

Lijepljenje polimernih materijala

Žolo, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2008

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:188459>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

LIJEPLJENJE POLIMERNIH MATERIJALA

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Ivan Žolo

Zagreb, 2008.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen pod stručnim vodstvom prof. dr. sc. Mladena Šercera, kojem se ovim putem zahvaljujem na pruženoj pomoći i korisnim savjetima.

Zahvaljujem također dipl. ing. Anti Bakiću što mi je omogućio da obavim potrebna ispitivanja u laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku FSB-a, te na savjetima i pruženoj pomoći prilikom provedbe ispitivanja.

Zahvaljujem i svojoj sestri Marini, bratu Mariju, a ponajviše svojim roditeljima Ivi i Petru koji su mi bili podrška pri izradi ovog rada i tijekom cijelog studija.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, uz korištenje navedene literature i konzultacija.

Ivan Žolo

SAŽETAK

U radu su navedene osnove teorije lijepljenja kao jednog od sve učestalijih i sveprisutnih suvremenih načina spajanja dijelova. Cilj pokusa je bio provesti ispitivanje mehaničkih svojstava lijepljenih spojeva koji se sastoje od različitih polimernih materijala i različitih ljepila, pri različitim temperaturama. Uzimajući u obzir međunarodnu normu *ISO 4587*, provedeno je statičko ispitivanje prekidne sile lijepljenog spoja ispitnih tijela koja su se sastojala od dvije vrste polimernih materijala za lijepljenje (PA i PC) te dvije vrste ljepila (jednokomponentno i dvokomponentno). Ispitivanje je provedeno na temperaturi od 20 °C, koja je propisana normom te na sniženoj (-30 °C) i povišenoj (70 °C) temperaturi.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	VII
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	X
1. UVOD	1
2. LJEPILA	2
2.1. Osnovni pojmovi i definicije [1].....	2
2.2. Vrste i podjela ljepila [2].....	2
2.2.1. Ljepila prema kemijskom sastavu.....	2
2.2.2. Ljepila prema mehanizmu očvršćivanja	3
2.3. Svojstva ljepila [2]	6
2.3.1. Mehanizam lijepljenja.....	6
2.3.2. Adhezija	6
2.3.3. Površinska napetost.....	7
2.3.4. Močenje površine	8
2.3.5. Kohezija	9
2.4. Svojstva sloja ljepila [2].....	9
2.4.1. Modul rastezljivosti.....	9
2.4.2. Modul smičnosti.....	10
2.4.3. Puzanje	11
2.4.4. Kristalnost strukture ljepila.....	12
2.4.5. Nehomogenosti sloja ljepila.....	13
2.5. Prednosti i nedostaci spajanja polimernih materijala lijepljenjem [3].....	13
2.6. Izbor ljepila	14
2.6.1. Utjecajni čimbenici na izbor ljepila [2].....	16
2.6.1.1. Postupak proizvodnje.....	16
2.6.1.2. Postupak izbora ljepila.....	17
2.6.1.3. Materijal i kombinacije materijala.....	19
2.6.1.4. Vrsta ljepila.....	19
3. PRIPREMA ZA LIJEPLJENJE	20
3.1. Priprema površine za lijepljenje	20
3.1.1. Čišćenje i odmašćivanje.....	22
3.1.2. Mehanička priprema površine [1]	23
3.1.3. Kemijska priprema površine [1].....	24
3.1.4. Dodatna priprema površine [1].....	24
3.2. Priprema ljepila [4]	25
3.2.1. Miješanje ljepila.....	25
3.2.2. Nanošenje ljepila.....	26
3.2.2.1. Ručno nanošenje ljepila.....	26
3.2.2.2. Nanošenje ljepila mlaznicama	27
3.2.2.3. Nanošenje ljepila valjcima.....	28
3.2.2.4. Zavjesno nanošenje ljepila.....	28
4. OBLIKOVANJE LIJEPLJENIH SPOJEVA	29
4.1. Uvod.....	29
4.2. Osiguranje dovoljnih površina za lijepljenje [2]	30
4.3. Smanjenje naprezanja [2].....	30
4.4. Izbor vrste spoja.....	31
4.4.1. Jednostruki preklopni spoj [2].....	31
4.5. Sastavljanje spoja [6]	33

4.5.1.	Naprave za sastavljanje i učvršćivanje lijepljenog spoja	34
5.	PRORAČUN JEDNOSTRUKOG PREKLOPNOG SPOJA [2]	36
6.	PROVEDBA POKUSA	38
6.1.	Svrha pokusa	38
6.2.	Međunarodna norma ISO 4587 [7]	38
6.2.1.	Cilj	38
6.2.2.	Načelo	38
6.2.3.	Uređaj	39
6.2.4.	Ispitna tijela	39
6.2.5.	Prilagodba uvjetima	40
6.2.6.	Postupak	41
6.2.7.	Prikaz rezultata	41
6.2.8.	Preciznost	41
6.2.9.	Izvešće o ispitivanju	41
6.3.	Pokus	42
6.3.1.	Materijal ispitnih tijela	42
6.3.2.	Vrste primjenjenog ljepila	43
6.3.2.1.	Jednokomponentno ljepilo Terostat 9220 [10]	43
6.3.2.2.	Dvokomponentno ljepilo Hysol 9464 A&B [12]	44
6.3.3.	Izrada priprema za lijepljenje	45
6.3.4.	Priprema površine i lijepljenje	46
6.3.5.	Označavanje ispitnih tijela	46
6.3.6.	Uređaj za ispitivanje	46
6.3.7.	Uvjeti ispitivanja	47
6.4.	Rezultati ispitivanja	48
6.4.1.	Sobna temperatura	48
6.4.2.	Povišena temperatura (70 °C)	52
6.4.3.	Snižena temperatura (-30 °C)	57
6.5.	Analiza i usporedba rezultata	60
7.	ZAKLJUČAK	77

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Opća podjela ljepila prema kemijskom sastavu [2].....	3
Slika 2.2. Podjela ljepila prema mehanizmu očvršćivanja [2]	4
Slika 2.3. Adhezijske i kohezijske sile [2].....	6
Slika 2.4. Mehaničko sidrenje [2].....	7
Slika 2.5. Kut močenja [2].....	9
Slika 2.6. Deformacije usljed smičnog naprezanja	10
Slika 2.7. Ovisnost deformacije sloja ljepila o njegovoj debljini [2]	11
Slika 2.8. Područja puzanja sloja polimernih ljepila ²	12
Slika 2.9. Utjecajni čimbenici na izbor ljepila [2].....	16
Slika 3.1. Površina kristalastog plastomera [2]	20
Slika 3.2. Provjera pripreme površine metodom „vodene kapljice“ [2].....	21
Slika 3.3. Postupci pripreme površine [2]	22
Slika 3.4. Pištolj za nanošenje ljepila [5].....	27
Slika 4.1. Ovisnost nosivosti spoja o duljini preklapanja [2]	29
Slika 4.2. Neki od oblika preklopnih lijepljenih spojeva [2].....	30
Slika 4.3. Vrste opterećenja različitih lijepljenih spojeva [2].....	31
Slika 4.4. Ovisnost čvrstoće jednostrukog preklopnog spoja o debljini sloja ljepila [1]	33
Slika 5.1. Jednostruki preklopni spoj i dimenzije potrebne za proračun [2]	36
Slika 6.1. Ispitno tijelo [7].....	39
Slika 6.2. Ljepilo Terostat 9220 [11]	44
Slika 6.3. Kidalica <i>MESSPHISIK BETA 50-5</i>	47
Slika 6.4. Komora za temperiranje.....	47
Slika 6.5. Komora i kidalica spremne za ispitivanje.....	48
Slika 6.6. Ispitno tijelo stegnuto u hvataljke	48
Slika 6.7. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_I_20	49
Slika 6.8. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_II_20.....	50
Slika 6.9. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_I_20	51
Slika 6.10. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_II_20.....	52
Slika 6.11. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_I_70.....	53
Slika 6.12. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_II_70.....	54
Slika 6.13. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_I_70	55
Slika 6.14. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_II_70.....	56
Slika 6.15. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_I_–30.....	57
Slika 6.16. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PA_II_–30	58
Slika 6.17. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_I_–30.....	59
Slika 6.18. Dijagram <i>sila – pomak</i> za ispitno tijelo PC_II_–30.....	60
Slika 6.19. Dijagram <i>sila – pomak</i> za PA_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	61
Slika 6.20. Usporedba rezultata za PA_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi.....	62
Slika 6.21. Usporedba rezultata za PC_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	63
Slika 6.22. Usporedba rezultata za PC_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi.....	64
Slika 6.23. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri 20 °C	65
Slika 6.24. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri 70 °C	66
Slika 6.25. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri –30 °C.....	67
Slika 6.26. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri 20 °C	68
Slika 6.27. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri 70 °C	69
Slika 6.28. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri –30 °C	70
Slika 6.29. Dijagram <i>sila – pomak</i> za PA_I i PC_I pri 20 °C.....	71
Slika 6.30. Dijagram <i>sila – pomak</i> za PA_I i PC_I pri 70 °C.....	72
Slika 6.31. Dijagram <i>sila – pomak</i> za PA_I i PC_I pri –30 °C	73

Slika 6.32. Dijagram <i>sila - pomak</i> za PA _{II} i PC _{II} pri 20 °C	74
Slika 6.33. Dijagram <i>sila-pomak</i> za PA _{II} i PC _{II} pri 70 °C	75
Slika 6.34. Dijagram <i>sila-pomak</i> za PA _{II} i PC _{II} pri -30 °C	76

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Slobodna površinska energija nekih polimera i metala [2]	8
Tablica 2.2. Ovisnost modula rastezljivosti polimera o uvjetima očvršćivanja [2]	10
Tablica 2.3. Izbor ljepila prema materijalu kojeg treba zalijepiti [1]	15
Tablica 2.4. Preporuke za izbor skupine ljepila tvrtke LOCTITE [2]	17
Tablica 6.1. Neka svojstva polikarbonata (PC) [9]	43
Tablica 6.2. Neka svojstva poliamida (PA) [9]	43
Tablica 6.3. Svojstva ljepila <i>Terostat 9220</i> [10]	44
Tablica 6.4. Svojstva komponenti dvokomponentnog ljepila Hysol 9464 A&B [12]	45
Tablica 6.5. Otpornost ljepila Hysol 9464 A&B na različite medije [12]	45
Tablica 6.6. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_20	49
Tablica 6.7. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_20	50
Tablica 6.8. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_20	51
Tablica 6.9. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_20	52
Tablica 6.10. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_70	53
Tablica 6.11. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_70	54
Tablica 6.12. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_70	55
Tablica 6.13. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_70	56
Tablica 6.14. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_-30	57
Tablica 6.15. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_-30	58
Tablica 6.16. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_-30	59
Tablica 6.17. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_-30	60
Tablica 6.18. Prekidna sila ispitnog tijela PA_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	61
Tablica 6.19. Prekidna sila ispitnog tijela PA_II na sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	62
Tablica 6.20. Prekidna sila ispitnog tijela PC_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	63
Tablica 6.21. Prekidna sila ispitnog tijela PC_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi	64
Tablica 6.22. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri 20 °C	65
Tablica 6.23. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri 70 °C	66
Tablica 6.24. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri -30 °C	67
Tablica 6.25. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri 20 °C	68
Tablica 6.26. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri 70 °C	69
Tablica 6.27. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri -30 °C	70
Tablica 6.28. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri 20 °C	71
Tablica 6.29. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri 70 °C	72
Tablica 6.30. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri -30 °C	73
Tablica 6.31. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri 20 °C	74
Tablica 6.32. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri 70 °C	75
Tablica 6.33. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri -30 °C	76

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Veličina	Jedinica
a	- širina spoja	mm
d	- debljina sloja ljepila	mm
E	- modul rastezljivosti	N/mm ²
F	- prekidna sila	N
F_{max}	- maksimalna spojem prenesena sila rastezanja	N
l_u	- duljina preklapanja	mm
l_u	- optimalna duljina preklapanja	mm
p	- tlak	Pa
s	- debljina podloge	mm
s	- pomak	mm
t	- vrijeme	h
γ	- kutna deformacija	°
γ_K	- kut močenja	°
μ	- koeficijent trenja	-
η	- viskoznost	Pa s
ρ	- gustoća	g/cm ³
σ	- rastezno naprezanje	N/mm ²
σ_{smax}	- najveće rastezno naprezanje	N/mm ²
ϑ	- temperatura	°C
τ	- smično naprezanje	N/mm ²
τ_{amax}	- smična čvrstoća ljepila	N/mm ²

1. UVOD

Ljepilo je od davnina poznato kao sredstvo za spajanje, tako da su ga koristili još u drevnom Egiptu. U početku su to bila ljepila biljnog i životinjskog porijekla, koja su se dobivala najčešće od kože, kostiju i tetiva sisavaca, a ulogu zgušnjavanja ljepila odigrali su ugljikohidrati dobiveni iz pšenice, krumpira i riže.

Tek krajem 18. stoljeća ljepilo poprima industrijski značaj, a nagli razvoj doživljava nakon 2. svjetskog rata. Sve do kraja 19. stoljeća koriste se ljepila biljnog i životinjskog porijekla, da bi se u 20. stoljeću pojavili umjetni izvori ljepila koji se koriste do danas. Ljepilo je danas prisutno u gotovo svim granama proizvodnje, od obučarske, gdje su kapljevita ljepila zamijenila čavle, do zrakoplovne, gdje se koriste epoksidna ljepila modificirana gumom u kombinaciji sa aluminijskim legurama.

Razlog ovako raširenoj upotrebi ljepila leži u činjenici da ljepila omogućavaju izvedbu vrlo čvrstih spojeva, ne samo kod polimera, nego i kod svih ostalih materijala, osobito kod onih koji se ne mogu zavarivati, kao što je drvo, kamen, keramika i staklo.

Ljepilo omogućuje spajanje tankih ploča i raspodjelu opterećenja na veću površinu. Ne treba zanemariti estetsku i aerodinamičku vanjštinu spoja, koja se zahvaljujući ljepilu vrlo jednostavno postiže, a tome pridonosi i mogućnost nanošenja ljepila uz pomoć strojeva i robota.

Sposobnost spajanja različitih materijala svojstvo je zahvaljujući kojem je upotreba ljepila toliko raširena. Zbog sve većeg broja proizvoda koji se izrađuju od polimernih materijala, zamjenjujući tako puno teže i skuplje materijale, u ovom radu će naglasak biti na lijepljenju polimernih materijala i ispitat će se svojstva takvih spojeva.

2. LJEPILA

2.1. Osnovni pojmovi i definicije [1]

Pojam ljepila je definiran normom DIN 16920 kao *nemetalni materijal koji različite dijelove može povezati površinskim pričvršćivanjem i unutrašnjom čvrstoćom (adhezija i kohezija)*.

Zbog jasnoće u daljnjem izlaganju, potrebno je navesti još neke definicije vezane uz lijepljenje:

- Lijepljenje je spajanje uz primjenu ljepila.
- Površina za lijepljenje je površina koja je već zalijepljena ili se tek mora zalijepiti.
- Lijepljeni sastav je međuprostor između dviju zalijepljenih površina ispunjen slojem ljepila.
- Sloj ljepila je stvrdnuti ili još nestvrdnuti sloj ljepila između zalijepljenih površina.
- Zalijepljenost je povezanost različitih površina pomoću ljepila.

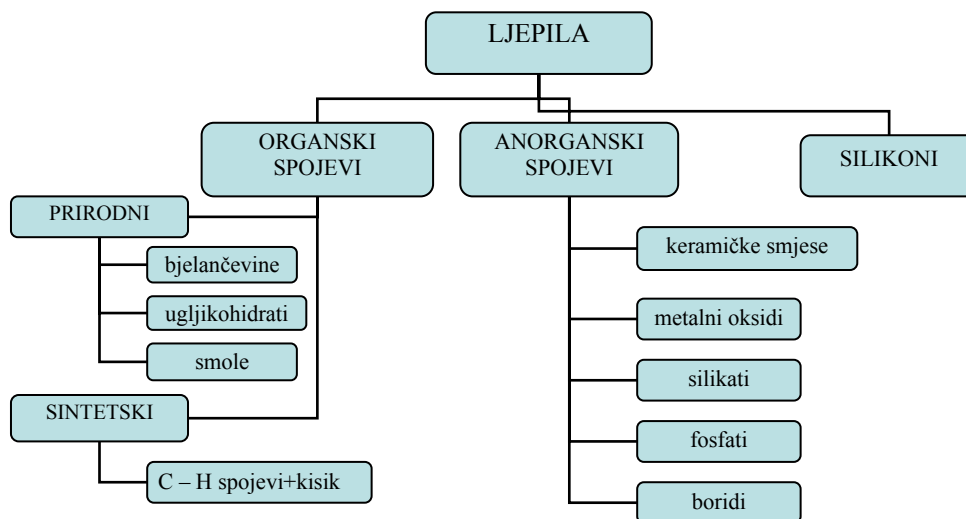
2.2. Vrste i podjela ljepila [2]

Ljepila se mogu podijeliti prema različitim kriterijima, primjerice prema sastavu, agregatnom stanju, temperaturi primjene, namjeni i sl. Dva najvažnija kriterija prema kojima se dijele ljepila jesu: *kemijski sastav i mehanizam očvršćivanja ljepila*.

2.2.1. Ljepila prema kemijskom sastavu

Prema kemijskom sastavu mogu se razlikovati dvije osnovne skupine ljepila. Jedna se temelji na anorganskim, a druga na organskim spojevima. Slika 2.1 prikazuje opću podjelu ljepila temeljem njihovog kemijskog sastva.

Ljepila na organskoj osnovi su poznata od davnina, ali se u novije vrijeme rijetko koriste jer su niske čvrstoće, slabo su postojana na starenje i nisu pogodna za lijepljenje metala. Ponekad se koriste za lijepljenje papira, kartona i drveta, odnosno poroznih materijala, a nazivaju se *tutkalo*. Tutkalo se sastoji od životinjskih, biljnih ili sintetičkih osnovnih tvari i vode kao otapala.



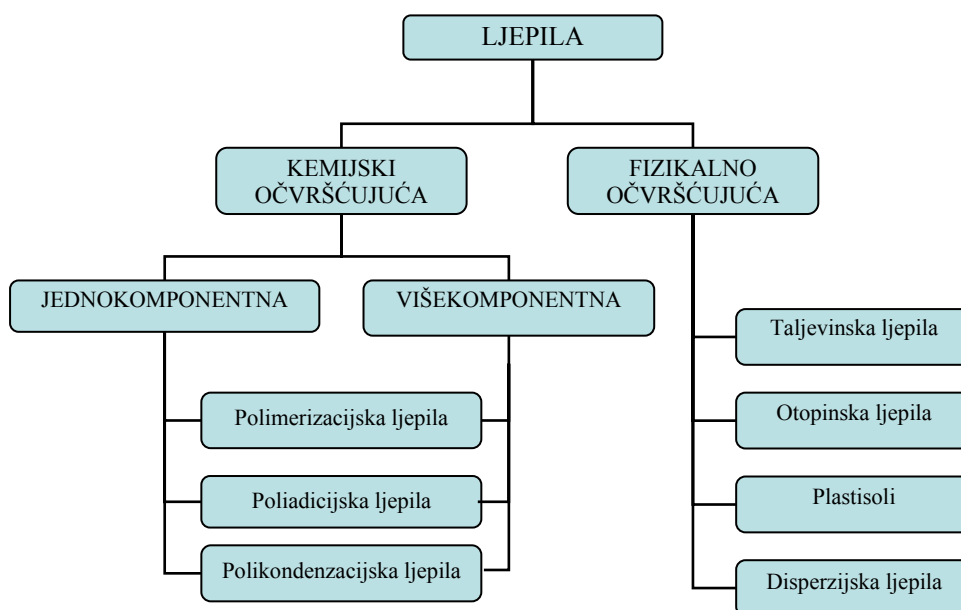
Slika 2.1. Opća podjela ljepila prema kemijskom sastavu [2]

Prema porijeklu životinjskih tutkala, razlikuje se tutkalo od kostiju i krvi, riblje tutkalo i tutkalo od kože. Osnovni sastojci biljnih ljepila su škrob, dekstrin i celuloza. Tako se razlikuju celulozni nitrat, celulozno tutkalo, dekstrinsko tutkalo, guma arabicum (ljepila od krutih biljnih sokova) i škrobno tutkalo.

Ljepila na anorganskoj osnovi su, za razliku od ljepila na organskoj osnovi, postojana pri povišenim temperaturama, a poznatija su kao anorganska stakla ili glaslote. To su mješavine silicijevog dioksida, natrijevog karbonata, borne kiseline, aluminijevog oksida s metalnim dijelovima, niklom, željezom i bakrom. Najveća se čvrstoća spoja u primjeni ovakvih ljepila postiže pri temperaturama uporabe iznad 400 °C.

2.2.2. Ljepila prema mehanizmu očvršćivanja

Ljepila se prema mehanizmu očvršćivanja mogu podijeliti na *kemijski* i *fizikalno* očvršćujuća. Slika 2.2 prikazuje podjelu ljepila prema mehanizmu očvršćivanja.



Slika 2.2. Podjela ljepila prema mehanizmu očvršćivanja [2]

Među *polimerizacijskim jednokomponentnim kemijski očvršćujućim ljepilima* najpoznatija su cijanoakrilatna, anaerobna i ljepila koja očvršćuju pod utjecajem zračenja. Za njih je karakteristično da početne monomerne tvari imaju barem jednu dvostruku vezu koja, za razliku od jednostruke, posjeduje veću količinu energije.

Cijanoakrilatna ljepila umrežuju tijekom reakcije sa površinom za lijepljenje i očvršćuju trenutačno pa se zalijepljeni dijelovi mogu koristiti svega nekoliko sekundi nakon što su zalijepljeni. Ova ljepila su krhka i kruta te su prikladna za lijepljenje manjih plastomernih površina i gume. Temperatura primjene ovakvih ljepila je do 100 °C.

Anaerobna ljepila umrežuju kada je eliminiran dovod zraka i u kapljevitom su obliku sve dok su u kontaktu sa kisikom, što im daje jednu prednost pred drugim ljepilim. Višak koji iscureti prilikom lijepljenja vrlo se lako može odstraniti jer je ljepilo zbog dodira s kisikom još uvijek u kapljevitom stanju. Koriste se za lijepljenje sigurnosnih dijelova jer su spojevi otporni na udarce i vibracije.

Polimerizacija *zračenjem očvršćujućih ljepila* odvija se pod utjecajem fotoinicijatora, a tu ulogu najčešće imaju dušični spojevi.

Od *polimerizacijskih dvokomponentnih kemijski očvršćujućih ljepila* najpoznatiji su *metakrilati*, čija je prednost jednostavna primjena i brzo očvršćivanje. Ova su ljepila relativno neosjetljiva na

masne površine i pogodna su za lijepljenje krutih materijala (staklo, metal, keramika), kao i za lijepljenje materijala različite toplinske rastezljivosti (npr. metal-staklo).

Najpoznatija *poliadicijska kemijski očvršćujuća ljepila* su epoksidna i poliuretanska ljepila. *Epoksidna ljepila* se sastoje od epoksidne smole i umreživala. Daju vrlo čvrste i trajne spojeve, a očvršćivanje je moguće ubrzati povišenom temperaturom. Dostupna su kao jednokomponentna i dvokomponentna ljepila, s temperaturom primjene i do 120 °C. *Poliuretanska kemijski očvršćujuća ljepila* su žilava i elastična ljepila koja se koriste za veće površine i zračnosti spojeva. Dobro prijanjaju na različite površine, dobro su postojana pri povišenim temperaturama, a posebno se ističe fleksibilnost spojeva pri nižim temperaturama.

Polikondenzacijska *kemijski očvršćujuća ljepila* se razlikuju od polimerizacijskih i poliadicijskih ljepila u tome što do povezivanja dviju monomernih molekula u polimer dolazi usljed cijepanja jedne jednostavne molekule kao što je voda ili alkohol. Pri tome je važno ukloniti nusprodukt koji pri toj reakciji nastaje. Najpoznatija polikondenzacijska ljepila su: *formaldehidi, poliamidi, poliesteri, silikoni, polibenzimidazoli i polisulfoeni*.

Među *fizikalno očvršćujućim ljepilima*, najpoznatija su *taljevinska ljepila* koja vrlo brzo očvršćuju, ne sadrže otapala i hlapljive monomere, nisu štetna za okoliš i jamče sigurnost u radu. Međutim, kako su ta ljepila iz skupine plastomera, sklona su deformacijama pri povišenim temperaturama.

Druga skupina fizikalno očvršćujućih ljepila jesu *otopinska ljepila*. To su ljepila za čiju je obradu potrebno hlapljivo organsko otapalo, koje ne ulazi u sloj ljepila. U ova ljepila spadaju *vlažna ljepila, kontaktna ljepila, prijanjajuća ljepila i vruća pečatna ljepila*.

Plastoli su bezotopinska ljepila koja očvršćuju pri temperaturama između 150 i 180 °C. Vrlo su fleksibilna, teško se ljušte i ne posjeduju visoku čvrstoću.

Disperzijska fizikalno očvršćujuća ljepila nastaju isparavanjem kapljevite faze iz vodenih disperzijskih sredstava u kojima se nalaze čvrste čestice polimera koje nakon toga i stvaraju lijepljivi sloj.

2.3. Svojstva ljepila [2]

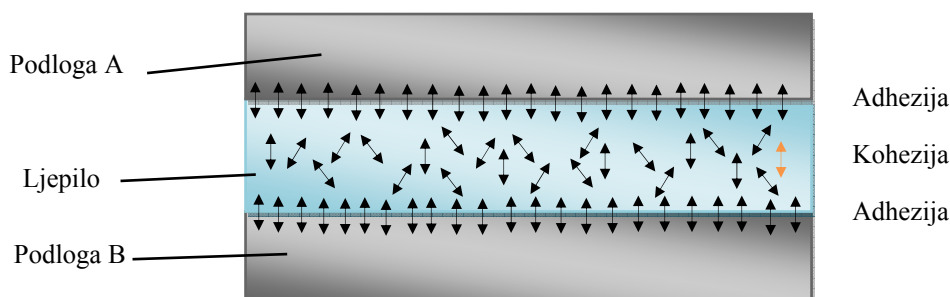
Da bi se moglo razumjeti način na koji se vrši spajanje uz pomoć ljepila, potrebno je opisati neka svojstva ljepila. Ljepila su proizvodi koji, na temelju svojeg kemijskog sastava i fizičkog stanja u trenutku nanošenja na dijelove koje treba spojiti, omogućuju spajanje površina.

2.3.1. Mehanizam lijepljenja

Mehanizam lijepljenja djeluje na načelu dviju vrsta privlačnih sila koje se javljaju u lijepljenom spoju, a to su:

- adhezijske privlačne sile,
- kohezijske privlačne sile.

Adhezijske privlačne sile omogućuju dobro prijanjanje ljepila na površine koje se lijepe, a kohezijske privlačne sile omogućuju postizanje dovoljne čvrstoće ljepila u očvrstnutom stanju. Slika 2.3 to zorno prikazuje.



