

Les in letala

avtor **Stane GRČAR**

V prispevku je prikazan kratek kronološki pregled lesenih letal in nekatere njihove konstrukcijske tehnološke značilnosti. Pionirskim graditeljem letal je bil prav les glavno gradivo. Njegove edinstvene lastnosti dokazujeta poleg vseh drugih eno največjih vodnih letal ter slavno angleško leseno bojno letalo iz druge svetovne vojne.

Narava je v milijonih let evolucije ustvarila fantastično tvorivo, ki ga imenujemo – les. Ko povprečen človek vidi sliko lesnega prereza povečano z elektronskim mikroskopom nekaj stotisoč ali celo milijonkrat vsakdo ostrmi, saj si niti v najbujnejši domišljiji ne zmoremo predstavljati nekaj tako čudovitega. Pravljičica o čudežni deželi Alice je le blede odsev zgradbe lesa ...

Drevesa so se pojavila na našem planetu že v paleozoiku pred nekako šeststo milijoni let. Arheologi so posamezne dobe prazgodovine poimenovali po glavnih gradivih: kamena, bronasta, železna doba. O vseh teh gradivih so se ohranili fosilni artefakti. Človekova lesena orodja se iz znanih bioloških razlogov niso mogla ohraniti, zato raziskovalci niso pred kameno dobo uvrstili tudi "lesene dobe", čeprav so jih že hominidi zanesljivo uporabljali. V dokaz so opazovanja današnjih primatov.

Dandanes gozdovi pokrivajo dokajšen del kopne zemlje v zmernem in tropskem pasu. Drevesa in les srečujejo na

vsakem koraku vsa živa bitja. Nedvomno so si naši davni predniki hominidi izdelovali lesena orodja. Med prvimi izdelovalci lesenih orodij je bil bržčas Homo Habilis. Dandanes les uporabljamo za brezštevne namene v vsakodnevnem rabi in tehnologiji.

Gradiva in njihove lastnosti

Glavne zahteve, ki jih postavljajo konstrukterji letal na gradiva so:

- mala masa v primerjavi s trdnostjo,
- zadostna trdnost,
- sprejemljive deformacije pri obremenitvah,
- odpornost na vplive okolja,
- primernost za spajanje,
- primernost za preoblikovanje.

Trdnost, elastični modul in gostota gradiv

Posamezni deli strukture letala so obremenjeni na različne načine. Tako razlikujemo natezne, tlačne, strižne in površinske napetosti. Posebno značilne so strukture letal po razmerju dimenzij. Praviloma so dolžinske dimenzije bistveno večje od prečnih, kar pomeni, da imamo opraviti s problemi uklona in stabilnosti strukture. V teh izračunih je pomembna lastnost gradiva elastični modul. Pri klasičnih gradivih večinoma zadošča podatek o modulu za napetosti do meje plastičnosti. V drugih vejah strojništva vprašanja stabilnosti niso pogosta.

V preglednici 1 so podane bistvene statične lastnosti konstrukcijskih gradiv.

Iz preglednice 1 je razvidno, da les po raztržni dolžini prekaša konstrukcijska jekla in mnoga druga gradiva. Tu je razlog, da je bil in je še vedno pomembno gradivo za lahke konstrukcije.

NATEZNI ELEMENTI

Za primerjavo mase in trdnosti gradiv pri natezno obremenjenih elementih je najbolj nazorna **raztržna dolžina**. Definirana je kot dolžina palice vpete na zgornjem koncu in prosto viseče, pri kateri se zgoraj pretrga. Izraz je preprost:

Napetost tik pod vpetjem: $\sigma = L \rho g$
ali raztržna dolžina: $L = \sigma / \rho g$

