

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Darko KUNC

**RAZVOJ TRDNOSTI UREA-FORMALDEHIDNEGA
LEPILNEGA SPOJA MED UTRJEVANJEM**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2009

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Darko KUNC

**RAZVOJ TRDNOSTI UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA
SPOJA MED UTRJEVANJEM**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**STRENGTH DEVELOPMENT OF THE UREA-FORMALDEHYDE
ADHESIVE BOND DURING CURE**

GRADUATION THESIS
Higher Professional Studies

Ljubljana, 2009

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Izvedbe meritev in testiranja preskušancev so bila opravljena na Univerzi v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, v laboratorijih Katedre za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomske naloge imenoval izr. prof. dr. Milana ŠERNEKA in za recenzenta diplomske naloge doc. dr. Sergeja MEDVEDA.

Mentor: izr. prof. dr. Milan ŠERNEK

Recenzent: doc. dr. Sergej MEDVED

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Darko KUNC

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*824.832
- KG strižna trdnost/temperatura stiskanja/urea-formaldehidno lepilo/katalizator
- AV KUNC, Darko
- SA ŠERNEK, Milan (mentor)/MEDVED, Sergej (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2009
- IN RAZVOJ TRDNOSTI UREA-FORMALDEHIDNEGA LEPILNEGA SPOJA MED
UTRJEVANJEM
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP XI, 44 str., 8 pregl., 14 sl., 20 vir., 8 pril.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Proučevali smo vpliv temperature stiskanja in deleža dodanega katalizatorja na rast strižne trdnosti urea-formaldehidnega (UF) lepilnega spoja med utrjevanjem. Preskušance iz bukovega furnirja (*Fagus sylvatica* L.) smo lepili z lepilom LENDUR-200. Debelina furnirja je bila 1.1 mm, vlažnost 7 % in nanos lepila 200 g/m². Testiranje preskušancev smo opravili z univerzalnim testirnim strojem Zwick Z100 po metodi »dinamika graditve strižne trdnosti« (DGST), prilagojeni po metodi »Automated Bonding Evaluation System« (ABES). Stroj je imel montirano manjšo vročo stiskalnico, v kateri smo preskušance lepili pri tlaku stiskanja 1,2 MPa. Utrjevanje UF lepilne mešanice, ki je vsebovala 100 delov UF lepila in 1 del suhega katalizatorja NH₄Cl, smo proučevali pri štirih različnih temperaturah stiskanja: 90, 100, 110 in 120 °C. Nato smo pri temperaturi stiskanja 100 °C proučevali utrjevanje štirih različnih UF lepilnih mešanic z enako količino UF lepila (100 delov), spreminjali pa smo delež dodanega katalizatorja: 0,1 del, 0,5 dela, 1 del, 2 dela. Čas stiskanja je bil od 20 do 180 s, pri eni lepilni mešanici pa do 600 s. Rezultati raziskave so pokazali, da se je strižna trdnost UF lepilnega spoja pri višjih temperaturah gradila hitreje kot pri nižjih temperaturah. Z naraščanjem deleža dodanega katalizatorja UF lepilni mešanici je naraščala tudi hitrost utrjevanja in graditve trdnosti lepilnega spoja. Lom po lesu se je pojavil, ko je adhezija med lepljencem in lepilom preseгла kohezijo lesa.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630*824.832
- CX shear strength/pressing temperature/urea-formaldehyde adhesive/catalyst
- AU KUNC, Darko
- AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/MEDVED, Sergej (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2009
- TI STRENGTH DEVELOPMENT OF THE UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE BOND DURING CURE
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO XI, 44 p., 8 tab., 14 fig., 20 ref., 8 ann.
- LA sl
- AL sl/en
- AB Influence of press temperature and proportion of added catalyst on growth shear strength of urea-formaldehyde (UF) adhesive bond during cure was investigated. Specimens of beech veneer (*Fagus sylvatica* L.) were glued with adhesive LENDUR-200. Thickness of veneer was 1.1 mm, moisture content 7 %, and adhesive coating 200 g/m². Specimens were tested with Zwick Z100 universal testing machine, by method »Dynamics of the Bond Strength Development« (DBSD), on a modified »Automated Bonding Evaluation System« (ABES) method. The machine had a mounted small hot-press, gluing specimens at compression pressure 1.2 MPa. Curing of UF adhesive mixture, which contained 100 parts of UF adhesive and 1 part of dry catalyst NH₄Cl, was investigated at 4 different pressing temperatures: 90, 100, 110, 120 °C. At pressing temperature 100 °C, curing of 4 different UF adhesive mixture having the same quantity of UF adhesive (100 parts), was investigated. The proportions of added catalyst: 0,1 part, 0,5 part, 1 part, 2 part were different. Pressing time was from 20 to 180 s, by one adhesive mixture to 600 s. Results showed that the strength development of UF adhesive bond developed quicker at higher temperatures than at lower ones. Increasing the proportion of added catalyst to the UF adhesive mixture, the strength of curing increased, so as the speed of the strength development of adhesive bond. Wood failure appeared, when adhesion between adherent and glue surpassed cohesion of wood.

KAZALO VSEBINE

| | str. |
|---|-------------|
| Ključna dokumentacijska informacija (KDI) | III |
| Key Words Documentation (KWD) | IV |
| Kazalo vsebine | V |
| Kazalo preglednic | VIII |
| Kazalo slik | IX |
| Kazalo prilog | X |
| Okrajšave in simboli | XI |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 OPREDELITEV PROBLEMA | 1 |
| 1.2 CILJ NALOGE..... | 1 |
| 1.3 DELOVNE HIPOTEZE | 2 |
| 2 PREGLED OBJAV | 3 |
| 2.1 SINTETIČNA LEPILA ZA LES | 4 |
| 2.1.1 Polikondenzacijska lepila za lepljenje lesa | 6 |
| 2.1.1.1 Urea-formaldehidno (UF) lepilo..... | 6 |
| 2.2 DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA UTRJEVANJE IN RAST TRDNOSTI UF LEPILNEGA SPOJA | 8 |
| 2.2.1 Sestava lepila | 8 |
| 2.2.1.1 Delež suhe snovi..... | 8 |
| 2.2.1.2 Osnovni sestavini UF lepila..... | 8 |
| 2.2.1.3 Katalizator | 9 |
| 2.2.2 Lastnosti lesa | 9 |
| 2.2.2.1 Anatomske lastnosti lesa | 10 |
| 2.2.2.2 Fizikalne lastnosti lesa..... | 10 |
| 2.2.2.3 Mehanske lastnosti lesa | 10 |
| 2.2.3 Parametri lepljenja | 11 |
| 2.2.3.1 Vlažnost furnirja..... | 11 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 2.2.3.2 | Nanos lepila | 11 |
| 2.2.3.3 | Temperatura lepljenja | 11 |
| 2.2.3.4 | Vmesni čas lepilne mešanice | 12 |
| 2.2.3.5 | Tlak stiskanja | 12 |
| 2.3 | RAZISKOVANJE UTRJEVANJA LEPILA | 13 |
| 2.3.1 | Ugotavljanje trdnosti lepilnega spoja z ABES in DGST | 13 |
| 2.3.2 | Dosedanje raziskave z ABES in DGST | 14 |
| 3 | MATERIAL IN METODE | 15 |
| 3.1 | MATERIALI | 15 |
| 3.1.1 | Preskušanci iz bukovega luščenega furnirja | 15 |
| 3.1.1.1 | Bukev (<i>Fagus sylvatica</i> L.) | 16 |
| 3.1.2 | Urea-formaldehidno lepilo | 17 |
| 3.1.3 | Katalizator amonijev klorid | 17 |
| 3.2 | METODA | 17 |
| 3.2.1 | Načrt za izvedbo testiranja | 18 |
| 3.2.2 | Priprava lepilne mešanice | 19 |
| 3.2.3 | Priprava preskušancev in nanos lepila | 20 |
| 3.2.4 | Izvedba testiranja | 21 |
| 3.2.5 | Merjenje temperature v lepilnem spoju s termočlenom | 22 |
| 3.2.6 | Meritve dimenzij strižne površine preskušancev | 22 |
| 3.2.7 | Ocena loma po lesu | 23 |
| 4 | REZULTATI | 24 |
| 4.1 | RAST STRIŽNE TRDNOSTI | 24 |
| 4.1.1 | Rast strižne trdnosti v odvisnosti od temperature stiskanja | 25 |
| 4.1.2 | Rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja pri različnih dodatkih katalizatorja | 26 |
| 4.2 | LOM PO LESU | 29 |
| 4.2.1 | Lom po lesu pri različnih temperaturah stiskanja | 29 |
| 4.2.2 | Lom po lesu pri različnih dodatkih katalizatorja | 30 |
| 4.3 | MERJENJE TEMPERATURE V LEPILNEM SPOJU | 32 |
| 5 | RAZPRAVA IN SKLEPI | 34 |
| 5.1 | RAZPRAVA | 34 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 5.1.1 | Graditev strižne trdnosti UF lepilnega spoja in deleža loma po lesu pri različnih temperaturah stiskanja | 34 |
| 5.1.2 | Strižna trdnost in delež loma po lesu pri različnih koncentracijah katalizatorja v UF lepilni mešanici | 36 |
| 5.2 | SKLEPI..... | 37 |
| 6 | POVZETEK..... | 40 |
| 7 | VIRI | 42 |

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

| | str. |
|---|------|
| Preglednica 1: Tipični parametri lepljenja z urea-formaldehidnimi lepili (Šernek, 2007).... | 7 |
| Preglednica 2: Temperatura stiskanja in število meritev pri različnih časih stiskanja | 18 |
| Preglednica 3: Koncentracija katalizatorja in število meritev pri različnih časih stiskanja | 18 |
| Preglednica 4: Nastavitev temperature na regulatorju..... | 22 |
| Preglednica 5: Povprečna strižna trdnost UF lepilnega spoja preskušancev glede na temperaturo stiskanja..... | 25 |
| Preglednica 6: Povprečna strižna trdnost UF lepilnega spoja preskušancev, ki so bili lepljeni z lepilnimi mešanicami z različno koncentracijo katalizatorja..... | 27 |
| Preglednica 7: Povprečne vrednosti loma po lesu glede na temperaturo stiskanja | 29 |
| Preglednica 8: Povprečne vrednosti loma po lesu pri različnih koncentracijah katalizatorja | 31 |

KAZALO SLIK

| | str. |
|--|------|
| Slika 1: Padanje pH vrednosti UF lepila po dodatku amonijevega klorida, odvisno od časa in temperature lepljenja (Resnik, 1989: 34) | 9 |
| Slika 2: Odvisnost časa želiranja UF lepilne mešanice od temperature lepljenja (Resnik, 1989: 33) | 12 |
| Slika 3: Preskušanelec za ugotavljanje strižne trdnosti UF lepilnega spoja (šrafirano) (Šernek in sod., 2009)..... | 15 |
| Slika 4: Priprava lepilne mešanice z metodo tehtanja | 19 |
| Slika 5: Pipeta za nanos lepila | 20 |
| Slika 7: Rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja pri temperaturi 100 °C v odvisnosti od časa stiskanja | 24 |
| Slika 8: Dinamika rasti strižne trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem glede na temperaturo stiskanja..... | 26 |
| Slika 9: Dinamika rasti strižne trdnosti UF lepila med utrjevanjem lepilnih mešanic glede na koncentracijo katalizatorja (C)..... | 28 |
| Slika 10: Lom po lesu UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja | 30 |
| Slika 11: Lom po lesu UF lepilnega spoja pri različnih koncentracijah katalizatorja (C)... | 32 |
| Slika 12: Naraščanje temperature v UF lepilnem spoju v odvisnosti od časa stiskanja in temperature stiskanja | 33 |
| Slika 13: Rast strižne trdnosti in deleža loma po lesu UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja | 35 |
| Slika 14: Rast strižne trdnosti in deleža loma po lesu UF lepilnega spoja pri različnih koncentracijah katalizatorja v UF lepilni mešanici | 37 |

KAZALO PRILOG

- Priloga A: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 90 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja).
- Priloga B: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)
- Priloga C: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 110 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)
- Priloga D: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 120 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)
- Priloga E: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 0,1 del katalizatorja)
- Priloga F: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 0,5 dela katalizatorja)
- Priloga G: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)
- Priloga H: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 2 dela katalizatorja)

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

OKRAJŠAVE:

- urea-formaldehid - UF
- Lendur 200 - L-200
- dinamika graditve strižne trdnosti - DGST
- Automated Bonding Evaluation System - ABES

SIMBOLI (enote):

- temperatura T (°C)
- strižna trdnost f_v (N/mm²)
- lom po lesu w (%)
- sila F (N)
- delež katalizatorja C (n-del)
- čas t (s)
- širina b (mm)
- dolžina l (mm)

1 UVOD

Lepljenje lesa je v lesni industriji ena izmed pomembnejših tehnoloških faz. Lepljenje lesa pomeni spajanje lepljencev med sabo s pomočjo lepila. Pri tem se ustvari trdnost lepilnega spoja, ki je v poenostavljenem smislu odvisna od kohezije lesa in lepila ter od adhezije med njima. Trdnost lepilnega spoja se tvori med procesom lepljenja oziroma stiskanja. Pri sobni temperaturi se trdnost lepilnega spoja tvori počasneje kot pri povišani temperaturi. Rezultat hladnega lepljenja je manjši izkoristek časa, slabša kvaliteta lepilnega spoja in manj ekonomična proizvodnja. Hitrejšo utrjevanje dosežemo s toplim ali vročim lepljenjem lesa in dodatkom katalizatorja lepilni mešanici.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Polikondenzacijska lepila za les utrjujejo na kemijsko fizikalen način. Utrjevanje je običajno izvedeno v vroči stiskalnici, kjer s pomočjo katalizatorja in povišane temperature pospešimo proces lepljenja. Lepilo utrjuje v odvisnosti od časa, in sicer se zadostna mehanska trdnost lepilnega spoja ustvari šele v zadnji fazi stiskanja. Čas stiskanja ne sme biti prekratek, če hočemo zagotoviti zadostno trdnost. Ne sme pa biti tudi predolg, saj to predstavlja časovne in energijske izgube, saj po nepotrebnem segrevamo že utrjeno lepilo. Predolgo stiskanje lahko vpliva tudi na padec strižne trdnosti spoja, saj so nekatera lepila podvržena termični degradaciji.

1.2 CILJ NALOGE

Glavni cilj diplomske naloge je ugotoviti vpliv časa stiskanja na rast strižne trdnosti urea-formaldehidnega (UF) lepilnega spoja in na osnovi tega določiti optimalen čas lepljenja. V ta namen bomo proučevali vpliv sestave lepilne mešanice, temperature stiskanja in čas stiskanja na strižno trdnost lepilnega spoja. Ocenjevali bomo tudi lom po lesu v odvisnosti od rasti strižne trdnosti in izmerili hitrost naraščanja temperature v lepilnem spoju.

Praktični namen raziskave je ugotoviti, kdaj je trdnost lepilnega spoja zadostna, da lahko lepljenke vzamemo iz stiskalnice, in kateri parametri so najugodnejši za lepljenje z UF lepili.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da se trdnost UF lepilnega spoja začne graditi šele po določenem času stiskanja, ki je v povezavi s časom želiranja lepila. Nato trdnost proporcionalno raste in pri daljših časih postaja konstantna oziroma lahko celo pade, če so časi stiskanja predolgi, ter pride do nezaželenih sprememb (razgradnja določenih komponent) v lesu in lepilnem spoju. Predvidevamo, da večja količina katalizatorja pospeši reakcijo utrjevanja in s tem hitrejšo graditev trdnosti. Podoben vpliv pa ima tudi povišana temperatura stiskanja. Lom po lesu pričakujemo, ko bo adhezija med lepilom in lepljencem večja od kohezije bodisi lesa bodisi čistega lepila.

2 PREGLED OBJAV

Utrjevanje urea-formaldehidnega (UF) lepila je kemijski in fizikalni proces. Kemijski del utrjevanja predstavlja nadaljevanje pri izdelavi lepila prekinjene reakcije polikondenzacije, fizikalni del pa oddajanje disperzijskega sredstva iz lepilne mešanice in pri reakciji nastale vode (Resnik, 1989).

Usklajenost kemijskega in fizikalnega procesa zagotavljajo ustrezni utrjevalci in drugi dodatki, dovedena toplotna energija, čas in tlak lepljenja (Resnik, 1989).

Pri izdelavi sintetičnih lepil prekinejo sintezo v fazi, ko je produkt še vodotopen. Potek reakcije prekinejo tako, da raztopino nevtralizirajo z lugom, da je pH 7,5–8 (Mervič, 1962).

Pri procesu utrjevanja, v katerem UF lepilo preide iz tekočega v trdno fizikalno stanje, se ustvari kohezija v lepilu in adhezija med lepilom in lepljencem. Med utrjevanjem lepila se zaradi povezovanja molekul viskoznost lepila povečuje. Ko začne viskoznost lepila naraščati proti neskončni vrednosti, govorimo o želiranju lepila, ki predstavlja prehod med tekočim in gel stanjem. Z nadaljevanjem procesa utrjevanja se molekule lepila vse bolj povezujejo v tridimenzionalno strukturo (zamrežijo) in na koncu dosežejo vitifikacijo (posteklenitev). Spremembe pri utrjevanju lepila lahko raziskujemo z različnimi metodami, ki zaznajo kemijske in fizikalne spremembe v lepilu (Jošt in Šernek, 2009).

Zadostna mehanska trdnost lepilnega spoja se ustvari šele v zadnji fazi lepljenja, ko začne UF lepilo zamreževati. Čas stiskanja zato ne sme biti prekratek, če hočemo zagotoviti trdnost, ki bo čvrsto povezovala lepljene elemente v lepljencu. Ne sme pa biti predolg, ker lahko to vpliva na padec trdnosti lepilnega spoja, saj so UF lepila podvržena termični degradaciji. Predvsem pa predolg proces stiskanja poveča stroške za porabljeno toplotno energijo in predstavlja ozko grlo zaradi nizke kapacitete. V proizvodnji poskušajo kapaciteto lepljenja povečati s povišanjem temperature stiskalnice, kar pospeši utrjevanje lepila. Pri višjih temperaturah stiskanja so stroški energije za gretje višji, hkrati pa so večje

tudi toplotne izgube. Tako v proizvodnji vedno iščejo kompromis med potrebno kapaciteto, stroški proizvodnje in kvaliteto lepljenega proizvoda (Jošt in Šernek, 2009).

Šernek (1999) v raziskavi ugotavlja, da je strižna trdnost lepilnega spoja večja pri preskušancih, ki so bili lepljeni iz furnirja z nižjo vlažnostjo. Pri višjih vlažnostih furnirja (11,0 in 13,1 %) se je trdnost zmanjšala skoraj za petino. Opažen trend je bil prisoten tako pri klasičnem vročem lepljenju kot pri visokofrekvenčnem lepljenju. Nadalje avtor navaja, da obstaja pozitivna korelacija med strižno trdnostjo in lomom po lesu. Večji ko je bil delež loma po lesu, večja je bila strižna trdnost UF lepilnega spoja.

