

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Gašper KRANJEC

**ANALIZA KONSTRUKCIJE SEDEŽNIH ELEMENTOV
IZ VEZANEGA LESA**

MAGISTRSKA NALOGA
Magistrski študij – 2. stopnja

**CONSTRUCTION ANALYSIS OF SEAT ELEMENTS
MADE FROM PLYWOOD**

M.SC THESIS
Master study Programme

Ljubljana, 2013

Magistrska naloga je zaključek Magistrskega študija Lesarstva – 2. stopnja. Delo je bilo opravljeno v Laboratoriju za preizkušanje pohištva Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Sedežne lupine so bile izdelane v tovarni Sodimex d.o.o.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorico magistrske naloge imenoval doc. dr. Manjo Kitek Kuzman, za somentorja dr. Mirka Kariža, in za recenzenta dr. Srečka Vratušo.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Magistrska naloga je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje magistrske naloge na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Gašper Kranjec

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 684.43
KG	konstrukcija/stol/lupina/vezan les/simulacija
AV	KRANJEC, Gašper
SA	KITEK KUZMAN, Manja (mentorica)/KARIŽ, Mirko (somentor)/VRATUŠA, Srečko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2013
IN	ANALIZA KONSTRUKCIJE SEDEŽNIH ELEMENTOV IZ VEZANEGA LESA
TD	Magistrska naloga (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	VIII, 43 str., 4 pregl., 26 sl., 21 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Raziskovali smo obnašanje različnih ukrivljenih sedežnih lupin pod pogoji, ki jih predpisuje standard SIST EN 15373: 2007. Na lupinah smo izvedli statično obremenitev naslona, porušitveni preizkus, preizkus z odvzemom materiala v kritičnih točkah sedežnih lupin in merili deformacije z uporovnimi lističi. Prav tako smo izvedli preizkus upogibne in strižne trdnosti vezane plošče. Obremenitve lupin smo na koncu simulirali še z računalniškim programom SolidWorks ter vrednosti primerjali z vrednostmi dejanskega testa. Na osnovi rezultatov smo ugotovili, da vse lupine dosegajo predpisane vrednosti standarda ter so predimenzionirane. Lastnosti materiala so se od lupine do lupine močno spreminjale. S preizkusom z odvzemom materiala smo prišli do sklepa, da si oblikovalci in konstruktorji pri oblikovanju lahko privoščijo še mnogo drznejše oblike lupin, ki pa bi še vedno ustrezale zahtevam standarda. Z računalniško simulacijo je bilo mogoče dobro napovedati deformacijo, ki jo povzroči obremenitev naslona; do večjih odstopanj v primerjavi z vrednostmi iz dejanskega preizkusa lupin pa je prišlo šele po pojavu plastičnih deformacij pri večjih obremenitvah.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2

DC UDC 684.43

CX construction/chair/shell/plywood/simulation

AU KRANJEC, Gašper

AA KITEK KUZMAN, Manja (supervisor)/KARIŽ, Mirko (co-advisor)/VRATUŠA, Srečko (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

FPY 2013

TI CONSTRUCTION ANALYSIS OF CHAIR ELEMENTS
MADE FROM PLYWOOD

DT M. Sc. Thesis (Master Study Programme)

NO VIII, 43 p., 4 tab., 26 fig., 21 ref.

LA sl

AL sl/en

AB The behavior of various shapes of bended chair shells under the conditions prescribed by the standard SIST EN 15373: 2007 was researched. The test of static load on the back of the shells, destructive test, test with removal of material in the critical points of the chair shell, and deformations measured by the strain gauges were performed. The tests of shear and bending strength of plywood were also made. The loads on the shells were simulated using SolidWorks Simulation software, and obtained values compared with those of the actual test. Based on the results, we concluded that all the shells were oversized and met the standard requirements. Material properties of the individual shells varied widely. Test with removal of material in critical points indicated that more daring forms of shell shapes could be designed by designers and constructors, still meeting the requirements of the standard. Using computer simulation it was possible to accurately predict deformation caused by the load on the back of the shells; it was only when plastic deformations at higher loads occurred that there was significant deviation compared to the values from the actual test.

KAZALO VSEBINE

str.

Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key Words Documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik.....	VIII
1 UVOD.....	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 CILJI NALOGE.....	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE.....	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 VEZANA PLOŠČA.....	3
2.1.1 Zgodovina laminacije lesa	4
2.1.1.1 Patentiranje vezanega lesa	4
2.1.2 Zgodovina krivljenega masivnega lesa	5
2.1.3 Uporaba ukrivljenega lesa pri izdelavi stolov.....	5
2.2 DIMENZIONIRANJE POHIŠTVA	9
2.3 PREIZKUŠANJE POHIŠTVA	9
2.3.1 Preverjanje konstrukcije z računskimi metodami	10
2.3.2 Računalniške simulacije obremenitev	11
2.4 KAKOVOST IZDELKA IN STANDARDI	12
2.4.1 Ugotavljanje skladnosti	13
3 MATERIAL IN METODE	14
3.1 LUPINE	14
3.2 PREIZKUŠANJE LUPIN	18
3.2.1 Standard SIST EN 15373:2007	18
3.2.2 Statična obremenitev naslona	19
3.2.2.1 Izvedba statične obremenitve naslona	20
3.2.3 Porušitveni preizkus	22

3.2.4	Preizkus z odvzemom materiala v kritičnih točkah sedežnih lupin.....	23
3.2.4.1	Izvajanje preizkusa z odvzemom materiala	23
3.2.5	Merjenje deformacij z uporovnimi lističi	24
3.2.6	Preizkus upogibne in strižne trdnosti vezane plošče	25
3.2.6.1	Izvedba preizkusa upogibne trdnosti lepilnih spojev vezane plošče.....	26
3.2.6.2	Izvedba preizkusa strižne trdnosti lepilnih spojev vezane plošče.....	26
3.2.7	Računalniška simulacija obremenitve	27
4	REZULTATI	29
4.1	LASTNOSTI MATERIALA	29
4.2	PRIMERJAVA DEFORMACIJ IZ SIMULACIJE IN DEJANSKEGA PREIZKUSA SEDEŽNE LUPINE	31
4.3	PRIMERJAVA DEFORMACIJ IZ SIMULACIJE IN MERITEV Z UPOROVNIMI LISTIČI.	32
4.4	PRIMERJAVA KRITIČNIH TOČK UGOTOVLJENIH S SIMULACIJO TER PRI DEJANSKEM PREIZKUSU.....	33
5	RAZPRAVA	34
6	SKLEPI.....	38
7	VIRI.....	40

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1: Dodatek C standarda SIST EN 15373:2007.....	18
Preglednica 2: Uporabljeni standardi ter pripadajoče sile pri določenem preizkusu	19
Preglednica 3: Lastnosti materiala posamezne sedežne lupine.....	29
Preglednica 4: Primerjava deformacij iz simulacije in dejanskega preizkusa sedežne lupine.	31

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Stol številka 41 (Model No. 41 lounge chair, 2013).....	6
Slika 2: Stol LCM (Charles Eames LCM Lounge Chair, 2013).....	7
Slika 3: Stol Mravlja (Ant chair, 2013).....	7
Slika 4: Stol REX (Nico Kralj Rex Chair, 2013).....	8
Slika 5: Orientiranost slojev vezane plošče	14
Slika 6: Dvostranski valjni nanašalni stroj	15
Slika 7: Vstavitev plošče v stiskalnico.....	15
Slika 8: Neobdelane ukrivljene lupine	16
Slika 9: Pozicioniranje lupin (levo) ter obrezovanje le-teh (desno).....	16
Slika 10: Končna oblika po obrezovanju	16
Slika 11: Lupina A	17
Slika 12: Lupina B	18
Slika 13: Prikaz vpetja sedežne lupine.....	20
Slika 14: Pritisna plošča po standardu SIST EN 1728:2002.....	21
Slika 15: Merilec odmika	22
Slika 16: Lupina B z odvzetim materialom širine 50 mm	23
Slika 17: Uporovni listič	24
Slika 18: Shema razporeditve oštevilčenih uporovnih lističev	24
Slika 19: Na lupino prilepljeni uporovni lističi ter enota za zajem podatkov Agilent.....	25
Slika 20: Shema preizkusa upogibne trdnosti	26
Slika 21: Vpetje preizkušanca v čeljusti trgalnega stroja.....	27
Slika 22: Primerjava deformacij iz simulacije in meritev z uporovnimi lističi.....	32
Slika 23: Razplastitev (levo) in natezna porušitev zunanjskega sloja (desno)	33
Slika 24: Računalniška simulacija napetosti pri obremenitvi	33
Slika 25: Odstopanje simulacije od dejanske vrednosti	35
Slika 26: Primerjava deformacije lupine B2 pri dejanskem testiranju in pri simulaciji z uporabo različnih elastičnih modulov (povprečni za stol, povprečni za vse lupine skupaj ter 5 - percentil vseh stolov skupaj).....	36

1 UVOD

Pohištveni elementi se že stoletja proizvajajo v najrazličnejših oblikah, redko pa se jih je oblikovalo kot konstrukcijo. Večina oblikovanja pohištva se je namreč razvila z metodo poskusov in napak in ne na podlagi metod in teorij konstrukcijskih analiz. Standardni in preizkušeni vzorci so prehajali iz roda v rod in dokler se nove oblike niso močno razlikovale od prejšnjih, so njihove mehanske lastnosti lahko ocenili na podlagi preteklih izkušenj. Dandanes je slika drugačna; moderne oblike pohištvenih elementov vključujejo močno obremenjene spoje, njihova trdnost pa ne sme biti prepuščena naključju. Optimalna oblika mora vedno osnovati na znanstvenih spoznanjih, pohištvo pa na tak način postane tako konstrukcijsko, kot tudi oblikovno na visokem nivoju.

Pri oblikovanju novega kosa pohištva se v veliko podjetjih tega postopka lotijo neekonomično. Da bi zagotovili konstrukcijsko trdnost novo oblikovanega izdelka, le-tega zaradi pomanjkljivih podatkov o materialu predimenzionirajo. Na tak način pride do prevelike porabe materialov, do podražitve proizvodnje ter posledično tudi do podražitve samega izdelka.