Preglednica 1. Bistvene statične lastnosti konstrukcijskih gradiv

NAZIV	OZNAKA	TRDNOST	GOSTOTA	RAZTRŽNA DOLŽINA	ELASTIČNI MODUL
		N/mm ²	kg/m ³	km	N/mm ²
LES	SMREKA	70	600	11,7	10 000
JEKLO KONST.	St 60-2	650	7850	8,3	210 000
JEKLO VZM.	50CrV4	1550	7850	19,7	210 000
TITAN	Ti-15Mo-5Zr	1550	5060	31,2	105 000
ELEKTRON	MgAl ₂ Zn	275	1800	15,3	40 000
PERAL	AlMg5	340	2700	12,8	71 000
DURAL	AlCu ₄ SiMg	450	2700	17	72 000
STEKLO	VLAKNO	2200	2500	90	73 000
KEVLAR	VLAKNO	2600	1450	183	132 000
OGLJIK	VLAKNO	2800	2600	110	276 000

Pri čemer so:

g ... zemeljski pospešek	(9,81 m/s ²)
L ... dolžina palice	(m)
σ ... napetost ob vpetju	(N/m ²)
ρ ... gostota gradiva	(kg/m ³)

Iz enačb vidimo, da raztržna dolžina ni odvisna od prereza preskusne palice, kar je na prvi pogled presenetljivo. Iz preglednice razberemo da je les za letala ugodnejši od običajnih jekel.

Uklonski elementi

Kadar so prečne dimenzije elementov v primerjavi z vzdolžnimi precej manjše, je treba upoštevati elastično in plastično stabilnost. Strojniški zglede uklon palice, obremenjene na tlak. Kritična vrednost uklonske sile pri obojestranskem zglobnem vpetju je:

$$F_k = \pi^2 E I_{\min} / l_0^2$$

Pri čemer so:

I_{\min} ... najmanjši aksialni vztrajnostni moment prereza	
l_0 ... prosta uklonska dolžina	(m)

Od lastnosti gradiva je pri tej vrsti obremenitve pomemben le elastični modul. Analiza drugih uklonskih elementov in razmer v plastičnem območju zahteva mnogo bolj zapletene račune.

Strižni in torzijski elementi

Konstruktivski elementi letala imajo precej tankih ploščatih stojin, ki jih zunanje sile obremenjujejo s strižnimi napetostmi. Te računamo po enačbi:

$$\tau = Q / h \cdot d$$

τ ... strižna napetost v stojini	(N/m ²)
h ... višina stojine	(m)
Q ... prečna sila	(N)
d ... debelina stojine	(m)

Letalo ima tudi precej tenkostenskih torzijskih votlih elementov. Najpomembnejša je torzijska škatla krila. Strižno napetost v oplati računamo po znani preprosti BREDTOVI enačbi:

$$\tau = M / A \cdot d$$

τ ... strižna napetost v oplati	(N/m ²)
A ... površina znotraj konture oplate	(m ²)
d ... debelina oplate	(m)
M ... torzijski moment	(N/m)

Večino elementov letala je treba analizirati tudi prek uklonske meje, kar je bistveno bolj zapleteno.

Evolucija tehnologije gradiv

O tehnologiji gradiv je ogromno napisanega v strokovni literaturi. Tukaj podajam le kratek pregled.

Les je bil nedvomno eno najpomembnejših gradiv primernih za gradnjo letal vse do sredine dvajsetega stoletja. Vse njegove lastnosti je bilo mogoče še mnogo bolje uporabiti s pojavom kakovostnih sintetičnih lepil in zaščitnih premazov, ki so se pojavili v prvi tretjini dvajsetega stoletja. Pomen lesa za gradnjo letal je močno upadel s pojavom dveh lahkih kovin: aluminija in magnezija. Aluminijske zlitine z bakrom so najbolj trdne, a žal korozivno občutljive. Slaba lastnost magnezijevih zlitin je vnetljivost.