Jošt (2009) je v raziskavi proučeval dinamiko graditve strižne trdnosti (DGST) fenol-formaldehidnega lepila in ugotovil, da se je strižna trdnost začela graditi prej, kot se je pojavil lom po lesu, saj je bila takrat adhezija med molekulami lepila in lesa manjša od kohezije. Ko se je temperatura v lepilnem spoju povečala, se je pojavil lom po lesu, ki je skupaj s strižno trdnostjo hitro naraščal. Maksimalna strižna trdnost in maksimalen delež loma po lesu sta bila dosežena skoraj hkrati, in sicer v trenutku, ko je bila trdnost lepilnega spoja višja od trdnosti lesa.

Na hitrost utrjevanja vpliva tudi hitrost rasti temperature v lepilnem spoju. Le-ta se z večanjem debeline lepljencev zmanjšuje, zato je lepilo v spoju dlje časa izpostavljeno nižji temperaturi kot površina lepljenca. Zaradi počasnejše rasti temperature v spoju je manjša tudi hitrost utrjevanja lepila, s čimer se poveča potreben čas stiskanja lepljenca (Kariž, 2005).

2.1 SINTETIČNA LEPILA ZA LES

Sintetična lepila za lepljenje lesa se v lesni industriji veliko uporabljajo in prevladujejo nad lepili iz naravnih surovin. Osnovna surovina za proizvodnjo sintetičnih lepil so proizvodi petrokemije, naravni plin in zrak. Naravni plin je izhodna surovina za sintezo metanola, ki je izhodna surovina za sintezo formaldehida. Za sintezo sečnine pa se za izhodno surovino uporablja amoniak (Resnik, 1989).

Lepila utrjujejo na kemijski, fizikalen ali kombiniran način. Utrjevanje na kemijski način poteka z dvokomponentnem sistemom. Lepila se ločijo glede kemijske reakcije na polimerizacijska, polikondenzacijska in poliadiacijska lepila.

Utrjevanje lepil lahko poteka pri normalni in povišani temperaturi. Lepljenje lesa je razdeljeno v tri temperaturne razrede:

- hladno lepljenje, kjer so temperature nižje od 35 °C,
- toplo lepljenje, kjer so temperature od 35 do 90 °C,
- vroče lepljenje, kjer so temperature nad 90 °C.

Primerjava hladnega in vročega lepljenja pokaže, da ima posamezen postopek tako prednosti kot pomanjkljivosti. Pomanjkljivosti hladnega lepljenja oziroma lepljenja pri nižjih temperaturah so:

- uporaba je omejena na zaprte prostore (razen pri RF, MUF in PUR),
- običajno večji nanosi lepila,
- daljši časi stiskanja,
- nižja stopnja utrjenosti lepila,
- slabša trpežnost in lahko tudi nižja trdnost,
- daljši čas med lepljenjem in nadaljnjo obdelavo.

Prednosti vročega lepljenja so:

- širša uporabnost lepljencev (na prostem, pokritem in notranjem prostoru),
- nižja teža plošč zaradi bolj suhega furnirja,
- časi lepljenja so bistveno krajši,
- večja stopnja utrjenosti lepila in zamreženja,
- večja trpežnost spoja,
- možnost hitrejše nadaljnje obdelave kot pri nižjih temperaturah.

Poleg veliko dobrih lastnosti vročega lepljenja so tudi nekatere pomanjkljivosti: dražja, zahtevnejša tehnološka oprema, sušenje furnirja na nižjo vlažnost, furnir se lomi in je

krhek zaradi nižje vlažnosti, vnos napetosti zaradi temperaturnega in tlačnega gradienta, kondicioniranje plošč in večji vprešek zaradi plastifikacije lesa (Šernek, 2007).

2.1.1 Polikondenzacijska lepila za lepljenje lesa

Med polikondenzacijska lepila uvrščamo urea-formaldehidna (UF), melamin-formaldehidna (MF), fenol-formaldehidna (FF), resorcinol-formaldehidna (RF), poliamidna, poliestrska in silikonska lepila za les.

Polikondenzacija je kemijski proces združevanja nizko molekularnih spojin v visoko molekularne produkte. Reakcija polikondenzacije, ki poteka z nadziranjem temperature, poteka na grobo v treh fazah (Resnik, 1989: 12):

- faza A – rezol stanje, v kateri so produkti topni v vodi;
- faza B – rezitol stanje, v kateri so produkti netopni, vendar nabreknejo in se talijo;
- faza C – rezit stanje, produkti so netopni, ne nabreknejo in se ne talijo.

Posebna oblika polikondenzacijskih lepil so aminoplasti (UF in MF). Prednosti aminoplastov so predvsem začetna topljivost v vodi, trdota, negorljivost, dobre toplotne lastnosti, brezbarven lepilni spoj in prilagodljivost različnim zahtevam uporabe, pomanjkljivosti pa so nezadostna odpornost proti vlagi in vodi. Uporaba je primerna predvsem v zaprtih prostorih (Resnik, 1989).

2.1.1.1 Urea-formaldehidno (UF) lepilo

Za lepljenje lesa z UF lepilom je potrebno upoštevati parametre za doseganje kvalitetno utrjenega lepilnega spoja in visoko končno trdnost lepilnega spoja (preglednica 1).

Preglednica 1: Tipični parametri lepljenja z urea-formaldehidnimi lepili (Šernek, 2007)

| Parameter lepljenja | Vrednost |
|-----------------------------|--------------------------|
| Vlažnost lesa | 6–8 % |
| Nanos lepila | 150–200 g/m ² |
| Temperatura stiskanja | 90–120 °C |
| Vmesni čas lepilne mešanice | do 45 min |
| Tlak stiskanja | 2–15 barov |

UF lepilo je namenjeno za lepljenje furnirnih in ivernih plošč, proizvodnjo ploskovnega pohištva in lepljenje polproizvodov. Lepilo pa ni primerno za izdelke, ki so izpostavljeni vlagi, vroči vodi in tropski klimi.

Prednost UF lepil je enostavna uporaba, brezbarvni in trdni lepilni spoji ter duromernost. Proizvodnja lepila v prašnati obliki omogoča daljšo življenjsko dobo. Lepilo se uporablja za hladna, topla in vroča lepljenja. Poleg naštetih dobrih lastnosti so tudi cenovno ugodna, zato je tudi uporaba UF v lesni industriji razširjena.

Med slabe lastnosti štejemo slabo odpornost proti vlagi, kar se izboljšuje z modifikacijo z drugimi lepili, predvsem z melaminskimi. Površine za nanos lepila morajo biti ravne in manj hrapave, preveliki nanosi povečujejo debelino lepilnega sloja, kar zmanjšuje trdnost lepilnega spoja. Lepilni spoj je trden in pri obdelavi obrablja rezila. Velik problem je tudi sproščanje formaldehida, ki povzroča solzenje in je zdravju škodljiv (kancerogen).

Obstojnost lepila je v veliki meri odvisna od načina skladiščenja. Za daljšo obstojnost skladiščimo lepilo pri nižjih temperaturah, saj se obstojnost z višanjem temperature niža. Povišana temperatura pospeši staranje lepila, vrednost pH se znižuje, to pa pospešuje kondenzacijo. Lepilu se s staranjem povečuje viskoznost.

Samo lepilo pri lepljenju ne utrjuje, zato je potrebno dodati katalizator, ki sproži in pospeši kemijsko reakcijo kondenzacije. Katalizator (običajno kisel) ima nalogo zmanjšanja vrednosti pH. Uporaba vrste katalizatorja je odvisna od temperature stiskanja, za hladna lepljenja se uporablja bolj agresivni z nižjim pH kot za lepljenja v toplem in vročem načinu. Pri visokih temperaturah toplota dodatno pospeši utrjevanje. Lepila za vroče

lepljenje imajo daljši čas uporabe tudi po dodatku katalizatorja kot pripravljeno lepilo za hladno lepljenje. Za hladna lepljenja je primeren ločen nanos katalizatorja ter lepila zaradi pospešene reakcije in kratkega časa uporabnosti pripravljene lepilne mešanice (Resnik, 1989).

2.2 DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA UTRJEVANJE IN RAST TRDNOSTI UF LEPILNEGA SPOJA

2.2.1 Sestava lepila

2.2.1.1 Delež suhe snovi

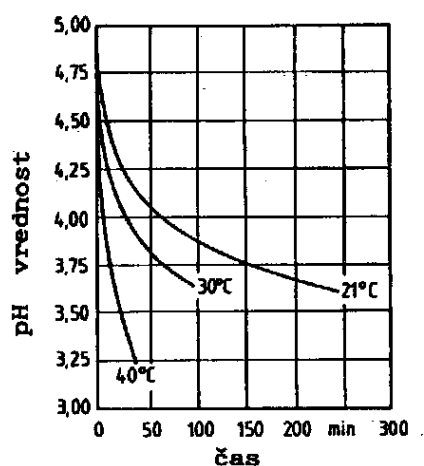
Sestava lepila vpliva na proces utrjevanja in končno trdnost UF lepilnega spoja. Delež suhe snovi v lepilni mešanici določa količino dejanskega veziva, ki ostane po utrjevanju lepilnega spoja. Običajno je delež suhe snovi pri UF lepilih med 45 in 70 %. Kariž (2005) je pri proučevanju dveh FF lepil z različnim deležem suhe snovi ugotovil, da se večja trdnost razvije pri FF lepilu z večjim deležem suhe snovi pri enakih nanosih lepila.

2.2.1.2 Osnovni sestavini UF lepila

Osnovni sestavini UF lepila sta urea in formaldehid. Urea ali sečnina ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) je kristalen higroskopičen prah bele barve, brez vonja in topen v vodi. Formaldehid (HCHO) pa je plin neprijetnega vonja, ki povzroča draženje sluznice, solzenje in je kancerogen. V UF lepilih je tudi nekaj prostega formaldehida, ki pospešuje reaktivnost. Več prostega formaldehida vsebujejo UF lepila za hladno lepljenje (Resnik, 1989).

2.2.1.3 Katalizator

Utrjevanje lepila pospešimo z dodatkom kislega katalizatorja, z dovajanjem toplote ali s kombinacijo obeh, kar je v praksi najpogosteje (Šernek in Kutnar, 2009). V raziskavi smo uporabili katalizator amonijev klorid, ki pospeši kondenzacijo UF lepila. Ko lepilu dodamo amonijev klorid, pH vrednost začne padati, še posebej hitro pri višjih temperaturah (slika 1).



Slika 1: Padanje pH vrednosti UF lepila po dodatku amonijevega klorida, odvisno od časa in temperature lepljenja (Resnik, 1989: 34)

2.2.2 Lastnosti lesa

Glavne lastnosti lesa, ki vplivajo na utrjevanje in graditev trdnosti lepilnega spoja, so:

- anatomske lastnosti lesa (rani/kasni les, beljava/jedrovina, smer lesnih vlaken, juvenilni/adultni les, poroznost),
- fizikalne lastnosti lesa (gostota, higroskopnost, vlažnost, ravnovesna vlažnost, krčenje/nabrekanje),
- kemijske lastnosti lesa (celuloza, hemiceluloza, lignin, ekstraktivi, pH vrednost),
- mehanske lastnosti lesa (trdnost lesa).

2.2.2.1 Anatomske lastnosti lesa

Lepilo zaradi večjih lumnov v ranem lesu bolje penetrira v rani les kot v kasni les. Lepilo tudi lažje penetrira v beljavo kot v jedrovino, saj jedrovina vsebuje različne ekstraktive (celice niso aktivne (prevodne) kot sicer v beljavi). Visoka poroznost je moteča, saj se tvori pusti lepilni spoj (Jošt, 2009). Penetracija lepila v bukov les je boljša v tangencialni smeri, slabša pa je v radialni smeri. Na lepljenje ima velik vpliv kot, pod katerim potekajo lesna vlakna.

2.2.2.2 Fizikalne lastnosti lesa

Gostota lesa pomembno vpliva na lepljenje lesa. Višja gostota pomeni večjo trdnost. Pri višji gostoti se začne permeabilnost zmanjševati. Lepilo pri nižji permeabilnosti slabše penetrira v les. Les, ki je manj higroskopičen, tudi manj deluje in napetosti v lepilnem spoju bodo manjše. Nizka higroskopičnost pa povzroča slabšo omočitev površine. Vlažnost lesa zelo vpliva na procese lepljenja lesa in trdnost lesa. Pomembna je tudi toplotna prevodnost lesa, predvsem za hitro segrevanje lepilnega spoja.

2.2.2.3 Mehanske lastnosti lesa

Mehanske lastnosti lesa so zelo odvisne od drevesne vrste in tudi znotraj posamezne vrste lesa so zelo variabilne. Na trdnost najbolj vpliva gostota lesa, gostejši les ima večjo trdnost. Trdnost lesa z naraščajočo vlažnostjo pada.

2.2.3 Parametri lepljenja

2.2.3.1 Vlažnost furnirja

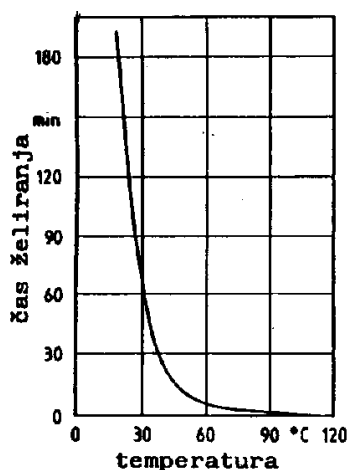
Vlažnost furnirja mora biti med 6 in 8 %, pri višjih vlažnostih je kvaliteta lepljenja slabša. Z naraščanjem vlažnosti lepilnega spoja trdnost UF lepilnega spoja pada.

2.2.3.2 Nanos lepila

Nanos UF lepila je lahko enostranski ali obojestranski, nanos komponent lepila in utrjevalca pa skupen ali ločen. Nanos je odvisen od deleža suhe snovi in v praksi znaša od 150 do 200 g/m², pogosto 180 g/m². Prevelik nanos ima posledico debele utrjene filme, kar pa zmanjšuje trdnost lepilnega spoja, manjša adhezija med lepilom in lesom ter nepotrebni stroški večjih količin lepila. Majhen nanos lepila ima posledico pusti lepilni spoj, slabo omočitev ter slabo adhezijo med UF lepilom in lesom.

2.2.3.3 Temperatura lepljenja

Od temperature lepljenja je odvisen čas želiranja in utrjevanja UF lepila. Lepilo pri višjih temperaturah bistveno hitreje želira (slika 2).



Slika 2: Odvisnost časa želiranja UF lepilne mešanice od temperature lepljenja (Resnik, 1989: 33)

Običajno lepimo z UF lepili pri temperaturi med 90 in 120 °C. Višje temperature lepljenja in predolgi časi stiskanja povzročijo termično degradacijo; zmanjša se tudi trdnost lepilnega spoja. Višje temperature in daljši časi stiskanja poleg padca trdnosti povzročajo nepotrebne stroške energije in daljše čase proizvodnje.

2.2.3.4 Vmesni čas lepilne mešanice

Vmesni čas UF lepilne mešanice traja od nekaj minut in do maksimalno 45 minut. Ko pripravimo lepilno mešanico z dodatkom kislega katalizatorja, se kemijska reakcija pospeši in viskoznost hitreje raste. Pri vročem lepljenju je z visoko temperaturo pospešeno nižanje pH v bolj kislo stanje.

2.2.3.5 Tlak stiskanja

Tlak lepljenja je predvsem odvisen od vrste lesa in načina lepljenja. Običajno je specifični tlak stiskanja med 2 in 15 bari. Na samo hitrost utrjevanja tlak ne vpliva. Tlak ima predvsem velik vpliv na penetracijo lepila. Penetracija UF lepila je bila pri nestiskanih preskušancih desetkrat manjša v primerjavi s stiskanimi (Šernek, 1999).

2.3 RAZISKOVANJE UTRJEVANJA LEPILA

Spremembe pri utrjevanju lepila lahko raziskujemo z različnimi metodami, ki zaznajo kemijske in fizikalne spremembe v lepilu (Jošt in Šernek, 2009).

Metode za kemijsko raziskovanje utrjevanja lepila so:

- diferenčna dinamična kalorimetrija (Differential Scanning Calorimetry – DSC),
- nihajna spektroskopija (Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FT-IR),
- nuklearna magnetna resonanca (Nuclear Magnetic Resonance – NMR).

Metode za fizikalno raziskovanje utrjevanja lepila so:

- termomehanska analiza (Termomechanical Analysis – TMA),
- dinamična mehanska analiza (Dynamic Mechanical Analysis – DMA),
- torzijska analiza (Torsional Braid Analysis – TBA),
- dielektrična analiza (Dielectric Analysis – DEA),
- dinamika graditve strižne trdnosti – DGST (Automated Bonding Evaluation System – ABES).

Večino metod lahko izvajamo le v kontroliranih laboratorijskih pogojih in so primerne le za analizo čistega lepila. Za spremljanje utrjevanja lepila v lepilnem spoju so primerne TMA, DEA, DMA in ABES, pri čemer pa je od teh le DEA primerna za spremljanje utrjevanja v vroči stiskalnici pri proizvodnji lepljenih izdelkov. Pomanjkljivost DEA je v tem, da rezultati ne odražajo mehanske trdnosti lepilnega spoja. Dejstvo pa je, da je za prakso trdnost lepilnega spoja najpomembnejši kriterij pri ugotavljanju kakovosti lepljenja (Šernek in sod., 2009).

2.3.1 Ugotavljanje trdnosti lepilnega spoja z ABES in DGST

Danes lahko trdnost lepilnega spoja med utrjevanjem ugotavljamo s patentirano metodo ABES (Šernek in sod., 2009, cit. po Humphery, 1990) in njeno modifikacijo DGST (Jošt in

Šernek, 2009). Princip delovanja teh metod je merjenje strižne trdnosti novonastalega lepilnega spoja v odvisnosti od časa stiskanja. Preskušanelec pri DGST je po obliki podoben preskušancu za ugotavljanje natezne strižne trdnosti lepilnega spoja (SIST EN 205, 2003) (Šernek in sod., 2009). Pomanjkljivost metod ABES in DGST je v destruktivnosti preskušancev, kar pomeni, da z enim preskušancem dobimo le eno meritev strižne trdnosti. Za spremljanje rasti strižne trdnosti moramo tako opraviti veliko meritev pri različnih časih stiskanja.

Razlike med ABES in DGST napravama je v tem, da je pri DGST (Šernek in sod., 2006) preskušanelec vpet v čeljusti med celotnim ciklom (stiskanje in preskušanje), pri napravi ABES (Humphery, 1990) pa se preskušanelec avtomatsko vpije v čeljust šele po zaključenem stiskanju. Zaradi vpetja preskušanca skozi celoten cikel preskusa DGST se kot posledica sušenja furnirja in lepila v preskušancu pojavijo natezne napetosti. Napetosti pa se lahko zmanjšajo z uravnavanjem sile ($F = 0 \text{ N}$) na vpenjalnih čeljustih med celotnim ciklom. Na ta način postaneta obe metodi bolj podobni in tako dobljeni rezultati so primerljivi med seboj (Jošt, 2009).