Najboljši način, da se izdelava novega izdelka optimizira, je v optimiziranju konstrukcije, to pa enostavno dosežemo s pravilnimi podatki o materialu, kot so na primer mehanske lastnosti materiala in odziv konstrukcije na različne obremenitve.

Namen magistrske naloge je konstrukcijska analiza stolov z ukrivljeno sedežno lupino iz vezanega lesa in izdelava optimalnega modela.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Podjetje Sodimex izdeluje široko paleto odpreškov za stole in ostale pohištvene elemente, ki jih odlikuje trdnost, ergonomičnost, eleganca in sodoben dizajn. Namen naloge je raziskati napetostno deformacijsko stanje več ukrivljenih elementov iz vezanega lesa pri različnih vplivih ter ugotovitev njihovih kritičnih območij.

Pri preiskavah v Laboratoriju za preizkušanje pohištva Oddelka za lesarstvo BF bodo upoštevane zahteve in načini sodobnih evropskih standardov za sedežno pohištvo.

1.2 CILJI NALOGE

Glavni cilj magistrske naloge je laboratorijsko preizkušanje obnašanja različnih ukrivljenih sedežnih lupin pod pogoji, ki jih predpisuje standard SIST EN 15373: 2007 Pohištvo - Trdnost, trajnost in varnost - Zahteve za sedežno pohištvo, ki ni za domačo uporabo. Rezultati preizkušanja pri različnih obremenitvah bodo prikazani v obliki parametrične študije obnašanja sedežnih lupin različnih oblik, ki bodo omogočale ugotavljanje kritičnih mest lupin in s tem možnost nadaljnjega razvoja.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Rezultati preiskav bodo omogočili vpogled v napetostno deformacijsko stanje kompozitnega lesa različnih ukrivljenih oblik. Ugotovitev kritičnih območij elementov iz vezanega lesa daje možnosti optimizacije njihovih oblik in debelin.

2 PREGLED OBJAV

2.1 VEZANA PLOŠČA

Kadar govorimo o vezani plošči (VP), imamo v mislih eno najbolj univerzalnih lesnih plošč, ki se uporablja na skoraj vseh področjih. Tako jo predvsem zaradi njene majhne teže, visoke trdnosti in stabilnosti uporabljamo v gradbeništvu za predelne stene, obloge zidov, talne plošče in ostale elemente. V pohištveni industriji jih uporabljajo za elemente miznih plošč, sedežnega pohištva, kuhinjskih pultov, vratnih in okenskih kril ter poves, kjer je potreba tako po ravnih kot po ukrivljenih elementih. Zaradi majhne teže glede na nosilnost je posebej zanimiva na področju letalstva, ladjedelnštva in avtomobilizma (Šernek, 2007).

Vezano ploščo po standardu SIST EN 313-1 uvrščamo v skupino Vezan les in podskupino Vezane plošče. VP prepoznamo po večjem (lihem) številu zlepljenih slojev lesa, ki se med seboj razlikujejo po različni usmerjenosti lesnih vlaken v slojih. Število, usmerjenost lesnih vlaken, lesna vrsta in debelina zleplencev si vedno simetrično sledijo od sredine (osi) proti površini v obe smeri (Šernek, 2007).

Zaradi odličnih mehanskih lastnosti ter enostavne je VP ena izmed najbolj razširjenih oblik predelanega lesa.

2.1.1 Zgodovina laminacije lesa

Vežan les je produkt, ki ga pridobimo s spajanjem dveh ali več plasti tanjšega materiala v debelejši ter močnejši material. Proces laminacije lesa sega v daljno preteklost. Arheologi so sledi vezanega lesa odkrili v že grobnicah faraonov. Egipčani so imeli v tistih časih namreč veliko pomanjkanje kvalitetnega lesa. Da bi le-tega prihranili za izdelavo zunanjih slojev pohištva ter ostalih dekorativnih izdelkov, so tanke plasti kvalitetnega lesa lepili na sloje lesa manjše kvalitete.

Tudi Kitajci so se pri izdelavi pohištva posluževali podobnih tehnik. V 16. in 17. stoletju so Britanci ter Francozi eksperimentirali z različnimi tipi vezanega lesa. Vsi ti zametki vezanega lesa pa so bili uporabljeni zgolj pri izdelavi notranjega pohištva, kot so na primer omare, mize, zaboji ter vrata.

Pri nas se je krivljenje lesa sprva uporabljalo v obrti, kot je sodarstvo, kolarstvo in v izdelovanju »suhe robe«. Ponosni moramo biti na znamenite bloške smučke, ki jih je opisal že Valvasor v Slavi Vojvodine Kranjske leta 1689. Sicer prvi primerki niso imeli krivljene špice, poznejši pa že (Lapanja, 2005).

2.1.1.1 PATENTIRANJE VEZANEGA LESA

Decembra 1865 je John K. Majo izdal patent za vezan les. V patentni listini je bil vezan les opisan kot "zlepljanje ali druga oblika spajanja večjega števila slojev lesa, kjer so posamezni sloji orientirani pravokotno drug na drugega".

Vežan les je priljubljen gradbeni material postal šele v zgodnjem 20. stoletju. Ploščo, kakršno poznamo danes pod imenom VP, je prvič predstavilo podjetje Portland Manufacturing Company of St. Johns v Oregonu v ZDA, in sicer leta 1905. Takrat se je VP močno razširila tudi na konstrukcijsko zahtevnejša področja. S »house boom« v petdesetih letih prejšnjega stoletja pa se je VP začela uporabljati v gradbeništvu (Smulski, 1997).

2.1.2 Zgodovina krivljenega masivnega lesa

Krivljen les so v minulih stoletjih uporabljali pri obrteh, kot sta kolarstvo in stolarstvo. Industrijska tehnika krivljenja lesa pa se je v Evropi in Ameriki uveljavila v ladjedelništvu v začetku 19. stol. Vprašanje serijske proizvodnje upognjenega pohištva je prvi reševal Mihael Thonet starejši, ki je ob preizkusih leta 1830 v svoji delavnici spoznal, da obstajajo pri krivljenju lesa trije vzporedni sloji:

- notranji sloj, kjer se lesni material tlači,
- srednji, nevtralni in
- zunanji, kjer so lesna vlakna obremenjena na nateg.

Njegov patent je temeljil na tem, da je zunanja, za nateg obremenjena vlakna zavaroval z železnim pasom potrebne debeline, ta kovinski trak je bil po dolžini zaključen z dvema zakrivkoma ali petama, ki sta preprečevala podaljšanje zunanjega sloja pri upogibanju. Nevtralno os je s tem enostavnim pripomočkom pomaknil proti zunanjemu pasu in dosegel, da se je kos lesa tlačil po celotnem prerezu, najbolj seveda na skrajnem notranjem sloju (Ložar, 1990).

Po letu 1850 je pričel izdelovati prve pohištvene dele iz zlepljenih lesenih letev, ki jih je kuhal v lepilu in nato stiskal v šablonah. Na ta način je hotel poceniti in poenostaviti izdelavo krivih delov pohištva, vendar je bil postopek še vedno zamuden in drag. Poleg tega se je pohištvo zaradi higroskopičnosti takratnih lepil pri večji vlagi deformiralo. Nadaljnje poizkuse je zato opravljal na kvadratnih lamelah, ki jih je najprej zmehčal v vodni pari, zakrivil in posušil ter šele nato zlepil v modelu. Čeprav ne velja za začetnika te tehnike, je bil prvi, ki je začel na ta način izdelovati pohištvo.

2.1.3 Uporaba ukrivljenega lesa pri izdelavi stolov

Leta 1825 je M. Thonet naredil lesen stol, ki je imel brezov okvir in sedež iz vezanega lesa. Leta 1830 pa je že izdeloval stole iz trakov nažaganega furnirja, ki jih je zlepil pod pritiskom v lesenih kalupih.

Alvar Aalto je okoli 1930 oblikoval prve serijsko izdelane stole iz v eno smer upognjenega lesa. Njegova tehnika se razlikuje od Thonetove po tem, da lesa ni krivil z vodno paro, ampak se je zanašal na njegovo naravno vlažnost. Masivni brezov les je razžagal na sloje in ga nato upognil. Eksperimentiral je z masivnim in vezanim lesom. Uporabljal je lepila, ki so jih razvili za letalsko industrijo. Med leti 1929 in 1933 je nastal stol številka 41 (slika 1) iz krivljenega bukovega vezanega lesa, ki je bil sprva oblikovan za sanatorij v Paimiu, kasneje pa so ga začeli izdelovati tudi serijsko.



Slika 1: Stol številka 41 (Model No. 41 lounge chair, 2013)

Charles Eames, ki se je ukvarjal z eksperimentalnim oblikovanjem, je leta 1941 na razstavi Organsko oblikovano pohištvo razstavil mehko oblikovano sedežno lupino, ki pa zaradi previsokih proizvodnih stroškov ni prišla v proizvodnjo. Po petletnem eksperimentalnem delu mu je leta 1946 uspelo, da je s kalupom ukrivil vezano ploščo v treh dimenzijah. Posledica je bil stol model LCM (slika 2), ki ima obliko sedišča in hrbtnega naslona prilagojeno oblikam človeškega telesa.



Slika 2: Stol LCM (Charles Eames LCM Lounge Chair, 2013)

Stoli Arneja Jacobsena so izdelani iz prožne, v dve smeri ukrivljene vezane plošče, ki rabi za enovito in na različne načine izrezano sedežno lupino. Primer komercialno uspešnega stola, ki ga še danes izdelujejo in je še vedno oblikovno aktualen, je stol Mravlja, ki ga je oblikoval 1952 (slika 3),



Slika 3: Stol Mravlja (Ant chair, 2013)

Zelo velik vpliv na razvoj industrijskega oblikovanja stolov iz ukrivljenega vezanega lesa je imel slovenski oblikovalec Niko Kralj. Leta 1954 je predlagal način za prostorsko krivljene vezane plošče v treh dimenzijah z večjimi krivinami, kot je bilo to do tedaj možno zgolj z upoštevanjem naravne razteznjivosti lesa. Rešitev je temeljila na perforaciji vezane plošče, ki zaradi odvzetega materiala dopušča večje krivine v treh dimenzijah. Njegov najbolj poznan izdelek je stol REX (slika 4), ki se proizvaja že od leta 1956 in je zgled kakovostno oblikovanega industrijskega izdelka (Hrovatin in Kušar, 1996).



