

Značajke materijala u brodogradnji

Vuko, Stipe

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:868227>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STIPE VUKO

ZNAČAJKE MATERIJALA U
BRODOGRADNJI

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2019.

	POMORSKI FAKULTET U SPLITU	STRANICA: ŠIFRA:	1/1 F05.1.-DZ
	DIPLOMSKI ZADATAK	DATUM:	8.03.2019.

SPLIT, _____ 2019.

ZAVOD/STUDIJ: _____ BRODOSTROJARSTVO

PREDMET: _____ MEHANIKA POMORSKIH KONSTRUKCIJA

DIPLOMSKI ZADATAK

STUDENT/CA: _____ STIPE VUKO

MATIČNI BROJ: _____ 0023074139

ZAVOD/STUDIJ: _____ BRODOSTROJARSTVO

ZADATAK:

ZNAČAJKE MATERIJALA U BRODOGRADNJI

OPIS ZADATKA:

Opisati i usporediti najvažnije značajke materijala u brodogradnji.

CILJ:

Cilj rada je napraviti pregled prednosti i nedostataka brodograđevnih materijala koji se danas upotrebljavaju u brodogradnji. Svrha ovog rada je analizirati svaki materijal, napraviti međusobnu usporedbu brodograđevnih materijala, spomenuti njihov daljnji razvoj i korištenje u budućnosti te njihove međusobne odnose u samoj konstrukciji broda.

ZADATAK URUČEN STUDENTU/CI: _____ **8.03.2019.**

POTPIS STUDENTA/CE: _____

MENTOR: _____

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

ZNAČAJKE MATERIJALA U
BRODOGRADNJI

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

Prof. dr. sc. Nenad Vulić

KOMENTOR:

mr. sc. Marko Katalinić

STUDENT:

Stipe Vuko

(MB:0023074139)

SPLIT, 2019.

SAŽETAK

Tema ovog rada su značajke materijala u brodogradnji. Izabrana su četiri najučestalija materijala koja se koriste u brodogradnji a to su čelik, aluminijske slitine, drvo i kompozitni materijali. Za svaki materijal napravljen je unificirani pregled svojstava radi jednostavnije usporedbe između materijala, te lakšeg razumijevanja prednosti i nedostataka svakog materijala što je i bio cilj ovog rada. Opisana su svojstva svakog od materijala općenito. Navedena su mehanička svojstva za svaki od materijala. Spomenute su prednosti i nedostaci u pogledu mehaničkih svojstava što je osnovna stavka u izboru konstrukcijskog materijala u brodogradnji. Kako uz porast mehaničkih svojstava različitih materijala obično ide i veća cijena, dan je pregled cijena svakog od materijala u obliku sirovine i poluproizvoda što nam direktno utječe na cijenu završnog proizvoda. Spomenuti su proizvodni postupci za izradu tvorevina, te su opisani oni koji se najčešće upotrebljavaju u brodogradnji. Na kraju, objašnjene su mogućnosti zbrinjavanja na kraju životnog vijeka.

Ključne riječi: *značajke brodograđevnih materijala, čelik, aluminijske slitine, drvo, kompoziti značajke brodograđevnih materijala*

ABSTRACT

The thesis gives an overview of shipbuilding material features. Four most common material groups used in shipbuilding are steel, aluminum alloys, wood and composite materials. Properties of each material are reported in a uniform manner for easier inter-comparison, and for an easier understanding of their mutual advantages and disadvantages. Each material is described in general and its mechanical properties, which are the basic selection criteria, are given. The advantages and disadvantages are outlined for each material individually considering shipbuilding applications. Usually a higher cost is related to the increase of material mechanical properties. Thus, prices are reported of each material considering raw materials and semi-products which directly affect the prices of the finished products. The most common shipbuilding production processes are described. And finally, the possibilities of disposal at the end of life are explained.

Keywords: *steel, aluminium alloys, wood, composite.*

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći se znanjima stečenim tijekom studija i navedenom literaturom.

Stipe Vuko

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ČELIK	2
2.1. OPĆENITO	2
2.2. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	4
2.2.1. Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika.....	4
2.2.2. Određivanje rezultata ispitivanja rastezanjem	5
2.2.3. Određivanje rezultata ispitivanja žilavosti	5
2.2.4. Ispitivanje tvrdoće	6
2.3. VRSTE BRODOGRAĐEVNIH ČELIKA.....	7
2.3.1. Brodograđevni čelici normalne čvrstoće	7
2.3.2. Brodograđevni čelici povišene čvrstoće	8
2.3.3. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama	9
2.3.4. Čelici za rad pri niskim temperaturama	11
2.4. CIJENA BRODOGRAĐEVNOG ČELIKA.....	13
2.5. TEHNOLOGIJA.....	14
2.5.1. Tehnologija proizvodnje	14
2.5.2. Alati za montažu i zavarivanje	15
2.5.3. Transport u brodogradilištu.....	19
2.5.4. Zaštita broorskog trupa od korozije	20
2.5.5. Zaštita broorskog trupa od obraštanja	22
2.5.6. Antivegetativni(Antifouling) premaz	23
2.6. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA.....	24
2.6.1. Rezanje	25
2.6.2. Taljenje i pročišćavanje	25
2.6.3. Topljenje i stvrdnjavanje.....	26

3. ALUMINIJSKE SLITINE	27
3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	29
3.1.1. Čvrstoća i grupe Al materijala	30
3.1.2. Aluminij i Al - legure bez strukturnog očvršćavanja.....	33
3.1.3. Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem ("kaljive legure").....	37
3.2. CIJENA.....	38
3.3. TEHNOLOGIJA.....	39
3.3.1. Tehnologija proizvodnje	39
3.3.2. Alati za montažu i zavarivanje	40
3.3.3. TIG zavarivanje (<i>Tungsten-electrode inert gas welding</i>)	42
3.3.4. MIG zavarivanje.....	43
3.3.5. Utjecaji na zavarljivost	45
3.4. ODRŽAVANJE.....	47
3.4.1. Zaštita od korozije	47
3.4.2. Popravak	48
3.5. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA.....	48
4. DRVO	51
4.1. OPĆENITO	51
4.1.1. Domaće vrste brodograđevnog drva [11]	52
4.2. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	52
4.2.1. Gustoća drva	53
4.2.2. Vлага u drvu.....	54
4.2.3. Modul elastičnosti.....	55
4.2.4. Čvrstoća na vlak	57
4.2.5. Čvrstoća na tlak.....	58
4.2.6. Udarni rad loma	58
4.2.7. Tvrdća drva.....	59

4.2.8.	Varijacije mehaničkih svojstava	61
4.2.9.	Trajnost drva	62
4.2.10.	Temperatura.....	62
4.3.	CIJENA.....	62
4.4.	TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE.....	63
4.4.1.	Izvedbe spojeva	63
4.4.2.	Tehnologija gradnje	66
4.4.3.	Polimerni materijali u završnoj obradi drvenog broda	68
4.4.4.	Primjena epoksidne smole u drvenoj brodogradnji.....	68
4.4.5.	Alati.....	69
4.5.	ODRŽAVANJE.....	69
4.6.	ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA.....	70
4.6.1.	Tradicionalni način spaljivanja drvenog broda	71
5.	KOMPOZITI	72
5.1.	OPĆENITO	72
5.2.	MEHANIČKA SVOJSTVA.....	73
5.2.1.	Usporedba osnovnih tipova kompozita	74
5.2.2.	Vlaknima ojačani kompoziti.....	76
5.2.3.	Svojstva vlaknima ojačanih kompozita	78
5.2.4.	Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita	79
5.2.5.	Kompoziti s česticama	80
5.2.6.	Sendvič konstrukcije	82
5.3.	MATERIJALI OJAČANJA	85
5.3.1.	Staklena vlakna (engl. <i>Fiberglass</i>).....	85
5.3.2.	Aramidna vlakna	89
5.3.3.	Ugljikova vlakna.....	90
5.3.4.	Hibridne kombinacije vlakana	93

5.4. KOMPOZITI S OBZIROM NA MATERIJAL MATRICE	93
5.4.1. Kompoziti s metalnom matricom	93
5.4.2. Kompoziti s keramičkom matricom	94
5.4.3. Kompoziti s polimernom matricom	94
5.5. MATRICE	96
5.5.1. Materijali matrice.....	97
5.6. CIJENA.....	100
5.7. TEHNOLOGIJA.....	100
5.7.1. Laminati	100
5.7.2. Ručni dodirni postupak laminiranja (engl. <i>Hand Lay-up</i>)	102
5.7.3. Podtlačno oblikovanje	103
5.7.4. Podtlačno ulijevanje	104
5.7.5. Prednosti podtlačnog ulijevanja.....	105
5.7.6. Nedostaci podtlačnog ulijevanja.....	107
5.7.7. Priprema za postupak podtlačnog ulijevanja	108
5.8. ODRŽAVANJE.....	109
5.9. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA.....	110
5.9.1. Recikliranje kompozitnih materijala na primjeru stakloplastike	110
6. USPOREDBA MATERIJALA	111
7. ZAKLJUČAK.....	115
LITERATURA	116
POPIS TABLICA I GRAFOVA.....	120
POPIS SLIKA.....	122
POPIS KRATICA	125

1. UVOD

Brod je financijski skup proizvod, u čiju su izradu uložena znatna materijalna sredstva, vrijeme, znanje i rad. U svakoj proizvodnoj industriji, pa tako i u brodogradnji, moraju se zadovoljiti uvjeti kao što su niska cijena, kratki rokovi isporuke i dobra kvaliteta materijala, te uz to i ostvarivanje financijske dobiti. Potrebno je postići što bolju cijenu proizvoda na tržištu, uz što niže troškove proizvodnje i isporuke.

Brodograđevni materijal, materijalizira formu broda, osigurava plovnost, tvori unutrašnji korisni prostor broda i odvaja ga od morske okoline te preuzima sva opterećenja koja ta okolina nameće brodu. Postoji više standardnih brodograđevnih materijala ovisno o veličini, vrsti i namjeni broda, a neki su brodovi i građeni kombinacijom više materijala (npr. čelik – aluminij, čelik – drvo, itd.) Osnovni materijali za primjenu u brodogradnji obrađeni kao cjeline su: čelik, aluminijske slitine, drvo i kompozitni materijali. Za svaki materijal dan je pregled značajki u istom formatu i svaka cjelina je podijeljena na 6 poglavlja. Počevši sa općenitim dijelom za svaki materijal, njegovim mehaničkim svojstvima, cijenom materijala i komponenti, tehnologijom proizvodnje i obradom materijala, načinom održavanja i produženjem životnog vijeka materijala te smo na kraju spomenuli vrlo aktualnu temu koja će privlačiti sve više pažnje u budućnosti a to je adekvatno zbrinjavanje na kraju životnog vijeka, tj. recikliranje. Izbor materijala direktno utječe na cijenu broda (koliko košta materijal po kilogramu), odabirom tehnologije s kojom ćemo taj materijal transportirati, obrađivati, ugrađivati, cijenom održavanja tijekom eksploatacije pa čak i cijenom zbrinjavanja na kraju životnog vijeka broda.

Motivacija i cilj rada je napraviti pregled prednosti i nedostataka brodograđevnih materijala koji se danas upotrebljavaju u brodogradnji. Svrha ovog rada je analizirati svaki materijal, napraviti međusobnu usporedbu brodograđevnih materijala, spomenuti njihov daljnji razvoj i korištenje u budućnosti te njihove međusobne odnose u samoj konstrukciji broda. Dodatno, kod kompozita je cilj pojasniti direktno spajanje različitih materijala (hibridne aplikacije) te upoznati kolege studente i inženjere s tim činjenicama. Ovo je pregledni rad u kojem popisujemo i uspoređujemo glavna svojstva različitih brodograđevnih materijala.

2. ČELIK

2.1. OPĆENITO

Najvažniji brodograđevni materijal za izradu brodske konstrukcije u velikoj brodogradnji je brodograđevni čelik. Brodograđevni čelik može biti običan ili povišene čvrstoće, a zadovoljava skoro sva svojstva koja se traže za brodograđevni materijal, osim nemagnetičnosti i otpornosti na koroziju. Osim navedenih zahtjeva, brodograđevni čelik treba biti pogodan za zavarivanje i da pri udaru ne puca već da se deformira. Zato se prateći elementi čelika, kao što su ugljik, mangan i silicij biraju u postotku koji osigurava ta svojstva, a poželjno je da sadržaj sumpora i fosfora bude što manji. Nedostatak običnog čelika je pojava krhkog loma pri niskim temperaturama. Čelik povišene čvrstoće ima veću cijenu, ali bolja mehanička svojstva od običnog i manju specifičnu težinu, pa se njegovom upotrebom smanjuje masa broda. Zahvaljujući njegovim mehaničkim svojstvima mogu se koristiti tanji limovi i konstrukcijski elementi manjeg poprečnog presjeka. Zbog visoke cijene čelik povišene čvrstoće se često upotrebljava samo za pojedine elemente konstrukcije [2].

Upotreba čeličnih konstrukcija olakšala je proizvodnju brodova velikih dimenzija. U brodogradnji se zahtijeva posebna kvaliteta čelika. Čelik se nabavlja u obliku ploča ili raznih profila. [30]

Svojstva čelika koje je potrebno uzeti u obzir u brodogradnji su: kemijski sastav, gustoća, prekidna čvrstoća, granica razvlačenja ili konvencionalno naprezanje od 0,2 %, stanje obrade (toplinske ili mehaničke), Youngov modul, Poissonov koeficijent, minimalni radijus savijanja. [24]

Čelik je slitina željeza i ugljika, s maksimalnom primjesom ugljika (C) do 1,7 %. Različiti sastav značajno utječe na mogućnost prerade, strukturu, svojstva, a time i primjenu, pa se čelik dijeli na: [24]

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

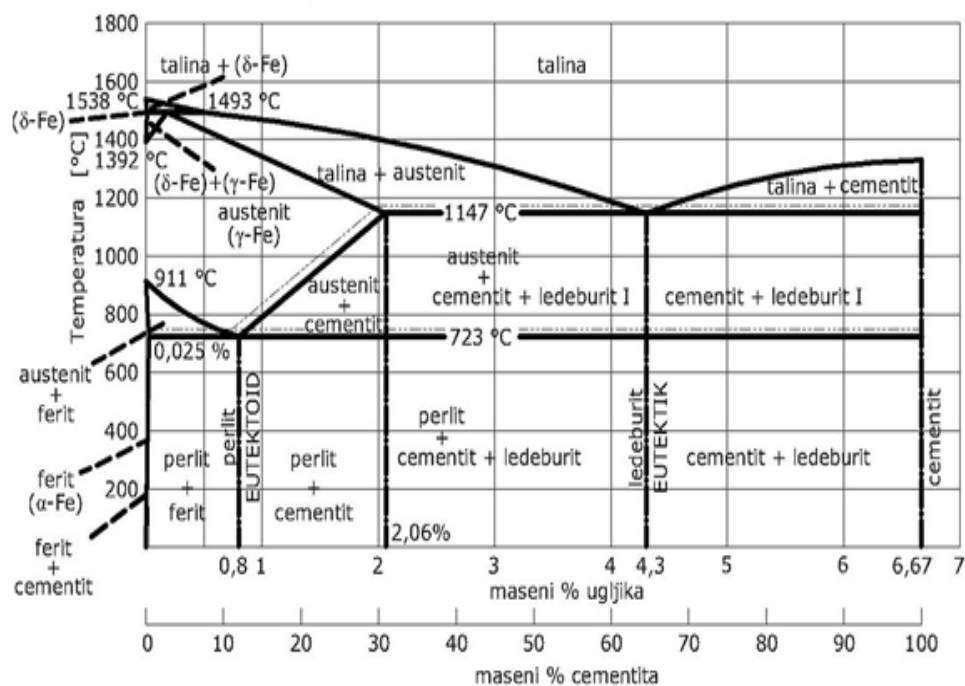
Niskougljični čelici imaju uglavnom feritnu strukturu, a svojstvima su bliski čistom željezu, što se ogleda u mogućnostima njihova zavarivanja, dok im je glavni nedostatak

nemogućnost postizanja visoke tvrdoće kaljenjem. Primjenjuju se za izradbu konstrukcija, pa se za njih upotrebljava i naziv konstrukcijski čelici [24].

Srednjouglični čelici imaju miješanu, perlitno–feritnu strukturu. Nasuprot niskougličnim čelicima, imaju veću čvrstoću i tvrdoću, te manju žilavost i istezljivost. Veća količina ugljika otežava zavarivanje, no omogućuje kaljenje. Uglavnom se primjenjuju za izradu konstrukcijskih elemenata [24].

Visokouglični 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 [24].

Detaljnije o omjerima u strukturama i više detalja u dijagramu 1.



Dijagram 1. Fe-C dijagram stanja [24]

Prednosti čelika: [2]

- čvrsta i žilava struktura,

- moguće popraviti sve deformacije jednostavnim alatom,
- dugovječnost konstrukcije,
- primjenjiv u visokom rasponu temperaturama,
- monolitna konstrukcija cijelog broda bez zakovica ili vijaka na spoju trupa i palube,
- jednostavno recikliranje.

Nedostaci čelika: [2]

- visoka specifična težina,
- korodiranje.

Brodograđevni čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika, koji su najzastupljeniji u proizvodnji i primjeni za nosive, uglavnom zavarene konstrukcije. Brodograđevne čelike možemo podijeliti na: [24]

- normalne čvrstoće,
- povišene čvrstoće,
- za rad pri povišenim i visokim temperaturama,
- za rad pri niskim temperaturama.

2.2. MEHANIČKA SVOJSTVA

2.2.1. Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika

Ispitivanje mehaničkih svojstava brodograđevnih čelika se vrše prema zahtjevima klasifikacijskih društava. Sva ispitivanja moraju obavljati ovlaštene osobe primjenjujući primjerene strojeve. Strojevi se moraju održavati u dobrom stanju. Rezultati moraju biti pohranjeni u laboratoriju i dostupni provjeri.

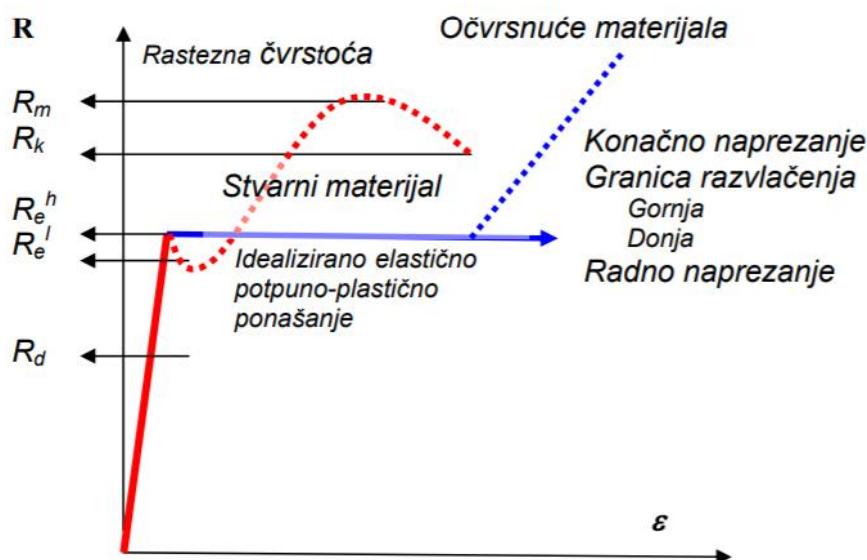
Potrebna su slijedeća ispitivanja: [2]

- ispitivanje rastezanjem (kidalice),
- ispitivanje udarne žilavosti (Charpy-ijev bat),
- ispitivanje savijanjem,
- ispitivanje tvrdoće (po Vickersu, Brinellu ili Rockwellu).

2.2.2. Određivanje rezultata ispitivanja rastezanjem

Za brodograđevne čelike se koriste podaci iz vlačnih pokusa o napreznjima R u funkciji o relativnim deformacijama ε , dijagram 2. To su: [2]

- vlačna ili rastezna čvrstoća R_m ,
- konačno naprezanje R_k ,
- granice razvlačenja R_e ,
- tehnička granica razvlačenja: Određuje se granica 0,2 %, odnosno naprezanje kod kojeg trajno produljenje iznosi 0,2 % početne mjerne duljine,
- produljenje i suženje presjeka.



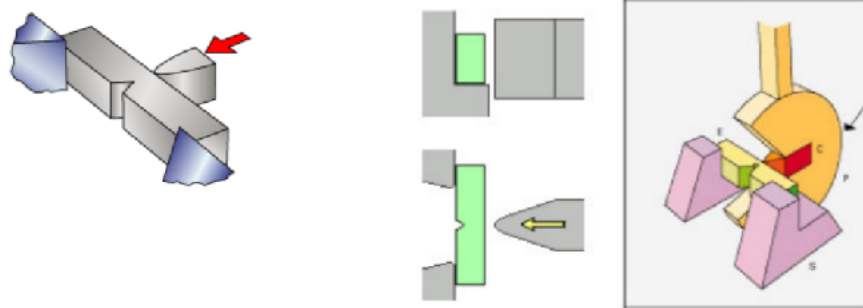
Dijagram 2. Čvrstoća stvarnih i idealiziranih elastičnih potpuno-plastičnih materijala ($\sigma - \varepsilon$ dijagram) [2]

2.2.3. Određivanje rezultata ispitivanja žilavosti

Utvrđuje se utrošena energija udara (prijeloma), uobičajeno u džulima (J), zaokružena na prvi cijeli broj [34].

- KV - za epruvetu s V-izrezom,
- KU - za epruvetu s U-izrezom.

Svi proizvodi namijenjeni za rad na temperaturama nižim od normalnih temperatura okoline (20 °C) moraju se ispitati epruvetama sa V-zarezom. Za ispitivanje treba primjenjivati uređaj sa udarnim klatnom kojeg možemo vidjeti na slici 1 [34].



Slika 1. Ispitivanje udarne radnje loma [34]

2.2.4. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća se određuje po: [34]

- Brinell,
- Vickersu,
- Rockwellu.

Razlike u postupcima ispitivanja tvrdoće možemo proučiti na slici 2.

Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number
		Side view	Top view		
Brinell	10-mm steel or tungsten-carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Diamond pyramid			1–120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Diamond pyramid			25 g–5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$\left. \begin{matrix} HRA \\ HRC \\ HRD \end{matrix} \right\} = 100 - 500t$
B } F } G }	$\frac{1}{16}$ -in. diameter steel ball			100 kg 60 kg 150 kg	$\left. \begin{matrix} HRB \\ HRF \\ HRG \end{matrix} \right\} = 130 - 500t$
E	$\frac{1}{8}$ -in. diameter steel ball			100 kg	HRE

Slika 2. Razlike između Brinell, Vickers i Rockwell postupka ispitivanja tvrdoće [34]
(prijevod eng. u prilogu)

2.3. VRSTE BRODOGRAĐEVNIH ČELIKA

2.3.1. Brodograđevni čelici normalne čvrstoće

Većinom se brodovi grade od brodograđevnih čelika normalne čvrstoće, koji se ovisno o najnižoj temperaturi jamčene žilavosti dijele u sljedeće kategorije: A, B, D i E. U tablici 1 su mehanička svojstva brodograđevnog čelika normalne čvrstoće. [24]

Tablica 1. Mehanička svojstva brodograđevnog čelika normalne čvrstoće [24]

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

2.3.2. Brodograđevni čelici povišene čvrstoće

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: [24]

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

Pravilima klasifikacijskih društava brodograđevni se čelici povišene čvrstoće ovisno o najnižoj temperaturi jamčene žilavosti, dijele u četiri skupine s tri podskupine: [24]

- A (A32, A36, A40),
- D (D32, D36, D40),
- E (E32, E36, E40),
- F (F32, F36, F40).

Preporuke za izbor pojedinog čelika za ove skupine su: [28]

A - za tanje, statički opterećene metalne konstrukcije koje nisu izložene velikim temperaturnim razlikama i temperaturama nižim od -10°C .

B - za odgovorne konstrukcije gdje ne postoji opasnost od krtog loma, a u slučaju manje odgovornih konstrukcija za sva opterećenja.

D - za odgovorne zavarene konstrukcije koje moraju biti sigurne od krtog loma,

E - za razne odgovorne oblike i druge elemente u strojarstvo kao osovine, vratila, klipovi, zupčanici i sl.,

F – čelici za kovanje.

Broj iza slova kod oznake razreda brodograđevnog čelika označava granicu razvlačenja ($\times 10$) materijala u mjernoj jedinici [MPa].

U tablici 2. prikaza su mehanička svojstva brodograđevnog čelika povećane čvrstoće. Možemo usporediti njihove granice tečenja, rasteznu čvrstoću, istezljivost te samu temperaturu ispitivanja. Kategorije čelika A, B, D, E i F smo objasnili u prethodnom naslovu.

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika povećane čvrstoće [24]

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

2.3.3. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama

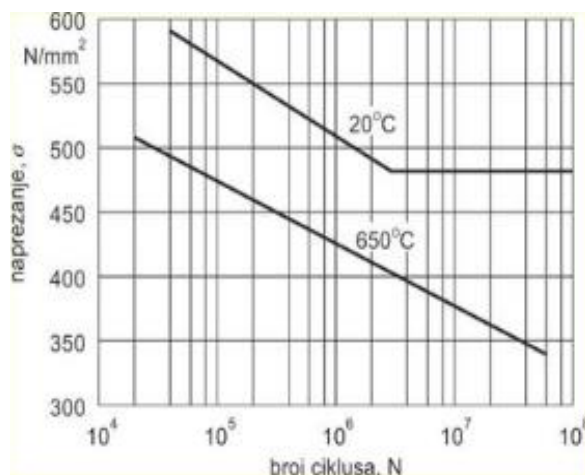
Prema temperaturnom području primjene čelici namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama dijele se na: [8]

- ugljične (čelici za kotlovski lim),
- niskolegirane (najčešće dodaju samo molibden ili kombinacija molibdena i kroma te kod nekih vrsta i manje količine vanadija),
- visokolegirane martenzitne (sadrže oko 1 % molibdena i do 12 % kroma),
- visokolegirane austenitne čelike (austenitni Cr-Ni čelici imaju vrlo visoku temperaturu rekristalizacije (900 – 1000 °C), pa se mogu dugotrajno primjenjivati pri temperaturama 600 – 750 °C).

Mehanička otpornost pri visokim temperaturama ostvarena je: [21]

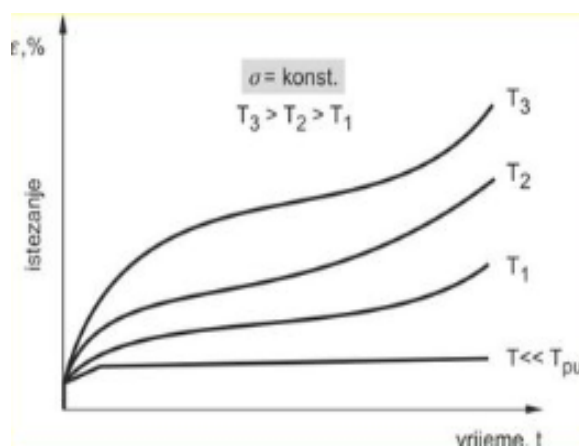
- Plošno centriranom kubnom (FCC) (engl. *face-centered cubic lattice*) rešetkom,
- Legiranjem s Mo, V (Vanadij), Ti (titanijum) i Nb (Niobij),
- Kombinacijom postupaka toplo/hladnog valjanja i dozrijevanja (“starenja”).

Na slici 3 možemo vidjeti pojavu kada se dugo trajno opterećeni materijali koji su pod utjecajem neke sile, ovisno o temperaturi, počnu postepeno rastezati. Puzanje će se zaustaviti ako se materijal pri rastezanju primjereno očvrstne, a u protivnom se puzanje nastavlja do loma materijala [21].



Slika 3. Pojava puzanja pri visokim temperaturama [21]

Na slici 4 možemo uočiti se da tijekom rada pri povišenim i visokim temperaturama smanjuje dinamička izdržljivost ili uopće ne postoji, odnosno dolazi do loma kod određenog broja ciklusa opterećenja. Slika 4 prikazuje kao primjer promjenu savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature [21].



Slika 4. Promjena dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika povišenjem temperature [21]

2.3.4. Čelici za rad pri niskim temperaturama

Poznato je da sniženjem temperature kojoj je čelik izložen može doći do smanjenja duktilnosti, udarne radnje loma, toplinske istezljivosti i vodljivosti, te specifičnog toplinskog kapaciteta. Pri niskim temperaturama primjene čelika može doći do porasta tvrdoće, vlačne čvrstoće R_m i granice razvlačenja R_e . Najopasniju pojava koja se javlja tijekom izloženosti čelika niskim temperaturama predstavlja sniženje žilavosti. U primjeni se razlikuju tri osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama: [8]

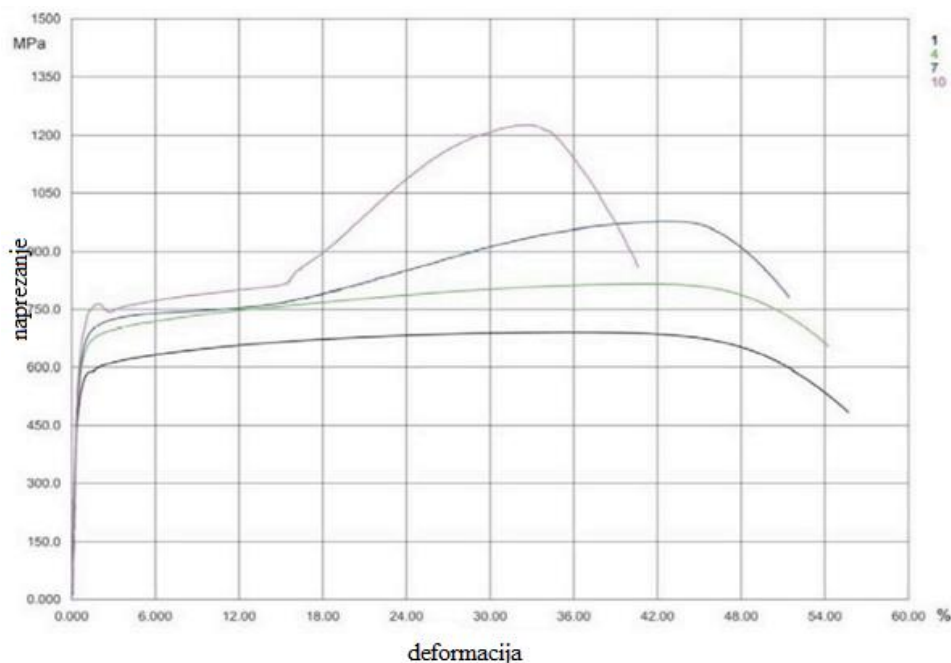
- Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici, čija je niža prijelazna temperatura žilavosti posljedica sitnog kristalnog zrna, dezoksidacije aluminijem i silicijem te više čistoće od klasičnih konstrukcijskih čelika,
- Čelici za poboljšanje, legirani s 1,5 – 9 % nikla, koji pospješuje stvaranje sitnijeg zrna i vrlo žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja,
- Austenitni čelici Cr-Ni (Nikal), Cr-Ni-N (Nitrogen) (Nb, Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N, koji i blizu apsolutne nule imaju zadovoljavajuću žilavost.

U tablici 3 nalaze se podaci iz Hrvatskog registra brodova o primjeni čelika na niskim temperaturama. Mogu se primjeniti finoizrnuti konstrukcijski čelici s nazivnom granicom tečenja do 355 N/mm² za temperaturu do -45 °C, dok se za niže temperature koriste niklom legirani čelici u skladu s normom DIN 17280. Za prijevoz ukapljenog plina prihvatljivi su austenitni čelici u skladu s normom DIN 17440. [12]

Tablica 3. Čelici primjenjivi na niskim temperaturama [12]

Kategorija	Norma / Oznaka materijala	Najniža proračunska temperatura [°C]
Finoizrnuti konstrukcijski čelici s nazivnom granicom tečenja do 355 N/mm ²	DIN 17102	-45
Niklom legirani čelici koji sadrže:	DIN 17280	
0.5 % Ni	13 Mn Ni 6 3	-55
1.5 % Ni	14 Ni Mn 6	-60
3.5 % Ni	10 Ni 14	-90
5 % Ni	12 Ni 19	-105
9 % Ni	X 8 Ni 9	-165
Austenitni čelici	DIN 17440 (AISI 304 L) 1.4404 (AISI 316 L) 1.4541 (AISI 321) 1.4306, 1.4550 (AISI 347)	-165

Usporedni dijagram ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama prikazan je ispod. Za ovaj prikaz uzeta je po jedna karakteristična epruveta iz svake ispitne grupe za svaku temperaturu, a rezultati su prikazani i u tablici 4 [12].