2.3.2 Dosedanje raziskave z ABES in DGST

Trdnost lepilnega spoja z ABES je bila proučevana v številnih raziskavah (Kreber in sod., 1993; Prasad in sod., 1994; Chowdhury in Humphrey, 1999; Kim in Humphrey, 2000; Heinemann in sod., 2002; Lecourt in sod., 2003). Poleg tega je bilo nekaj raziskav narejenih na prirejenih napravah, ki pa delujejo po podobnih principih (DGST) (Šernek in sod., 2006; Šernek in Jošt, 2008; Jošt in Šernek, 2009). V teh raziskavah je bilo proučevano predvsem fenol-formaldehidno in melamin-urea-formaldehidno lepilo (Šernek in sod., 2009).

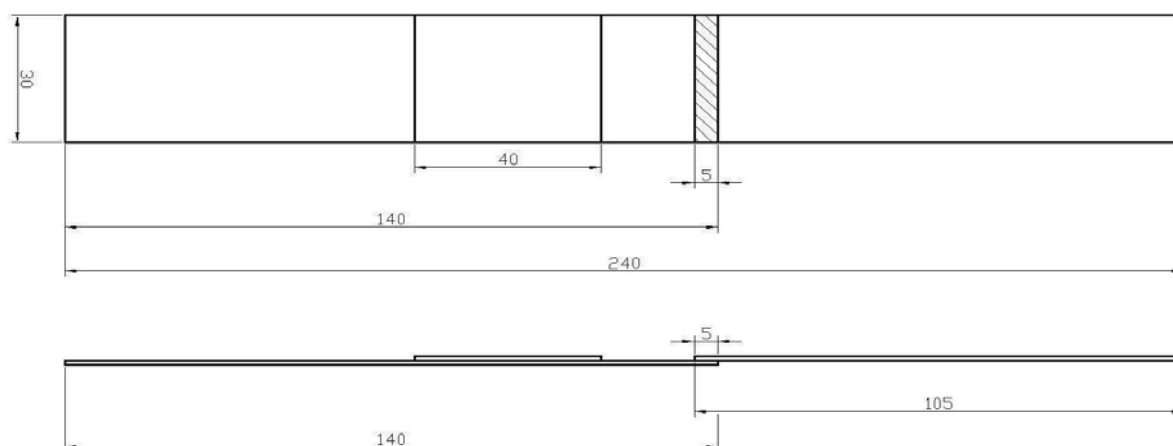
3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIALI

V raziskavi smo uporabili UF lepilo in testne preskušance iz bukovega (*Fagus sylvatica* L.) luščenega furnirja. Lepilni mešanici smo dodali različne koncentracije katalizatorja amonijevega klorida.

3.1.1 Preskušanci iz bukovega luščenega furnirja

Vzorci za strižne preskušance smo izdelali iz bukovega luščenega furnirja debeline 1,1 mm. Preskušanci so že bili obrezani na končne dimenzije in klimatizirani v standardni klimi ter shranjeni v skladišču. Povprečna gostota furnirja za strižne preskušance je bila 680 kg/m^3 . Vlažnost furnirja je bila 7%, tako da ni bilo potrebe po dodatnem sušenju v laboratorijskem sušilniku.



Slika 3: Preskušanec za ugotavljanje strižne trdnosti UF lepilnega spoja (šrafirano) (Šernek in sod., 2009)

Za strižni preskušanec (slika 3) smo rabili tri furnirje, in sicer manjši košček furnirja kot podlogo pri stiskanju in dva kot lepljenca. Širina furnirjev je bila 30 mm, dolžina

spodnjega furnirja 140 mm in dolžina zgornjega furnirja 105 mm. Skupna dolžina sestavljenega preskušanca je bila 240 mm. Preklopna dolžina furnirja je bila 5 mm. Furnir 30 mm x 40 mm, prilepljen z lepilnim trakom, je služil kot podloga za zmanjšanje specifičnega tlaka na lepilni spoj.

3.1.1.1 Bukev (*Fagus sylvatica* L.)

Bukov les je rdečkasto bele barve (beljava in jedrovina se barvno ne ločita). Pri starejših drevesih se na prečnem prerezu navadno pojavlja nepravilno oblikovan rdečerjav diskoloriran les, imenovan »rdeče srce«. Za »rdeče srce« je značilno močno otiljenje trahej, ki med drugim otežuje impregnacijo lesa. Branike so različne. Kasni les z manj trahejami je nekoliko temnejši od ranega. Difuzno razporejene traheje velikostnega reda okoli 100 µm so na prečnem prerezu vidne z lupo. Zelo značilni so številni široki trakovi, ki so na tangencialni površini vidni kot rdečkasta vretenca, na radialni pa kot očitna do več milimetrov visoka zrcalca, ki zelo vplivajo na videz lesa.

Les bukve ima visoko gostoto, je trd in se zelo krči ter nabreka. Trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke. Les je zelo žilav, malo elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in predvsem po parjenju se dobro upogiba.

Gostota bukovega lesa v absolutno suhem stanju je od 490 do 880 kg/m³. Modul elastičnosti je 16.000 N/mm². Trdnost, vzporedno s potekom aksialnih elementov, je 53 N/mm², natezna trdnost 135 N/mm², upogibna trdnost 105 N/mm² in strižna trdnost 8 N/mm². Krčenje lesa od svežega do suhega je največje v tangencialni smeri. V vzdolžni smeri je krčenje 0,3 %, radialno 5,8 % in tangencialno 11,8 %. Bukov les ima rahel kiselkast pH od 5,1 do 5,4 (Čufar, 2001).

3.1.2 Urea-formaldehidno lepilo

Uporabili smo UF lepilo Lendur 200 (L-200), ki ga proizvaja Nafta Lendava. UF lepila spadajo med polikondenzacijska lepila. Lepilo je vodna suspenzija polikondenzata sečnine in formaldehida. Lepilo se uporablja v proizvodnji furnirnih vezanih plošč, v proizvodnji panelnih plošč ter pri furniranju in montažnem lepljenju v emisijskem razredu E-2.

Vsebnost suhe snovi L-200 lepila je 65 % in gostota 1280 kg/m^3 . Vsebnost prostega formaldehida je max 1,5 %. Želiranje pri $100 \text{ }^\circ\text{C}$ je pri $34 \pm 7 \text{ s}$. Lepilo ima pH med 8 in 9. Lepilo je mlečno do svetlo rjave barve in ima vonj po formaldehidu. Pri sobni temperaturi je lepilo obstojno 21 dni, z višjo temperaturo pa se obstojnost lepila krajša (Tehnična specifikacija Lendur – 200, 2007).

3.1.3 Katalizator amonijev klorid

Katalizator amonijev klorid (NH_4Cl) v procesu lepljenja aktivira kondenzacijo UF lepila. Delovanje katalizatorja dodatno pospešimo z višanjem temperature. Katalizator, ki smo ga mešali z UF lepilno smolo, je bil v obliki prahu.

3.2 METODA

Za raziskavo smo uporabili štiri UF lepilne mešanice z različno koncentracijo katalizatorja in štiri temperature stiskanja. Nanos lepila smo izvedli s pipeto. Izdelali smo strižne preskušance in testiranje opravili na univerzalnem testirnem stroju Zwick Z100. Stroj je bil povezan z računalnikom in tam smo s pomočjo programa dobili maksimalno porušitveno silo ter izračunali strižno trdnost. Merili smo tudi rast temperature v odvisnosti od časa v lepilnem spoju in na preskušancih vizualno ocenjevali lom po lesu.

3.2.1 Načrt za izvedbo testiranja

Pred začetkom izvedbe glavnega testiranja smo izvedli preliminaren test in na podlagi rezultatov določili glavni del testiranja. V testu smo preskušance testirali pri različnih temperaturah in časih stiskanja ter pri različnih koncentracijah dodanega katalizatorja. Utrjevanje UF lepilne mešanice, ki je vsebovala 100 delov UF lepila in 1 del suhega katalizatorja amonijevega klorida (NH_4Cl), smo proučevali pri 4 različnih temperaturah (T) stiskanja: 90, 100, 110 in 120 °C (preglednica 2). Nato smo pri temperaturi stiskanja 100 °C proučevali utrjevanje 4 različnih UF lepilnih mešanic, v katerih je bila količina UF lepila enaka (100 delov), in spreminjali delež (C) dodanega katalizatorja (preglednica 3). Stiskanje smo opravili pri različnih časih na razponu od 20 do 180 s (oziroma pri eni lepilni mešanici do 600 s), nato pa smo takoj ugotovili strižno trdnost, ki se je formirala v lepilnem spoju (Šernek in sod., 2009). Za vsako kombinacijo izbranih parametrov smo izvedli 5 ponovitev in tako skupno testirali 425 preskušancev. Po končanem glavnem testiranju smo pri rezultatih, ki so bili statistični osamelci (večje odstopanje od povprečne vrednosti), izvedli 2 dodatni meritvi (zmanjšali variabilnost dobljenih rezultatov) in ju vključili v povprečne vrednosti.

Preglednica 2: Temperatura stiskanja in število meritev pri različnih časih stiskanja

| Oznaka | Čas stiskanja (s) | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 | 180 |
| T (°C) - C | | | | | | | | | | |
| 90 - 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 100 - 1 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 5 |
| 110 - 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 120 - 1 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 7 |

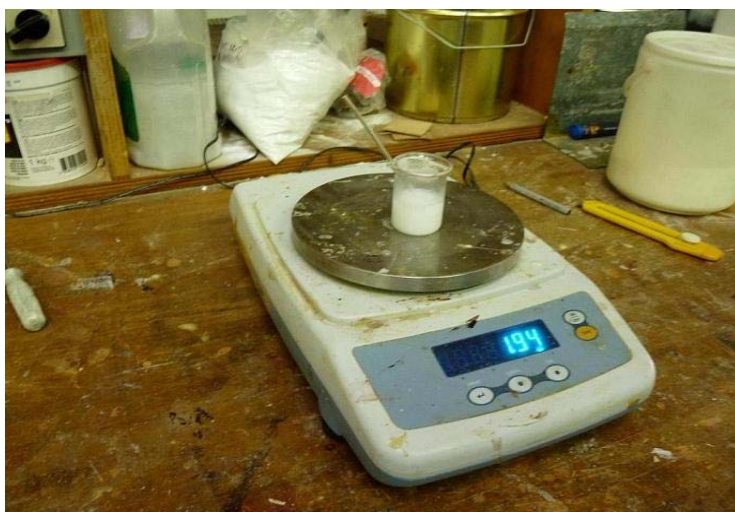
Preglednica 3: Koncentracija katalizatorja in število meritev pri različnih časih stiskanja

| Oznaka | Čas stiskanja (s) | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 | 180 | 240 | 300 | 360 | 480 | 600 |
| T (°C) - C | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 - 0,1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 100 - 0,5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | | | | | |
| 100 - 1,0 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | | | | | |
| 100 - 2,0 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 | | | | | |

3.2.2 Priprava lepilne mešanice

Lepilno UF smolo smo imeli shranjeno v hladilniku pri temperaturi 4 °C in s tem upočasnili staranje lepila. Datum proizvodnje UF lepila je bil 12. 12. 2008, glavno testiranje pa je bilo izvedeno med 10. 3. do 1. 4. 2009. Pred uporabo smo UF lepilo vzeli iz hladilnika, dobro premešali, v čašo prelili dnevno porabo UF lepila in ostalo vrnili v hladilnik. Preden smo UF smolo uporabili, smo čašo s smolo dali v toplo vodo in ogreli na sobno temperaturo. Čašo UF smole smo pokrivali z aluminijasto folijo, da smo preprečili izhlapevanje vode in kontaminacijo s prahom.

Ustrezno razmerje UF lepilne smole in katalizatorja smo dosegli z metodo tehtanja na tehtnici (slika 4) na dve decimalni mesti natančno, razen pri deležu katalizatorja 0,1 dela, kjer smo zaradi majhne količine katalizatorja tehtali na tisočinko natančno.



Slika 4: Priprava lepilne mešanice z metodo tehtanja

Zatehtali smo 100 delov UF lepilne smole in 0,1, 0,5, 1, 2 delov katalizatorja (NH_4Cl). Praktičen primer za 1 del dodatka katalizatorja: v čaši zatehtamo 10 g UF smole in 0,1 g katalizatorja. Po tehtanju smo lepilno mešanico dobro premešali, da ni bilo grudic katalizatorja. Po 40 minutah smo pripravljeno lepilno mešanico zamenjali z drugo, saj je potekel čas mešanice (pot life). Lepilno mešanico smo med uporabo večkrat premešali.

3.2.3 Priprava preskušancev in nanos lepila

Pred izvedbo strižnega testa z univerzalnim testirnim strojem Zwick Z100 smo izbrali furnir brez razpok in drugih napak, ki bi lahko vplivale na končni rezultat. Na mestu, kjer je bilo potrebno nanesti lepilo, smo obe lepilni površini zbrusili z brusnim papirjem granulacije 120. Preskušanec smo postavili v šablono in s svinčnikom zarisali črto, kjer se je začel lepilni spoj. Površine, ki smo jo osvežili z brusnim papirjem, se nismo dotikali in tako zmanjšali možnost kontaminacije, kar bi lahko vplivalo na oprijemnost lepila. Na spodnji daljši furnir smo z lepilnim trakom prilepili košček furnirja, ki je ohranjal debelino lepljencev na stiskalni površini grelcev.

Pripravljeno lepilno mešanico smo nanašali s pomočjo pipete (slika 5). Nanos lepila je bil enostranski, in sicer 200 g/m^2 . Površina nanosa lepila na preskušanec je bila $30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, kar je $0,00015 \text{ m}^2$. Tako smo s pipeto nanесли na preskušanec $25 \text{ }\mu\text{l}$ lepilne mešanice.



Slika 5: Pipeta za nanos lepila

3.2.4 Izvedba testiranja

Raziskavo rasti strižne trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem smo izvedli z metodo DGST (dinamika graditve strižne trdnosti) (Jošt in Šernek, 2009). Na testirnem stroju Zwick Z100 smo pred začetkom testiranja nastavili ustrezne parametre za izvedbo testa. Pozicijo levega grelca (s pnevmatskim cilindrom) smo nastavili na 950 mm, pozicijo desnega grelca na 588 mm, odmik desnega grelca od spodnje čeljusti pa na 50 mm. Hitrost pomika vpenjalnih čeljusti je bila 50 mm/min. Premer bata je znašal 63 mm in je imel površino 3117 mm². Specifičen tlak stiskanja je bil 1,2 MPa. Širina lepljenca je bila nastavljena na 30 mm, preklopna dolžina pa na 5 mm.

Preskušance smo po predhodni pripravi in po nanosu lepila vpeli v vpenjalni čeljusti, zaprli grelca ter tako stisnili preskušanece. Po začetku delovanja tlaka smo sprožili računalniški program in začeli meriti čas stiskanja. Ko je zeleni čas stiskanja potekel, smo ročno prekinili delovanje tlaka in s testirnim strojem Zwick izvedli test strižne trdnosti.



Slika 6: Preskušanec vpet v vpenjalni čeljusti testirnega stroja Zwick Z100

Preglednica 4 prikazuje nastavitve temperature, ki so bile dejansko nastavljene na regulatorju, da smo dosegli zeleno temperaturo grelnih plošč.

Preglednica 4: Nastavitev temperature na regulatorju

| Želena temperatura grelnih plošč (°C) | Nastavljena temperatura na regulatorju (°C) |
|---------------------------------------|---|
| 90 | 87,6 |
| 100 | 96,9 |
| 110 | 106,2 |
| 120 | 115,6 |

Strižno trdnost smo izračunali na osnovi maksimalne sile loma, ki smo jo izmerili s testirnim strojem in površine lepljene ploskve, ki smo jo izmerili po poružitvi preskušanca.

$$f_v = \frac{F_{\max}}{l \times b} \quad \dots (1)$$

- f_v – strižna trdnost (N/mm²),
- F_{\max} – maksimalna sila loma (N),
- l – dolžina preklopa (mm),
- b – širina preklopa (mm).

3.2.5 Merjenje temperature v lepilnem spoju s termočlenom

Za vsako temperaturo stiskanja (90, 100, 110 in 120 °C) smo izmerili rast temperature v lepilnem spoju od pričetka delovanja tlaka do 400 s oziroma pri temperaturi 100 °C do 600 s. Temperaturo smo merili s termočlenom tipa J.

3.2.6 Meritve dimenzij strižne površine preskušancev

Zaradi večje natančnosti meritev smo po testiranju vse preskušance še premerili po širini in dolžini. V samem programu smo določili širino 30 mm in dolžino 5 mm, realno pa so preskušanci po širini odstopali za ± 3 mm, po dolžini pa za ± 1 mm. Pri dolžini smo pri zamaknjenih preskušancih merili srednjo vrednost dolžine. Meritve smo opravili z digitalnim kljunastim merilom Mitutoyo na dve decimalni mesti natančno. Kljunasto

merilo smo povezali z računalnikom in preko programa Mitutoyo meritve beležili v excelovo tabelo. Izmerjene dimenzije smo nato uporabili pri izračunu strižne trdnosti.

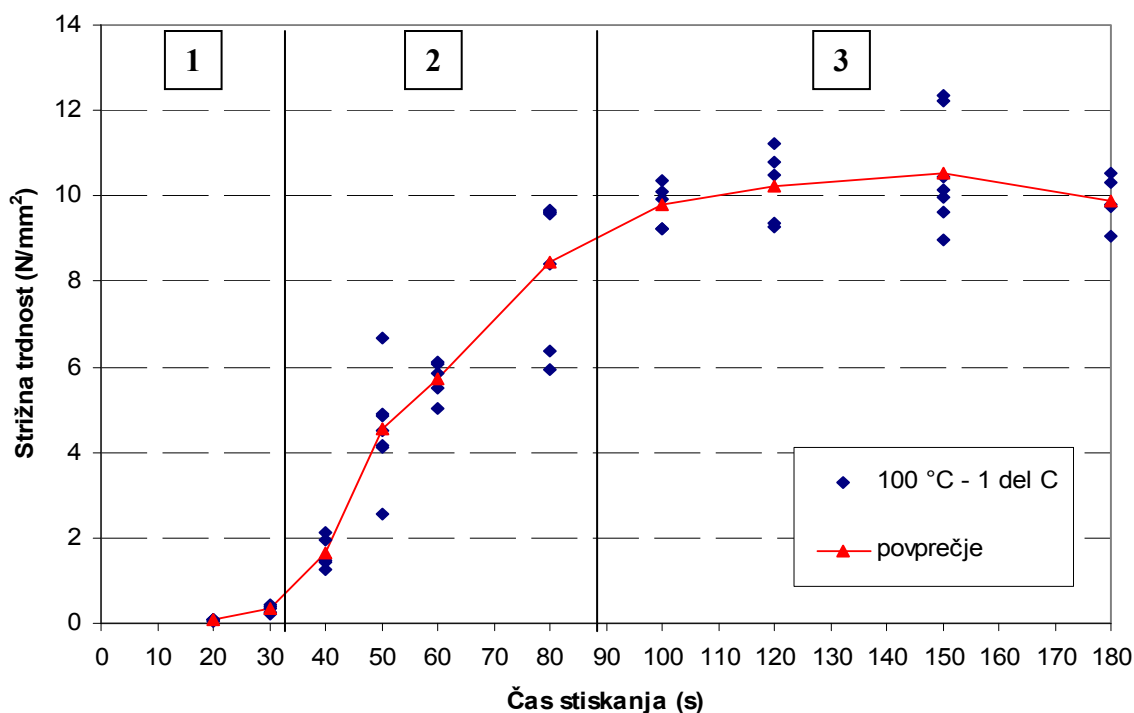
3.2.7 Ocena loma po lesu

Lom po lesu smo ocenjevali vizualno, in sicer po zaključku testiranja. Oceno loma smo ocenjevali v odstotkih od 0 do 100. Pri 0 % ni loma po lesu in pri 100 % je lom po lesu po celotni površini lepilne površine. Natančnost vizualne ocene loma po lesu je bila do 10 %. Zaradi brezbarvnega lepilnega spoja smo si pri vizualni oceni loma po lesu pomagali z dodatno lokalno osvetlitvijo in si tako olajšali delo.