Slika 4: Stol REX (Nico Kralj Rex Chair, 2013)

2.2 DIMENZIONIRANJE POHIŠTVA

Pri konstruiranju izdelka področje dimenzioniranja določa tiste mere izdelka, ki bodo zagotavljale varno in trajno konstrukcijo. Značilnost pohištvenih izdelkov je v tem, da pri določanju novih dimenzij večinoma ne uporabljamo statičnega izračunavanja. Praktične izkušnje, poznavanje materiala in občutek za material večinoma zadostujeta za ustvarjanje logične in pravilno dimenzionirane konstrukcije. Slaba pohištvena konstrukcija je velikokrat odraz nepravilnega dimenzioniranja, lahko pa je tudi razlog v nekvalitetnih materialih oziroma napačnih konstrukcijskih izvedbah.

S statičnega vidika so elementi pri pohištvu mnogokrat predimenzionirani, ponavadi zaradi estetskih in ergonomskih zahtev ter delovanja lesa, ki na tanjših elementih povzroča vidnejše deformacije. Če se pri dimenzioniranju ne zanašamo na izkušnje in občutek, imamo dve različni metodi določevanja dimenzij:

- z eksperimentalno metodo, pri kateri predvidimo izvedbo izdelka, nato preizkusimo konstrukcijo, na osnovi rezultatov preizkušanja pa konstrukcijo korigiramo;
- z dimenzioniranjem, pri katerem določamo dimenzije v izdelkih z izračunavanjem in računskimi analizami (Smardzewski, 2009).

2.3 PREIZKUŠANJE POHIŠTVA

V zgodovini so konstrukcijo preizkušali tako, da so jo najprej izdelali na osnovi izkušenj in nato preverili z uporabo. Na podlagi izkušenj so izdelovali konstrukcije mostov, zgradb, hiš, spomenikov, objektov in pohištva. Pri izdelovanju konstrukcije so se opirali na znanje predhodnikov, ki so se učili tako na uspešnih kot na spodletelih primerih. Za primer vzemimo prve mostove, ki so bili izdelani izključno po navodilih konstruktorja, ki se je zanašal na izkustveno znanje. Ko je bil most zgrajen, ni noben vedel, kolikšno breme bo prenesel. Čas je pokazal, da so nekateri ustrezno težo prenašali, drugi ne (Eckleman, 1966).

2.3.1 Preverjanje konstrukcije z računskimi metodami

Trdnost mostov, hiš in objektov ni bila dolgo prepuščena sreči, saj je bilo zaradi nepravilno načrtovane konstrukcije velikokrat v nevarnosti človekovo življenje. Zaradi tega so razvili metode, s katerimi lahko preračunamo in ugotovimo kakšne obremenitve bo konstrukcija prenesla, še preden je dejansko zgrajena. Računske metode so se zelo hitro razvijale v gradbeništvu, v pohištveni industriji pa žal temu ni bilo tako, saj so v zgodovini verjeli, da je pohištvo umetnost, katera ne bi smela biti preizkušena in obravnavana kot konstrukcija (Eckleman, 1966).

Eden pomembnejših ljudi, ki so se ukvarjali z metodami, s katerimi si pomagamo določati dimenzije konstrukcije in samo konstrukcijo s preračunavanjem, je bil Carl A. Eckleman. Njegova teorija preizkušanja temelji na dejstvu, da je stol tako kot stavbe, mostovi in ostale zgradbe struktura, ki ne sme ostati nepreizkušena in nepreverjena.

Obremenitve na določeno vez pri stolu oz. konstrukciji za različne pozicije sedenja človeka lahko preračunamo z naslednjo metodo, ki vsebuje:

- določitev bremena, ki ga bo konstrukcija prenašala,
- analiziranje napetosti, ki bi se generirale v spojih elementov medtem, ko jih obremenjujemo s silo,
- in količino materiala in razporeditev materiala po konstrukciji tako, da nobeden izmed spojev ni preobremenjen (Eckleman, 1966).

Eckleman je tudi raziskoval odnos med delovanjem sile na konstrukcijo in njenim odzivom. Preizkušanje konstrukcije je hotel prenesti v obliko računalniškega algoritma (Eckleman 1969).

2.3.2 Računalniške simulacije obremenitev

Z razvojem programov za računalniško 3D modeliranje se je pojavila tudi možnost uporabe te tehnologije pri analiziranju konstrukcije izdelka. Na ta način se pri razvoju izdelka izognemo večjim stroškom, ki nastanejo kot posledica dolgotrajnega preizkušanja, izdelovanja prototipov izdelka. Končni izdelek je tako skonstruiran hitreje, ceneje ter tudi bolj kakovostno.

Da pa so rezultati simulacij skladni s tistimi, narejenimi s fizičnimi preizkusi, potrebujemo natančne podatke o materialu, ki ga testiramo. V računalniško simulacijo se ponavadi vključi povprečne vrednosti materiala, katerega konstrukcijo simuliramo. Tu naletimo na težavo, saj je les precej nehomogen, variabilen material, ki se poleg tega spreminja tudi časovno v obliki nabrekanja, krčenja, lezenja (Eckelman, 1966). Posledica te nehomogenosti pa se hitro pokaže v obliki odstopanj rezultatov simulacij s tistimi, pridobljeni s fizičnimi preizkusi. Ta odstopanja so včasih zanemarljiva, pri nekaterih raziskavah pa zelo velika (Gustafsson, 1997).

Pri testiranju konstrukcije se zato poleg simulacij še vedno izvajajo tudi mehanski preizkusi končnega izdelka.

2.4 KAKOVOST IZDELKA IN STANDARDI

V Sloveniji velika večina veljavnih standardov temelji na evropskih (EN) in mednarodnih (ISO) standardih. Prezeti evropski ali mednarodni standard Slovenija dopolni s kratico SIST, tako dobi končno oznako SIST EN ali SIST ISO. Slovenski inštitut za standardizacijo je tudi na področju lesarstva oz. pohištva prevzel praktično že vse evropske standarde s tega področja.

Kakovost izdelka in standarde se preverja v Laboratoriju za preizkušanje pohištva (LPP) na Oddelku za lesarstvo. LPP na oddelku za lesarstvo deluje na področju ugotavljanja skladnosti – preskušanja pohištva že več kot 35 let. Bil je eden prvih, ki je začel sodelovati in se povezovati z lesno industrijo. Dejavnost laboratorija, vezana na potrebe lesnopredelovalne industrije in drugih naročnikov, obsega preizkušanje in ugotavljanje skladnosti. Vsa preizkušanja se izvajajo v skladu z zahtevami evropskih (EN) standardov, ki so hkrati tudi nacionalni-slovenski (SIST) standardi. Po potrebi oz. na osnovi dogovora preizkušanja potekajo tudi po metodah mednarodnih (ISO) standardov ali nacionalnih standardov neevropskih držav.

Strokovna in raziskovalna dejavnost LPP, vezana na potrebe lesnopredelovalne industrije in drugih naročnikov, obsega:

- preskušanje bivalnega pohištva,
- preskušanje šolskega pohištva,
- preskušanje pisarniškega pohištva,
- preskušanje notranjih in zunanjih vrat, predvsem njihove mehanske lastnosti in odziv na mehanske vplive,
- ugotavljanje ergonomske skladnosti pohištva z zahtevami standardov za bivalno in delovno okolje,
- preverjanje oblikovalskih in konstrukcijskih rešitev,
- sodelovanje pri oblikovanju in konstruiranju novih proizvodov lesne industrije.

Uporaba standardov ni obvezna. Zakon o standardizaciji pravi, da je uporaba prostovoljna, razen če je obvezna uporaba določena s predpisom. Zavedati se moramo, da so na tržišču na prodaj tudi izdelki, ki ne zadostijo niti minimalnim zahtevam standardov.

Z uporabo standardov si proizvajalec omogoči doseganje nekaterih ciljev:

- zagotavljanje kakovosti proizvodov, procesov in storitev,
- zvišanje ravni varnosti, varovanja zdravja in okolja,
- zagotavljanje smotrne izrabe dela, materiala in energije,
- izboljšanje proizvodne učinkovitosti z obvladovanjem raznolikosti, združljivosti in zamenljivosti,
- pospeševanja mednarodne trgovine in preprečevanje ovir pri trgovanju (Kitek Kuzman, 2013).

2.4.1 Ugotavljanje skladnosti

S tem, ko je proizvajalec izdal izdelek v skladu s standardi, je opravil šele polovico dela. Da so bila določila standardov upoštevana, je potrebno preveriti in dokazati. Postopek takega preverjanja imenujemo ugotavljanje skladnosti. Tako kot lastnosti izdelka, tako tudi načine in metode ugotavljanja skladnosti (preizkušanje) določajo standardi. Skladnost lahko ugotavlja oz. preverja za to usposobljena institucija, ki je nepristranska in neodvisna. Največkrat so to laboratoriji v sestavi raziskovalnih institucij, zavodov ali univerz.

Rezultati preizkušanja so dokumenti prikazani v »Poročilu o preizkušanju«. Vsi izdelki, ki so uspešno prestali celoten postopek preizkušanja, lahko pridobijo posebno spričevalo oz. listino, tj. CERTIFIKAT O SKLADNOSTI (Rudolf, 2008).

Certifikat o skladnosti je listina – dokument, predvsem reprezentančnega in promocijskega značaja, ki po vsebini povzema glavne ugotovitve preizkušanja. Vsebina certifikata vključuje vse osnovne ugotovitve poročila o preizkušanju, s poudarkom na delih, ki imajo večji promocijski pomen (ime izdelka ali programa, proizvajalec, nazivi standardov, izvajalec preizkušanja itd.). Istovetnost in sledljivost navedb sta zagotovljeni z navajanjem zaporedne številke certifikata in številke poročila o preizkušanju. Vse navedbe so v slovenskem in angleškem jeziku (Kitek Kuzman, 2013).

