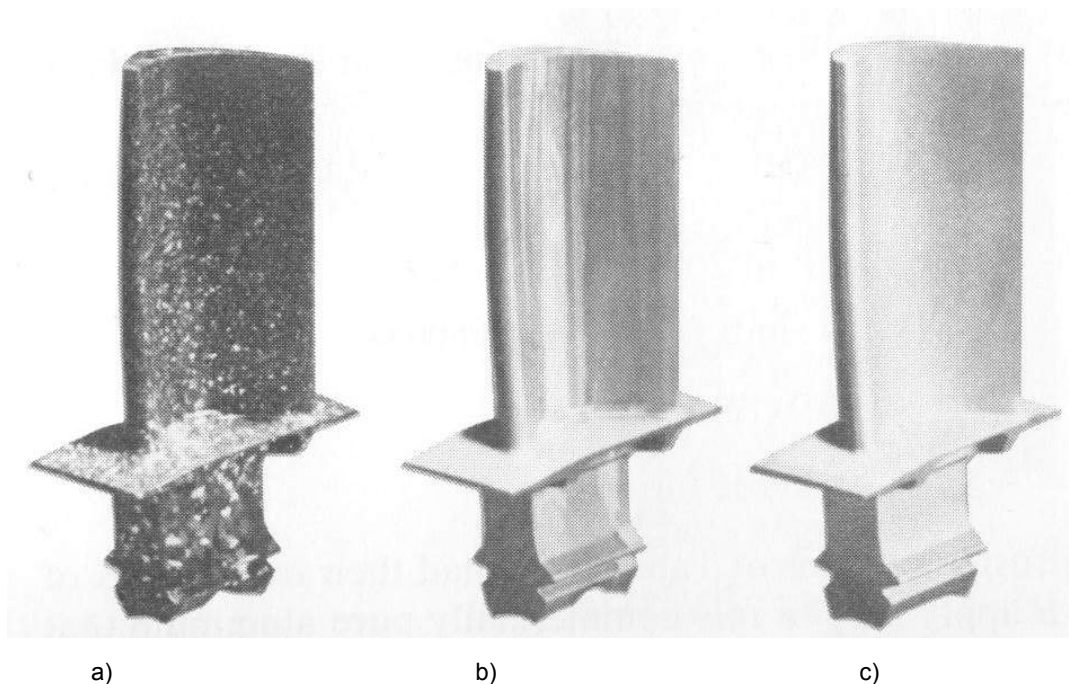
Figure 18. Turbine blade manufactured by single crystal growing with structure schematics

4.5.4. Usporedba nakon eksploatacijskih ispitivanja

Exploitation test comparison

Slika 19. [8] prikazuje izgled lopatica turbina izrađenih: konvencionalnim lijevanjem (a), usmjerenim skrutnjavanjem (b) i rastom monokristala (c) nakon eksploatacijskih ispitivanja.

Najveća, okom vidljiva oštećenja nastala su na lopatici izrađenoj konvencionalnim postupkom lijevanja. Na lopatici izrađenoj usmjerenim skrutnjavanjem oštećenja se jedva vide, dok lopatica izrađena rastom monokristala nije pretrpjela nikakvih oštećenja.



Slika 19. Lopatice turbina nakon eksploatacijskih ispitivanja: [8]
 a – lopatica lijevana konvencionalnim postupkom; b – lopatica lijevana usmjerenim skrutnjavanjem;
 c – lopatica lijevana rastom monokristala

Figure 19. Turbine blades after exploitation test: [8]
 a – conventionally casted blade; b – directional solidification casted blade;
 c – single crystal growing casted blade

5. Zaključak

Conclusion

U fokusu svih razmatranja su željezo i njegove slitine kao temeljni i danas najrasprostranjeniji materijali, zahvalni i zbog jednostavnosti promatranja utjecaja ugljika na međudnose sastava, strukture i prerade, na svojstva i uporabne karakteristike. Pregled materijala obuhvatio je ugljične i legirane čelike, s težištem na materijalima prijeko potrebnima u pomorstvu i brodogradnji. Široka uporaba svih vrsta ugljičnih čelika razlog je podjednako opširnog pregledu, s prikazanim sastavima, strukturama, svojstvima, postupcima prerade i primjenama. Skromniji udio legiranih čelika, uzrokovan prije svega ekonomskim razlozima, usmjerio je pregled na posebnu skupinu, tzv. superslitine, pa su one posebno i detaljno obrađene. Pregledom svakog materijala, počevši od kemijskog sastava kao osnove za promatranje sa znanstvenog aspekta znanosti i tehnologije materijala, strukture kao temelja za definiranje svojstava, a samim time i uporabnih karakteristika, upućeno je na postojanje uzročno-posljedičnog lanca među navedenim elementima, i na mogućnost utjecaja na odlike materijala s pomoću različitih tehnologija prerade. U radu se, na nov,

jednostavan i posebno ilustrativan način, prikazala sinergija fundamentalnih znanosti i inženjerstva, tj. sastava, strukture, postupka prerade, svojstava i uporabnih karakteristika, u znanosti i tehnologiji materijala.

Literatura

References

- [1] J. Šundrica, "Kompozitni materijali", Naše more, 37, 1-2, Dubrovnik, 1990, str. 79-81.
- [2] F. Kovačiček, et.al., *Inženjerski priručnik IP4 proizvodno strojarstvo*, sv. I, Materijali, Školska knjiga, Zagreb 1998.
- [3] B. Kraut, *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb 1988.
- [4] T. Filetin, *Svojstva i primjena materijala I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [5] R. C. Thomson, *Microstructural and Mechanical Property Modelling of Austempered Ductile Iron Camshafts*, Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Loughborough University, Great Britain, 2001.
- [6] ASM International, "Superalloys – retrospect and future prospects", ASM International, Materials Park, Ohio, pp 339-351.

- [7] S. Kalopakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison – Wesley publishing company, 1997.
- [8] L. H. Van Vlack, *Elements of Materials Science and Engineering*, Addison – Wesley publishing company, 1985.
- [9] L. Edwards, *Manufacturing with materials*, The Open University, Oxford, 1990.
- [10] W.F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1996.
- [11] *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 8th Edition, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1996.
- [12] *Slovenske železarne - železarna Jesenice, Toplo valjani limovi 1*, «Zrinski», Čakovec, 1980.
- [13] *Hrvatski registar brodova*, Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, dio 25. Metalni materijali, Hrvatski registar brodova, Split, 2001.
- [14] *Bureau Veritas, Rules and Regulations for the Classification of ships and offshore installations Materials*, NR 216 DNC RO1 E, Impremerie Strasbourgeoise, Paris, France, 1992.
- [15] *Reed's general engineering knowledge for marine engineers*, Thomas Reed Publications, Surrey, Great Britain, 1994.

Rukopis primljen: 28.6.2004.