4 REZULTATI

4.1 RAST STRIŽNE TRDNOSTI

V raziskavi smo proučevali rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja in različnih koncentracijah katalizatorja. Pri vsakem času stiskanja smo opravili pet ponovitev testiranja preskušancev in nekajkrat še dodatna dva testa. Slika 7 prikazuje rezultate strižnih testov vseh preskušancev pri eni temperaturi in povprečno vrednost. V nadaljevanju bodo predstavljene povprečne vrednosti petih oziroma sedmih preskušancev. Krivuljo rasti povprečnih vrednosti strižne trdnosti lahko razdelimo v tri faze: začetek, rast in zaključek rasti strižne trdnosti. V prvi fazi je bila rast strižne trdnosti majhna. Druga faza je predstavljala intenzivno rast strižne trdnosti, skoraj linearna rast. V tretji fazi se je rast strižne trdnosti upočasnila in zaključila. Krivulja rasti ima obliko črke »S« in je tipična logistična krivulja rasti.



Slika 7: Rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja pri temperaturi 100 °C v odvisnosti od časa stiskanja

4.1.1 Rast strižne trdnosti v odvisnosti od temperature stiskanja

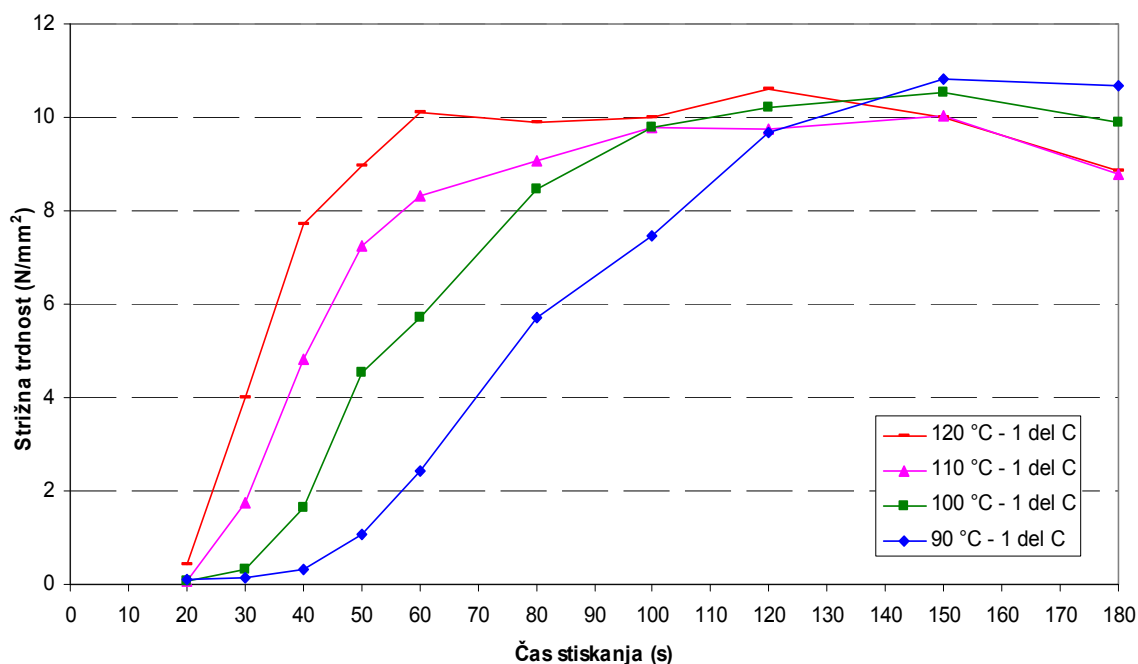
V preglednici 5 so predstavljene povprečne vrednosti strižne trdnosti petih ali ponekod sedmih preskušancev za vsako temperaturo stiskanja, ki je bila od 90 do 120 °C. Začetni čas stiskanja je bil 20 s, nato se je vsak naslednji čas stiskanja povečeval v intervalu po 10 s (prva minuta), nato v intervalu 20 s (druga minuta) in v intervalu 30 s (tretja minuta).

Preglednica 5: Povprečna strižna trdnost UF lepilnega spoja preskušancev glede na temperaturo stiskanja

| T (°C) | 90 | 100 | 110 | 120 |
|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| t (s) | f_v (N/mm ²) | f_v (N/mm ²) | f_v (N/mm ²) | f_v (N/mm ²) |
| 20 | 0,11 | 0,08 | 0,08 | 0,42 |
| 30 | 0,14 | 0,34 | 1,74 | 4,02 |
| 40 | 0,33 | 1,64 | 4,82 | 7,73 |
| 50 | 1,09 | 4,54 | 7,24 | 8,96 |
| 60 | 2,42 | 5,71 | 8,81 | 10,10 |
| 80 | 5,73 | 8,46 | 9,06 | 9,89 |
| 100 | 7,47 | 9,78 | 9,80 | 10,00 |
| 120 | 9,67 | 10,23 | 9,77 | 10,61 |
| 150 | 10,84 | 10,74 | 10,04 | 10,00 |
| 180 | 10,69 | 9,89 | 8,77 | 8,87 |

Povprečne vrednosti strižne trdnosti so naraščale s časom stiskanja in temperaturo stiskanja. Pri začetnih časih stiskanja so imeli preskušanci majhne strižne trdnosti, ki pa so s podaljševanjem časa stiskanja naraščale. Preskušanci, lepljeni pri višji temperaturi, so imeli večje povprečne vrednosti strižne trdnosti kot tisti preskušanci, lepljeni pri nižji temperaturi. Pri temperaturi 90 °C je bilo za doseg 10 N/mm² strižne trdnosti potrebno približno 150 s, pri najvišji temperaturi lepljenja 120 °C pa se je ta čas skrajšal na približno 60 s. Iz povprečnih vrednosti so tudi razvidna začetna počasna rast strižne trdnosti, ki pa se je po določenem času začela hitreje graditi, odvisno od temperature lepljenja. V prvi fazi lepilni spoj še ni bil segret na končno temperaturo, zato je bila rast trdnosti počasnejša.

Na sliki 8 je prikazan razvoj trdnosti UF lepila med utrjevanjem pri različnih temperaturah lepljenja. Lepilna mešanica je bila ves čas enaka, in sicer je vsebovala 100 delov UF smole in 1 del katalizatorja. Preskušance smo testirali do 180 s časa stiskanja in pri vseh štirih temperaturah smo dosegli maksimalno trdnost.



Slika 8: Dinamika rasti strižne trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem glede na temperaturo stiskanja

Ugotovimo lahko, da se rast trdnosti začne tvoriti šele po določenem času, kar je v našem primeru opazno po 20 s. Hitrost rasti trdnosti je bila različna in je bila najpočasnejša pri temperaturi 90 °C. Z višanjem temperature se je trdnost tvorila v krajšem času, kar posledično pomeni krajši čas lepljenja. Pri temperaturi 90 °C je bila dosežena maksimalna trdnost po 130 s, ista trdnost pa je bila dosežena tudi pri temperaturi 120 °C po 60 s. Iz grafa je viden padec trdnosti v zadnjem delu stiskanja, ki je predvsem pri višjih temperaturah (110 in 120 °C) bolj izrazit. Predvidevamo, da je to posledica termične degradacije zaradi predolgega časa stiskanja in previsoke temperature. UF lepila so namreč podvržena temu pojavu, če so časi stiskanja predolgi, temperature pa previsoke.

4.1.2 Rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja pri različnih dodatkih katalizatorja

Z različnimi dodatki katalizatorja lahko vplivamo na hitrost utrjevanja lepilnega spoja. Preglednica 6 prikazuje povprečne vrednosti strižne trdnosti UF lepilnega spoja glede na koncentracijo katalizatorja in čas stiskanja pri konstantni temperaturi stiskanja 100 °C.

Koncentracije katalizatorja so bile 0,1, 0,5, 1, 2 delov in 100 delov UF lepila. Najkrajši čas stiskanja je bil 20 s, nato se je vsak naslednji povečeval v intervalu po 10 s (prva minuta), nato v intervalu 20 s (druga minuta) in v intervalu 30 s (tretja minuta). Za utrjevanje UF lepilne mešanice, ki je vsebovala 0,1 dela katalizatorja, smo morali čase stiskanja še podaljšati, in sicer so po tretji minuti naraščali v intervalu 30 s (četrt, peta in šesta minuta), nato pa v intervalu 60 s vse do končnega časa stiskanja, ki je bil 10 minut. Manjša količina katalizatorja v lepilni mešanici je namreč pomenila počasnejše utrjevanje in graditev strižne trdnosti. Predvsem zelo dolgo utrjevanje lepilnega spoja je potekalo pri 0,1 delu dodanega katalizatorja, kjer smo potrebovali 600 s za doseg maksimalne trdnosti. Pri 0,5 delov dodanega katalizatorja ali več pa je bila hitrost utrjevanja večja in so vsi preskušanci po 180 s stiskanja že dosegli maksimalno trdnost.

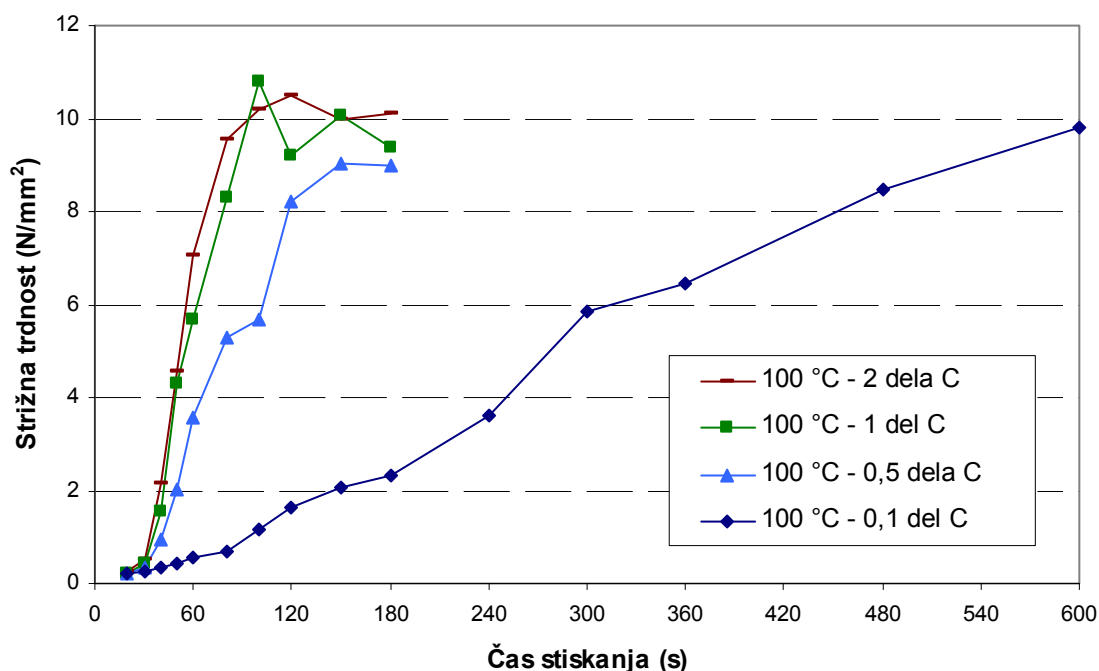
Preglednica 6: Povprečna strižna trdnost UF lepilnega spoja preskušancev, ki so bili lepljeni z lepilnimi mešanicami z različno koncentracijo katalizatorja

| C (del) | 0,1 | 0,5 | 1 | 2 |
|----------------|--|--|--|--|
| t (s) | f_v (N/mm²) | f_v (N/mm²) | f_v (N/mm²) | f_v (N/mm²) |
| 20 | 0,21 | 0,22 | 0,20 | 0,24 |
| 30 | 0,24 | 0,34 | 0,44 | 0,50 |
| 40 | 0,34 | 0,96 | 1,53 | 2,13 |
| 50 | 0,41 | 2,03 | 4,30 | 4,55 |
| 60 | 0,55 | 3,55 | 5,70 | 7,06 |
| 80 | 0,67 | 5,30 | 8,30 | 9,55 |
| 100 | 1,15 | 5,66 | 10,79 | 10,17 |
| 120 | 1,65 | 8,22 | 9,16 | 10,49 |
| 150 | 2,08 | 9,02 | 10,08 | 9,96 |
| 180 | 2,30 | 8,99 | 9,38 | 10,10 |
| 240 | 3,61 | | | |
| 300 | 5,85 | | | |
| 360 | 6,46 | | | |
| 480 | 8,47 | | | |
| 600 | 9,79 | | | |

V prvi fazi stiskanja je bila strižna trdnost majhna in je počasi rasla glede na čas stiskanja. V drugi fazi se je razvoj trdnosti pospešil, najbolj pri dodatku 1 dela in 2 dela katalizatorja. Povprečne vrednosti strižne trdnosti med tema dvema lepilnima mešanicama bistveno ne odstopajo. Pri 1 delu so bile vrednosti strižne trdnosti malo nižje, vendar zanemarljive. Za lepljenje z UF lepilom L-200 je zato smiselno uporabiti lepilno mešanico z 1 delom

katalizatorja amonijevega klorida, saj je rezultat primerljiv z lepilno mešanico, ki je vsebovala 2 dela katalizatorja. Pri tem je potrebno tudi upoštevati manjšo variabilnost samega lesa in tudi pripravljene lepilne mešanice, saj se v 40 minutah lastnosti lepilne mešanice spreminjajo, še zlasti pri večjih koncentracijah katalizatorja, ki pospešuje kondenzacijo lepila.

Slika 9 prikazuje rast strižne trdnosti v odvisnosti od časa stiskanja in deleža dodanega katalizatorja v UF lepilno mešanico. Temperatura stiskanja je bila za vse štiri koncentracije katalizatorja 100 °C.



Slika 9: Dinamika rasti strižne trdnosti UF lepila med utrjevanjem lepilnih mešanic glede na koncentracijo katalizatorja (C)

Na sliki 9 je vidna razlika med 0,1 delom in ostalimi deli dodanega katalizatorja, saj se pri 0,1 delu razvija strižna trdnost zelo počasi in doseže maksimalno trdnost šele po približno 600 s. Hitrost utrjevanja UF lepilne mešanice je bila močno odvisna od deleža dodanega katalizatorja. Večji delež katalizatorja v UF lepilni mešanici pomeni hitrejšo rast strižne trdnosti lepilnega spoja.

4.2 LOM PO LESU

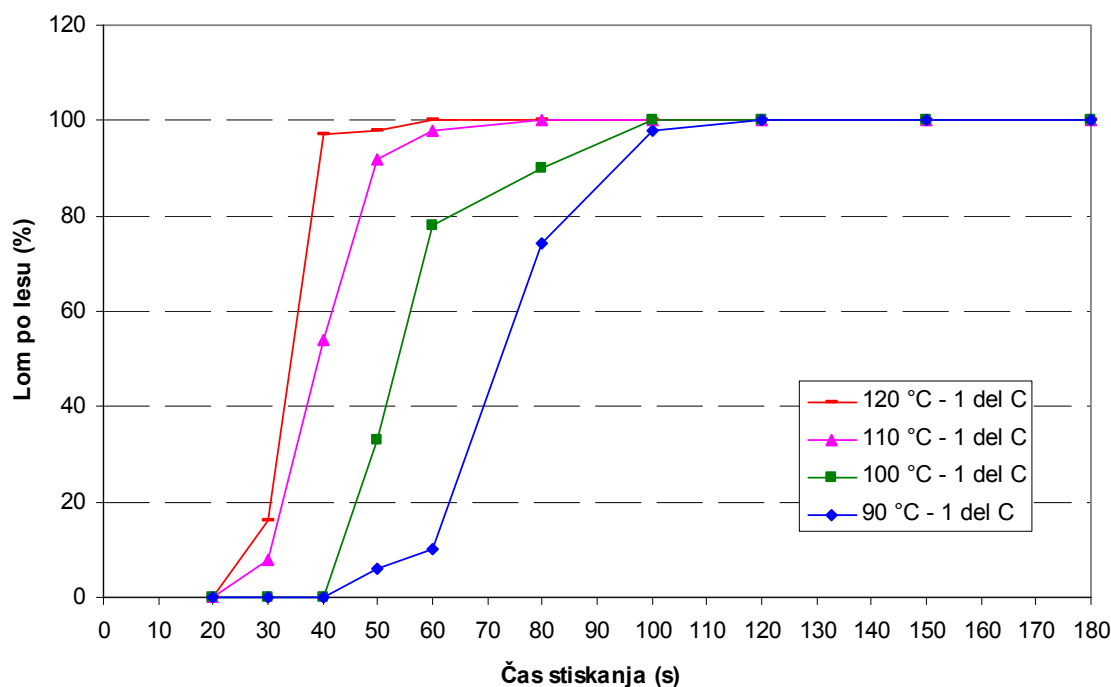
4.2.1 Lom po lesu pri različnih temperaturah stiskanja

Ko je bila dosežena dovolj velika strižna trdnost lepilnega spoja, se je preskušanec pri strižnem testu zlomil po lesu. V prvi fazi, ko je lepilo omočilo površino in se spreminja v želatinasto stanje, lom po lesu ni opazen. V drugi fazi, ko je bila pospešena rast strižne trdnosti v lepilnem spoju, se je večal tudi lom po lesu. Ko nastopi tretja, zadnja faza pa je potekal lom 100 % po lesu.

V preglednici 7 je iz povprečnih vrednosti loma po lesu jasno razviden vpliv temperature stiskanja na rast strižne trdnosti oziroma na nastajanje loma po lesu. Pri temperaturi 90 °C je bil 100% lom po lesu dosežen po približno 120 s, pri 100 °C je bil ta čas že zmanjšan na 100 s, pri 110 °C na 80 s in pri 120 °C le še 60 s. Pri temperaturi 120 °C se je čas za doseg 100% loma po lesu skrajšal za polovico v primerjavi s temperaturo 90 °C.