Kemijska tehnologija je v sredini dvajsetega stoletja ustvarila polimerna gradiva z mnogimi uporabnimi lastnostmi. Kompozitna gradnja s temi smolami in izjemno trdnimi vlakni (steklo, kevlar, ogljik) je odprla popolnoma nove možnosti v gradnji počasnejših podzvočnih letal. Med najpomembnejše štejemo izjemno natančno geometrijo in gladkost zunanjih površin. Oboje je pogoj za laminarno aerodinamiko.

Lesena letala

V tem prispevku prikazujem nekaj najzanimivejših lesenih letal, ki so se zapisala v svetovno zgodovino kot pomembni mejniki. Slovenci nismo zastajali, zato sledi pregled najuspešnejših naših in tujih letal.

Vsa letala v devetnajstem stoletju so gradili obrtniško pionirji amaterji iz

lesa, platna in nekaj malega kovin. Z njimi so poskušali leteti, žal neuspešno, včasih tudi tragično.

Lilienthal je v svojem drsalcu visel (slika 1). Njegov zmajček je bil ves lesen in prekrit z impregniranim platnom. Krmaril je s premikanjem telesa. Vzletal in pristajal je kar na nogah. Leta 1896 je pri poskusu novega drsalca strmoglavil in naslednjega dne umrl.

Sedemnajstega decembra leta 1903 je američanoma bratoma Orvillu in Wilburju Wrightu po številnih poskusih uspelo poleteti z njunim motornim letalom Flyer III. Njun podvig je končno dokazal, da letalo težje od zraka vendarle leti. Ta datum je zapisan v zgodovini kot začetek sodobnega letalstva.

Bratoma Orvillu in Wilburju Wrightu je po številnih poskusih 17. decembra 1903 uspelo poleteti z njunim motornim letalom FLYER I. Uspešen polet je trajal 59 sekund, letalo je preletelo 260 m. Letalo sta izdelala dobesedno s svojimi rokami.

Letalo je bilo dvokrilno z dvema propelerjema. Vzletalo je na tračnicah proti vetru. Pilot je ležal na spodnjem krilu. Imelo je smerno in višinsko krmilo, vendar je bilo brez krilc. Pilot je letalo nagibal z zvijanjem zunanijh delov kril.

Želje in zahteve graditeljev letal so narasčale, saj naj bi letalo služilo za prelete večjih razdalj in druge praktične namene. Motorji so postajali močnejši in zanesljivejši. Francozi so vodili v letalstvu tistega časa in tako je bil izziv: preleteti Rokavski preliv. Prvi je uspel Francoz Louis Blériot (slika 3), ki je 25. julija 1908 poletel s francoske obale in po 37 minutah poleta pristal na angleški obali blizu Dovra. Tako si je prislužil izdatno nagrado.

Popolnoma leseni dvomotorni De Havilland MOSQUITO (slika 4) je po svojih letalnih zmogljivostih prekašal večino takratnih lovskih letal. Motorja



□ Slika 1. Lilienthalov drsalec



□ Slika 2. Letalo Flyer I bratov Wright.



□ Slika 3. Letalo Blériot XI. Nizkokrilnik s paličastim trupom, podvozjem in že kar modernimi krmili. Trivaljni motor je zmogel vsega 19 kW.



□ Slika 4. Med lesena letala spada tudi izjemno uspešno dvomotorno bojno letalo De Havilland MOSQUITO, ki so ga zgradili Angleži med zadnjo svetovno vojno. Sklepamo lahko, da je bil eden od razlogov za uporabo lesa izogibanje sovražnikovem radarjem. Njegovo gradnjo so omogočila takrat razvita sintetična lepila (foto Marko Malec).

Rolls – Royce sta imenitno brnela in tako je letalo dobilo ime Komar. To je vrhunski dosežek lesene gradnje letal.

Med našeta lesena letala spada kot posebej tudi orjaško vodno letalo bogataša Hughesa HK-1 Spruce Goose (slika 5). Tudi on je bil velik posebej.