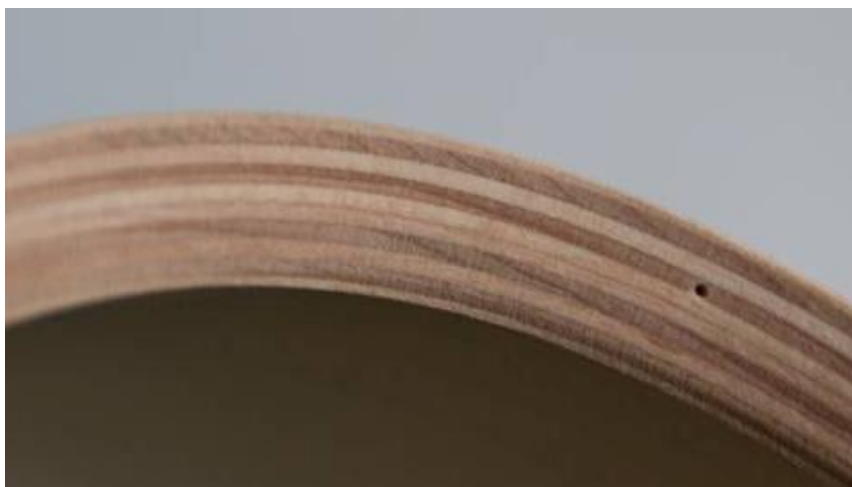
3 MATERIAL IN METODE

Uporabljeni materiali pri testiranju so bile lupine stolov podjetja Sodimex d.o.o. Podjetje primarno izdeluje sedeže in naslone za proizvodnjo lesenih in kovinskih stolov ter ukrivljene elemente za pohištveno industrijo in opremo objektov. Modele, dimenzije in izbor lesa prilagajajo zahtevam strank.

3.1 LUPINE

Lupine so bile izdelane iz 10-slojne bukove vezane plošče debeline $10,8 \pm 0,2$ mm.

Razporeditev posameznih plasti je bila izmenično vzdolžno/prečno orientirana: zunanji plasti sta bili orientirani vzdolžno, nato pa v smeri proti notranjosti plošče prečno itd. Oba sredinska sloja sta bila orientirana vzdolžno (slika 5).



Slika 5: Orientiranost slojev vezane plošče

Posamezni sloji so bili spojeni z uporabo urea-formaldehidnega lepila. Tega so na vsak drugi sloj nanесли s pomočjo dvostranskega valjčnega nanašalnega stroja (slika 6). Sloje so nato v pravilnem zaporedju ter pravilno orientacijo zložili v ploščo ter jo vstavili v stiskalnico (slika 7), ki deluje na princip visoke frekvence. Lupina se je v stiskalnem kalupu v obliki naših lupin oblikovala ter po utrditvi lepila tudi zadržala pravilno obliko.



Slika 6: Dvostranski valjčni nanašalni stroj



Slika 7: Vstavitev plošče v stiskalnico

Lupine so se po končanem stiskanju kondicionirale (slika 8), nato pa transportirale do CNC rezkalnega stroja. Delavci so lupine s pomočjo laserskih linij natančno pozicionirali na obdelovalno mizo več-osnega CNC rezkalnega stroja (slika 9), ta pa je lupine obrezal na končno obliko (slika 10). Na koncu je sledilo še ročno brušenje ter obdelava robov. Nekatere lupine se je na koncu še površinsko obdelalo. Lupine, ki smo jih testirali, so sicer brez površinske obdelave.



Slika 8: Neobdelane ukrivljene lupine

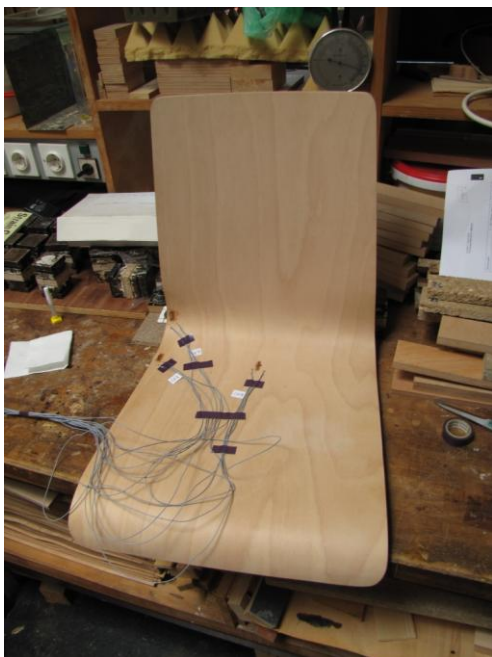


Slika 9: Pozicioniranje lupin (levo) ter obrezovanje le-teh (desno)



Slika 10: Končna oblika po obrezovanju

Na začetku magistrske naloge smo testirali "lupino A" (slika 11). Ta je imela izmed vseh možnih najbolj preprosto obliko. Lupina A je služila predvsem za izdelavo ogrodja, nastavitve vpetja, testne meritve.



Slika 11: Lupina A

Po testiranju lupine A smo imeli boljšo predstavbo o predimenzioniranosti lupin. Tako smo se lažje odločili za obliko lupine, s katero smo nato nadaljevali testiranja. Odločili smo se za "lupino B" (slika 12). Ta je imela na kritičnih točkah najmanj materiala, in je bila s stališča nadaljnjih raziskav najustreznejša.



Slika 12: Lupina B

3.2 PREIZKUŠANJE LUPIN

3.2.1 Standard SIST EN 15373:2007

Sedežne lupine smo preizkušali po standardu SIST EN 15373:2007, ki predpisuje zahteve za sedežno pohištvo, ki ni za domačo uporabo.

V preglednici 1 je predstavljen dodatek C standarda SIST EN 15373:2007, ki predpisuje 3 različne stopnje potrebnih vrednosti, ki jih mora preizkušanec doseči.

Preglednica 1: Dodatek C standarda SIST EN 15373:2007

Zahtevnost rabe (razred)	Tip rabe	Primeri
1	lahka	hotelske spalnice, cerkve, knjižnice,...
2	splošna	splošno v hotelu, kavarne, restavracije, čakalnice, javne dvorane, sejne sobe, bari,...
3	zahtevna	nočni klubi, policijske postaje, javne avle, športne garderobe, vojašnice, ...

Odločili smo se, da bomo sedežne lupine preizkušali z vrednostmi, ki jih določa druga/splošna stopnja uporabe.

V preglednici 2 pa so prikazani uporabljeni standardi ter predpisane sile, ki jih ti določajo.

Preglednica 2: Uporabljeni standardi ter pripadajoče sile pri določenem preizkusu

Preizkus	Standard	Uporabljene sile	Število ponovitev
Statična obremenitev naslona	Prilagojen SIST EN 15373:2007	560 N	1 (standard: 10)
Porušitveni preizkus	/	max	1
Preizkušanje z odvzemom materiala	Prilagojen SIST EN 15373:2007	560 N	1

Vse preizkuse smo opravljali v Laboratoriju za preizkušanje pohištva Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin.

3.2.2 Statična obremenitev naslona

S statično obremenitvijo naslona smo ugotavljali, če lupine dosegajo potrebe standardov SIST EN 15373:2007. Pri obremenitvi sedežne lupine v materialu nastajajo napetosti, ki vodijo do deformacije ali celo do porušitve. Od materiala samega pa je odvisno ali bo deformacija elastična ali plastična. Ker je les anizotropne in nehomogene narave, težko ocenimo, kdaj, kje in kako bo do deformacije ali porušitve prišlo. Variacije mehanskih lastnosti različnih ali istih lesnih vrst so namreč lahko zelo velike, kar moramo upoštevati že pri samem oblikovanju ter konstruiranju izdelka.

3.2.2.1 Izvedba statične obremenitve naslona

Standard predpisuje silo obremenjevanja sedežne lupine, ki znaša 560 N. Obremenitev naj bi po standardu izvedli 10 krat in jo zadržali za 10 ± 2 s. Ker pa smo pri testiranju želeli ugotoviti le odziv sedežne lupine na predpisano obremenitev, je zadostovala le enkratna obremenitev.

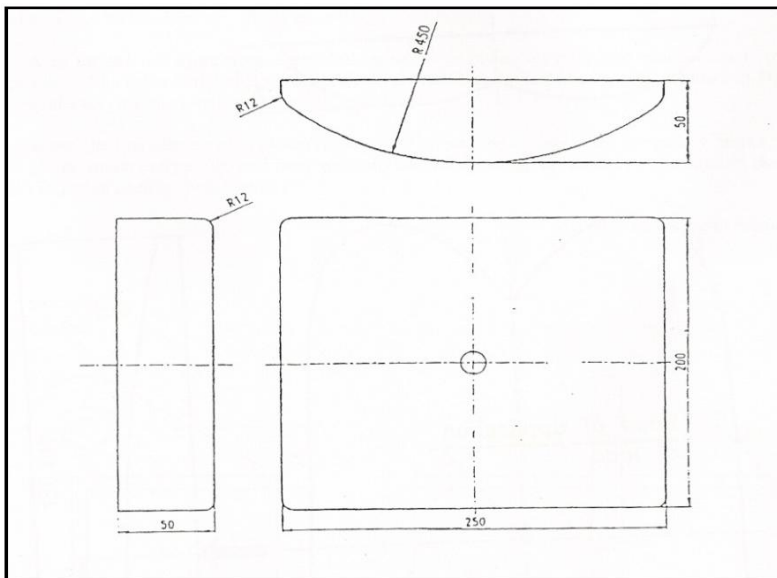
Preizkus smo izvajali na testirnem stroju Zwick Z100, s katerim lahko opravljamo meritve deformacije v odvisnosti od sile, s katero delujemo na preizkušaneec.

Mehanske lastnosti materialov se na tem stroju preizkuša na način, kot ga predpisujejo standardi. Testirni stroj ima tako raznovrstne vpenjalne mehanizme za standardne oblike preizkušancev. Ker pa smo v našem primeru preizkušali nestandardne vzorce/ cele lupine, smo morali izdelati lasten način vpetja sedežne lupine na že obstoječ nosilni element. To smo storili s pomočjo lesenega ogrodja, ki smo ga vpeli na nosilni element testirnega stroja. Sedežno lupino smo nato s svorami pritrdili na izdelano ogrodje na način, ki je zagotavljal pravilno smer in lokacijo obremenitve stroja na hrbtišče lupine (slika 13).