Dijagram 3. Usporedni dijagram ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama [12]

Tablica 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama [12]

Redni broj mjer.	Oznaka epruvete	d	So	E	R _{p0.2}	R _m	ε _m	A
		[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1.	E-1-sobna	7.98	50.014	204.4	485.4	688.9	35.79	55.44
2.	E-4-M40	7.99	50.202	198.5	568.5	815.9	40.30	53.82
3.	E-7-M80	7.88	48.768	195.2	572.6	976.7	42.14	50.94
4.	E-10-M165	6.85	36.863	203.2	603.4	1227.7	31.68	37.18

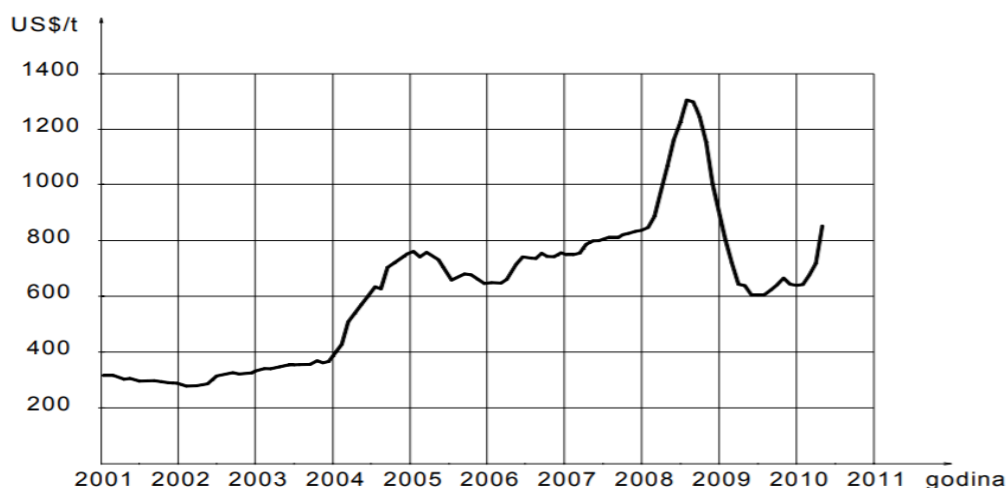
Snižavanjem temperature vrijednosti granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m rastu, dok se istežljivost A i deformacija ϵ_m smanjuju. Vrijednosti modula elastičnosti E su približno jednake bez obzira na promjene temperature što se vidi na dijagramu jer sve krivulje imaju isti nagib Hookovog pravca. Detaljnijom analizom mjernih rezultata

pojedinih svojstva materijala uočeno je da vlačna čvrstoća lagano raste u intervalu od sobne temperature do -40 °C nakon čega porast postaje izraženiji [12].

2.4. CIJENA BRODOGRAĐEVNOG ČELIKA

Kod većine tipova i veličina brodova čelična konstrukcija predstavlja najveću pojedinačnu stavku u cijeni gradnje broda. Ona utječe na iznos dviju najvećih troškovnih grupa: materijala i procesa (rada). Izrada brodske konstrukcije predstavlja, u najvećem broju slučajeva, 30 do 60 % ukupnog troška rada, pa se minimiziranjem volumena broda i mase čelične konstrukcije postižu značajne uštede u procesu. Po pitanju troška vezanog uz nabavu materijala potrebnog za gradnju broda brodograđevni čelik je daleko najznačajnija pojedinačna stavka. Kod jednostavnijih brodova (prvenstveno velikih *bulk carrier-a*) čelik je zadnjih godina dosegao polovinu ukupne cijene koštanja materijala. Na manjim brodovima je utjecaj čelika na cijenu materijala nešto manji, ali ni na složenim brodovima njegov dio u ukupnom trošku materijala ne pada ispod 20 do 25 % [1].

Stoga je potpuno razumljivo da su brodogradilišta izuzetno osjetljiva na kretanje cijene brodograđevnog čelika te da tom problemu posvećuju izuzetnu pažnju. Dodatni poticaj ovakvom stavu brodogradilišta je dalo kretanje cijene brodograđevnog čelika na svjetskom tržištu tijekom posljednjih godina. Iz slike 5 se može uočiti da se cijena brodograđevnog lima dugo vremena zadržavala na nivou od 300 – 350 US\$ po toni, da bi od početka 2004. godine počela naglo rasti doseguvši tijekom 2008. godine dotad nezabilježene visine od oko 1300 US\$ po toni. Slika 5 prikazuje kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima od 2001. godine [1].



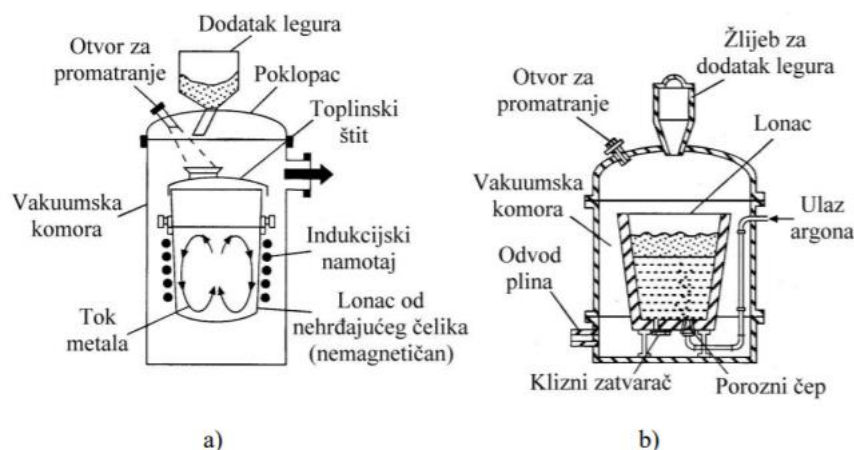
Slika 5. Kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima od 2001. godine do danas – svjetsko tržište [1]

2.5. TEHNOLOGIJA

2.5.1. Tehnologija proizvodnje

Moderna tehnologija izrade čelika uključuje u proces izrade posebnu metalurgiju i kontinuirano lijevanje plosnatih i okruglih profila što manje debljine. Elektrolučna peć je u načelu samo agregat za taljenje, a sve dodatne operacije (korektura kemijskog sastava, dezoksidacija, modifikacija uključaka, smanjivanje udjela plinova u čeliku), koje bitno utječu na kvalitetu čelika izvode se u loncu u vakuumskoj komori uz propuhivanje čelika argonom. Postupak možemo vidjeti na slici 6 [17].

Modernim postupcima obrade u vakuumu može se provesti odsumporavanje, odugljičenje, zagrijavanje taline, legiranje i homogenizacija i pri tome postići veća čistoća čelika i modifikacija uključaka. Prilagodba postupka obrade u vakuumu za proizvodnju čelika s vrlo niskim udjelom ugljika je važan smjer razvoja [17].



Slika 6. VD postupak (vakumiranje lonca): a) elektromagnetsko miješanje taline u loncu, b) miješanje inertnim plinom (Ar) [17]

Na taj način, moguće je smanjiti koncentraciju vodika i kisika za više od 50 %, a sumpora i ispod 0,003 %. Osim toga, dodavanjem modifikatora uključaka dolazi do promjene oblika i rasporeda sulfida, silikata i oksida u okrugli oblik. Sve to dovodi do poboljšanja zavarljivosti i žilavosti pri niskim temperaturama [17].

2.5.2. Alati za montažu i zavarivanje

Da bi posao montaže radnik obavio kako treba i na vrijeme, potreban mu je adekvatan alat. Alat mora biti ispravan i redovito servisiran, a za neke je potrebno često raditi i provjeru sigurnosti [14].

Montaža brodskih elemenata temelji se na njihovom smještanju na pozicije na limu, njihovom postavljanju u ispravan položaj, te pripremanju spojeva za zavarivanje. Budući da se radi o tankim limovima i profilima od čelika velike žilavosti i dobrih obradivih svojstava, rukovanje materijalom pri postavljanju maksimalno je olakšano, a ako bi bili sigurni da su elementi ili sklopovi broda postavljeni ispravno monter mora posjedovati određene mjerne instrumente. Za donošenje materijala na mjesto montaže koriste se dizalice i drugi strojevi [14].

Što se tiče alata, navest ćemo neke u nastavku ali se oni odnose na manja komercijalna brodogradilišta. Na brodogradilišta koja grade manje čelične trupove. Instrumenti za mjerenje i označavanje su: metar dugi i kratki, kutnik, kreda, tanki konop, crtača olovka, laser, vaservaga (libela), visak, itd.

Alati za rukovanje materijalom su: metalne poluge, razne vrste čekića, lančane dizalice, mehaničke ili hidraulične pumpe, stezaljke, klinovi i gafe (pomoćna naprava u montaži) [14].



Slika 7. Mehanička dizalica, hidraulična pumpa, ručna lančana dizalica [14]

Alati za obradu materijala su: plinski rezač, brusilica ravna i kutna, i grijač. Plinski rezač koristi se pri montaži radi oblikovanja krajeva limova i profila (slika 8). Kao plin se koriste kisik i acetilen ili butan (slika 9). Brusilice se najčešće koriste kod pripreme i oblikovanja zavora i oštih bridova [14].



Slika 8. Postupak rezanja [14]



Slika 9. Pribor i boce sa plinom i kisikom za plinski rezač [14]

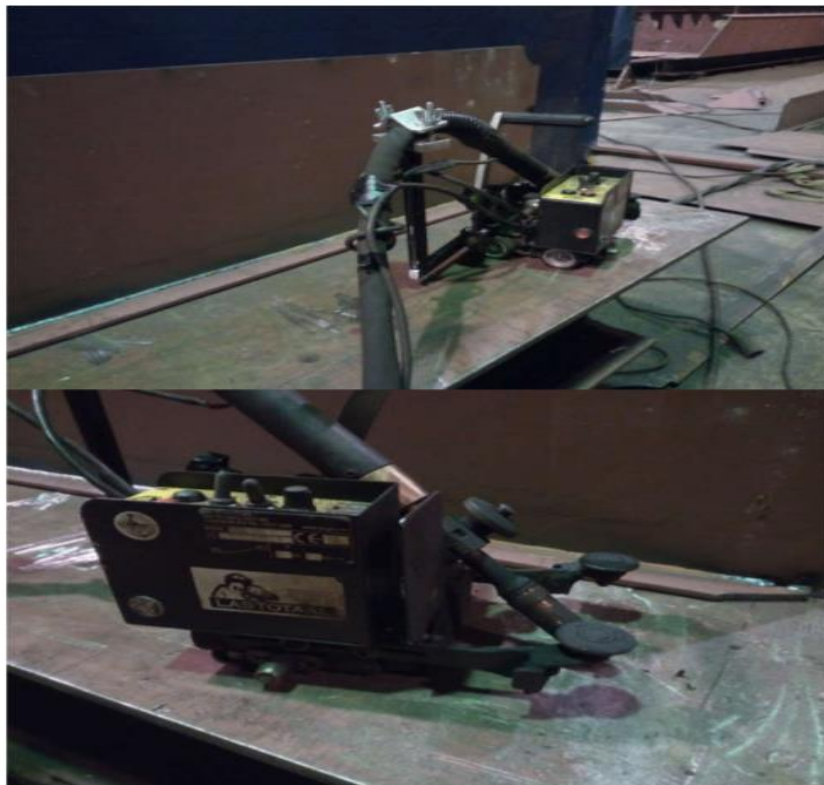


Slika 10. Aparat za zavarivanje MIG postupkom (gore lijevo) i postupak zavarivanja čelične cijevi (gore desno) [14]

Spajanje cijevi pri montaži i prihvaćanje izvodi se kratkim zavarima na određenim mjestima kako bi se komad učvrstio. Za to se koristi REL postupak zavarivanja (dolje desno). Aparat za REL zavarivanje (dolje lijevo) [14].

Aparati i alati za zavarivanje su: [14]

- REL (Ručno elektrolučno zavarivanje, engl. *Manual Metal Arc Welding* (MMA)),
- MIG (Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina, engl. *Metal Inert Gas*),
- MAG (Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina, engl. *Metal Active Gas*),
- EEP (Zavarivanje pod praškom, engl. *Saw Welding*)
- kablovi i kliješta, maska za zavarivanje, piket (čekić/batić koji se koristi za skidanje šljake kod zavarivanja), kliješta. Postupak zavarivanja profila i limova najčešće se izvodi MIG postupkom (slike 10 i 11), dok se pričvršćivanje dijelova pri montaži izvodi REL postupkom zavarivanja (slika 10).



Slika 11. Zavarivanje pomoću automatskog MIG aparata za zavarivanje kojim se pojednostavljuje postupak zavarivanja dugih ravnih profila [14]

Alati za transport i vezivanje tereta su: sajle, transportne trake, kliješta za prihvat, lanci i kuke za podizanje tereta, magneti za prijenos ravnih limova, drvene palete, itd. (slika 12)



Slika 12. Sredstva potrebna za transport u radioni za predmontažu [14]

Kad spominjemo velika komercijalna brodogradilišta onda spominjemo razne postupke pripreme počevši od sačmarenja, premaza materijala preko rezanja i krivljenja upotrebom numeričkih upravljanih strojeva koji automatiziranim linijama dostavljaju već gotove poluproizvode spremna na ugradnju i daljnu obradu [14].

2.5.3. Transport u brodogradilištu

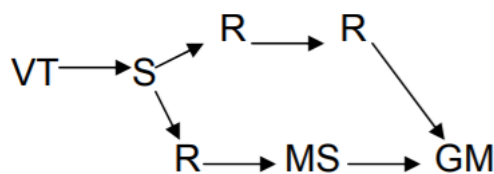
Brodogradilišta mogu normalno funkcionirati samo ako raspolažu jakim transportnim sredstvima. Na neki način upravo ta tehnologija određuje principe rada u proizvodnji. Veća i jača transportna sredstva znače da se više posla može okrupniti u halama u kontroliranim uvjetima rada, a manje spojenja se radi na navozu ili u doku. U nastavku ćemo opisati općenito transport u brodogradilištu jer svako brodogradilište raspolaže različitim transportnim uređajima i alatima ovisno o vrsti i veličini brodova koju grade.

Podjela transporta po zonama: [14]

- Vanjski transport predstavlja vezu brodogradilišta sa isporučiocima materijala i opreme. Ovisno o lokaciji isporučioaca (dobavljača), i postojećoj transportnoj vezi može biti: kopneni (željeznica, cestovna vozila, tegljači), vodni (brod, barža).

- Unutrašnji transport osigurava transportnu vezu među pojedinim fazama proizvodnog procesa, radionicama, radnim površinama, skladištima ... Dijeli se na: među-radionički i radionički.

Obavlja se različitim parternim i zračnim (dizalice) transportnim sredstvima ovisno o vrsti tereta (masa, količina, dimenzije), rastojanju objekata, konfiguraciji terena. Radionički transport pored općih zahtjeva prvenstveno ovisi o potrebama proizvodnog procesa (prijenos, pozicioniranje, preokretanje, itd.) [14].



Slika 13. Plan transporta u brodogradilištu [14]

gdje je:

VT – vanjski transport

S – glavno skladište

R – radionica

MS – međuskladište

GM – građevno mjesto

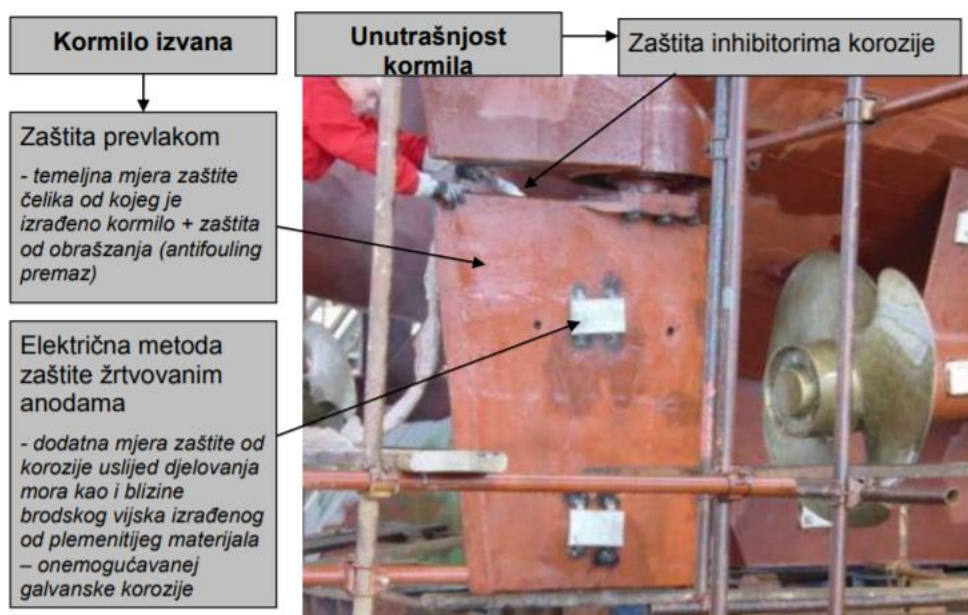
Napomena je da se ovaj plan transporta može odvijati i na plan transporta za brodogradilišta koja rade i s drugim brodograđevnim materijalima koja ćemo obraditi u nastavku a to su aluminijska, drvena i kompozitna brodogradnja [14].

2.5.4. Zaštita brodskog trupa od korozije

Ovisno o dijelu konstrukcije koji se štiti, premazi imaju zaštitnu namjenu i to protiv korozije, protiv obraštanja, protukliznu, protupožarnu itd. Kod izvođenja zaštite od iznimne je važnosti odgovarajuće pripremiti podlogu, ispravno nanositi premaz, te osigurati dobre radne uvjete (osvjetljenje, dostupnost površine, ventilacija) uz odgovarajuću mikroklimu (temperatura okolice, relativna vlažnost i sl.). Pravilan izbor metode bojenja bitno utječe na cjelokupnu zaštitu površine (brzinu zaštićivanja i kakvoću izvedene operacije).

Najčešće se koristi: bojenje četkom, valjcima, prskanje sa zrakom, bezračno i elektrostatsko prskanje [7].

Uz zaštitu premazima, važna je metoda zaštite od korozije u brodogradnji katodna zaštita. Postupak se temelji na privođenju elektrona kovini, bilo iz negativnoga pola istosmjerne struje (narinuta struja) bilo iz plemenitije kovine (žrtvovana anoda), sve dok potencijal objekta ne padne ispod zaštitne vrijednosti jednake ravnotežnom potencijalu anode korozijskoga članka, čime nestaje afinitet za koroziju, tj. kovina postaje imuna [7].



Slika 14. Kombinira različitih tehnologija zaštite – kormilo broda [7]

Inhibitore korozije definiramo kao supstance koje usporavaju korozijske procese kada se u malim koncentracijama dodaju u okolinu. Prema mehanizmu djelovanja dijele se na: anodne, katodne i mješovite, a posebnu skupinu čine hlapivi (isparljivi) inhibitori (VCI – engl. *Volatile Corrosion Inhibitors*). Zbog svojega specifičnog djelovanja inhibitori nalaze primjenu u zaštiti nepristupačnih mjesta brodskih konstrukcija kao što su npr. kobilica, unutrašnjost lista kormila, rog kormila, bokoštitnik, cjevovodi, brodska oprema, električni kontakti itd. Veća primjena inhibitora u brodogradnji bez sumnje bi značila tehnološki, ali i ekonomski napredak u području primjene tehnologija zaštite od korozije [6].

Korozijski postojani materijali općenito su materijali koje karakterizira korozijska otpornost na djelovanje medija koji ih okružuju. U brodogradnji se najviše primjenjuju

nehrđajući čelici, bakrene i aluminijske legure. Nehrđajući se čelici, usprkos osjetno višoj cijeni u odnosu na ugljični čelik, koriste za tankove tereta, cjevovode, teretne pumpe, te ljestve i nosače u tankovima. Veliki problem u primjeni njihova je sklonost lokalnim korozijskim pojavama [6].

Važni materijali za primjenu u brodogradnji su bakrene legure među kojima su nikal-aluminij-manganske bronce osobito kvalitetne i često se upotrebljavaju za izradu propelera. Koroziju je moguće usporiti i različitim konstrukcijskim i tehnološkim mjerama tj. kreativnom primjenom teorijskih temelja pri oblikovanju konstrukcije [6].

2.5.5. Zaštita broskog trupa od obraštanja

Nadzirati obraštanje (engl. *fouling*) u praksi znači riješiti problem adhezije morskih organizama koja se odvija u četiri glavna stadija. Obraštanje počinje u trenutku kad je umjetno stvoreni objekt uronjen u more. Bilo da je riječ o kovini, drvu, kamenu ili plastici, njegova površina brzo akumulira otopljenu organsku tvar i molekule [6].

Obraštanje je vrlo dinamičan proces na koji mogu utjecati strujanje mora, mehanička oštećenja, slanost mora, količina svjetla, temperatura, zagađenje i dostupnost nutrijenata. Jačina obraštanja je i sezonski fenomen koji ovisi i o zemljopisnom položaju. Poznavajući područje u kojem će brod ploviti moguće je procijeniti rizik od obraštanja. Najugroženiji su brodovi koji plovo pri nižim brzinama, brodovi male aktivnosti, te brodovi koji najviše plovo u tropskim i suptropskim morima [6].



Slika 15. Obraštaj podvodnog dijela broskog trupa [6]



Slika 16. Obraslo dno plutajuće platforme [6]

2.5.6. Antivegetativni (en. antifouling) premazi

Glavni su ciljevi brodovlasnika u životnom vijeku broda maksimizirati učinkovitost u eksploataciji i minimizirati potrošnju goriva. Obraštanje i dotrajalogost površine glavni su uzroci povećanja hrapavosti, a hrapavost izvanjske oplata podvodnog dijela trupa ima dominantan utjecaj na otpor trenja. Kod sporih brodova, u koje možemo ubrojiti većinu trgovačkih brodova, udio otpora trenja u ukupnom otporu može iznositi i do 90 %. S pojavom obraštanja rastu troškovi održavanja broda (brod mora češće u dok, priprema površine i nanošenje premaza iziskuju više vremena i sredstava [29]).

Utjecaj na okoliš evidentan je i ozbiljan, jer povećana potrošnja goriva uzrokovana obraštanjem dna broda, rezultira povećanom emisijom štetnih plinova (CO_2 , NO_x , SO_x) i uzrokuje širenje morskih organizama iz prirodnoga staništa u područja gdje mogu predstavljati prijetnju ekološkoj ravnoteži [29].

Međutim najveća kritika antivegetativnim premazima jest toksičnost i njihov loš utjecaj na okoliš. Moderni premazi su manje toksični, izostavljeni su neki elementi kao npr. kositar koji je zabranjen da se koristi kao sastojak u antivegetativnom premazu ali su i manje učinkoviti što predstavlja potencijalni problem u budućim troškovima za brodovlasnika, posebno ako mislimo na velike komercijalne brodove za prijevoz putnika ili tereta [29].

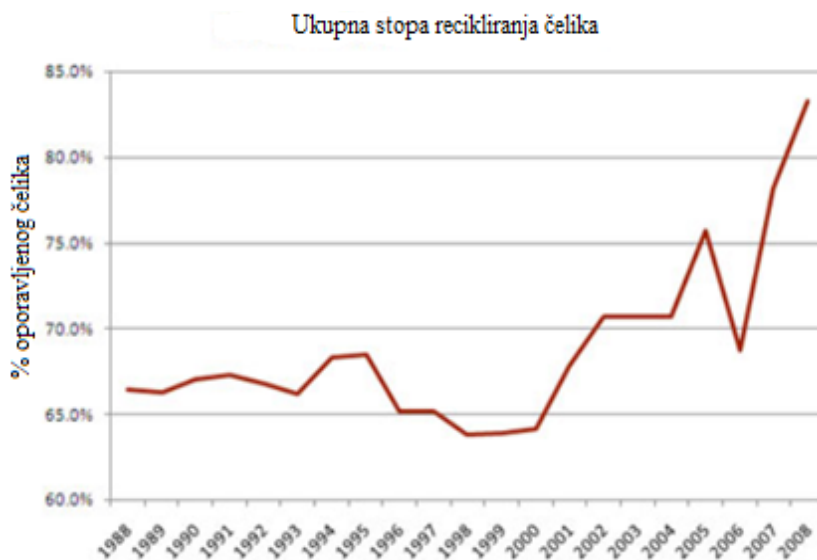
2.6. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA



Slika 17. Proces recikliranja čelika [33]

(prijevod eng. u prilogu)

Čelik je najviše reciklirani materijal na planeti, više nego svi drugi materijali zajedno. Čelik zadržava iznimno visoku stopu recikliranja, koja je u 2014. iznosila 86 %. Nevjerojatna metalurška svojstva čelika omogućuju neprekidno recikliranje bez pogoršanja performansi od jednog do drugog proizvoda [33].



Slika 18. Stopa rasta recikliranja čelika [19]

U potjeri za profitom, brodovlasnici se danas odlučuju na zbrinjavanje brodova vođeni cijenom koju rastuće ekonomije poput Indije, Pakistana i Bangladeša mogu ponuditi prvenstveno zbog minimalnih ulaganja u infrastrukturu, niskih odnosno minimalnih troškova vezanih uz ekološku regulativu i zbog iznimno jeftine radne snage [18].

2.6.1. Rezanje

U slučaju prikupljanja otpadnog čelika u brodogradnji podrazumijeva se da nakon svih inspekcija, ispoštovanja regulativa i klasifikacijskih društava, demontiranja opreme itd. brod raznim tehnološkim procesima režemo na dijelove. Ovaj proces treba biti organiziran na takav način da moraju postojati spremnici posebno dizajnirani za skupljanje metala. Otpadne metalne posude koriste se kao sabirni centri za metale. Čelik se raščlanjuju na sitne komade ili listove kako bi se omogućila daljnja obrada. Mali komadi imaju veliki omjer površine prema volumenu koji se može rastopiti s manje energije u usporedbi s velikim komadima metala. Čelik se oblikuje u čelične blokove, dok se aluminij oblikuje u ploče [18].

2.6.2. Taljenje i pročišćavanje

Taljenje otpadnog čelika odvija se u velikoj peći. Svaki metal se odvodi u peć koja je posebno dizajnirana za taljenje tog određenog metala na temelju njegovih specifičnih svojstava. Proces topljenja koristi znatnu količinu energije.

Međutim, energija potrebna za topljenje recikliranog čelika je manja u usporedbi s energijom potrebnom za proizvodnju metala iz njegove sirovine [18].

Nakon što je proces taljenja završen, sljedeći korak je proces pročišćavanja. Čelik se pročišćava različitim metodama. Pročišćavanje čelika vrši se kako bi se osiguralo da konačni proizvod ne sadrži nečistoće i da je visokokvalitetan. Elektroliza je jedna od metoda čišćenja nekih metala. Ostali metali se jednostavno propuštaju pod snažnim magnetskim sustavima koji odvajaju metale od drugih materijala za reciklažu. Danas postoje različite metode pročišćavanja ovisno o vrsti metala [18].

2.6.3. Topljenje i stvrđavanje

Nakon postupka pročišćavanja, rastaljeni čelik se transportnom trakom prenosi u rashladnu komoru gdje se hladi i skrutne. U ovoj fazi se otpadni metal pretvara u čvrsti metal koji se može ponovno koristiti. Zatim se u rastopljeni metal dodaju druge kemikalije kako

bi se postigla njegova gustoća i druga svojstva. U fazi hlađenja nastaju i oblikuju se različiti oblici i veličine metala [18].



Slika 19. Rezanje sekcija na plaži u Bangladešu [18]

3. ALUMINIJSKE SLITINE

Svjetski su razvojni trendovi sve više usredotočeni na razvoj konstrukcija iz aluminijskih slitina, prije svega zbog njihove relativno male gustoće, niže čvrstoće i veće elastičnosti nego čelik kao vodeći konstrukcijski materijal, pa smanjenje mase nije direktno proporcionalno u usporedbi s drugim konstrukcijskim metalima, te jednako tako i zbog njihove dobre korozijske otpornosti [31]

Danas korištene “morske” aluminijske legure općenito imaju dobru otpornost na koroziju. Do nedavno nije bilo standarda za procjenu otpornosti na koroziju u stvarnom okruženju morske vode, a razvojni inženjeri novih legura oslanjali su se na ubrzane laboratorijske testove koji nisu bili strogo povezani s terenskim testiranjem kako bi se provjerila prikladnost njihovih proizvoda za uporabu u morskim okruženjima. Dva su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao brodograđevnog materijala: [39]

Brodski trup izrađen od aluminijske legure bit će lakši od čeličnog trupa, što sa sobom povlači niz drugih prednosti poput uštede goriva, povećanja brzine itd. U usporedbi

sa stakloplastikom, aluminij ima manju masu pri izradi brodice duljih od 10 metara, i ta prednost progresivno raste s veličinom broda.

Drugo glavno svojstvo je relativno velika korozijska postojanost jer aluminij ima veliki afinitet prema kisiku pa brzo stvara zaštitni oksidni sloj na površni koji sprečava daljnju oksidaciju slojeva ispod. Zahvaljujući tome aluminijski brod ne treba premazivati bojama, osim ako se ne želi postići estetski učinak. Zbog navedenog, aluminijske konstruktivne elemente ne treba predimenzionirati kako bi se spriječio gubitak čvrstoće do kojega dolazi uslijed korozije, kao što se to čini kod čelika. Trup se mora bojiti samo ispod vodne linije, i to antivegetativnim premazima.

Aluminij za konstrukciju trupa koristi se u dva osnovna oblika polu-proizvoda, limovi i profili. Aluminijski konstrukcijski oblici dobivaju se postupkom ekstruzije, gdje se vrući metal utiskuje kroz kalup kako bi se dobio strukturni profil. Ovaj proces je prilično svestran, a novi oblik može se lako dizajnirati i ekstrudirati. Iz tog razloga, postoji niz različitih ekstruzija koje se koriste u gradnji, ali vrlo malo uobičajenih presjeka.



Slika 20. Zavareni aluminijski trup s nadgrađem

Ostala svojstva, odnosno prednosti Al i Al-legura: [37]

- oko 2,9 puta lakši od čelika,
- dobra istezljivost,
- dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama,

- toplinska vodljivost 13 puta veća nego kod nerđajućeg čelika, 4 puta veća od običnog čelika,
- elektrovodljivost bliska Cu (bakar), ali pri istoj težini dvostruko veća nego kod Cu,
- dobro reflektira svjetlost pri visokom finišu i toplinu,
- dobra otpornost na koroziju i dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje slojem oksida čime se postiže samozaštita u normalnoj atmosferi,
- anodizacijom i lakiranjem (eloksiranjem) se postiže izvanredan dekorativni efekt,
- nije magnetičan,
- dobro se obrađuju raznim načinima. Posebno je pogodan za proizvodnju prešanjem (ekstruzijom) složenih šupljih i punih presjeka. Pogodan je i za duboko vučenje i zavarivanje.

3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA

Svrha legiranja jest prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, pa i žilavosti ili livljivosti. Nadalje im je mehanička svojstva moguće poboljšati precipitacijskim očvrstnućem, makar se brojne legure koriste bez ikakve obrade. Za razliku od primarnog aluminijske legure se upotrebljavaju i u valjanom i u lijevanom stanju. [37]

Tablica 5. Fizikalna svojstva Al [37]

Talište	660 °C
Gustoća, pri 20 °C	2,70 g cm ⁻³
Koeficijent linearnog istezanja, (0- 100 °C)	23,5 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Specifični topl. kapacitet, (0 - 100 °C)	920 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
Toplinska vodljivost (0 - 100 °C)	240 J s ⁻¹ m ⁻¹
Specifični električni otpor, (20 °C)	0,0269 Wmm ² m ⁻¹
Modul elastičnosti, (20 °C)	71 900 MPa

Kao dodaci ili nečistoće prisutni su u manjem udjelu željezo (Fe), krom (Cr), i titan (Ti). Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak drugih legiranih elemenata koji poboljšavaju svojstva. Neki od takvih posebnih dodataka su: nikel (Ni), kobalt (Co), litij (Li), srebro (Ag), vanadij (V), cirkonij (Zr), kositar (Sn), olovo

(Pb), kadmij (Cd) i bizmut (Bi). U vrlo malim količinama dodaju se i berilij (Be), bor (B), natrij (Na) i stroncij (Sr). Svi legirni elementi su pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topivi u rastaljenom aluminiju. Topivost elemenata ovisi o kristalima mješancima. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Svojstva legura ovise o topivosti legirnih elemenata, udjelu, veličini, obliku i raspodjeli intermetalnih spojeva. [37]

Najvažniji legirni elementi su: [24]

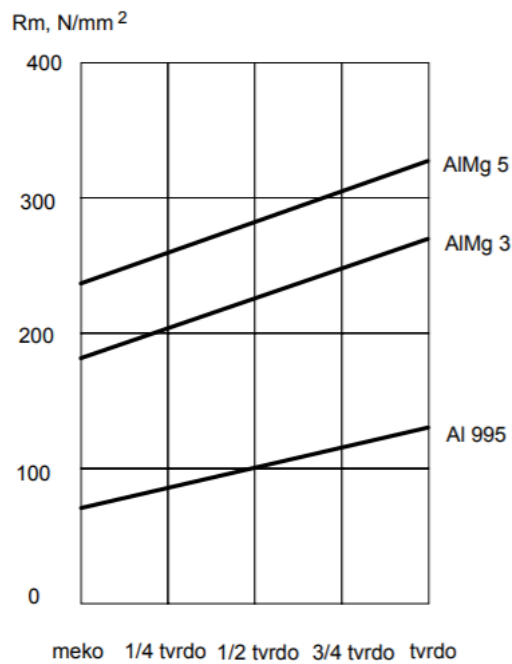
- bakar (Cu)
- magnezij (Mg)
- silicij (Si)
- cink (Zn)
- mangan (Mn).

3.1.1. Čvrstoća i grupe Al materijala

Čisti Al ima čvrstoću 90 – 190 [MPa], ovisno o stanju isporuke (tvrđi, 1/2 tvrđi, 1/4 tvrđi, meki – prema stupnju hladne deformacije). Čvrstoća Al materijala se može povisiti na više načina: [37]

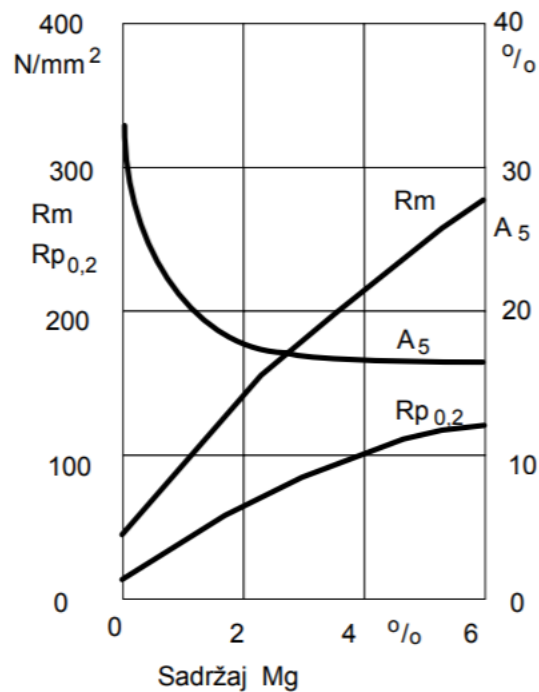
- hladnom deformacijom,
- legiranjem,
- toplinskom obradom,
- kombinacijom, npr. legiranjem i hladnom deformacijom.