Slovenci nismo zaostajali za svetovnimi dosežki. Goričana brata Edo in Jože Rusjan sta izhajala iz družinske sodarske tradicije, zato sta obvladala lesno rokodelstvo. S svojim prvim letalom EDA I je Edvard v Rojah pri Gorici 25. novembra 1909 prvič uspešno poletel in se zapisal v zgodovino slovenskega in jugoslovanskega letalstva (slika 6).

Med obema vojnama so slovenski graditelji ustvarili vrsto lepih in uspešnih jadralnih in motornih letal. Vsa so bila lesene gradnje in izdelana rokodelsko.

V Konstrukcijskem Biroju Letalske Zveze so v desetletjih po vojni nastali načrti mnogo lepih in uspešnih jadralnih in motornih letal, ki so jih gradili v tedanji tovarni LETOV. Navdušeni študentje - amaterji so gradili zares lepa in uspešna letala. (vir: ZIT 100-let letalstva).

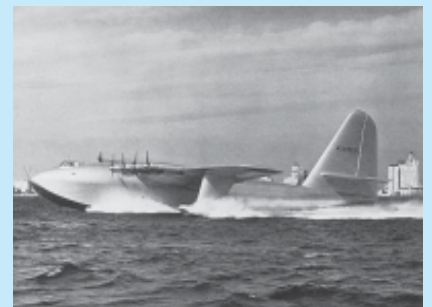
Organizirana gradnja letal je v Sloveniji zamrla v šestdesetih letih dvajsetega stoletja, ko se je iztekel tudi čas lesene gradnje letal. Dandanes so zelo dejavni ljubiteljski ustvarjalci, ki z ljubeznijo obnavljajo stara letala in gradijo nova po lastnih ali tujih načrtih.

Značilnosti lesenih konstrukcij v letalstvu

Mehanske in kemijske značilnosti lesa narekujejo ustrezne konstrukcijske in tehnološke prijeme. Podajam nekaj bistvenih lastnosti lesa, ki jih je treba upoštevati pri konstruiranju letal.

- natezna, tlačna in strižna trdnost so odvisne od smeri vlaken (anizotropnost);
- natezna trdnost lesa iglavcev je precej večja od tlačne;
- kakovost lesa, posebno iglavcev, je močno odvisna od rastišča;
- iglavci imajo večinoma vraščene grče, ki jih je treba izločiti;
- les se zelo lepo obdeluje z odrezovanjem in brušenjem;
- za spajanje je uporabno predvsem lepljenje z ustreznimi lepili;
- na atmosferske vplive les ni zelo odporen in ga je treba zaščititi s premazi;
- za torzijske in strižne elemente so uporabne vezane plošče iz lihega števila slojev;
- v omejenem območju je mogoče les plastično preoblikovati;
- za gradnjo lesenih konstrukcij je uporabna mizarska tehnologija;
- za gradnjo letal ne uporabljamo silosklepnih spojev.

V Sloveniji imamo dve znani rastišči najkakovostnejše smreke: Jelovico in Po-



□ Slika 5. Največje med lesenimi letali je bilo vodno letalo HK-1 Spruce Goose. Zgrajeno je bilo eno samo, pa še to je poletelo le nekajkrat (arhiv Marko Malec).



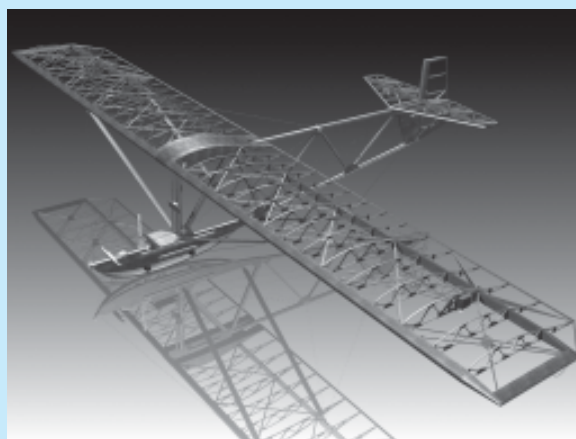
- **Slika 6.** Posebno mesto med letali bratov Rusjan ima EDA V, najbrž prvo slovensko letalo, ki je tudi letelo. Naš neumorni letalec in ustvarjalec ALBIN NOVAK je zgradil veren posnetek tega letala. Dandanes z njim letijo naši večji piloti.