Slika 13: Prikaz vpetja sedežne lupine

Ko smo končali z pritrditvijo sedežne lupine, smo izdelali še pritisno ploščo, s katero smo izvajali obremenitve na hrbtišče. Le-to smo izdelali iz masivnega lesa po standardu SIST EN 1728:2002 (slika 14).



Slika 14: Pritisna plošča po standardu SIST EN 1728:2002

Zaradi improviziranega nestandardnega vpetja sedežne lupine je med obremenitvijo prišlo tudi do rahlega odmikanja ogrodja, v katerega je bila lupina vpeta. Zaradi natančnejših rezultatov smo poleg ogrodja neodvisno namestili merilec odmika, ki je beležil premikanje ogrodja v skrajni točki vpetja lupine (slika 15). Ta odmik smo nato sinhronizirali z rezultati deformacij, ter ga računsko odpravili.



Slika 15: Merilec odmika

Po vpetju sedežne lupine smo morali v program TestXpert, s katerim izvajamo obremenitve na testirni napravi Zwick, vnesti parametre izvajanja obremenitve. Hitrost pomika pritisne plošče smo nastavili na 15 mm/min, maksimalno silo pa na 560 N.

3.2.3 Porušitveni preizkus

Pri porušitvenem preizkusu smo sedežne naslone obremenili do porušitve. Tako smo ugotovili maksimalno silo, ki jo naslon zdrži. S tem preizkusom smo prav tako ugotavljali, če oz. koliko so lupine predimenzionirane ter kakšna je morebitna povezava med obliko sedežne lupine in njenimi mehanskimi lastnostmi.

Postopek preizkušanja obremenitve je bil v vseh pogledih enak kot pri testiranju lupin s silo 560 N, le da pri tem preizkusu testirna naprava Zwick ni bila omejena z maksimalno silo obremenitve.

3.2.4 Preizkus z odvzemom materiala v kritičnih točkah sedežnih lupin

Pri tem preizkusu smo postopoma odvezemali material v kritični točki sedežne lupine z namenom, da bi ugotovili količino materiala, ki ga še smemo odvzeti, da lupina še vedno zadostuje zahtevam standardne statične obremenitve 560 N. S preizkusom smo ugotavljali potencialno predimenzioniranost hrbtnega naslona, ta podatek pa lahko služi prihodnjim oblikovalskim oz. konstrukcijskim rešitvam. Kritična točka se je tekom prejšnjih preizkusov pokazala kot vrat hrbtnega naslona zato smo se odvezemanja materiala lotili na tem mestu.

3.2.4.1 Izvajanje preizkusa z odvzemom materiala

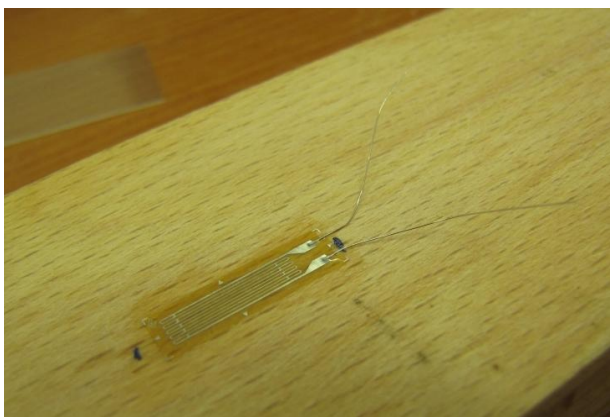
Sedežne lupine smo pri tem preizkusu prav tako na isti način vpeli v testirno napravo Zwick Z100. V prvem delu smo na kritični točki odvezeli del naslona v širini 50 mm (slika 16) ter nato naslon obremenili s silo 560 N. Preko te meje nismo šli, saj smo imeli za izvedbo tega testa na voljo le eno sedežno lupino. V kolikor bi se izkazalo, da vrat hrbtnega naslona zdrži obremenitev 560N, bi v naslednjem poizkusu na kritični točki odvezeli 80 mm materiala po širini vratu. Material smo odvezemali s pomočjo ročnega električnega vrtalnika ter krožnega žagalnega stroja.



Slika 16: Lupina B z odvzetim materialom širine 50 mm

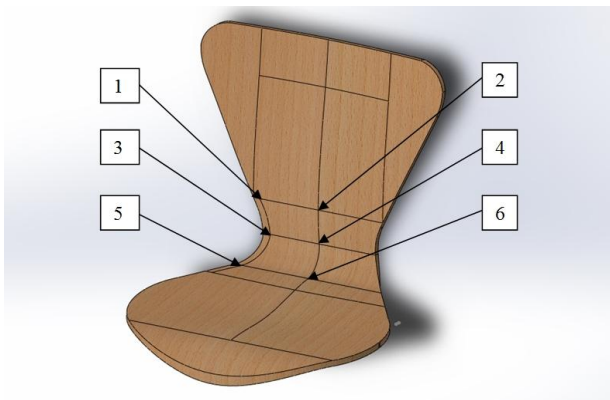
3.2.5 Merjenje deformacij z uporovnimi lističi

Pri izvedbi merjenja deformacij sedežnih lupin smo se pri tej magistrski nalogi odločili, da bomo poleg merjenja deformacij preko testirnega stroja Zwick, vzporedno deformacije merili tudi s pomočjo uporovnih lističev (slika 17), vrednosti pa kasneje primerjali s tistimi, pridobljenimi na računalniškem modelu preizkusa stola.



Slika 17: Uporovni listič

Uporovni lističi delujejo na principu spremenljive upornosti, ki je posledica mehanskih deformacij. Uporovne lističe, namenjene za testiranje nizko elastičnih materialov z oznako LFLA-10-11, proizvajalca TML Tokyo Sokki Kenkyujo, smo s priloženim sekundnim lepilom prilepili na kritične točke sedežne lupine. Mesta, kamor smo lističe pritrdili, smo natančno izmerili, tako da so bili ti na vseh preizkušanih lupinah na enakem mestu (slika 18).



Slika 18: Shema razporeditve oštevilčenih uporovnih lističev

Uporovne lističe smo na površino lupine prilepili, ko je bila ta še neobremenjena. Na vse uporabne lističe smo nato z električnim spajkalnikom pritrdili žice, te pa na drugi strani pritrdili na enoto za zajem podatkov in stikalo Agilent 34970A (slika 19).



Slika 19: Na lupino prilepljeni uporovni lističi ter enota za zajem podatkov Agilent

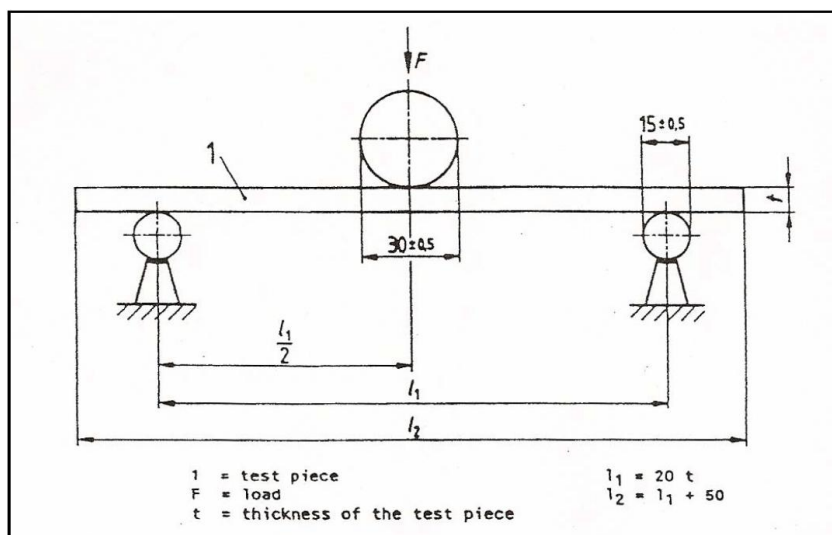
Ko je testirna naprava Zwick začela obremenjevati sedežno lupino, so se uporovni lističi pričeli raztezati/krčiti, kar je povzročilo spremembo upornosti na lističih. Upornost merilnega traku se je v primeru natega lističa povečala, v primeru tlaka pa zmanjšala.

3.2.6 Preizkus upogibne in strižne trdnosti vezane plošče

Pri nadaljnjih meritvah smo zaradi natančnejših rezultatov želeli izmeriti tudi druge mehanske lastnosti vezane plošče, iz katere so bile lupine sestavljene. Dve karakteristični mehanski lastnosti, ki najboljše opišeta kakovost zlepljenosti materiala pa sta upogibna ter strižna trdnost.

3.2.6.1 Izvedba preizkusa upogibne trdnosti lepilnih spojev vezane plošče

Pri izvedbi preizkusa trdnosti smo uporabili prilagojen standard EN 310:1993. Standard predpisuje dolžino vzorca, ki mora predstavljati dvajsetkratno vrednost debeline vzorca z dodatnimi 50 mm z maksimalno dolžino 1050 mm in minimalno 150 mm. Ker je naslon rahlo ukrivljen smo predpisano širino preskušancev (50 mm) zmanjšali na 30 mm, da bi dobili čim bolj ploščate preskušance. Razdalja med podpornima valjema je znašala dvajsetkratno vrednost debeline preizkušancev. Premer podpornih valjev je bil $15 \pm 0,5$ mm, premer pritisknega valja pa $30 \pm 0,5$ mm (slika 20). Testirni stroj Zwick je porušitev izvedel v nastavljenih 60 ± 30 sekundah.



Slika 20: Shema preizkusa upogibne trdnosti

3.2.6.2 Izvedba preizkusa strižne trdnosti lepilnih spojev vezane plošče

Pri preizkušanju strižne trdnosti lepilnih spojev smo uporabili prilagojen standard SIST EN 314-1:2005. Ker smo testirali enake lupine, podatek o strižni trdnosti lepilnih spojev pa smo potrebovali zgolj kot informacijo pri simulaciji konstrukcije, smo strižno trdnost izmerili na 10 naključno izbranih vzorcih. Širina preizkušancev je bila 25 mm, dolžina 120 mm, velikost strižne površine pa 25 mm x 25 mm.