Na slici 21 možemo vidjeti kako se hladnom deformacijom aluminijski slitina povećava njihova čvrstoća.



Slika 21. Hladnom deformacijom povećava se čvrstoća [37]

Isto tako na slici ispod možemo vidjeti kako se legiranje aluminija sa magnezijom može povećati čvrstoća materijala.



Slika 22. Legiranjem se može povećati čvrstoća [37]

Mehanička svojstva se mogu značajno povećati legirajućim elementima tvoreći tako legure aluminija. Pri tome se razlikuju dvije grupe: [37]

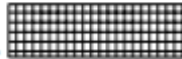
- Al-legure bez strukturnog očvršćavanja tzv. "nekaljive legure"

Grupe nekaljivih legura: Al Mn, Al Mg Mn, AlMg.

- Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem tzv. "kaljive legure".

Grupa kaljivih Al legura: Al Cu Mg, Al Mg Si, Al Mg Si, Al Zn Mg, Al Li Cu Zr, Al Li Cu Mg Zr.

Legura	Serija	Tip	Internacionale oznake	Raspon mehaničkih karakteristika (MPa)							
				0	100	200	300	400	500	600	700
Toplinski Neočvrstive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080								
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105								
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182								
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219								
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351								
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039								
	7000	Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050								

Granica razvlačenja R_p 

Prekidna čvrstoća R_m 

Slika 23. Mehanička svojstva nekih Al slitina [37]

3.1.2. Aluminij i Al - legure bez strukturnog očvršćavanja

Očvršćavanje se u ovom slučaju postiže kombinacijom efekata dodavanja legirajućih elemenata (Mg, Si, Mn, Fe i drugih), hladne plastične deformacije i žarenja. Postiže se cijela lepeza mehaničkih svojstava od mekog stanja s minimalnim mehaničkim vrijednostima i maksimalnom plastičnošću do tvrdih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja, te minimalnom plastičnošću. U ovu grupu spadaju familije legura prema normama: [37]

- aluminij (1000),
- legure s manganom (3000),
- legure s magnezijem (5000).

Legure sa magnezijem (5000) – U ovoj grupi osnovni legirajući element je magnezij, obično do 5 %, a ponekad se dodaje mangan i krom. Ove legure posjeduju osrednja mehanička svojstva, dobro se zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. S većim sadržajem magnezija odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost je dobra ali opada s porastom sadržaja magnezija. Primjena im je vrlo raznovrsna: građevinarstvo, brodogradnja, uređaji za desalinizaciju morske vode, posude, različite cisterne za transport. Zavarljivost je dobra [37].

Tablica 6. Neke od Al legura iz serije 5000 [37]

kemijski sastav %									
Razred	Si	Fe	Cu	MN	Mg	CR	Ni	ZN	Al
5005	0.300	0.700	0.200	0.200	0.50-1.1	0.100	-	0.250	ostaja
5052	0.250	0.400	0.100	0.100	2.2-2.8	0.15-0.35	-	0.100	ostaja
5083	0.400	0.400	0.100	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	-	0.250	ostaja
5154	0.250	0.400	0.100	0.100	3.1-3.9	0.15-0.35	-	0.200	ostaja
5182	0.200	0.350	0.150	0.20-0.50	4.0-5.0	0.100	-	0.250	ostaja
5251	0.400	0.500	0.150	0.1-0.5	1.7-2.4	0.150	-	0.150	ostaja
5754	0.400	0.400	0.100	0.500	2.6-3.6	0.300	-	0.200	ostaja

Aluminijska slitina 5083 („morski“ aluminij) – Aluminijska slitina 5083 je poznat po iznimnim performansama u ekstremnim uvjetima. Aluminij 5083 je vrlo otporan na morske utjecaje pa tako i na industrijske kemijske utjecaje. Vrlo je popularan u brodogradnji pa ga i samim time nazivamo „morskim“ aluminijem [37].

Tablica 7. Fizikalna svojstva Aluminijske slitine 5083 [37]

Property	Value
Density	2650 kg/m ³
Melting Point	570°C
Modulus of Elasticity	72 GPa
Electrical Resistivity	0.058x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	121 W/m.K
Thermal Expansion	25x10 ⁻⁶ /K

(prijevod eng. u prilogu)

- Aluminij 5083 također zadržava izuzetnu čvrstoću nakon zavarivanja. Ima najveću čvrstoću legura koje nisu toplinski predobrađene, ali se ne preporučuje za uporabu na temperaturama višim od 65 °C. U tablici ispod možemo vidjeti da je prisutnost Mg (magnezija) u najvećoj mjeri, od 4,0 – 4,9 %.

Aluminijska slitina 5083 se obično koristi u: [37]

- brodogradnji,
- željezničkim vagonima,
- tijelima vozila,
- karoserijama auto-moto vozila.

Vrste Aluminijske slitine 5083: [37]

- O – mekane tvrdoće,
- H111 – tvrdoće koja se stvara procesom oblikovanja,
- H32 – tvrdoće ojačane valjanjem, a zatim stabilizirane toplinskom obradom na niskoj temperaturi.

Tablica 8. Kemijski sastav „morskog“ aluminija 5083 [37]

Element	% Present
Si	0.4
Fe	0.4
Cu	0.1
Mn	0.4-1.0
Mg	4.0-4.9
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.05-0.25
Al	Balance

(prijevod eng. u prilogu)

**Tablica 9. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu
0.2 – 6.3 mm (O/H111) [37]**

BS EN 485-2:2008 Sheet 0.2 - 6.3mm Thick	
Property	Value
Proof Stress	125 Min MPa
Tensile Strength	275 - 350 MPa
Hardness Brinell	75 HB

(prijevod eng. u prilogu)

**Tablica 10. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu
0.2 – 6.3 mm (H32) [37]**

BS EN 485-2:2008 Sheet 0.2mm to 6.00mm	
Property	Value
Proof Stress	215 Min MPa
Tensile Strength	305 - 380 MPa
Hardness Brinell	89 HB

**Tablica 11. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu
6.3 – 80 mm (O/H111) [37]**

BS EN 485-2:2008 Plate 6.3mm to 80mm	
Property	Value
Proof Stress	115 Min MPa
Tensile Strength	270 - 345 MPa
Hardness Brinell	75 HB

**Tablica 12. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu
80 - 120 mm (O/H111) [37]**

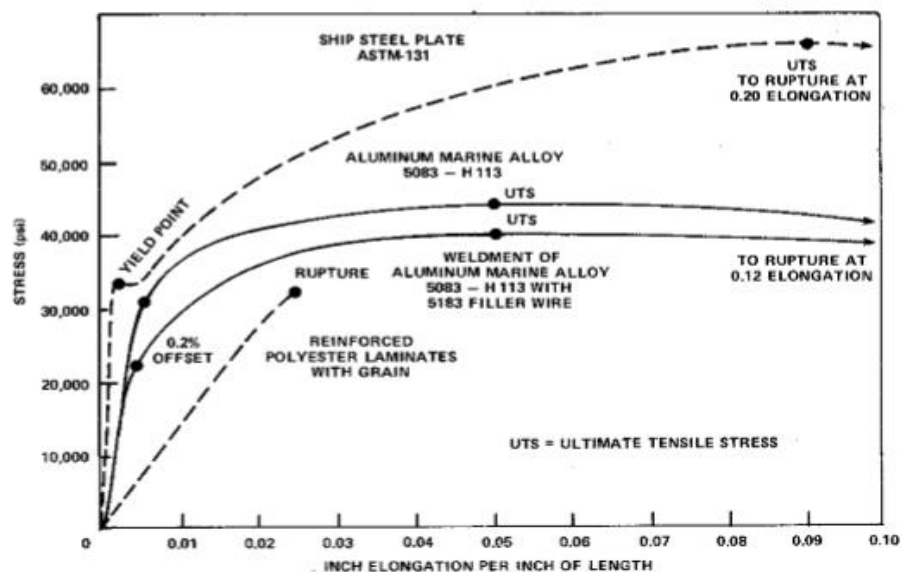
BS EN 485-2:2008	
Plate	
80mm to 120mm	
Property	Value
Proof Stress	110 Min MPa
Tensile Strength	260 Min MPa
Hardness Brinell	70 HB
Elongation A	12 Min %

(prijevod eng. u prilogu)

Aluminijska slitina 5083 se općenito isporučuje kao valjani proizvod u obliku limova i ekstrudirani u obliku profila.

Tipična krivulja naprezanja-deformacije za aluminij prikazana je na slici 24 za 5083 aluminij u osnovnim metalima i zavarenim uvjetima. Također su prikazane krivulje za brodski čelik i za tipični FRP (engl. *Fiber Reinforced Polymer*, polimerni materijali ojačani vlaknima). Osnovni metal i zavareni aluminij pokazuju kontinuirano otvrdnjavanje jer se povećava naprezanje i značajna energija ispod krivulje naprezanja-deformacije. Međutim, ta ukupna energija je mnogo manja od one od čelika, koji pukne na oko 20 % izduženja, u usporedbi s 12 % za aluminij. [36]

Na slici 24 možemo vidjeti koliko postupak zavarivanja snizi svojstva aluminijske legure u odnosu na osnovni materijal.



Slika 24. Krivulja naprezanja – deformacije za Aluminijsku slitinu 5083 [37]

(prijevod eng. u prilogu)

3.1.3. Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem ("kaljive legure")

Ova grupa Al-legura sadrži bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), litij (Li), cink (Zn) i skandij (Sc). Ima mogućnost strukturnog očvršćavanja. To očvršćavanje se postiže određenim toplinskim postupkom. Ovu grupu predstavljaju tri vrste legura: [37]

- legure s bakrom (2000),
- legure sa silicijem i magnezijem (6000),
- legure sa cinkom i magnezijem (7000).

Legure sa silicijem i magnezijem (6000) - Legirajući elementi su silicij (Si) i magnezij (Mg) koji tvore i očvršćavaju spoj Mg_2Si . Posjeduju osrednje mehaničke vrijednosti. Izvanredno dobro se oblikuju. Dobro se zavaruju i posjeduju dobra antikorozivna svojstva. Legure se mogu podijeliti na dva dijela: [37]

- bogatije na sadržaju silicija i magnezija uz dodatak mangana, kroma, cirkonija. Imaju bolja (veća) mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u nosivim elementima.
- siromašnije u sadržaju silicija i magnezija, što im omogućuje velike brzine prešanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Ove legure imaju široku primjenu kao na primjer za zavarene dijelove, cijevi, transportnu opremu, karoserije, za vagone vlakova i za metro jarbole i sl.

Nekoć je bakar bio glavni legirni element za poboljšanje čvrstoće aluminijskih legura, a koristio se za nekoliko brodskih primjena, uključujući i torpedne čamce. Neprikladnost tih aluminijskih legura na bazi bakra za upotrebu na moru postala je očigledna kada su se u roku od nekoliko godina zbog galvanske korozije doslovno raspali.

Tablica 13. Kemijski sastav aluminijskih legura (maseni %) [35]

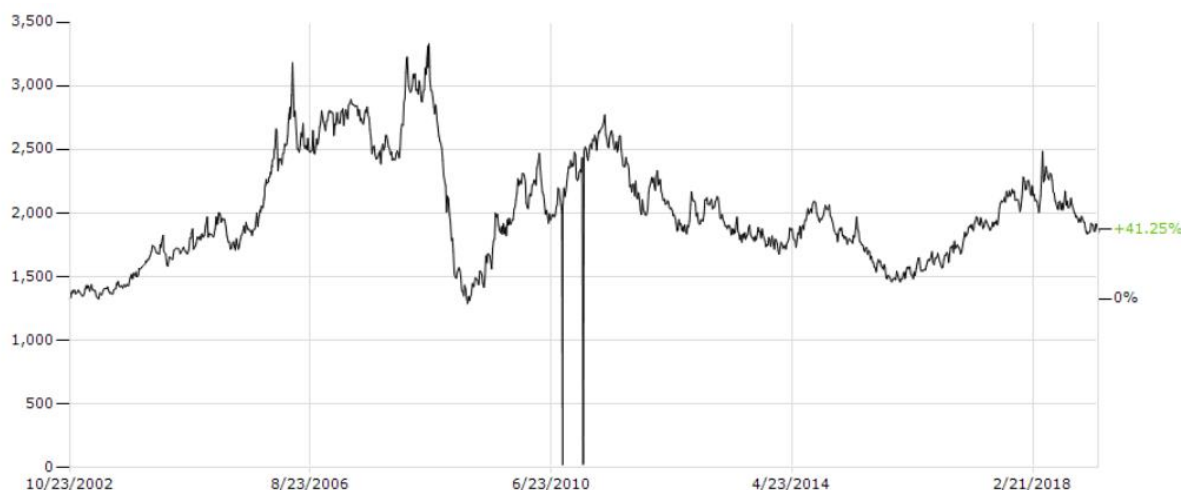
Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	-	xx
5059	0.45	0.50	0.25	0.60-1.2	5.0-6.0	0.25	0.40-0.90	0.20	xx
5083	0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	xx
5086	0.40	0.50	0.10	0.20-0.70	3.5-4.5	0.05-0.25	0.25	0.15	xx
5383	0.25	0.25	0.20	0.7-1.0	4.0-5.2	0.25	0.40	0.15	xx
5454	0.25	0.40	0.10	0.50-1.00	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	0.20	xx
5456	0.25	0.40	0.10	0.50-1.00	4.7-5.5	0.05-0.20	0.25	0.20	xx
6005A	.50-.90	0.35	0.3	0.5	.40-.70	0.3	0.2	0.1	xx
6061	.40-.80	0.7	.15-.40	0.15	.80-1.20	0.04-0.35	0.25	0.15	xx
6063	0.20-0.60	0.35	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	xx
6082	0.7-1.3	0.50	0.1	0.40-1.0	0.6-1.2	0.25	0.20	0.10	xx

3.2. CIJENA

U novije vrijeme Kina vrlo ubrzano razvija proizvodnju aluminijskih legura, pa je u današnje vrijeme najveći svjetski proizvođač s gotovo 20 milijuna tona godišnje proizvodnje. Suštinska konkurentnost aluminijskih legura svodi se na utakmicu s drugim konstrukcijskim materijalima, kao što su čelik i plastika. Ocjena o prihvatljivosti nekog od tih materijala obuhvaća njegove proizvodne troškove po jedinici težine ili jedinici volumena, te svojstva i koristi pri danoj primjeni [5].

Konkurentnost svake pojedine tvrtke koja proizvodi aluminijske legure, uvjetovana je njenom specifičnom troškovnom pozicijom, koja je određena proizvodnim troškovima za materijal (glinica, anode i dr.), energiju, radnu snagu i kapital. Kakva će ta troškovna pozicija tvrtke biti zavisi od toga kakva je bila inicijalna koncepcija izgradnje tvornice, kakva je primijenjena tehnologija u proizvodnji i kolika je kvalificiranost radne snage, te koliko je u proizvodnom procesu efikasan menadžment. Zato se rezultanta učinkovitost tvornice aluminijskih legura izražava kroz iskorištenje struje, specifični utrošak energije, produktivnost i specifične investicijske troškove [5].

Na dijagramu 4 možemo vidjeti intervale rasta i pada cijene 1 tone (t) aluminija kroz period od 2002. godine do danas u intervalima od 4 godine. Novčane jedinice na ordinati su u američkim dolarima (\$). Možemo vidjeti da se dogodio znatni rast od 41,25 % do danas u odnosu na prvu cijenu jedne tone aluminija 2002. godine.



Dijagram 4. Cijena aluminija u periodu od 2002.-2019. godine [5]

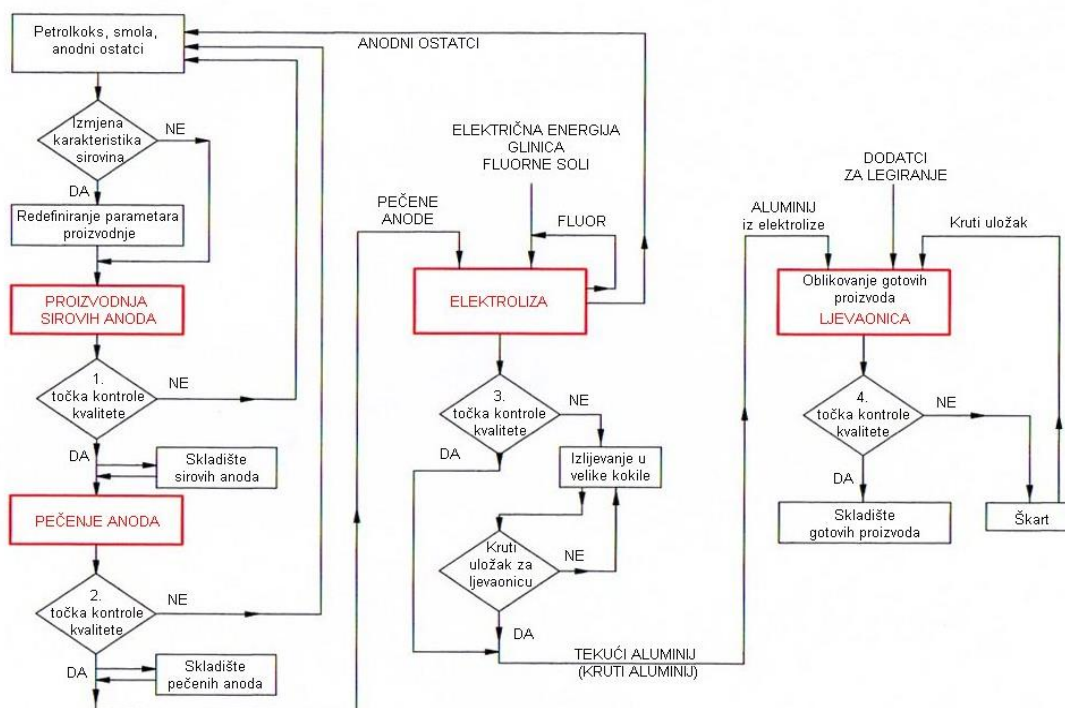
3.3. TEHNOLOGIJA

3.3.1. Tehnologija proizvodnje

Komercijalna proizvodnja aluminija traje tek nešto više od 100 godina, dok čovječanstvo upotrebljava bakar, olovo i kositar već tisućama godina. Pa ipak, danas se u svijetu godišnje proizvede više aluminija (oko 45 milijuna tona primarnog) nego svih obojenih metala zajedno [5].

U Hall-Heroult-ovom procesu aluminij se proizvodi elektrolitičkom redukcijom glinice (Al_2O_3) otopljene u kupki temeljenoj na rastaljenom kriolitu (Na_3AlF_6). Povećanje znanja o kemijskim i elektrokemijskim procesima koji se odvijaju u tvornicama aluminija, bilo je omogućeno promjenama koje su učinjene u kemijskom sastavu kupke. Neki su fluoridi u malim i ograničenim količinama dodani u kupku s namjerom sniženja njene temperature i povišenja učinkovitosti elektrolitičkog procesa. Prema Faradayevom zakonu elektrolize, jedan Faradej elektriciteta (26,8 Ah) bi trebao teorijski proizvesti jedan gram-ekvivalent aluminija (9,0 g). Međutim, u praksi se obično proizvede između 85 i 95 % od te

količine metala. Glavni gubitak u iskorištenju struje je uzrokovan reoksidacijom tekućeg aluminija s ugljičnim dioksidom [5].



Dijagram 5. Proces proizvodnje aluminija [5]

Razvoj tehnološkog postupka išao je putem usavršavanja konstrukcije ćelije, mehaniziranjem i automatiziranjem pojedinih radnih operacija posluživanja ćelija, računalnim upravljanjem pojedinih tehnoloških parametara, te osuvremenjivanjem organizacije rada [5].

3.3.2. Alati za montažu i zavarivanje

Za razliku od čelika koji se na odgovarajući način može zavarivati i na otvorenom, aluminij se zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstava, može zavarivati isključivo u zatvorenom prostoru. Kvalitetne aluminijske legure i sve preciznija i bolja oprema za rezanje i zavarivanje aluminija, tehnološki postaju sve naprednije [39].

Aluminij se može rezati plazmom, vodenim mlazom, reznim pločama, ubodnom pilom ili cirkularom. Pritom treba paziti na to da su rezne i brusne ploče prilagođene aluminiju [39].

Neposredno prije zavarivanja treba očistiti površinski sloj oksida na mjestu zavarivanja i bližoj okolini. Njega je najbolje odstraniti s metalnom četkom. Nakon čišćenja površinske korice oksida, budući spoj bi valjalo i odmastiti, i nakon toga dobro osušiti plamenom [39].

Sam postupak zavarivanja u principu je uvijek MIG i TIG postupak. Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštitnom plinu, pri čemu se metal topi i očvrstnjava zajedno s dodanim metalom. Aluminij i njegove legure su podložne visokoj topivosti vodika u talini koji pri hlađenju ostaje zarobljen u spoju te se na taj način dobiva porozni zavareni spoj [39].

Vodik u talinu može doći iz nečistoća na osnovnom materijalu, plinu, žici, alatu za obradu ili iz atmosfere. Zbog tih utjecaja zavarivanje bi se moralo izvoditi u zatvorenom prostoru zaštićenom od vjetra i po mogućnosti vlage, te pod zaštitom inertnog plina. Za razliku od čelika koji se na odgovarajući način može zavarivati i na otvorenom, aluminij je zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstava, preporučljivo zavarivati u zatvorenom prostoru [39].



Slika 25. Proces zavarivanja aluminija u zatvorenom prostoru [39]

Drugo svojstvo aluminija koja otežava zavarivanje je aluminijski oksid koji se stvara na površini i štiti ga od korozije. Temperatura taljenja oksida iznosi oko 2050 °C, dok se sam aluminij topi na oko 658 °C. Iz toga proizlazi da će se aluminij rastaliti prije oksida, a

da oksidna korica neće biti razbijena. Kako bi se to spriječilo, sloj aluminijske oksida odstranjuje se mehanički, čeličnom četkom ili strugačem, neposredno prije samoga zavarivanja [39].

Kod zavarivanja sučeonog spoja uvijek treba koristiti podlogu, kako bi se talina brže skrutnula. Kao podloga mogu se koristiti deblje ploče od CrNi čelika, bakra ili aluminijske. Zavaruje se s tehnikom gdje je manji unos topline, a gorionik se drži pod kutom od 75 – 80° suprotno od smjera zavarivanja, radi boljeg čišćenja oksida [39].

Zavarivanje aluminijskih legura u odnosu na čelik zahtijeva specifičnu opremu i tehnologiju uz strogo kontrolirane uvjete rada. MIG (engl. *Metal Inert Gas*) postupak se koristi za zavarivanje strukture i oplata broda. [39]

Svi postupci zavarivanja koriste neki način zaštite kako bi zaštilili zonu taljenja od djelovanja atmosfere, a to je inertni plin. Bez te zaštite talina bi reagirala sa plinovima iz atmosfere i zavar bi postao porozan, a i otežano bi bilo uspostavljanje električnog luka. Važnost zaštite od atmosferskog djelovanja očituje se u činjenici da se kod gotovo svih elektrolučnih postupaka spominje način zaštite od atmosfere u imenu postupka (npr. MIG i MAG) [39].

Kao zaštitni plin koriste se čisti plinovi (Ar ili He) i mješavina ta dva plina. Svaki plin ima prednosti i nedostatke koji utječu na postupak pri zavarivanju, a njihovom kombinacijom (miješanjem) nastoji se dobiti „idealni“ zaštitni plin za svaki postupak, odnosno vrstu aluminijske legure koja se zavaruje [39].

3.3.3. TIG zavarivanje (*Tungsten-electrode inert gas welding*)

Koristi efekt razbijanja oksidne kože, pomicanjem katodne mrlje, mjesta izlaska elektrona, što znači da se zavar - radni komad priključuje na negativan pol izvora istosmjernog struje - na katodu, a W (Wolfram-ova) elektroda se priključuje na plus pol, koji jače zagrijava W elektrodu. Da se W elektroda ne grije, koristi se izmjenična struja, pa se efekt "čišćenja" oksida dešava, kada je zavar - radni komad negativan, a elektroda pozitivna. Za vrijeme druge poluperiode W elektroda se "hladi", kada je na minus polu. TIG se koristi za tanke limove i predmete do 6 mm. Ovaj postupak koristi se za manje popravke i detalje koje nije

moгуće izvesti MIG-om, odnosno kad brzina zavarivanja nije toliko bitna, ali se traži kvalitetan spoj [25].

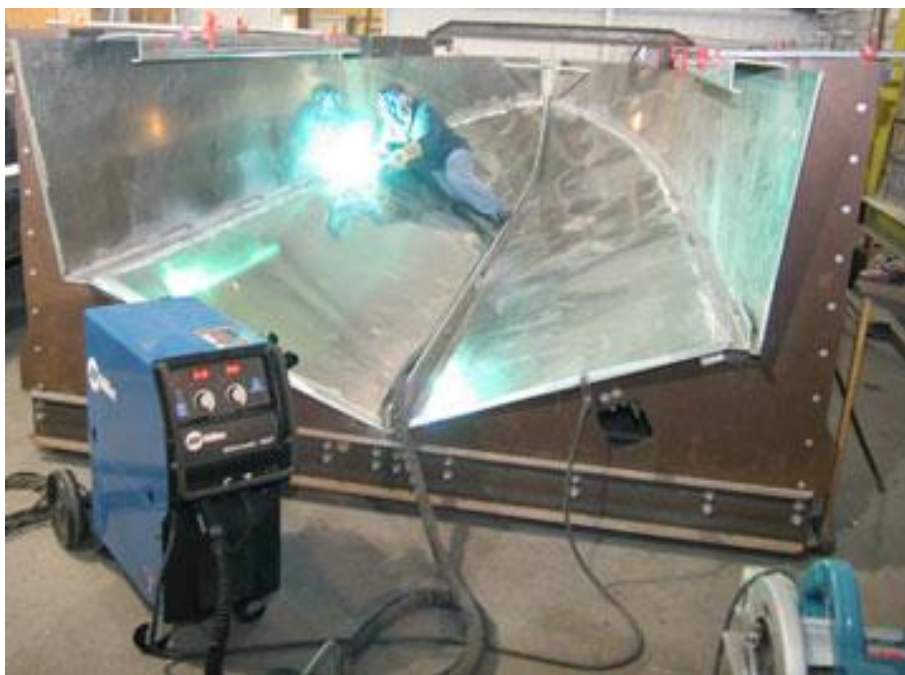


Slika 26. Postupak zavarivanja TIG postupkom (tanki limovi)

Na ovaj način zavarivati se može i bez dodatnog materijala, posebno kod spajanja limova manjih i od 1 mm. Ako se spajaju aluminij i njegove legure koristi se zavarivanje izmjeničnom strujom koja osigurava dobro čišćenje aluminijskog oksida tijekom pozitivne poluperiode. Ovaj postupak daje odličnu kvalitetu i lijep izgled spoja, no brzina zavarivanja je relativno mala. U usporedbi s brodograđevnim čelikom, aluminij i njegove legure zahtijevaju znatno više pažnje i tehnološke discipline u proizvodnom procesu, međutim, uz dobru pripremu i kvalitetno obučen kadar, može se uspješno zavarivati [25].

3.3.4. MIG zavarivanje

Koristi se za deblje materijale, npr. preko 6 mm. Treba naglasiti da se kod MIG zavarivanja koriste strojevi za impulsno MIG zavarivanje. Na ovaj način potreban je manji unos energije, zavarivač lakše kontrolira talinu, a i čišćenje oksida je bolje. Argon, plin koji se koristi u ovom postupku je inertni plin bez boje, mirisa i okusa. Nije otrovan, ali u zatvorenom prostoru može smanjiti koncentraciju kisika, pa radni prostor mora imati dobru ventilaciju. Argon se može nabaviti u kvaliteti A, B, C i D što označava njegovu čistoću [39].



Slika 27. Zavarivanje trupa broda MIG postupkom (deblji limovi)

Osim navedenih postupaka koriste se i drugi postupci zavarivanja odnosno druge tehnike spajanja: [25]

- difuzijom,
- plinsko,
- REL,
- kondenzatorsko s pražnjenjem (slično elektrootpornom),
- ultrazvukom,
- trenjem,
- snopom elektrona,
- eksplozijom (posebno zanimljivo u brodogradnji, za pripremu spoja čeličnog trupa s aluminijskim nadgrađem – u brodogradilište dolaze gotovi spojni elementi),
- plazma (i mikroplazma za debljine 0,2 do 1,5 mm)
- pod troskom,
- pod prahom,
- ljevačko,
- lemljenje,
- lijepljenje,

- hladno zavarivanje i
- elektrootporno zavarivanje.

Od svih postupaka TIG i MIG se najviše koriste. Za oba postupka preporučuje se rad sa impulsnim strujama pomoću kojih upravljamo prijelazom kapljica u luku i ostvarujemo kvalitetniji spoj [25].

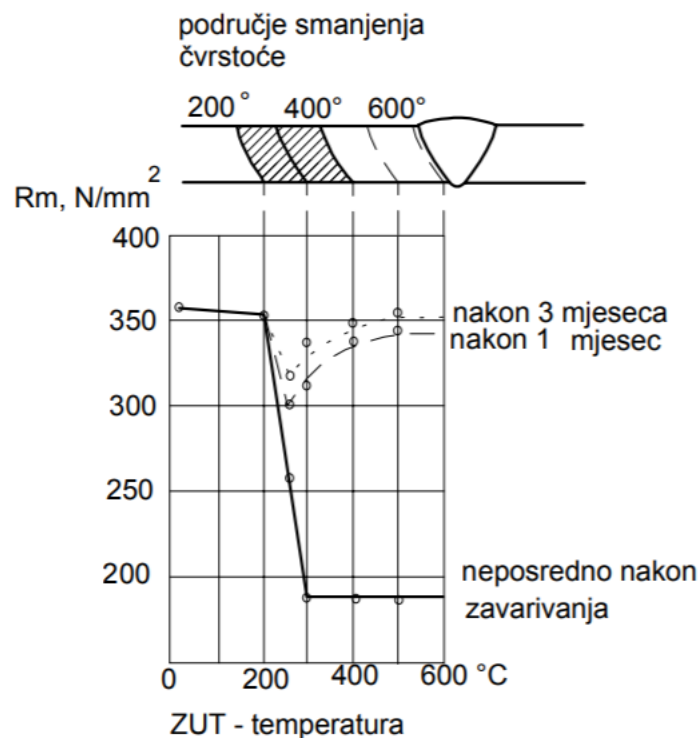
Da bi se postigla željena kvaliteta treba imati odgovarajuću opremu za zavarivanje, tehnologiju zavarivanja i odgovarajuće uvjete rada. Najviše pažnje treba obratiti na pripremu, čišćenje i odmašćivanje zone spoja, a potrebno je osigurati i radno mjesto od propuha kako ne bi došlo do nepravilnosti u zavarenom spoju uslijed nedovoljne zaštite plinom [38].

3.3.5. Utjecaji na zavarljivost

- Al₂O₃ prirodna oksidna kožica stvara se na površini deblji sloj oksida kao i na kapima metala, pa se ne može dobiti homogen zavareni ili lemljeni spoj zbog uključaka oksida. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za zavarivanja
- Dobra toplinska vodljivost zahtjeva snažne koncentrirane tokove energije i visoki toplinski input (ulaz) unatoč niskoj temperaturi tališta. Ako se zavaruje sa slabim i nedovoljno koncentriranim tokovima energije, nastaje široka ZUT (zona utjecaja topline) sa omekšanom strukturom. Zbog visoke toplinske vodljivosti čistog Al, velika je vjerojatnost pojave poroznosti. Kod zavarivanja većih debljina potrebno je predgrijavanje da se izbjegne poroznost.
- Jaka električna vodljivost zahtijeva velike jakost struje i kratko vrijeme elektrootpornog zavarivanja.
- Veliki koeficijent toplinskog istezanja uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju, pa je moguća pojava pukotina zbog jakog stezanja.
- Rastvorljivost vodika u rastaljenom materijalu je velika. Pri kristalizaciji, zbog naglog pada rastvorljivosti, oslobađaju se mjehurići vodika, koji mogu uzrokovati poroznost.

- Pri zagrijavanju se ne mijenja boja kao kod čelika, pa se ne može procijeniti temperatura na temelju boje pri zagrijavanju do tališta, što pričinjava poteškoće kod zavarivanja i lemljenja.
- Sklonost vrućim, a u manjoj mjeri i hladnim pukotinama ovisi o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja.
- Omekšanje na mjestu zavarenog spoja. Hladnom deformacijom Al - materijali postaju znatno čvršći. Na mjestu zavarenog spoja zbog ljevačke strukture čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju. Ovo slabljenje je razlog da se u avio industriji još uvijek mnogo koriste zakovani spojevi i svornjaci slični zakovicama (engl. *lockbolt fastener*) napravljeni od titan legura [37].

Na slici 28 možemo vidjeti točno utjecaj topline na mjestu zavora i pad čvrstoće u ZUT zoni.



Slika 28. Na mjestu zone taljenja i u zoni utjecaja topline je najniža čvrstoća [37]

3.4. ODRŽAVANJE

3.4.1. Zaštita od korozije

Zbog odlične otpornosti na koroziju aluminijski u morskom okolišu, za mnoge legure, koje su doživjele dugi niz godina rada bez problema, nije potrebna boja. Bojanje palube se također radi iz kozmetičkih razloga, a nakon bojenja, premaz će se morati održavati. Potrebno je i bojanje ispod vodene linije kako bi se spriječilo obraštanje, te u nekim spremnicima, kao što su kanalizacija i sivi spremnici vode, zbog nagrizajuće prirode tekućina u tim spremnicima. Teže je obojiti aluminij nego čelik jer su zahtjevi za pripremu i kontrolu atmosfere stroži [22].