Preglednica 7: Povprečne vrednosti loma po lesu glede na temperaturo stiskanja

| T (°C) | 90 | 100 | 110 | 120 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| t (s) | w (%) | w (%) | w (%) | w (%) |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 8 | 16 |
| 40 | 0 | 0 | 54 | 97 |
| 50 | 6 | 33 | 92 | 98 |
| 60 | 10 | 78 | 98 | 100 |
| 80 | 74 | 90 | 100 | 100 |
| 100 | 98 | 100 | 100 | 100 |
| 120 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 150 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 180 | 100 | 100 | 100 | 100 |



Slika 10: Lom po lesu UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja

Slika 10 prikazuje lom po lesu za preskušance, ki so bili zlepljeni z lepilno mešanico z 1 delom dodanega katalizatorja pri štiri različnih temperaturah stiskanja. Večji delež loma po lesu preskušanca je bil hitreje dosežen pri višjih temperaturah stiskanja. Pri času stiskanja 20 s praktično ni bilo loma po lesu, nato se je počasi stopnjeval in rasel do 100 %. Pri temperaturi stiskanja 90 °C se je največji delež loma po lesu tvoril med 60 in 80 s, pri 100 °C med 40 in 60 s, pri 110 °C med 30 in 50 s in pri 120 °C med 20 in 40 s. Najhitreje je bil 100% lom po lesu dosežen pri temperaturi stiskanja 120 °C, nato pri 110 °C, 100 °C in 90 °C.

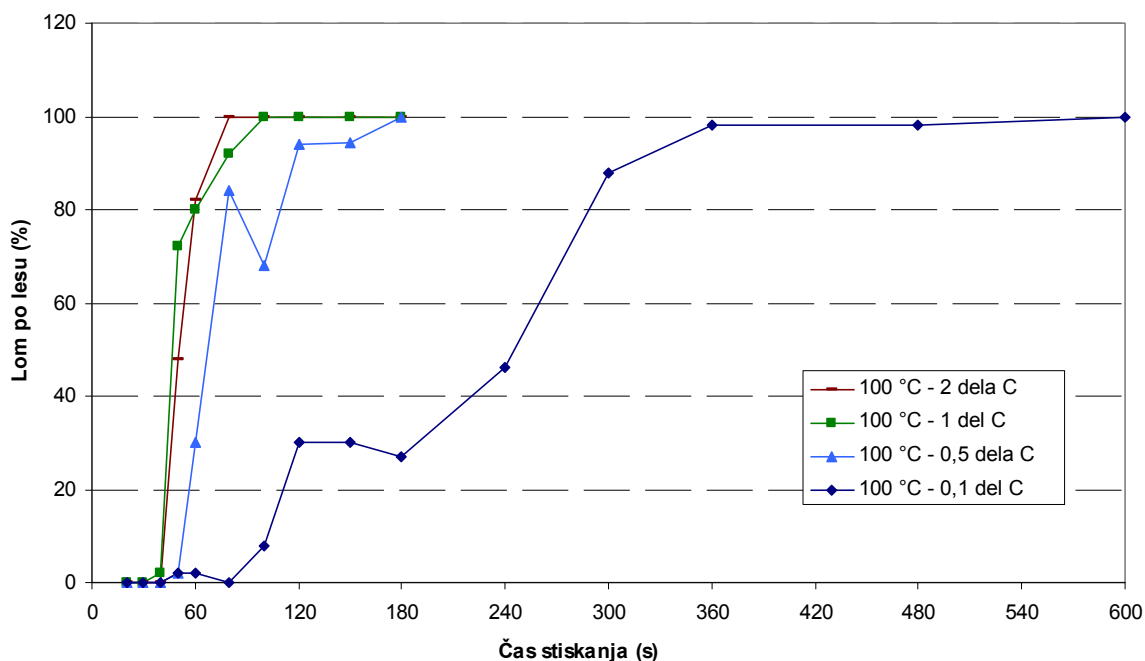
4.2.2 Lom po lesu pri različnih dodatkih katalizatorja

Preglednica 8 predstavlja povprečne vrednosti loma po lesu za preskušance, ki so bili zlepljeni z lepilnimi mešanici z različnimi dodatki katalizatorja.

Preglednica 8: Povprečne vrednosti loma po lesu pri različnih koncentracijah katalizatorja

| C (del) | 0,1 | 0,5 | 1 | 2 |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| t (s) | w (%) | w (%) | w (%) | w (%) |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 50 | 2 | 2 | 72 | 48 |
| 60 | 2 | 30 | 80 | 82 |
| 80 | 0 | 84 | 92 | 100 |
| 100 | 8 | 68 | 100 | 100 |
| 120 | 30 | 94 | 100 | 100 |
| 150 | 30 | 94 | 100 | 100 |
| 180 | 27 | 100 | 100 | 100 |
| 240 | 46 | | | |
| 300 | 88 | | | |
| 360 | 98 | | | |
| 480 | 98 | | | |
| 600 | 100 | | | |

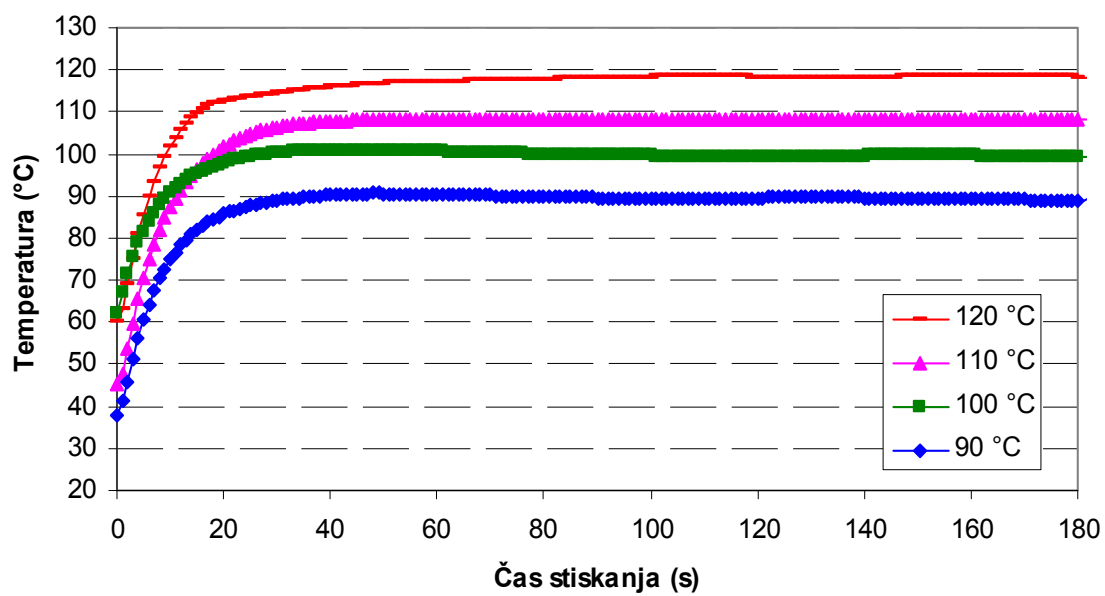
Slika 11 prikazuje lom po lesu preskušancev, ki so bili zlepljeni s štirimi lepilnimi mešanici z različno koncentracijo katalizatorja. Temperatura lepljenja je bila povsod enaka 100 °C. Ugotovili smo, da je delež lepilu dodanega katalizatorja ugodno vplival na hitrost nastajanja trdnosti UF lepilnega spoja in na naraščanje deleža loma po lesu. Majhen delež dodanega katalizatorja (0,1 del na 100 delov UF lepila) ni zadostno pospešil kemijske reakcije, ki je zato potekala počasi, kar se je odražalo na počasni graditvi trdnosti. Potrebovali smo 600 s stiskanja, da je ta UF lepilna mešanica utrdila do mere, ko je lom preskušanca potekal povsem po lesu (100 %). To se je pri UF lepilnih mešanicah z večjim deležem dodanega katalizatorja zgodilo bistveno prej: pri dodatku 0,5 dela na 100 delov UF lepila po 180 s, pri dodatku 1,0 dela na 100 delov UF lepila po 100 s in pri dodatku 2,0 dela na 100 delov UF lepila po 80 s.



Slika 11: Lom po lesu UF lepilnega spoja pri različnih koncentracijah katalizatorja (C)

4.3 MERJENJE TEMPERATURE V LEPILNEM SPOJU

Utrjevanje UF lepila smo proučevali pri različnih temperaturah stiskanja. Plošče stiskalnice smo segreli na želeno temperaturo, ki je bila konstantna ves čas med procesom stiskanja. Ker je imel preskušaneec na začetku preskusa sobno temperaturo, se je med procesom stiskanja segreval. Ker je hitrost utrjevanja UF lepila odvisna od temperature, smo temperaturo merili v lepilnem spoju, kamor je bilo lepilo naneseno. Hitrost prehoda toplote s plošč stiskalnice na lepljenec je odvisna predvsem od debeline lepljencev. Večja je debelina lepljencev, daljši je čas segrevanja lepilnega spoja. V našem primeru je bila debelina 1,1 mm, zato je segrevanje potekalo hitro. Ugotovili smo, da je temperatura v lepilnem spoju naraščala v odvisnosti od časa stiskanja in se je po določenem času približala temperaturi stiskalnice ter se ustalila (slika 12). Hitrost naraščanja temperature, ki je bila odvisna od temperature stiskalnice, je bila največja na začetku procesa stiskanja.



Slika 12: Naraščanje temperature v UF lepilnem spoju v odvisnosti od časa stiskanja in temperature stiskanja

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

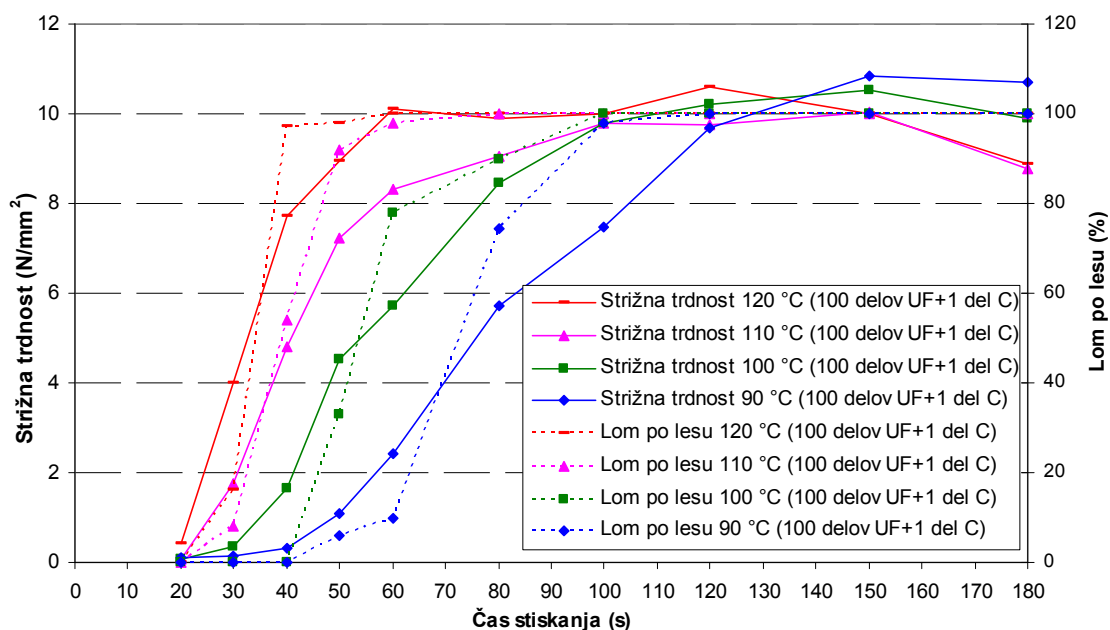
5.1 RAZPRAVA

5.1.1 Graditev strižne trdnosti UF lepilnega spoja in deleža loma po lesu pri različnih temperaturah stiskanja

Graditev strižne trdnosti UF lepilnega spoja in deleža loma po lesu pri različnih temperaturah stiskanja (90, 100, 110, 120 °C) je predstavljena na sliki 13. Oblike krivulj na sliki so med sabo podobne. Šernek in sod. (2009) navajajo, da je krivulja graditve strižne trdnosti v obliki črke »S« in da je tipična logistična krivulja rasti. Krivuljo strižne trdnosti in loma po lesu lahko razdelimo na tri značilne dele: začetek, rast in zaključek. Začetek rasti strižne trdnosti se začne od vrednosti 0 in je do 40 s stiskanja majhna, predvsem pri najnižji temperaturi (90 °C), ter raste z večjo temperaturo stiskanja. Počasna rast strižne trdnosti je posledica postopnega segrevanja lepilnega spoja na končno temperaturo stiskanja. Doseganje končne temperature v lepilnem spoju je odvisno od debeline lepljencev; z večjo debelino se čas segrevanja podaljšuje. Kariž (2005) v raziskavi sklepa, da lepilo pri večji debelini lepljenca počasneje utrdi zaradi počasnejšega segrevanja lepilnega spoja. V raziskavi smo uporabili luščen bukov furnir (*Fagus sylvatica* L.) debeline 1,1 mm, zato je lepilni spoj dokaj hitro dosegel (po 40 sekundah) končno temperaturo stiskanja. Z višanjem nastavljene temperature grelcev je bil čas za dosego končne temperature v lepilnem spoju nekoliko daljši. Lom po lesu je bil v prvem delu utrjevanja 0 %, ker je bila adhezija med lepilom in lesom manjša od kohezije lesa. Prvi lom po lesu se pojavi lokalno in odstotek loma postopoma raste ter se v drugi fazi, ko je adhezija med lepilom in lesom večja od kohezije lesa, rezultira kot popoln lom po lesu. Popoln lom po lesu je odvisen od strižne trdnosti lesa in nastopi pri približno 10 N/mm². Čas za dosego te strižne trdnosti pa je odvisen od temperature stiskanja. Pri temperaturi stiskanja 90 °C je bil popoln lom po lesu dosežen po 120 s. Ta čas se je krajšal z naraščajočo temperaturo stiskanja. Pri 120 °C je bil popoln lom po lesu dosežen že v

približno 60 s. Rast strižne trdnosti in loma po lesu je bila v drugi fazi skoraj linearna, saj je bila reakcija polikondenzacije v tej fazi najbolj intenzivna. Lom po lesu je hitro naraščal. V zadnji fazi se je polikondenzacija UF lepila zaključila in ni bilo več opaziti rasti strižne trdnosti. Dosežena je bila maksimalna trdnost spoja, ki je bila nad 10 N/mm^2 . Maksimalna trdnost in 100% lom po lesu sta bila pri določeni temperaturi stiskanja dosežena skoraj istočasno.

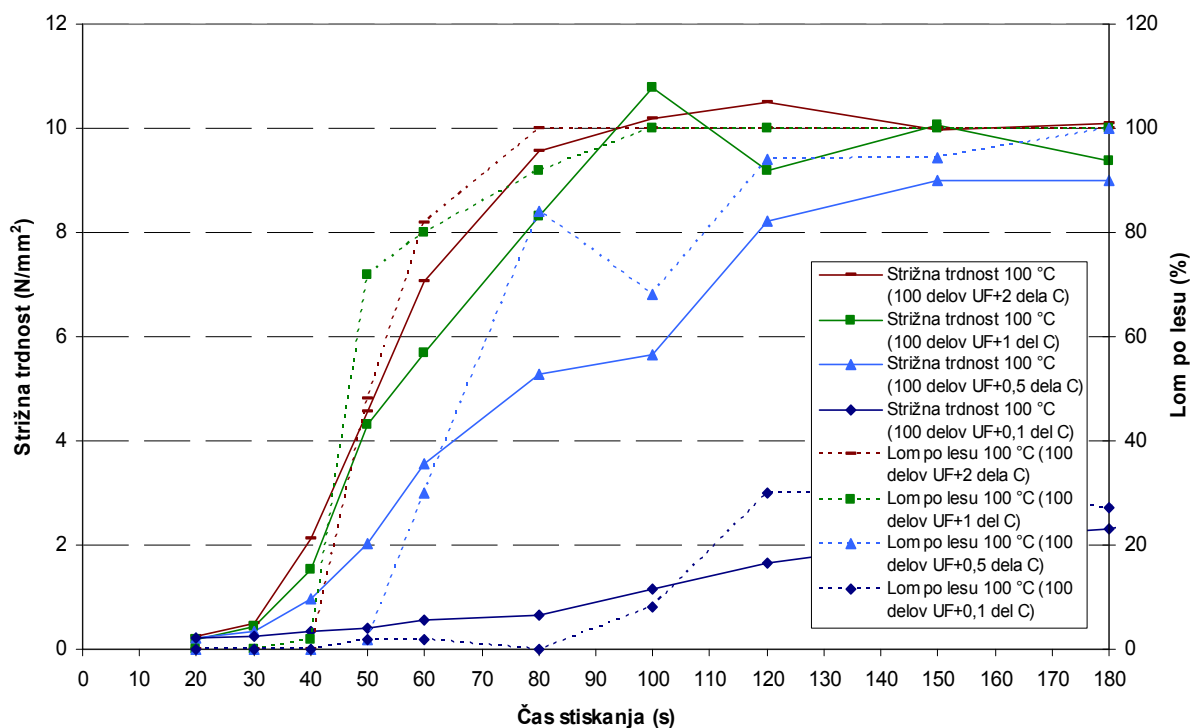
Če poteka zadnja faza predolgo, se pojavi padec strižne trdnosti zaradi temperaturne degradacije lepilnega spoja. Na sliki 13 je mogoče opaziti, da je padec strižne trdnosti izrazit predvsem pri temperaturi 110 in 120 °C, nakazuje pa se tudi pri 90 in 100 °C. Z višjo temperaturo stiskanja se temperaturna degradacija pojavi hitreje.



Slika 13: Rast strižne trdnosti in deleža loma po lesu UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah stiskanja

5.1.2 Strižna trdnost in delež loma po lesu pri različnih koncentracijah katalizatorja v UF lepilni mešanici

Strižna trdnost in delež loma po lesu za preskušance, ki so bili zlepljeni z UF lepilnimi mešanicami z različnimi dodatki katalizatorja (0,1 del, 0,5 dela, 1 del in 2 dela) in stisnjeni pri temperaturi 100 °C, sta predstavljena na sliki 14. Različni dodatki katalizatorja vplivajo na razvoj strižne trdnosti lepilnega spoja, majhen delež dodatka je pomenil bistveno daljši čas rasti strižne trdnosti. Prva faza ali začetek rasti strižne trdnosti se je začelo iz vrednosti 0 in počasi raste zaradi segrevanja lepilnega spoja na končno temperaturo 100 °C. Lom po lesu se zaradi nizke strižne trdnosti v prvi fazi ne pojavi. To se zgodi šele po 40 s stiskanja. Druga faza rasti strižne trdnosti je pomenila hitro rast trdnosti, ki je skoraj linearna. Nekaj odstopanj je bilo zaradi variabilnosti lesa preskušancev in lepilne mešanice. Lom po lesu je ob dobri adheziji med lepilom in lesom najhitreje naraščal pri lepilni mešanici z 2 deloma dodanega katalizatorja. Rast strižne trdnosti pri 0,1 delu katalizatorja je bila časovno bistveno daljša in je trajala 600 s. Za praktične namene UF lepilna mešanica z 0,1 delom dodanega katalizatorja ni priporočljiva zaradi predolгих časov stiskanja in slabše kvalitete lepilnega spoja. V zaključni fazi lepljenja se je polikondenzacija UF lepila končala. Strižna trdnost je dosegla maksimalno vrednost, ki je znašala približno 10 N/mm². Najhitreje se je maksimalna strižna trdnost dosegla pri UF lepilni mešanici z enim oziroma dvema deloma dodanega katalizatorja (po približno 100 s časa stiskanja). Za lepljenje v proizvodnji je najbolj uporabna UF lepilna mešanica z 2 deloma dodanega katalizatorja, vendar tudi 1 del katalizatorja zagotavlja hitro in kvalitetno lepljenje. Z nekoliko višjo temperaturo lepljenja pa je možno čas lepljenja še dodatno skrajšati. Glede na majhno razliko med tema dvema krivuljama lahko zaključimo, da bi bil za praktične namene lepljenja že dodatek 1 dela katalizatorja zadosten za optimalno utrjevanje UF lepila.