Preizkušance smo zarezali tako, da smo strižni obremenitvi izpostavili površino drugega sloja. Tako izdelane vzorce smo vsakega posebej vstavili v čeljusti trgalnega stroja Zwick, ter jih strižno obremenili do porušitve (slika 21).



Slika 21: Vpetje preizkušanca v čeljusti trgalnega stroja

3.2.7 Računalniška simulacija obremenitve

S programom SolidWorks 2012 smo najprej na podlagi meritev fizičnih lupin izdelali prostorski model preizkušane lupine. Obremenitev lupin smo simulirali s programom Solidworks Simulation 2012. Tekom računalniških simulacij smo težili k čim boljšem posnemanju simulacije fizičnega testiranja na napravi Zwick. Simulacija je potekala po naslednjem vrstem redu:

1. Simuliranemu materialu smo najprej določili lastnosti. Na podlagi predhodno testiranih meritev upogibne trdnosti smo določili elastični modul vezane plošče, ki je predstavljal povprečno vrednost vseh meritev. Lupine smo zaradi poenostavitve simulacije obravnavali kot izotropen material. Uporabili smo Poissonov količnik 0,3.
2. Lupinam smo določili vpetje na dveh površinah, ki sta predstavljali realno vpetje lupine.
3. Določili smo točko, smer ter vrednosti obremenitve lupine, ki so bile odvisne od sile pri dejanski porušitvi ter so se gibale v območju od 100 N do 1200 N.
4. Pri simulaciji obremenitve lupine smo najprej izvedli mreženje (H-adaptive mesh).
5. Končna stopnja je bila dejanska simulacija obremenitve lupine na podlagi vnešenih podatkov. Pri simulaciji smo spremljali deformacije naslona ter kritična območja napetosti v lupini.

4 REZULTATI

4.1 LASTNOSTI MATERIALA

Preglednica 3 prikazuje pridobljene rezultate iz merjenja lastnosti materiala testiranih sedežnih lupin.

Preglednica 3: Lastnosti materiala posamezne sedežne lupine

				
	Lupina A	Lupina B1	Lupina B2	Lupina B3
E modul- upogib (N/mm ²) - povprečje	8543	7260	8694	7618
Standardni odklon (N/mm ²)	303	169	48	439
Porušitvena trdnost upogib (N/mm ²)	86.48	83.66	96.46	79.58
Standardni odklon (N/mm ²)	4.4	2.8	4.8	7.4
Sila porušitve lupine (N)	1260	732	895	469
Povprečni elastični modul (skupno) za vse lupine (N/mm ²)				8053
5-percentil elastičnega modula (N/mm ²)				7140
Povprečna porušitvena trdnost za vse lupine skupaj (N/mm ²)				86.5
5-percentil trdnosti (N/mm ²)				75.2
Povprečna vrednost strižne trdnosti vezane plošče (N/mm ²)				3,2

Iz preglednice 3 lahko ugotovimo, da se vrednosti elastičnega upogibnega modula ter porušitvene trdnosti materiala od lupine do lupine precej razlikujejo kljub dejstvu, da so lupine izdelane v istem kalupu pri enakih pogojih. Vrednosti se tako gibljejo od 7260 N/mm^2 pri lupini B1 pa vse do 8694 N/mm^2 pri lupini B2, odstopanja tako predstavljajo kar do 9,8 % vrednosti povprečnega elastičnega modula.

Pri računalniški simulaciji obremenitve lupin smo zaradi tako velikih razlik v velikosti modulov za vsako lupino uporabili pripadajočo vrednost modula. Poleg povprečne vrednosti modula elastičnosti pa smo izračunali tudi tako imenovani 5 (peti)-percentil vrednosti. Ta zagotavlja, da merjene kriterije dosega ali presega 95 % vzorcev in ne le 50 %, kot pri povprečju. Na ta način pri simulaciji obremenitve napovemo večje deformacije, kot se lahko kasneje ugotovijo pri fizičnih preizkusih. Tako pri konstruiranju zagotovimo večji faktor varnosti. Povprečna vrednost modula elastičnosti je tako znašala 8053 N/mm^2 , 5-percentil pa 7140 N/mm^2 .

Ugotovimo lahko, da se od lupine do lupine prav tako razlikujejo tudi vrednosti porušitvene trdnosti. Te se gibljejo od $79,58 \text{ N/mm}^2$ pri lupini B3 pa vse do $96,46 \text{ N/mm}^2$ pri lupini B2. Povprečna vrednost porušitvene trdnosti za vse lupine je znašala $86,5 \text{ N/mm}^2$, 5-percentil vrednosti pa $75,2 \text{ N/mm}^2$.

Sile porušitve lupin se gibljejo od 469 N pri lupini B3, ki je imela odvzet material v kritični točki lupine, pa vse do 1260 N pri lupini A.

Povprečna vrednost strižne trdnosti vezane plošče znaša $3,2 \text{ N/mm}^2$.

4.2 PRIMERJAVA DEFORMACIJ IZ SIMULACIJE IN DEJANSKEGA PREIZKUSA SEDEŽNE LUPINE

V preglednici 4 je prikazana primerjava vrednosti deformacij, pridobljenih z računalniško simulacijo obremenitve lupin in tistih, pridobljenih z dejanskimi preizkusom na napravi Zwick.

Preglednica 4: Primerjava deformacij iz simulacije in dejanskega preizkusa sedežne lupine

								
	Lupina A		Lupina B1		Lupina B2		Lupina B3	
Obremenitev (N)	Z*	SW*	Z*	SW*	Z*	SW*	Z*	SW*
100	10.2	8.8	13.8	14.0	11.7	11.8	16.8	18.2
200	19.8	17.7	27.7	28.0	23.3	23.5	34.1	36.4
300	29.3	26.5	42.5	42.0	35.9	35.3	53.8	54.6
400	39.0	35.3	57.1	56.0	48.3	47.0	75.4	72.9
500	48.1	44.2	75.2	70.0	60.9	58.8		
600	56.8	53.0	96.7	85.0	75.5	70.5		
700	65.7	61.8	118.4	99.0	92.4	82.3		
800	74.7	70.7			109.5	94.0		
900	84.0	79.5			130.4	105.8		
1000	92.9	88.3						
1100	101.9	97.2						
1200	113.0	106.0						

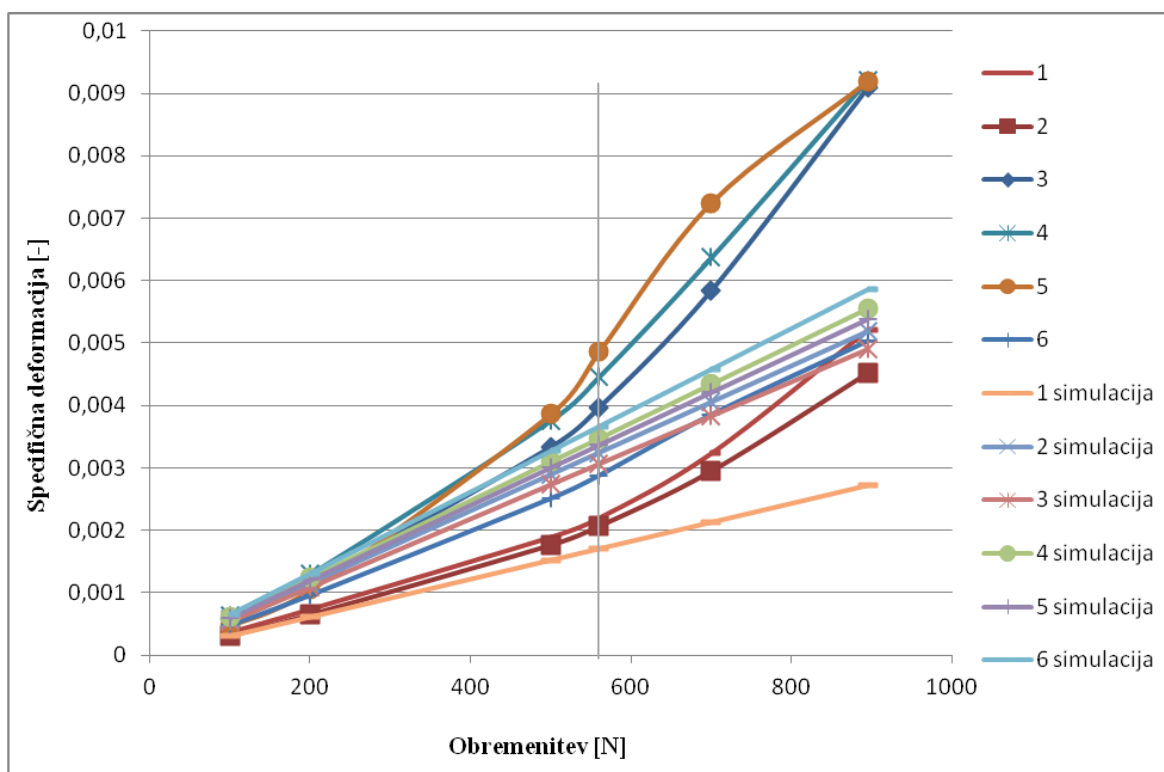
Z*..... Zwick - dejanska deformacija

SW*... SolidWork Simulation - simulacija

Iz zgornje razpredelnice lahko ugotovimo, da so vrednosti deformacij pri manjših obremenitvah zelo podobne, pri večjih obremenitvah pa prihaja do večjih odstopanj.

4.3 PRIMERJAVA DEFORMACIJ IZ SIMULACIJE IN MERITEV Z UPOROVNIMI LISTIČI

Na sliki 22 je prikazana primerjava specifičnih deformacij iz simulacije in meritev z uporovnimi lističi. Kot je razvidno iz slike, se specifična deformacija povečuje z obremenitvijo; zveza med njima je v primeru simulacije linearna, saj so tu upoštevane le elastične deformacije. V primeru dejanskega preizkusa pa je zveza linearna le v začetnem delu obremenjevanja, ko dosežemo območje plastične deformacije, pa se začnejo vrednosti specifične deformacije povečevati hitreje od vrednosti obremenitev.