Među konstrukcijskim metalima, samo su berilij i magnezij reaktivniji od aluminijski [3]. Međutim, aluminij ima izvanrednu otpornost koroziji koju zahvaljuje ekstremno prijanjajućem oksidnom filmu što se oblikuje na površini uvijek kada je ona izložena zraku ili vodi. Samonastajući mikroskopski tanki površinski sloj aluminijeva oksida (Al_2O_3) vrlo je tanak i mjeri se u mikronima [22].

Debljina sloja što nastaje na površini u kontaktu aluminijski sa zrakom iznosi $2,5\ \mu\text{m}$, dok isti takav sloj star nekoliko godina može dostići debljinu od oko $10\ \mu\text{m}$; on se sastoji od dva dijela: [31]

- tanki, unutrašnji pregradni granični sloj,
- znatno tanji, vanjski sloj, koji je više propustan nego unutrašnji granični sloj.

Taj oksidni film predstavlja jaku zaštitu, te kako je termodinamički neaktivan, spriječava daljnju koroziju. Međutim, kada se izloži ekstremnom korozijskom sredstvu kao što je slana voda, oksidni se film može prelomiti i stvoriti uvjete za daljnju koroziju aluminijski, ili čak i za pojavu rupičaste korozije (engl. *pitting*) [31].

Kemijski sastav i način proizvodnje određuju korozijske karakteristike metala. Tako, najvažniji korozijski mehanizam aluminijski je onaj koji se razvija na temelju elektrokemijske ćelije nastale na temelju razlike u potencijalima različitih mikrokonstituenata slitine. Ako mikrostrukturni sastojak u jednoj slitini ima veći elektropotencijal od aluminijski, pojavit će se korozijski proces. Toplinska obrada i proces otvrdnjavanja tehnike su u proizvodnji koje utječu na korozijski proces aluminijevih slitina jer obrada određuje mikrostrukturu metala i utječe na interkristalnu koroziju [31].

Korozija izazvana morskim organizmima nastaje kada se morski organizmi, kao lupari i školjke, prihvate za površine metala, razvijaju se, pa zatim odvajaju komadiće metala s površine. Tim procesom nastaju rupice na metalu ispod morskih organizama. Obraštanje morskim organizmima obično je intenzivno u toplim i plitkim morima. Topla mora pogoduju dugom razdoblju naglog množenja mikroorganizama na izloženim površinama. Ako obraštaj prekriva cijele površine ili samo njihove dijelove, on znatno utječe na intenzitet korozije morskim organizmima. Pritom, isprekidani sloj obraštaja, formiran od izdvojenih kolonija organizama, zajedno s neprekrivenim metalom između njih znatno će prije izazvati strukturno značajnu koroziju nego neprekidni sloj morskog obraštaja. Cjelovito obraštanje djeluje kao zaštitni sloj koji ograničava količinu otopljenog kisika što stiže do površine metala. Isprekidani sloj znatno više uzrokuje početak lokalizirane korozije, stvarajući ćelije povećane koncentracije kisika [31].

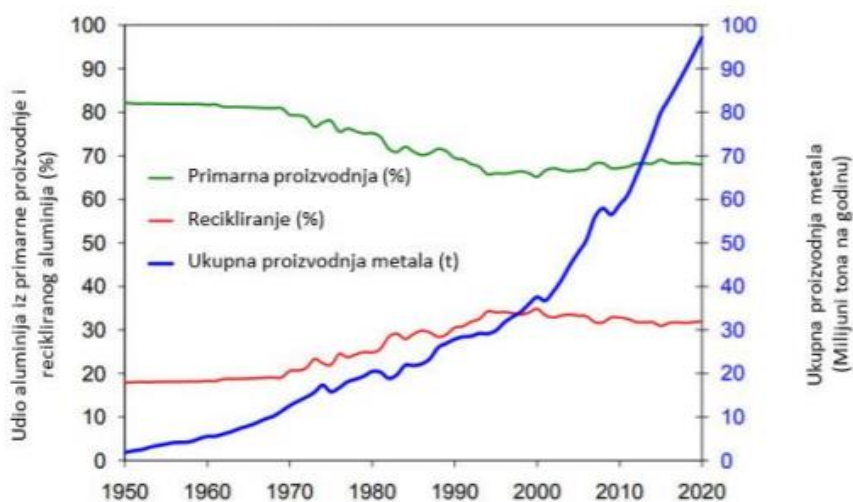
3.4.2. Popravak

Zbog niske otpornosti aluminijskog na zamor, strukturno pucanje postaje problem za nepravilno održavanje konstruirane konstrukcije. Općenito, područja pojave pukotina morat će se projektirati s poboljšanim strukturnim detaljima kako bi se spriječilo ponavljanje pukotina na istom mjestu [31].

3.5. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA

U novije se vrijeme uvodi se i analiza životnog ciklusa proizvoda s aspekta potrošene energije u proizvodnji, upotrebi i reciklaži pa tako i za aluminij. Gotovo svaki aluminijski proizvod može biti komercijalno (profitabilno) recikliran na kraju svog korisnog vijeka, bez gubitka na kvaliteti materijala ili njegovih svojstava. Reciklirani aluminij zahtjeva samo 5 % energije koja je potrebna za proizvodnju “novog” (primarnog) aluminijskog. Aluminijski potencijal za reciklažu je gotovo neiscrpan, pa otuda relativno visoka vrijednost aluminijskih otpadaka. Mješanjem recikliranog s primarnim aluminijem omogućava se znatna ušteda energije. Kad bi povratni aluminij dosegao udio od 90 % u novom proizvodu, energija potrebna za njegovu proizvodnju bila bi samo 15 % energije potrebne za novi proizvod potpuno izrađen iz primarnog aluminijskog. Takva razina efekata ostvaruje se u nekoliko zemalja za lijevanje komponente potrebne automobilske industriji [5].

Prema podacima Međunarodnog instituta za aluminij predviđanja su da će potražnja za aluminijem biti u izrazitom porastu. Prema slici 29 do 2020. godine ukupna proizvodnja aluminija bi trebala biti oko 100 milijuna tona. Udio recikliranja u ukupnoj proizvodnji materijala će se zadržati oko 30 %, dok će udio primarne proizvodnje biti 70 % [10].



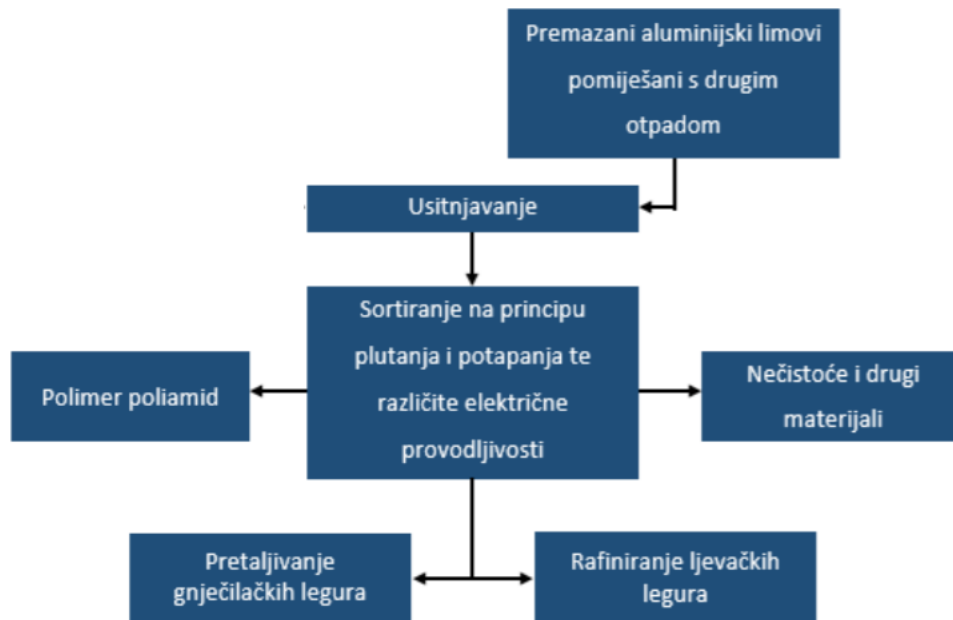
Slika 29. Ukupna proizvodnja aluminija [10]

Na donjoj slici možemo vidjeti jedan primjer usporedbe mehaničkih svojstava reciklirane aluminijske slitine („morskog aluminija“) 5083 sa drugim uzorcima iste te slitine kao npr. tek ekstrudiranog uzorka iste te slitine.

Alloy	Ultimate tensile strength (MPa)	0.2% Proof stress (MPa)	Elongation to failure (%)
As-received specimen	277	131	13
Solid recycled specimen	329	179	16
Virgin extruded specimen	345	187	17

Slika 30. Mehanička svojstva reciklirane Al slitine 5083 sa drugim uzorcima iste te slitine [10]

Na slici ispod možemo proučiti proces pretaljivanja koji se kod recikliranja odvija se u dva smjera, u jednom slučaju pretaljuju se gnječilačke legure, a u drugom slučaju se rafiniraju ljevačke legure.



Slika 31. Faze recikliranja aluminijskog otpada [10]

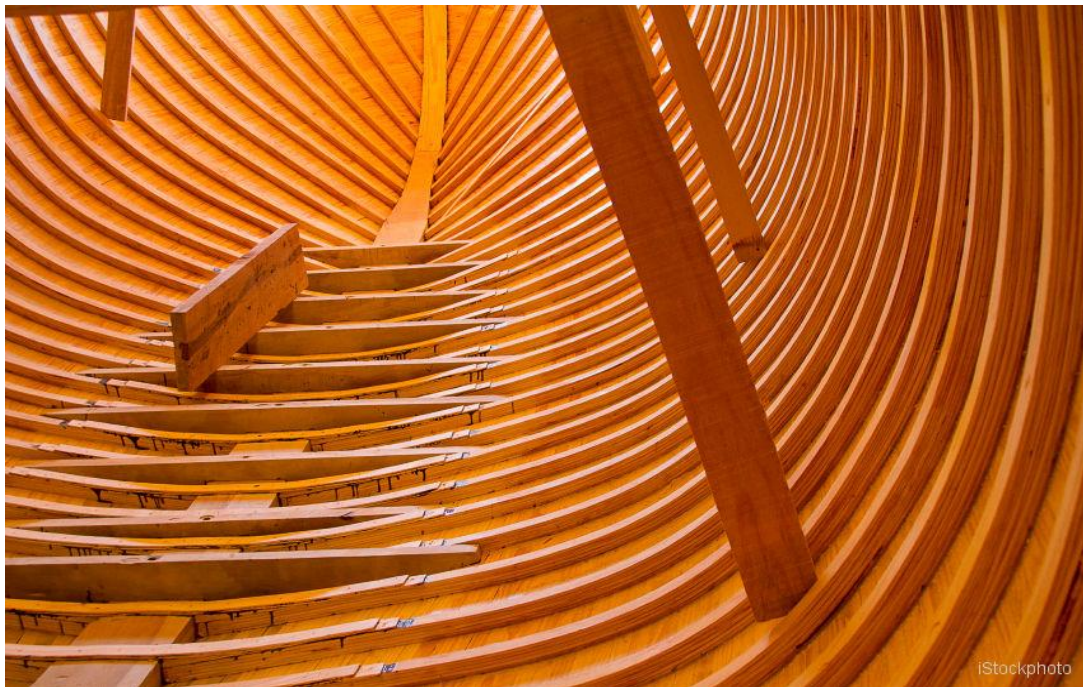
Prema slici proces recikliranja u čvrstom stanju ili tzv. direktna metoda recikliranja sastoji se od čišćenja metalnog otpada, zatim usitnjavanja ako je potrebno, hladnog predsabijanja u brikete, te plastične deformacije u toplom stanju. Direktno recikliranje otpada najčešće se izvodi istiskivanjem u toplom stanju, ali u posljednjih par godina razvio se sve veći broj različitih postupka direktnog recikliranja: [10]

- istiskivanje rotirajućim alatima,
- vijčano istiskivanje,
- različiti postupci recikliranja primjenom velike plastične deformacije (SPD),
- sinteriranje iskrenjem plazme (SPS)
- i kovanje.

4. DRVO

4.1. OPĆENITO

U brodogradnji drvo ima niz prednosti ispred drugih materijala. Estetska svojstva i vizualni doživljaj boravka u okruženju prirodnog materijala su mnogima važni kod odabira materijala za izradu broda (drvo je uvijek u modi). Nedostatak drvenih brodova je duga, komplicirana proizvodnja i održavanje. Serijska proizvodnja drvenih brodova je u praksi gotovo nezamisliva. U tom segmentu, brodovi izrađeni od polimernih kompozita su u velikoj prednosti [30].



Slika 32. Raspored konstrukcije trupa s unutrašnje strane trupa [30]

Odlikuju ga jednostavna dostupnost, obradivost, trajnost i ekološka prihvatljivost. Drvo je tisućljećima bilo jedini konstrukcijski materijal u brodogradnji. Drvo je danas prvi izbor za gradnju nekih od najjednostavnijih brodica, ali i najekskluzivnijih jahti. U kombinaciji sa suvremenim kompozitnim materijalima, ono pruža izuzetna toplinsku i akustičnu izolaciju. Konstrukcije od drveta su veoma složene zbog njegovih svojstava, udjela vlage, temperature i sl. [30]



Slika 33. Konstrukcija drvenog broda [30]

4.1.1. Domaće vrste brodograđevnog drva [11]

Nije svaka vrsta drva prikladna za gradnju plovila. Osnovna potrebna svojstva drva za brodogradnju su čvrstoća uz što manju težinu, dimenzijska stabilnost, što manje stezanje i vitoperenje, zatim dobra savitljivost, žilavost, otpornost na utjecaj vlage i trajnost drva. Također se traže i estetski zahtjevi kao npr. boja, tekstura i smjer vlakana [3].

Neke od vrsta brodograđevnog drva su: ariš, bagrem, bor alepski, bor crni, bor obični, bor planinski, bor primorski, brijest, bukva, crnika – česmina, čempres, murva – dud bijeli, grab, hrast kitnjak, hrast lužnjak, hrast medunac, jasen, javor, jela, kesten, oskoruša, rogač, smreka [3].

4.2. MEHANIČKA SVOJSTVA

Pri izboru materijala za gradnju čamaca, brodova i dr. velika se pažnja posvećuje omjeru čvrstoće i volumne težine drva, koji se naziva koeficijent kvaliteta $k = s/t_p$, gdje je k koeficijent kvaliteta, s čvrstoća, t_p volumna težina drva u prosušenom stanju. Što je veći koeficijent kvaliteta to je drvo bolje za konstruktivne svrhe. Drvo ima veći koeficijent kvaliteta nego čelik (naročito u pogledu čvrstoće savijanja i vlaka, vidi tablicu 14) [40].

Tablica 14. Koeficijent kvalitete drva u odnosu na čelik [40]

Vrsta materijala	Volumna težina g/cm ³	Koeficijenti kvaliteta							
		$\frac{E}{t}$	%	$\frac{\sigma_B}{t}$	%	$\frac{\sigma_V}{t}$	%	$\frac{q_k}{t}$	%
Vinokovrjedni čelik	7,8	261 370	100	793	100	796	100	2028	100
Južni europski bor	0,58	460 300	176	2588	327	2340	294	1574	78
Crvenkasta smreka	0,39	325 000	124	2618	330	2460	310	1580	78
Glavolinska karkas	0,75	222 000	85	2250	284	1840	231	1060	52

Svojstva drva koja je potrebno poznavati u brodogradnji su: [30]

- vrsta drva,
- sadržaj vlage,
- pritisna čvrstoća,
- savojna čvrstoća,
- gustoća,
- vlačna čvrstoća,
- Youngov modul,
- Poissonov koeficijent,
- te prekidno istezanje.

4.2.1. Gustoća drva

Gustoća drva je važno svojstvo, a predstavlja odnos između mase i volumena. Potpuna eliminacije vlage iz drva (apsolutno suho stanje) postiže se sušenjem u peći pri temperaturi od 103 ± 2 °C do konstantne mase. Gustoća je usko povezana s fizikalnim i mehaničkim karakteristikama drva tako da povećanjem gustoće dolazi do porasta ogrjevnosti, porasta čvrstoće i tvrdoće, drvo se teže suši, impregnacija drva se teže izvodi i dr. Vrijednosti gustoće domaćih vrsta kreću se između 0,3 i 0,9 g/cm³, a na taj raspon osim vrste drva utječu građa drva, pozicija u stablu, stanište, udio celuloze, hemiceluloze i lignina i dr. [27]

U tablici 3.1. prikazana je gustoća nekih domaćih vrsta pri udjelu vlage od 12 do 15 %.

Tablica 15. Gustoća domaćih vrsta (12 – 15% vlažnosti) [27]

Vrsta drva	Gustoća, g/cm ³
	min – srednja - max
hrast	0,43 – 0,69 – 0,96
jasen	0,45 – 0,69 – 0,86
lipa	0,35 – 0,53 – 0,60
trešnja	0,60 – 0,63 – 0,69
jela	0,35 – 0,45 – 0,75
smreka	0,33 – 0,47 – 0,68
ariš	0,44 – 0,59 – 0,85

Gustoća drva također je mjerilo za mogućnost upotrebe drva, ali je za precizniju ocjenu karakteristika i korisnosti drva potrebno poznavati i druge značajne karakteristike. Jedna od tih značajki je poroznost drva koja je u obrnutom razmjeru s gustoćom. Volumni udio pora računa se prema izrazu (1): [27]

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s} \times 100 \quad (1)$$

gdje je:

α – poroznost (%),

ρ_0 – gustoća drva u apsolutno suhom stanju (g/cm³),

ρ_s – gustoća drvene tvari (g/cm³).

Poroznost čini drvo bitno različitijim od homogenih materijala (metal, staklo i sl.). Ona je neophodna, jer se drvo u toku svog života izgrađuje kao živa supstanca u kojoj svuda moraju postojati prostori i šupljine radi njegovih životnih funkcija [27].

4.2.2. Vлага u drvu

Tehničko drvo je mrtvo drvo i primjenjuje se u prosušenom stanju. S promjenom količine vlage u drvu dolazi do promjena dimenzija, mehaničkih, toplinskih i drugih svojstava. [4] Vлага u drvu određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva te se sadržaj vlage u drvu izračunava prema izrazu (2): [27]

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \% \quad (2)$$

gdje je:

M – sadržaj vlage u drvu (%),

m_1 – masa drva kod nekog sadržaja vode (g),

m_2 – masa drva nakon sušenja (g).

Sadržaj vlage izražava se u % i zaokružuje na 1 %. Sadržaj vlage kod kojeg je sva kapilarna vlaga uklonjena (dakle sve su šupljine suhe) a stijenke kapilara su potpuno zasićene vodom u točki zasićenja ima 25 – 32 % vlage (u prosjeku se uzima 28 %) [27].

4.2.3. Modul elastičnosti

Elastičnost je svojstvo materijala da se pod djelovanjem vanjske sile savije, a kada ta sila popusti vraća se u prvobitni oblik. Kada je sila koja djeluje na drvo prevelika, drvo ili trajno zadržava zakrivljeni oblik ili pukne. Čimbenici koji utječu na modul elastičnosti drva su: [3]

- vrsta drva,
- građa drva,
- gustoća drva,
- sadržaj vode,
- smjer vlakanaca,
- temperatura,
- oblik presjeka.

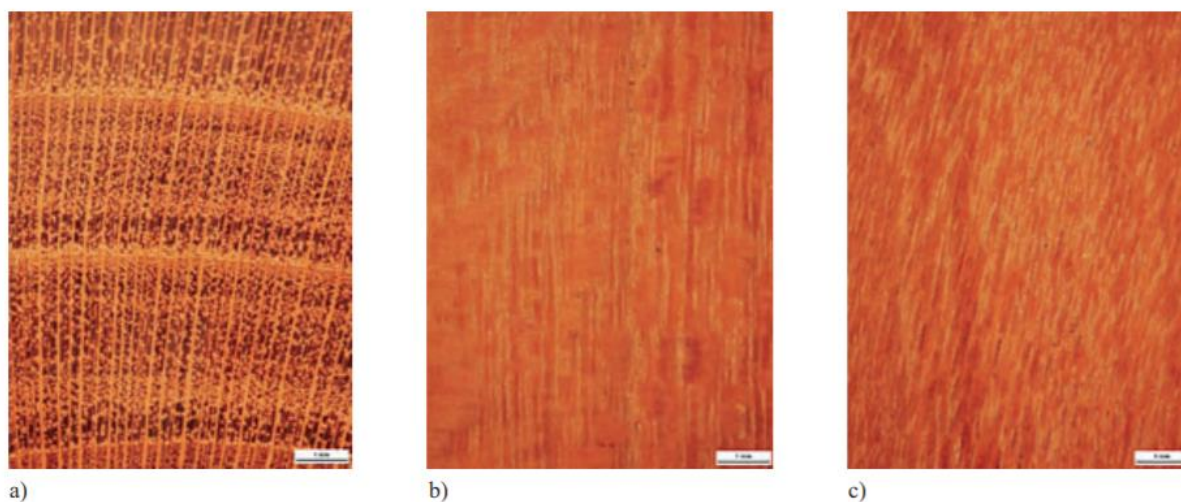
Osnovna karakteristika drva, najstarijeg brodograđevnog materijala, je njegova usmjerenost. Kod drva potrebno je definirati module elastičnosti u tri smjera, koji su označeni oznakama E_L , E_T i E_R . Pri tome su: E_L modul elastičnosti u uzdužnom longitudinalnom smjeru, E_T modul elastičnosti u tangecijalnom smjeru i E_R modul elastičnosti u radijalnom smjeru. Podaci za module elastičnosti se dobivaju raznim testovima, međutim, podatci za E_T i E_R često se definiraju u odnosu na E_L . [30].

Prosječne vrijednost modula elastičnosti drva u ovisnosti o različitim vrstama, iznose:

$$E_L = 300 - 2500 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_T = (1/23 - 1/40) * E_L$$

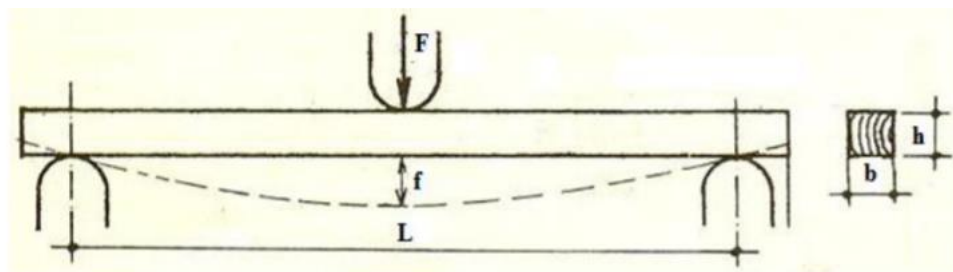
$$E_R = (1/6 - 1/23) * E_L$$



Slika 34. Primjer vrste drva: a) poprečni presjek, b) radijalni presjek, c) tangencijalni presjek [30]

Za određivanje modula elastičnosti za drvo postoji više načina. Prikazi dva osnovna načina prikazana su na slici 35. Više se koriste metode savijanja za određivanje E_L , nego razni aksijalni testovi.

Općeniti izraz za određivanje modula elastičnosti prema slici 35 iskazan je izrazom: [3]



Slika 35. Prikaz općeg postupka određivanja modula elastičnosti [3]

$$E_{\text{drva}} = \frac{F \times l^3}{4 \times b \times h^3 \times f} \text{ (GPa)} \quad (3)$$

gdje je:

F = sila (N),

h = visina probe (mm),

L = razmak oslonaca (mm),

f = veličina progiba (mm),

B = širina ležišta probe (mm).

Tablica 16. Modul elastičnosti različitih vrsta brodograđevnog drva [3]

Hrvatski naziv	Botanički	Modul elastičnosti [GPa]
Bor bijeli	Pinussilvestris L.	9,5...13,8...18,0
Bor crni	Pinusnigra Arn.	6,9...12,0...20,1
Bor kratkoiglavi	Pinusechinata Mill.	2,4
Bor planinski	Pinusmontana Mill.	7,8...12,8...18,5
Bor vajmutov	Pinusstrobus L.	10,4
Hrast kitnjak	Quercuspetrea Liebl.	9,2...13,0...13,5
Hrast lužnjak	Quercusrobur L.	10,0...11,7...13,2
Jela obična	Abiesalba Mill.	6,6...10,7...17,2

Drvo mijenja svoje dimenzije s promjenom vlage (bubri kod povećanja postotka vlage) i to različito kod raznih vrsta drva. Vlažnost drva određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva [30].

4.2.4. Čvrstoća na vlak

Čvrstoća drva na vlak je najveći otpor nastao uslijed djelovanja sila istog pravca, ali suprotnog smjera koje ga nastoje razvući paralelno ili okomito na smjer vlakanaca. U literaturi možemo naći nazive: čvrstoća na vlak i vlačna čvrstoća. Čvrstoća na vlak kod drva se razlikuje ovisno o djelovanju sile pa može biti paralelna i okomito na vlakanca [3].

$$\sigma_{\text{vlak}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0} \quad (4)$$

gdje je:

F_{max} = maksimalna sila loma (N),

A_0 = površina presjeka na mjestu loma (mm²).

Drvo ima izraženo svojstvo čvrstoće na vlak u smjeru vlakanaca. Čvrstoća na vlak u smjeru vlakanaca znatno je veća od one okomito na vlakanca [3].

4.2.5. Čvrstoća na tlak

Čvrstoća na tlak je najveće naprezanje koje se javlja ako na tijelo, smješteno na horizontalnoj podlozi, djeluje sila okomito na podlogu koja ga nastoji stlačiti, smrviti ili zgnječiti [18]. Za izračunavanje čvrstoće na tlak koristi se izraz (5): [3]

$$\sigma_{\text{vlak}} = \frac{F_{\text{pm}}}{A_0} \quad (5)$$

gdje je:

F_{pm} = maksimalna sila loma (N)

A_0 = površina presjeka na mjestu loma (mm^2)

Čvrstoća na tlak paralelno u smjeru vlakanca dostiže samo do 50 % vrijednosti čvrstoće na vlak u smjeru vlakana. Čvrstoća na tlak drva paralelno s vlakna 3 do 10 puta je veća od čvrstoće na tlak okomito na vlakanca. U praksi je mnogo važnija čvrstoća na tlak okomito na vlakanca [3].

Prilikom uspostavljanja kritične sile, kod nekih vrsta drva, dolazi do pucketanja. Svojstvo pucketanja je važno u praksi za sigurnost radnika, jer upozorava radnika na opasnost od loma. Primjeri vrsta drva koji imaju izraženo svojstvo pucketanja su: smreka, jela, ariš, bor, bukva, grab, breza, hrast i bagrem. Svojstvo pucketanja ovisi o vlažnosti i temperaturi drva. Jače je ukoliko je vlažnost manja, a temperatura veća [3].

4.2.6. Udarni rad loma

Udarni rad loma je otpor kojim se drvo opire djelovanju (radu) kratkotrajnog udarnog naprezanja (udarcu, šoku), a mjera je žilavosti materijala. Izražava se kao rad, kojeg je potrebno obaviti po jedinici površine prema izrazu (7): [3]

$$\sigma_{\text{udarac}} = \frac{1000 \times Q}{b \times h} (\text{kJ} / \text{m}^2) \quad (6)$$

gdje je:

Q – rad utrošen za lom uzorka (J),

b – širina poprečnog presjeka (m),

h – visina poprečnog presjeka (m).

U praksi su često drvene konstrukcije opterećene na dinamička naprezanja. Žilavost je najmanja kada udarac pada tangencijalno na godove, a najveća kada pada u radijalnom smjeru. Promjena vrijednosti žilavosti je vidljiva golim okom i to je prva indikacija da je došlo do promjene u strukturi drva. Uređaj za provođenje ispitivanja žilavosti je Charpy-jev bat [18].

U tablici 17 su prikazane vrijednosti udarnog rada loma za neke vrste brodograđevnog drva.

Tablica 17. Prikaz vrijednosti udarnog rada [18]

Hrvatski naziv	Botanički	Čvrstoća na udarac [kJ/m ²]
Bor obični	Pinussilvestris	15 ... 40 ... 130
Bor crni	Pinusnigra Arn.	20 ... 50 ... 90
Jela	Abiesalba Mill.	30 ... 40 ... 120
Hrast	Quercus	10 60... 160

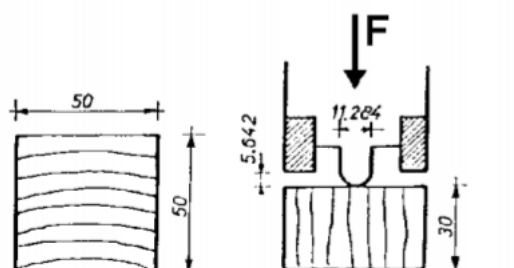
4.2.7. Tvrdća drva

Tvrdća, zajedno s ostalim mehaničkim svojstvima, pokazuju nam opću kvalitetu drva. Tvrdća drva je otpor drva prodiranju nekog drugog tvrdog tijela u njegovu masu. Prodiranje drugog materijala može biti postepeno posredstvom djelovanje sile ili trenutno posredstvom udarca. Kako je drvo anizotropan materijal, razlikujemo tvrdoću zavisno o smjeru vlakna pa tako imamo: [3]

- frontalnu (longitudinalnu),
- tangencijalnu,
- radijalnu.

Najopćenitije objašnjenje je da tvrdoća ovisi o rezultanti različitih anatomskih, fizikalnih i mehaničkih svojstava. Upravo zbog kombinacije svih tih parametara tvrdoću se ne može definirati kao elastičnu čvrstoću drva. Pojedine unificirane metode za određivanje tvrdoće drva nema. Postoji više metoda određivanja tvrdoće.

Jedna od metoda je modificirana verzija Brinell-ove metode ispitivanja tvrdoće. Ta metoda je opće prihvaćena kod testiranja drva, slika 28 [3].



Slika 36. Prikaz metode određivanja tvrdoće drva [3]

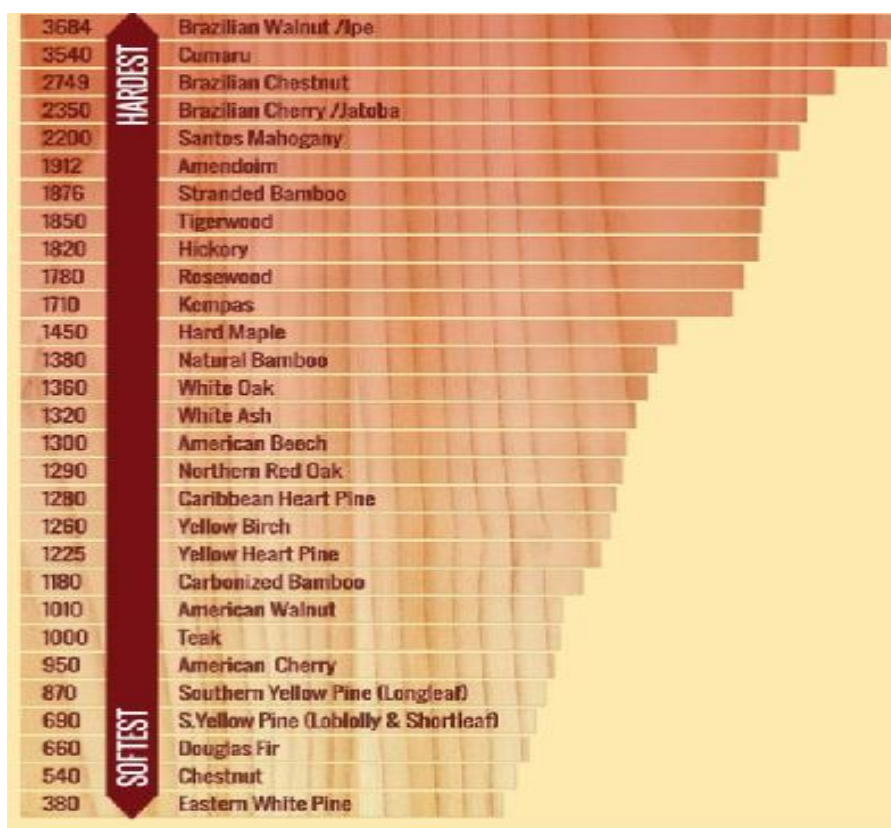
Drvo se razvrstava po tvrdoći u nekoliko razreda: [3]

- vrlo meko drvo (broj tvrdoće do 35,0 N/mm²)
- meko drvo (broj tvrdoće od 35,1 do 50,0 N/mm²)
- srednje tvrdo drvo (broj tvrdoće od 50,1 do 65,0 N/mm²)
- tvrdo drvo (broj tvrdoće od 65,1 do 100 N/mm²)
- vrlo tvrdo drvo (broj tvrdoće od 100,1 do 150,0 N/mm²)
- drvo tvrdo kao kost (broj tvrdoće veci od 150,0 N/mm²)

U tablici 18 su prikazane vrijednosti tvrdoće za neke vrste brodograđevnog drva.

Tablica 18. Prikazane vrijednosti tvrdoće drva [3]

Tvrdoća	Botanički	Broj tvrdoće [N/mm ²]
Bor obični	Pinus	19,0... 30,0... 50,0
Bor crni	Pinus nigra Arn.	35
Jela	Abies alba Mill.	18,0... 34,0... 53,0
Hrast lužnjak	Quercus robur L.	28,0... 65,0... 101,0
Hrast kitnjak	Quercus petraea Liebl.	43,0... 69,0... 99,0



Slika 37. Tvrdće raznih vrsta drva [36]

4.2.8. Varijacije mehaničkih svojstava

Na mehanička svojstva utječu razni čimbenici. Unutar pojedine vrste drva, postoje značajne varijacije mehaničkih svojstava u zavisnosti o starosti drva, nadmorskoj visini rasta drva, i sličnim čimbenicima. U tablici 19 prikazani su koeficijenti varijacije određenog mehaničkog svojstva, koji su ustanovljeni brojnim pokusima [3].