Slika 14: Rast strižne trdnosti in deleža loma po lesu UF lepilnega spoja pri različnih koncentracijah katalizatorja v UF lepilni mešanici

5.2 SKLEPI

V raziskavi smo proučevali vpliv temperature stiskanja in deleža dodanega katalizatorja na rast strižne trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem. Raziskava je bila opravljena z DGST metodo, ki je prilagojena metoda ABES.

Ugotovili smo, da je bila hitrost utrjevanja UF lepilnega spoja pri višjih temperaturah stiskanja hitrejša in bolj kvalitetna. Praktično to pomeni, da lahko čas lepljenja tudi prepolovimo, če dovolj povečamo temperaturo lepljenja. Z UF lepili običajno lepimo pri temperaturah od 90 do 120 °C. Pri temperaturi 90 °C je bil čas stiskanja za doseg maksimalne trdnosti približno 120 s, pri temperaturi 120 °C pa smo dosegli maksimalno trdnost že v 60 s. Pomembno je upoštevati navodila proizvajalca lepila in ne preseči maksimalne dovoljene temperature lepljenja, sicer se pojavi temperaturna degradacija UF

lepilnega spoja. Slabosti lepljenja pri višjih temperaturah so večja poraba energije za zagotavljanje temperature in večje toplotne izgube. Tudi tehnološka oprema je običajno dražja in zahtevnejša za lepljenje pri visokih temperaturah.

Večji del katalizatorja v pripravljene lepilni mešanici pospeši reakcijo polikondenzacije. Katalizator amonijev klorid zmanjšuje pH lepilne mešanice in vpliva na povečanje viskoznosti. V raziskavi smo ugotovili, da za hitro lepljenje zadošča 1 do 2 dela katalizatorja v 100 delih UF lepilne smole. Manjša količina katalizatorja (0,1 in 0,5 dela) zahteva daljše čase stiskanja, prav tako pa ni smiselno dodajati več kot 2 dela katalizatorja, saj s tem časa stiskanja bistveno ne skrajšamo.

Temperatura v lepilnem spoju je bila v začetku nižja od grelnih plošč stiskalnice in je postopoma naraščala, odvisno od debeline lepljenca. V raziskavi je bila debelina furnirja 1,1 mm, tako da je lepilni spoj dosegel temperaturo grelnih plošč približno v 40 s.

Lom po lesu se je pojavil, ko je bila lokalno adhezija med lesom in lepilom večja od kohezije lesa. Strižna trdnost se je pojavila nekoliko pred lomom po lesu, vendar je nato lom po lesu hitro napredoval, tako da sta bili maksimalni vrednosti za obe lastnosti doseženi skoraj hkrati.

Čas stiskanja lepljenca mora biti ravno pravšnji. Prekratko stiskanje ne zagotavlja dovolj velike adhezije med lepilom in lesom, strižna trdnost pa še ne doseže maksimuma. Posledica krajšega stiskanja je manj kvaliteten spoj ali celo razpad lepljenca. Predolgo stiskanje pa povzroči termično degradacijo UF lepila in s tem padec strižne trdnosti.

Na osnovi opravljene raziskave lahko rezultate strnemo v naslednje bistvene sklepe:

- Dinamika graditve strižne trdnosti UF lepilnega spoja je bila odvisna od temperature stiskanja in od sestave lepilne mešanice.
- Hitrost rasti strižne trdnosti UF lepilnega spoja je naraščala z naraščajočo temperaturo stiskanja. Pri temperaturi stiskanja 90 °C je bila dosežena maksimalna trdnost po 130 s, medtem ko se je to pri temperaturi stiskanja 120 °C zgodilo že po 60 s.

- Delež loma po lesu UF lepilnega spoja je naraščal s časom stiskanja in je po določenem času potekal povsem po lesu. To se je pri temperaturi stiskanja 90 °C zgodilo po 120 s, pri 100 °C po 100 s, pri 110 °C po 80 s in pri 120 °C po 60 s.
- Z naraščanjem deleža dodanega katalizatorja je polikondenzacija UF lepila potekala hitreje, prav tako pa tudi hitrost graditve trdnosti lepilnega spoja.
- Predolgo stiskanje pri visoki temperaturi je povzročilo termično degradacijo UF lepila in padec strižne trdnosti.

Na osnovi rezultatov te raziskave priporočamo lepljenje z lepilno mešanico, ki naj vsebuje 1 del katalizatorja NH_4Cl na 100 delov UF smole, lepljenje pa naj bo izvedeno pri temperaturi stiskalnice 120 °C.

6 POVZETEK

Lepljenje lesa je ena izmed pomembnejših tehnoloških faz v lesarstvu. Kvalitetno utrjeni lepilni spoji so pogoj za nadaljnjo obdelavo in dolgo življenjsko dobo izdelka. Zaradi čedalje bolj zmogljivih obdelovalnih strojev so potrebe po čim krajšem času lepljenja vedno bolj pomembne. Krajši časi lepljenja pomenijo odpravljanje ozkih grl v proizvodnji, večjo produktivnost in nižanje stroškov proizvodnje.

V raziskavi za diplomsko nalogo smo proučevali razvoj strižne trdnosti UF lepila Lendur 200. Bukov (*Fagus sylvatica* L.) furnir debeline 1,1 mm smo uporabili za izdelavo preskušancev širine 30 mm in dolžine 240 mm. Furnir je bil klimatiziran na 7% vlažnost. Lepilno mešanico smo pripravljali z metodo tehtanja, in sicer 100 delov lepilne smole in n delov katalizatorja. Lepilno mešanico smo vsakih 40 minut zamenjali z novo. Lepilo smo nanašali na 30 mm x 5 mm veliko površino preskušanca, ki smo jo obrusili in na njo enostransko s pipeto nanašali lepilo v količini 200 g/m².

Raziskava je bila opravljena z metodo dinamike graditve strižne trdnosti (DGST), ki je prilagojena metoda ABES. Proučevali smo rast strižne trdnosti in lom po lesu UF lepilnega spoja pri različnih temperaturah in dodatkih katalizatorja. Preskušance smo testirali s strojem Zwick Z100, kamor smo vpeli preskušanec, ga stiskali določen čas in nato ugotovili njegovo strižno trdnost. Časovno smo stiskanje opravljali od 20 do 180 s in pri eni lepilni mešanici dodatno do 600 s. Pri vsakem času stiskanja smo naredili 5 ali 7 ponovitev istega testa. Lom po lesu smo ocenjevali vizualno.

Utrjevanje UF lepilne mešanice, ki je vsebovala 100 delov UF lepila in 1 del suhega katalizatorja amonijevega klorida (NH₄Cl), smo proučevali pri 4 različnih temperaturah stiskanja: 90, 100, 110 in 120 °C. Nato smo pri temperaturi stiskanja 100 °C proučevali utrjevanje 4 različnih UF lepilnih mešanic, v katerih je bila količina UF lepila enaka (100 delov), spreminjali pa smo delež dodanega katalizatorja, in sicer 0,1 del, 0,5 dela, 1 del in 2 dela.

Z rezultati raziskave smo potrdili predvidevanja, da strižna trdnost hitreje raste pri višji temperaturi stiskanja. Najhitreje se je strižna trdnost gradila pri 120 °C. Tudi večja koncentracija katalizatorja amonijevega klorida je pozitivno vplivala na rast strižne trdnosti, saj je rast trdnosti pri 1 delu in 2 delih dodanega katalizatorja UF lepilni mešanici potekala bistveno hitreje kot pri 0,1 delu katalizatorja. Lom po lesu UF lepilnega spoja v začetku lepljenja zaradi majhne adhezije ni bil prisoten, kasneje pa je bil z rastjo strižne trdnosti do maksimalne vrednosti dosežen tudi 100% lom po lesu.

Merjenje temperature v lepilnem spoju je pokazalo, da je bil potreben določen čas, da se je temperatura iz grelnih plošč prenesla v lepilni spoj. Pri predolgem času lepljenja pa je bilo opaziti temperaturno degradacijo UF lepilnega spoja in padec strižne trdnosti.

Na osnovi rezultatov te raziskave priporočamo lepljenje z lepilno mešanico, ki naj vsebuje 1 del katalizatorja NH_4Cl na 100 delov UF smole, lepljenje pa naj bo izvedeno pri temperaturi stiskalnice 120 °C.

7 VIRI

Chowdhury M.J.A., Humphrey P.E. 1999. The effect of acetylation on the shear strength development kinetics of phenolic resin-to-wood bonds. *Wood and Fiber Science*, 31,3: 293–299

Čufar K. 2001. Opis lesnih vrst. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 16–18

Heinemann C., Lehnen R., Humphrey P.E. 2002. Kinetic response of thermosetting adhesive systems to heat: physico-chemical versus mechanical responses. V: *Proceedings of the 6th Pacific Rim Bio-Based composites symposium*. Portland/USA, 10.–13. 11. 2002, Corvallis: Oregon state university: 34–44

Humphrey P.E. 1990. Device for testing adhesive bonds. United States Patent 5.176.028.

Jošt M. 2009. Vpliv temperature stiskanja na kinetiko utrjevanja in dinamiko graditve trdnosti fenol-formaldehidnega lepilnega spoja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 106 str.

Jošt M., Šernek M. 2009. Shear strength development of the phenol-formaldehyde adhesive bond during cure. *Wood Science and Tehnology*, 43, 1/2: 153–166

Kariž M. 2005. Vpliv temperature stiskanja na proces utrjevanja fenol-formaldehidnega lepila. Diplomsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 62 str.

Kim J.W., Humphrey P.E. 2000. The effect of testing temperature on the strength of partially cured phenol-formaldehyde adhesive bonds. V: *Wood adhesives 2000: extended abstract*: June 22–23, 2000. South Lake Tahoe: Forest Product Society: 92–94

Kreber B., Humphrey P.E., Morrell J.J. 1993. Effect of polyborate pre-treatment on the shear strength development of phenolics resin to Sitka spruce bonds. *Holzforschung*, 47, 5: 398–402

Lecourt M., Pizzi A., Humphrey P. 2003. Comparison of TMA and ABES as forecasting systems of wood bonding effectiveness. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 1: 75–76

Mervič B. 1962. Sintetična lepila in njihova uporaba. Ljubljana, Tehniška šola KRLM: 287 str.

Nafta Petrochem. 2007. Tehnična specifikacija Lendur 200

Prasad T.R.N., Humphrey P.E., Morrell J.J. 1994. The effects of chromated copper arsenate and ammoniacal copper zinc arsenate on shear strength development of phenolic resin to Sitka spruce bonds. *Wood and Fibe Science*, 26, 2: 223–228

Resnik J. 1989. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 103 str.

SIST EN 205. 2003. Lepila - Lepila za les za nekonstrukcijsko uporabo - Ugotavljanje natezno strižne trdnosti spojev s preklopom

Šernek M. 1999. Vpliv bistvenih dejavnikov na penetracijo in trdnost UF lepilnega spoja pri lepljenju bukovine. Magistrsko delo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 111 str.

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

Šernek M., Jošt M. 2008. Monitoring bond strength development during the phenol-formaldehyde adhesive cure. V: *Proceedings of the International Panel Products Symposium 2008*, Bangor: BioComposites Centre: 87–95

Šernek M., Kariž M., Kunc D. 2009. Graditev trdnosti urea-formaldehidnega lepilnega spoja med utrjevanjem. Les, 61, 5: 264–273

Šernek M., Kutnar A. 2009. Aminoplastična lepila. Les 61, 2: 47–53

ZAHVALA

Zahvaljujem se celotnemu kolektivu Biotehniške fakultete, Oddelku za lesarstvo, predvsem pa Katedri za lepljene, lesne kompozite in obdelavo površin za sodelovanje med študijem in pri izdelavi diplomske naloge. Predvsem se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Milanu Šerneku za pomoč pri izvedbi meritev in usmerjanju pri pisanju diplomske naloge, recenzentu doc. dr. Sergeju Medvedu za strokovno recenzijo diplomske naloge in asist. Mirku Karižu za pomoč pri izvedbi meritev. Zahvala gre tudi vsem sošolcem in domačim, ki so mi med študijem stali ob strani.

PRILOGE

Priloga A: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 90 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja).

| 90 °C - 1 DEL | | | | | | | | |
|---------------|-----|---|------|------------|-------------|----------------|-----|--------|
| Zap. št. | t | n | F | a - širina | b - dolžina | f _v | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 22 | 28,86 | 5,47 | 0,14 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 23 | 29,89 | 5,83 | 0,13 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 20 | 30,25 | 5,60 | 0,12 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 12 | 28,48 | 5,51 | 0,08 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 14 | 29,92 | 5,49 | 0,09 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 20 | 29,52 | 5,50 | 0,12 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 34 | 29,41 | 5,46 | 0,21 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 19 | 30,58 | 5,24 | 0,12 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 17 | 29,62 | 5,47 | 0,10 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 24 | 29,98 | 5,89 | 0,14 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 37 | 30,71 | 5,65 | 0,21 | 0 | |
| 12 | 40 | 2 | 67 | 30,03 | 5,62 | 0,40 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 43 | 30,19 | 5,60 | 0,25 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 79 | 29,91 | 5,72 | 0,46 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 49 | 29,83 | 5,48 | 0,30 | 0 | |
| 16 | 50 | 1 | 146 | 28,85 | 5,34 | 0,95 | 0 | |
| 17 | 50 | 2 | 235 | 29,18 | 5,35 | 1,51 | 10 | |
| 18 | 50 | 3 | 183 | 30,59 | 5,29 | 1,13 | 10 | |
| 19 | 50 | 4 | 138 | 28,05 | 5,20 | 0,95 | 0 | |
| 20 | 50 | 5 | 145 | 28,92 | 5,50 | 0,91 | 10 | |
| 21 | 60 | 1 | 319 | 28,50 | 5,51 | 2,03 | 10 | |
| 22 | 60 | 2 | 384 | 27,75 | 5,33 | 2,60 | 10 | |
| 23 | 60 | 3 | 414 | 29,57 | 5,24 | 2,67 | 10 | |
| 24 | 60 | 4 | 428 | 28,73 | 5,26 | 2,83 | 10 | |
| 25 | 60 | 5 | 295 | 28,51 | 5,31 | 1,95 | 10 | |
| 26 | 80 | 1 | 1177 | 30,97 | 5,03 | 7,56 | 100 | |
| 27 | 80 | 2 | 726 | 30,25 | 5,40 | 4,44 | 80 | |
| 28 | 80 | 3 | 893 | 29,25 | 5,45 | 5,60 | 80 | |
| 29 | 80 | 4 | 714 | 29,11 | 5,33 | 4,60 | 80 | |
| 30 | 80 | 5 | 1112 | 30,86 | 5,67 | 6,36 | 100 | |
| 31 | 80 | 6 | 797 | 28,97 | 5,23 | 5,26 | 30 | * |
| 32 | 80 | 7 | 1060 | 29,56 | 5,73 | 6,26 | 50 | * |
| 33 | 100 | 1 | 1262 | 28,28 | 5,67 | 7,87 | 100 | |
| 34 | 100 | 2 | 1032 | 29,56 | 5,33 | 6,55 | 90 | |
| 35 | 100 | 3 | 1112 | 29,47 | 5,48 | 6,89 | 100 | |
| 36 | 100 | 4 | 1174 | 29,11 | 5,77 | 6,99 | 100 | |
| 37 | 100 | 5 | 1382 | 28,17 | 5,43 | 9,03 | 100 | |
| 38 | 120 | 1 | 1253 | 28,31 | 5,58 | 7,93 | 100 | |
| 39 | 120 | 2 | 1425 | 30,03 | 4,92 | 9,64 | 100 | |
| 40 | 120 | 3 | 1420 | 30,13 | 5,13 | 9,19 | 100 | |
| 41 | 120 | 4 | 1691 | 28,24 | 5,28 | 11,34 | 100 | |
| 42 | 120 | 5 | 1619 | 28,44 | 4,89 | 11,64 | 100 | |
| 43 | 120 | 6 | 1449 | 28,66 | 5,55 | 9,11 | 100 | * |
| 44 | 120 | 7 | 1489 | 30,30 | 5,56 | 8,84 | 100 | * |
| 45 | 150 | 1 | 1869 | 28,73 | 5,44 | 11,96 | 100 | |
| 46 | 150 | 2 | 1463 | 28,82 | 5,00 | 10,15 | 100 | |
| 47 | 150 | 3 | 1714 | 30,14 | 5,31 | 10,71 | 100 | |
| 48 | 150 | 4 | 1382 | 28,30 | 5,06 | 9,65 | 100 | |
| 49 | 150 | 5 | 1754 | 29,49 | 5,08 | 11,71 | 100 | |
| 50 | 180 | 1 | 1450 | 29,26 | 5,27 | 9,40 | 100 | |
| 51 | 180 | 2 | 1736 | 28,53 | 5,16 | 11,79 | 100 | |
| 52 | 180 | 3 | 1657 | 28,48 | 5,44 | 10,70 | 100 | |
| 53 | 180 | 4 | 1892 | 30,13 | 5,59 | 11,23 | 100 | |
| 54 | 180 | 5 | 1692 | 30,14 | 5,43 | 10,34 | 100 | |