- **Slika 8.** GRUNAU BABY je bilo prikupno jadralno letalo za šolanje in trenajo. Gradili so ga po nemških načrtih tudi pri nas (arhiv Marko Malec).



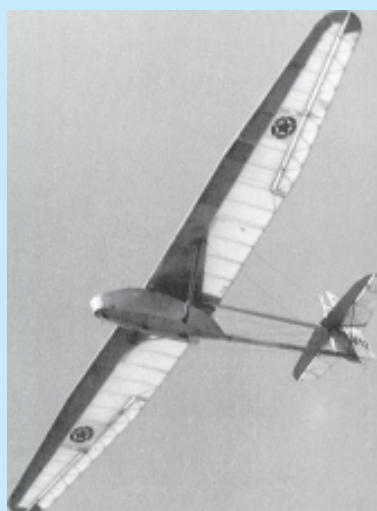
- **Slika 9.** ČAVKA, po slovensko kavka je bila namenjena za trenajo in šolanje. Gradili so jih tudi pri nas. Za letenje je bila preprosta in prijetna. V ugodnih vremenskih razmerah so piloti z njo tudi jadrili (arhiv Marko Malec).



- **Slika 7a.** Po vojni se je razcvetela gradnja domačih letal. Med prvimi je bilo popolnoma leseno začetniško šolsko letalo VRABEC, na katerem so lepo vidne značilnosti lesene konstrukcije. Na sliki je letalo brez platna, bila je generirana s programom Autodesk Inventor, izdelal jo je kapitan Aleksander Sekirnik.



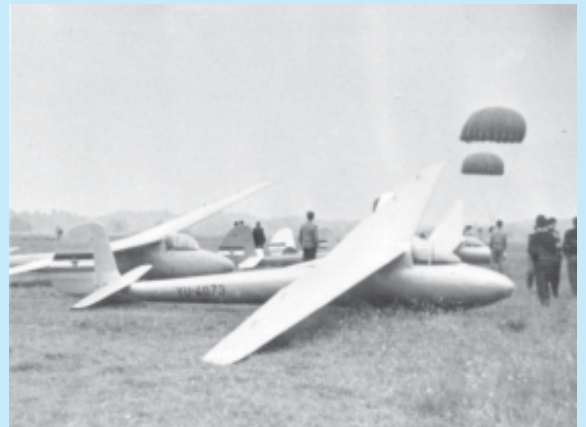
- **Slika 7b.** Amatersko vzorno izdelan VRABEC B, s katerim bodo lahko navdušenci lahko celo leteli (foto Marko Malec).



- **Slika 10.** SALAMANDRA je bilo uspešno prehodno šolsko jadralno letalo, ki so ga v štiridesetih letih po poljskih načrtih gradili tudi pri nas (arhiv Marko Malec).



□ **Slika 11.** Jadralno letalo JASTREB je konstruiral inženir Šoštarič, gradili so jih pri nas. S tem letalom je celo avtor izpolnil enega od pogojev za "srebrni C" s preletom iz Ljubljane v Ajdovščino v davnem letu 1952 (arhiv Marko Malec).