Slika 2.3. Adhezijske i kohezijske sile [2]

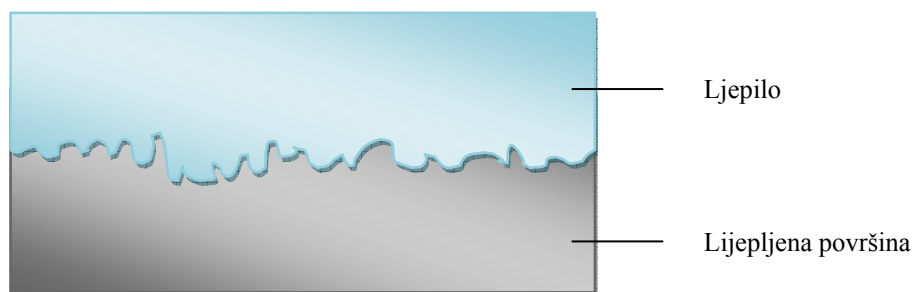
2.3.2. Adhezija

Adhezija je stanje u kojem se dvije površine drže zajedno međusobnim djelovanjem privlačnih sila zbog interakcije molekula, atoma i iona na obje površine. Može uključivati kemijsko ili fizikalno povezivanje dviju površina. Pri tome se kemijsko povezivanje sastoji od izravnog povezivanja molekula dvaju materijala kovalentnim ili ionskim vezama, a fizikalno povezivanje

može rezultirati mehaničkim sidrenjem, fizikalnom apsorpcijom između molekula ljepila i površine koja se lijepi ili penetracijom molekula ljepila u površinu zbog mehanizma difuzije.

Mehaničko sidrenje se događa kada lijepljena površina sadrži pore po kojima se ljepilo rasprši i pri tome se „usidri“ za površinu. Ovaj mehanizam je specifičan za porozne materijale kao što su drvo, papir, tekstil i sl. Slika 2.4 prikazuje mehaničko sidrenje.

Kod materijala visoke gustoće, kao što su metal i keramika, zbog nemogućnosti difuzije molekula ljepila u površinu materijala za lijepljenje, dolazi do *adsorpcije* molekula ljepila na tu površinu. Jednostavno rečeno, molekule ljepila bivaju privučene na površinu za lijepljenje. Ovaj proces je u praksi otežan zbog prisutnosti različitih oksida, masnoće i prljavštine na površini.



Slika 2.4. Mehaničko sidrenje [2]

2.3.3. Površinska napetost

Hoće li se neki materijal lakše ili teže zalijepiti, ovisi o površinskoj napetosti, odnosno o slobodnoj površinskoj energiji. Površinska napetost je nastojanje kapljevine ili čvrstog tijela da postigne što povoljnije energetske stanje smanjenjem slobodne površine. Molekule koje se nalaze u unutrašnjosti kapljevine ili čvrstog tijela svojim privlačnim silama privlače molekule sa površine, smanjujući tako broj onih molekula koje ostaju na površini, oko kojih se stvara dodatni prostor i na taj način molekule na površini postižu veću energiju. Upravo količina energije koju sadrže molekule na površini ima glavnu ulogu u tome, hoće li sposobnost nekog tijela za lijepljenje biti velika ili mala. Slobodna energija lijepljenog materijala mora biti veća ili barem jednaka slobodnoj energiji ljepila, da bi se ostvarilo uspješno lijepljenje. Većina polimernih ljepila ima slobodnu energiju $25 - 30 \text{ mJ/m}^2$. Polimerni materijali imaju male vrijednosti slobodne površinske energije, što je uzrok tome da se neki polimeri vrlo teško ili pak nikako ne mogu zalijepiti.

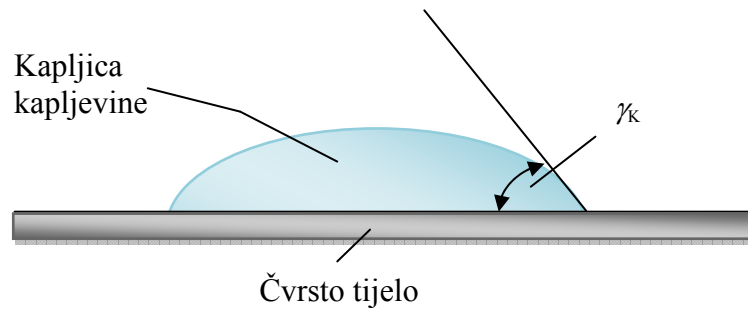
Tablica 2.1. Slobodna površinska energija nekih polimera i metala [2]

SLOBODNA (POVRŠINSKA) ENERGIJA					
<i>Niska</i>		<i>Srednja</i>		<i>Visoka</i>	
POLIMERI		POLIMERI		METALI	
PTFE	18 mJ/m ²	PMMA	38 mJ/m ²	Olovo	450 mJ/m ²
Silikoni	24 mJ/m ²	PVC	40 mJ/m ²	Cink	750 mJ/m ²
PP	29 mJ/m ²	ABS	42 mJ/m ²	Aluminij	840 mJ/m ²
PE	31 mJ/m ²	Fenolna smola	42 mJ/m ²	Bakar	1100 mJ/m ²
		Poliuretan	43 mJ/m ²	Željezo	2030 mJ/m ²
		PA 66	46 mJ/m ²	Volfram	6800 mJ/m ²
		SBR (guma)	50 mJ/m ²		
				KERAMIKA	300...500 mJ/m ²

Tablica 2.1 prikazuje slobodnu površinsku energiju nekih polimera i metala. Kao što se može vidjeti, polimeri imaju male do srednje vrijednosti površinske energije, za razliku od metala koji se puno bolje lijepe upravo iz razloga što imaju jako visoke vrijednosti slobodne površinske energije. Kako bi se podigla energetska razina i na taj način povećala sposobnost lijepljenja, polimerni materijali se često podvrgavaju različitim kemijskim, električnim i toplinskim postupcima obrade površine.

2.3.4. Močenje površine

Sposobnost ljepila da ostvari potpuni dodir sa obje površine za lijepljenje, naziva se *sposobnost močenja*. Stupanj močenja mjeri se kutem močenja γ_K . Slika 2.5 prikazuje kut močenja. Kada je kut močenja jednak nuli ($\gamma_K = 0$), kapljevina se slobodno raspršuje po površini i potpuno moči površinu. Kako bi se postiglo to, da ostvari potpuni dodir sa obje površine i k tome prodre u sve pore i neravnine površine, ljepilo se nanosi u kapljevitom stanju i pri tome se podvrgava potrebnom tlaku. Da bi se smanjila mogućnost zaostalih naprezanja, tijekom očvršćivanja ljepilo ne bi smjelo znatnije mijenjati svoj volumen. Jednako tako toplinske rastezljivosti materijala koji se lijepi i ljepila moraju biti približno jednake.



Slika 2.5. Kut močenja [2]

2.3.5. Kohezija

Kohezija je unutrašnja čvrstoća ljepila, odnosno djelovanje privlačnih sila istovrsnih atoma i molekula ljepila, koje određuju čvrstoću ljepila i samog lijepljenog spoja.

2.4. Svojstva sloja ljepila [2]

Na svojstva sloja ljepila nanešenog na površine za lijepljenje kao i na čvrstoću takvog spoja uvelike utječu sljedeći elementi: *modul rastezljivosti, modul smičnosti, puzanje, kristalna struktura i nehomogenost sloja.*

2.4.1. Modul rastezljivosti

Različita ovisnost o temperaturi ljepila i podloge uzrok je značajnim razlikama u deformacijskim karakteristikama tih dviju komponenti. Tablica 2.2 prikazuje kako modul rastezljivosti polimera ovisi o uvjetima očvršćivanja.

Tablica 2.2. Ovisnost modula rastezljivosti polimera o uvjetima očvršćivanja [2]

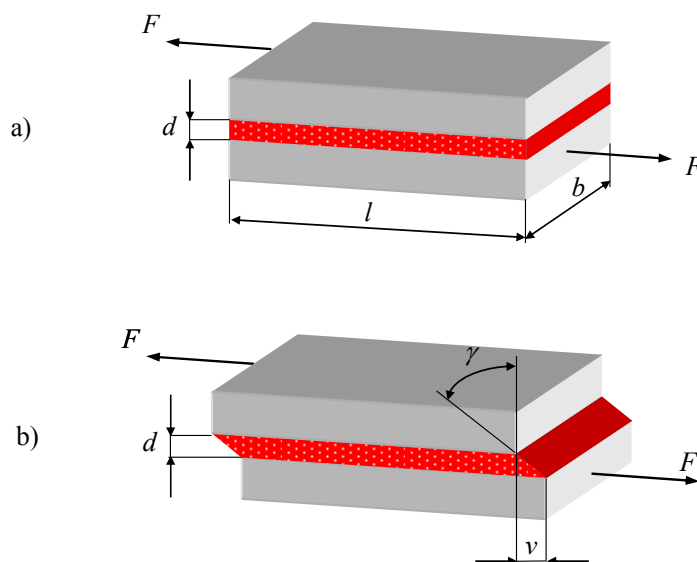
Temperatura ϑ , °C	Vrijeme t , h	Modul rastezljivosti E , N/mm ²
80	2,5	1400
120	2,5	1800
160	2,5	2100
80	10	1800
120	10	2600
160	10	2800

2.4.2. Modul smičnosti

Modul smičnosti je omjer smičnog naprezanja (τ) i njime uvjetovane kutne deformacije (γ):

$$\mathbf{G} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.1)$$

gdje je: $\gamma \cong \tan \gamma = \frac{v}{d}$ (2.2)

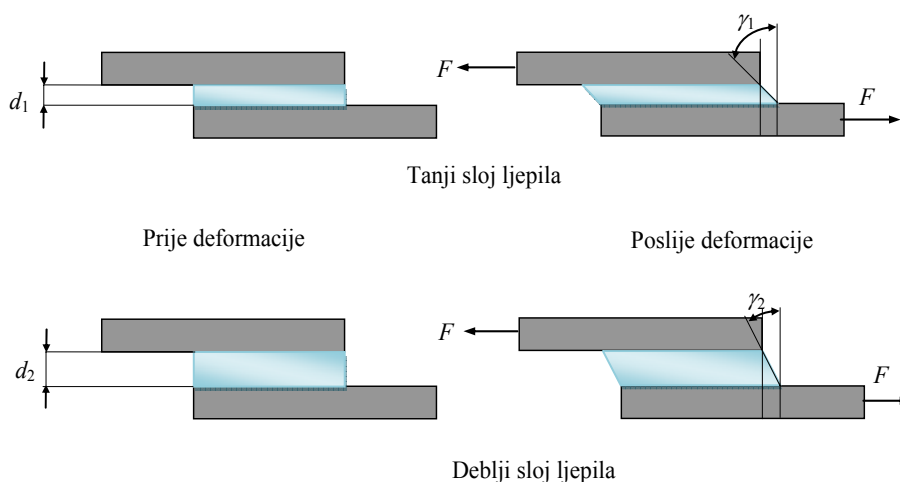


Slika 2.6. Deformacije usljed smičnog naprezanja (a-nedeformirano stanje, b-deformirano stanje) [2]

Deformacija u mnogome ovisi i o debljini sloja ljepila. Deblji sloj ljepila uz isto vanjsko opterećenje uzrokuje manji kut smicanja (γ). Iz toga bi se dalo zaključiti da deblji sloj ljepila daje veću čvrstoću spoja, što je pogrešan zaključak jer deblji sloj ljepila uzrokuje:

- porast momenta savijanja zbog kojeg na krajevima preklapanja dolazi do normalnog naprezanja, odnosno naprezanja zbog ljuštenja,
- povećanu mogućnost poprečne kontrakcije (suženja presjeka u odnosu na tanke slojeve ljepila),
- pojavu stezanja i nehomogenosti kod debljih slojeva ljepila.

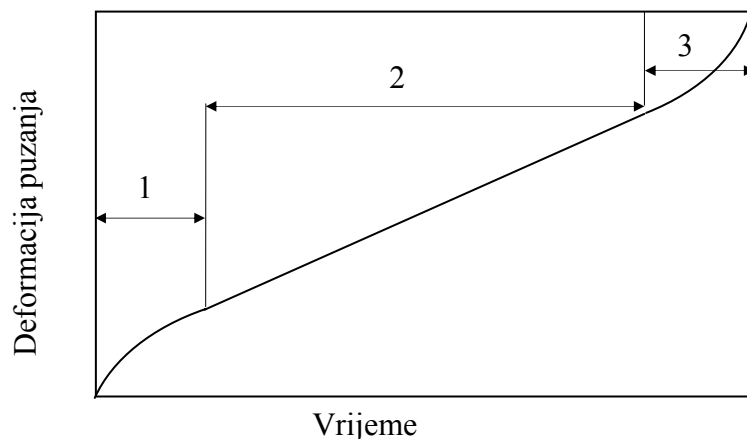
Slika 2.7 prikazuje ovisnost deformacije sloja ljepila o njegovoj debljini.



Slika 2.7. Ovisnost deformacije sloja ljepila o njegovoj debljini [2]

2.4.3. Puzanje

Puzanje je vremenski ovisna deformacija viskoelastičnih tvari pri konstantnom opterećenju. Do puzanja dolazi usljed popuštanja nekih veza među molekulama polimera. Viskoelastična svojstva polimera karakteristična za puzanje sloja ljepila, mogu biti linearna i nelinearna. Slika 2.8 prikazuje pojedina područja puzanja sloja ljepila.



Slika 2.8. Područja puzanja sloja polimernih ljepila²

Područja označena na slici 2.8 redom predstavljaju:

- 1 – područje primarnog (prijelaznog) puzanja
- 2 – područje sekundarnog (stacionarnog) puzanja
- 3 – područje tercijarnog (ubrzanog) puzanja.

Područje primarnog puzanja karakterizira deformacija molekulne strukture, a osim kod polimernih ljepila javlja se i kod amornih kristalastih ljepila. Za područje sekundarnog, odnosno stacionarnog puzanja karakteristična je stalna brzina puzanja, pri čemu dolazi do određenog odvajanja molekula. I konačno, u području tercijarnog, odnosno ubrzanog puzanja dolazi do puzanja lijepljenog sloja.

2.4.4. Kristalnost strukture ljepila

Kristalastu, odnosno djelomično kristalnu strukturu imaju samo plastomerna ljepila nakon očvršćivanja, dok su duromerna ljepila najčešće amorfna. Kristalna struktura jako utječe na čvrstoću lijepljenog sloja na način da veći udio kristalne strukture povišuje čvrstoću i modul rastezljivosti ljepila u očvrstnutom stanju.

2.4.5. Nehomogenosti sloja ljepila

Zbog uključina zraka ili ostataka otapala, u strukturi ljepila u očvrstnutom stanju javljaju se mnoge nepravilnosti koje snizuju čvrstoću spoja. Iako snizuju ukupnu čvrstoću sloja ljepila, znatno povisuju čvrstoću ljuštenja.

2.5. Prednosti i nedostaci spajanja polimernih materijala lijepljenjem [3]

Prednosti spajanja polimernih materijala lijepljenjem u usporedbi s tradicionalnim metodama spajanja kao što je zavarivanje, vijčani spojevi i sl., jesu:

- jednolična raspodjela sile po cijeloj lijepljenoj površini, osim na krajevima preklopnih spojeva,
- gotovo svi polimerni materijali mogu se međusobno spajati (univerzalno spajanje),
- uporaba ljepila omogućava koncepciju novih vrsta konstrukcijskih elemenata, primjerice: pločasti sendvič elementi, lijepljeni laminarni elementi,
- lijepljeni spojevi cijevi mogu se tako oblikovati da su spojevi nepropusni,
- površine lijepljenih spojeva su glatke, za razliku od ostalih spojeva kod kojih mogu, primjerice, stršeće glave vijaka i zakovica ili zavareni šavovi iz tehničkih i drugih razloga smetati,
- lijepljeni se spojevi mogu tako oblikovati da mogu u određenoj mjeri prigušivati vibracije,
- spojni elementi se lako centriraju.

Nedostaci spajanja polimernih materijala lijepljenjem su:

- lijepljeni spojevi uglavnom nisu postojani na velike temperaturne promjene,
- većina ljepila je pri trajnom statičkom opterećenju sklona puzanju,
- konstrukcijsko oblikovanje spojeva složenije je kod lijepljenja, nego kod drugih vrsta spajanja,
- obrada spojnih površina pri lijepljenju znatno je složenija, osjetljivija i vremenski uvjetovanija, nego kod drugih vrsta spajanja,
- priprema ljepila često postavlja povećane zahtjeve pri njihovoj primjeni, primjerice: omjer miješanja dvokomponentnih ljepila, vrijeme primjene, temperatura pri primjeni i upotrebi i sl., pri čemu neznatno odstupanje od propisanog postupka može imati teže posljedice nego što bi to bio slučaj pri drugim postupcima spajanja,

- većina ljepila (naročito dvokomponentna ljepila) trebaju za vezivanje određeno vrijeme, u koje se mora uračunati trajanje procesa lijepljenja i vrijeme potrebno za dodatno pričvršćivanje spojnih elemenata sve dok ljepilo ne stvrdne,
- lijepljeni spojevi u mnogim slučajevima pokazuju nepovoljno ponašanje pri starenju, osobito pod utjecajem vode, otapala, i dr.,
- nedostatak odgovarajućih normi otežava ispravan konstrukcijski i proizvodni izbor ljepila,
- ispitivanja bez razaranja mogu se upotrebljavati za kontrolu lijepljenih spojeva uglavnom samo s ograničenjima.

Dakle, pri izboru ljepila i načina lijepljenja polimernih materijala treba odabrati onaj koji će iskoristiti najviše ovih prednosti lijepljenja, ali isto tako izbjeći najviše nedostataka lijepljenja. Posebno treba napomenuti da čvrstoća ljepila treba imati barem jednaku ili veću čvrstoću od čvrstoće lijepljenog polimera, kako bi se izbjeglo to da lijepljeni spojevi budu najslabija mjesta u konstrukciji.

2.6. Izbor ljepila

Za izbor ljepila potrebno je poznavati svojstva materijala tijela koja se spajaju, a na prvom mjestu njihovu poroznost i karakteristike površina. Jednako tako je potrebno poznavati tehnološka svojstva ljepila koja stoje na raspolaganju, kao što su način i brzina močenja površine, iznos i brzina doseganja konačne kohezijske čvrstoće, specifična adhezija na dodirne površine spoja, primjenljivost u postojećim uvjetima. Ne treba zanemariti ni ekonomske čimbenike: cijenu i potrebnu masu ljepila po jedinici površine. Svi ovi parametri čine izbor ljepila iznimno složenim postupkom. I kada se svi parametri poslože i ljepilo bude izabrano, postoji mogućnost da tehnološki uvjeti onemoguće upotrebu tog ljepila. Primjerice, u postrojenjima koja nisu primjereno osigurana od eksplozije, ne smiju se upotrebljavati ljepila koja sadrže zapaljiva otapala, dok u postrojenjima koja nemaju primjereno prozračivanje nisu dopuštena ljepila koja sadrže hlapljive sastojke koji su štetni za zdravlje. [1]

Prilikom izbora ljepila treba obratiti pažnju na njegovo stezanje pri stvrdnjavanju, koje mora biti što manje. Također, ljepilo ne smije biti kruće od materijala tijela u spoju. Pri lijepljenju ljepilima koja sadržavaju otapalo mora se osigurati potpuno ishlapljivanje. Veliku ulogu pri

izboru ljepila ima materijal koji se lijepi. Tablica 2.3 prikazuje izbor ljepila prema materijalu površine za lijepljenje. [1]

Tablica 2.3. Izbor ljepila prema materijalu kojeg treba zalijepiti [1]

Materijal	Ljepilo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aluminij	x	x	x	x			xx	xx	xx
Mjed	x	x	x	x			xx	xx	xx
Bronca		x	x	x			xx	xx	xx
Kadmij		x	x	x			xx		
Bakar		x	x	x	x		xx		
Čelik		x	x	x			xx	xx	xx
Nikal	x	x	x	x			xx	xx	xx
Titan	x	x	x	x			xx	xx	xx
Volfram			x	x			xx		
Cink	x	x	x	x	x		xx	xx	xx
Poliester			x				xx	xx	
Epoksid						x	xx	xx	
Drvo	x	x		x	xx	xx	x	x	x
Beton			x	x		xx	xx	x	
Staklo	x	x	x	x		x	x	x	

- x može se upotrebljavati
- xx uobičajeno se upotrebljava
- 1 Polikloropren
- 2 Ojačani akrilati
- 3 Cijanokrilati
- 4 Poliuretani
- 5 Ureaformaldehidi ili melaminformaldehidi
- 6 Fenolformaldehidi ili rezorcinolformaldehidi
- 7 Epoksidi
- 8 Nitrilfenoli

Ponekad je važno za izbor ljepila u kakvom se agregatnom stanju to ljepilo nalazi. Ljepilo može biti u čvrstom, kapljevitom i pastoznom stanju, ali i u obliku filmova i folija.

2.6.1. Utjecajni čimbenici na izbor ljepila [2]

Ukratko, moguće je navesti nekoliko osnovnih čimbenika koji utječu na izbor ljepila. Slika 2.9 prikazuje te čimbenike.



Slika 2.9. Utjecajni čimbenici na izbor ljepila [2]

2.6.1.1. Postupak proizvodnje

Za izbor ljepila vrlo je bitno radi li se o pojedinačnoj ili serijskoj proizvodnji. Za proizvodnju jednog komada potrebna je znatno manja količina ljepila i mogu se koristiti razna učvršćenja. Kod serijske proizvodnje, osnovno je pitanje radi li se o maloj ili o velikoj serijskoj proizvodnji. Učvršćivači se najčešće ne mogu koristiti. Treba razmotriti koja će se vrsta nanošenja ljepila primjeniti: ručno, mehanizirano ili automatizirano. Također treba razmotriti zahtjeve kontrole kakvoće i cijenu proizvodnje spoja.

2.6.1.2. Postupak izbora ljepila

Postupak izbora ljepila podrazumijeva nekoliko koraka: određivanje materijala koji se lijepi u kombinaciji s ljepilom, mehaničko-tehnološka svojstva, svojstva površine koja se lijepi, konstrukciju, dimenzioniranje površine lijepljenja, pritisno opterećenje, omjer duljina preklopa/debljina lijepljenog sloja, razmatranje uvjeta naprezanja, određivanje metode proizvodnje, mogućnosti popravaka, recikliranja itd. Međutim, proizvođač ljepila najčešće pojednostavni taj postupak tako što kupcima nudi tablice s preporukom za upotrebu ljepila. Tablica 2.4 prikazuje preporuke za izbor skupine ljepila tvrtke LOCTITE.

Tablica 2.4. Preporuke za izbor skupine ljepila tvrtke LOCTITE [2]

	SKUPINA LJEPILA						
	<i>Akrilna</i>	<i>Cijano akrilatna</i>	<i>Epoksidna</i>	<i>Taljevinska</i>	<i>Silikonska</i>	<i>Poli-uretanska</i>	<i>Dvokom.akrilna</i>
Prednosti	Dobra postojanost na udare /fleksibilnost	Izvanredno lijepi gumu i plastiku	Velike mogućnosti oblikovanja	Brzo ispunjavanje zračnosti	Izvanredna toplinska postojanost	Izvanredna žilavost/fleksibilnost	Dobra postojanost na udare/fleksibilnost
Nedostaci	Zahtijeva primer	Niska postojanost na otopine	Zahtijeva miješanje	Niska toplinska postojanost	Niska čvrstoća	Osjetljiv na vlagu	Zahtijeva miješanje
Toplinska postojanost Tipična za skupinu (°C) Najbolje ljepilo u skupini (°C)	-18 do +149 205	-18 do +82 120	-18 do +82 135	-18 do +120 166	-18 do +205 316	-18 do +120 149	-18 do +120 120
Kemijska postojanost Polarne otopine (etilen glikol, aceton) Nepolarne otopine (motorno ulje, toluen, benzin)	Dobra Vrlo dobra	Loša ¹ Vrlo dobra	Vrlo dobra Izvrсна	Dobra Dobra	Dobra Loša	Dobra Dobra	Dobra Vrlo dobra

Tablica 2.4. Nastavak

Lijepljenje podloge:							
Metali	Izvršno	Vrlo dobro	Izvršno	Dobro	Dobro	Dobro	Izvršno
Plastika ²	Povoljno	Izvršno	Povoljno	Vrlo dobro	Povoljno	Vrlo dobro	Izvršno
Staklo	Izvršno	Loše	Izvršno	Dobro	Vr.dobro	Dobro	Dobro
Guma	Loše	Vrlo dobro	Povoljno	Povoljno	Dobro	Dobro	Loše
Drvo	Dobro	Dobro	Vrlo dobro	Izvršno	Povoljno	Povoljno	Dobro
Smična čvrstoća	Visoka	Visoka	Visoka	Niska	Niska	Srednja	Visoka
Čvrstoća ljuštenja	Srednja	Niska	Srednja	Srednja	Srednja	Srednja	Visoka
Rastezna čvrstoća	Visoka	Visoka	Visoka	Niska	Niska	Srednja	Visoka
Produljenje/ Fleksibilnost	Srednja	Niska	Niska	Visoka	Vrlo visoka	Visoka	Visoka
Tvrdoća	Polukruto	Kruto	Kruto	Polumeko	Meko	Meko	Polukruto
Postupak lijepljenja							
Broj komponenti	2	1	2	1	1	2	2
Temperatura umreživanja	Sobna	Sobna	Sobna	Sobna ³	Sobna	Sobna	Sobna
Vrijeme fiksiranja							
Srednje	10 min	60 s	35 min	70 s	25 min	25 min	20 min
Brzo	30 s	10 s	3-5 min	20 s	10 min	5 min	3-5 min
Vrijeme potpunog umreživanja	24 sata	24 sata	12-24 sata	1 sat (ili kad se ohladi) ⁴	24 sata	24 sata	24 sata

¹Cijanoakrilati imaju vrlo dobru postojanost na vlagu na plastici.

²Neumrežena kapljevita ljepila mogu uzrokovati površinske napukline kod nekih plastomera, npr. polikarbonata, akrila ili polisulfona. Dostupni su specijalni proizvodi i proizvodne tehnike.

³Zahtijeva se povišena temperatura.

⁴Poliuretanska taljevinska ljepila trebaju 24 sata do potpunog umreženja.

2.6.1.3. Materijal i kombinacije materijala

Vrste materijala, odnosno kombinacija materijala za lijepljenje trebaju biti usklađeni. Npr. kod polimernih leća, „ista“ vrsta polimera od različitih dobavljača može imati različite karakteristike. Utjecaj pripreme površine može biti vrlo varijabilan.

Kod pripreme površine vrlo su bitna svojstva površine za adheziju, a također i za stabilnost cjelokupne lijepljene strukture. Vrlo je bitno razmotriti sve od navedenog: postojeći sloj na površini, geometrijsku strukturu, svojstva močenja, difuziju.

Veličina lijepljene strukture povezana je s konstrukcijom. Mogućnosti tehnologije lijepljenja trebaju se realno razmotriti. Ovo također vrijedi za dimenzioniranje površine koja se lijepi.

2.6.1.4. Vrsta ljepila

Vrsta ljepila utječe na izbor ljepila s obzirom na:

- uvjete proizvodnje,
- mehanizam umreživanja,
- vrijeme umreživanja,
- proizvodna svojstva,
- rezultirajuća svojstva lijepljenog sloja.