Priloga B: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)

| 100 °C - 1 DEL | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 11 | 29,28 | 5,13 | 0,07 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 10 | 30,68 | 5,20 | 0,06 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 15 | 29,34 | 5,49 | 0,09 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 11 | 30,30 | 5,57 | 0,07 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 15 | 28,75 | 5,51 | 0,09 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 72 | 30,11 | 5,32 | 0,45 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 34 | 28,69 | 5,38 | 0,22 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 54 | 29,09 | 5,10 | 0,36 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 60 | 29,87 | 5,22 | 0,38 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 42 | 28,59 | 5,43 | 0,27 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 201 | 28,74 | 5,62 | 1,24 | 0 | |
| 12 | 40 | 2 | 348 | 29,79 | 5,47 | 2,14 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 223 | 29,06 | 5,25 | 1,46 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 217 | 28,55 | 5,31 | 1,43 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 298 | 28,74 | 5,36 | 1,93 | 0 | |
| 16 | 50 | 1 | 834 | 29,37 | 5,83 | 4,87 | 60 | |
| 17 | 50 | 2 | 988 | 27,20 | 5,45 | 6,66 | 50 | |
| 18 | 50 | 3 | 701 | 29,96 | 5,66 | 4,13 | 40 | |
| 19 | 50 | 4 | 760 | 30,90 | 5,46 | 4,50 | 30 | |
| 20 | 50 | 5 | 639 | 28,96 | 5,33 | 4,14 | 30 | |
| 21 | 50 | 6 | 402 | 29,65 | 5,34 | 2,54 | 0 | * |
| 22 | 50 | 7 | 785 | 28,69 | 5,59 | 4,89 | 20 | * |
| 23 | 60 | 1 | 929 | 28,55 | 5,55 | 5,86 | 50 | |
| 24 | 60 | 2 | 925 | 28,23 | 5,37 | 6,10 | 90 | |
| 25 | 60 | 3 | 923 | 29,32 | 5,19 | 6,07 | 90 | |
| 26 | 60 | 4 | 737 | 28,15 | 5,20 | 5,03 | 80 | |
| 27 | 60 | 5 | 789 | 28,84 | 4,97 | 5,50 | 80 | |
| 28 | 80 | 1 | 1520 | 28,59 | 5,52 | 9,63 | 100 | |
| 29 | 80 | 2 | 1242 | 29,13 | 5,08 | 8,39 | 90 | |
| 30 | 80 | 3 | 1449 | 29,05 | 5,19 | 9,61 | 100 | |
| 31 | 80 | 4 | 1450 | 28,44 | 5,32 | 9,58 | 100 | |
| 32 | 80 | 5 | 1541 | 30,01 | 5,32 | 9,65 | 100 | |
| 33 | 80 | 6 | 1024 | 28,86 | 5,96 | 5,95 | 60 | * |
| 34 | 80 | 7 | 1120 | 29,89 | 5,88 | 6,37 | 80 | * |
| 35 | 100 | 1 | 1434 | 28,46 | 5,45 | 9,25 | 100 | |
| 36 | 100 | 2 | 1333 | 29,19 | 4,94 | 9,24 | 100 | |
| 37 | 100 | 3 | 1854 | 31,52 | 5,93 | 9,92 | 100 | |
| 38 | 100 | 4 | 1619 | 31,03 | 5,16 | 10,11 | 100 | |
| 39 | 100 | 5 | 1625 | 29,71 | 5,27 | 10,38 | 100 | |
| 40 | 120 | 1 | 1389 | 27,13 | 5,47 | 9,36 | 100 | |
| 41 | 120 | 2 | 1691 | 28,92 | 5,41 | 10,81 | 100 | |
| 42 | 120 | 3 | 1771 | 29,92 | 5,65 | 10,48 | 100 | |
| 43 | 120 | 4 | 1579 | 28,96 | 5,89 | 9,26 | 100 | |
| 44 | 120 | 5 | 1850 | 29,94 | 5,50 | 11,23 | 100 | |
| 45 | 150 | 1 | 1862 | 27,82 | 5,47 | 12,24 | 100 | |
| 46 | 150 | 2 | 1881 | 28,71 | 5,31 | 12,34 | 100 | |
| 47 | 150 | 3 | 1679 | 30,40 | 6,15 | 8,98 | 100 | |
| 48 | 150 | 4 | 1605 | 29,23 | 5,41 | 10,15 | 100 | |
| 49 | 150 | 5 | 1540 | 29,24 | 5,28 | 9,97 | 100 | |
| 50 | 150 | 6 | 1685 | 27,87 | 5,79 | 10,44 | 100 | * |
| 51 | 150 | 7 | 1604 | 29,97 | 5,55 | 9,64 | 100 | * |
| 52 | 180 | 1 | 1594 | 28,92 | 5,63 | 9,79 | 100 | |
| 53 | 180 | 2 | 1668 | 30,56 | 5,59 | 9,76 | 100 | |
| 54 | 180 | 3 | 1851 | 31,71 | 5,54 | 10,54 | 100 | |
| 55 | 180 | 4 | 1840 | 32,59 | 5,48 | 10,30 | 100 | |
| 56 | 180 | 5 | 1532 | 29,37 | 5,77 | 9,04 | 100 | |

Priloga C: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 110 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)

| 110 °C - 1 DEL | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 8 | 27,68 | 5,25 | 0,06 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 15 | 27,64 | 5,74 | 0,09 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 12 | 29,02 | 5,42 | 0,08 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 23 | 30,11 | 5,40 | 0,14 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 6 | 29,04 | 5,30 | 0,04 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 302 | 29,50 | 5,48 | 1,87 | 10 | |
| 7 | 30 | 2 | 260 | 29,17 | 5,42 | 1,64 | 10 | |
| 8 | 30 | 3 | 231 | 27,42 | 5,74 | 1,47 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 456 | 28,98 | 5,59 | 2,81 | 20 | |
| 10 | 30 | 5 | 156 | 28,93 | 5,83 | 0,92 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 799 | 28,51 | 5,35 | 5,24 | 60 | |
| 12 | 40 | 2 | 791 | 28,40 | 5,78 | 4,82 | 60 | |
| 13 | 40 | 3 | 845 | 27,59 | 5,61 | 5,46 | 70 | |
| 14 | 40 | 4 | 740 | 28,11 | 5,88 | 4,48 | 50 | |
| 15 | 40 | 5 | 689 | 29,60 | 5,65 | 4,12 | 30 | |
| 16 | 50 | 1 | 1343 | 27,76 | 5,56 | 8,70 | 100 | |
| 17 | 50 | 2 | 1142 | 28,99 | 5,51 | 7,15 | 100 | |
| 18 | 50 | 3 | 942 | 27,86 | 5,50 | 6,15 | 80 | |
| 19 | 50 | 4 | 732 | 27,66 | 5,42 | 4,88 | 80 | |
| 20 | 50 | 5 | 1427 | 27,94 | 5,49 | 9,30 | 100 | |
| 21 | 60 | 1 | 1120 | 29,13 | 5,38 | 7,15 | 100 | |
| 22 | 60 | 2 | 1115 | 29,01 | 5,67 | 6,78 | 90 | |
| 23 | 60 | 3 | 1489 | 29,60 | 5,42 | 9,28 | 100 | |
| 24 | 60 | 4 | 1585 | 28,90 | 5,89 | 9,31 | 100 | |
| 25 | 60 | 5 | 1366 | 29,06 | 5,21 | 9,02 | 100 | |
| 26 | 80 | 1 | 1580 | 28,43 | 5,72 | 9,72 | 100 | |
| 27 | 80 | 2 | 1789 | 29,17 | 5,98 | 10,26 | 100 | |
| 28 | 80 | 3 | 1670 | 30,15 | 5,68 | 9,75 | 100 | |
| 29 | 80 | 4 | 1288 | 30,08 | 6,13 | 6,99 | 100 | |
| 30 | 80 | 5 | 1385 | 29,08 | 5,54 | 8,60 | 100 | |
| 31 | 100 | 1 | 2013 | 31,03 | 5,39 | 12,04 | 100 | |
| 32 | 100 | 2 | 1889 | 29,08 | 5,73 | 11,34 | 100 | |
| 33 | 100 | 3 | 1545 | 28,51 | 5,79 | 9,36 | 100 | |
| 34 | 100 | 4 | 1193 | 28,62 | 5,25 | 7,94 | 100 | |
| 35 | 100 | 5 | 1552 | 30,15 | 6,17 | 8,34 | 100 | |
| 36 | 120 | 1 | 1884 | 28,18 | 5,62 | 11,90 | 100 | |
| 37 | 120 | 2 | 1745 | 30,16 | 5,82 | 9,94 | 100 | |
| 38 | 120 | 3 | 1213 | 27,26 | 5,42 | 8,21 | 100 | |
| 39 | 120 | 4 | 1290 | 29,10 | 5,39 | 8,22 | 100 | |
| 40 | 120 | 5 | 1720 | 29,23 | 5,57 | 10,56 | 100 | |
| 41 | 150 | 1 | 1852 | 27,46 | 5,55 | 12,15 | 100 | |
| 42 | 150 | 2 | 1773 | 29,06 | 5,80 | 10,52 | 100 | |
| 43 | 150 | 3 | 1446 | 29,07 | 5,77 | 8,62 | 100 | |
| 44 | 150 | 4 | 1288 | 27,67 | 5,87 | 7,93 | 100 | |
| 45 | 150 | 5 | 1478 | 27,40 | 4,91 | 10,99 | 100 | |
| 46 | 180 | 1 | 1438 | 27,76 | 5,82 | 8,90 | 100 | |
| 47 | 180 | 2 | 1661 | 28,00 | 5,38 | 11,03 | 100 | |
| 48 | 180 | 3 | 1412 | 27,55 | 6,25 | 8,20 | 100 | |
| 49 | 180 | 4 | 1353 | 28,60 | 6,34 | 7,46 | 100 | |
| 50 | 180 | 5 | 1470 | 27,37 | 6,50 | 8,26 | 100 | |

Priloga D: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 120 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)

| 120 °C - 1 DEL | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 92 | 29,45 | 5,41 | 0,58 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 71 | 29,10 | 5,40 | 0,45 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 66 | 28,25 | 5,62 | 0,42 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 49 | 29,48 | 5,55 | 0,30 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 52 | 28,98 | 5,27 | 0,34 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 770 | 29,08 | 5,78 | 4,58 | 20 | |
| 7 | 30 | 2 | 682 | 28,81 | 5,87 | 4,03 | 10 | |
| 8 | 30 | 3 | 690 | 28,15 | 5,30 | 4,62 | 20 | |
| 9 | 30 | 4 | 549 | 28,41 | 5,52 | 3,50 | 20 | |
| 10 | 30 | 5 | 560 | 29,84 | 5,61 | 3,35 | 10 | |
| 11 | 40 | 1 | 1121 | 29,05 | 5,30 | 7,28 | 100 | |
| 12 | 40 | 2 | 973 | 29,10 | 5,19 | 6,44 | 90 | |
| 13 | 40 | 3 | 1103 | 29,33 | 5,47 | 6,88 | 100 | |
| 14 | 40 | 4 | 1227 | 28,58 | 5,63 | 7,63 | 90 | |
| 15 | 40 | 5 | 1471 | 29,68 | 5,39 | 9,20 | 100 | |
| 16 | 40 | 6 | 1268 | 30,03 | 5,26 | 8,03 | 100 | * |
| 17 | 40 | 7 | 1409 | 29,51 | 5,53 | 8,63 | 100 | * |
| 18 | 50 | 1 | 1518 | 28,53 | 5,41 | 9,83 | 100 | |
| 19 | 50 | 2 | 1483 | 29,40 | 5,38 | 9,38 | 90 | |
| 20 | 50 | 3 | 1245 | 29,40 | 4,93 | 8,59 | 100 | |
| 21 | 50 | 4 | 1216 | 27,90 | 5,70 | 7,65 | 100 | |
| 22 | 50 | 5 | 1552 | 29,20 | 5,67 | 9,37 | 100 | |
| 23 | 60 | 1 | 1645 | 29,52 | 5,19 | 10,74 | 100 | |
| 24 | 60 | 2 | 1432 | 29,54 | 5,30 | 9,15 | 100 | |
| 25 | 60 | 3 | 1535 | 29,66 | 5,21 | 9,93 | 100 | |
| 26 | 60 | 4 | 1620 | 28,79 | 5,35 | 10,52 | 100 | |
| 27 | 60 | 5 | 1580 | 27,74 | 5,60 | 10,17 | 100 | |
| 28 | 80 | 1 | 1461 | 26,91 | 5,36 | 10,13 | 100 | |
| 29 | 80 | 2 | 1682 | 27,15 | 5,52 | 11,22 | 100 | |
| 30 | 80 | 3 | 1188 | 27,51 | 5,82 | 7,42 | 100 | |
| 31 | 80 | 4 | 1830 | 27,75 | 5,44 | 12,12 | 100 | |
| 32 | 80 | 5 | 1467 | 28,43 | 5,11 | 10,10 | 100 | |
| 35 | 100 | 1 | 1558 | 30,29 | 5,52 | 9,32 | 100 | |
| 36 | 100 | 2 | 1519 | 29,33 | 5,35 | 9,68 | 100 | |
| 37 | 100 | 3 | 1516 | 29,29 | 4,90 | 10,56 | 100 | |
| 38 | 100 | 4 | 1430 | 29,38 | 4,69 | 10,38 | 100 | |
| 39 | 100 | 5 | 1488 | 29,32 | 5,04 | 10,07 | 100 | |
| 40 | 120 | 1 | 1483 | 29,33 | 5,36 | 9,43 | 100 | |
| 41 | 120 | 2 | 1546 | 28,63 | 5,45 | 9,91 | 100 | |
| 42 | 120 | 3 | 1557 | 29,44 | 5,46 | 9,69 | 100 | |
| 43 | 120 | 4 | 1719 | 28,44 | 5,49 | 11,01 | 100 | |
| 44 | 120 | 5 | 1941 | 28,41 | 5,04 | 13,56 | 100 | |
| 45 | 120 | 6 | 1738 | 29,90 | 5,57 | 10,44 | 100 | * |
| 46 | 120 | 7 | 1611 | 29,20 | 5,38 | 10,25 | 100 | * |
| 47 | 150 | 1 | 1364 | 28,92 | 5,23 | 9,02 | 100 | |
| 48 | 150 | 2 | 1654 | 28,98 | 5,65 | 10,10 | 100 | |
| 49 | 150 | 3 | 1760 | 30,53 | 5,40 | 10,68 | 100 | |
| 50 | 150 | 4 | 1662 | 27,73 | 5,54 | 10,82 | 100 | |
| 51 | 150 | 5 | 1453 | 29,47 | 5,24 | 9,41 | 100 | |
| 52 | 180 | 1 | 1632 | 28,77 | 5,72 | 9,92 | 100 | |
| 53 | 180 | 2 | 1219 | 29,10 | 5,87 | 7,14 | 100 | |
| 54 | 180 | 3 | 1628 | 30,36 | 5,41 | 9,91 | 100 | |
| 55 | 180 | 4 | 1244 | 28,72 | 5,40 | 8,02 | 100 | |
| 56 | 180 | 5 | 1657 | 28,35 | 5,54 | 10,55 | 100 | |
| 57 | 180 | 6 | 1386 | 29,37 | 6,30 | 7,49 | 100 | * |
| 58 | 180 | 7 | 1560 | 30,16 | 5,70 | 9,07 | 100 | * |

Priloga E: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 0,1 del katalizatorja)

| 0,1 DEL - 100 °C | | | | | | | | |
|------------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 33 | 29,63 | 5,37 | 0,21 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 39 | 30,42 | 5,72 | 0,22 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 40 | 29,74 | 5,69 | 0,24 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 27 | 28,13 | 5,82 | 0,16 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 30 | 27,20 | 5,70 | 0,19 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 46 | 27,06 | 6,17 | 0,28 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 29 | 29,36 | 5,87 | 0,17 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 53 | 29,01 | 5,47 | 0,33 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 35 | 28,30 | 5,32 | 0,23 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 29 | 28,88 | 5,46 | 0,18 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 57 | 30,26 | 5,45 | 0,35 | 0 | |
| 12 | 40 | 2 | 68 | 29,32 | 5,24 | 0,44 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 49 | 30,55 | 5,61 | 0,29 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 55 | 30,17 | 5,46 | 0,33 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 50 | 29,40 | 5,89 | 0,29 | 0 | |
| 16 | 50 | 1 | 66 | 27,73 | 5,32 | 0,45 | 10 | |
| 17 | 50 | 2 | 55 | 28,70 | 5,65 | 0,34 | 0 | |
| 18 | 50 | 3 | 65 | 28,47 | 5,31 | 0,43 | 0 | |
| 19 | 50 | 4 | 52 | 28,80 | 5,36 | 0,34 | 0 | |
| 20 | 50 | 5 | 75 | 28,97 | 5,15 | 0,50 | 0 | |
| 21 | 60 | 1 | 96 | 28,59 | 5,29 | 0,63 | 0 | |
| 22 | 60 | 2 | 72 | 28,81 | 5,36 | 0,47 | 0 | |
| 23 | 60 | 3 | 72 | 28,86 | 5,21 | 0,48 | 0 | |
| 24 | 60 | 4 | 82 | 29,46 | 5,28 | 0,53 | 0 | |
| 25 | 60 | 5 | 100 | 30,05 | 5,21 | 0,64 | 10 | |
| 26 | 80 | 1 | 169 | 30,10 | 5,75 | 0,98 | 0 | |
| 27 | 80 | 2 | 62 | 29,15 | 5,48 | 0,39 | 0 | |
| 28 | 80 | 3 | 100 | 28,83 | 5,37 | 0,65 | 0 | |
| 29 | 80 | 4 | 103 | 27,63 | 5,19 | 0,72 | 0 | |
| 30 | 80 | 5 | 92 | 28,58 | 6,44 | 0,50 | 0 | |
| 31 | 80 | 6 | 101 | 27,83 | 5,31 | 0,68 | 0 | * |
| 32 | 80 | 7 | 126 | 29,22 | 5,59 | 0,77 | 0 | * |
| 33 | 100 | 1 | 170 | 29,03 | 5,62 | 1,04 | 10 | |
| 34 | 100 | 2 | 163 | 29,23 | 5,65 | 0,99 | 0 | |
| 35 | 100 | 3 | 164 | 28,53 | 5,58 | 1,03 | 10 | |
| 36 | 100 | 4 | 205 | 28,14 | 5,57 | 1,31 | 10 | |
| 37 | 100 | 5 | 244 | 28,99 | 6,05 | 1,39 | 10 | |
| 38 | 120 | 1 | 233 | 30,07 | 5,78 | 1,34 | 20 | |
| 39 | 120 | 2 | 237 | 29,63 | 5,18 | 1,54 | 10 | |
| 40 | 120 | 3 | 237 | 26,94 | 5,72 | 1,54 | 0 | |
| 41 | 120 | 4 | 298 | 27,50 | 5,62 | 1,93 | 80 | |
| 42 | 120 | 5 | 295 | 27,84 | 5,63 | 1,88 | 40 | |
| 43 | 150 | 1 | 328 | 29,94 | 5,66 | 1,94 | 20 | |
| 44 | 150 | 2 | 453 | 28,61 | 6,53 | 2,42 | 10 | |
| 45 | 150 | 3 | 353 | 30,07 | 5,85 | 2,01 | 30 | |
| 46 | 150 | 4 | 345 | 27,74 | 5,84 | 2,13 | 10 | |
| 47 | 150 | 5 | 318 | 28,79 | 5,78 | 1,91 | 80 | |
| 48 | 180 | 1 | 384 | 26,71 | 5,73 | 2,51 | 70 | |
| 49 | 180 | 2 | 348 | 30,10 | 5,67 | 2,04 | 10 | |
| 50 | 180 | 3 | 509 | 29,59 | 5,51 | 3,12 | 0 | |
| 51 | 180 | 4 | 350 | 30,36 | 5,51 | 2,09 | 30 | |
| 52 | 180 | 5 | 396 | 29,43 | 5,72 | 2,35 | 70 | |
| 53 | 180 | 6 | 311 | 29,68 | 5,46 | 1,92 | 10 | * |
| 54 | 180 | 7 | 343 | 29,61 | 5,54 | 2,09 | 0 | * |

se nadaljuje

nadaljevanje

| 0,1 DEL - 100 °C | | | | | | | | |
|------------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 55 | 240 | 1 | 628 | 29,27 | 6,13 | 3,50 | 100 | |
| 56 | 240 | 2 | 553 | 30,14 | 5,63 | 3,26 | 20 | * |
| 57 | 240 | 3 | 507 | 30,35 | 5,37 | 3,11 | 30 | * |
| 58 | 240 | 4 | 700 | 29,03 | 5,43 | 4,44 | 70 | * |
| 59 | 240 | 5 | 628 | 29,14 | 5,79 | 3,72 | 10 | * |
| 60 | 300 | 1 | 961 | 27,16 | 5,47 | 6,47 | 100 | |
| 61 | 300 | 2 | 836 | 26,51 | 5,23 | 6,03 | 100 | |
| 62 | 300 | 3 | 884 | 28,72 | 5,78 | 5,33 | 50 | |
| 63 | 300 | 4 | 866 | 29,65 | 5,36 | 5,45 | 100 | * |
| 64 | 300 | 5 | 976 | 30,83 | 5,31 | 5,96 | 90 | * |
| 65 | 360 | 1 | 1240 | 29,11 | 5,84 | 7,29 | 100 | |
| 66 | 360 | 2 | 1015 | 29,63 | 5,19 | 6,60 | 90 | * |
| 67 | 360 | 3 | 1074 | 29,05 | 5,60 | 6,60 | 100 | * |
| 68 | 360 | 4 | 1024 | 29,19 | 5,56 | 6,31 | 100 | * |
| 69 | 360 | 5 | 939 | 29,44 | 5,79 | 5,51 | 100 | * |
| 70 | 480 | 1 | 1378 | 29,66 | 5,57 | 8,34 | 100 | * |
| 71 | 480 | 2 | 1494 | 31,77 | 5,55 | 8,47 | 100 | * |
| 72 | 480 | 3 | 1465 | 28,99 | 5,39 | 9,38 | 100 | * |
| 73 | 480 | 4 | 1416 | 29,87 | 6,23 | 7,61 | 90 | * |
| 74 | 480 | 5 | 1400 | 28,99 | 5,65 | 8,55 | 100 | * |
| 75 | 600 | 1 | 1702 | 28,89 | 5,61 | 10,50 | 100 | * |
| 76 | 600 | 2 | 1625 | 29,27 | 5,70 | 9,74 | 100 | * |
| 77 | 600 | 3 | 1554 | 29,42 | 5,48 | 9,64 | 100 | * |
| 78 | 600 | 4 | 1549 | 30,80 | 5,80 | 8,67 | 100 | * |
| 79 | 600 | 5 | 1642 | 29,12 | 5,41 | 10,42 | 100 | * |