Slika 22: Primerjava deformacij iz simulacije in meritev z uporovnimi lističi

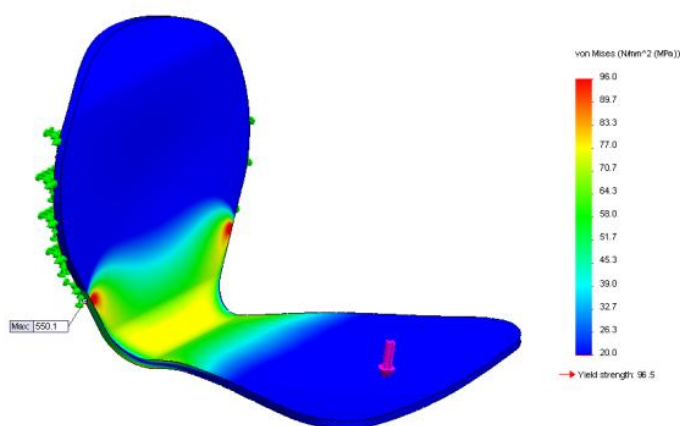
4.4 PRIMERJAVA KRITIČNIH TOČK UGOTOVLJENIH S SIMULACIJO TER PRI DEJANSKEM PREIZKUSU

Pri obremenjevanju lupin z napravo Zwick je do porušitev pri vseh lupinah prišlo v območju prehoda med sediščem in naslonom. Porušitev se je pokazala v obliki razplastitve ali pa je prišlo do porušitve zunanjega sloja (slika 23).



Slika 23: Razplastitev (levo) in natezna porušitev zunanjega sloja (desno)

V primeru simulacije so se maksimalne napetosti pojavile tik za vpetjem lupine, manj kritično pa je bilo območje prehoda med sediščem in naslonom (slika 24).



Slika 24: Računalniška simulacija napetosti pri obremenitvi

5 RAZPRAVA

Preizkušali smo obnašanja ukrivljenih sedežnih lupin po standardu SIST EN 15373: 2007, ki predpisuje zahteve za sedežno pohištvo, ki ni za domačo uporabo. Poleg omenjenega standarda smo na lupinah izvedli tudi porušitveni preizkus ter preizkus z odvzemom materiala v kritičnih točkah lupin. Deformacije smo vzporedno merili tudi s pomočjo uporovnih lističev, ki smo jih pritrdili na kritične točke lupin. Materialu smo izmerili tudi upogibno in strižno trdnost, nato pa te podatke uporabili pri računalniški simulaciji obremenitve sedežnih lupin.

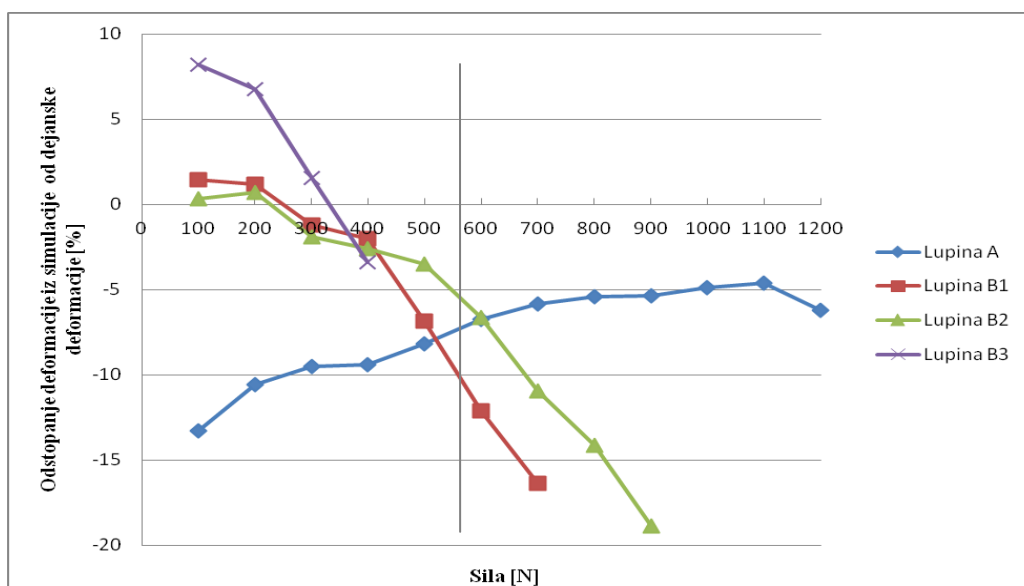
Rezultati iz merjenja lastnosti materiala testiranih sedežnih lupin so pokazali relativno veliko variacijo tako v vrednostih elastičnega upogibnega modula, kot tudi v vrednostih porušitvene trdnosti materiala posameznih lupin. Lupine so bile namreč izdelane v istem kalupu pri enakih pogojih (temperatura stiskanja, čas stiskanja, lepilo ter material).

Razlogov za tako velika odstopanja v vrednostih je lahko več. Možne so manjše razlike v količini nanosa lepila, pri lepilnem spoju lahko prav tako nastanejo različno veliki zračni mehurčki, lahko prihaja tudi do manjših razlik v času stiskanja. Do razlik verjetno prihaja tudi zaradi nehomogenosti materiala, saj so bile vidne različne usmeritve vlaken v zunanjem sloju furnirja. Večji faktor pa predstavlja tudi razlika v zmanjšani debelini zunanjega, vzdolžno usmerjenega sloja furnirja, zaradi katerega posledično prihaja do manjše upogibne trdnosti vezane plošče. Površine sedežnih lupin se namreč po končanem stiskanju brusi na krtačnem brusilnem stroju, ki neenakomerno pobrusi/ stanjša zunanji sloj furnirja.

Ko smo na posamezni lupini izvedli vse potrebne meritve, smo lupino na koncu obremenili do porušitve. Ugotovili smo, da so vse lupine močno predimenzionirane, saj so končne vrednosti presegale po standardu potrebnih 560 N. Vrednosti so se tako gibale od 732 N pri lupini B1, pa vse do 1260 N pri lupini A. Ravno lupina A je imela na kritičnih točkah lupine največ materiala. Ker so lupine tipa B presegale vrednosti po standardu kljub veliko manjši količini materiala v kritičnih območjih, smo se odločili lupini še dodatno odvzeti material. Širina vratu je pred preizkusom z odvzemom materiala znašala 200 mm.

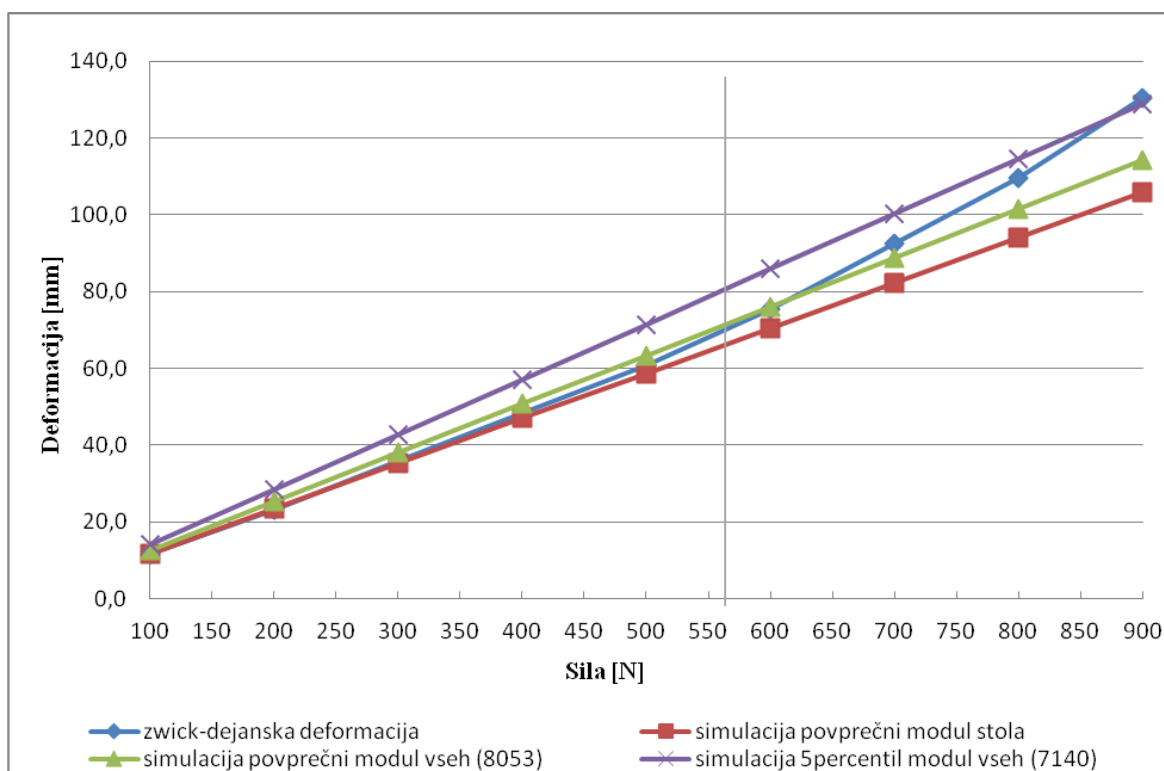
V prvem delu smo na kritičnem delu lupine odvzeli del naslona v širini 50 mm (slika 16) ter nato naslon obremenili do sile 560 N. Ker je lupina to obremenitev prestala, smo v naslednjem poizkusu na kritični točki odvzeli še dodatnih 30 mm, skupno torej 80 mm materiala, kar je predstavljalo kar 40 % prvotne širine vratu. Do porušitve je v tem primeru prišlo pri sili 469 N. Ta preizkus je pokazal, da so lupine še vedno predimenzionirane ter da si lahko oblikovalci in konstruktorji pri oblikovanju lahko privoščijo še mnogo drznejše oblike lupin.