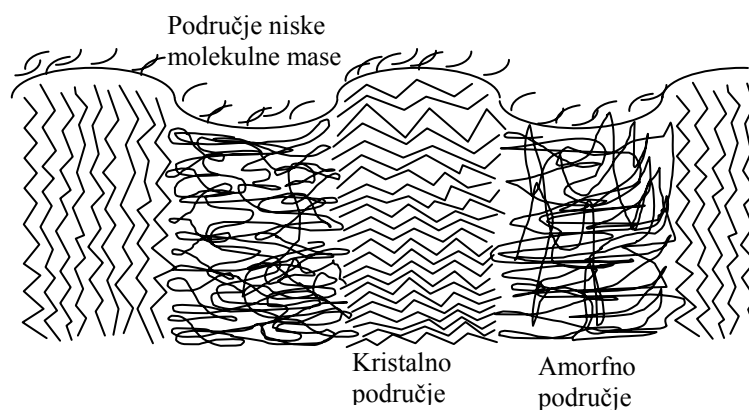
Uvjeti proizvodnje zahtijevaju da temperatura umrežavanja ljepila bude u korelaciji s ekonomskim i ekološkim zahtjevima. Parametri mehanizma umreživanja, kao što su toplinska svojstva, čvrstoća, tlak itd., često su vrlo bitni. Rezultirajuća svojstva umreženog ljepila uključuju mehaničku stabilnost, deformabilnost i toplinsku stabilnost. Za proizvodna svojstva važan je utjecaj reoloških svojstava ljepila, a ujedno je važna i viskoznost koja određuje učvršćivanje komponenti.

3. PRIPREMA ZA LIJEPLJENJE

3.1. Priprema površine za lijepljenje

Priprema površine za lijepljenje vrši se u svrhu povećanja prijanjajućih sila između površine zalijepljenih dijelova i sloja ljepila. Za to su potrebna aktivna središta na površini, odnosno mjesta na kojima se dobro mogu odvijati fizikalne i kemijske reakcije koje su potrebne za stvaranje prijanjajućih sila. Takva središta se mogu sastojati od nakupina naboja ili razlika u morfologiji površine. Različitim postupcima pripreme površine povećavaju se važne međumolekulne sile u graničnom sloju između ljepila i površine zalijepljenih dijelova te se površina sloja ljepila dovodi u željeno stanje. Pripremom se poboljšava i otpornost lijepljenog spoja na atmosferske promjene, kemijska postojanost kao i otpornost prema različitim vrstama opterećenja. [1]

Većina industrijski uporabljivih plastomera ne dolaze u čistom kemijskom sastavu, već kao smjese. Kao sastojci smjesama najčešće se dodaju plastifikatori, antioksidansi itd. Štoviše, većina plastomera načinjeni su od dijelova koji nemaju istu molekulnu masu. Posebni materijali, polimerizirani slobodnim radikalima, mogu imati široku razdiobu molekulne mase. Na površini kristalastih plastomera često nastaju materijali niske molekulne mase (poznati kao „repovi“), koji uvelike otežavaju postupak lijepljenja polimera. Slika 3.1 prikazuje takvu površinu. [2]



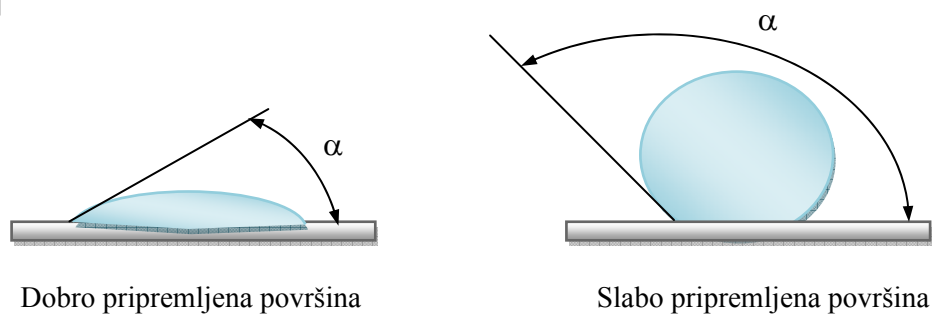
Slika 3.1. Površina kristalastog plastomera [2]

Nepravilna linija u unutrašnjosti polimera predstavlja amorfno područje, dok izlomljena linija predstavlja kristalno područje površine polimera. Na površini plastomera prikazanoj kratkim,

zakrivljenim linijama nalazi se područje niske molekularne mase. Kod lijepljenja polimera javlja se znatno više poteškoća nego kod drugih materijala, a uzrok tome je upravo niska molekularna masa na površini. Vanjska površina je relativno ravna, ali može biti prevučena slojem niske molekularne mase. Kako bi se postigli optimalni rezultati lijepljenja, potrebno je obaviti pravilnu pripremu površina koje se lijepe. Čvrstoća ostvarene veze u velikoj će mjeri ovisiti o adheziji između površina koje se lijepe i ljepljiva. Lijepljeni spoj je čvršći što je temeljitije provedeno čišćenje površina koje se lijepe, a adhezijske sile se mogu značajno povećati:

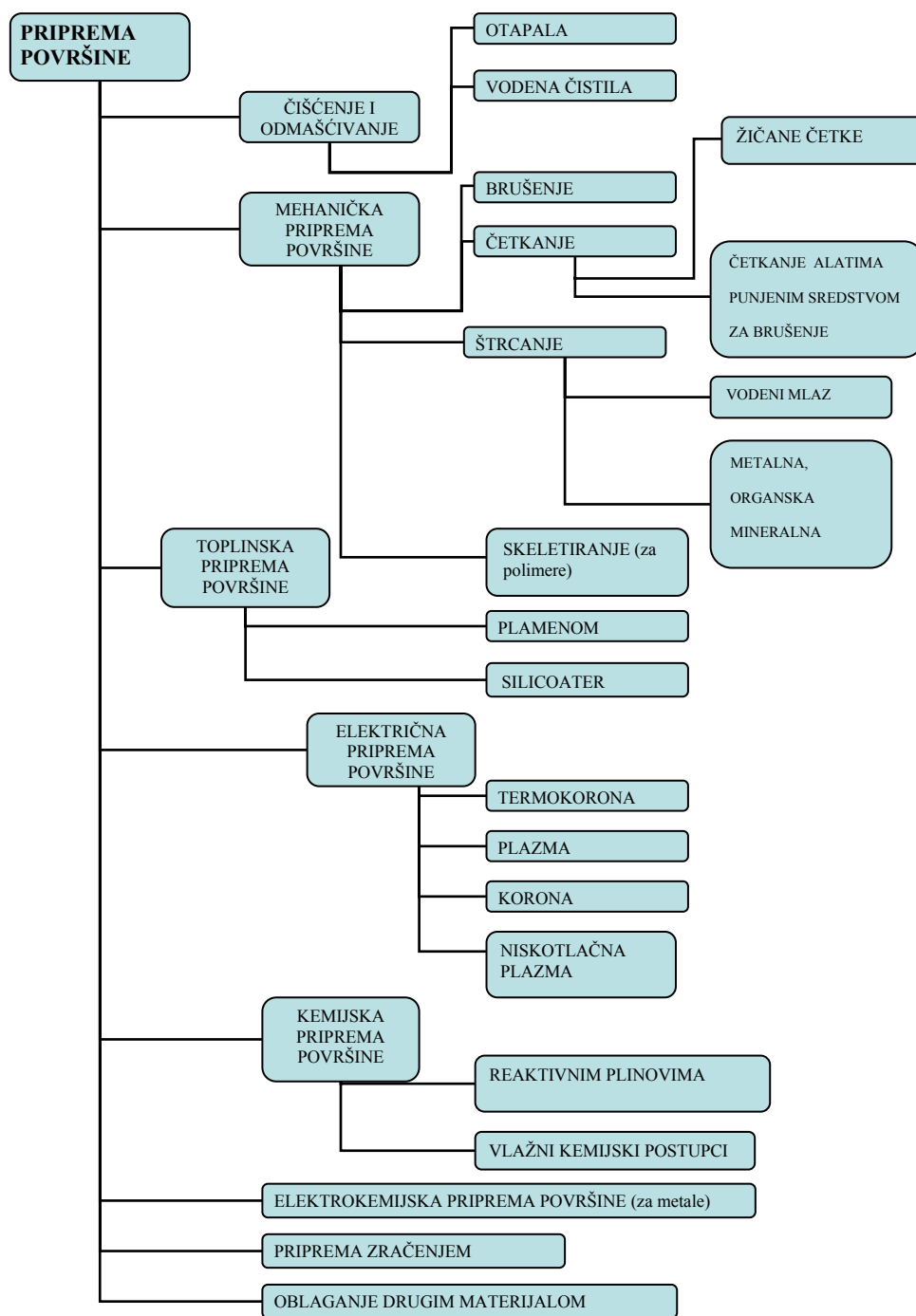
- skidanjem neodgovarajućeg površinskog sloja materijala mehaničkom obradom i odmašćivanjem,
- stvaranjem novog, aktivnog površinskog sloja kemijskim postupkom. [2]

Provjera učinkovitosti postupka pripreme površina vrši se najčešće i najjednostavnije metodom „vodene kapljice“. Slika 3.2 prikazuje tu metodu. Nekoliko kapljica čiste vode nanese se na očišćenu površinu, i ukoliko površina nije odgovarajuće pripremljena, kapljice zadržavaju približno oblik kugle, što je znak da se površina mora podvrgnuti temeljitom čišćenju. Ukoliko se vodene kapljice razlijevaju na površini, močenje površine je dobro, što znači da je površina dobro pripremljena, odnosno da ima dovoljno visoke vrijednosti slobodne površinske energije i čistoće. [2]



Slika 3.2. Provjera pripreme površine metodom „vodene kapljice“ [2]

Slika 3.3 prikazuje načine pripreme površine za lijepljenje.



Slika 3.3. Postupci pripreme površine [2]

3.1.1. Čišćenje i odmašćivanje

Čišćenjem površina za lijepljenje otklanjaju se prljavština, hrđa, boje, lakovi, a izvodi se brušenjem ili četkanjem. To je jedan od osnovnih preduvjeta za postizanje očekivane čvrstoće spoja. *Odmašćivanje* se provodi pomoću organskih otapala ili alkalnih otopina za čišćenje, pri čemu dodatna upotreba ultrazvuka dovodi do posebne učinkovitosti čišćenja. Da bi se postiglo

dobro povezivanje, treba odstraniti masnoće i ulja, što odmašćivanje čini obaveznim postupkom, bez obzira je li površina prethodno obrađena na neki drugi način. Za to se koriste halogenirani ugljikovodici (trikloretilen, perkloretilen, metilenklorid) i aceton. Alkoholi i zasićeni ugljikovodici (benzin, petrolej) se ne preporučaju za odmašćivanje. [1]

Pri izboru odgovarajućeg otapala za odmašćivanje polimernih materijala ne smije doći ni do kakve negativne promjene na materijalu, npr. stvaranja mjehurića. Vodena, alkalna čistila, koja se mogu koristiti kod svih polimernih materijala, postižu potpunu djelotvornost tek pri visokim temperaturama uz naknadno pranje i sušenje. [2]

3.1.2. Mehanička priprema površine [1]

Mehanička priprema površine može se obaviti već prilikom proizvodnje dijelova za lijepljenje ili prilikom dodatne mehaničke pripreme brušenjem, četkanjem ili mlaznim postupcima. Time se površina čisti, a ujedno i povećava djelotvorna površina. Mehaničko čišćenje se može provesti ručno, strojno ili mlazom abraziva. Ručno čišćenje podrazumijeva upotrebu žičanih četki, brusnog papira ili lopatica. Taj postupak je jako spor i ne daje dovoljno čistu površinu, a ekonomičan je tek na malim površinama. Koristi se uglavnom za mjesta koja su nedostupna za strojno čišćenje.

Strojna priprema površine izvodi se uz pomoć rotirajućih čeličnih četki, bruseva i sl. Ovakvo čišćenje daje puno bolju površinu i omogućuje veću brzinu rada, nego ručno čišćenje.

Mehaničko čišćenje moguće je izvoditi i uz pomoć mlaza abraziva (kremeni pijesak, silicij-karbid, aluminijski oksid, čelična sačma). Najjeftinije je pjeskarenje uz primjenu kremenog pijeska. Međutim, taj je pijesak štetan za zdravlje jer se pri čišćenju pretvara u sitnu prašinu, koju radnik udiše. Zbog toga se za pjeskarenje primjenjuje postupak *Vacublast*, pri čemu se prašina odsisava izravno s mjesta obrade. Često se primjenjuje i vlažno pjeskarenje, odnosno obrada mlazom vodene emulzije kremenog pijeska.

Ponekad se za pripremu polimera koristi i vodeni mlaz, a prednost ovog postupka je neškodljivost za okolinu. Međutim, nedostatak postupka je neznatno povećanje adhezivnih sila i skupa oprema.

3.1.3. Kemijska priprema površine [1]

Odmašćivanje površine služi za uklanjanje masnih tvari mineralnog podrijetla (teških ugljikovodika) ili biološkog podrijetla (triglicerida masnih kiselina) s površine. Masne tvari se mogu otopiti u organskim kapljevinama. Najčešće se za to primjenjuju ugljikovodici (npr. benzin, petrolej), koji imaju manju zapaljivost, te halogenirani ugljikovodici (npr. trikloretilen, perkloretilen, dikloretilan, triklortrifluoretan), koji nisu zapaljivi, ali su im pare otrovne. Odmašćivanje se vrši trljanjem tkaninom natopljenom otapalom, uranjanjem predmeta u otapalo, prskanjem otapala i djelovanjem pare otapala. Odmašćivanje parom provodi se pomoću nezapaljivih halogeniranih ugljikovodika i to na način da se hladni predmeti izlažu vrućoj pari otapala, koja se na njima kondenzira, otapa masne tvari i otkapljuje.

Za odmašćivanje služe i tople alkalne otopine, tj. otopine hidroksida, karbonata, fosfata, silikata, borata i cijanida, koje emulgiraju masne tvari mineralnog podrijetla i osapunjavaju masne tvari biološkog podrijetla.

Odmašćivanje se također može provoditi pomoću toplih otopina deterdženata, tako da se površina prska 3 - 5 postotnom otopinom deterdženta, zatim spaljivanjem masnih tvari i mehaničkim čišćenjem pomoću mlaza vodene pare. Odmašćivanje u alkalnim otopinama može se ubrzati primjenom ultrazvuka.

3.1.4. Dodatna priprema površine [1]

Ukoliko nije moguće obaviti lijepljenje odmah nakon pripreme površine usljed određenih uvjeta proizvodnje, u obzir se mogu uzeti sljedeće mjere:

- klimatizacija: na taj način se izbjegavaju reakcije površine s vlagom iz atmosfere. Temperatura dijelova za lijepljenje mora biti jednaka okolišnoj, kako bi se izbjegla kondenzacija vodene pare na površini;
- nanošenje sredstava za pojačavanje prijanjanja: služi povećanju čvrstoće lijepljenog spoja i otpornosti prema atmosferskim promjenama,
- konzervacija površina za lijepljenje: može se provesti primjenom *primera*.

3.2. Priprema ljepila [4]

Prije nanošenja, ljepila se moraju na određeni način pripremiti. Kod ljepila koja kemijski reagiraju, to je u pravilu miješanje po sustavu podređenih komponenti. Kod ljepila koja očvršćuju na fizikalni način, radi se o homogeniziranju otopine ljepila. Reološka svojstva ljepila su važna za proizvodnju i ponašanje lijepljenih spojeva. Ona određuju sposobnost ljepila da se, u ovisnosti o vremenu, ravnomjerno raspoređi po površini.

Odlučujući kriterij za sposobnost močenja ljepilom površine za lijepljenje je viskoznost, pri čemu se pod sposobnošću močenja podrazumijeva i mogućnost da ljepilo iz prisutnih kapilara ili površinskih udubina istiskuje zrak. Viskoznost nekog ljepila temelji se na molekulnom sastavu, osobito na duljini lanca i polarnih skupina. Viskozno ponašanje važno je poznavati za postizanje ravnomjerne debljine ljepila i kontinuiteta nanesenog sloja ljepila. U slučaju premale viskoznosti, dodaju se sredstva za zgušnjavanje, a u slučaju previsoke viskoznosti, dodaju se odgovarajuća otapala kako bi se viskoznost smanjila.

3.2.1. Miješanje ljepila

Prilikom miješanja ljepila potrebno je postići dva cilja:

1. promjena fizikalnih svojstava ljepila, što se postiže dodavanjem punila i/ili otapala. Pri tom se uzima u obzir:
 - izbjegavanje zračnih mjehurića kod ljepila visoke viskoznosti,
 - izbor odgovarajućeg otapala pogodnog za određeni sustav,
 - činjenica da se otapala – reakcijska ljepila visoke viskoznosti, a koja su prije polimerizirana – ne mogu ponovno učiniti upotrebljivima;
2. uvođenje kemijske reakcije do očvršćivanja, pri čemu se razlikuju dva osnovna tipa reakcijskih ljepila:
 - reakcije do kojih dolazi dodavanjem učvršćivača (ubrzivača, katalizatora) koji se u manjim količinama dodaju osnovnom monomeru,
 - reakcije do kojih dovode dvije komponente osnovnih monomera. Što se tiče tih komponenti, najvažnije je da su one pri uporabi ljepila ravnomjerno i homogeno

raspoređene. Prema reaktivnosti komponenti koje se miješaju, dolazi do određenog oslobađanja topline. Pri tome vrijede sljedeće zakonitosti:

- sustavi koji očvršćuju na hladnom, imaju kraće vrijeme očvršćivanja (sekunde, minute, sati),
- sustavi koji očvršćuju na toplom, imaju duže vrijeme očvršćivanja (sati, dani, tjedni),
- hlađenjem se vrijeme očvršćivanja može produljiti.

3.2.2. Nanošenje ljepila

Ljepilo se može nanositi na različite načine koji se biraju prema geometriji dijelova za lijepljenje, viskoznosti ljepila i stupnju automatizacije proizvodnog procesa. Načini na koje se ljepilo može nanositi su: prskanje, umakanje, nanošenje valjkom, lijevanje, nanošenje kistom, nanošenje lopaticom, mazanje, pečačenje, topljenje, polaganje i umetanje.

Bez obzira na način nanošenja ljepila, potrebno je uzeti u obzir sljedeće:

- ljepilo treba nanijeti neposredno nakon površinske obrade,
- izbjegavati kondenzirane slojeve vlage na površini dijelova za lijepljenje,
- održavati ravnomjernu debljinu ljepila izborom parametara, pritiska i temperature,
- nanositi ljepilo na oba dijela za lijepljenje, što omogućava ravnomjerno močenje i stvaranje graničnih slojeva,
- ljepila sa otapalom, koja se brzo suše, nanositi na oba dijela za lijepljenje,
- pri nanošenju taljivih ljepila osigurati odgovarajuće prethodno zagrijavanje dijelova za lijepljenje,
- ako ljepila sadrže otapalo, predvidjeti najkraće vrijeme sušenja,
- nakon nanošenja ljepila potrebno je osigurati nepokretnost lijepljenih spojeva pomoću naprava.

3.2.2.1. Ručno nanošenje ljepila

Nanošenje kistom ili četkom, jedan je od najstarijih načina nanošenja ljepila. Njegova prednost je u mogućnosti dobrog utrljavanja i dobrog prijanjanja ljepila, niski troškovi investiranja i nije potrebna kvalificirana radna snaga.

Nanošenje valjkom se rijetko primjenjuje zbog lošeg utrljavanja ljepila u podlogu. Nedostatak ručnog nanošenja ljepila je nejednoličnost debljine nanesenog sloja ljepila.

3.2.2.2. Nanošenje ljepila mlaznicama

Nanošenje mlaznicama omogućava veću brzinu rada i prikladno je za serijsku proizvodnju. Najvažniji dio uređaja je pištolj kroz čiju se mlaznicu potiskuje ljepilo pomoću komprimiranog zraka. Slika 3.4 prikazuje pištolj za nanošenje ljepila. Ljepilo se usisava iz posude na vrhu ili dnu pištolja pomoću stvorenog podtlaka, a zatim ga stlačeni zrak raspršuje po objektu.



Slika 3.4. Pištolj za nanošenje ljepila [5]

Kod bezračnog štrcanja ljepilo se ne miješa sa stlačenim zrakom, nego potrebni tlak stvara crpka koja je uronjena u sredstvo nanošenja. Raspršivanje počinje već u glavi pištolja. Prednost ovog postupka je veliki kapacitet i brzina rada, uz mogućnost nanošenja različitih debljina slojeva u jednom štrcanju.

Posebni uređaji za štrcanje dvokomponentnih i višekomponentnih ljepila omogućuju miješanje u glavi, odnosno na izlazu iz pištolja. Takvi uređaji omogućuju rad s ljepilima koja imaju vrlo kratko radno vrijeme, odnosno vrijeme od miješanja dviju komponenti do otvrdnjavanja. Materijal se troši ekonomičnije i olakšano je čišćenje uređaja.

3.2.2.3. Nanošenje ljepila valjcima

Nanošenje ljepila valjcima je suvremen i visoko automatizirani postupak kojim se nanose jednolični filmovi ljepila. Pritom se debljina sloja ljepila regulira uz pomoć noževa ili razmakom i brzinom vrtnje valjaka.

3.2.2.4. Zavjesno nanošenje ljepila

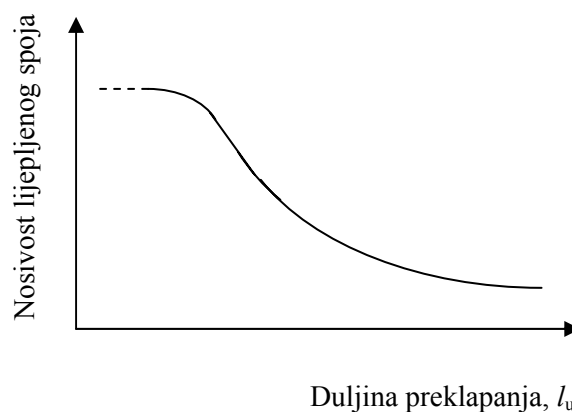
Zavjesno nanošenje ljepila je postupak nanošenja ljepila na ravne površine ili na pomične trake jednostavnom tehnikom ispuštanja ljepila iz posuda s procjepom.

4. OBLIKOVANJE LIJEPLJENIH SPOJEVA

4.1. Uvod

Oblikovanje lijepljenog spoja uvelike utječe na njegovu nosivost. Najveći utjecaj ima vrsta spoja, odnosno radi li se o jednostrukom preklopu, dvostrukom preklopu, sučeljenom spoju, cijevnom spoju itd. Parametri koji također značajno utječu na nosivost spoja su debljina i površina mjesta lijepljenja. [2]

U jednostrukom preklopnom spoju osim smičnih naprezanja javlja se i dodatna komponenta normalnog naprezanja usljed savijanja. Zbog toga je takva vrsta spoja lošija od dvostranog preklopnog spoja. Kod skošenog preklopnog spoja očekuje se najviša nosivost zbog jednolike razdiobe smičnih naprezanja. Na nosivost lijepljenog spoja utječe i duljina preklopa. Najviša nosivost se postiže pri optimalnoj duljini preklopa. Svako daljnje povećanje dužine preklopa snizuje nosivost spoja. [2] Slika 4.1 prikazuje dijagram ovisnosti nosivosti lijepljenog spoja o duljini preklapanja.



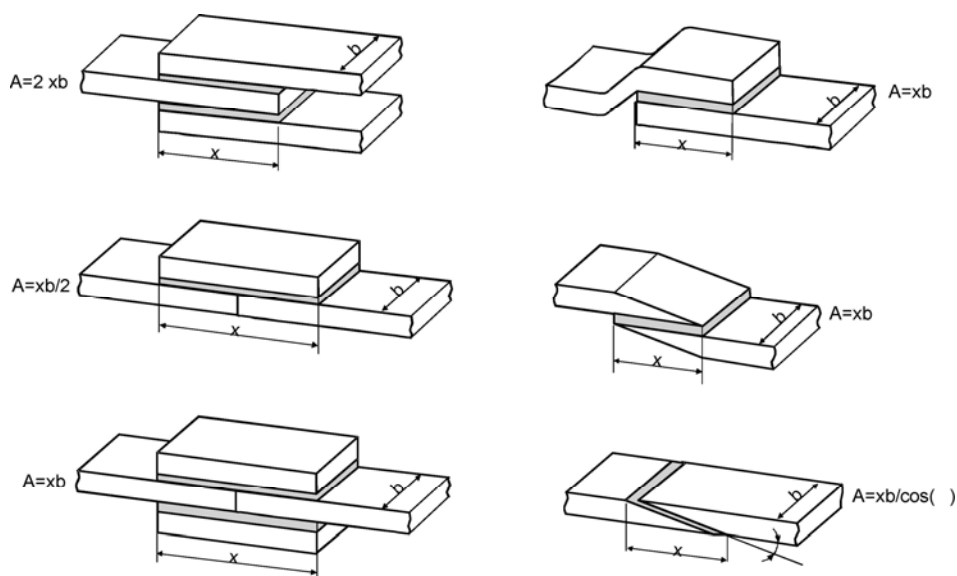
Slika 4.1. Ovisnost nosivosti spoja o duljini preklapanja [2]

Opadanje nosivosti s povećanjem duljine preklopa može se objasniti utjecajem koncentriranih naprezanja na krajevima preklopnog spoja. Jednako tako, nosivost lijepljenog spoja opada s porastom debljine sloja ljepila. Optimalna debljina sloja ljepila kreće se od 0,05 do 0,1 mm, što opet ovisi o vrsti ljepila. [2]

Nosivost lijepljenog spoja ovisi i o svojstvima materijala koji se lijepe. Kod jednostrukog preklopnog spoja s porastom debljine materijala koji se lijepe raste i njegova nosivost. Međutim, to se događa samo do postizanja granične vrijednosti debljine materijala, nakon čega daljnje povećanje debljine ne donosi veću nosivost.

4.2. Osiguranje dovoljnih površina za lijepljenje [2]

Ljepila obično imaju znatno nižu čvrstoću u usporedbi s dijelovima koji se lijepe, pa je potrebno osigurati dovoljno površina za lijepljenje. Povećanjem površine lijepljenja postiže se dovoljna čvrstoća lijepljenog spoja. Kako bi se povećala površina lijepljenja, koriste se različiti preklopni spojevi kod kojih je moguća jednostavna promjena površine lijepljenja. Slika 4.2 prikazuje neke vrste preklopnih spojeva.