Priloga F: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 0,5 dela katalizatorja)

| 0,5 DELA - 100 °C | | | | | | | | |
|-------------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 33 | 31,82 | 5,19 | 0,20 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 33 | 29,96 | 5,12 | 0,22 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 38 | 30,27 | 5,45 | 0,23 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 33 | 29,22 | 4,97 | 0,23 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 33 | 30,46 | 5,06 | 0,21 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 63 | 28,38 | 5,67 | 0,39 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 42 | 28,70 | 5,50 | 0,27 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 50 | 29,67 | 5,51 | 0,31 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 49 | 28,61 | 5,30 | 0,32 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 66 | 29,77 | 5,54 | 0,40 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 155 | 29,52 | 5,40 | 0,97 | 0 | |
| 12 | 40 | 2 | 148 | 28,37 | 5,61 | 0,93 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 133 | 29,75 | 5,56 | 0,80 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 181 | 30,59 | 5,50 | 1,08 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 168 | 29,03 | 5,70 | 1,02 | 0 | |
| 16 | 50 | 1 | 319 | 29,04 | 5,47 | 2,01 | 0 | |
| 17 | 50 | 2 | 246 | 29,14 | 5,48 | 1,54 | 0 | |
| 18 | 50 | 3 | 388 | 28,98 | 5,38 | 2,49 | 0 | |
| 19 | 50 | 4 | 319 | 28,40 | 5,51 | 2,04 | 0 | |
| 20 | 50 | 5 | 340 | 30,38 | 5,44 | 2,06 | 10 | |
| 21 | 60 | 1 | 658 | 28,54 | 5,53 | 4,17 | 40 | |
| 22 | 60 | 2 | 1160 | 30,89 | 5,49 | 6,84 | 90 | |
| 23 | 60 | 3 | 355 | 30,08 | 5,40 | 2,19 | 10 | |
| 24 | 60 | 4 | 532 | 27,96 | 5,47 | 3,48 | 30 | |
| 25 | 60 | 5 | 540 | 30,52 | 5,26 | 3,36 | 20 | |
| 26 | 60 | 6 | 528 | 29,78 | 6,31 | 2,81 | 10 | * |
| 27 | 60 | 7 | 367 | 29,28 | 6,28 | 2,00 | 10 | * |
| 28 | 80 | 1 | 741 | 25,95 | 5,40 | 5,29 | 80 | |
| 29 | 80 | 2 | 763 | 28,63 | 5,87 | 4,54 | 80 | |
| 30 | 80 | 3 | 1173 | 29,36 | 6,68 | 5,98 | 100 | |
| 31 | 80 | 4 | 796 | 30,00 | 5,52 | 4,81 | 70 | |
| 32 | 80 | 5 | 961 | 29,87 | 5,49 | 5,86 | 90 | |
| 33 | 100 | 1 | 890 | 28,81 | 5,55 | 5,57 | 90 | |
| 34 | 100 | 2 | 858 | 28,03 | 5,61 | 5,46 | 70 | |
| 35 | 100 | 3 | 1070 | 27,31 | 6,32 | 6,20 | 50 | |
| 36 | 100 | 4 | 933 | 27,57 | 5,62 | 6,02 | 50 | |
| 37 | 100 | 5 | 851 | 29,20 | 5,77 | 5,05 | 80 | |
| 38 | 120 | 1 | 1537 | 29,83 | 5,40 | 9,54 | 100 | |
| 39 | 120 | 2 | 1161 | 29,64 | 5,53 | 7,08 | 70 | |
| 40 | 120 | 3 | 1542 | 29,93 | 5,88 | 8,76 | 100 | |
| 41 | 120 | 4 | 1250 | 29,17 | 5,62 | 7,62 | 100 | |
| 42 | 120 | 5 | 1201 | 27,58 | 5,38 | 8,09 | 100 | |
| 43 | 150 | 1 | 1256 | 26,55 | 5,36 | 8,83 | 90 | |
| 44 | 150 | 2 | 1642 | 30,75 | 5,95 | 8,97 | 100 | |
| 45 | 150 | 3 | 1660 | 29,79 | 5,46 | 10,21 | 100 | |
| 46 | 150 | 4 | 1964 | 28,74 | 5,98 | 11,43 | 100 | |
| 47 | 150 | 5 | 1543 | 30,30 | 5,72 | 8,90 | 100 | |
| 48 | 150 | 6 | 1139 | 29,99 | 5,38 | 7,06 | 80 | * |
| 49 | 150 | 7 | 1235 | 28,75 | 5,57 | 7,71 | 90 | * |
| 50 | 180 | 1 | 1691 | 29,78 | 6,13 | 9,26 | 100 | |
| 51 | 180 | 2 | 1472 | 29,58 | 6,03 | 8,25 | 100 | |
| 52 | 180 | 3 | 1567 | 28,67 | 5,58 | 9,80 | 100 | |
| 53 | 180 | 4 | 1464 | 29,02 | 5,23 | 9,65 | 100 | |
| 54 | 180 | 5 | 1239 | 26,88 | 5,76 | 8,00 | 100 | |

Priloga G: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 1 del katalizatorja)

| 1 DEL - 100 °C | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 28 | 30,03 | 5,27 | 0,18 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 33 | 29,01 | 5,19 | 0,22 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 27 | 29,57 | 5,10 | 0,18 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 40 | 30,41 | 5,33 | 0,25 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 32 | 29,71 | 5,65 | 0,19 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 98 | 30,35 | 5,26 | 0,61 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 68 | 29,73 | 5,88 | 0,39 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 51 | 29,84 | 5,74 | 0,30 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 73 | 29,69 | 5,76 | 0,43 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 77 | 29,63 | 5,74 | 0,45 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 305 | 28,13 | 5,78 | 1,88 | 10 | |
| 12 | 40 | 2 | 247 | 29,04 | 5,93 | 1,43 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 330 | 29,69 | 5,43 | 2,05 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 174 | 27,04 | 5,63 | 1,14 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 189 | 28,02 | 5,75 | 1,17 | 0 | |
| 16 | 50 | 1 | 735 | 29,96 | 5,59 | 4,39 | 20 | |
| 17 | 50 | 2 | 830 | 30,45 | 5,86 | 4,65 | 80 | |
| 18 | 50 | 3 | 814 | 30,02 | 5,64 | 4,81 | 80 | |
| 19 | 50 | 4 | 588 | 28,94 | 5,57 | 3,65 | 90 | |
| 20 | 50 | 5 | 639 | 28,84 | 5,55 | 3,99 | 90 | |
| 21 | 60 | 1 | 1014 | 29,38 | 5,54 | 6,23 | 90 | |
| 22 | 60 | 2 | 950 | 29,27 | 5,45 | 5,96 | 90 | |
| 23 | 60 | 3 | 813 | 29,45 | 5,40 | 5,11 | 90 | |
| 24 | 60 | 4 | 685 | 27,90 | 5,85 | 4,20 | 70 | |
| 25 | 60 | 5 | 1328 | 28,87 | 5,40 | 8,52 | 100 | |
| 26 | 60 | 6 | 890 | 29,26 | 6,06 | 5,02 | 50 | * |
| 27 | 60 | 7 | 780 | 29,00 | 5,54 | 4,85 | 70 | * |
| 28 | 80 | 1 | 1339 | 28,72 | 5,47 | 8,52 | 100 | |
| 29 | 80 | 2 | 1250 | 30,26 | 5,86 | 7,05 | 60 | |
| 30 | 80 | 3 | 1410 | 27,30 | 5,31 | 9,73 | 100 | |
| 31 | 80 | 4 | 1154 | 28,98 | 5,48 | 7,27 | 100 | |
| 32 | 80 | 5 | 1481 | 29,69 | 5,58 | 8,94 | 100 | |
| 33 | 100 | 1 | 1394 | 29,41 | 5,05 | 9,39 | 100 | |
| 34 | 100 | 2 | 1876 | 29,49 | 6,03 | 10,55 | 100 | |
| 35 | 100 | 3 | 1812 | 28,59 | 5,29 | 11,98 | 100 | |
| 36 | 100 | 4 | 1789 | 30,52 | 5,28 | 11,10 | 100 | |
| 37 | 100 | 5 | 1630 | 27,98 | 5,33 | 10,93 | 100 | |
| 38 | 120 | 1 | 1491 | 28,83 | 5,32 | 9,72 | 100 | |
| 39 | 120 | 2 | 1591 | 29,43 | 5,68 | 9,52 | 100 | |
| 40 | 120 | 3 | 1471 | 28,66 | 5,77 | 8,90 | 100 | |
| 41 | 120 | 4 | 1664 | 29,68 | 5,34 | 10,50 | 100 | |
| 42 | 120 | 5 | 1428 | 29,60 | 6,75 | 7,15 | 100 | |
| 43 | 120 | 6 | 1550 | 28,89 | 5,81 | 9,23 | 100 | * |
| 44 | 120 | 7 | 1515 | 28,38 | 5,73 | 9,32 | 100 | * |
| 45 | 150 | 1 | 1845 | 31,18 | 5,47 | 10,82 | 100 | |
| 46 | 150 | 2 | 1518 | 29,02 | 5,19 | 10,08 | 100 | |
| 47 | 150 | 3 | 1487 | 29,07 | 5,54 | 9,23 | 100 | |
| 48 | 150 | 4 | 1729 | 29,11 | 5,50 | 10,80 | 100 | |
| 49 | 150 | 5 | 1604 | 29,81 | 5,69 | 9,46 | 100 | |
| 50 | 180 | 1 | 1727 | 30,42 | 5,32 | 10,67 | 100 | |
| 51 | 180 | 2 | 1635 | 29,20 | 5,46 | 10,26 | 100 | |
| 52 | 180 | 3 | 1552 | 29,29 | 5,40 | 9,81 | 100 | |
| 53 | 180 | 4 | 1534 | 28,67 | 5,33 | 10,04 | 100 | |
| 54 | 180 | 5 | 1340 | 27,61 | 6,08 | 7,98 | 100 | |
| 55 | 180 | 6 | 1381 | 29,93 | 5,43 | 8,50 | 100 | * |
| 56 | 180 | 7 | 1374 | 29,11 | 5,60 | 8,43 | 100 | * |

Priloga H: Rast trdnosti UF lepilnega spoja med utrjevanjem pri 100 °C (100 delov UF smole + 2 dela katalizatorja)

| 2 DELA - 100 °C | | | | | | | | |
|-----------------|-------|---|-------|--------|--------|----------------------------|-----|--------|
| Zap. št. | t (s) | n | F (N) | b (mm) | l (mm) | f_v (N/mm ²) | % | Opomba |
| 1 | 20 | 1 | 37 | 28,38 | 5,38 | 0,24 | 0 | |
| 2 | 20 | 2 | 36 | 29,82 | 5,44 | 0,22 | 0 | |
| 3 | 20 | 3 | 43 | 28,99 | 5,59 | 0,27 | 0 | |
| 4 | 20 | 4 | 35 | 30,22 | 5,36 | 0,22 | 0 | |
| 5 | 20 | 5 | 41 | 27,84 | 5,40 | 0,27 | 0 | |
| 6 | 30 | 1 | 84 | 29,40 | 5,48 | 0,52 | 0 | |
| 7 | 30 | 2 | 72 | 29,27 | 5,80 | 0,42 | 0 | |
| 8 | 30 | 3 | 74 | 29,85 | 5,75 | 0,43 | 0 | |
| 9 | 30 | 4 | 87 | 28,42 | 5,83 | 0,53 | 0 | |
| 10 | 30 | 5 | 100 | 29,45 | 5,90 | 0,58 | 0 | |
| 11 | 40 | 1 | 308 | 27,59 | 5,64 | 1,98 | 0 | |
| 12 | 40 | 2 | 239 | 27,30 | 5,57 | 1,57 | 0 | |
| 13 | 40 | 3 | 579 | 29,21 | 5,51 | 3,60 | 0 | |
| 14 | 40 | 4 | 264 | 26,06 | 5,58 | 1,82 | 0 | |
| 15 | 40 | 5 | 381 | 28,27 | 6,09 | 2,21 | 0 | |
| 18 | 50 | 1 | 794 | 28,21 | 5,72 | 4,92 | 50 | |
| 19 | 50 | 2 | 775 | 28,25 | 5,48 | 5,01 | 50 | |
| 20 | 50 | 3 | 706 | 28,91 | 5,78 | 4,23 | 60 | |
| 21 | 50 | 4 | 584 | 29,11 | 5,48 | 3,66 | 30 | |
| 22 | 50 | 5 | 850 | 29,43 | 5,83 | 4,95 | 50 | |
| 23 | 60 | 1 | 1014 | 29,57 | 5,64 | 6,08 | 40 | |
| 24 | 60 | 2 | 980 | 29,10 | 5,31 | 6,34 | 70 | |
| 25 | 60 | 3 | 1237 | 29,74 | 5,54 | 7,51 | 100 | |
| 26 | 60 | 4 | 1219 | 28,37 | 5,57 | 7,71 | 100 | |
| 27 | 60 | 5 | 1209 | 28,30 | 5,57 | 7,67 | 100 | |
| 28 | 80 | 1 | 1714 | 29,01 | 5,38 | 10,98 | 100 | |
| 29 | 80 | 2 | 1348 | 29,91 | 5,54 | 8,14 | 100 | |
| 30 | 80 | 3 | 1672 | 30,03 | 5,11 | 10,90 | 100 | |
| 31 | 80 | 4 | 1517 | 29,29 | 6,14 | 8,44 | 100 | |
| 32 | 80 | 5 | 1683 | 28,73 | 5,34 | 10,97 | 100 | |
| 33 | 80 | 6 | 1534 | 29,28 | 6,38 | 8,21 | 100 | * |
| 34 | 80 | 7 | 1451 | 28,91 | 5,43 | 9,24 | 100 | * |
| 35 | 100 | 1 | 1539 | 28,46 | 5,39 | 10,03 | 100 | |
| 36 | 100 | 2 | 1517 | 28,75 | 5,04 | 10,47 | 100 | |
| 37 | 100 | 3 | 1533 | 31,32 | 5,34 | 9,17 | 100 | |
| 38 | 100 | 4 | 1732 | 29,92 | 5,60 | 10,34 | 100 | |
| 39 | 100 | 5 | 1751 | 29,13 | 5,53 | 10,87 | 100 | |
| 40 | 120 | 1 | 1312 | 29,19 | 5,38 | 8,35 | 100 | |
| 41 | 120 | 2 | 1886 | 27,93 | 5,73 | 11,78 | 100 | |
| 42 | 120 | 3 | 1681 | 29,55 | 5,62 | 10,12 | 100 | |
| 43 | 120 | 4 | 1626 | 27,32 | 5,59 | 10,65 | 100 | |
| 44 | 120 | 5 | 1916 | 29,42 | 5,19 | 12,55 | 100 | |
| 45 | 120 | 6 | 1470 | 28,64 | 5,67 | 9,05 | 100 | * |
| 46 | 120 | 7 | 1681 | 28,78 | 5,34 | 10,94 | 100 | * |
| 47 | 150 | 1 | 1689 | 30,91 | 5,53 | 9,88 | 100 | |
| 48 | 150 | 2 | 1534 | 29,06 | 5,66 | 9,33 | 100 | |
| 49 | 150 | 3 | 1794 | 30,28 | 6,44 | 9,20 | 100 | |
| 50 | 150 | 4 | 1424 | 30,60 | 4,89 | 9,52 | 100 | |
| 51 | 150 | 5 | 2023 | 31,52 | 5,64 | 11,38 | 100 | |
| 52 | 150 | 6 | 1703 | 29,52 | 5,53 | 10,43 | 100 | * |
| 53 | 150 | 7 | 1610 | 29,76 | 5,41 | 10,00 | 100 | * |
| 54 | 180 | 1 | 1706 | 27,39 | 5,95 | 10,47 | 100 | |
| 55 | 180 | 2 | 1777 | 29,85 | 5,46 | 10,90 | 100 | |
| 56 | 180 | 3 | 1814 | 30,68 | 5,77 | 10,25 | 100 | |
| 57 | 180 | 4 | 1371 | 28,43 | 5,42 | 8,90 | 100 | |
| 58 | 180 | 5 | 1676 | 30,68 | 5,52 | 9,90 | 100 | |
| 59 | 180 | 6 | 1714 | 28,07 | 5,35 | 11,41 | 100 | * |
| 60 | 180 | 7 | 1564 | 31,29 | 5,64 | 8,86 | 100 | * |