Tablica 19. Koeficijenti varijacije vrijednosti mehaničkih svojstava [3]

Svojstvo	Koeficijent varijacije (%)
Modul elastičnosti	22
Čvrstoća na savijanje	12
Najveće opterećenje	34
Čvrstoća na udarac	25
Čvrstoća na tlak paralelno na vlakanca	18
Čvrstoća na tlak okomito na vlakanca	28
Čvrstoća na smicanje	25
Tvrdoća	20
Specifična gustoća	10

4.2.9. Trajnost drva

Trajnost drva je sposobnost da se ono odupire promjenama i razaranjima nastalim djelovanjem atmosferilija, raznih kemijskih tvari, te štetnika, bilnog i životinjskog porijekla. Prirodna trajnost je vremenski period u kojem drvo zadržava svoja prirodna svojstva. Kreće se u širokim granicama, i to od nekoliko mjeseci do nekoliko tisuća godina. Prirodna trajnost ovisi o unutrašnjim i vanjskim čimbenicima.

Unutarnji čimbenici su: vrsta drva, građa, kemijski sastav, gustoća, sadržaj vode. Vanjski čimbenici su: zrak, svjetlo, voda, kemijske tvari, štetnici bilnog i životinjskog porijekla, stanište, vrijeme sječe, način i mjesto upotrebe.

Trajnost pod vodom: [3]

- vrlo trajne vrste (preko 500 g.): brijest, hrast, bukva, grab, kesten, bagrem, joha, ariš, bor,
- trajne vrste (50 – 100 g.): smreka, jela,
- slabo trajne vrste (ispod 20 g.): javor, breza, jasen, lipa, topola, vrba.

4.2.10. Temperatura

Generalno gledajući, mehanička svojstva drva padaju povećanjem temperature, i obratno, smanjenjem temperature, mehanička svojstva rastu. Pri jednakoj vlazi i temperaturi manjoj od 150 °C, mehanička su svojstva u linearnoj ovisnosti o temperaturi. Pri zagrijavanju drva do temperature ispod 100 °C, proces promjene mehaničkih svojstava je reverzibilan. Uvjet za reverzibilnost je da se nakon zagrijavanja, u kratkom vremenu, temperatura drva vrati na početnu. Ukoliko je proces dovoljno brz, doći će do povratnog procesa promjene mehaničkih svojstava [3].

4.3. CIJENA

Cijena drva varira od vrste do vrste ali i mehanička svojstva i trajnost variraju u sličnom omjeru. Svaka vrsta drva ima specifična svojstva, pa se različite vrste drveta često koriste za različite dijelove broda. Vrste drva u brodogradnji su: ariš, bagrem, borovi (alpski, crni, obični i primorski), brijest, bukva, crnika – česmina, čempres, murva - dud bijeli, grab, hrastovi (kitnjak, medunac i lužnjak), jasen, javor, jela, kesten, rogač, smreka [30].

4.4. TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE

Šuma je savršena ekološka tvornica u kojoj se uvjeti rada mijenjaju iz dana u dan s obzirom na varijable iz okoliša. Drvo, kao glavni proizvod te tvornice, raste samo uz pomoć sunčeve energije i uvijek je dostupno. Drvo je prirodni, ekološki i biorazgradivi materijal koji se koristi od početka ljudske civilizacije i nikada nije izgubilo popularnost. U ranoj ljudskoj povijesti drvo je, uz kamen i glinu, bio najtraženiji materijal, a danas se najviše koristi kao glavni izvor energije za više od polovice svjetske populacije te kao tehnički materijal. U usporedbi s procesom proizvodnje i obrade drugih sirovina, drvo zahtijeva minimalan utrošak energije, posjeduje sposobnost prirodnog vezivanja štetnog CO₂ i sposobnost proizvodnje kisika. Sve to s obzirom na vrlo visoke ekološke norme i zahtjeve današnjice, stavlja drvo na prvo mjesto kad je riječ o izboru materijala i uvijek je dobro izabrana alternativa [27].

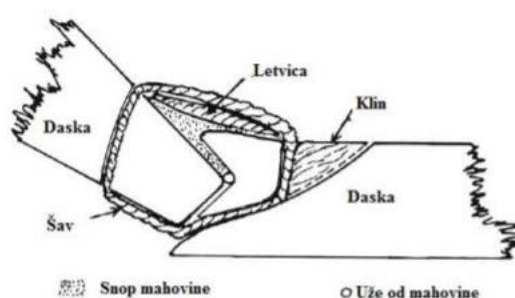


Slika 38. Stanište hrasta lužnjaka u Spačvanskoj šumi [27]

4.4.1. Izvedbe spojeva

Drvena vezna sredstva upotrebljavaju se u onim spojevima u koja, osim povezivanja dvaju elemenata, ne preuzimaju na sebe neka veća naprezanja. Načini spajanja drvenih komada: [3]

- Čavli (drveni klinci) - nazivaju se još i drveni klinci. Postoji više vrsta oblika drvenih čavala. Izrađuju se tesanjem. Specifičnost kružnih čavala je ta što se oni izrađuju probijanjem istesnog čavla većeg promjera kroz rupu izbušenu u ploči jačeg čeličnog lima, pa oštrina čeličnog brida guli čavao i na taj način ga oblikuje [10]. Na slici 39 prikazan je primjer spoja drvenog klina.



Slika 39. Spoj drva s drvenim klinom [3]

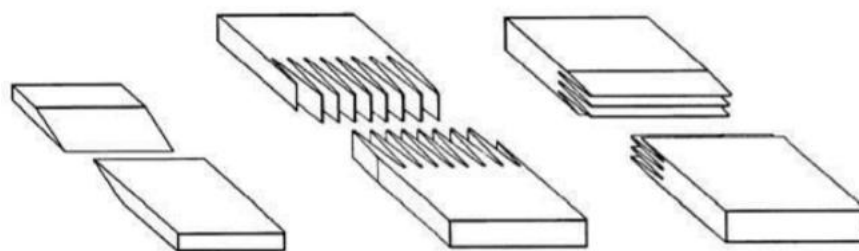
- Drveni trnovi - to su drveni čavli koji su od svoje sredine do jednog i drugog kraja konusni. Trn se zabija u rupu donjeg sastavnog elementa, a gornji se element svojim rupama "nasada" na stršću polovinu zabijenog trna.
- Drveni moždanici - nazivaju se još i zaglavci i zagvozde. Oni su pomoćna vezna sredstva. Danas se upotrebljavaju samo za prijenos sila sa elementa na element, čije osi leže na istom pravcu. Izrađuju se od tvrdog drveta, te kao umetci u zasjecima spojnih elemenata pojačavaju spoj učvršćen čeličnim veznim sredstvima. Na slici 40 prikazan je spoj drva pomoću drvenih moždanika.



Slika 40. Drveni moždanici [3]

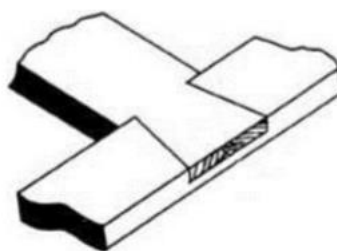
Drvena čivija - ima oblik skraćenog stošca, laganog konusa, a njen promjer ovisi o njenoj duljini. Drvene čivije se upotrebljavaju na onim mjestima spoja, gdje uglavnom dolazi u obzir naprezanje na odrez. Drvene se čivije mogu upotrijebiti kod spajanja pojedinih sastavnih dijelova rebara. Duljina drvene čivije uvijek je veća od ukupne debljine komada, koji se trebaju međusobno čvrsto spojiti. Drvo za izradu čivija mora biti mlado, ravnih vlakanaca, bez čvorova, čisto od bjelike i dobro odležano. Vanjski pojas u drvu koji sadrži žive stanice zove se bjel ili bjelika, svijetle je boje, širina joj varira zavisno o vrsti drva.

- Geometrijom - Razvojem kemijske industrije, umjetne smole omogućile su pouzdano, trajno i vodootporno spajanje dva komada drva. Danas se rabi lamelirana konstrukcija, gdje se ostatci drva spajaju smolama ili ljepilima, slika 41. Spoj se posebno izradi da nakon lijepljenja komad tvori kompaktnu cjelinu.



Slika 41. Prikaz lamelarnih spojeva [3]

Takvim načinom spojevi postaju jednako čvrsti ili čak čvršći od osnovnog materijala. Također, pravilnom izvedbom, moguće je dobiti vrlo kvalitetne i čvrste spojeve pazeći na orijentaciju vlakanaca drva smjeru djelovanja naprezanja. Na slici 42 je prikazan primjer geometrijski izveden spoj [3].



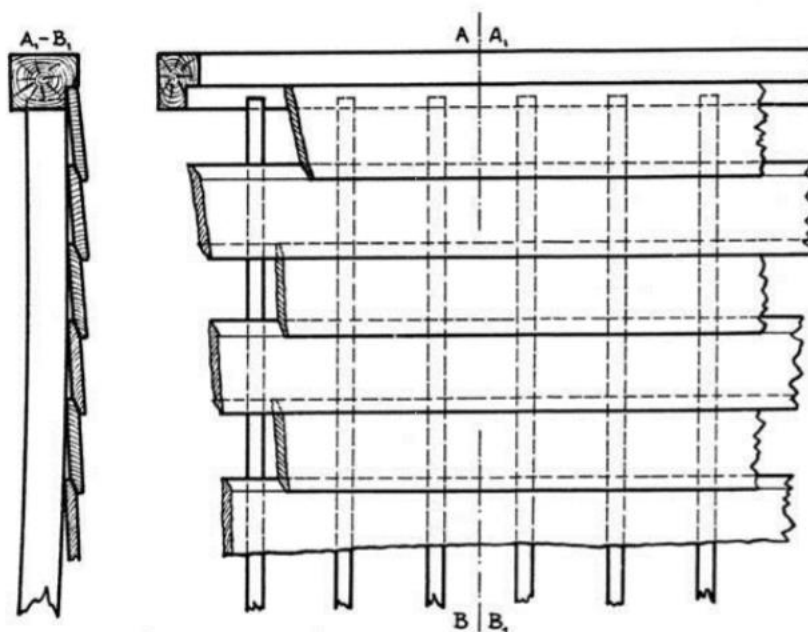
Slika 42. Geometrijski izveden spoj [3]

4.4.2. Tehnologija gradnje

Tradicionalna drvena konstrukcija broda dijeli se na dva oprečna načina i pristupa gradnji broda. Postoje gradnje: [3]

- Klinker,
- Karvel.

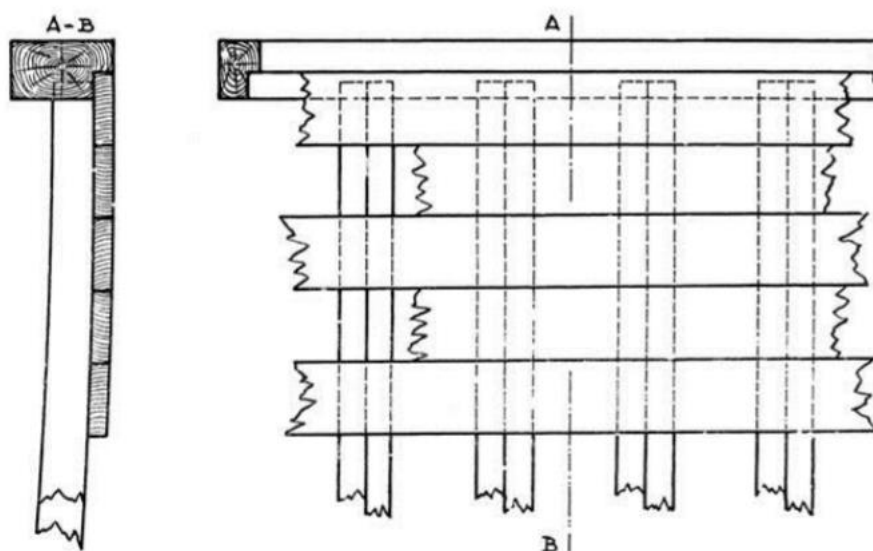
Klinker gradnju možemo naći i pod nazivom lamelarni sistem gradnje ili sistem preklapanje platica, slika 43.



Slika 43. Primjer klinker gradnje [3]

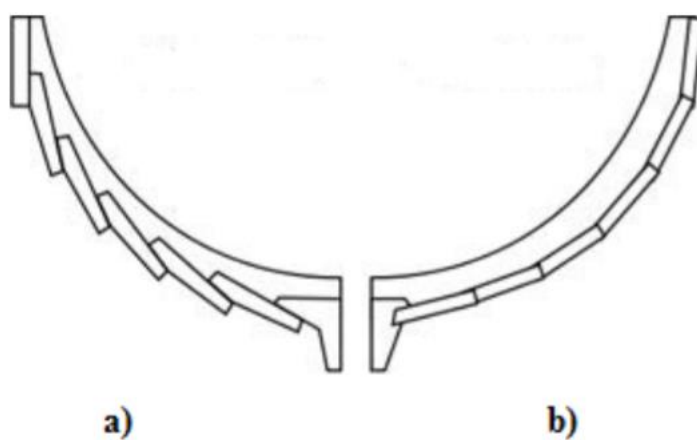
Klinker gradnja se sastoji od izrade glavnih, a po potrebi i sporednih elemenata trupa drvenog broda pomoću lijepljenja više slojeva dasaka (lamela) u jedan komad koji se zove laminantni blok. Lijepljenjem pojedinih lamela u jedan laminantni blok povećava se trajnost drva, jer ljepilo prodire u drvo te se time povećava čvrstoća drva [3].

Kod karvel tipa gradnje, oplata se postavlja na prethodno oblikovani kostur sastavljen od uzdužnih i poprečnih nosača i ukrepa. Karvel (engl. *carvel*) oplata koja se sastoji od platica koje se međusobno bočno dodiruju (ponekad se zove i dodirna oplata). Dobila je ime od karavele (*caravella*), naziva portugalskog broda iz XIII stoljeća. Primjer karvel gradnje je prikazan na slici 44 [3].



Slika 44. Primjer karvel gradnje [3]

Po načinu slaganja broda, moglo bi se reći da je klinker gradnja izvana prema unutra dok je karvel gradnja iznutra prema van, kako je prikazano na slici 45 [3].



Slika 45. Usporedba klinker (a) i karvel (b) tipa gradnje [3]

Suvremena drvena brodogradnja doživljava neke nove tehnologije koje se križaju s tradicionalnom brodogradnjom a to su da danas u gradnji drvenih brodova važan faktor postaju i polimerni materijali [3].

4.4.3. Polimerni materijali u završnoj obradi drvenog broda

Danas u gradnji drvenih brodova važan faktor su i polimerni materijali. Kod drvenih brodova polimeri se koriste kod završne obrade broda tj. drvene površine izložene vanjskim utjecajima (vlage, morske soli, UV zračenja, itd.) zaštićene su epoksidnom smolom. Osnovni nedostatak drva u brodogradnji je što ono neprekidno mijenja volumen zbog upijanja i isušivanja vlage i biva podložno napadajima drvotočaca koji ga izjedaju [30].

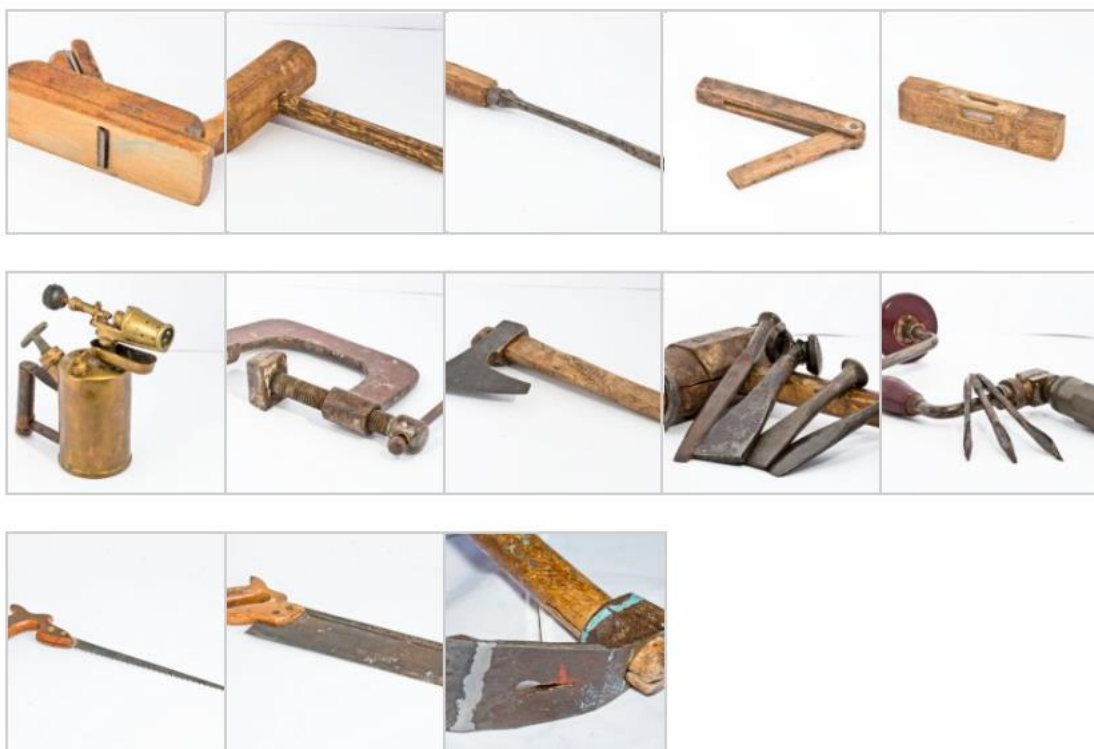
Epoksidne smole pripremljene za primjenu u brodogradnji posjeduju dva važna svojstva, a to su: [30]

- lijepljenje kojim se postiže vrlo čvrsta konstrukcija trupa,
- te stvaranje površinskog sloja koji sprječava daljnje upijanje vlage pa drvo postaje potpuno stabilan materijal (uz uvjet da je zaštićeno epoksidnom smolom sa svih strana).

Primjena epoksidne smole u drvenoj brodogradnji

Primjena epoksidne smole izazvala je veliki napredak u izradi drvenih brodova. Epoksidne smole su dobar impregnator drva ali i odlično ljepilo. Brodovi kod kojih su sve drvene površine izložene vanjskim utjecajima (vlage, morske soli, UV (ultraviolett) zračenja, itd.) zaštićene epoksidnom smolom, imaju poboljšana svojstva, te troškovi održavanja takvog trupa se ne razlikuju mnogo od održavanja brodova od polimernih kompozita (polimerne smole ojačane staklenim vlaknima). Intervali održavanja ovise o vremenu upotrebe broda u moru, kvaliteti premaza te kvaliteti nanošenja premaza. Usprkos tome, proizvodnja drvenih brodova zahtjevan je, skup i dug proces [30].

4.4.4. Alati



Slika 46. Osnovni tradicionalni alati za drvenu brodogradnju

4.5. ODRŽAVANJE

Drvo ima bolja toplinska, akustična, galvanska i kemijska svojstva u odnosu na druge uobičajene materijale, tako da nema problema s kondenzacijom, korozijom i osmozom ali može izazvati truljenje drva ako nije adekvatno zaštićeno [30].

Održavanje drvenog broda je jako skupo ali za drvene brodove laminirane i saturirane epoksidnom smolom troškovi održavanja drastično padaju i stručno znanje više nije toliko potrebno za održavati drveni brod. Tako konzervirano, tehnički suho drvo, zadržava sva svoja izvanredna svojstva, praktično bez starenja dugi niz desetljeća. Troškovi održavanja takvog trupa nisu ništa veći od održavanja stakloplastike [30].



Slika 47. Jedna od faza brtvljena drvene konstrukcije po West sistemu (zaštita epoksidnom smolom) drvene gradnje

4.6. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA

U staro doba nakon kraja životnog vijeka drvenog broda brodovi su se spaljivali radi spašavanja željezarije koja je tada puno vrijedila. Jeftino staro drvo se spaljivalo, a okovi i čavli se spasili za sljedeći brod. Danas je ta praksa besmislena.

U današnje vrijeme drveni brodovi se u specijaliziranim brodogradilištima grajferom dovede u prah te se taj otpad dalje zbrinjava na posebnim otpadima. Otpadno drvo se loženjem može iskoristiti npr. za krivljenje rebara i sl.



Slika 48. Zbrinjavanje na kraju životnog vijeka

4.6.1. Tradicionalni način spaljivanja drvenog broda

U Hrvatskoj, tradicionalni način spaljivanja brodova se odvija na dan Sv. Nikole po tradicionalnom običaju u mjestu Komiža na otoku Visu. Osim što se zbrine i spali do pepela stari drveni brod, na taj način se i odaje počast za dan Sv. Nikole, tradicionalnom zaštitniku pomoraca.



Slika 49. Tradicionalni način spaljivanja drvenog broda

5. KOMPOZITI

5.1. OPĆENITO

Kompoziti su homogeni materijali dobiveni spajanjem dvaju ili više različitih materijala s ciljem postizanja specifičnih karakteristika i svojstava kakva ne posjeduje niti jedan sastojak sam za sebe. Sastoje se od osnovnog materijala (matrice) i dodatnog materijala (ojačavala i/ili punila) [30].

Kompozitni materijali mogu posjedovati neobične, tj. kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava (krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća, električna ili toplinska vodljivost) [30].



Slika 50. Kompozitna konstrukcija broskog trupa [30]

Evolucija konstrukcije broskog kompozitnog materijala stvorila je potrebu za procjenom osnovnih alata za projektiranje koji se koriste za stvaranje sigurnih pomorskih struktura. Kako se materijali i postupci gradnje poboljšavaju, nije nerazumno razmatrati kompozitnu konstrukciju sve većih plovila.

Temeljna podjela kompozita je: [30]

- metalni kompoziti,
- keramički kompoziti,
- polimerni kompoziti.

Kompoziti se mogu dijeliti prema: [30]

- materijalu matrice (metalni kompoziti, polimerni kompoziti, keramički kompoziti),
- materijalu ojačavala (kompoziti sa staklenim vlaknima, metalnim ojačanjem i sl.),
- obliku ojačavala (vlaknasti kompoziti, kompoziti sa česticama),
- rasporedu ojačavala (kontinuirani kompoziti, diskontinuirani kompoziti),
- postupku izrade (izravno prešani kompoziti, namotavani kompoziti),
- primjeni (konstrukcijski kompoziti, elektrotehnički kompoziti).

Kompoziti mogu biti: [30]

- metalno-metalni,
- metalno-keramički,
- metalno-polimerni,
- keramičko-polimerni,
- keramičko-keramički,
- polimerno-polimerni,
- polimerno-metalni.

5.2. MEHANIČKA SVOJSTVA

Kompoziti se stvaraju u cilju poboljšanja kombinacija mehaničkih karakteristika kao što su krutost i žilavost, te čvrstoće u uvjetima djelovanja okoline odnosno pri povišenim temperaturama [30].

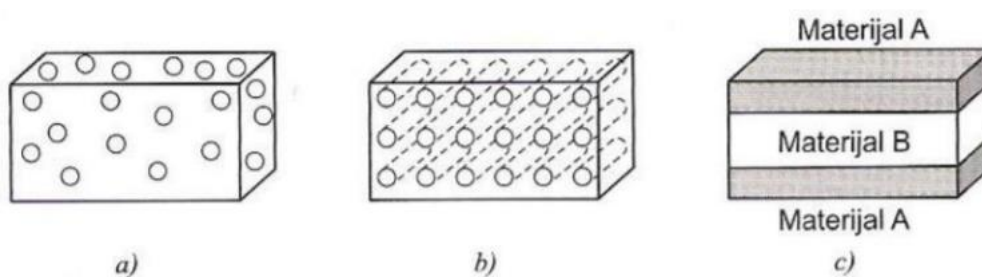
Kompozitnim materijalima se postiže: [30]

- povišenje krutosti, čvrstoće i dimenzijske stabilnosti,
- povišenje udarne žilavosti,
- povišenje toplinske postojanosti,
- sniženje troškova održavanja,
- sniženje apsorpcije vode,

- sniženje toplinske ekspanzije,
- poboljšanje otpornosti na trošenje,
- veću korozijsku postojanost,
- smanjenje mase,
- poboljšanu konstrukcijsku fleksibilnost.

5.2.1. Usporedba osnovnih tipova kompozita

Kompoziti mogu biti s vlaknima, s česticama i slojeviti.



Slika 51. Usporedba osnovnih tipova kompozita: (a) kompoziti s česticama, (b) kompoziti s vlaknima, (c) slojeviti kompoziti [20]

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima (vlaknima ojačanih kompozita). Kod ovih kompozita opterećenje se prenosi i distribuira među vlaknima, i to putem matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Znatno ojačanje ovih kompozita moguće je jedino ako je veza vlakno-matrica jaka. Prema njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice [20].

Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala, visoke čistoće koji imaju ekstremno velik omjer "duljina/promjer". Ukoliko su vlakna diskontinuirana, efikasnost ojačanja ovisi o duljini vlakana [4].

Raspored valakana bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća je maksimalna, dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima, vlakna mogu biti usmjerena ili slučajno raspoređena. Značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru vlakana kod spomenutih kompozita [20].

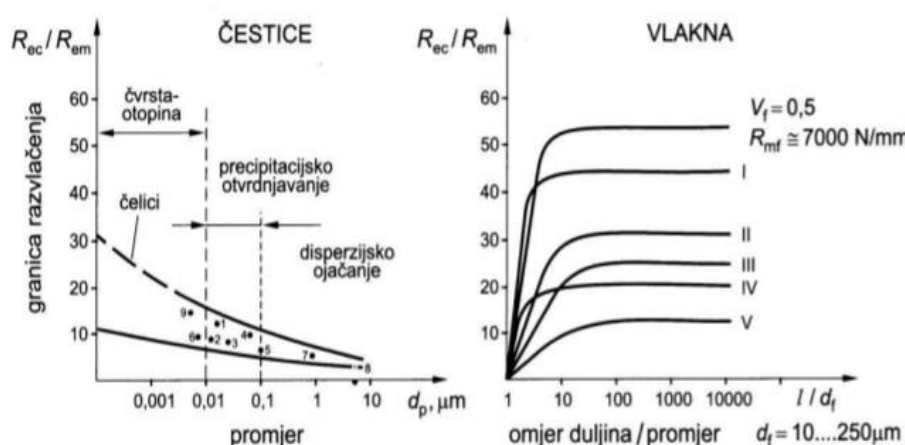
Unatoč nekim ograničenjima na efikasnost ojačanja, kod kompozita ojačanih slučajnim usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna.

Vlaknima ojačani kompoziti se prema vrsti matrice mogu podjeliti na: [4]

- polimerne,
- metalne i
- keramičke kompozite.

Polimerna matrica je najčešća, te može biti ojačana staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Radne temperature metalnih kompozita su mnogo više, te se kao ojačala koriste razni tipovi vlakana i viskeri. Značajka mnogih polimernih i metalnih kompozita su visoka specifična čvrstoća (omjer čvrstoće i gustoće) i specifična krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće), što se postiže primjenom matrica niske gustoće. Kod keramičkih kompozita razvoj je usmjeren na povećanje lomne žilavosti (otpornosti na naglo širenje napukline). Sljedeća skupina suvremenih kompozita su "ugljik - ugljik" kompoziti. Riječ je o kompozitima koji su načinjeni ulaganjem ugljičnih vlakana u pirolaziranu ugljičnu matricu. Nadalje, značajni su hibridni kompoziti kod kojih se susreće ojačanje s barem dva različita tipa vlakana [20].

U cilju ilustriranja prednosti kompozita pred drugim materijalima slijedi kratki prikaz utjecaja čestica i vlakana na čvrstoću kompozita, što prikazuje slika 52 [16].



Slika 52. Ovisnost omjera "granica tečenja kompozita-granica tečenja matrice" o promjeru čestica - d_p , te omjeru l/d_f - duljina vlakana/promjer vlakana [16]

Opis slike 52:

R_{ec} - granica razvlačenja kompozita,

R_{em} - granica razvlačenja matrice,

R_{mf} - vlačna čvrstoća vlakna,

točka u dijagramu predstavlja ispitivanjem određenu vrijednost,

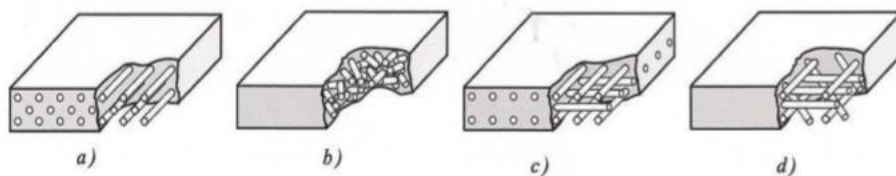
krivulje u dijagramu odnose se na proračunom dobivene vrijednosti,

pretpostavljeno opterećenje paralelno s vlaknima.

5.2.2. Vlaknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanje omjera "čvrstoća/gustoća" uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna, te osigurava duktilnost i žilavost, budući vlakna nose veći dio opterećenja [20].

Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit uporabiv za transportna sredstva, te primjenu u brodogradnji. Vlakna načinjena od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje. Ojačavala mogu biti raspoređena na različite načine (slika 53) [13].

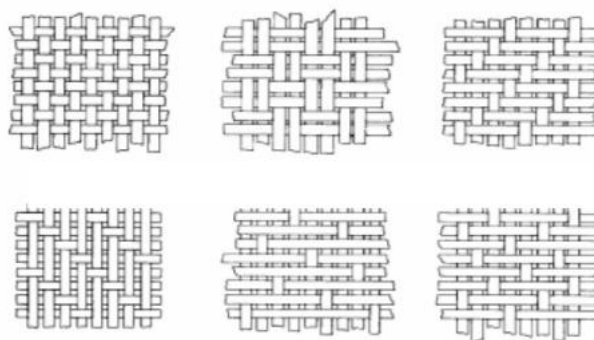


Slika 53. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna [13]

Jednosmjerno usmjerenje kontinuiranih vlakana može se primijeniti na izradu proizvoda kod kojih se žele postići bolja mehanička svojstva u jednom smjeru. Na taj način dolaze do izražaja anizotropna svojstva kompozita. Kod ortogonalnih višesmjernih i kratkih slučajno usmjerenih vlakana kompoziti imaju izraženija izotropna svojstva. Od vlakana se mogu izraditi tkanine ili trake. Slojevi traka mogu se različito usmjeravati.

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Osim u jednom smjeru vlakna možemo polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom. Time se snižava čvrstoća, ali i postižu jednoličnija svojstva kompozita [30].

Vlaknasti polimerni kompozitni materijali su anizotropni pa imaju bolja svojstva u smjeru vlakana. Pojava usmjerenosti mehaničkih svojstava uklanja se laminiranjem nekoliko slojeva kompozita od kojih svaki ima vlakna usmjerena u drugom smjeru. Na slici 54 su prikazani primjeri tvornički različito pletenih vlakana. Ukoliko je potrebno proizvesti materijal izotropnih mehaničkih svojstava, koriste se vlaknasta ojačavala koja nemaju pravilnu usmjerenost [30].



Slika 54. Primjeri tvornički različito pletenih vlakana [30]

Prednosti vlaknastih polimernih kompozita su: [30]

- znatno više specifične čvrstoće i krutosti,
- postojanost prema većini kiselina i lužina,
- relativno niska cijena proizvodnje i obrade,
- velika mogućnost prigušenja vibracija i dobra tarna svojstva.

Nedostaci vlaknastih polimernih kompozita su: [30]

- osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje,
- mogućnost širenja pukotina duž vlakna,
- napetosti izazvane skupljanjem matrice pri i nakon proizvodnje tvorevine,
- anizotropnost svojstava i visoka cijena.

5.2.3. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita

Zakonom miješanja uvijek se može odrediti gustoća vlaknima ojačanih kompozita: [16]

$$\rho_c = V_m * \rho_m + V_f * \rho_f \quad (7)$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a indeks "f" na vlakno. Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti: [16]

$$E_c = V_m * E_m + V_f * E_f \quad (8)$$

gdje je:

E_c – modul elastičnosti kompozita,

E_m – modul elastičnosti matrice,

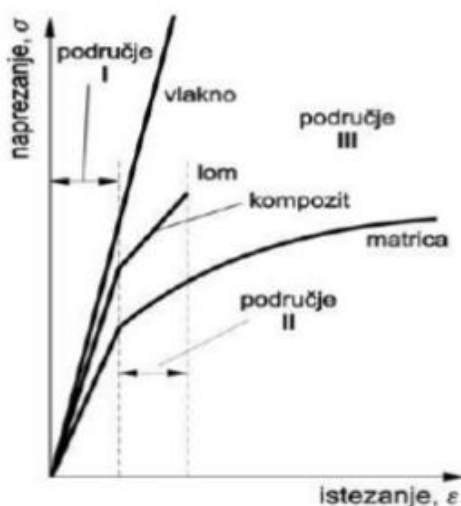
E_f – modul elastičnosti vlakna,

V_m – volumni udio matrice,

V_f – volumni udio vlakna.

Pri visokim napreznanjima započinje deformiranje matrice, te veza između napreznanja i istežanja više nije linearna (slika 4) [1]. U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Modul elastičnosti može se predvidjeti izrazom: [16]

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f \quad (9)$$



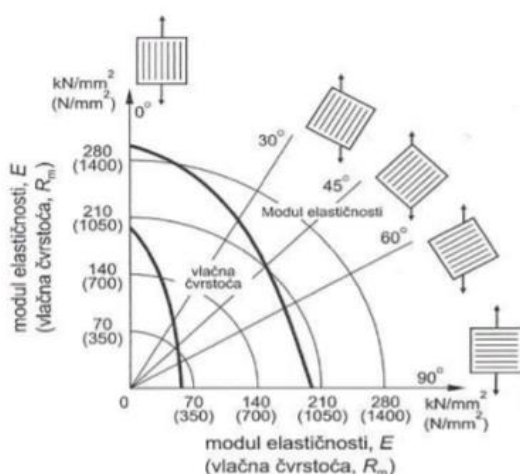
Dijagram 6. "napreznanje-istežanje" vlaknima ojačanog kompozita [16]

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice, te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost), ponašanje pri udaru (žilavost), ponašanje pri dinamičkom (umor materijala) i dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanju materijala) predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća [16].