Slika 4.2. Neki od oblika preklopnih lijepljenih spojeva [2]

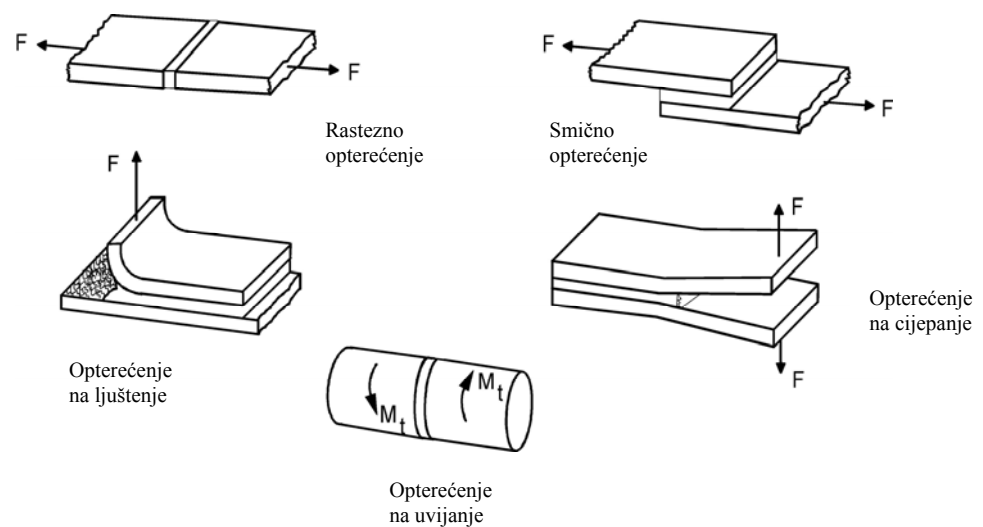
4.3. Smanjenje naprezanja [2]

Jednostruki preklopni spojevi, koji se najčešće koriste, imaju problem ograničene nosivosti zbog naprezanja koje se javlja na rubovima preklapanja. Ta se naprezanja smanjuju ili eliminiraju prikladnim konstrukcijskim oblikovanjima:

- mehaničkim ojačanjem spoja,
- savijanjem,

- povećanjem krutosti,
- povećanjem površine,
- dodatnim zakovicama i vijcima.

Veća opterećenja se mogu izbjeći sprečavanjem nastanka momenata savijanja koji dovode do normalnih naprezanja. Preporuča se primjena geometrije koje eliminira ovaj efekt, što se postiže dvostrukim preklopnim spojem, dvostrukim preklopnim spojem s podmetačem i spojem s umetkom. Jednako tako se preporuča izbjegavati cijepanje postavljanjem dodatnih zakovica ili vijaka na početak preklapanja. Slika 4.3 prikazuje najčešće vrste opterećenja.



Slika 4.3. Vrste opterećenja različitih lijepljenih spojeva [2]

4.4. Izbor vrste spoja

S obzirom na međunarodnu normu *ISO 4587* prema kojoj će se vršiti ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada, ovdje će se opisat samo jednostruki preklopni spoj, kojeg norma nalaže za ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja.

4.4.1. Jednostruki preklopni spoj [2]

U sloju ljepila jednostrukog preklopnog spoja javljaju se smična naprezanja paralelna s površinom lijepljenja uvjetovana pomicanjem podloge (dijelova koji se lijepe), smična

naprezanja paralelna s površinom lijepljenja uvjetovana deformiranjem podloge (dijelova koji se lijepe) i normalna naprezanja okomita na površinu lijepljenja uvjetovana momentom savijanja. Povećavanjem opterećenja sva se naprezanja povećavaju i superponiraju na području rubova preklapanja do dosizanja kritičnog naprezanja pri kojemu popušta sloj ljepila.

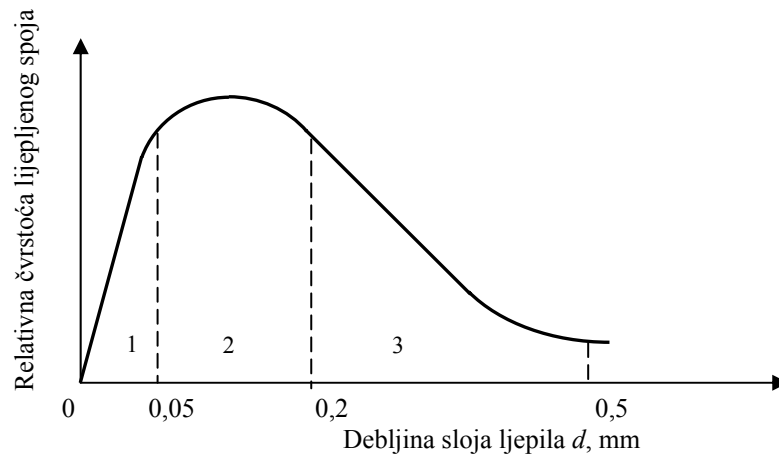
Jedno vrlo često opterećenje koje se javlja kod jednostrukih preklopnih spojeva je *opterećenje na ljuštenje* koje uzrokuje normalna naprezanja na rubovima. Otpornost lijepljenog spoja na ljuštenje ovisi o nekoliko čimbenika. Povišeni modul rastezljivosti materijala lijepljenih dijelova znatno povisuju čvrstoću lijepljenog spoja. Povećana debljina lijepljenih dijelova uz manji polumjer savijanja djeluje na povišenje čvrstoće ljuštenja, dok debljina sloja ljepila nema nikakvog utjecaja.

Duljina preklapanja jednostrukog preklopnog spoja utječe na čvrstoću lijepljenog spoja. Povišenjem njene dužine, povećava se i čvrstoća, ali postoje ograničenja uvjetovana pojavom koncentracije naprezanja na rubovima jednostrukih preklopnih lijepljenih spojeva.

Povećana *debljina dijelova* koji se lijepe utječe na čvrstoću lijepljenog spoja zbog povećane krutosti i povećanog momenta savijanja. Ako se poveća debljina lijepljenih dijelova uz konstantnu debljinu sloja ljepila, povećat će se čvrstoća lijepljenog sloja. Pri opterećenju debljih dijelova za lijepljenje dolazi do manje deformacije nego kod tanjih. Tako su i vrijednosti naprezanja na rubovima preklapanja kod debljih dijelova za lijepljenje manja, što je uzrok prijenosa opterećenja na veći dio lijepljenog spoja zbog veće krutosti.

Površina lijepljenja također utječe na čvrstoću jednostrukog preklopnog spoja. Prekomjerno povećanje površine smanjuje ravnomjernost sloja ljepila pri nanošenju, a također je uzrok nejednolikog očvršćivanja ljepila zbog različite razdiobe temperature i neujednačenog pritiska dijelova pri lijepljenju.

Svojstva sloja ljepila koja ovise o *debljini sloja ljepila* također utječu na čvrstoću lijepljenog spoja. Tako je kod tanjih slojeva ljepila spriječena poprečna kontrakcija sloja ljepila, što pridonosi većoj čvrstoći. Kod jednostrukih preklopnih spojeva s povećanjem debljine sloja ljepila povećava se i moment savijanja. Moment savijanja uzrokuje normalna naprezanja i naprezanja na rubovima preklapanja. Slika 4.4 prikazuje kako čvrstoća jednostrukog preklopnog spoja ovisi o debljini sloja ljepila.



Slika 4.4. Ovisnost čvrstoće jednostrukog preklopnog spoja o debljini sloja ljepila [1]

U području 1 debljine sloja ljepila do 0,05 mm čvrstoća jednostrukog preklopnog spoja se povećava. Uvjet za porast čvrstoće ljepila u ovom području je da viskoznost ljepila bude manja od 200 mPa s. Područje 2, u kojem lijepljeni spoj postiže maksimalnu čvrstoću, je u rasponu debljine od 0,05 do 0,2 mm. Debljine sloja ljepila iznad 0,2 mm predstavljaju područje 3, u kojem čvrstoća jednostrukog preklopnog spoja opada s porastom debljine sloja ljepila, a iznad debljine 0,5 mm vrijednost čvrstoće se ne mijenja s porastom debljine sloja ljepila.

4.5. Sastavljanje spoja [6]

Sastavljanje lijepljenog spoja obuhvaća niz operacija. Poslije nanošenja ljepila dijelovi se moraju spojiti i učvrstiti određeno vrijeme. Prilikom očvršćivanja ljepila tri su osnovna parametra koja utječu na kvalitetu lijepljenog spoja: temperatura, tlak i vrijeme.

Što se *temperature* tiče, ljepila mogu očvršćivati u hladnom stanju na sobnoj temperaturi (hladna ljepila) ili na 80 – 220 °C (taljiva ili topla ljepila). Pri upotrebi taljivih ljepila treba obratiti pozornost na osjetljivost materijala koji se spajaju na povišenu temperaturu. Svako taljivo ljepilo, prije nego što počne djelovati, na visokim temperaturama prolazi fazu smanjene viskoznosti prije nego što uđe u fazu visoke viskoznosti na kraju procesa otvrdnjavanja. U fazi niske viskoznosti ljepilo može prodrijeti u sve prostore između lijepljenih površina. Za očvršćivanje taljivih ljepila potrebno je mnogo više uložiti truda (sušionici, ploče s grijačima, naprave) nego za očvršćivanje hladnih ljepila.

Za svako ljepilo postoji *određeni tlak*, kojim se površine na koje je nanoseno ljepilo, nakon sastavljanja spoja prešaju, kako bi se postigao homogeni sloj ljepila s optimalnom debljinom. Ljepila koja očvršćuju umreživanjem, za vrijeme očvršćivanja mijenjaju strukturu, zbog čega se javlja skupljanje lijepljenog sloja. U debljim slojevima ljepila to skupljanje uzrokuje unutrašnja naprezanja zbog kojih se smanjuje čvrstoća spoja. Iznos tlaka ovisi i o kvaliteti površina za lijepljenje. Pojedina kapljevita ljepila mogu popuniti sve prostore na površinama za lijepljenje, tako da se za njih može upotrijebiti najniži tlak. Dva su osnovna načela kojih se treba pridržavati prilikom sastavljanja spoja:

- spoj se mora tlačiti određenim tlakom sve dok slijepljeni dio u potpunosti ne očvrstne,
- pridržavati se uputa proizvođača ljepila.

Vrijeme je vrlo bitan čimbenik u ostvarenju kvalitetnog lijepljenog spoja. Elementi koji se lijepe moraju se spojiti pravodobno, unutar otvorenog vremena (vrijeme od nanošenja ljepila do postizanja konačne čvrstoće lijepljenog spoja). To vrijeme treba strogo kontrolirati jer male razlike u otvorenom vremenu mogu uzrokovati velike razlike u čvrstoći lijepljenog spoja. Otvoreno vrijeme propisuje proizvođač i tog vremena se treba pridržavati.

4.5.1. Naprave za sastavljanje i učvršćivanje lijepljenog spoja

Tlačenje sastavljenog spoja provodi se pomoću različitih preša, tlačnim valjcima i uređajima za upinjanje. Za toplinske operacije pri očvršćivanju ljepila upotrebljavaju se peći s cirkulacijom vrućeg zraka, uređaji za kontaktno grijanje (npr. grijane preše), rjeđe uređaji za mikrovalno ili induktivno grijanje.

Stega za lijepljenje je tipičan pomoćni uređaj koji se zasniva na vijku koji uzrokuje elastičnu deformaciju svinutog dijela stega. Ako se prilikom lijepljenja smanji debljina zalijepljenog dijela, smanjuje se i deformacija svinutog dijela stega. Na taj se način smanjuje tlačenje sastavljenog spoja. Isto se događa pri upotrebi stega za lijepljenje sa zagrijavanjem, tj. kada se u stegu stegne sastavljeni spoj, te se zatim sve stavi u peć. Ovdje treba paziti na toplinsku deformaciju svinutog dijela stega. Temperaturne promjene mogu uzrokovati gubitak moći stezanja stega, te da se površine sastavljenog spoja ne dodiruju. Ovaj problem se rješava upotrebom stega s tanjurastim oprugama, koje imaju velike sile tiskanja.

Preša za lijepljenje je klasično pomagalo za postizanje potrebnog tlaka za prešanje i temperature očvršćivanja. Na prešu se mogu lako ugraditi električni grijaći elementi koji omogućuju ujednačeno širenje topline. Temperatura se može brzo povišavati i snižavati kako bi se postigla željena vrijednost, potrebna za očvršćivanje ljepila.

Ujednačenu temperaturu i tlak je teško održavati na istoj vrijednosti prilikom procesa očvršćivanja ljepila upotrebom preše. Zbog toga se koriti *autoklav*. Ukratko, to je tlačna posuda u kojoj se potrebni tlak postiže pomoću visokotlačnih spremnika koji se tijekom rada autoklava pune kompresorima.

5. PRORAČUN JEDNOSTRUKOG PREKLOPNOG SPOJA [2]

Slika 5.1 prikazuje jednostruki preklopni spoj, koji se najčešće koristi u praksi. Pri rasteznom opterećenju takvih spojeva paralelno s podlogom, u sloju ljepila se javlja naprezanje koje je zapravo kombinacija smičnih naprezanja paralelnih s podlogom za lijepljenje i normalnih naprezanja koja su okomita na podlogu. To je posljedica ekscentričnog djelovanja sila. Pri povećanju rastezne sile F naprezanja se superponiraju u rubnom području preklapanja sve dok se ne dostigne kritično naprezanje koje uzrokuje popuštanje sloja ljepila.

Veličina koja ima najveći utjecaj na čvrstoću, odnosno nosivost preklopnog spoja je duljina preklopa. Zbog toga se često izračunava optimalna duljina preklopa jednostrukog preklopnog lijepljenog spoja.

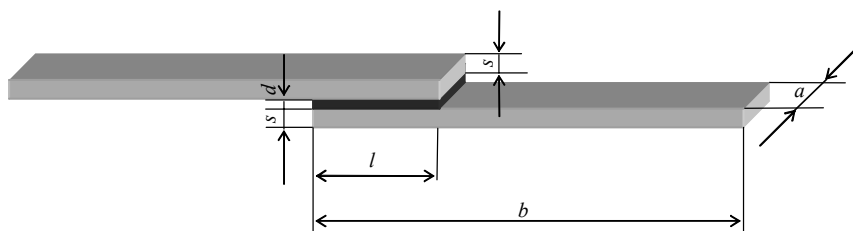
Jednostruki preklopni lijepljeni spoj dimenzionira se na temelju granice tečenja podloge i smične čvrstoće sloja ljepila. Maksimalno rastezno naprezanje podloge u smjeru opterećenja, odnosno rastezna čvrstoća podloge računa se prema sljedećem izrazu:

$$R_s = \sigma_{s \max} = \frac{F_{\max}}{s \times a} \quad (5.1)$$

dok se smična čvrstoća ljepila računa prema izrazu:

$$R_a = \tau_{a \max} = \frac{F_{\max}}{l \times a} \quad (5.2)$$

gdje su: $\tau_{a \max}$ - smična čvrstoća ljepila, F_{\max} - maksimalna spojem prenesena sila rastezanja, l - duljina preklopa, a - širina spoja, $\sigma_{s \max}$ - najveće rastezno naprezanje, s - debljina podloge.



Slika 5.1. Jednostruki preklopni spoj i dimenzije potrebne za proračun [2]

Izjednači li se maksimalna rastezna sila u ljepilu i maksimalna rastezna sila u podlozi (F_{\max}), koje su izračunate na temelju izraza (5.1) i izraza (5.2) te uvrštavanjem $l = l_{\text{opt}}$ i $\sigma_{\text{smax}} = R_{0,2}$, dobije se:

$$R_a \times l_{\text{opt}} \times a = R_{p0,2} \times s \times a \quad (5.3)$$

iz čega slijedi da je optimalna duljina jednostrukog preklopnog lijepljenog spoja:

$$l_{\text{opt}} = \frac{R_{p0,2} \times s}{R_a} \quad (5.4)$$

U praksi se kao gornja granica opterećenja uzima granica razvlačenja od 0,2 % te se tako izračunava optimalna duljina preklopa. Ova duljina predstavlja sigurnost protiv slučajnog preopterećenja, koje se u praksi često javlja zbog komponente momenta savijanja, koja se u teoretskim izračunima često zanemaruje.

6. PROVEDBA POKUSA

6.1. Svrha pokusa

Svrha pokusa je ispitati kako različiti parametri kao što su temperatura, vrsta ljepila i vrsta materijala za lijepljenje utječu na čvrstoću lijepljenog spoja. Pri tome će se ispitivati lijepljeni spojevi sastavljeni od dva različita polimerna materijala i dvije vrste polimernih ljepila, pri sobnoj (20 °C), sniženoj (-30 °C) i povišenoj (70 °C) temperaturi. Ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja propisano je međunarodnom normom ISO 4587.

6.2. Međunarodna norma ISO 4587 [7]

6.2.1. Cilj

Ova međunarodna norma određuje metodu za određivanje rastezne preklopno-smične čvrstoće kruto na kruto spojenih sklopova uz korištenje standardnog uzorka u određenim uvjetima pripreme i ispitivanja. Ovaj postupak ispitivanja ne daje informacije o konstrukciji.

6.2.2. Načelo

Preklopno-smična čvrstoća spoja određuje se naprežanjem jednostrukog preklopnog spoja krutih ispitnih tijela na smik, primjenom sile rastezanja koja je paralelna sa površinom za lijepljenje i glavnim osima ispitnog tijela.

- *Napomena 1:* Ispitna tijela sa jednostrukim preklopnim spojem su ekonomični, praktični i jednostavno ih je izraditi. Takva ispitna tijela se najviše koriste za istraživanje i ispitivanje ljepila i lijepljenih spojeva, te kontrolu kvalitete u proizvodnji.
- *Napomena 2:* Vrijednosti čvrstoće jednostrukog preklopnog spoja ne bi se trebale koristiti kao dopuštene vrijednosti naprežanja za strukturalne spojeve.

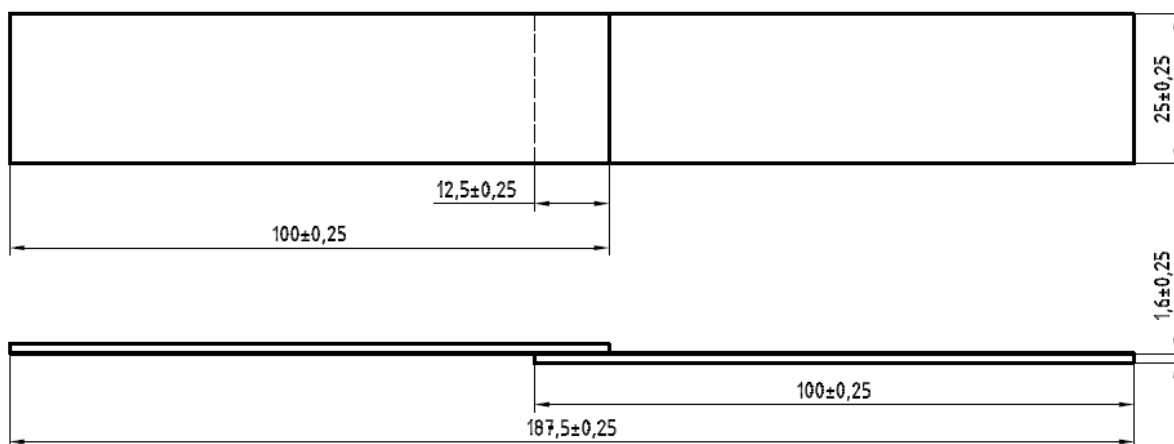
6.2.3. Uređaj

Uređaj za rastezno ispitivanje treba biti odabrana tako da se lom ispitaka događa između 10 % i 80 % cijelog raspona kapaciteta. Vrijeme odziva uređaja bi trebalo biti dovoljno kratko da omogući točno mjerenje sile primjenjene u trenutku loma. Zabilježena sila ne bi smjela odstupati od stvarno primjenjene sile više od 1 %. Uređaj treba imati sposobnost održavanja konstantnih brzina ispitivanja naznačenih u članku 7 (vidi ISO 527-1). Može se koristiti uređaj koji omogućuje konstantan iznos primjene opterećenja. U tom slučaju, uređaj treba imati sposobnost održavanja opterećenja od 8,3 MPa/min do 9,7 MPa/min. Uređaj treba biti opremljena sa odgovarajućim parom samoporavnavajućih hvataljki za držanje ispitnog tijela. Hvataljke i pribor trebaju biti konstruirani tako da se poravnavaju sa ispitnim tijelom čim se primjeni opterećenje, tako da se duge osi ispitnog tijela podudaraju sa smjerom primjenjene sile kroz centralnu liniju sklopa.

Napomena: hvataljke koje bi pridržavale ispitno tijelo uz pomoć vijaka treba izbjegavati jer takve hvataljke izazivaju nepoželjne koncentracije naprezanja.

6.2.4. Ispitna tijela

Ispitna tijela trebaju odgovarati obliku, dimenzijama i poravnanju ispitnog tijela prikazanog na slici 6.1. Dužina preklopa treba biti $12,5 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$. Glavne osi ispitnog tijela trebaju se podudarati sa smjerom valjanja kod metalnih aderenada.



Slika 6.1. Ispitno tijelo [7]

- *Napomena 1:* Izbor dimenzija različit od onih prikaznih na slici može rezultirati poteškoćama u interpretaciji rezultata jer neće omogućiti izravnu usporedbu čvrstoće lijepljenih spojeva.
- *Napomena 2:* Upotreba uzorka (matrice) za precizno smještanje materijala za lijepljenje tijekom spajanja je strogo preporučena.

Ispitna tijela mogu biti pripremljena ili pojedinačno ili iz ploče (slika 6.1). Prilikom izbora vrste pripreme, treba voditi računa o tome, hoće li lijepljeni spoj biti oštećen mehaničkom obradom, uključujući pregrijavanje. Posebnu pažnju treba obratiti na pripremu pojedinačnih ispitnih tijela, kako bi se osiguralo odgovarajuće poravnanje i da su debljine spojeva što ravnomjernije i konstantne.

Tipična debljina je 0,2 mm. Debljina se može kontrolirati umetanjem kalibriranog žičanog umetka ili malih staklenih kuglica u spojni prostor. Ako se koristi žičani umetak, žica bi trebala ležati paralelno sa smjerom primjene opterećenja kako bi se smanjio utjecaj žice na spoj.

Površina za lijepljenje treba biti pravilno obrađena kako bi se postigao optimalan spoj. Obrade površina bi trebale biti u skladu sa uputama proizvođača ili odgovarajućom normom (EN 13887). Ljepilo treba biti nanešeno i osušeno u skladu s preporukama proizvođača ljepila ili standardom primjenjenog materijala za lijepljenje. Višak ljepila istisnut tijekom formiranja spoja treba ukloniti odmah nakon spajanja. Za sva ljepila metoda korištena za pripremu površine treba biti zapisana.

Broj ispitnih tijela ovisi o zahtijevanoj točnosti, ali pouzdanost se ne smije temeljiti na manje od 5 promatranja. Mjere dimenzija ispitnih tijela moraju biti unutar $\pm 0,1$ mm.

6.2.5. Prilagodba uvjetima

Ispitna tijela trebaju biti prilagođena i ispitivana u jednoj od standardnih atmosfera određenih normom ISO 291.

6.2.6. Postupak

Smjestiti ispitno tijelo simetrično u hvataljke, sa svakom hvataljkom $50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ od najbližeg ruba preklopa. Može se koristiti podloška u hvataljkama tako da primjenjena sila bude u ravnini lijepljenog spoja. Napravom treba upravljati konstantnom brzinom tako da prosječan spoj pukne u vremenu od $65 \text{ s} \pm 20 \text{ s}$.

Ako se koristi naprava sa konstantnim iznosom opterećenja, primjeniti smično opterećenje u iznosu od 8,3 MPa do 9,8 MPa po minuti.

Snimiti najveću silu tijekom kidanja kao prekidnu silu za to ispitno tijelo.

Snimiti vrstu loma u skladu sa normom ISO 10365.

6.2.7. Prikaz rezultata

Rezultate ispitivanja treba prikazati kao aritmetičku sredinu prekidne sile u [N] ili prekidnog naprezanja u [MPa], ispravnih ispitnih tijela. Preklopno smična čvrstoća u [MPa] računa se tako da se podijeli prekidna sila u [N] sa preklopnom površinom u mm^2 .

6.2.8. Preciznost

Ovo ispitivanje ima široku upotrebu i prihvaćeno je posvuda. Ipak, preciznost je nepoznata jer podaci između laboratorija nisu dostupni.

6.2.9. Izvješće o ispitivanju

Izvješće o ispitivanju treba sadržavati sljedeće informacije:

- a) referencu na međunarodnu normu *ISO 4587*,
- b) sve detalje potrebne za kompletnu identifikaciju ispitivanog ljepila, uključujući vrstu, izvor, proizvođačev serijski broj, oblik itd,

- c) sve detalje potrebne za potpunu identifikaciju ispitnih tijela, uključujući vrstu materijala i pripremu površine,
- d) opis procesa spajanja, uključujući način nanošenja ljepila, sušenje i uvjete sušenja, vrijeme, temperaturu i tlak,
- e) prosječnu debljinu (što preciznije), sloja ljepila nakon oblikovanja spoja,
- f) kompletan opis ispitnih tijela uključujući dimenzije i oblik, nazivni preklop spoja, podatak o tome jesu li ispitna tijela pripremljeni individualno ili iz ploče, ako su pripremljena iz ploče koliko je ploča korišteno, postupak i uvjete izrezivanja ispitnih tijela i broj testiranih pojedinačnih ispitnih tijela,
- g) parametre testiranja i okolišne uvjete,
- h) brzinu ispitivanja (ili iznos opterećenja u slučaju konstnog iznosa primjene opterećenja),
- i) prekidnu silu ili prekidnu čvrstoću za svaki uzorak, aritmetičku sredinu i standardno odstupanje,
- j) vrstu loma u skladu sa normom ISO 10365,
- k) detalje bilo kakvih odstupanja od propisane procedure ili bilo kakve promjene koje bi mogle utjecati na rezultate.

6.3. Pokus

6.3.1. Materijal ispitnih tijela

Za izradu ispitnih tijela, odnosno jednostrukog preklopnog lijepljenog spoja odabrane su dvije vrste osnovnog materijala i dvije vrste ljepila. Odabrani materijali za lijepljenje su polikarbonat (PC) i poliamid (PA) [8].

Polikarbonat, trgovačkog naziva Lexan, je proziran i bezbojan amorfni polimer koji je poznat po visokoj udarnoj čvrstoći koja se očituje čak i pri temperaturama do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odlikuju ga dobra temperaturna postojanost, dimenzionalna stabilnost i otpornost na puzanje, dok je ponešto slabije kemijske postojanosti. Također je slabo otporan na zamor i trošenje. Primjenjuje se u staklarstvu, za sigurnosna stakla, leće, navlake i kućišta, medicinsku opremu (sterilizirajuću) i CD-ove (Compact disc-ove). Temperatura primjene polikarbonata se kreće od $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$. [9] Tablica 6.1 prikazuje neka osnovna svojstva polikarbonata.

Tablica 6.1. Neka svojstva polikarbonata (PC) [9]

Otpornost na abraziju ASTM D1044	10-15 mg/1000 ciklusa
Koeficijent trenja	0,31
Tvrdoća (Rockwell)	M70
Vlačna čvrstoća	55-75 MPa
Apsorpcija vode tijekom 24h	0,1 %

Poliamid, trgovačkog naziva Najlon, je djelomično kristalast polimer bijele boje, u pravilu čvrst, tvrd i relativno elastičan sa dobrim graničnim svojstvima i dobrom otpornošću na zamor i abraziju. Dobro apsorbira vodu uz povećanje dimenzija, koje u ekstremnim uvjetima može biti i do 3 %. Poliamid je otporan na masti, ulja i otapala, ali ne i na kiseline koje teže njegovoj razgradnji. Primjenjuje se u strojarstvu za izradu zupčanika, ležajeva, vijaka i zakovica. [8]

Tablica 6.2 prikazuje još neka svojstva poliamida.