Pri primerjavi deformacij iz simulacije in dejanskega preizkusa lupin smo ugotovili, da so si vrednosti pri nizkih obremenitvah zelo podobne. Do večjih odstopanj je prišlo šele pri višjih obremenitvah. Glavni razlog temu so omejitve programa SolidWorks, kjer je pri izračunih možna samo linearna elastična analiza. V območju, v katerem presežemo mejo proporcionalnosti materiala in se pojavijo še plastične deformacije, pa se izrazijo večje razlike v vrednostih. Ta razlika je najbolj nazorno prikazana s primerjavo vrednosti pri lupini B2. Tu je bila do obremenitve 500 N vrednost simulirane deformacije le 3 % večja kot pri obremenjevanju na napravi Zwick. Proti koncu obremenjevanja pa se odstopanja močno povečajo, saj pri obremenitvi 900 N simulacija prikazuje kar 19 % manjšo deformacijo v primerjavi z realnih testom (slika 25).



Slika 25: Odstopanje simulacije od dejanske vrednosti

Na sliki 26 je prikazana primerjava deformacij pri testiranju lupine B2 na napravi Zwick in pri simulaciji z uporabo različnih modulov elastičnosti. Iz grafa je razvidna smiselnost uporabe 5-percentila vrednosti modula elastičnosti, saj na ta način v simulaciji predvidimo večje deformacije, kot se kasneje lahko zgodijo pri realnih testiranjih. Pri uporabi povprečnega modula elastičnosti bi namreč predvideli manjše deformacije, kot bi se nato zgodile pri dejanskih preizkusih, faktor varnosti pa bi se zato močno zmanjšal.



Slika 26: Primerjava deformacije lupine B2 pri dejanskem testiranju in pri simulaciji z uporabo različnih elastičnih modulov (povprečni za stol, povprečni za vse lupine skupaj ter 5-percentil vseh stolov skupaj)

Pri primerjavi deformacij iz simulacije in meritvijo z uporovnimi lističi smo opazili trend naraščanja deformacij z naraščajočo obremenitvijo, sicer pa smo dobili zelo nekonsistentne rezultate. Možnih razlogov za to je več, med samim pritrdjevanjem uporovnih lističev je lahko prihajalo do nezadostne ali neenakomerne zlepljenosti na površino lupine, lepilo je lahko (neenakomerno) ojačalo površino. Krčenje in raztezanje lističev je v veliki meri odvisno od zunanjega sloja furnirja, ta pa je bil neenakomerne debeline zaradi postopka obdelave površine. Poleg tega uporovni lističi merijo zelo majhne deformacije, tako pa je možnost odstopanj zaradi nehomogenosti lesa, razpok v lesu, zelo velika.

Pri ugotavljanju kritičnih točk lupin smo primerjali rezultate s simulacij ter dejanskega preizkusa. Ugotovili smo, da so se v primeru računalniške simulacije maksimalne napetosti pojavile tik za vpetjem lupine, sledilo je območje prehoda med sediščem in naslonom (slika 24). Pri dejanskem obremenjevanju pa je porušitve lupin vedno prišlo v območju prehoda med sediščem in naslonom, medtem ko na območju vpetja ni bilo vidnih porušitev. Porušitev v prehodu med sediščem in naslonom se je pokazala v obliki razplastitve ali pa je prišlo do porušitve zunanjega sloja (slika 23). Razplastitev se je najverjetneje pojavila kot posledica napetosti pravokotno na smer vlaken, s tem pa je prišlo do porušitve lesa oziroma lepilnega spoja. Do porušitve zunanjega sloja pa je verjetno prišlo zaradi nateznih napetosti zunanjih slojev pri upogibu. Pri simulaciji smo uporabili poenostavitve, da je material homogen z izotropnimi lastnostmi. Tako je na prehodu med sediščem in naslonom simulacija pokazala natezne porušitve, pri dejanskem preizkusu pa je najpogosteje prišlo do razplastitve, ki je posledica napetosti v smeri pravokotno na plasti furnirja, kjer pa ima les izrazito nižjo trdnost.

Pri dejanskem preizkusu se območje pri vpetju lupine ni izkazalo kot kritično. Glavni razlog temu je najverjetneje dejstvo, da je vpetje lupine pri simulaciji popolnoma fiksno, pri dejanskem preizkusu pa je tu prihajalo do manjših odmikanj, zdrsov lupine iz vpetja, ter posledično do sprostitve napetosti v tem območju.

6 SKLEPI

Na podlagi rezultatov opravljene raziskave lahko oblikujemo naslednje sklepe:

- Vse testirane lupine so pod obremenitvijo dosegle vrednosti, ki jih predpisuje standard SIST EN 15373: 2007.
- Lastnosti materiala testiranih sedežnih lupin so močno variirale tako v vrednostih elastičnega upogibnega modula, kot tudi v vrednostih porušitvene trdnosti materiala. Možni vzroki variacije lastnosti materiala so lahko razlike v količini nanosa lepila, nastanek zračnih mehurčkov znotraj lepilnega spoja, različna usmeritev vlaken v zunanjem sloju, neenakomerna debelina zunanjega sloja furnirja ter nehomogenost furnirja.
- Vse testirane lupine so bile predimenzionirane, saj je porušitveni test pokazal, da so bile vrednosti sil ob porušitve tudi do dvakrat večje, kot jih predpisuje standard. S preizkusom z odvzemom materiala pa smo prišli do sklepa, da si lahko oblikovalci in konstruktorji pri oblikovanju lahko privoščijo še mnogo drznejše oblike lupin, ki pa bi še vedno ustrezale zahtevam standarda.
- Z računalniško simulacijo je bilo mogoče dobro napovedati deformacijo, ki jo povzroči obremenitev naslona. Do večjih odstopanj pri primerjavi deformacij iz simulacije in dejanskega preizkusa lupin je zaradi omejitev programa SolidWorks prišlo šele po pojavu plastičnih deformacij pri večjih obremenitvah. Za korektno primerjavo pri velikih obremenitvah bi morali uporabiti programe, ki omogočajo geometrijsko in materialno nelinearno analizo.
- Z uporabo 5-percentila vrednosti modula elastičnosti pri simulaciji lahko povečamo faktor varnosti, saj na ta način predvidimo večje deformacije, kot se lahko kasneje zgodijo pri realnih testiranjih pri večini izdelkov.

- Pri ugotavljanju kritičnih točk lupin smo ugotovili, da se te nahajajo na prehodu med sediščem in naslonom, porušitev pa se pokaže v obliki razplastitve ali kot porušitev zunanega sloja. Pri računalniški simulaciji se kritične točke nahajajo tudi tik za vpetjem lupine.

Raziskave na tem področju so nakazale nove izzive in naloge, ki bi jih bilo potrebno podrobneje raziskati.

7 VIRI

Ant chair. Replicate.

http://fashion.savebrand.net/sites/files/fashion/images/Chairs-ant_chair_web.jpg

(17.9.2013)

Charles Eames LCM Lounge Chair Birch 1950's. Just in Modern.

<http://justinmodern.blogspot.com/2011/11/charles-eames-lcm-lounge-chair-birch.html>

(17.9.2013)

Dewiel L. L. 1982. Stuhle und andere Sitzmobel, München: 207 str.

Eckleman C. A. 1966. A Look at The Strength Design of Furniture. Forest product journal, 16, 3: 21-24

Eckleman C. A. 1969. Analysis and design of furniture frames. Wood Science and Technology, 3: 239-255

EN 310:1993 -Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength

Gustafsson S. I., 1997. Optimising ash wood chairs. Wood Science and Technology Volume 31, Number 4: 291-301

Hrovatin J., Kušar J. 1996. Stol REX – Najuspešnejši slovenski pohištveni oblikovalski dosežek. Les, 48, 1/2: 11-18

Kitek Kuzman M. 2013. Laboratorij za preizkušanje pohištva – pedagoško in raziskovalno delo. Oddelek za lesarstvo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 15 str.

- Kralj N., Prostorsko krivljena vezana plošča in okvir za njeno vsaditev, Patentna isprava, broj 18240, 11.1954
- Lapanja D. 2005. Vpliv vlažnosti na postopek krivljenja in kakovost krivljenih elementov
Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 47 str.
- Ložar A. 1990. Tehnološki vplivi razvoja industrijskega oblikovanja stola "Rex" avtorja prof. Nika Kralja, Diplomaska naloga. Ljubljana, Biotehniška fakulteta VTOZD za lesarstvo: 31 str.
- Model No. 41 lounge chair. Heilbrunn Timeline of Art History.
<http://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/2000.375> (17.9.2013)
- Nico Krajl Rex Chair, old Version. Okay Art.
<http://www.okayart.com/en/product/nico-krajl-rex-chair-old-version/> (17.9.2013)
- Prekrat S., Smardzewski J. 2010. Effect of glueline shape on strength of Mortise and Tenon Joint. Drvna industrija, 61, 4: 223-228
- Rudolf S. 2008. Kakovost pohištva in standardi. Les, 60:155-156
- SIST EN 15373: 2007 Pohištvo- Trdnost, trajnost in varnost – Zahteve za sedežno pohištvo, ki ni za domačo uporabo
- SIST EN 1728:2002: Pohištvo za domačo uporabo – Sedežno pohištvo – Preizkusne metode za ugotavljanje trdnosti in trajnosti
- Smardzewski J. 2009. Antropotechnical aspect of furniture design. Drvna industrija, 60, 1: 15-21
- Smulski S. 1997. Engineered Wood Products. Wisconsin, PFS Research Foundatio, 294 str.

Šernek M. 2007. Furnir in lepljen les. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici dr. Manji Kitek Kuzman in somentorju dr. Mirku Karižu za pomoč pri nastajanju in oblikovanju magistrske naloge.

Hvala recenzentu dr. Srečku Vratuši za strokovno recenzijo magistrske naloge.

Zahvaljujem se podjetju Sodimex d.o.o. za podarjene sedežne lupine.

Iskrena hvala tudi moji družini za vzpodbudo in podporo.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Gašper KRANJEC

**ANALIZA KONSTRUKCIJE SEDEŽNIH
ELEMENTOV IZ VEZANEGA LESA**

MAGISTRSKA NALOGA

Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2013