□ **Slika 12.** Popolnoma leseno visokosposobno jadralno letalo WEIHE (slovensko: Kanja), ki so ga nepoučeni poimenovali kar "VAJA". To letalo je bilo bržčas najuspešnejše med konstrukcijami znanega nemškega inženirja Jacobsa. Z njim so odlični piloti dosegli v 50-letih vrsto odmevnih rekordov. S Kanjo je z užitkom letel tudi avtor, vendar zaradi konstrukter-skega dela premalo (arhiv Marko Malec).

kljuko. Po izročilu je slavni italijanski izdelovalec godal STRADIVARI svoje čudovite instrumente izdeloval prav iz tega lesa. Večina letal, izdelanih po vojni v tovarni LETOV, je bila zgrajena prav iz tega lesa. Mojstri so sami v gozdu izbirali primerna drevesa. Posebno pozorno so svež les sušili na pravilno vlažnost. Uporaben je bil les z več kot desetimi rastmi na centimeter širine. Vse napake v rasti so izrezali in nato kose zlepili s poševnim spojem. Tako dobljene primerno dolge letve so nato zlepili v tramiče, ki so bili namenjeni za nosilce.

Za strižne elemente so primerne vezane plošče iz brezovih ali bukovih furnirjev, ki so zlepili s sintetičnim lepilom v foliji pod pritiskom in pri povišani temperaturi. število furnirjev je vedno liho. Uporabne debeline so od 0,8 do 10 mm, za gradnjo plovil rabijo tudi debelejša plošča.

Pri modernih lesenih konstrukcijah so zelo pomembna lepila. Elementi tesarskih in mizarskih konstrukcij iz preteklih časov so bili spojeni izključno s silosklepnimi spoji, saj niso poznali ustreznega lepila. Mizarski kožni klej ni bil primeren ker je zahteval stiskanje lepljencev in ni bil odporen na vlago. Nekaj boljše je bilo kazeinsko lepilo, ki je služilo v gradnji letal vse do prvih sintetičnih lepil v petdesetih letih dvaj-

setega stoletja. Angleško izredno uspešno bojno letalo De Havilland Mosquito je bilo vrhunski dosežek profesionalne letalske lesene gradnje. Gradbeniki danes z uporabo lepljenih lameliranih nosilcev uspešno gradijo tudi zelo velike loke. Ugotovili so, da ima les nekatere prednosti v primerjavi z armiranim betonom in jeklom.

Priključni ali spojni okovi lesenih konstrukcij so jekleni ali iz Alu-zliti. Na leseni del so vezani z vijaki ali votlimi kovicami, Sile se prenašajo kot ploščinski tlak. Modernejše konstrukcije so lepljene in se sile prenašajo s strižnimi napetostmi v lepljenih ploskvah.

Glavni krilni nosilci letal so bili najpogosteje škatlasti. Upogibne obremenitve krila so praviloma nesimetrične: navzgor so večje kot navzdol. Za dimenzioniranje pasnic takih nosilcev je izdelal naš profesor dr. Anton Kuhelj elegantno grafo-analitično metodo. Strižne napetosti v lepilnih ploskvah je mogoče kontrolirati s preprostimi enačbami. Obe stojini je treba kontrolirati tudi na elastično stabilnost.

Vozlišča letvastih predalčnih konstrukcij so zgrajena z nalepljenimi za-

platami iz vezane plošče.

Ukrivljeni elementi so praviloma zlepili iz več tanjših lamel. Tradicionalni rokodelci so les krivili pod paro ali dalj časa trajajočo obtežbo.

Za letala so značilne lupinaste strukture. Večinoma so to podprte lupine, le redko čiste masivne strukture. Vezane plošče je mogoče uvijati prek krilnih reber ali trupnih okvirov. Tako nastane zunanja oblika letala.

Sklep

Les je bil v začetkih razvoja letalstva nenadomestljivo gradivo vse do sredine dvajsetega stoletja, ko so konstrukterji to gradivo nadomestili z lahkimi kovinami. Lesene konstrukcije niso omogočale dovolj natančnih in gladkih površin za laminarna krila, saj les "diha". Kemija polimernih smol in izjemno trdnih vlaken je prinesla v drugi polovici dvajsetega stoletja gradiva, ki so zamenjala les pri vrhunskih laminarnih letalih. □