Tablica 6.2. Neka svojstva poliamida (PA) [9]

Otpornost na abraziju ASTM D1044	3-5 mg/1000 ciklusa
Koeficijent trenja	0,2-0,3
Tvrdoća (Rockwell)	M89
Rastezna čvrstoća	82 MPa
Apsorpcija vode tijekom 24h	2,3 %

6.3.2. Vrste primjenjenog ljepila

Prilikom izrade, odnosno lijepljenja ispitnih tijela korištena su dva ljepila tvrtke Loctite-Henkel: jednokomponentno polimerno ljepilo *Terostat 9220* i dvokomponentno epoksidno ljepilo *Hysol 9464 A&B*.

6.3.2.1. Jednokomponentno ljepilo *Terostat 9220* [10]

Terostat 9220 je jednokomponentno ljepilo visoke viskoznosti, koje očvršćuje uz prisustvo vlage u elastični proizvod. Vrijeme očvršćivanja ovisi o vlažnosti, temperaturi te o debljini sloja ljepila. S povišenjem temperature i vlažnosti to vrijeme se može smanjiti. Niska temperatura kao i niska vlažnost otežavaju proces očvršćivanja. *Terostat 9220* ne sadrži otapala, izocijanokrilate,

silikone niti PVC, te ima slab miris (nakon lijepljenja uopće nema mirisa). Pruža dobru adheziju bez *primera* na većini podloga. Također je otporno na UV zračenje i pogodno je za vanjsku primjenu. Slika 6.2 prikazuje ljepilo Terostat 9220.



Slika 6.2. Ljepilo Terostat 9220 [11]

Ljepilo Terostat 9220 se primjenjuje za elastično lijepljenje bez *primera* i za visoko kvalitetno brtvljenje na metalnim površinama ili obojenim površinama. Koristi se i za lijepljenje stakla, keramike i većine polimera, osim PTFE, PE, PP i njihovih mješavina. Površine za lijepljenje trebaju biti čiste, suhe i bez masnoće i ulja. Tablica 6.3 prikazuje neka svojstva ljepila.

Tablica 6.3. Svojstva ljepila *Terostat 9220* [10]

Boja	Crna
Miris	Bez mirisa
Gustoća	1,4 g/cm ³
Mehanizam očvršćivanja	Uz prisustvo vlage
Vrijeme obrade	20 – 30 min
Rastezna čvrstoća	3,3 MPa
Temperatura primjene	-40 °C
Promjena volumena	< 2 %

6.3.2.2. Dvokomponentno ljepilo *Hysol 9464 A&B* [12]

Ljepilo *Hysol 9464 A&B* je pojačano dvokomponentno epoksidno ljepilo visoke viskoznosti, za primjene koje zahtijevaju brzo očvršćivanje i izuzetnu čvrstoću ljuštenja. Idealno je za lijepljenje materijala različitih karakteristika. Radnu čvrstoću postiže za svega 3 do 4 sata pri sobnoj temperaturi. Povišenjem temperature može se ubrzati proces njegovog očvršćivanja. Sastoji se od dvije komponente, A i B, koje se miješaju u omjeru 1:1. Komponenta A je smola, a komponenta B je ojačalo. Tablica 6.4 prikazuje svojstva komponenti. Jednom kada se pomiješaju

ove dvije komponente s osnovnim materijalom, umrežuju pri sobnoj temperaturi s minimalnim skupljanjem i oblikuju lijepljeni sloj crne boje. Kad je potpuno umrežena, epoksidna smola postojana je u mnogim kemijskim spojevima i otapalima. Tablica 6.5 prikazuje postojanost ljepljiva u različitim medijima.

Tablica 6.4. Svojstva komponenti dvokomponentnog ljepljiva Hysol 9464 A&B [12]

Hysol 9464 A&B	Smola	Ojačalo	Mješavina
Vrsta kemijskog spoja	Epoksid	Amin	-
Boja	Bijela pasta	Crna pasta	Siva pasta
Gustoća	1,35 g/cm ³	1,31 g/cm ³	-
Viskoznost pri 25 °C	40,36 mPa s	34,83 mPa s	

Tablica 6.5. Otpornost ljepljiva Hysol 9464 A&B na različite medije [12]

Medij	°C	% početne čvrstoće		
		500 h	1000 h	3000 h
Motorno ulje	22	100	100	100
Bezolovni benzin	22	95	75	60
50 %-tni antifriz	87	60	60	50
Voda	60	70	65	65
Voda	90	70	65	60
Aceton	22	85	35	15
Octena kiselina, 10 %	22	80	70	45
Otopina soli, 7,5 %	22	90	85	80

6.3.3. Izrada priprema za lijepljenje

Prema međunarodnoj normi ISO 4587, pripremi za lijepljenje i ispitivanje svojstava lijepljenih spojeva mogu biti pripremljeni pojedinačno ili iz ploče. Kako bi se smanjilo mehaničko oštećenje lijepljenog spoja i utjecaj zagrijavanja prilikom izrezivanja lijepljenih uzoraka iz ploče, odbrana je pojedinačna priprema lijepljenih spojeva. Iz poliamidne i polikarbonatne ploče debljine 1,6 mm izrezane su epruvete dimenzija propisanih normom, 100 x 25 x 1,6 mm. Izrezivanje epruveta se vršilo na tiskarskoj štanci koja je omogućila postizanje dimenzija unutar

zadanih tolerancija. Za dvije vrste lijepljenog materijala, dvije vrste ljepila i tri različite temperature ispitivanja, a uz minimalno tri mjerenja, bilo je potrebno izraditi 36 ispitnih tijela, odnosno pripremiti 72 epruvete za lijepljenje. Nakon toga, pristupilo se lijepljenju epruveta.

6.3.4. Priprema površine i lijepljenje

Prije nanošenja ljepila na površinu za lijepljenje bilo je potrebno obaviti pripremu površine, kako bi se uklonile nečistoće i povećala adhezija između ljepila i lijepljene površine. Površina je očišćena 70 % - tnm alkoholom. Nakon čišćenja i odmašćivanja pristupilo se nanošenju ljepila na epruvete. Jednokomponentno ljepilo *Terostat 9220* je nanošeno uz pomoć silikonskog mehaničkog pištolja, a potom se uz pomoć druge epruvete razmazivalo u tanki sloj. Nakon kratkog sušenja od 5 minuta epruvete su spajane, pazeći pri tome na duljinu preklopa i poravnanje rubova. Svaki lijepljeni spoj tlačen je sa 35 kPa pri sobnoj temperaturi u trajanju od 48 sati. Jednaka procedura vrijedila je i za dvokomponentno ljepilo *Hysol 946 A&B*. Nakon što je spoj očvrstnuo, pristupilo se kidanju ispitnih tijela na kidalici u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu.

6.3.5. Označavanje ispitnih tijela

Kako bi se prilikom ispitivanja spriječila mogućnost zamjene ispitnih tijela i rezultata ispitivanja koji odgovaraju pojedinom ispitnom tijelu, bilo je potrebno označiti ispitna tijela na odgovarajući način. Svako ispitno tijelo dobilo je jedinstvenu oznaku iz koje se nedvojbeno moglo pročitati koji je osnovni materijal, koje je ljepilo, na kojoj temperaturi je provedeno ispitivanje i koji je redosljed ispitivanja. Tako je npr. ispitno tijelo, čiji je osnovni materijal polikarbonat (PC) zalijepljen sa jednokomponentnim ljepilom i koje je ispitano pri temperaturi od 20 °C s rednim brojem 5, dobilo sljedeću oznaku: *5_PC_I_20*. Ispitno tijelo čiji je osnovni materijal poliamid (PA) zalijepljen sa dvokomponentnim ljepilom i čija su svojstva ispitana pri temperaturi od 70 °C, s redosljedom ispitivanja 15, dobilo je oznaku *15_PA_II_70*.

6.3.6. Uređaj za ispitivanje

Slika 6.3 prikazuje kidalicu *MESSPHISIK BETA 50-5*, na kojoj je ispitano mehaničko svojstvo, odnosno prekidna sila lijepljenih spojeva. Ova kidalica je upravljana računalom i ima mogućnost

izravnog očitavanja dijagrama *sila – istezanje* tijekom trajanja pokusa. Pogodna je za ovaj pokus, gdje su ispitivanja rađena pri temperaturama od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, jer je opremljena komorom za temperiranje uzoraka s mogućnošću regulacije temperature u području od $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ s točnošću $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (proizvođač Messphysik, Austrija). Slika 6.4 prikazuje komoru za temperiranje koja omogućuje zagrijavanje ili hlađenje ispitnih tijela na željenu temperaturu. Za hlađenje komore koristi se kapljeviti dušik čije se doziranje iz spremnika preko crijeva automatski regulira, također pomoću računala.



Slika 6.3. Kidalica *MESSPHYSIK BETA 50-5*



Slika 6.4. Komora za temperiranje

6.3.7. Uvjeti ispitivanja

Ispitivanje je provedeno pri tri različite temperature, simulirajući tako tri različita okolišna uvjeta u kojima bi se lijepljeni spoj mogao koristiti. U standardnoj okolini od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, koja je određena normom, pri temperaturi od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, za čije se postizanje koristio kapljeviti dušik u komori te pri temperaturi od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, koja je također postignuta zahvaljujući komori za temperiranje. Brzina kojom se vršilo kidanje ispitnih tijela je bila konstantna, što je također uvjetovano međunarodnom normom ISO 4587, a iznosila je 1 mm/min . Prije početka kidanja ispitnih tijela

bilo ih je potrebno pozicionirati i stegnute hvataljke te poravnati tako da sila kojom su ispitna tijela opterećena bude u ravnini sa ravninom lijepljenog spoja, kako bi se izbjegla pojava momenta savijanja. To se postiglo umetanjem podloške debljine 1,6 mm u jednu od hvataljki. Slika 6.6 prikazuje ispitno tijelo stegnuto u hvataljke.



Slika 6.5. Komora i kidalica spremne za ispitivanje

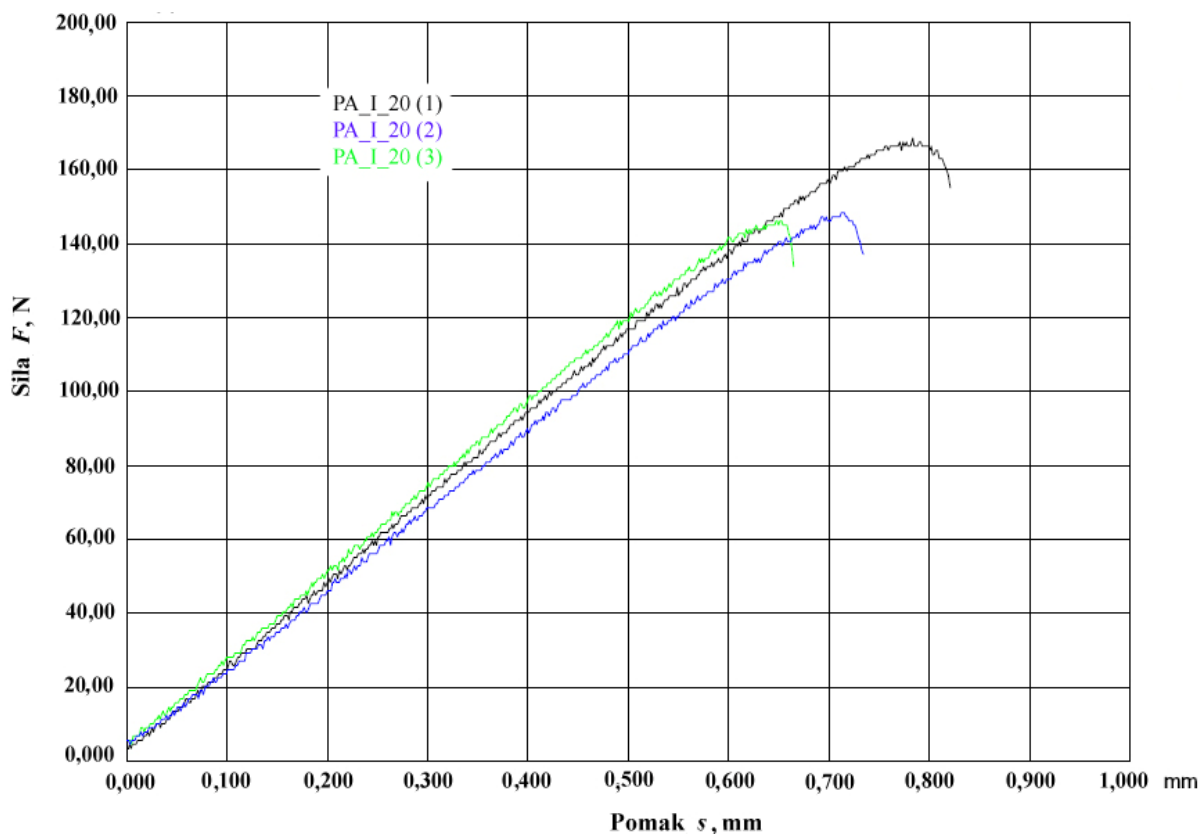


Slika 6.6. Ispitno tijelo stegnuto u hvataljke

6.4. Rezultati ispitivanja

6.4.1. Sobna temperatura

Slika 6.7 prikazuje dijagram *sila – pomak* za sva tri ispitna tijela oznake PA_I_20, što znači da su od poliamidnog osnovnog materijala (PA), lijepljenog jednokomponentnim (I) ljepilom *Terostat 9220*, i ispitivanja pri temperaturi od 20 °C. Iz dijagrama se može vidjeti da je nagib krivulje u elastičnom području za sva tri ispitna tijela približno jednak, odnosno da su rasipanja rezultata minimalna. Neznatna razlika u nagibu krivulje može biti uvjetovana nejednakom pripremom površine ispitnih tijela (koja uzrokuje različitu adheziju između ljepila i lijepljene površine) ili pak malom razlikom u debljini sloja ljepila.



Slika 6.7. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PA_I_20

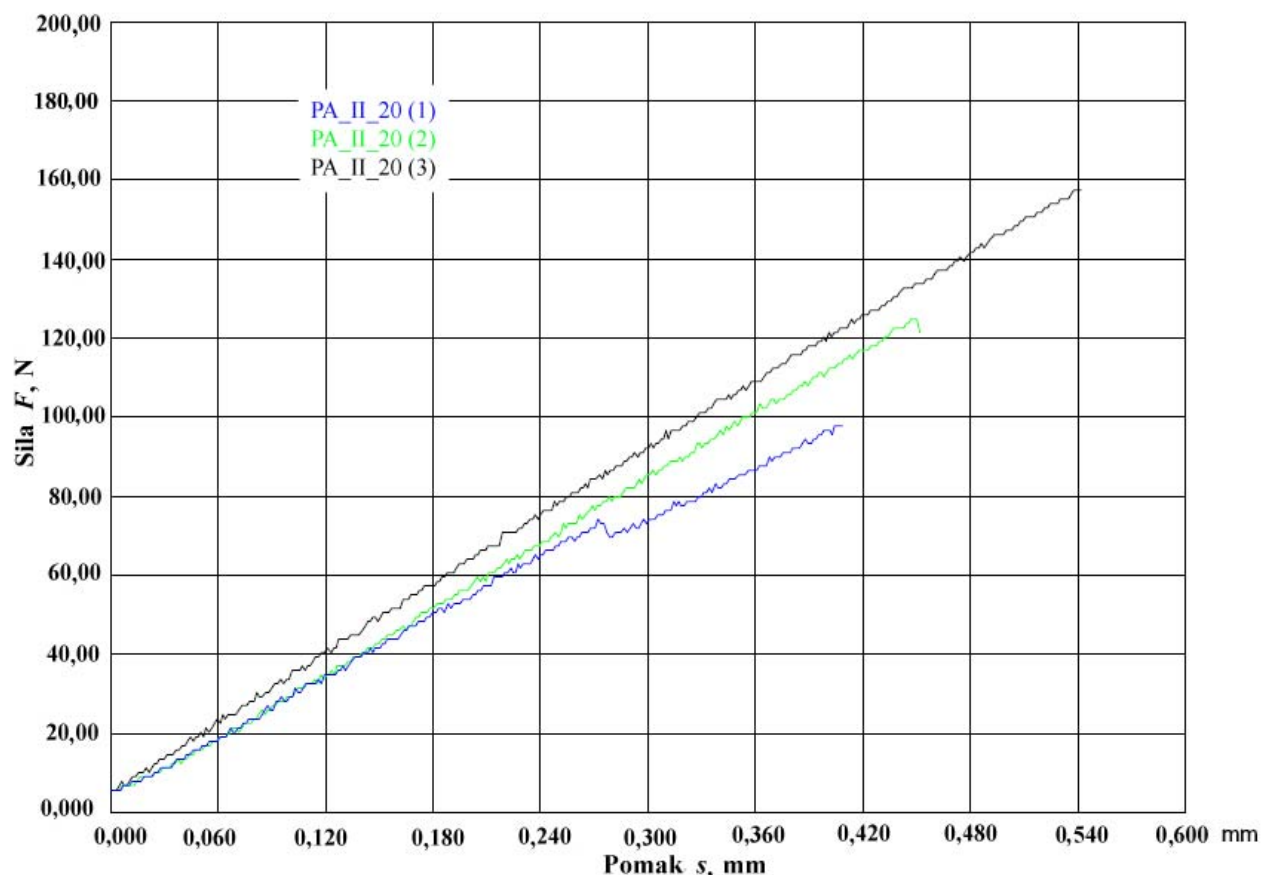
Tablica 6.6 prikazuje rezultate mjerenja (prekidnu silu) za ova tri ispitna tijela. Ispitna tijela (2) i (3) imaju gotovo identičnu prekidnu silu, dok je ispitno tijelo (1) imalo nešto veću prekidnu silu, što može biti rezultat nešto bolje pripreme površine kojom se povećala adhezija između ljepila i površine za lijepljenje.

Tablica 6.6. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_20

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	(1) PA_I_20	167
	(2) PA_I_20	148
	(3) PA_I_20	146

Slika 6.8 prikazuje dijagram sila – pomak za sva tri ispitna tijela oznake PA_II_20, odnosno ispitna tijela koja su od poliamidnog osnovnog materijala (PA), ali ovog puta lijepljena dvokomponentnim (II) ljepljivom *Hysol 9464 A&B*, ispitivana također pri temperaturi 20 °C. I na ovom dijagramu se vidi poprilično jednako ponašanje lijepljenog spoja za sva tri ispitna tijela. U

jednom trenutku je lijepljeni spoj označen plavom krivuljom popustio, a onda je još neko vrijeme pružao otpor opterećenju dok nije došlo do loma.



Slika 6.8. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PA_II_20

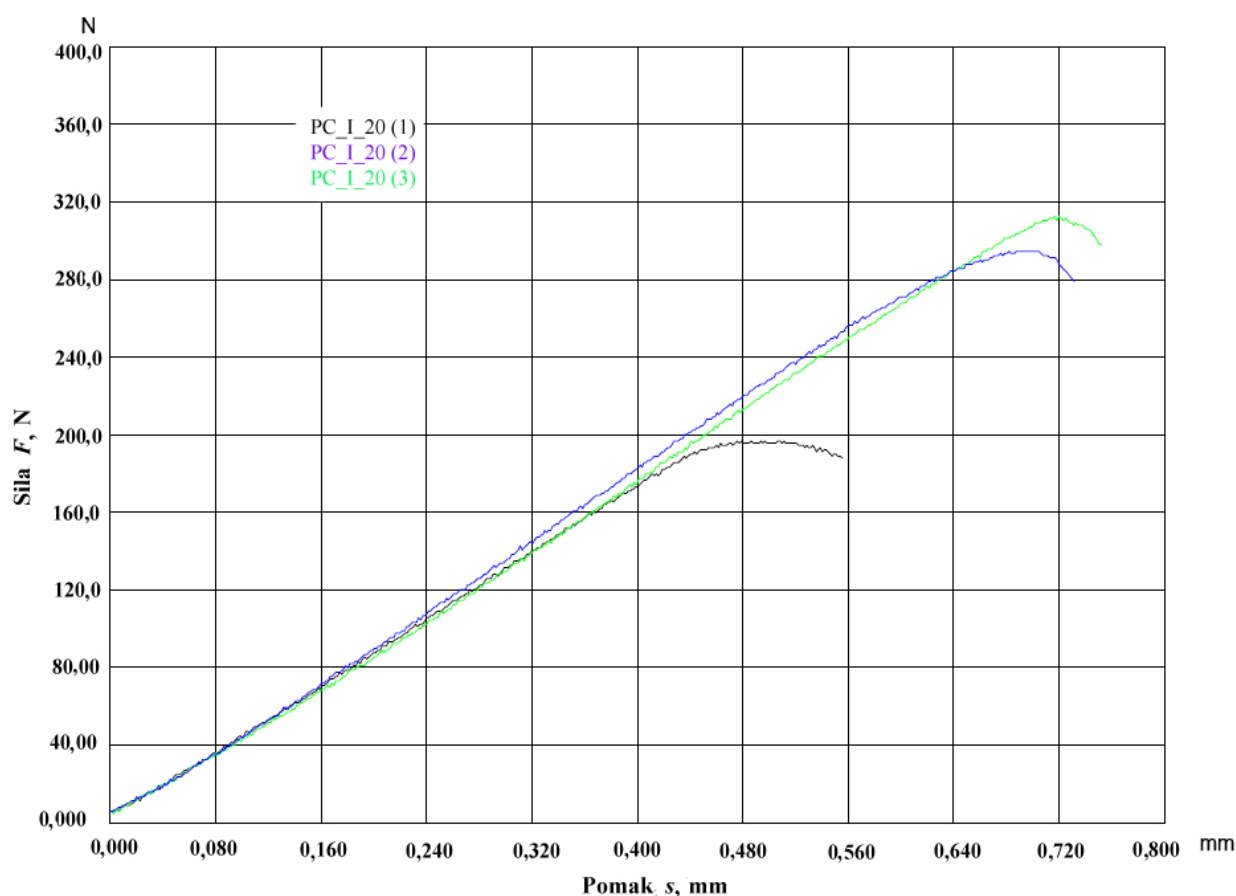
Tablica 6.7 prikazuje rezultate za poliamidna ispitna tijela lijepljena dvokomponentnim ljepilom.

Tablica 6.7. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_20

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	(1) PA_II_20	98
	(2) PA_II_20	125
	(3) PA_II_20	157

Slika 6.9 prikazuje dijagram sila – pomak za sva tri ispitna tijela oznake PC_I_20, što znači da je osnovni materijal za lijepljenje polikarbonat (PC), ljepilo koje je korišteno je jednokomponentno (*Terostat 9220*), a ispitivanja su provedena pri temperturi od 20 °C. Iz dijagrama se može vidjeti da se nagibi krivulja gotovo u potpunosti poklapaju u elastičnom području za sva tri ispitna tijela. Lijepljeni spojevi koje predstavljaju zelena i plava krivulja na dijagramu imaju gotovo jednaku prekidnu silu, dok je lijepljeni spoj trećeg ispitnog tijela popustio pri dosta nižoj sili, što

se može objasniti slabijom pripremom površine ili uključinom zraka koja je smanjila čvrstoću lijepljenog spoja.



Slika 6.9. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PC_I_20

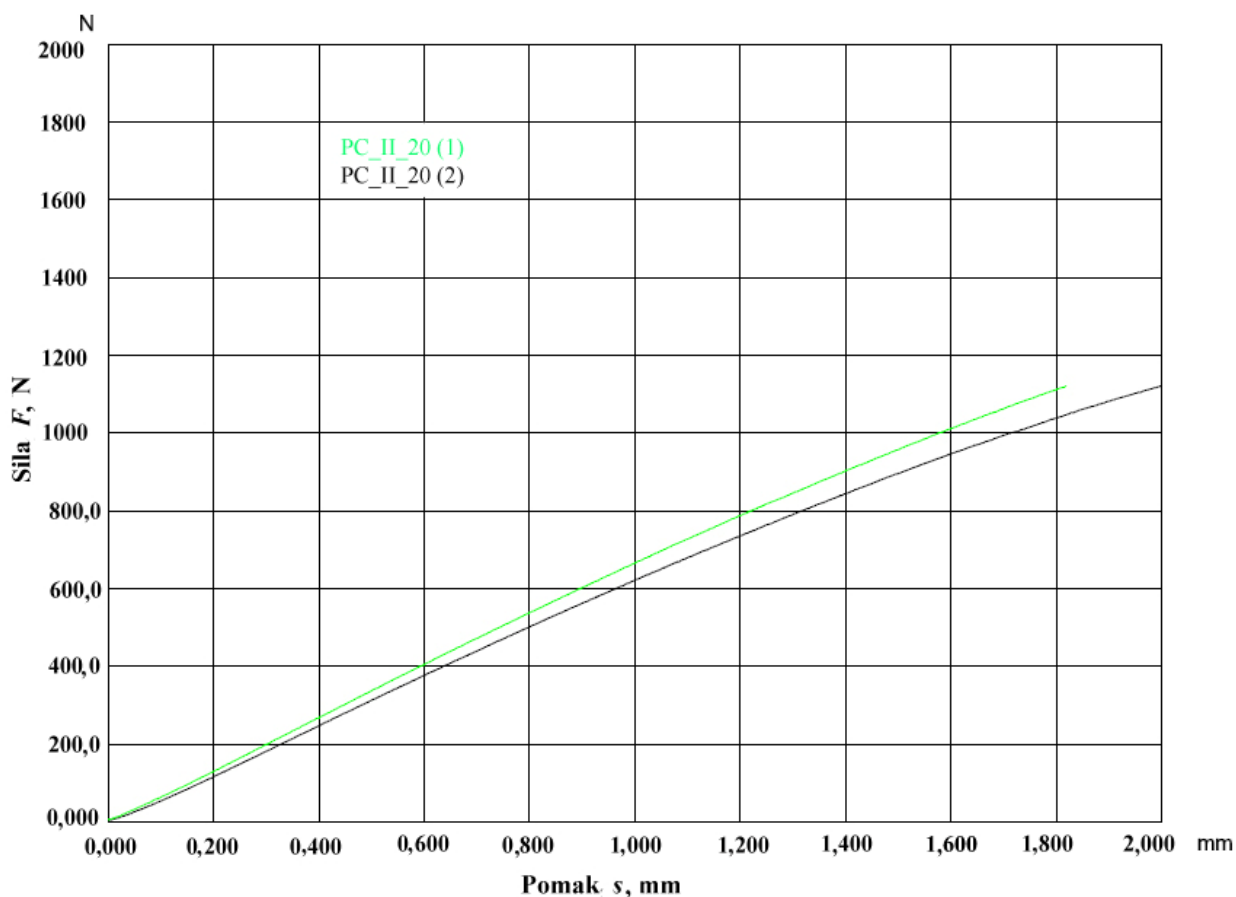
Tablica 6.8 prikazuje rezultate mjerenja za ispitna tijela čiji je osnovni materijal polikarbonat, a ljepilo kojim su lijepljeni jednokomponentno. Ispitna tijela (2) i (3) imaju gotovo jednaku prekidnu silu, dok je ispitno tijelo (1) imalo nešto nižu prekidnu silu, što se može objasniti uključinom zraka koja je pronađena u sloju ljepila, čime je smanjena čvrstoća lijepljenog spoja.