5.2.4. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita potrebno je uzeti u obzir brojne faktore. Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava često se teško proizvode, te također teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom „duljina/promjer“ znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće [11].

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima (slika 6). Ipak svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna. Umjesto u jednom smjeru, vlakna se mogu polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom, čime se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva kompozita [15].



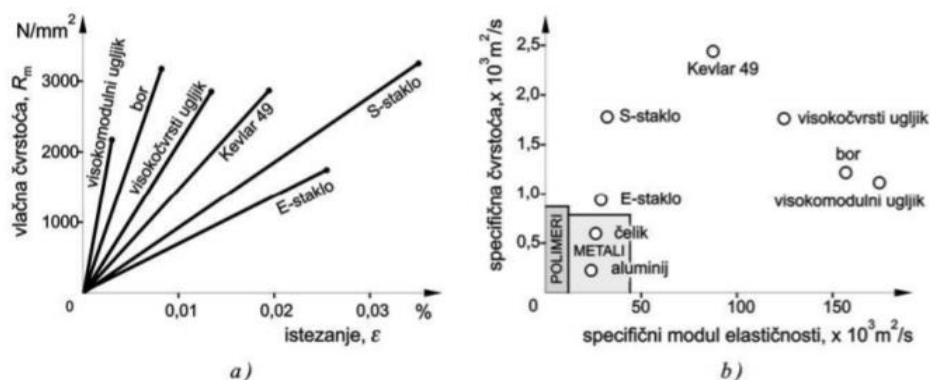
Slika 55. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na kao primjer Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [16]

Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također trebaju imati visoko talište. Specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti materijala definirani su izrazima: [20]

$$\text{Specifična čvrstoća} = R_m(R_e)/\rho$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = E/\rho$$

Kao materijali za vlakna preferiraju se materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće. Neki karakteristični podaci za svojstva ojačala prikazani su na slici 56 [20].



Slika 56. Svojstva vlakana: (a) krivulja "naprezanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [20]

5.2.5. Kompoziti s česticama

Za ojačanje kompozitnog materijala mogu se upotrijebiti ne samo vlakna, već i čestice od tvrdog i krhkog materijala koje su jednolično raspoređene u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Ta je struktura slična onoj mnogih dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura. Ipak, kod kompozita se za ugradnju disperziranih čestica ne primjenjuje transformacija faza [26].

S obzirom na veličinu čestica i način na koji utječu na ukupna svojstva kompozita, kompozite s česticama možemo podijeliti u dvije velike skupine: [26]

- kompoziti s disperzijom (malim česticama) (čestice $< 0,1 \mu m$),
- kompoziti s velikim česticama (čestice $> 1 \mu m$).

Kod kompozita s disperzijom, povišena čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze koje usporavaju gibanje dislokacija. Razmatranje ovog mehanizma očvršćivanja je na nivou atoma. Kod kompozita s velikim česticama mehanička

svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica. Volumni se udjel čestica kod kompozita s disperzijom kreće do 15 %, a za kompozite s velikim česticama taj je udjel veći od 20 % [26].

Jedna od najvažnijih razlika između kompozita s česticama i onih s vlaknima direktno proizlazi iz njihove građe. Kompoziti s česticama općenito su izotropni, tj. njihova svojstva (čvrstoća, krutost itd.) identična su u svim smjerovima, za razliku od kompozita s vlaknima koji su često anizotropni, te svojstva variraju s obzirom na položaj vlakna. Anizotropnost se može djelomično prevladati slaganjem više slojeva ojačanja različite orijentacije pri čemu se dobiva slojeviti kompozit [26].

Pri sobnoj temperaturi disperzijom ojačani kompoziti nisu čvršći od dvofaznih metalnih legura. Osim toga, postojanost prema puzanju ovih kompozita veća je od one kod precipitacijski očvrnutih legura. Za stabilnost pri visokim temperaturama disperzirana faza ne smije biti gruba (krupna) [20].

Svojstva disperzijom ojačanih kompozita mogu se optimirati uzimanjem u obzir sljedećih smjernica: [20]

- disperzirana (raspršena) faza, tipičan primjer je tvrd i stabilan oksid, treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju),
- materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela (količine),
- disperzirani materijal treba biti male rastvorljivosti u materijalu matrice (npr. Al_2O_3 ne otapa se u aluminiju, dakle taj materijal je djelotvoran dispergent za legure aluminija),
- između matrice i raspršenog materijala treba postojati dobra povezanost (slaba rastvorljivost raspršenog materijala u matrici može doprinijeti dobrim i čvrstim vezama).

Dodane velike čestice ne mogu učinkovito spriječiti gibanje dislokacija matrice, te na taj način ne ojačavaju matricu. Pri opterećivanju kompozita jednako se deformiraju matrica i dodane čestice, ali se u matrici i dodanim česticama javljaju različita naprezanja.

Kako bi se snizila cijena proizvoda, često se kompozit formira uz dodavanje matrici jeftinijih velikih čestica [26].

5.2.6. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije sastoje se od dva čvrsta i kruta tanka vanjska sloja između kojih se nalazi materijal male mase (za popunjavanje) koji čini jezgru (trodimenzionalni dodatak - vlakna su jednodimenzionalna, slojevi dvodimenzionalni), koja je prije svega namijenjena povećanju čvrstoće i krutosti pri savojnom i smičnom poprečnom, te lokalnom tlačnom opterećenju. Niti materijal za popunjavanje, niti vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti niti kruti, a sendvič ima oba svojstva. Zahvaljujući maloj masi, sendvič konstrukcije odlikuje visoka specifična čvrstoća i visoka specifična krutost. Poznat je primjer sendvič konstrukcije valoviti kartonski papir – s obje strane valovite jezgre zalijepljen je ravni papir veće debljine (karton). Niti valovita jezgra, niti površinski slojevi papira nisu kruti, ali njihova kombinacija jest [26].

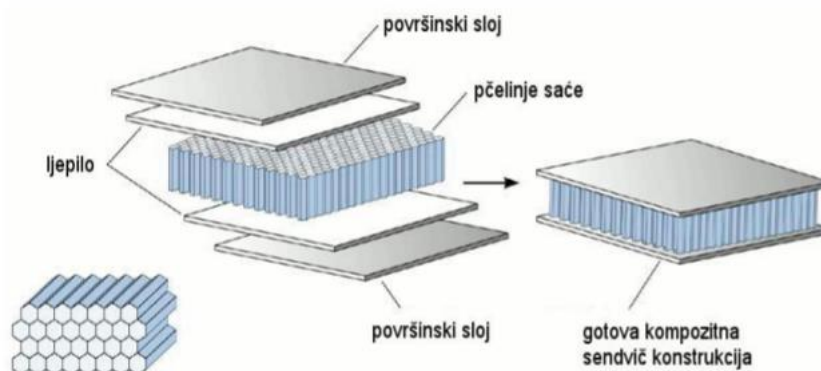
Jezgra u sendvič konstrukciju uvodi dodatnu komponentu koja ima funkciju prenošenja smičnih naprezanja između dviju oplata sendviča. Materijal jezgre može biti: [20]

- puno drvo (najčešće laganije vrste četinjača),
- furnirska ploča (brodograđevne kvalitete),
- balza (rezana s vlaknima okomitim na površinu sendviča, npr. BALTEK),
- pjenasti umjetni materijali (različite gustoća, na bazi PVC – poli vinil-klorid, poliuretan i fenol-formadehidna pjena),
- saće (karton sa smolom, Al folija, npr. TERMANTO).

Površinski slojevi mogu biti, a često i jesu, načinjeni od materijala više čvrstoće i krutosti. Za vanjske slojeve preferiraju se legure aluminija, polimerni kompoziti ojačani vlaknima, titanove legure i čelik [26].

Struktura sendvič konstrukcije u obliku pčelinjeg saća koja sadrži aluminijsku jezgru oblika saća položenu između tankih vanjskih slojeva, najčešće aluminijske folije (limova) ili laminata, slika 57. Time se dobiva vrlo postojan, krut, čvrst i izuzetno lagan sendvič koji je

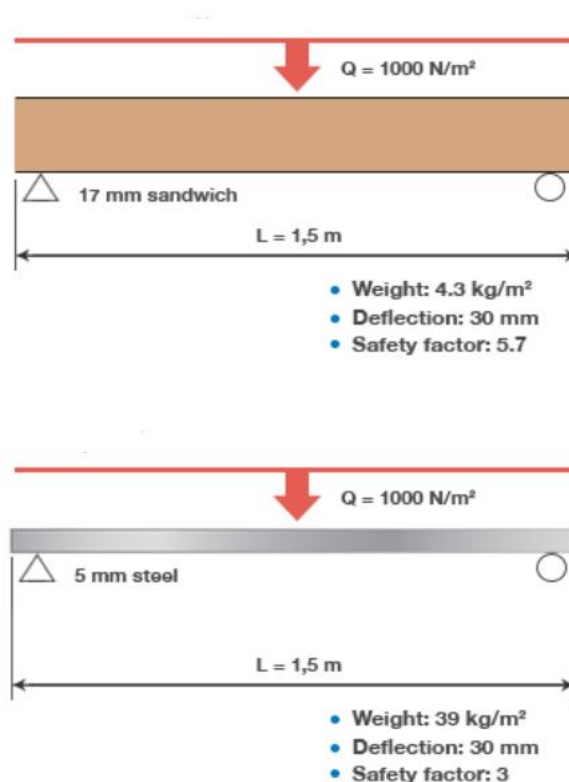
zahvaljujući svojim prednostima široko primjenjiv u izradi zrakoplovnih konstrukcija a i u primjeni kod brodogradnje [26].



Slika 57. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjih saća [26]

Sendvič konstrukcije susreću se u brodogradnji pri izradi nosivih konstrukcija, ali i pri izradi konstrukcija kod kojih zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava nisu prioritet. Posebno maloj brodogradnji, za brze brodove kao i u nekim posebnim slučajevima. Zbog svoje velike raznolikosti (po sastavu, svojstvima, mogućnostima izrade itd.), primjena sendvič materijala u brodogradnji je raznovrsna. Sendvič materijali se ponajprije upotrebljavaju pri proizvodnji brzih brodova i to za tzv. “strukturne” i “nestruckturne” dijelove.“ [30]

„Strukturni dijelovi” su oni koji su u uporabi izrazito mehanički opterećeni, tj. dijelovi kod kojih je pri izboru materijala i pri dimenzioniranju prioritetno udovoljavanje zahtjevima koji su povezani s mehaničkim opterećenjem. “Nestruckturni dijelovi” su oni kod kojih su prioritetni zahtjevi u pogledu dekorativnosti (estetike, boje itd.), samogasivosti, kemijske postojanosti itd. Na slici 58 možemo vidjeti da s istom silom savijanja, uštede u težini kod sendvič konstrukcija mogu biti i do 90 % [30].



Slika 58. S istom silom savijanja, uštede u težini kod sendvič dizajna su skoro 90 %

[30]

(prijevod eng. u prilogu)

Kod brodova sendvič materijali posebno su zanimljivi zbog smanjenja mase što rezultira većom brzinom plovila, povećanjem nosivosti, te smanjenjem potrošnje goriva. Sendvič materijali imaju povišenu krutost što smanjuje potrebu za podupiranjem, a time doprinose fleksibilnosti prostora. Ovi materijali imaju povišenu dinamičku čvrstoću, otporniji su na udarna opterećenja, a u slučajevima kada su komponente kemijski postojane, kemijski je postojana i sendvič konstrukcija [30].

Sendvič konstrukcije korištene u brodogradnji sastoje se od kombinacije poliesterskih ili epoksidnih laminata i pjenastih materijala. One posjeduju dobra mehanička i termoizolacijska svojstva. U brodogradnji se koristi ekspandirani PVC. Za izradu trupa broda koristi se kruta PVC pjena, koja je predviđena (oblikovana) za dinamičko opterećenje. Ta kruta pjena ima visoku otpornost na udarce i dobru zvučnu izolaciju. U slučaju ponovnih koncentriranih sila (udaraca) ne dolazi do uništenja ili savijanja materijala [30].

Postupci vezivanja tvrde PVC pjene na laminat su: [30]

- ručno laminiranje,
- ugradnja tvrde PVC pjene na otvrdnuti laminat s lijepilom,
- poliesterskom smolom ili poliesterskim kitom,
- te ugradnja tvrde PVC pjene na neotvrdnuti (mokri) laminat.

5.3. MATERIJALI OJAČANJA

Kao ojačanje u kompozitu se koriste vlakna izrađena od raznih materijala. Općenito za izradu ojačanja dolaze u obzir mnoge vrste materijala ako su kemijski kompatibilne matrici. Tako se u najopćenitijem smislu javljaju sljedeće grupe materijala za izradu ojačanja: [30]

- prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.),
- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo),
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.),
- aramidna vlakna (engl. *Kevlar*, *Twaron*, itd.),
- ugljična vlakna (engl. *Carbon*),
- metalna vlakna (žica ili žičano pletivo).

Bez obzira na materijal vlakna se rijetko direktno koriste bez prethodne pripreme u obliku poluproizvoda. Nakon postupka proizvodnje individualna vlakna se grupiraju u strukove koji se zatim namataju u klupka. Najčešće vrste poluproizvoda su mat, roving, platna i tkanine. U nastavku su opisane neke vrste najčešćih ojačavala u brodogradnji [30].

5.3.1. Staklena vlakna (engl. *Fiberglass*)

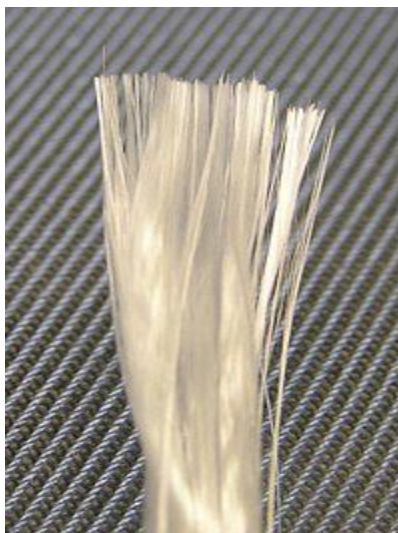
Staklena vlakna su niti načinjene od određenog tipa stakla, koje se najčešće koriste kao ojačala u kompozitnim materijalima. Staklena vlakna se proizvode od rastaljene smjese silicija (Si) i minerala koji sadržavaju okside potrebne za formiranje određenog sastava smjese, koja se tali u velikim pećima. Zatim se staklo izvlači iz spremnika načinjenog od legure platine na kojem se nalazi nekoliko tisuća individualnih otvora, promjera od 0,8 do 3,175 mm. Dok su još u viskoznom stanju, vlakna se oblikuju do željenog promjera 3 – 20 μm . Ova vrsta vlakana je najčešće korištena u brodogradnji [16].

Staklena vlakna se mogu podijeliti u dvije kategorije, jeftina vlakna za opću uporabu i premium vlakna za specijalnu upotrebu. Preko 90 % proizvedenih staklenih vlakana su za opću uporabu [16]. U tablici 20. prikazani su tipovi stakla i njihova nazivna svojstva.

Tablica 20. Tipovi stakla i nazivna svojstva [16]

Oznaka	Nazivno svojstvo
E-staklo , electrical(električna)	Mala električna provodnost
S-staklo , strenght(čvrstoća)	Visoka čvrstoća
C-staklo , chemical(kemijska)	Visoka kemijska otpornost
M-staklo , modulus(modul)	Visoka krutost
A-stalo , alkali(lužina)	Visoko lužnato staklo
D-staklo , dielectric(dielektrika)	Mala dielektrična konstanta

Staklena vlakna se proizvode kao kratka (isjeckani roving) i dugačka vlakna (kontinuirani roving). Dugačka vlakna (slika 59) se upotrebljavaju kod postupaka sa štrcanjem vlakana, za tkanje (ručno i strojno nanošenje u otvorene kalupe). Kratka vlakna (sječena) se upotrebljavaju u duromerima i smjesama koje se prerađuju postupcima ubrizgavanja ili injekcijskog prešanja [30].



Slika 59. Strukovi staklenog vlakna [30]

Svojstva kompozita sa staklenim vlaknima su: [30]

- povišena rastezna čvrstoća i modul rastezljivosti;
- povoljnog su omjera čvrstoće i mase;
- postojani su pri povišenim temperaturama i koroziji;
- dimenzijski su stabilni;
- dobra električna svojstva;
- postojani su na starenje;
- relativno se jednostavno i jeftino prerađuju u gotove proizvode.

Za postupke podtlačnog injekcijskog prešanja i pultrudiranja u otvorenim kalupima se upotrebljava mat. Mat je proizvod sječenog rovinga (dužine oko 5 cm), koji se sastoji od jednoliko debelog sloja vlakana površinski razbacanih u svim smjerovima (slika 60), koje na okupu drži posebno ljepilo (u obliku emulzije ili praha) topivo u matrici ili su okomito na površinu prošivena vlaknima od istog ili drugog materijala. Mat brzo impregnira (natapa se), dobre je prozirnosti i dobrih mehaničkih svojstava. U matu nisu dozvoljene šupljine (rupe) promjera preko 50 mm. Laminat izrađen s matom rezultira podjednakim svojstvima u svim smjerovima [30].



Slika 60. Stakleni mat 400 g/m² [30]

U tablici ispod se nalaze mehaničke osobine mata sa sječenim vrhovima.

Tablica 21. Mehaničke osobine laminata s matom od isjeckanih vlakana [16]

Težinski udio stakla u laminatu	$G_C = \frac{E_{staklo}}{E_{laminat}}$	-
Vlačna čvrstoća	$\sigma_T = 200 \cdot G_C + 25$	N/mm^2
Modul elastičnosti na vlak	$E_T = (15 \cdot G_C + 2) \cdot 10^3$	N/mm^2
Tlačna čvrstoća	$\sigma_C = 150 \cdot G_C + 72$	N/mm^2
Modul elastičnosti na tlak	$E_C = (40 \cdot G_C - 6) \cdot 10^3$	N/mm^2
Smična čvrstoća	$\tau_s = 80 \cdot G_C + 38$	N/mm^2
Modul smika	$G_s = (1.7 \cdot G_C + 2.24) \cdot 10^3$	N/mm^2
Savojna čvrstoća	$\sigma_F = 502 \cdot G_C^2 + 106.8$	N/mm^2
Modul savijanja	$E_F = (33.4 \cdot G_C^2 + 2.2) \cdot 10^3$	N/mm^2

U tablici ispod možemo proučiti mehaničke osobine laminata od mata uz 30 % stakla

Tablica 22. Minimalne osobine laminata od mata uz 30 % težinskog sadržaja stakla i uz primjenu smole za laminiranje [16]

Vlačna čvrstoća	90	N/mm^2
Modul vlaka kod 0.25% i 0.5% relativnog produljenja	6900	N/mm^2
Tlačna čvrstoća	125	N/mm^2
Modul tlaka	6400	N/mm^2
Savojna čvrstoća	160	N/mm^2
Modul savijanja	5700	N/mm^2
Interlaminarna smična čvrstoća	18	N/mm^2
Apsorpcija vode (maksimalno)	70	mg

Svojstva kompozita sa staklenim vlaknima su [30]:

- povišena rastezna čvrstoća i modul rastezljivosti,
- povoljnog su omjera čvrstoće i mase,
- postojani su pri povišenim temperaturama i koroziji,
- dimenzijski su stabilni, - imaju dobra električna svojstva,
- postojani su na starenje,
- relativno se jednostavno i jeftino prerađuju u gotove proizvode.

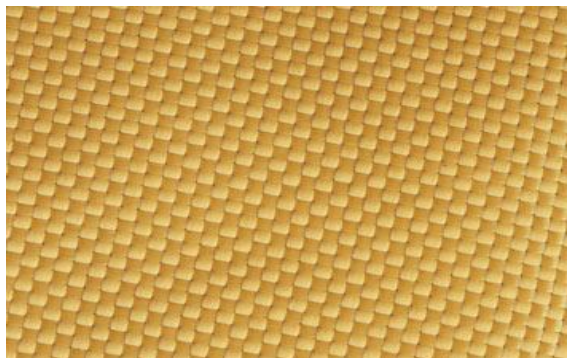
Tablica 23. Pregled svojstva staklenih vlakana u odnosu na biljna vlakna [30]

Vlakno	Vrsta vlakna	Gustoća, g/cm ³	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa/(g/cm ³)	Prekidno istezanje, %	Apsorpcija vlage, %	Cijena po kg, USD
Stakleno vlakno	mineral	2,50 – 2,55	1 800 – 3 500	70,0 – 73,0	700 – 1 400	2,5 – 3,0	0,0	1,30
Lan	lika	1,40 – 1,50	345 – 1 500	27,6 – 80,0	230 – 1 070	1,2 – 3,2	7,0	1,50
Konoplja	lika	1,48	550 – 900	70,0	370 – 610	1,60	8,0	0,6 – 1,8
Juta	lika	1,30 – 1,45	400 – 800	10,0 – 30,0	280 – 610	1,16 – 1,8	12,0	0,35
Agava	list	1,33 – 1,45	468 – 700	9,4 – 38,0	320 – 530	2,0 – 7,0	11,0	0,6 – 0,7
Curaua	list	1,40	500 – 1 150	11,8	360 – 820	3,7 – 4,3	n/a	0,60

5.3.2. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su umjetni organski polimeri (aromatski poliamid), proizvedeni predenjem kontinuiranog vlakna iz kapljevine smjese. Najčešće se koriste u kombinaciji s epoksidnim i poliesterskim smolama. Tako dobivena vlakna imaju tipičnu zlatno žutu boju, a karakterizira ih visoka rastezna čvrstoća i niska gustoća. Imaju sjajni omjer čvrstoće i mase koji je povoljniji od metala. Najpoznatija aramidna vlakna su Kevlar (poli-p-fenilentereftalamid – PPTA), prikazana na slici 61, te Twaron [30].

Sadržavaju visoka mehanička svojstva pri temperaturama od – 200 °C do + 200 °C. Podložna su na djelovanje jakih kiselina, ali su postojana na otapala i druge kemikalije. Dije se na temelju vrijednosti modula rastezljivosti. Svi tipovi aramidnih vlakana imaju dobru udarnu žilavost, a oni s nižim modulom rastezljivosti vrlo intenzivno se koriste u balistici. Aramidna vlakna se tkaju jednostavnije od staklenih, ugljičnih ili keramičkih vlakana [30].

**Slika 61. Aramidna vlakna (Kevlar) [30]**

Aramidna vlakna u suvremenim mješavinama već nadomještaju čelik i aluminij. Jedna su od osnovnih komponenata za izradu polimernih materijala gdje se traže izuzetna toplinska i mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u izradi zračnih i svemirskih letjelica, vojnoj industriji (pancirke), brodogradnji, industriji sportske opreme, građevinarstvu i elektronskim uređajima [30].

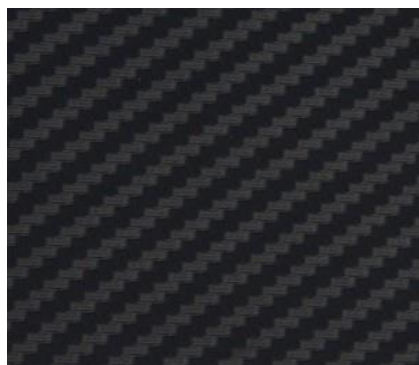
Tablica 24. Mehaničke osobine kevlara u usporedbi s drugim vlaknima [9]

TIP VLAKNA	GUSTOĆA VLAKANA ρ_F kg/m ³	MODUL VLAKA N/mm^2	MODUL SMIKA N/mm^2	POISSONOV OMJER μ_F
E-staklo	2560	69000	28000	0.22
S-staklo	2490	69000		0.20
R-staklo	2580	-		
Aramid (kevlar)	1450	124000	2800	0.34
LM grafit	1800	230000		
IM grafit	1800	270000		
HM grafit	1800	300000		
VHM grafit	2150	725000		

5.3.3. Ugljikova vlakna

Grafitna vlakna (nazivaju se i karbonska vlakna) su izrađena od organskog polimera kao što je poliakrilonitril. Materijal je izdužen u vlakna i grije se pod opterećenjem na visoku temperaturu (> 1000 °C). Dvodimenzionalni kristali ugljik-ugljik (grafit) se formiraju kada se eliminira vodik. Lanac ugljik-ugljik ima izuzetno jake molekularne veze (dijamant je trodimenzionalni ugljik-ugljik kristal), a to je ono što daje vlakna vrhunskih mehaničkih svojstava [9].

Najveći rast na tržištu vlakana bilježe ugljikova vlakna. Ugljikova vlakna (slika 62) se postupkom grafitizacije dobivaju najčešće od poliakrilonitrila (PAN) koji daje najbolja svojstva vlaknima. Postupak dobivanja iz PAN-a je skup. Proizvode se još i od katrana i celuloze. Podešavanjem parametara tijekom procesa grafitizacije dobivaju se ili vlakna visoke rastezne čvrstoće ili vlakna visokog modula rastezljivosti. Nakon oblikovanja se tretiraju (nanošenje tzv. apreture) kako bi se poboljšalo njihovo prijanjanje uz matricu. Promjer vlakana je 4 μm do 10 μm. Na osnovu vrijednosti modula vlaka (Youngov modul) dijele se na vlakna standardne, srednje, visoke i ultra- visoke čvrstoće [30].



Slika 62. Ugljikova vlakna [30]

Koriste se u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, za izradu sportske opreme, te u brodogradnji. Kompozitna struktura napravljena od ugljičnih vlakana i epoksidne smole koristi se u svim područjima tehnike i proizvodnje. Svojstva ugljikovih vlakana su: [30]

- najvišu krutost od svih komercijalno dostupnih vlakana,
- vrlo visoka rastezna i pritisna čvrstoća i na povišenim temperaturama,
- odlična postojanost na otapala, vlagu, kiseline, puzanje i zamor materijala.

U Tablici 25 je prikazana usporedba troškova i mehaničkih svojstava grafitnih kompozita (sa smolom) višeg razreda i komercijalnog razreda. Zbog raznolikosti grafitnih vlakana i smole dostupnih u brojnim kombinacijama, svojstva su navedena su u rasponu [9].

Tablica 25. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava višeg i nižeg razreda grafitnih kompozita (sa smolom) [9]

Svojstvo	Grafitni kompoziti (najviši razred)	Grafitni kompoziti (komercijalni razred)
Cijena, €/kg	40..500+	10..40
Čvrstoća, MPa	620..1380	345..620
Elastičnost, MPa	69×10^6 .. 345×10^6	55×10^6 .. 69×10^6
Gustoća, g/cm ³	1.39	1.39
Spec. čvrstoća	446×10^6 .. 992×10^6	248×10^6 .. 446×10^6
Specif. elastičnost	50×10^6 .. 248×10^6	39×10^6 .. 50×10^6
CTE, m/m/°C	-1.8×10^{-6} .. 1.8×10^{-6}	1.8×10^{-6} .. 3.6×10^{-6}

Grafitni kompoziti su idealno rješenje za primjene gdje je potrebna visoka čvrstoća i mala težina. Većina metala koji se koriste kod ovakvih zahtjeva imaju vrlo slične specifične krutost. Kod zahtjeva za visokom čvrstoćom i malom težinom, grafitni kompoziti su jedini izbor.

Primjeri: [9]

- građa letjelica,
- građa zrakoplova,
- građa trupova brodova,
- valjci kod strojeva,
- jarboli jedrilica,
- okviri za bicikle,
- komponente za strojeve koje rade sa velikim brzinama, a zahtijevaju visoku preciznost.



Slika 63. Model jedrilice sa karbonskim trupom

5.3.4. Hibridne kombinacije vlakana

Zbog optimiranja proizvoda u tehničkom i ekonomskom smislu često se koriste kombinacije dvaju ili više različitih vrsta vlakana. Hibridnim kombinacijama se kompenziraju nedostaci (mala žilavost, mala otpornost na udar, nedovoljna krutost ili visoka cijena) osnovnih kompozita. Najčešće se ugljikova vlakna koriste u kombinaciji sa staklenim vlaknima kod visoko opterećenih konstrukcija gdje se naprezanja rasprostiru u jednom smjeru. Koji će omjer ugljičnih vlakana ili Kevlara sa staklom biti upotrijebljen ovisi o dozvoljenom naprezanju [35].

5.4. KOMPOZITI S OBZIROM NA MATERIJAL MATRICE

5.4.1. Kompoziti s metalnom matricom

Polimeri su dominantni kao materijali matrice, u velikoj se mjeri koriste još i metali (MMC – engl. *Metal Matrix Composites*). Radi se o kompozitima kod kojih je matrica metalna (u pravilu duktilna). Kompoziti s metalnom matricom se odlikuju iznimno dobrim mehaničkim svojstvima. Ojačavanjem metalne matrice ojačalima u obliku čestica, kontinuiranih i diskontinuiranih vlakana, modificiraju se svojstva matrice i ono što je osobito značajno, povišuje se specifična čvrstoća i specifična krutost, te poboljšava otpornost puzanju. Značajna prednost je što ovi kompoziti omogućuju upotrebu pri znatno višim radnim temperaturama (višim od 700 °C), no uz vrlo visoku cijenu proizvodnje koja je uvjetovana iznimno kompliciranim postupcima izrade (u odnosu na polimerne kompozite), pa je njihova uporaba prilično ograničena [16].

Kao materijali matrice mogu se upotrijebiti razni metali poput superlegura na bazi nikla i kobalta, titanovih legura, te lakih magnezijjskih i aluminijskih legura posebno prikladnih u zrakoplovstvu [16].

Prednosti kompozita sa metalnom matricom su: [16]

- vrlo visoka čvrstoća i krutost uz vrlo nisku gustoću,
- visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost,
- vrlo dobra otpornost na trošenje,
- vrlo dobra svojstva pri visokim temperaturama.

Nedostaci kompozita sa metalnom matricom su: [16]

- komplicirana proizvodnja,
- vrlo visoka cijena,
- cijena će padati sa širenjem primjene,
- nedovoljno podataka o svojstvima materijala,
- još uvijek nema dovoljno smjernica za konstruiranje s ovom vrstom materijala,
- loša recikličnost.

5.4.2. Kompoziti s keramičkom matricom

Ova vrsta kompozita sadrži keramičku matricu dodatno ojačanu česticama ili viskerima. Keramika je općenito poznata kao materijal otporan puzanju koji zadržava dobru mehaničku otpornost pri visokim temperaturama (stabilnost pri ekstremno visokim temperaturama), te koji je iznimno postojan prema koroziji. Svojstva su također i visoka tvrdoća, te mala masa. Osnovni im je nedostatak sklonost krhkom lomu, zbog izrazito niske lomne žilavosti u odnosu na metale, što se nastoji prevladati razvojem suvremenih keramičkih kompozita [16].

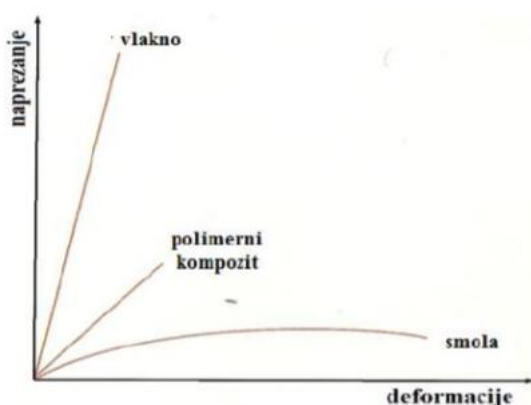
5.4.3. Kompoziti s polimernom matricom

Polimerni kompoziti su najraširenija vrsta kompozita. Zastupljeni su u raznim granama industrijske proizvodnje (automobilskoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu, elektrotehnici i elektronici, zrakoplovstvu, vojnoj industriji, te u svemirskim programima) gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. Sastoje se od polimerne matrice i punila i/ili ojačavala. Polimerne matrice mogu biti napravljene na temelju duromernih smola (npr. epoksidne, ili nezasićene smole), kaučukovih smjesa, te plastomera [16].

Ponašanje polimernog kompozita ovisi o svojstvima materijala i ojačavala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, prirodi i jakosti veza među konstituentima. Kompoziti mogu istovremeno postići: visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, postojanost na različite medije i druge kombinacije svojstava. Moguća je izrada složenih oblika od polimernih kompozita. Njihovom primjenom dolazi do sniženja troškova naknadne obrade dijelova. Također jedna od odlika polimernih kompozita je dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima [30].

Polimerni se kompoziti zbog svojih svojstava sve više primjenjuju u brodogradnji. Važna temeljna svojstva polimernih materijala su čvrstoća, žilavost, krutost, a nezaobilazna su i neka specifična svojstva kao npr. međuslojna čvrstoća i sadržaj šupljina [18]. Kako se polimerni kompoziti sastoje od smole ojačane vlaknima, svojstva polimernih kompozita ovise o svojstvima vlakna, svojstvima smole, volumnom omjeru vlakana naspram smole (VOV), te geometriji i orijentaciji vlakana u kompozitu. Na slici 64 je prikazano kako polimerni kompozit sadrži svojstva koja nema niti jedna njegova komponenta pojedinačno [30].

Najvažnija karakteristika kompozitnih materijala je da se njihova svojstva mogu oblikovati prema željama i potrebama gotovog proizvoda (izdržljivost kompozita na tlak, vlak, smik i savijanje) [30].