Tablica 6.8. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_20

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	(1) PC_I_20	197
	(2) PC_I_20	295
	(3) PC_I_20	311

Slika 6.10 prikazuje dijagram sila – pomak za dva ispitna tijela oznake PC_II_20. Osnovni materijal za lijepljenje je polikarbonat (PC), upotrijebljeno ljepilo je dvokomponentno Hysol 9464 A&B, a ispitivanja su provedena pri temperturi od 20 °C. Krivulja za treće ispitno

tijelo nije prikazana jer je ispitno tijelo prilikom ispitivanja iskliznulo iz hvataljke. Preostale dvije krivulje imaju jednaku karakteristiku i odstupanja su zanemariva.



Slika 6.10. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PC_II_20

Tablica 6.9 prikazuje rezultate ispitivanja za navedena ispitna tijela. Treba primijetiti kako je prekidna sila ovih dvaju ispitnih tijela izrazito visoka u odnosu na prethodna ispitna tijela, što navodi na zaključak da je ovo optimalna kombinacija osnovnog materijala i ljepljiva.

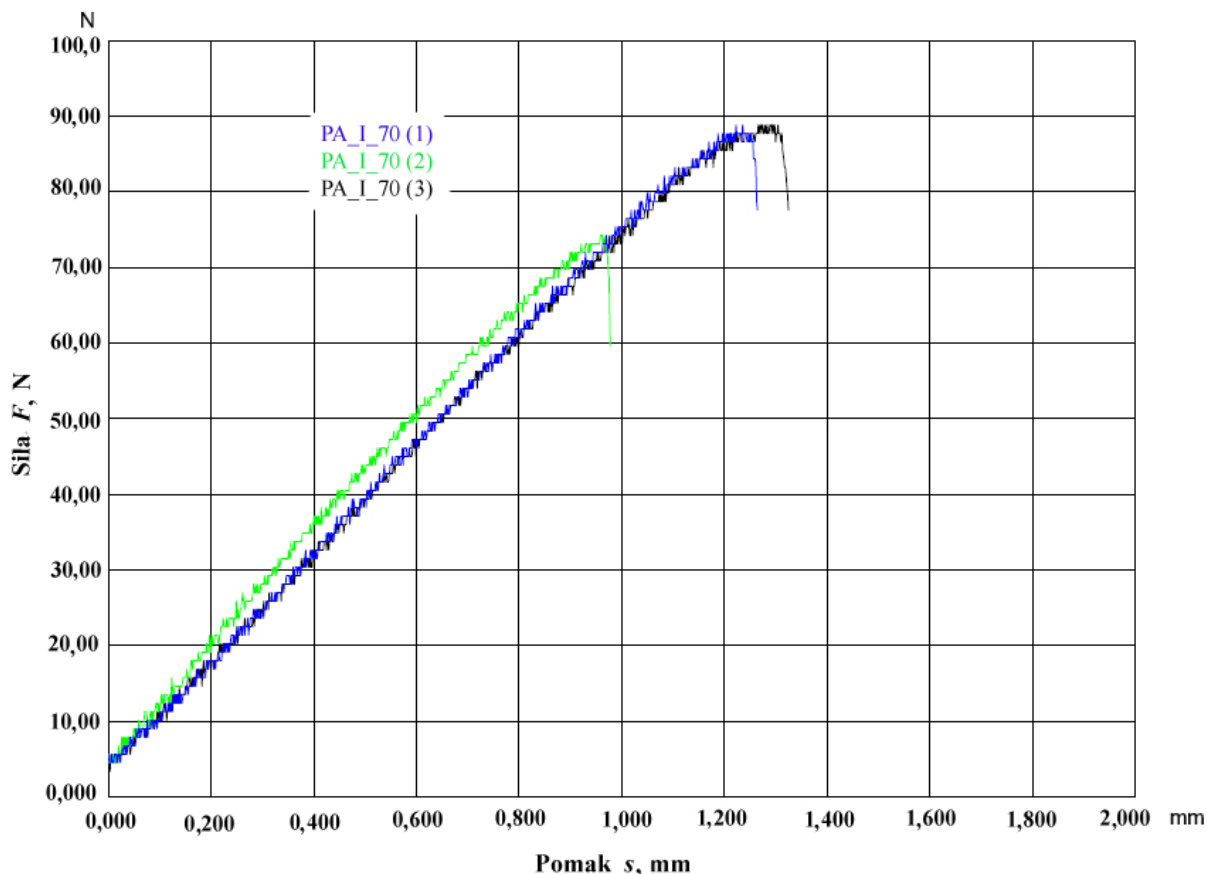
Tablica 6.9. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_20

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	(1) PC_II_20	1126
	(2) PC_II_20	1121

6.4.2. Povišena temperatura (70 °C)

Slika 6.11 prikazuje dijagram sila – pomak za poliamidna ispitna tijela lijepljena jednokomponentnim ljepljivom i ispitivana pri temperaturi 70 °C. Može se vidjeti da su krivulje

koje opisuju tijek procesa kidanja nešto položnije, odnosno da je lijepljeni spoj pri povišenoj temperaturi popustio pri nižoj prekidnoj sili, a da je u isto vrijeme pokazao veću elastičnost nego pri sobnoj temperaturi.



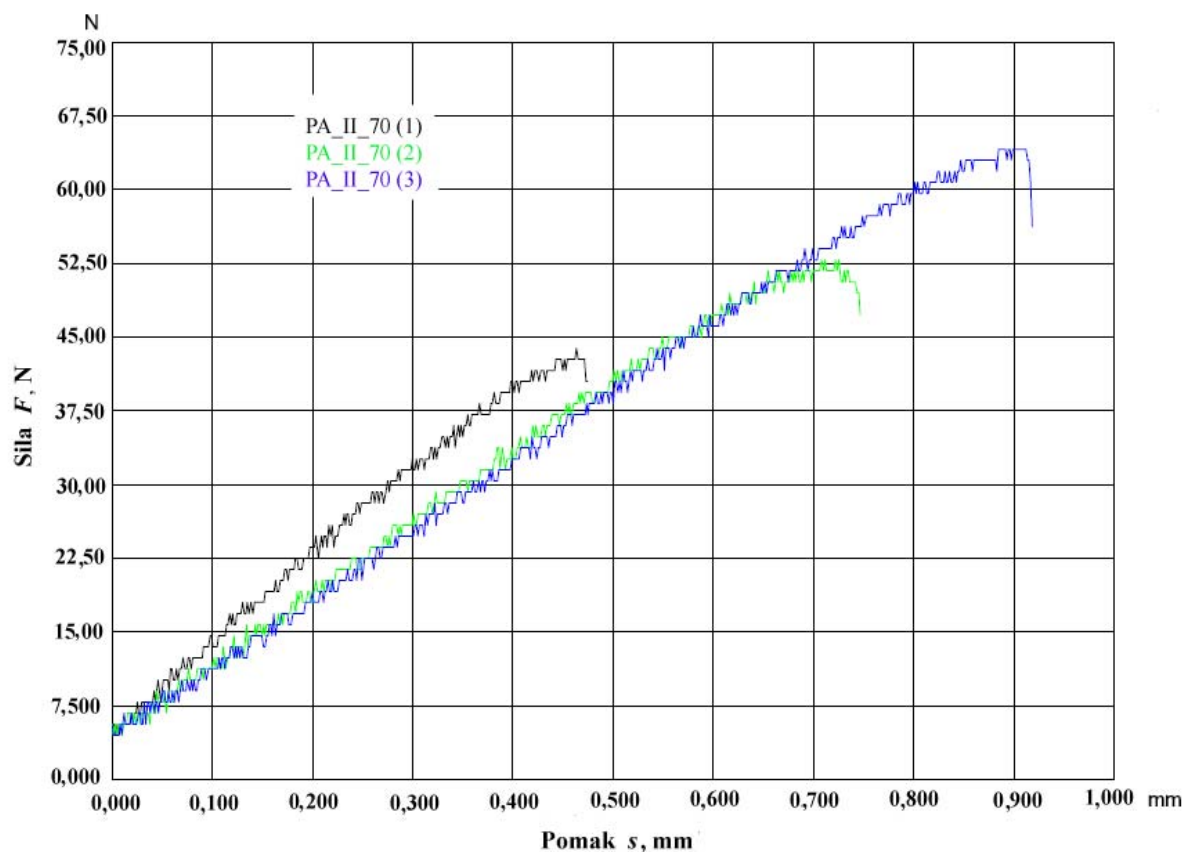
Slika 6.11. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PA_I_70

Tablica 6.10 prikazuje prekidne sile za ovaj slučaj.

Tablica 6.10. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_70

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	(1) PA_I_70	89
	(2) PA_I_70	74
	(3) PA_I_70	89

Slika 6.12 prikazuje svojstva lijepljenog spoja sastavljenog od poliamidnog osnovnog materijla i dvokomponentnog ljepila *Hysol 9464 A&B*, pri temperaturi od 70 °C.



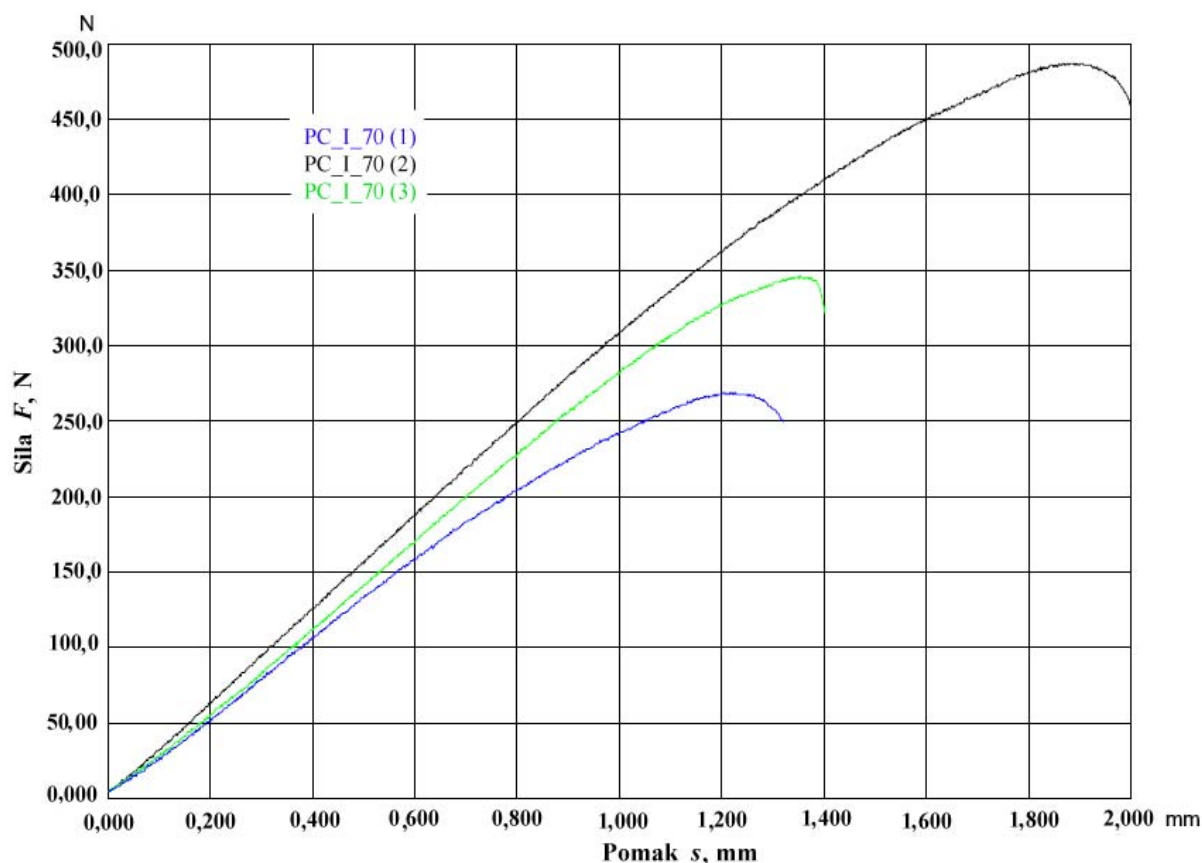
Slika 6.12. Dijagram *sila – pomak* za ispitno tijelo PA_II_70

Tablica 6.11 prikazuje vrijednosti prekidne sile za ovaj lijepljeni spoj. I za ovu kombinaciju osnovnog materijala i ljepila vrijednosti prekidne sile pri povišenoj temperaturi su niže od onih na sobnoj temperaturi, dok je pomak, odnosno istezanje izraženije, što ukazuje na to da je elastičnost lijepljenog spoja pri povišenoj temperaturi izraženija.

Tablica 6.11. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_70

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	(1) PA_II_70	98
	(2) PA_II_70	125
	(3) PA_II_70	157

Slika 6.13 prikazuje dijagram *sila – pomak* za lijepljeni spoj ispitivan pri povišenoj temperaturi, čiji je osnovni materijal poliakarbonat (PC), a ljepilo jednokomponentno.



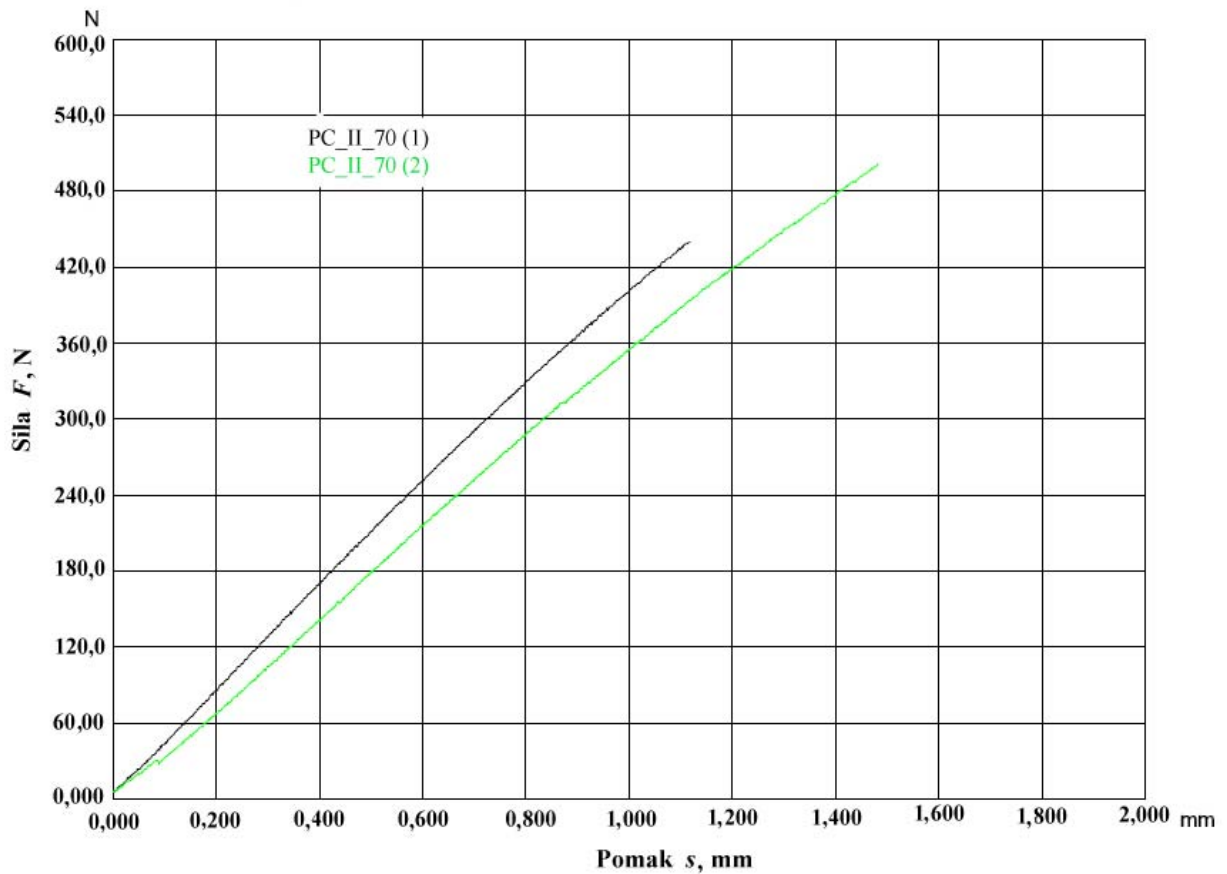
Slika 6.13. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PC_I_70

Tablica 6.12 prikazuje prekidnu silu lijepljenih spojeva za ovaj slučaj. Ova kombinacija osnovnog materijala i ljepila ne slijedi pravilo da je prekidna sila lijepljenog spoja pri povišenoj temperaturi veća, nego ima sasvim suprotno ponašanje. Kod ovog lijepljenog spoja, kod kojeg je osnovni materijal polikarbonat, a ljepilo jednokomponentno, prekidne sile su veće nego one pri sobnoj temperaturi, ali je i istežanje mnogo veće.

Tablica 6.12. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_70

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	(1) PC_I_70	269
	(2) PC_I_70	485
	(3) PC_I_70	345

Slika 6.14 prikazuje dijagram sila-pomak za lijepljeni spoj čiji je osnovni materijal polikarbonat, a ljepilo kojim je osnovni materijal zalijepljen je dvokomponentno ljepilo *Hysol 9464 A&B*.



Slika 6.14. Dijagram sila – pomak za ispitno tijelo PC_II_70

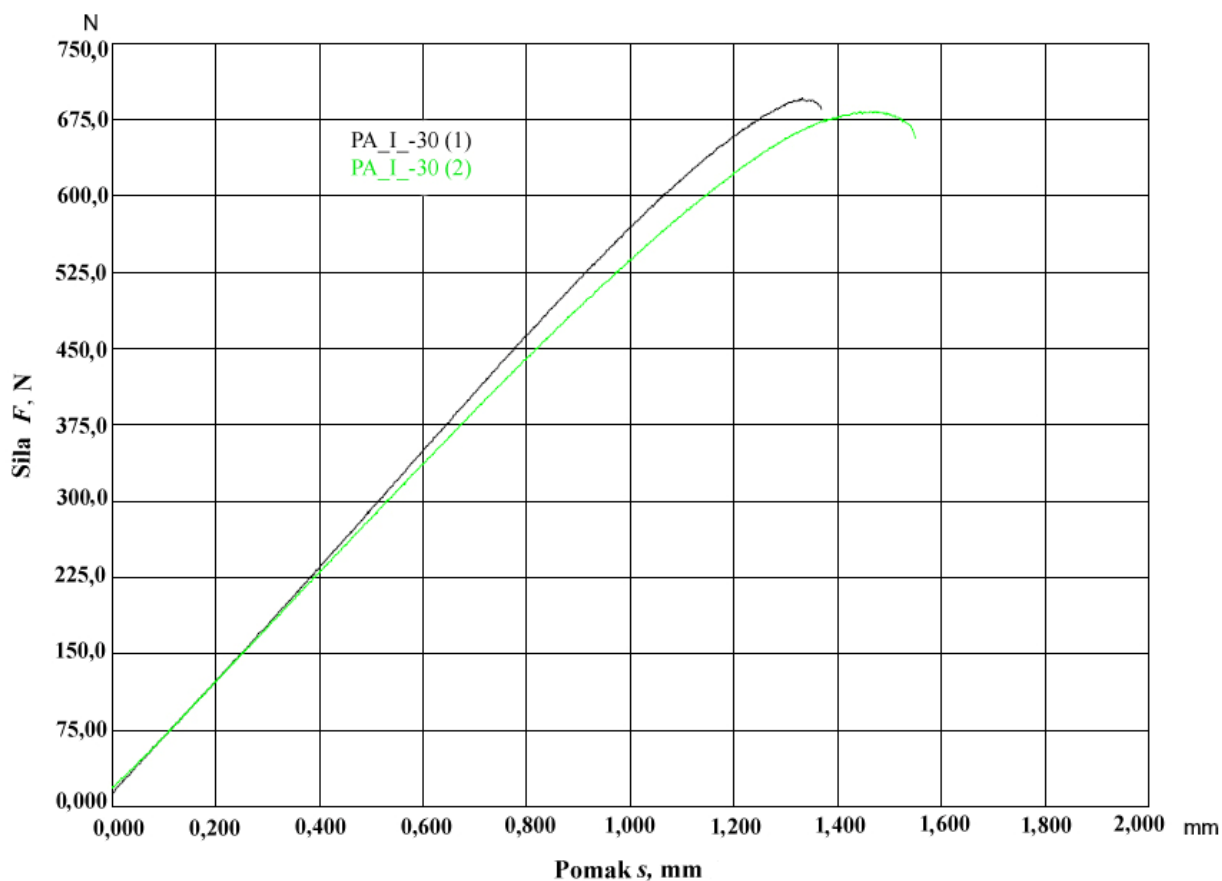
Tablica 6.13 prikazuje vrijednosti prekidne sile ispitnih tijela za gore navedenu kombinaciju osnovnog materijala i ljepila, pri povišenoj temperaturi. Kao i u prethodnom slučaju, gdje je nedostajao rezultat za jedno ispitno tijelo, riječ je o tome da je ispitno tijelo u tijeku ispitivanja iskliznulo iz hvataljke pa rezultat nije valjan, a zbog oštećenosti ispitnog tijela ispitivnje nije bilo moguće ponoviti.

Tablica 6.13. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_70

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	(1) PC_II_70	439
	(2) PC_II_70	501

6.4.3. Snižena temperatura ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Slika 6.15 prikazuje dijagram *sila – pomak* za poliamidna ispitna tijela lijepljena jednokomponentnim ljepilom i ispitivana pri temperaturi od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Može se vidjeti da su prekidne sile gotovo identične, a i karakteristike krivulje za ova dva ispitna tijela su veoma slične.



Slika 6.15. Dijagram *sila – pomak* za ispitno tijelo PA_I_-30

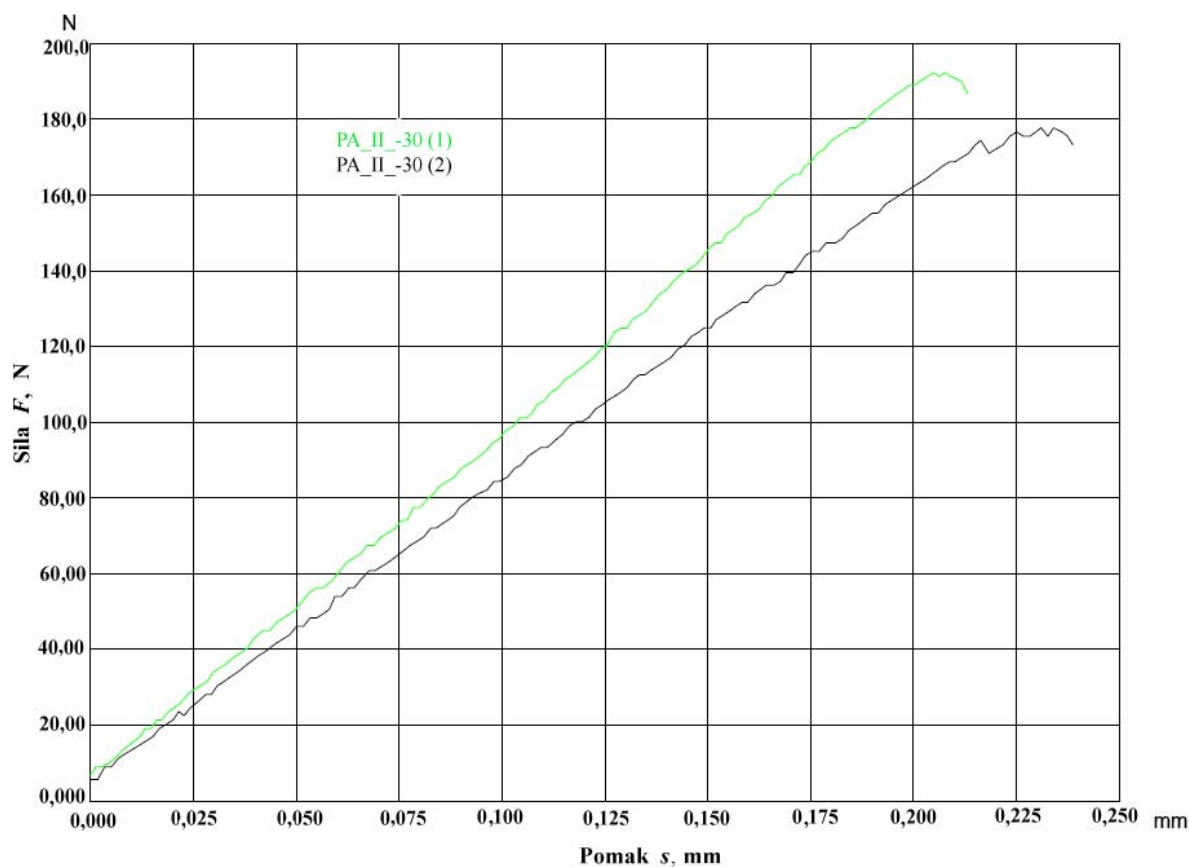
Tablica 6.14 prikazuje rezultate prekidne sile za ova ispitna tijela.

Tablica 6.14. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_I_-30

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	(1) PA_I_-30	696
	(2) PA_I_-30	679

Slika 6.16 prikazuje dijagram *sila-pomak* za lijepljeni spoj čiji je osnovni materijal poliamid, a ljepilo kojim je osnovni materijal zalijepljen je dvokomponentno ljepilo *Hysol 9464 A&B*. U

odnosu na sobnu temperturu, temperatura od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ daje mnogo veću prekidnu silu lijepljenog spoja i manje istežanje.



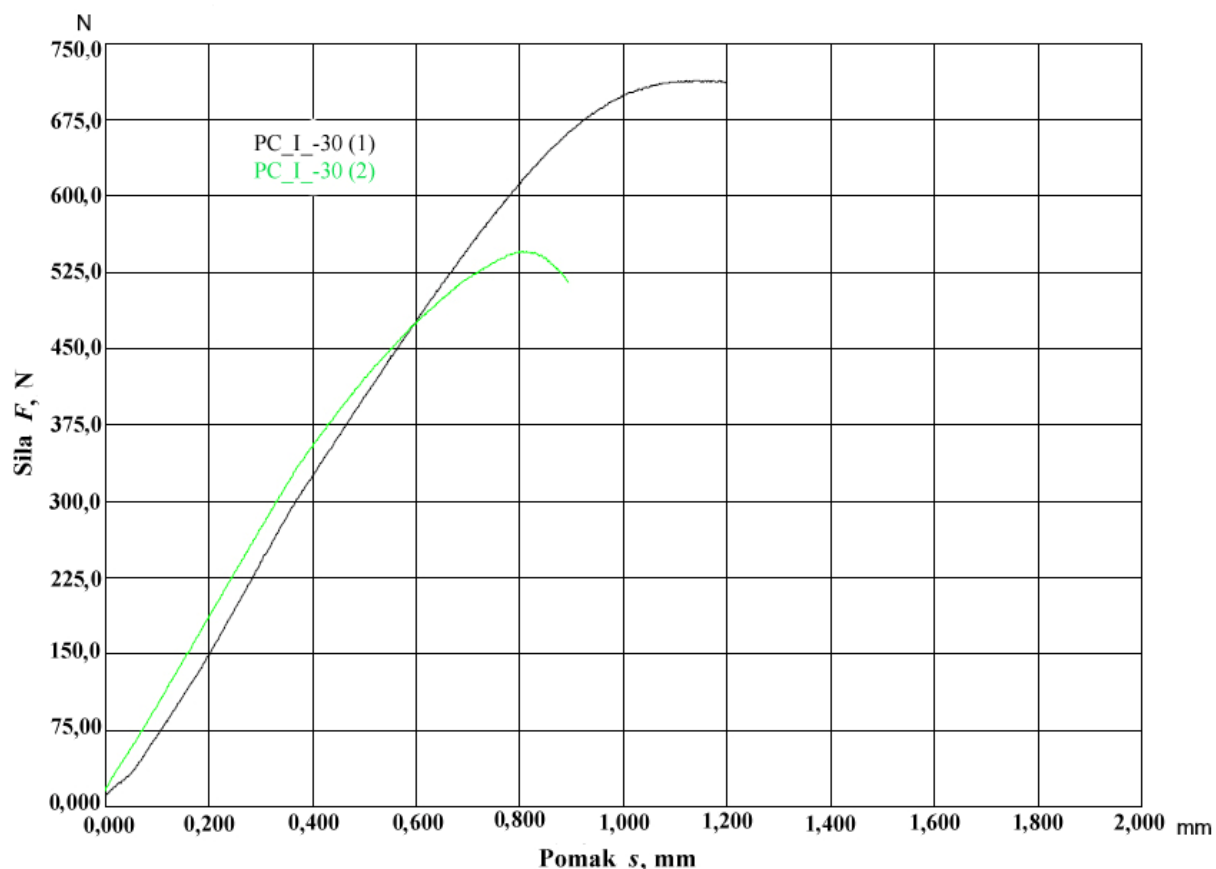
Slika 6.16. Dijagram *sila – pomak* za ispitno tijelo PA_II_-30

Tablica 6.15 prikazuje rezultate prekidne sile za lijepljeni spoj čiji je osnovni materijal poliamid, a ljepilo dvokomponentno.

Tablica 6.15. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PA_II_-30

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	(1) PA_II_-30	192
	(2) PA_II_-30	178

Slika 6.17 prikazuje dijagram *sila - pomak* za lijepljeni spoj ispitivan pri temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, čiji je osnovni materijal polikarbonat, a ljepilo jednokomponentno.



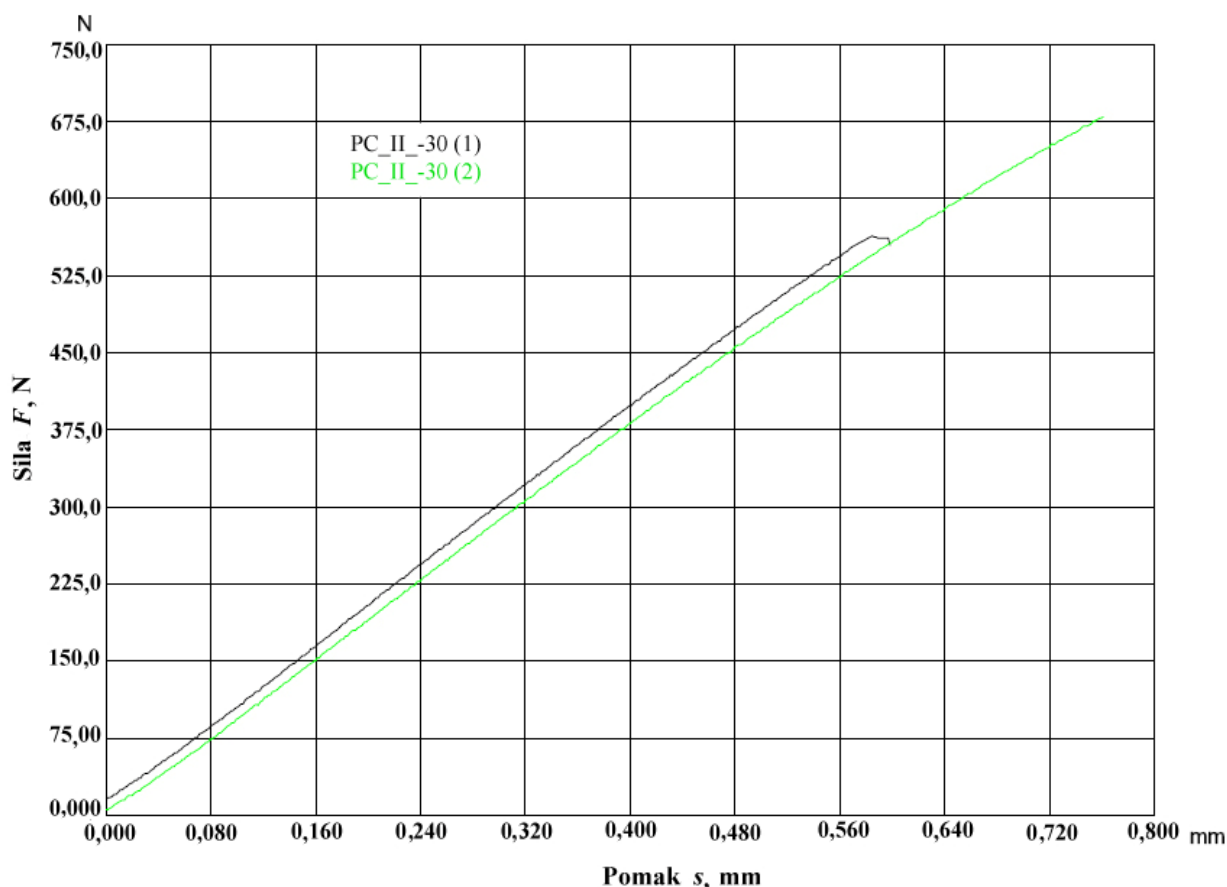
Slika 6.17. Dijagram *sila - pomak* za ispitno tijelo PC_I_-30

Tablica 6.16 prikazuje rezultate prekidne sile za ovaj lijepljeni spoj.

Tablica 6.16. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_I_-30

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	(1) PC_I_-30	713
	(2) PC_I_-30	542

Slika 6.18 prikazuje dijagram *sila - pomak* za lijepljeni spoj čiji je osnovni materijal polikarbonat, a ljepilo kojim je osnovni materijal zalijepljen je dvokomponentno ljepilo *Hysol 9464 A&B*. U odnosu na sobnu temperturu, temperatura od -30 °C daje mnogo nižu prekidnu silu lijepljenog spoja i manje istežanje, što nije slučaj kod ostalih kombinacija osnovnog materijala i ljepila.



Slika 6.18. Dijagram *sila – pomak* za ispitno tijelo PC_II_-30

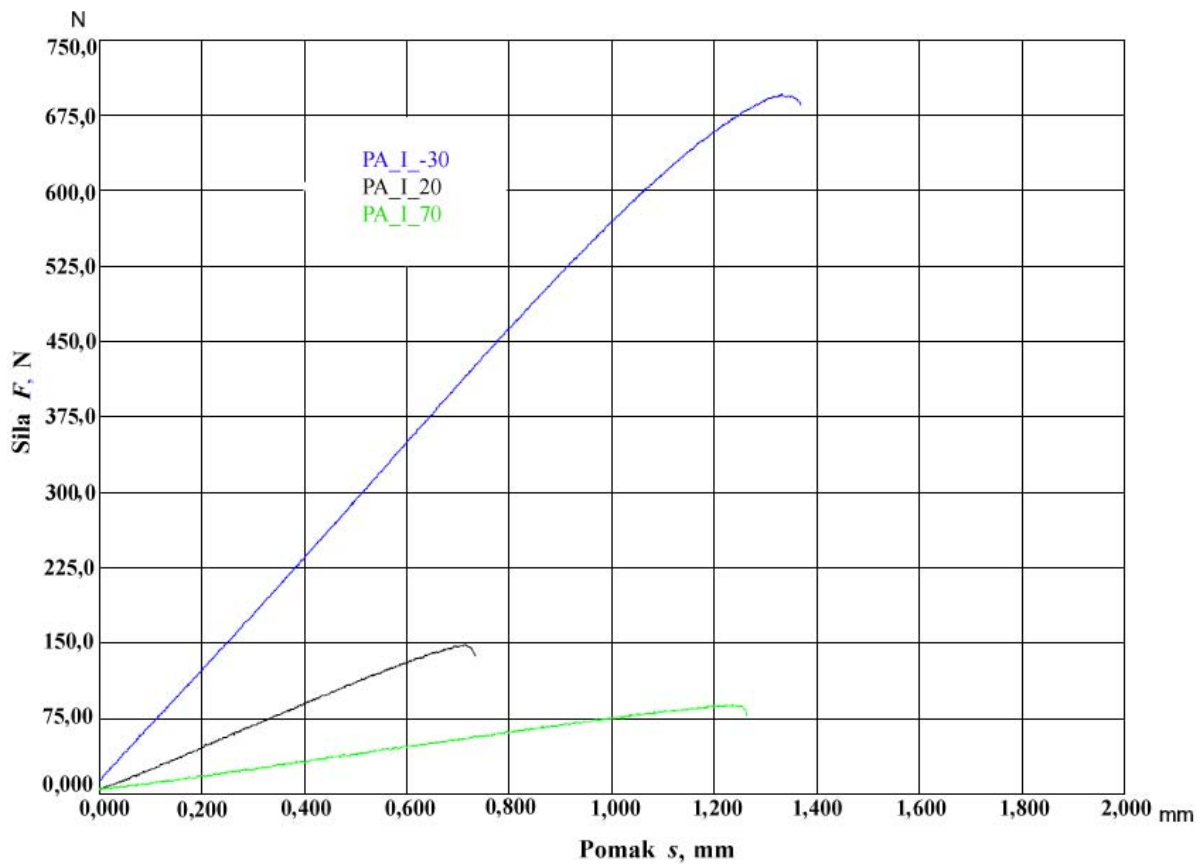
Tablica 6.17 prikazuje rezultate prekidne sile za ispitno tijelo PC_II_-30.

Tablica 6.17. Rezultati mjerenja prekidne sile za ispitna tijela PC_II_-30

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	(1) PC_II_-30	564
	(2) PC_II_-30	679

6.5. Analiza i usporedba rezultata

Slika 6.19 prikazuje usporedbu dijagrama *sila-pomak* za poliamidna ispitna tijela sa jednodimenzionalnim ljepljivim spojem pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Crna krivulja predstavlja sobnu temperaturu, plava sniženu, a zelena povišenu temperaturu. Vidljivo je da ovakav ljepljeni spoj na povišenoj temperaturi ima veću elastičnost od onog na sobnoj temperaturi. Zanimljivo je da je pri temperaturi od -30 °C ovaj ljepljeni spoj prije loma imao veće istežanje nego pri sobnoj temperaturi.



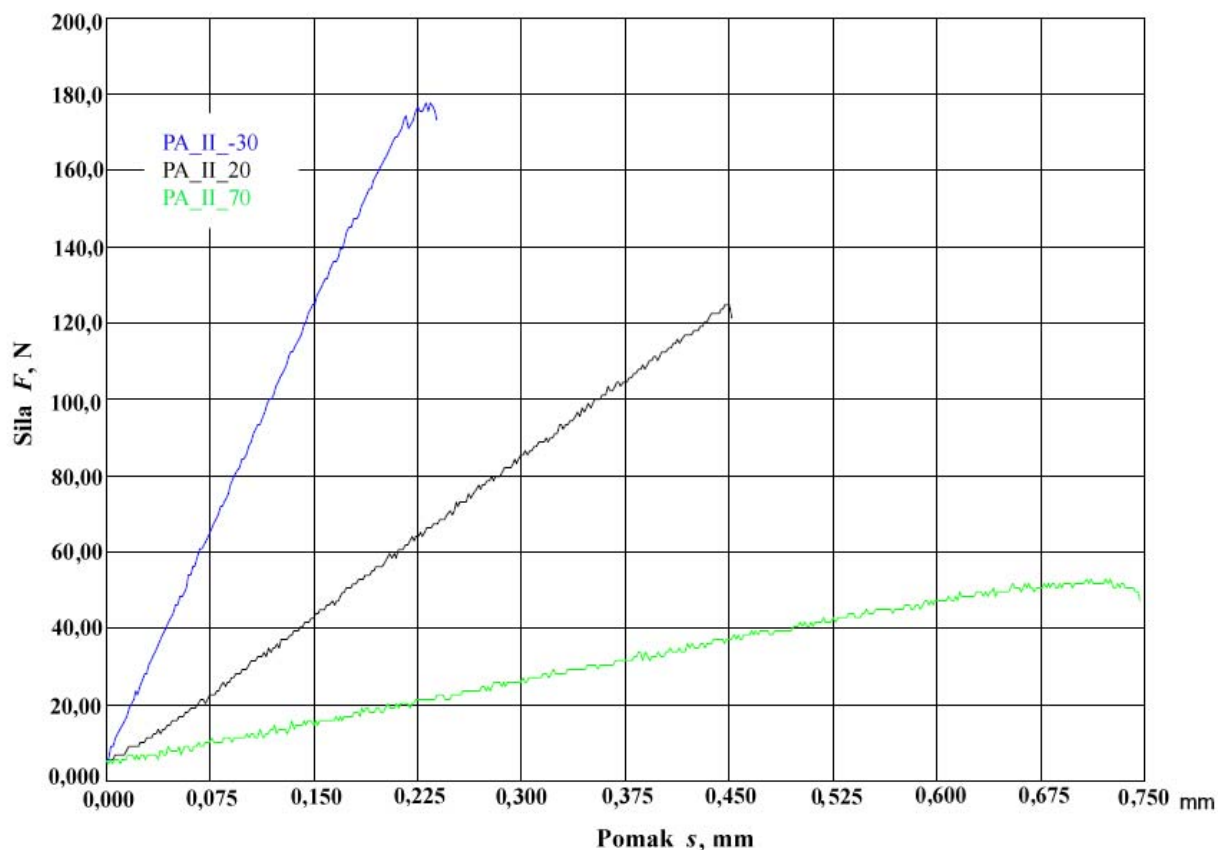
Slika 6.19. Dijagram *sila - pomak* za PA_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Tablica 6.18 prikazuje prekidne sile lijepljenog spoja PA_I na sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Najvišu prekidnu silu lijepljeni je spoj pokazao pri temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, a najnižu prekidnu silu pri povišenoj temperaturi od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tablica 6.18. Prekidna sila ispitnog tijela PA_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Ispitno tijelo	Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Prekidna sila F [N]
PA_I	-30	688
	20	154
	70	84

Slika 6.20 prikazuje usporedbu dijagrama *sila - pomak* za poliamidna ispitna tijela sa dvokomponentnim ljepilom pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Crna krivulja i ovdje predstavlja sobnu temperaturu, plava sniženu, a zelena povišenu temperaturu. Vidljivo je da i ovaj lijepljeni spoj pri povišenoj temperaturi ima veću elastičnost, a pri sniženoj temperaturi veću krtost od onog pri sobnoj temperaturi.



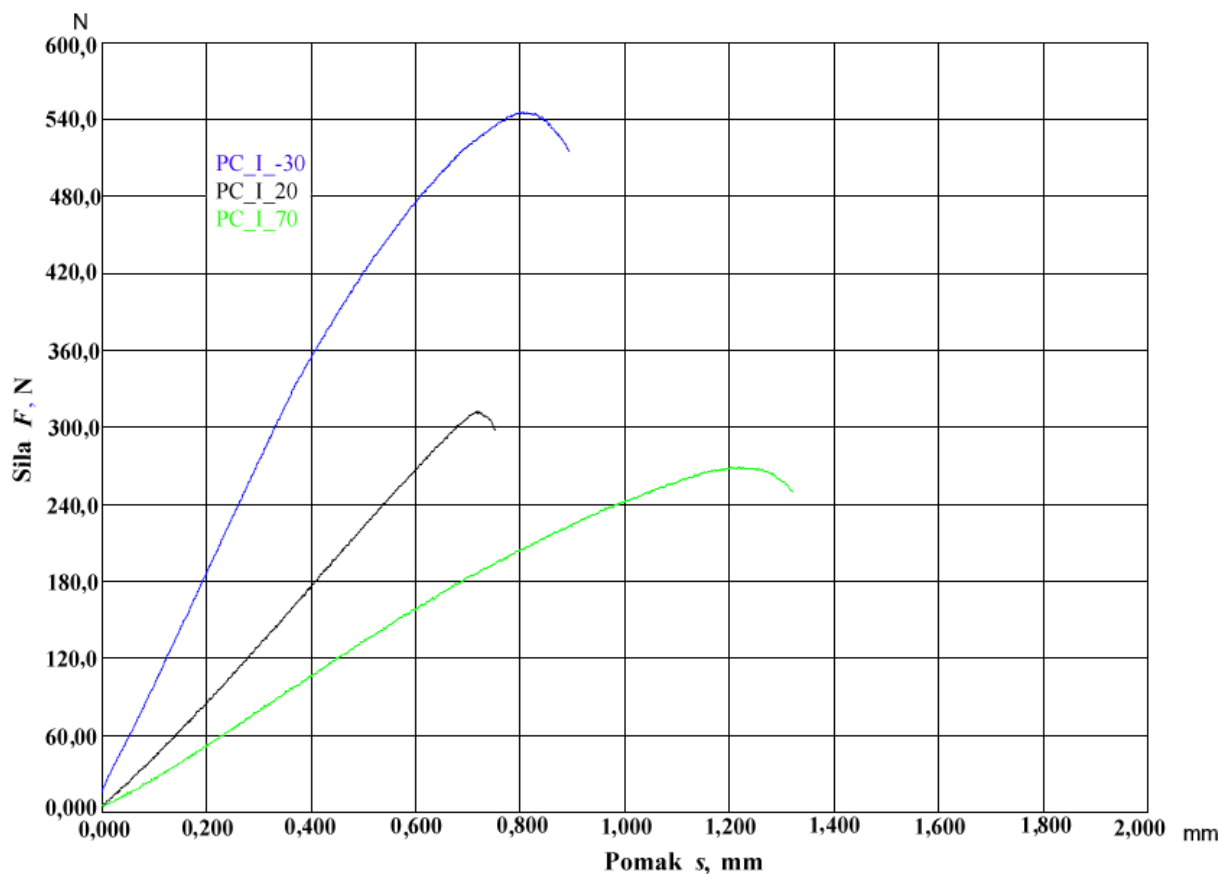
Slika 6.20. Usporedba rezultata za PA_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Tablica 6.19 prikazuje prekidne sile lijepljenog spoja PA_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Najvišu prekidnu silu ima lijepljeni spoj pri temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (178 N), a najnižu pri povišenoj temperaturi od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (54 N).

Tablica 6.19. Prekidna sila ispitnog tijela PA_II na sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Ispitno tijelo	Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Prekidna sila F [N]
PA_II	-30	178
	20	127
	70	54

Slika 6.21 prikazuje usporedbu dijagrama *sila - pomak* za polikarbontna ispitna tijela sa jednokomponentnim ljepilom pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Crna krivulja i ovdje predstavlja sobnu temperaturu, plava sniženu, a zelena povišenu temperaturu. Vidljivo je da i ovaj lijepljeni spoj pri povišenoj temperaturi ima veću elastičnost, a pri sniženoj temperaturi ipak pokazuje veće istežanje od onog pri sobnoj temperaturi.



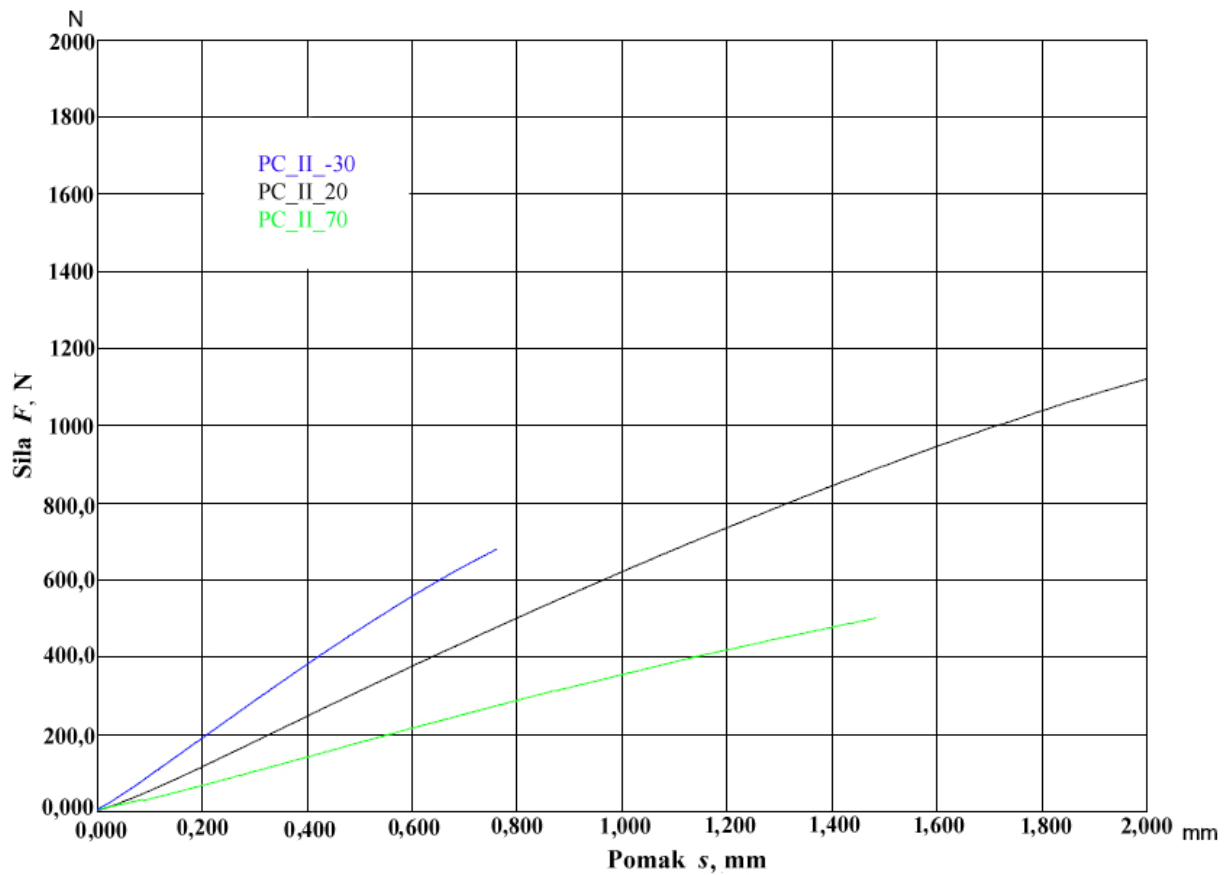
Slika 6.21. Usporedba rezultata za PC_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Tablica 6.20 prikazuje prekidne sile lijepljenog spoja PC_I na sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Najvišu prekidnu silu ima lijepljeni spoj pri temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (542 N), a najnižu pri povišenoj temperaturi od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (269 N).

Tablica 6.20. Prekidna sila ispitnog tijela PC_I pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Ispitno tijelo	Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Prekidna sila F [N]
PC_I	-30	542
	20	312
	70	269

Slika 6.22 prikazuje usporedbu dijagrama *sila - pomak* za polikarbonska ispitna tijela sa dvokomponentnim ljepilom pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Crna krivulja predstavlja sobnu temperaturu, plava sniženu temperaturu, a zelena povišenu temperaturu. Za ovaj lijepljeni spoj karakteristično je da najveću prekidnu silu (1121 N), ali i najveće istežanje ima pri sobnoj temperaturi.



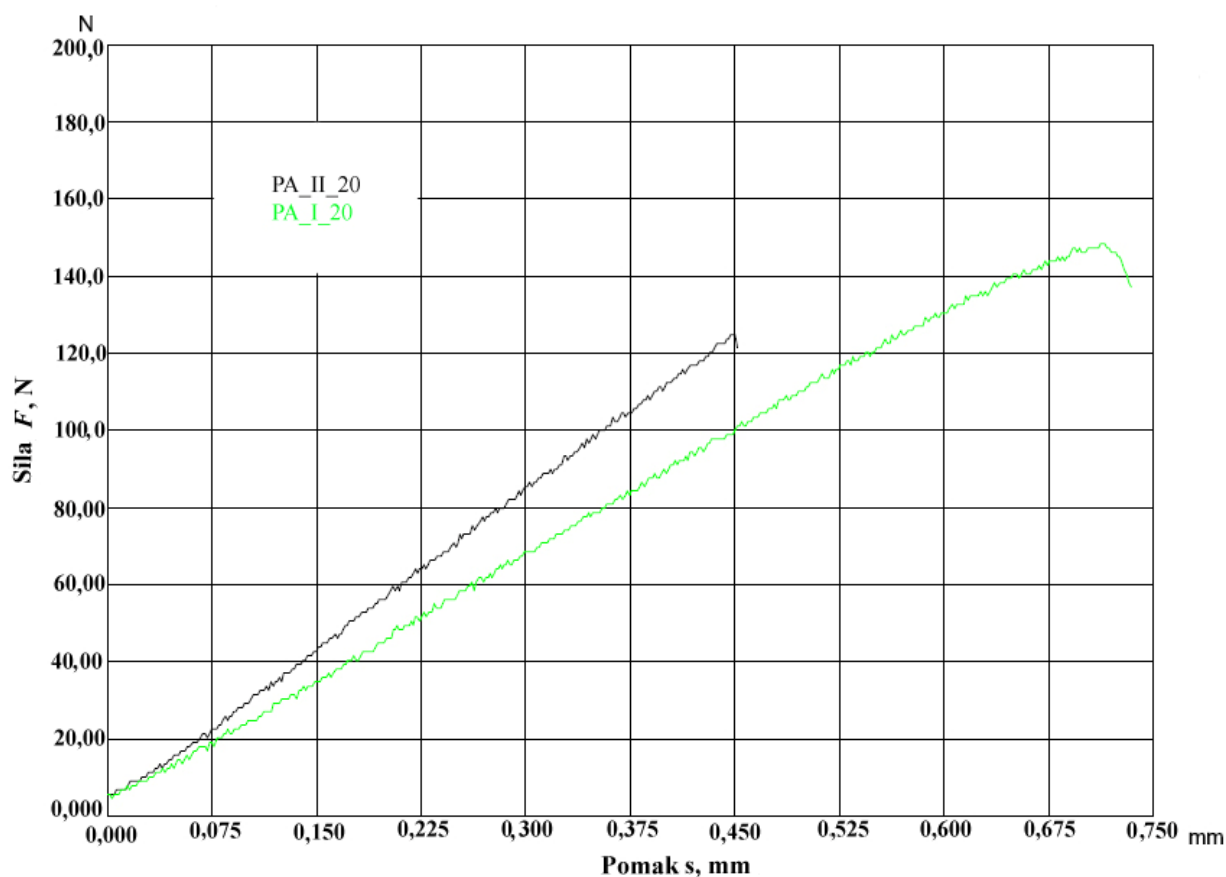
Slika 6.22. Usporedba rezultata za PC_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Tablica 6.21 prikazuje prekidne sile lijepljenog spoja PC_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi. Najvišu prekidnu silu ima lijepljeni spoj pri temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (542 N), a najnižu pri povišenoj temperaturi od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (269 N).

Tablica 6.21. Prekidna sila ispitnog tijela PC_II pri sobnoj, sniženoj i povišenoj temperaturi

Ispitno tijelo	Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Prekidna sila F [N]
PC_II	-30	679
	20	1121
	70	502

Slika 6.23 prikazuje usporedbu prekidne sile lijepljenih spojeva PA_I i PA_II pri sobnoj temperaturi. Prema ovim rezultatima, može se zaključiti da je za lijepljenje poliamida pri sobnoj temperaturi puno bolje jednokomponentno ljepilo. Tablica 6.22 to zorno prikazuje.