Slika 64. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita [30]

Prednosti kompozitnih polimernih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijale su: povoljne vrijednosti specifične čvrstoće i specifične krutosti, mala gustoća, dobra kemijska postojanost, dobro prigušenje vibracija, relativno laka i ne suviše skupa proizvodnja konstrukcijskih dijelova. Naravno postoje i nedostaci, a to su: krutost (nedeformabilnost), mogućnost raslojavanja i mrvljenja, anizotropnost svojstava, skupe komponente [30].

Kemijski sastav polimerne matrice bitno određuje svojstva polimernih kompozita. U primjeni prevladavaju duromerne matrice, prvenstveno one poliesterskog i epoksidnog tipa.

Različiti tipovi poliesterske matrice uz isto ojačavalo mogu pokazati različita svojstva. Za svojstva kompozita važna je ne samo vrsta ojačavala, nego i njegova usmjerenost i raspodjela u matrici [30].

Zbog heterogene strukture polimernih kompozita sposobnost povezivanja matrica i ojačavala bitno utječe na svojstva. Za homogenizaciju kompozita važna je kompatibilnost matrice i ojačavala, a često se koriste organske matrice s anorganskim ojačavalima (staklom). Kompoziti gotovo uvijek sadrže šupljine raznih oblika i veličina koje nastaju zbog neuklopljenih mjehurića zraka u viskoznoj fazi smole tijekom izrade, ili su posljedica lošeg kvašenja vlakna (npr. uslijed neodgovarajuće viskoznosti matrice) te šupljine smanjuju svojstva i bitno utječu na djelovanje medija [30].

5.5. MATRICE

Osnovne funkcije matrice su: [16]

- povezuje vlakna,
- prenosi opterećenje na vlakna,
- zaštićuje vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja.

Također, treba reći da matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknom i mora dobro prijanjati uz vlakna. Svojstva matrice (tablica 26) izrazito su važna za određivanje uzdužne tlačne čvrstoće, poprečne vlačne čvrstoće, kao i međuslojne posmične čvrstoće i obično se kaže da su ova svojstva uvjetovana matricom. Svojstva matrice najčešće određuju i svojstva kompozita, kao i ograničenja u primjeni. U slučaju izloženosti kompozita kemijskim ili utjecajima okoline, matrica je ona koja je prva izložena smanjenju mehaničkih svojstava, te njena svojstva značajno određuju ponašanje kompozita [16].

Vrlo je bitno fizikalno svojstvo temperatura prelaska u kruto stanje (engl. *glass transition temperature* - GTT) koja definira točku prelaska iz viskoznog u kruto stanje matrice. Ova temperatura bitno definira konačna svojstva matrice. Naime, pri upotrebi iznad GTT, svojstva matrice znatno se snižavaju. Vlaga u kompozitu (ponajviše matrici) znatno snižava GTT. Tehnologija izrade kompozita znatno utječe na njegova svojstva, jer mora osigurati dobru vezu vlakna i matrice, kao i minimalan udjel šupljina ili pukotina u kompozitu [16].

Tablica 26. Mehanička svojstva materijala matrice [26]

tip matrice	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	G [GPa]	σ_v [MPa]	ε [%]	α [10 ⁻⁶ /°C]	T_g [°C]
Poliester	1500	4.5	2	90	5	200	110
Vinil ester	1150	4	-	90	5	53	150
Epoksi	1400	6	2.2	130	8.5	70	250
Bizmaleimid	1320	3.6	1.8	78	6.6	49	300
Poliimid	1890	4.9	-	120	3	90	320
Polieter imid	1270	3	-	105	60	62	217
Poliamid imid	1400	5	-	95-185	12-18	36	240 - 270
PPS	1340	3.3	-	70-75	3	54-110	85
PEEK	1320	-	-	92-100	150	-	143
Polisulfon (PS)	1240	2.5	-	70-75	50-100	56-100	190
Polipropilen (PP)	900	1-1.4	-	25-38	300	110	-20 - -5
Polikarbonat (PC)	1200	2.4	-	45-70	50-100	70	133
Aluminij	2700	70	-	200	-	-	-
Ti-6Al-4V	4500	110	-	1000	-	-	-
borosilikatno staklo	2300	60	-	100	-	3.5	-
MgO	3600	210-300	-	97-130	-	13.8	-
Al ₂ O ₃	4000	360-400	-	250-300	-	8.5	-
SiC	3200	400-440	-	310	-	4.8	-

Kad je riječ o polimerima, oni se dijele u tri velike skupine: duromeri, elastomeri i plastomeri. Kao materijali matrice, najviše se koriste duromeri (epoksidna smola,...) i plastomeri (PVC, ...) [26].

5.5.1. Materijali matrice

Epoksidne smole spadaju u skupinu amorfnih polimera koje karakterizira pojava gumene (gel) faze na višim, te staklaste faze na nižim temperaturama. Epoksidi koji polimeriziraju na sobnoj temperaturi pogodni su za korištenje na temperaturama do 50 °C, dok se ovisno o tipu otvrđivača ostale vrste epoksida obrađuju na temperaturama između 120 - 180 °C. Kemijske reakcije koje se pri polimerizaciji događaju jesu egzotermne, te upotreba velike količine otvrđivača (katalizatora) ili previsoka temperature polimerizacije može dovesti do toplinske degradacije matrice, a time i samog kompozita [26].

Ovo je razlog zbog kojeg se posebna pažnja mora posvetiti izradi kalupa, posebice ako se radi o debljim ili većim dijelovima. Da bi im se promijenila mehanička svojstva, epoksidima se mogu dodavati različite tvari u svrhu smanjenja viskoznosti prilikom obrade, povećanja lomnog produljenja uz smanjenje modula elastičnosti, poboljšanje otpornosti širenju pukotina, promjena gustoće i dr. Njihov je osnovni nedostatak inherentna krhkost popraćena velikom čvrstoćom, što se često poboljšava dodavanjem plastomera [26].

Glavne prednosti epoksida su: mogućnost modificiranja svojstava prema postavljenim zahtjevima, mogućnost kontrole žilavosti, te laka i sigurna proizvodnost zbog

male količine štetnih tvari koje se pri tome oslobađaju, malo skupljanje, dobra kemijska otpornost, te dobra dimenzijska i toplinska stabilnost [26].

Glavni nedostaci su: viša cijena proizvodnje u odnosu na npr. poliestere, osjetljivost na vlagu, sporo polimeriziranje, mala otpornost nekim organskim spojevima (npr. organskim kiselinama i fenolima) te relativno niska najviša temperatura primjene [16]. Tablicom 27. prikazna su svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole.

Tablica 27. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole [16]

	Gustoća a kg/m ³	Tlačna čvrstoća a MPa	Modul elast. GPa	Smična čvrstoća, MPa	Smični modul Gpa	Vlačna čvrstoća a Mpa	Vol. udio vlakana %
Ugljična vlakna/epoksidna smola	1 600	570	70	90	5	600	50
E-staklena vlakna/epoksidna smola	1 900	415	-	-	-	490	50-60

Poliesterske smole također pripadaju duromerima, a proizvode se egzotermnim (energija se oslobađa iz sustava u okolinu, predznak promjene entalpije je negativan) kemijskim reakcijama pri kojima se nezasićeni poliesteri miješaju s relativno malom količinom inicijalizatora (katalizatora). Kao kod epoksida, i ovdje materijal pri polimerizaciji prolazi iz tekuće, preko gel do krute faze. Glavne prednosti ovih materijala su: mala početna viskoznost, mala cijena početnih sirovina, jednostavna proizvodnja, te izvrsna otpornost atmosferskim utjecajima. S druge strane, polimerizacija je vrlo egzotermna s visokim skupljanjem čime se u procesu proizvodnje unose značajna zaostala naprezanja, krhkost te slaba kemijska otpornost nekim spojevima (alkalima) [16]. Tablicom 28. prikazana su svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole.

Tablica 28. Svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole [16]

Materijal	Udio stakl. vlakana %	Tlačna čvrstoća MPa	Tlačni modul, 10^{-3} Pa	Savojna čvrstoća, MPa	Savojni modul, 10^{-3} Pa	Tlačna čvrstoća, MPa
Ortoftalna smola	40	150	5,5	220	6,9	
Izofalna smola	40	190	11,7	240	7,6	210

Vinil esteri su po svojstvima između epoksida i poliestera. Polimerizacija se događa na relativno niskim temperaturama (kao kod poliestera), a konačna svojstva daju dobru kemijsku otpornost kao kod epoksida uz jednostavnu proizvodnju te bolja mehanička svojstva i bolje veze između vlakna i matrice u odnosu na poliestere. Ovi materijali imaju znatno veće troškove proizvodnje nego poliesteri te znatno veće skupljanje u odnosu na epoksidge. Tablicom 29. prikazana su svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole [16].

Tablica 29. Svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole [16]

	Gustoća, kg/m ³	Tlačna čvrstoća, MPa	Savojni modul, GPa	Savojna čvrstoća, MPa	Vlačni modul, GPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Volumni udio vlakana, %
Ugljična vlakna/ vinil ester	1 500- 1 650	900- 1100	65-85	800- 1000	136	900- 1200	55-60
Poliaramidna vlakna/ vinil ester	1 200- 1 400	100-300	17-22	150-250	-	800- 1000	50-60

Još neke od smola koje se koriste: [16]

- fenolne,
- poliamidne ,
- cianatne smole.

5.6. CIJENA

Za primjer u tablici 30 je prikazana usporedba troškova i mehaničkih svojstava grafitnih kompozita višeg i nižeg razreda. Zbog raznolikosti grafitnih vlakana i smole dostupnih u brojnim kombinacijama, svojstva i cijene su navedene u rasponu [9].

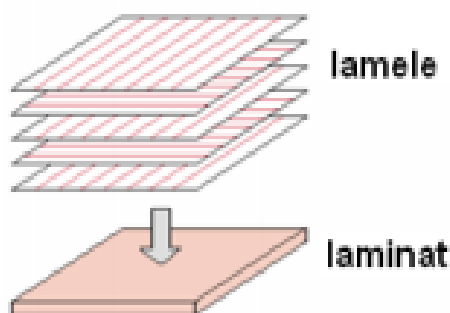
Tablica 30. Usporedba cijena različitih vrsta kompozita [9]

Svojstvo	Grafitni kompoziti (najviši razred)	Grafitni kompoziti (komercijalni razred)	Kompoziti sa staklenim vlaknima
Cijena, €/kg	40..500+	10..40	3..6
Čvrstoća, MPa	620..1380	345..620	138..241
Elastičnost, MPa	69×10^6 .. 345×10^6	55×10^6 .. 69×10^6	7×10^6 .. 10.5×10^6
Gustoća, g/cm ³	1.39	1.39	1.53
Spec. čvrstoća	446×10^6 .. 992×10^6	248×10^6 .. 446×10^6	90×10^6 .. 157×10^6
Specif. elastičnost	50×10^6 .. 248×10^6	39×10^6 .. 50×10^6	4.5×10^6 .. 6.7×10^6
CTE, m/m/°C	-1.8×10^{-6} .. 1.8×10^{-6}	1.8×10^{-6} .. 3.6×10^{-6}	11×10^{-6} .. 14×10^{-6}

5.7. TEHNOLOGIJA

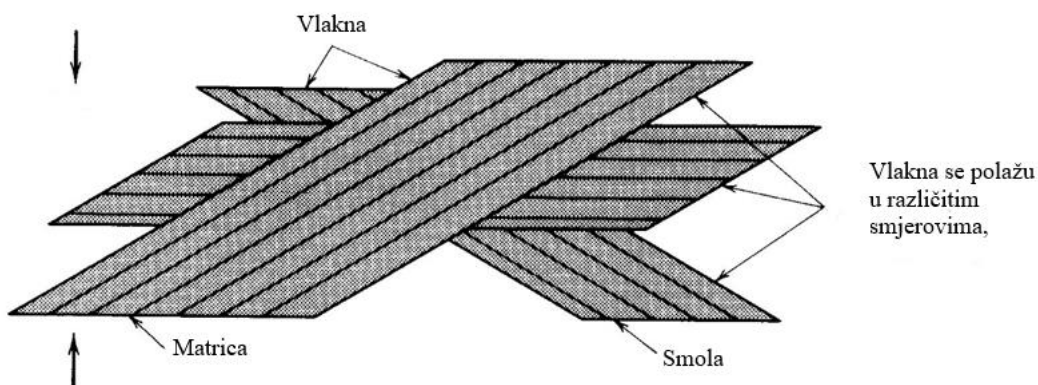
5.7.1. Laminati

Osnova kompozitne konstrukcije je laminat. Laminati su strukturirani polimerni kompoziti koji kao ojačanje imaju samo jednu vrstu vlakana, koja se ovisno o potrebi laminiraju u predviđenim smjerovima i slojevima. Polimerni laminat su kemijskom reakcijom stvrdnute i staklenim vlaknima ojačane epoksidne ili poliesterske smole. Lamelle s različito orijentiranim vlaknima ojačavala slažu se i lijepe međusobno u laminat uz djelovanje tlaka, kao što je prikazano na slici 65, te se tako dobiva laminatna struktura kompozita [30].



Slika 65. Laminantna struktura kompozita [30]

Laminiranje, naizmjenično slaganje smole i vlakana, je jedan od čestih postupaka proizvodnje kompozita (slika 66).



Slika 66. Proizvodnja kompozita laminiranjem [26]

Ovaj postupak je sličan tehnici rada sa staklenim vlaknima; međutim, kompozitna vlakna kod ovog postupka protežu se kontinuirano kroz materijal, dok su u stakloplastici kratki komadići staklenih vlakana nasumično raspoređeni u cijeloj strukturi smole [9].

Postoji više postupaka laminiranja a spomenit će se neki od najvažnijih i najčešće upotrebljivanih postupaka laminiranja u praksi: [30]

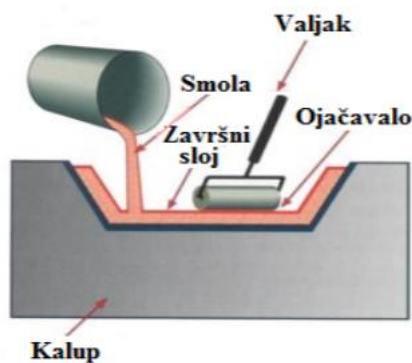
- ručni dodirni postupak laminiranja (engl. *Hand Lay-up*),
- podtlačno oblikovanje,
- podtlačno ulijevanje (vakumska infuzija).

5.7.2. Ručni dodirni postupak laminiranja (engl. *Hand Lay-up*)

Ručni dodirni postupak laminiranja koristi se za izradu proizvoda velikih dimenzija u malim serijama, gdje nije bitno što je samo jedna strana glatka (npr. čamci, bazeni, kalupi) [30]

Postupak ručnog dodirnog laminiranja je prikazan na slici 67. Započinje tako da se na kalup premazan tvarima za lakše odvajanje, najprije kistom nanosi sloj smole spremne za polireakciju uz umreživanje, ali bez ojačavala i punila. Zatim se redom nanose slojevi staklenog mata ili tkanine natopljeni hladno smolom za umreživanje, a valjkom se istiskuje zrak zadržan između slojeva. Smola bez ojačavala i punila čini i završni sloj u debljini dovoljnoj da pokrije stakleno ojačanje. Tako se dobije slojevit izradak, laminat. Kalupi za ručno laminiranje otvoreni su i nastoje se graditi jednostavno i od jeftinog materijala, drva ili nekoga polimernog materijala, rjeđe od metala [30].

Materijali matrice u postupku ručnog dodirnog laminiranja mogu biti sve vrste smola, kao npr.: poliesterske, vinil-esterske, epoksidne, te fenolne smole. Mogu se koristiti svi tipovi vlakana (problemi se jedino mogu javiti u slučaju težih aramidnih vlakana koje je teže natopiti ručno) [30].



Slika 67. Ručno dodirno laminiranje [30]

Prednosti ručnog dodirnog postupka su: [30]

- vrlo jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme;
- malen trošak izrade alata;
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača;
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem,

- rad na sobnoj temperaturi,
- potreban mali radni prostor.

Nedostaci ručnog dodirnog postupka laminiranja su: [30]

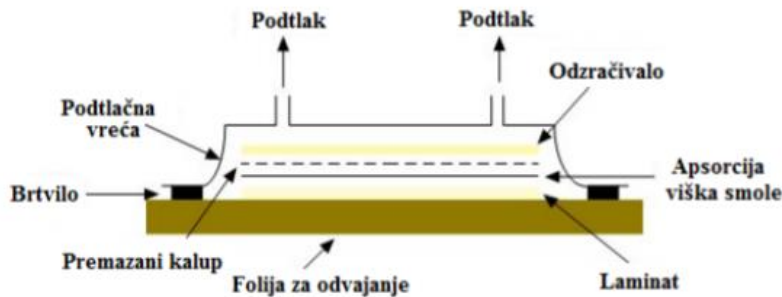
- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o radniku;
- teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina;
- smole obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetniji od proizvoda s većom molekularnom masom;
- ekološki nepovoljan postupak zbog isparavanja nevezanog sitiren-monomera;
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestera i vinil estera;
- moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva;
- nije moguće postići maksimalna mehanička svojstva;
- veliki udio rada u cijeni proizvoda.

Alati i pribor za rad su plosnati i okrugli kistovi od svinjske dlake, valjci od janječeg krzna, te metalni (Al) ili polietilenski valjci (roleri) za istiskivanje zraka, menzure ili pipete za doziranje katalizatora i ubrzavala, te polietilenske posude za preradu smjesa [30].

5.7.3. Podtlačno oblikovanje

Proizvodni postupak podtlačnog oblikovanja započinje ručnim slaganjem svih komponenata kompozita (smole i vlakana, odjeljivala, gelne prevlake) nakon čega se na njega stavlja polimerna folija (podtlačna vreća), kao što je prikazano na slici 68. Pomoću podtlačne pumpe uklanja se zrak iz unutrašnjosti zatvorenog kalupa, tj. ispod zaštitne vreće. Pomoću tog podtlaka u zatvorenome kalupu se poboljšava spajanje elemenata kompozita. Podtlačne vreće uvelike pridonose optimalnom odnosu smole i ojačavala (tj. uklanjaju višak smole), a rezultat toga je lakši i čvršći proizvod [30].

Kod podtlačnog oblikovanja najčešće se kao matrica koriste fenolne i epoksidne smole, zato što kod poliesterskih i vinil-esterskih smola problem može predstavljati povećana ekstrakcija stirena. Kao ojačavala mogu se koristiti sve vrste vlakana [30].



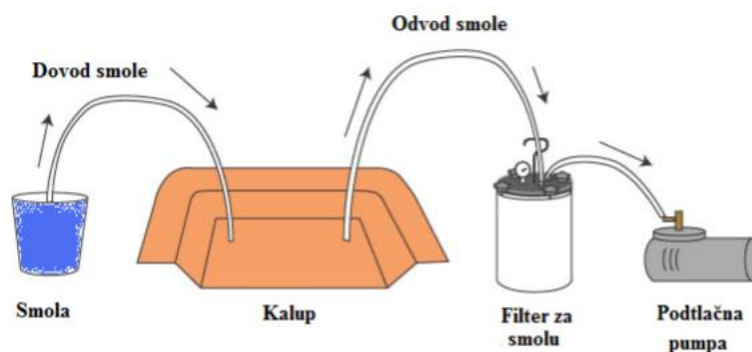
Slika 68. Podtlačno oblikovanje [30]

Glavni nedostaci podtlačnog oblikovanja je činjenica da je postupak nešto skuplji i zahtjeva prilično veliku vještinu operatera (vrlo bitno kod kontrole miješanja i udjela smole). Prednosti podtlačnog oblikovanja su: [30]

- proizvodnja kompozita s većim udjelom vlakana,
- manje pukotina u materijalu,
- bolje je vlaženje vlakana i protok smole kroz ojačavala zbog djelovanja povišenog tlaka,
- podtlačni pokrov smanjuje količinu ishlapljenih štetnih tvari tijekom skrućivanja.

5.7.4. Podtlačno ulijevanje

Postupak podtlačnog ulijevanja (VIP - engl. *Vacuum Infusion Process*) je postupak u kojemu se pomoću podtlaka smolu dovodi do laminata i višak smole odstranjuje iz kalupa. Ojačavalo je ručno položeno u kalup u kojemu je podtlak. Unutrašnjost klupa je sa cijevi spojena sa spremnikom u kojemu se nalazi smola (slika 69). Kada je podtlak u kalupu dovoljno visok, smola se dovodi kroz cijev u unutrašnjost kalupa do laminata. Višak smole se podtlakom pomoću podtlačne pumpe (0,8 bara do 0,9 bara) odstranjuje iz kalupa (slika 69) [30].



Slika 69. Pojednostavljeni prikaz postupka podtlačnog ulijevanja [30]

Postupak podtlačnog ulijevanja pruža niz poboljšanja u odnosu na tradicionalne postupke kao što su ručni dodirni postupak laminiranja i postupak štrcanja vlakana. Podtlačne vreće uvelike pridonose optimalnom odnosu smole i ojačavala a rezultat toga je lakši i čvršći proizvod [30].

Neke od bitnih prednosti postupka podtlačnog ulijevanja su: [30]

- optimalniji omjer smole i ojačavala
- manji utrošak smole (manja masa proizvoda)
- ujednačena raspodjela smole u laminatu
- trajanje procesa nije vremenski ograničeno
- zdraviji i čistiji proces (zatvoreni kalup)

5.7.5. Prednosti podtlačnog ulijevanja

Postupkom podtlačnog ulijevanja (VIP, engl. *Vacuum Infusion Process*) postiže se bolji omjer smole ojačavala nego kod običnog podtlačnog oblikovanja (eng. *Vacuum Bagging*). Uobičajeni ručni dodirni postupak laminiranja (eng. *hand lay-up*) rezultira velikim udjelom smole u kompozitnom proizvodu. Povoljan (optimalan) omjer smole i ojačavala u brodogradnji dobiven postupkom podtlačnog ulijevanja je 60 % smole i 40 % ojačavala. Nepovoljan omjer smole i ojačavala loše utječe na proizvod (npr. brod). Veći udio smole u kompozitnoj tvorevini (brodu) rezultira većom masom tvorevine, ali i lošijim mehaničkom karakteristikama (smanjena otpornost na lom). Veći udio smole u polimernom trupu broda rezultira slabijim manevarskim sposobnostima i većom potrošnjom goriva, zbog veće mase broda [30].

Podtlačnim oblikovanjem uklonjeni su neki nedostaci koji su karakteristični za ručni dodirni postupak laminiranja jer se podtlakom dio viška smole odstranjuje iz kalupa, a kalup je zatvoren što je također velika prednost (čišća metoda). Količina viška smole ovisi o vrsti smole i ojačala, vremenskom faktoru, itd. Postupak podtlačnog ulijevanja ima drugačiji pristup, smola se ulijeva pomoću podtlaka u zatvoreni kalup u kojemu su već postavljeni odvajalo, ojačavalo i gelna prevlaka. Višak smole u kalupu se odstranjuje podtlakom pomoću podtlačne pumpe. Podtlačno odstranjivanje viška smole rezultira minimalnim potrebnim udjelom smole u kompozitnoj tvorevini (optimalnim omjerom smole i ojačavala, 3/2), te samim time smanjenu masu tvorevine i povećanu čvrstoću. Standardni ručni dodirni postupak između ostalog ovisi i o ljudskom faktoru, dok postupak podtlačnog ulijevanja udio smole u kompozitnoj tvorevini je konstantno povoljan (optimalan) [30].

Vrlo važna prednost postupaka podtlačnog ulijevanja je vrijeme. Mnoge smole su ograničene s vremenom od 30 minuta do 2 sata koliko im treba da se stvrdnu nakon što su nanese u kalup. To vremensko ograničenje je iznimno nepogodno pri postupku podtlačnog oblikovanja, ako nastanu neki nepredviđeni problemi (npr. oštećenje zaštitne folije), nakon što je smola već dovedena u kalup. Takvi nepredviđeni problemi mogu rezultirati neravnomjernim nanašanjem ili viškom smole u kompozitnoj tvorevini, tj. škartom. Postupak podtlačnog ulijevanja omogućava neograničeno vrijeme trajanja procesa proizvodnje kompozitne tvorevine, a samim time ima svoje prednosti. Dode li do curenja smole iz kalupa, ili oštećenja cijevi za odstranjivanje viška smole podtlakom, postupak se privremeno može prekinuti da se uklone nepravilnosti bez utjecaja na kvalitetu proizvoda [30].

Od velike važnosti u postupku podtlačnog ulijevanja je i tzv. zatvoreni kalup koji omogućava čišći postupak koji je manje opasan za zdravlje radnika i ekološko je pogodniji od ručnog dodirnog laminiranja (otvoreni kalup). U postupku podtlačnog ulijevanja nema potrebe za dugim ručnim nanošenjem smole kistom ili valjkom, tako da su radnici zaštićeni od emisije stirena koja je štetna za zdravlje. Iako je kalup zatvoren potrebno je nositi zaštitnu masku i imati dobar ventilacijski sustav, jer dolazi do emisije para smole iz spremnika za smolu [30].

5.7.6. Nedostaci podtlačnog ulijevanja

Svaki proizvodni postupak ima svoje nedostatke. U postupku podtlačnog ulijevanja to su problemi koji se mogu dogoditi zbog ljudskog faktora, najčešće zbog nedovoljnog poznavanja tehnologije, te nepažnje ili nemara radnika. U postupku podtlačnog ulijevanja neke nepravilnosti u pripremi komponenata kompozitne tvorevine ili postavljanju podtlačne vreće (zaštitne folije) mogu uzrokovati značajnu štetu (škart i gubitak vremena). Posebno oprezno se mora postupati kada se ovim postupkom proizvod izrađuje prvi puta [30].

Pripreme za ovaj postupak relativno su složene. Potrebno je nanijeti odvajalo i gelna prevlaka, te postaviti pletivo ili tkaninu (staklena vlakna), cijevi za dovod i odvod smole podtlakom kao i nastavke tih cijevi s filterom, brtvilo i zaštitnu foliju. Za različite oblike kalupa cijevi se trebaju postavljati na različite načine da bi proizvod bio kvalitetan, što se ponekad treba naučiti tzv. postupkom „pokušaja i pogrešaka“. Cijevi i filtere treba kvalitetno postaviti prije zatvaranja kalupa zaštitnom folijom [30].

Za dobivanje optimalnog rasporeda cijevi, osim prethodnog iskustva u ovome postupku je ključna metoda „pokušaja i pogrešaka“. Zbog toga je vrlo važno imati na umu da će pri izradi nekog novog proizvoda vrlo vjerojatno nekoliko početnih proizvoda biti uništeno. Prethodnim iskustvom, pažljivim planiranjem i dokumentiranjem i razmatranjem tih propalih pokušaja će se sam njihov broj smanjiti na prihvatljivih 1 do 2 „pogrešna“ [30].

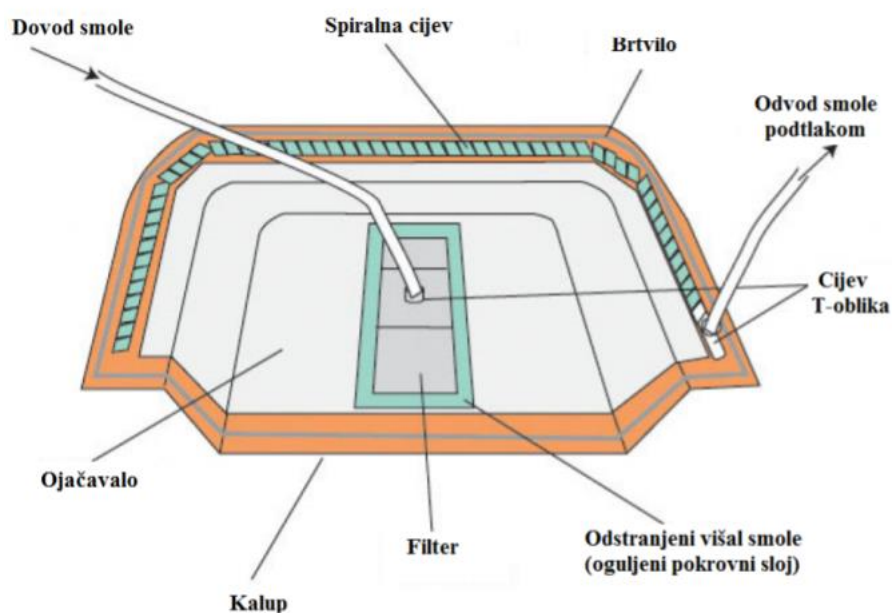
Ovisno o složenosti oblika će naravno ovisiti broj „pogrešaka“ (jednostavniji oblici često uspiju iz prvog pokušaja). Također je potrebno pratiti tok smole u kalupu i olakšati dotok smole na mjesta u kalupu gdje smola dolazi teže ili nikako. Čak i najmanja promjena u rasporedu cijevi može pridonijeti velikoj razlici u kvaliteti proizvoda. Za složene postupke proizvodnje preporučljivo je najmanje 6 mjeseci testiranja, pripreme i planiranja višeserijske proizvodnje. Za pokusne pokušaje se koriste jeftiniji materijali i manje količine materijala [30].

5.7.7. Priprema za postupak podtlačnog ulijevanja

Kod pokusnih pokušaja postupkom podtlačnog ulijevanja potrebno je dobro proučiti kako ta tehnologija funkcionira, te kako se komponente kompozitnog polimera ponašaju tijekom postupka proizvodnje.

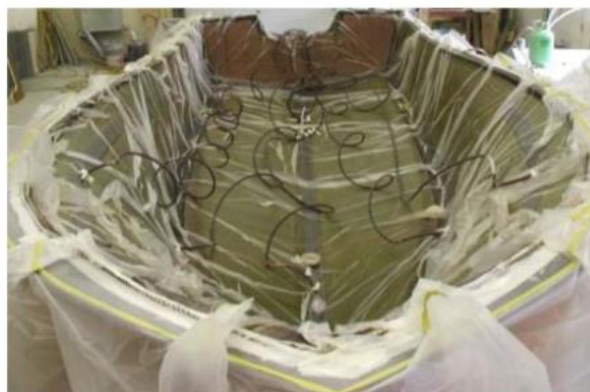
Potrebno je imati na umu da je izrada svakog proizvoda jedinstvena i često je za svaki proizvod potreban drugačiji pristup iako prijašnja iskustva mogu pomoći [30].

U nastavku je opisan pojednostavljen postupak sa samo jednom cijevi za dovod smole u središte kalupa (slika 70). Višak smole se odstranjuje iz kalupa kroz cijev uz pomoć podtlačne pumpe. Na slici 70. prikazan je postupak podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom. [30]



Slika 70. Postupak podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom [30]

U praksi se zbog velike površine kalupa i složenijih oblika koristi više cijevi za dovod smole u kalup, a njihov raspored na zaštitnoj foliji je planiran kako bi se omogućilo jednoliko dovodenje smole do svakog dijela kalupa (slika 71.), jer u suprotnome može vrlo lagano doći do nepravilnosti u procesu tj. škarta [30].



Slika 71. Prikaz raspodjele cjevčica za dovod smole pri izradi trupa broda [30]

Redoslijed radnji koje se trebaju obaviti u postupku podtlačnog ulijevanja: [30]

- Priprema kalupa – izbor ojačavala, odvajala i gelne prevlake, te medija za olakšavanje tečenja
- Cijevi za dovod i odvod smole – određivanje njihovog rasporeda i postavljanje
- Zaštitna folija – postavljanje i onemogućavanje curenja smole i zraka (zatvoreni kalup)
- Podtlačna pumpa – povezivanje kalupa sa pumpom pomoću cijevi i određivanje tlaka
- Priprema za ulijevanje – izbor smole i spajanje spremnika smole i kalupa pomoći cijevi
- Ulijevanje smole – dodavanje ubrzavala u smolu (po potrebi)
- Eksperimentiranje i poboljšavanje

5.8. ODRŽAVANJE

Gelna prevlaka je poliesterska smola specijalno namijenjena za izradu završnog sloja, koji služi za površinsku zaštitu materijala. Gelna prevlaka je tanki nearmirani sloj koji prekriva laminat s vanjske strane, štiti ga od korozije i istovremeno osigurava zadovoljavajući estetski izgled. Može se bojati (pigmentirati) tako da se proizvod ne treba lakirati. Dodaje mu se 6 % do 10 % boje. Debljina premaza ručnim postupkom (kistom) je 0,4 mm do 0,8 mm, a potrošak smole je 400 g/m² do 700 g/m² [30].

Posjeduje svojstva kao što su: dobra elastičnost i postojanost na apsorpciju vode i agresivne medije, postojanost na UV zračenje i dobar sjaj. Brzina otvrdnjavanja gelne

prevlake ovisi o temperaturi okoline i relativne vlažnosti u prostoriji. Temperatura radnog prostora mora biti od 16 °C do 25 °C, a relativna vlažnost u prostoriji ne smije prelaziti 66 % [30].

Korištenjem gelne prevlake postiže se: [30]

- manji sjaj površine kompozitne tvorevine (slabije uočljive ogrebotine),
- mekša poliesterska smola omogućava lakše poliranje,
- ravna površinu za bojanje (nije potrebno dodatno kitanje tako da je snižena cijena bojanja kao i vremenski period bojanja),
- lako su dostupni kitovi za popravljjanje gelne prevlake (povoljnija cijena).

5.9. ZBRINJAVANJE NA KRAJU ŽIVOTNOG VIJEKA

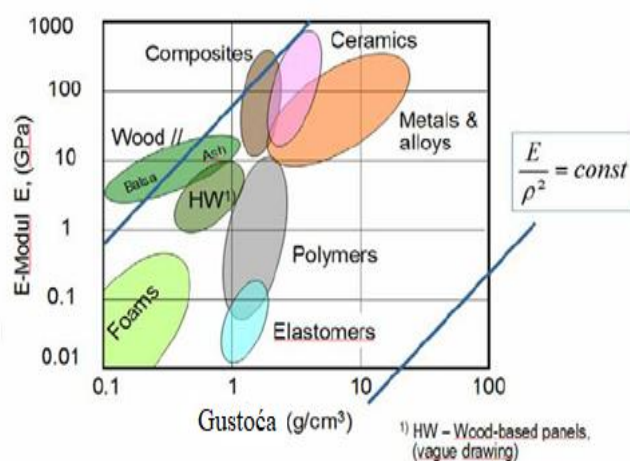
5.9.1. Recikliranje kompozitnih materijala na primjeru stakloplastike

Recikliranje kompozita je teško, jer se oni obično sastoje od dviju ili više komponenata (punilo, vlakna, smola itd.). Recikliranje termo kompozita je poseban izazov s obzirom da kada se jednom molekule termo matrice povežu, materijal koji nastane se ne može više rastopiti ili remodelirati. Zbog toga što se termo kompoziti, koji u sebi imaju poliestar i epoksi smolu, ne mogu dekompozirati na originalne sastojke, obično završe na odlagalištu i pošto su njihove komponente bionerazgradive, cijena takvog odlaganja je vrlo visoka. Predloženo je puno tehnologija za recikliranje termo kompozita. U osnovi, mogu se klasificirati u tri kategorije: [23]

- Mehaničko usitnjavanje je temeljni postupak kojim se dobije određena veličina čestica. Mljevenje je postupak u kojem se materijal drobi na istu duljinu vlakana te se takav dobiveni materijal može ponovno koristiti kao ojačanje u proizvodnji brodova od stakloplastike, stolova, ograda, autodijelova, itd.
- Termalni procesi
- Izgaranje i korištenje proizvedene topline,
- Piroliza (kemijska razgradnja organske tvari zagrijavanjem na visokoj temperaturi bez prisutnosti kisika),
- Fluidizirani sloj za toplinske procese za oporabu kompozita od ojačanja od vlakana
- Depolimerizacija kompozita.

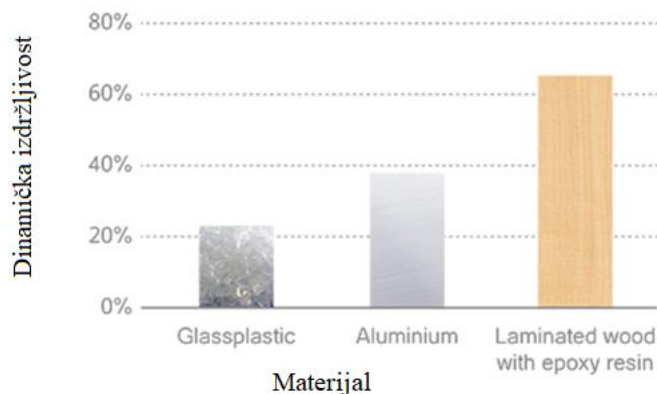
6. USPOREDBA MATERIJALA

Od materijala koji se koriste u brodogradnji zahtijeva se mala specifična težina, velika čvrstoća i žilavost, dobra obradivost, otpornost na koroziju, nezapaljivost, trajnost, nemagnetičnost i niska cijena. Naravno da niti jedan materijal ne posjeduje sve ove osobine, tako da se pri izboru materijala traži zadovoljavajući kompromis. Za materijale od kojih se grade vitalni dijelovi broda klasifikacijska društva propisuju koja svojstva i kvalitetu trebaju imati. Ovi materijali moraju posjedovati garantirani kemijski sastav, čvrstoću, žilavost, granice istezanja i dr. Dobar parametar međusobne usporedbe brodograđevnih materijala je Youngov modul elastičnosti drva koji možemo vidjeti na slici ispod [2].



Slika 72. Youngov modul elastičnosti drva u usporedbi s drugim materijalima [2]

Drvo kao materijal ispred ostalih je najotpornije na tzv. zamor materijala. Zamor materijala jest smanjenje njegovih mehaničkih svojstava poglavito čvrstoće uslijed intenzivnih dinamičkih opterećenja. Brodska konstrukcija prilikom plovidbe je izložena neprestanim dinamičkim udarima vode i opterećenjima uslijed vlastite težine. To je posebno izraženo kod brzih motornih plovila. Ispitivanja su pokazala da su probni komadi različitih materijala izloženi dinamičkim opterećenjima od 1 000 000 ciklusa u vremenu od 30 sati trajno izgubili na svojoj čvrstoći i to možemo vidjeti na slici ispod [32].

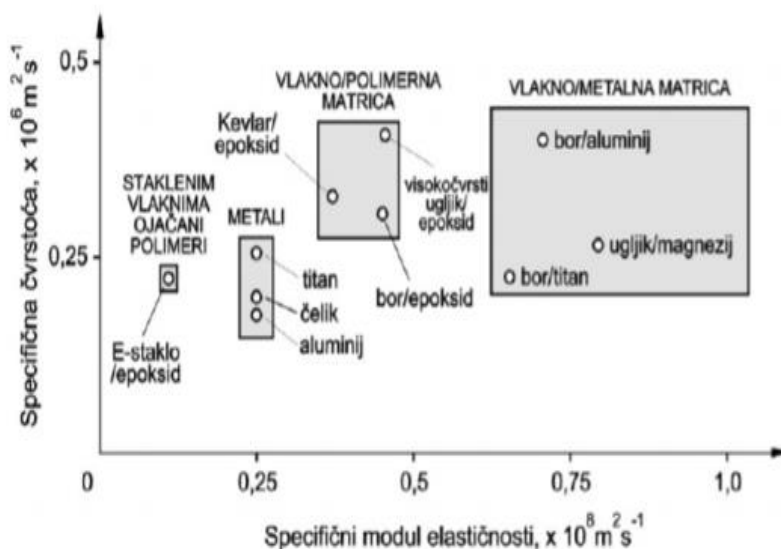


Slika 73. Različiti materijali izloženi dinamičkoj izdržljivosti [32]

Iz slike možemo zaključiti da pri ispitivanju materijala izloženim dinamičkim opterećenjima: [32]

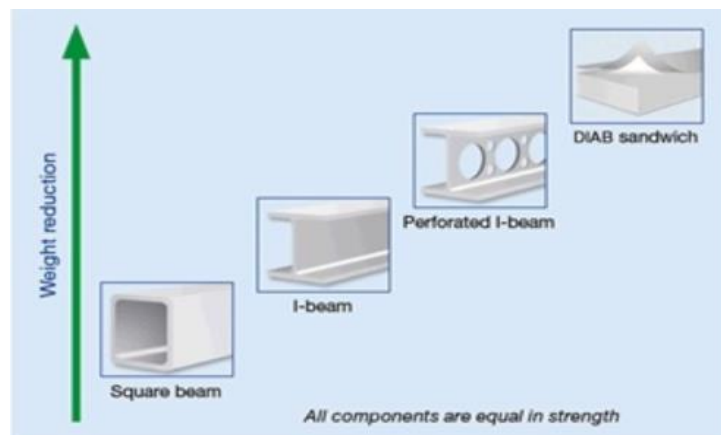
- Stakloplastika je zadržala samo 22 % svoje izvorne čvrstoće,
- Aluminium je zadržao 37 % svoje izvorne čvrstoće,
- Lamelirano drvo s epoksi smolom je zadržalo 64 % svoje izvorne čvrstoće.

Dalje na slici ispod možemo vidjeti usporedbu specifičnog modula elastičnosti i specifičnu čvrstoću pojedinih kompozita s metalima.



Slika 74. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [26]

Nešto što se može istaknuti je ušteda mase kod sendvič materijala koji su spomenuti u dijelu kompozitnih materijala. Na slici 75. se može vidjeti usporedba u uštedi mase s ostalim materijalima.



Slika 75. Ušteda mase kod sendvič dizajna je gotovo 90 % (ovaj primjer uspoređuje standardne materijale) [2]

Osim tehničkih zahtjeva funkcionalnosti, tehnoložnosti i eksploataбилnosti, pri izboru materijala nezavisno su prisutni i kriteriji ekonomičnosti. U tablici 31 je prikazana usporedba troškova i mehaničkih svojstava grafitnih kompozita, kompozita sa staklenim vlaknima, aluminijem i čelikom. Zbog raznolikosti grafitnih vlakana i smole dostupnih u brojnim kombinacijama, svojstva su navedena u rasponu [2].

Tablica 31. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava [9]

Svojstvo	Grafitni kompoziti (najviši razred)	Grafitni kompoziti (komercijalni razred)	Kompoziti sa staklenim vlaknima	Aluminij 6061 T-6	Čelik
Cijena, €/kg	40..500+	10..40	3..6	6	0.60
Čvrstoća, MPa	620..1380	345..620	138..241	241	414
Elastičnost, MPa	69×10^6 .. 345×10^6	55×10^6 .. 69×10^6	7×10^6 .. 10.5×10^6	69×10^6	210×10^6
Gustoća, g/cm ³	1.39	1.39	1.53	2.78	7.8
Spec. čvrstoća	446×10^6 .. 992×10^6	248×10^6 .. 446×10^6	90×10^6 .. 157×10^6	86×10^6	53×10^6
Specif. elastičnost	50×10^{-6} .. 248×10^{-6}	39×10^{-6} .. 50×10^{-6}	4.5×10^{-6} .. 6.7×10^{-6}	25×10^{-6}	27×10^{-6}
CTE, m/m/°C	-1.8×10^{-6} .. 1.8×10^{-6}	1.8×10^{-6} .. 3.6×10^{-6}	11×10^{-6} .. 14×10^{-6}	23×10^{-6}	12.6×10^{-6}

Osnovne osobine koje aluminij čine poželjnim materijalom za svakojačku primjenu su njegova specifična gustoća, čvrstoća, otpornost na koroziju, električna i toplinska vodljivost, trajnost, te mogućnost oblikovanja i reciklaže. Zahvaljujući takvim njegovim jedinstvenim odlikama, potražnja i primjena aluminija u svijetu neprestano raste, obuhvaćajući sve više novih područja primjene [5].

Postojanje informacija o raspoloživosti, mogućnostima nabave i cijenama materijala bitno doprinosi nalaženju najjeftinijih vrsta, oblika, stanja i dimenzija materijala za neku konstrukciju odnosno proizvod. Bez obzira na tehničku prikladnost materijala da ispuni određene kombinacije funkcionalnih, tehnoloških ili uporabnih svojstva, ako materijal nije raspoloživ u traženom obliku, stanju, dimenzijama, količini, roku dobave i cijeni, izbor nije uspješno obavljen. Cijena materijala dio je kriterija ekonomičnosti na temelju kojeg se provodi izbor materijala, a tijekom ili nakon konstrukcijskog i tehnološkog oblikovanja izračunavaju troškovi izrade proizvoda. Osnovna cijena materijala kao i troškovi koji nastaju primjenom određene vrste, u odnosu na drugu alternativnu vrstu, uz tehničke kriterije određuju konkurentnost proizvoda na tržištu [2].

7. ZAKLJUČAK

Od materijala koji se danas koriste u brodogradnji zahtjeva se mala specifična težina, velika čvrstoća i žilavost, dobra obradivost, otpornost na koroziju, nezapaljivost, trajnost, nemagnetičnost, niska cijena i adekvatno ekonomski isplativo recikliranje tih materijala. Naravno da jedan materijal ne posjeduje sve ove značajke, tako da se pri izboru materijala traži zadovoljavajući kompromis. Za materijale od kojih se grade vitalni dijelovi broda, klasifikacijska društva propisuju koje značajke i kvalitetu treba brodograđevni materijal garantirat. Rad se bavio općom sistematizacijom različitih brodograđevnih materijala i njihovih karakteristika i kao cilj napravljen je kratki unificirani pregled najvažnijih brodograđevnih materijala koji može poslužiti kao jednostavna skripta za studente tehničkih fakulteta i ostale.

Kako bi se osigurala izrada kvalitetnog proizvoda sa potrebnim mehaničkim i uporabnim svojstvima, potrebno je unaprijed isplanirati cijeli proizvodni postupak. U slučaju kompozita koji je najzanimljiviji materijal današnje male brodogradnje, na temelju ispitivanja potrebno je odrediti količinu potrebne smole, vrstu smole, vrstu ojačavala, broj slojeva ojačavala, iznos podtlaka u postupku podtlačnog ulijevanja, vrijeme potrebno za skrućivanje polimerne tvorevine, vrstu i debljinu jezgre u sendvič konstrukciji dok za neke druge materijala druga svojstva kao npr. vlažnost za drvo, vrstu „morskog“ aluminijsa ovisno o namjeni ili tehnološki postupak obrade čelika prije samog varenja sekcija broda. Postoje razne varijante od planiranja, izbora i kombiniranja materijala i tehnologije pa na kraju i samog recikliranja, koje su ostavljene na izbor proizvođaču a poslije korisniku tog proizvoda.

U ni jednom dijelu rada se ne može pronaći „favoriziran“ materijal jer ljepotu i plemenitost drva nitko ne može zamijeniti i obrnuto sa čvrstoćom čelika i održavanjem aluminijsa ili težinom i performansama kompozita. Svaki materijal je za sebe specifičan i ima svoje prednosti i nedostatke ovisno o vrsti i namjeni korištenja.

LITERATURA

- [1] Čudina, P.: *Nova metodologija projektiranja trgovačkih brodova*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/1093/1/12_10_2010_Doktorat-print.pdf, (2.3.2019.)
- [2] Deranja, G.: *Materijali u brodogradnji*, Politehnika Pula - Visoka tehničko-poslovna škola, Pula, prosinac 2014.
URL: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/politehnikapu:32/preview>, (1.2.2019.)
- [3] Duboković, M.: *Analiza ponašanja konstrukcije od drva metodom konačnih elemenata*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
URL: repozitorij.fsb.hr/4579/1/Dubokovic_2015_Diplomski.pdf, (6.3.2019.)
- [4] Jagar, M.: *Kompoziti s plastomernom matricom ojačanom vlaknima*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/9192/1/Jagar_2019_zavr%C5%A1ni_preddiplomski.pdf, (10.3.2019.)
- [5] Jakovljević, M.: *O proizvodnji aluminijske*,
URL: <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/>, (6.3.2019.)
- [6] Juraga, I.: *Zaštita brodskoga trupa od korozije i obraštanja*, Brodogradnja, Vol. 58, No. 3, 2007., str. 278-283
https://www.academia.edu/30966234/Za%C5%A1tita_brodskoga_trupa_od_korozije_i_obra%C5%A1tanja_Protecting_the_Ships_Hull_Against_Corrosion_and_Fouling, (3.3.2019.)
- [7] Jurišić, P.: *Utjecaj starenja na graničnu čvrstoću brodskog trupa*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/2081/1/06_12_2012_paul_jurisc_disertacija.pdf, (2.3.2019.)
- [8] *Konstruktivski čelik*, 4. srpnja 2015.
URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstruktivski_%C4%8Delik, (15.2.2019.)
- [9] Krizbergs, J.; Gutakovskis, V.: *Kompozitni materijali*, 2016.
URL: <https://www.hup.hr/EasyEdit/UserFiles/.../Kompozitni%20materijali.docx>, (15.3.2019.)

- [10] Krolo, J.: *Postupci recikliranja metalnog otpada u čvrstom agregatnom stanju*, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, svibanj 2018.
URL: https://data.fesb.unist.hr/public/news/Kvalifikacijski%20rad_Krolo- cea4228354.pdf, (6.3.2019.)
- [11] Kužnar, M.: *Ovisnost rasteznih svojstava poliestera ojačanog staklenim vlaknima o tipu ispitnih tijela i smjeru opterećenja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
URL: <http://repozitorij.fsb.hr/8883/1/zavr%C5%A1na%20verzija-output%281%29-merged.pdf>, (12.3.2019.)
- [12] Ljubičić, P.; Kodvanj, J.; Ljubenkov, B.: *Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika pri niskim temperaturama*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
https://www.academia.edu/30078564/MEHANI%C4%8CKA_SVOJSTVA_NEHR%C4%90AJU%C4%86EG_%C4%8CELIKA_PRI_NISKIM_TEMPERATURAMA_MECHANICAL_CHARACTERISTICS_OF_THE_STAINLESS_STEEL_AT_SUB-ZERO_TEMPERATURES, (5.3.2019.)
- [13] Mandić, D.: *Utjecaj uvjeta ispitivanja na žilavost kompozita*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/277/1/30_06_2008_Mandic_zavrzni_rad.pdf, (11.3.2019.)
- [14] Manev, S.: *Proizvodnja brodske sekcije i optimizacija procesa*, Politehnika Pula - Visoka tehničko-poslovna škola, Pula, 2017.
URL: <https://repozitorij.politehnika-pula.hr/islandora/object/politehnikapu:95/preview>, (20.2.2019.)
- [15] Matošević, T.: *Primjena polimernih kompozita u izradi dijela HALE letjelice*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
http://repozitorij.fsb.hr/7967/1/Mato%C5%A1evi%C4%87_2017_zavr%C5%A1ni.pdf, (12.3.2019.)
- [16] Mihaljević, T.: *Mehanička svojstva kompozita s polimernom matricom*, Veleučilište u Karlovcu, 2015.
URL: <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A102/datastream/PDF/view>, (11.3.2019.)
- [17] Mišina, N.; Oršulić, M.; Polajnar, I.: *Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji*, Naše more, Vol. 50, No. 5-6, 2003., str. 174-180
URL: <https://hrcak.srce.hr/file/13040>, (20.2.2019.)

- [18] Prestint, D.: *Rezališta brodova*, 1.5.2017.
URL: https://www.burzanautike.com/hr/rezalista_brodova/4531/57, (1.4.2019.)
- [19] <https://econ243.academic.wlu.edu/2015/11/20/upstream-steel-where-does-scrap-metal-come-from/>, (5.3.2019.)
- [20] Primorac, I.: *Jarosit kao punilo za kompozite na bazi poliesterske smole*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/4568/1/PRIMORAC_DIPLOMSK%20RAD.pdf, (10.3.2019.)
- [21] Rede, V.: *Repetitorij 2.*,
URL: <https://www.scribd.com/presentation/361078897/1383141195-0-repetitorij2-im>, (1.3.2019.)
- [22] Sejdinović, B.: *Korozija aluminija u vodi*, Zbornik radova: TECHNO-EDUCA, Zenica, 2012.
URL: <https://www.scribd.com/document/364133963/Zbornik-radova-2012-finalno-pdf>, (8.3.2019.)
- [23] Strupar, L.: *Recikliranje stakloplastike*, Geotehnički fakultet, Varaždin, 2016.
<https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A194/datastream/PDF/view>, (16.3.2019.)
- [24] Šundrica, J.: *Znanost i tehnologija materijala s osvrtom na primjenu*, Naše more, Vol. 51 No. 3-4, 2004., str. 105-120
URL: <https://hrcak.srce.hr/file/12847>, (1.3.2019.)
- [25] Tarandek, Ž.: *Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
URL: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/18_05_2011_14837_2011-05-02-MAG-Zeljko_Tarandek.pdf, (6.3.2019.)
- [26] Tomašić, D.: *Primjena kompozitnih tvorevina u zrakoplovnoj industriji*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/1318/1/20_05_2011_Danijel_Tomasic_-_Diplomski_rad_-_PDF_-_600_dpi.pdf, (13.3.2019.)
- [27] Trupina, I.: *Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/7789/1/Trupina_2017_diplomski.pdf, (8.3.2019.)

- [28] Ugrin, L.: *Dobivanje, svojstva i upotreba čelika*, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split, rujan 2016.
URL: <https://repozitorij.ktf-split.hr/islandora/object/ktfst:189/preview>, (15.2.2019)
- [29] Vidović, Lj.: *Inspekcija, održavanje i primjena premaza na brodovima*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2018.
URL: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfst%3A437/datastream/PDF/view>, (4.3.2019.)
- [30] Vlahović, M.: *Proizvodnja kompozitnih tvorevina centrifugalnim lijevanjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
URL: http://repozitorij.fsb.hr/948/1/13_05_2010_Marin_Vlahovic_-_DIPLOMSKI_RAD.pdf, (5.2.2019.)
- [31] Živković, D.; Anzulović, B.; Delić, D.: *Utjecaj morske korozije na kugličareni sloj aluminijske slitine*, Naše more, Vol. 52, No. 5-6, 2005., str. 206-213
URL: <https://hrcak.srce.hr/file/12530>, (4.3.2019.)
- [32] <http://www.enavigo.hr/hr/wooden-boats/why-wood/>, (17.3.2019.)
- [33] <http://www.eurofer.org/Sustainable%20Steel/Steel%20Recycling.fhtml>, (5.3.2019.)
- [34] <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/trgovbrod/6materijali.pdf>, (20.2.2019.)
- [35] <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/kbuu458hrnv/poglavlje6/p62.htm>, (15.3.2019.)
- [36] <https://www.highlandhardwoods.com/flooring/resources/hardness-and-stability-chart/>, (8.3.2019.)
- [37] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf, (7.3.2019.)
- [38] <https://varmetaltuksar.hr/aluminij/>, (6.3.2019.)
- [39] <http://www.zavarivanje.info/cd/3563/zavarivanje-aluminija-literatura>, (6.3.2019.)
- [40] tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/drvo.pdf, (7.3.2019.)

POPIS TABLICA I GRAFOVA

Tablica 1. Mehanička svojstva brodograđevnog čelika normalne čvrstoće	7
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika povećane čvrstoće	9
Tablica 3. Čelici primjenjivi na niskim temperaturama	11
Tablica 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama	12
Tablica 5. Fizikalna svojstva Al	29
Tablica 6. Neke od Al legura iz serije 5000	33
Tablica 7. Fizikalna svojstva Aluminijske slitine 5083.....	34
Tablica 8. Kemijski sastav „morskog“ aluminija 5083	34
Tablica 9. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu 0,2 – 6,3 mm (O/H111)	35
Tablica 10. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu 0.2 – 6.3 mm (H32)	35
Tablica 11. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu 6.3 – 80 mm (O/H111)	35
Tablica 12. Mehanička svojstva Aluminijske slitine 5083 za definiranu debljinu 80 – 120 mm (O/H111)	36
Tablica 13. Kemijski sastav Aluminijskih legura (postotna masa)	38
Tablica 14. Koeficijent kvalitete drva u odnosu na čelik	53
Tablica 15. Gustoća domaćih vrsta (12 – 15% vlažnosti)	54
Tablica 16. Modul elastičnosti različitih vrsta brodograđevnog drva	57
Tablica 17. Prikaz vrijednosti udarnog loma.....	59
Tablica 18. Prikazane vrijednosti tvrdoće drva	60
Tablica 19. Koeficijenti varijacije vrijednosti mehaničkih svojstava.....	61
Tablica 20. Tipovi stakla i nazivna svojstva	86
Tablica 21. Mehaničke osobine laminata s matom od sječenih strukova.....	88
Tablica 22. Minimalne osobine laminata od mata uz 30 % težinskog sadržaja stakla i uz primjenu smole za laminiranje.....	88
Tablica 23. Pregled svojstva staklenih vlakana u odnosu na biljna vlakna.....	89
Tablica 24. Mehaničke osobine kevlara u usporedbi s drugim vlaknima	90

Tablica 25. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava višeg i nižeg razreda grafitinih kompozita (sa smolom).....	91
Tablica 26. Mehanička svojstva materijala matrice	97
Tablica 27. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole.....	98
Tablica 28. Svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole	99
Tablica 29. Svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole.....	99
Tablica 30. Usporedba cijena različitih vrsta kompozita	100
Tablica 31. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava	113

Dijagram 1. Fe-C dijagram stanja.....	3
Dijagram 2. Čvrstoća stvarnih i idealiziranih elastičnih potpuno-plastičnih materijala ($\sigma - \varepsilon$ dijagram)	5
Dijagram 3. Usporedni dijagram ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na niskim temperaturama	12
Dijagram 4. Cijena aluminija u periodu od 2002.-2019. godine	39
Dijagram 5. Proces proizvodnje aluminija	40
Dijagram 6. "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita.....	78

POPIS SLIKA

Slika 1. Ispitivanje udarne radnje loma	6
Slika 2. Razlike između Brinell, Vickers i Rockwell postupka ispitivanja tvrdoće	7
Slika 3. Pojava puzanja pri visokim temperaturama	10
Slika 4. Promjena dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika povišenjem temperature	10
Slika 5. Kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima od 2001. godine do danas – svjetsko tržište	14
Slika 6. VD postupak (vakumiranje lonca): a) elektromagnetsko miješanje taline u loncu, b) miješanje inertnim plinom (Ar).....	15
Slika 7. Mehanička dizalica, hidraulična pumpa, ručna lančana dizalica	16
Slika 8. Postupak rezanja.....	16
Slika 9. Pribor i boce sa plinom i kisikom za plinski rezač.....	17
Slika 10. Aparat za zavarivanje MIG postupkom (gore lijevo) i postupak zavarivanja čelične cijevi (gore desno).....	17
Slika 11. Zavarivanje pomoću automatskog MIG aparata za zavarivanje kojim se pojednostavljuje postupak zavarivanja dugih ravnih profila.....	18
Slika 12. Sredstva potrebna za transport u radioni za predmontažu.....	19
Slika 13. Plan transporta u brodogradilištu	20
Slika 14. Kombinira različitih tehnologija zaštite – kormilo broda	21
Slika 15. Obraštaj podvodnog dijela brodskog trupa	23
Slika 16. Obraslo dno plutajuće platforme	23
Slika 17. Proces recikliranja čelika.....	24
Slika 18. Stopa rasta recikliranja čelika.....	25
Slika 19. Rezanje sekcija na plaži u Bangladešu.....	26
Slika 20. Zavareni aluminijski trup s nadgrađem	28
Slika 21. Hladnom deformacijom povećava se čvrstoća.....	30
Slika 22. Legiranjem se može povećati čvrstoća.....	31
Slika 23. Mehanička svojstva nekih Al slitina	32
Slika 24. Krivulja naprezanja – deformacije za Aluminijsku slitinu 5083.....	37
Slika 25. Proces zavarivanja aluminija u zatvorenom prostoru.....	41
Slika 26. Postupak zavarivanja TIG postupkom (tanki limovi)	43
Slika 27. Zavarivanje trupa broda MIG postupkom (deblji limovi).....	44

Slika 28. Na mjestu zone taljenja i u zoni utjecaja topline je najniža čvrstoća	46
Slika 29. Ukupna proizvodnja aluminija	49
Slika 30. Mehanička svojstva reciklirane Al slitine 5083 sa drugim uzorcima iste te slitine	49
Slika 31. Faze recikliranja aluminijskog otpada.....	50
Slika 32. Raspored konstrukcije trupa s unutrašnje strane trupa.....	51
Slika 33. Konstrukcija drvenog broda	52
Slika 34. Primjer vrste drva: a) poprečni presjek, b) radijalni presjek, c) tangencijalni presjek.....	56
Slika 35. Prikaz općeg postupka određivanja modula elastičnosti.....	56
Slika 36. Prikaz metode određivanja tvrdoće drva	60
Slika 37. Tvrdoće raznih vrsta drva.....	61
Slika 38. Stanište hrasta lužnjaka u Spačvanskoj šumi	63
Slika 39. Spoj drva s drvenim klinom	64
Slika 40. Drveni možanici	64
Slika 41. Prikaz lamelarnih spojeva	65
Slika 42. Geometrijski izveden spoj	65
Slika 43. Primjer klinker gradnje.....	66
Slika 44. Primjer karvel gradnje	67
Slika 45. Usporedba klinker (a) i karvel (b) tipa gradnje	67
Slika 46. Osnovni tradicionalni alati za drvenu brodogradnju	69
Slika 47. Jedna od faza brtvljena drvene konstrukcije po West sistemu (zaštita epoksidnom smolom) drvene gradnje	70
Slika 48. Zbrinjavanje na kraju životnog vijeka.....	71
Slika 49. Tradicionalni način spaljivanja drvenog broda	71
Slika 50. Kompozitna konstrukcija brodskog trupa	72
Slika 51. Usporedba osnovnih tipova kompozita: (a) kompoziti s česticama, (b) kompoziti s vlaknima, (c) slojeviti kompoziti	74
Slika 52. Ovisnost omjera "granica tečenja kompozita-granica tečenja matrice" o promjeru čestica - d_p , te omjeru l/d_f - duljina vlakana/promjer vlakana.....	75
Slika 53. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna	76
Slika 54. Primjeri tvornički različito pletenih vlakana.....	77

Slika 55. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na kao primjer Ti-leguru ojačanu vlaknima bora.....	79
Slika 56. Svojstva vlakana: (a) krivulja "naprezanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana	80
Slika 57. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjih saća.....	83
Slika 58. S istom silom savijanja, uštede u težini kod sendvič dizajna su skoro 90 %	84
Slika 59. Strukovi staklenog vlakna	86
Slika 60. Stakleni mat 400 g/m ²	87
Slika 61. Aramidna vlakna (Kevlar).....	89
Slika 62. Ugljikova vlakna	91
Slika 63. Model jedrlice sa karbonskim trupom	92
Slika 64. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita.....	95
Slika 65. Laminantna struktura kompozita.....	101
Slika 66. Proizvodnja kompozita laminiranjem	101
Slika 67. Ručno dodirno laminiranje.....	102
Slika 68. Podtlačno oblikovanje	104
Slika 69. Pojednostavljeni prikaz postupka podtlačnog ulijevanja	105
Slika 70. Postupak podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom.....	108
Slika 71. Prikaz raspodjele cjevčica za dovod smole pri izradi trupa broda	109
Slika 72. Youngov modul elastičnosti drva u usporedbi s drugim materijalima.....	111
Slika 73. Različiti materijali izloženi dinamičkoj izdržljivosti	112
Slika 74. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita.....	112
Slika 75. Ušteda mase kod sendvič dizajna je gotovo 90 % (ovaj primjer uspoređuje standardne materijale).....	113

POPIS KRATICA

EEP	elektrolučno zavarivanje pod praškom
FCC (engl. <i>face-centered cubic lattice</i>)	plošno centrirana kubna rešetka
FRP (engl. <i>Fiber Reinforced Polymer</i>)	polimerni materijali ojačani vlaknima
GTT (engl. <i>glass transition temperature</i>)	temperatura prelaska u kruto stanje
MAG (engl. <i>Metal Active Gas</i>)	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
MIG (engl. <i>Metal Inert Gas</i>)	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina
MMA (engl. <i>Manual Metal Arc Welding</i>)	ručno elektrolučno zavarivanje
MMC (engl. <i>Metal Matrix Composites</i>)	kompoziti s metalnom matricom
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
SPS (engl. <i>Spark Plasma Sintering</i>)	sinteriranje iskrenjem plazme
SPD (engl. <i>Severe Plastic Deformation</i>)	recikliranje primjenom velike plastične deformacije
VCI (engl. <i>Volatile Corrosion Inhibitors</i>)	hlapljivi inhibitori korozije
VIP (engl. <i>Vacuum Infusion Process</i>)	postupak podtlačnog ulijevanja
VOV	volumni omjer vlakana naspram smole

PRILOG

Slika 2.

engl. indenter

engl. side view

engl. top view

engl. load

engl. hardness number

engl. diamond pyramid

engl. steel or tungsten-carbide ball

engl. diamond cone

engl. diameter steel ball

oblik udubljenja

pogled sa strane

pogled odozgo

težina

veličina tvrdoće

oblik piramide od dijamanta

zakaljena čelična kuglica

oblik konusa od dijamanta

promjer čelične kuglice

Slika 17.

engl. raw material extraction

engl. steel production

engl. manufacturing

engl. re-use and remanufacturing

engl. scrap collection and preparation

engl. use phase

engl. post consumer scrap

engl. pre consumer scrap

vađenje sirovine

proizvodnja čelika

proizvodnja

ponovna upotreba i prerada

skupljanje otpada i priprema

upotrebna faza

otpad potrošača poslije

otpad potrošača prije

Tablica 7.

engl. property

engl. value

engl. density

engl. melting point

engl. modulus of elasticity

engl. electrical resistivity

engl. thermal conductivity

engl. thermal expansion

svojstva

vrijednosti

gustoća

točka taljenja

modul elastičnosti

električni otpor

toplinska vodljivost

toplinska ekspanzija

Tablica 8.*engl. element*

element

engl. % present

postotak

Tablica 9.,10.,11.,12.*engl. sheet*

lim

engl. thick

debljina

engl. property

svojstvo

Slika 24.*engl. yield point*

točka popuštanja

engl. ship steel plate

čelična oplata broda

engl. aluminium marine alloy

morska aluminijska slitina

engl. offset

odstupanje

engl. reinforced polyester laminates with grain

ojačani poliesterski laminati sa č.

engl. ultimate tensile stress

konačno naprezanje

engl. stress

naprezanje

engl. inch elongation per inch of length

produljenje po duljini

Tablica 13.*engl. alloy*

slitina

Slika 30.*engl. alloy*

slitina

engl. as-received specimen

novi uzorak

engl. solid recycled specimen

kruti reciklirani uzorak

engl. virgin extruded specimen

novi ekstrudirani uzorak

engl. ultimate tensile strenght

kranja vlačna čvrstoća

engl. proof stress

površinsko naprezanje

engl. elongation to failure

produljenje do loma

Slika 58.*engl. sandwich*

sendvič konstrukcija

engl. weight

težina

engl. deflection
engl. safety factor

izvijanje
faktor sigurnosti

Slika 72.

engl. composites
engl. ceramics
engl. wood
engl. balsa
engl. metal & alloys
engl. polymers
engl. foams
engl. elastomer

kompoziti
keramika
drvo
balsa
metali i slitine
polimeri
pjena
elastomeri

Slika 73.

engl. glassplastic
engl. aluminium
engl. laminated wood with epoxy resin

stakloplastika
aluminij
laminirano drvo s epoksidnom smolom

Slika 75.

engl. square beam
engl. I-beam
engl. perforated I-beam
engl. DIAB sandwich
engl. all components are equal in strenght
engl. weight reduction

kvadratna greda
I greda
modificirana I greda
sendvič konstrukcija
sve komponente su jednake u čvrstoći
smanjenje težine