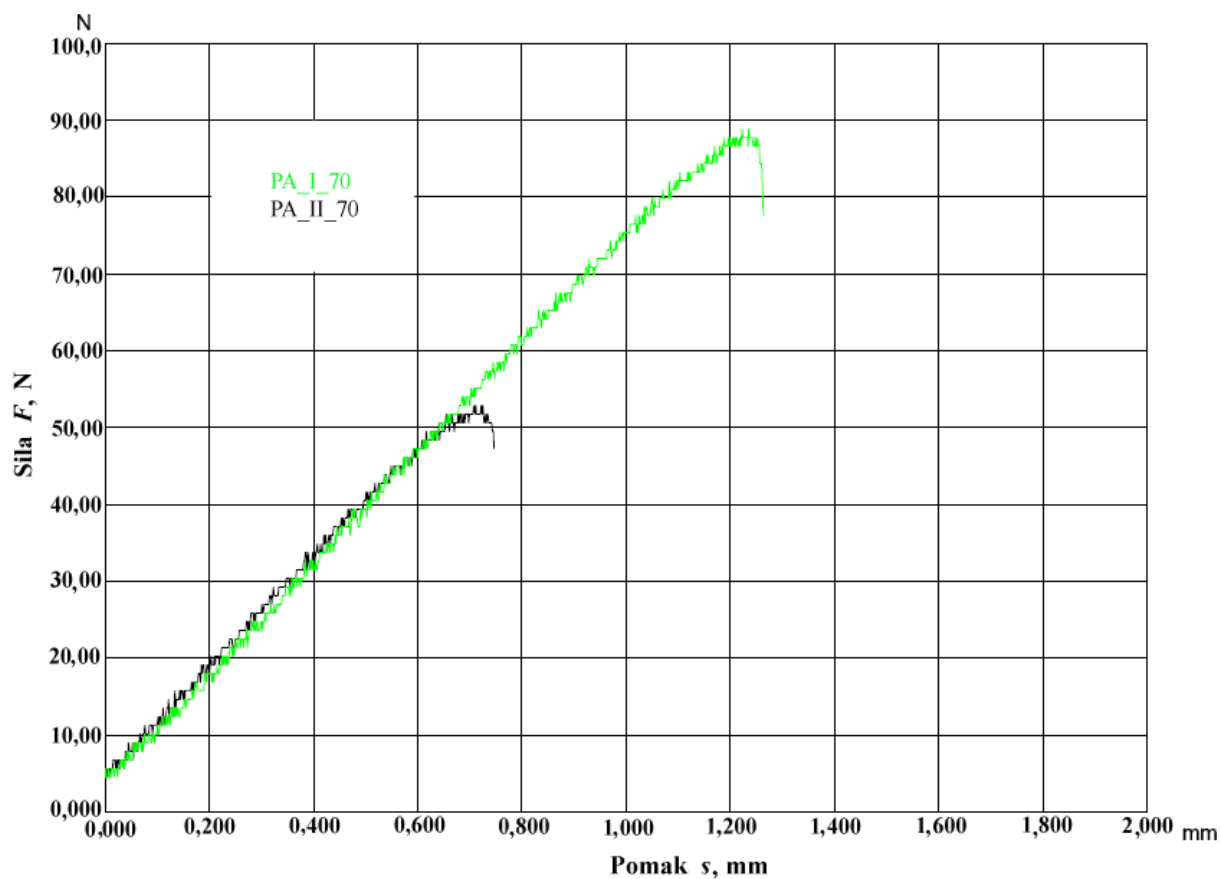


Slika 6.23. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri 20 °C

Tablica 6.22. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri 20 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	PA_I	148
	PA_II	125

Slika 6.24 pokazuje da se lijepljeni spoj, čiji je osnovni materijal poliamid, jednako ponaša pri povišenoj temperaturi, bez obzira na to je li ljepilo jednokomponentno ili dvokomponentno, ali je prekidna sila jednokomponentnog ljepila i ovdje mnogo veća, nego prekidna sila dvokomponentnog ljepila.

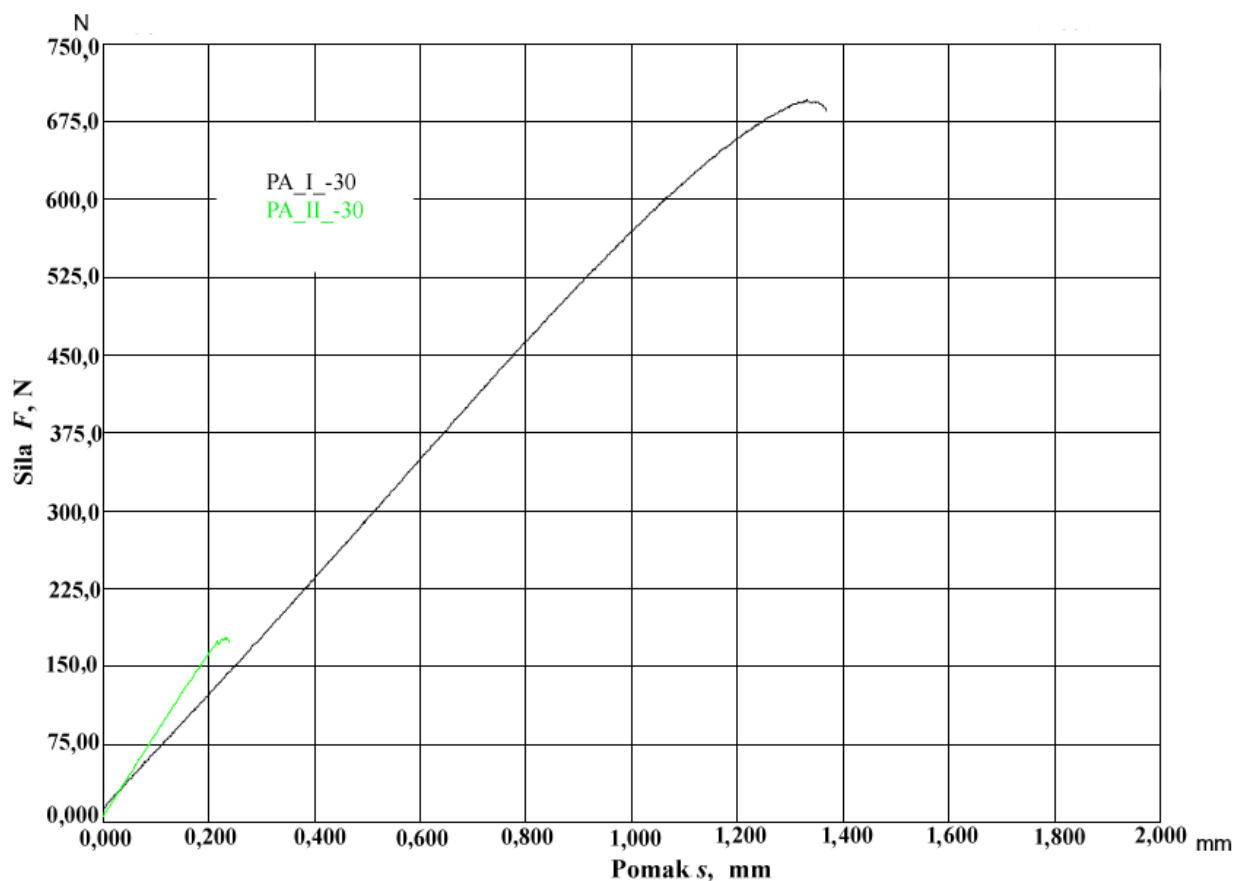


Slika 6.24. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri 70 °C

Tablica 6.23. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri 70 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	PA_I	89
	PA_II	53

I pri sniženoj temperaturi jednokomponentno ljepilo u kombinaciji sa poliamidnim osnovnim materijalom ima prednost u odnosu na dvokomponentno. Slika 6.25 prikazuje usporedbu rezultata za PA_I i PA_II na -30 °C, gdje crna krivulja predstavlja lijepljeni spoj sa jednokomponentnim ljepilom, a zelena krivulja spoj sa dvokomponentnim ljepilom.



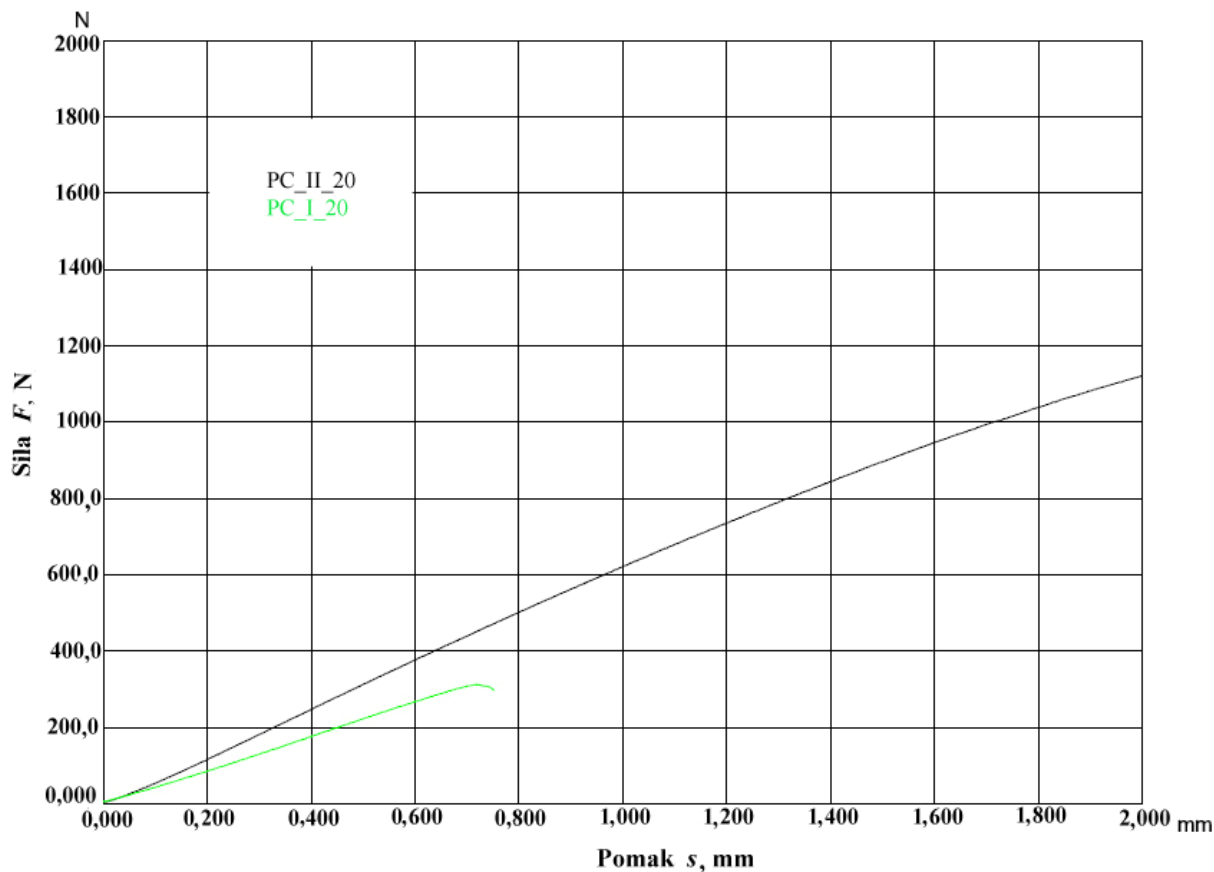
Slika 6.25. Usporedba rezultata za PA_I i PA_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 6.24. Prekidna sila za PA_I i PA_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	PA_I	696
	PA_II	192

Što se tiče lijepljenih spojeva čiji je osnovni materijal polikarbonat, odgovor na pitanje, je li bolje jednokomponentno ili dvokomponentno ljepilo i pri kojoj temperaturi, može se doznati iz dijagrama koji slijede.

Slika 6.26 prikazuje usporedbu rezultata za PC_I i PC_II pri $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iz slike je vidljivo da je za sobnu temperaturu puno bolja kombinacija dvokomponentnog ljepila i polikarbonata kao osnovnog materijala, nego kombinacija jednokomponentno ljepilo – polikarbonat.

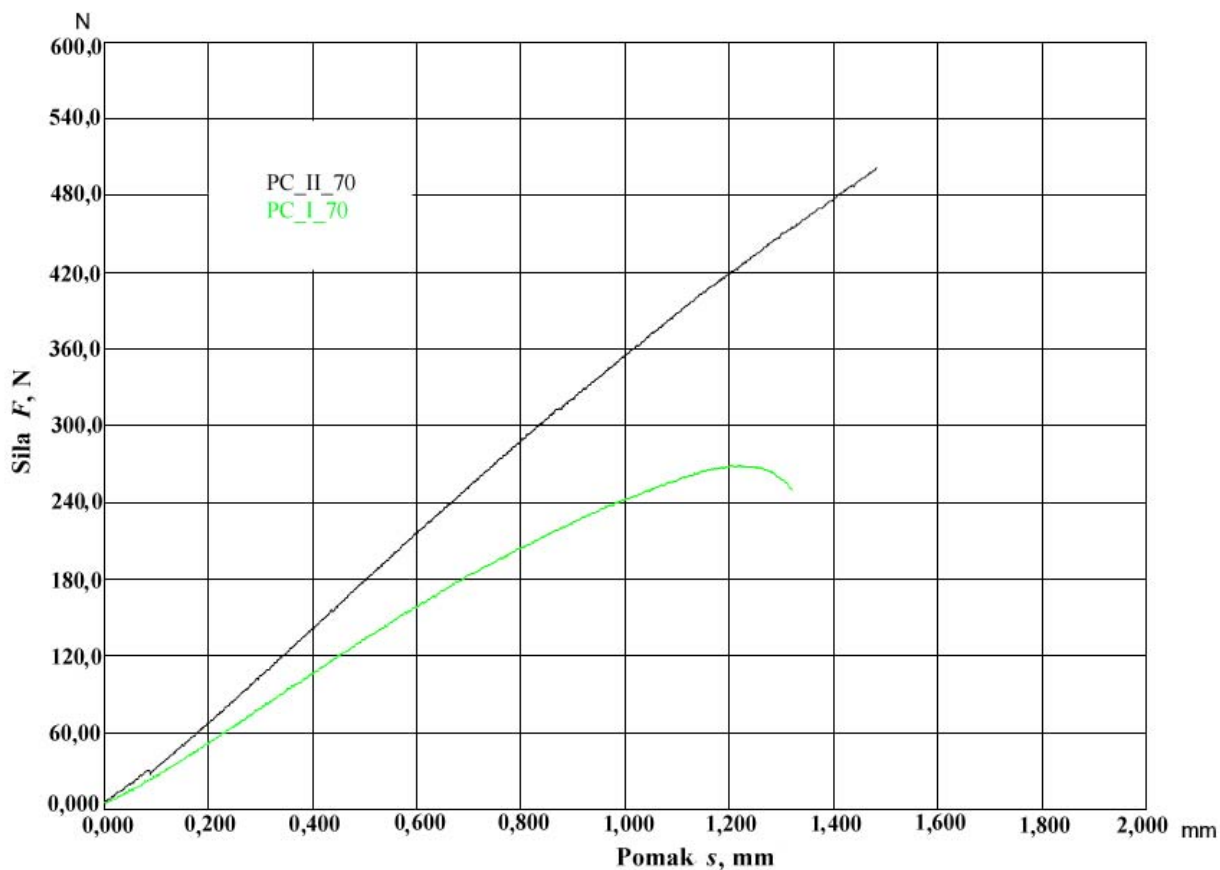


Slika 6.26. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri 20 °C

Tablica 6.25. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri 20 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	PC_I	312
	PC_II	1121

Povišena temperatura jednako utječe na lijepljeni spoj sa polikarbonatom kao i sobna temperatura. I ovdje je dvokomponentno ljepilo u prednosti nad jednokomponentnim. Slika 6.27 to prikazuje. Crna krivulja predstavlja lijepljeni spoj sa dvokomponentnim ljepilom, a zelena krivulja spoj sa jednokomponentnim ljepilom.

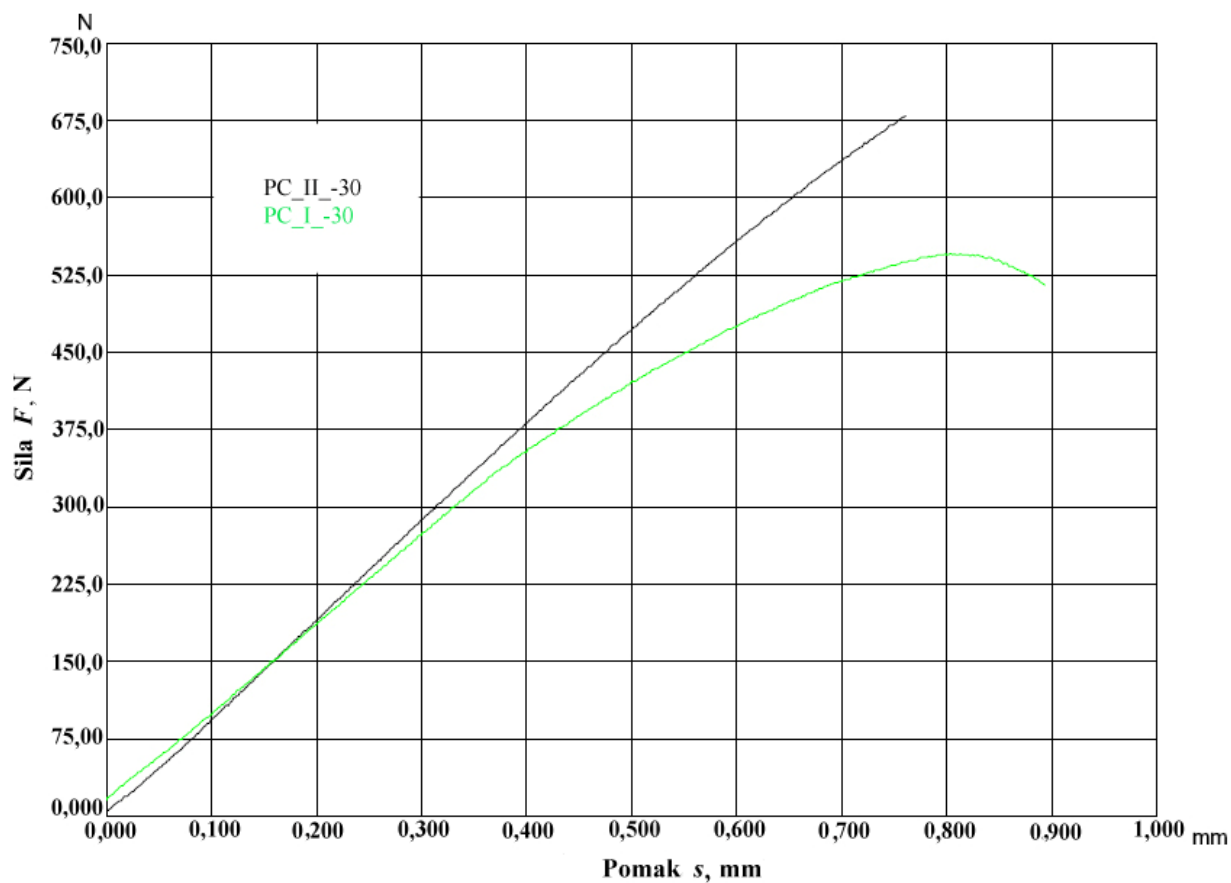


Slika 6.27. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri 70 °C

Tablica 6.26. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri 70 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	PC_I	268
	PC_II	502

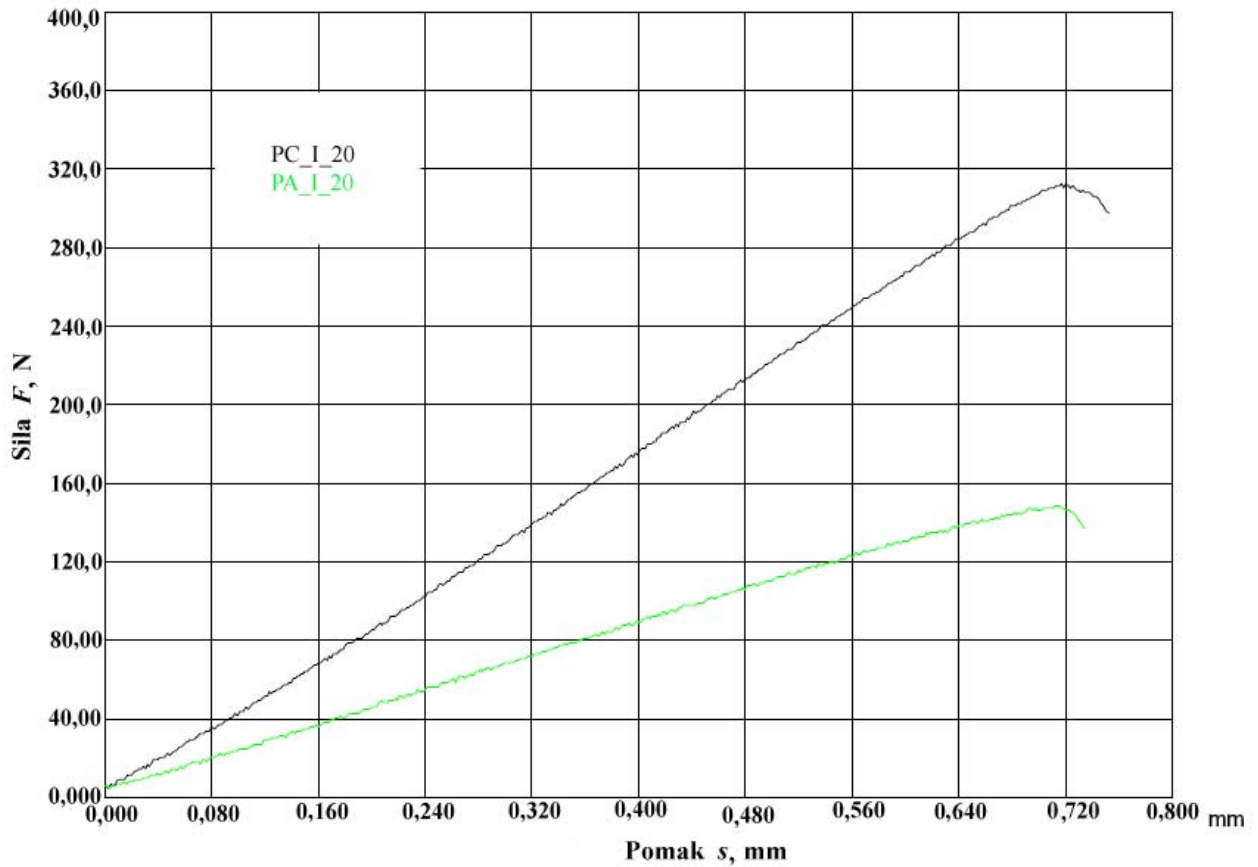
Pri sniženoj temperaturi jednokomponentno ljepilo u kombinaciji sa polikarbonatnim materijalom za lijepljenje daje lijepljeni spoj sa nešto većom elastičnošću, ali zato dvokomponentno ljepilo i ovdje ima veću prekidnu silu. Slika 6.28 prikazuje usporedbu prekidne sile za PC_I i PC_II pri -30 °C.



Slika 6.28. Usporedba rezultata za PC_I i PC_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 6.27. Prekidna sila za PC_I i PC_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	PC_I	542
	PC_II	679

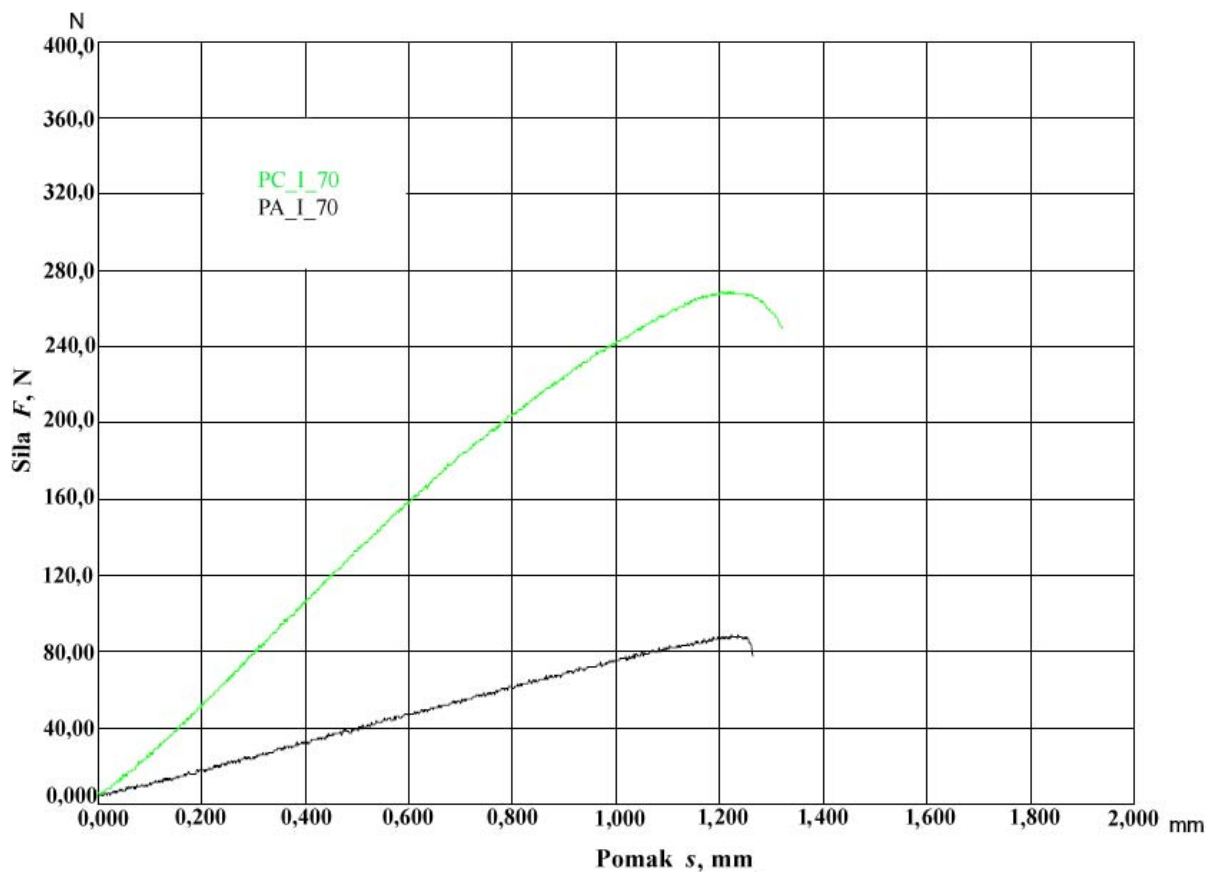


Slika 6.29. Dijagram sila - pomak za PA_I i PC_I pri 20 °C

Tablica 6.28. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri 20 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	PC_I	312
	PA_I	148

Slika 6.29 prikazuje koliko je veća prekidna sila pri sobnoj temperaturi lijepljenog spoja kojeg čine jednokomponentno ljepilo i polikarbonat od onog kojeg čine jednokomponentno ljepilo i poliamid.

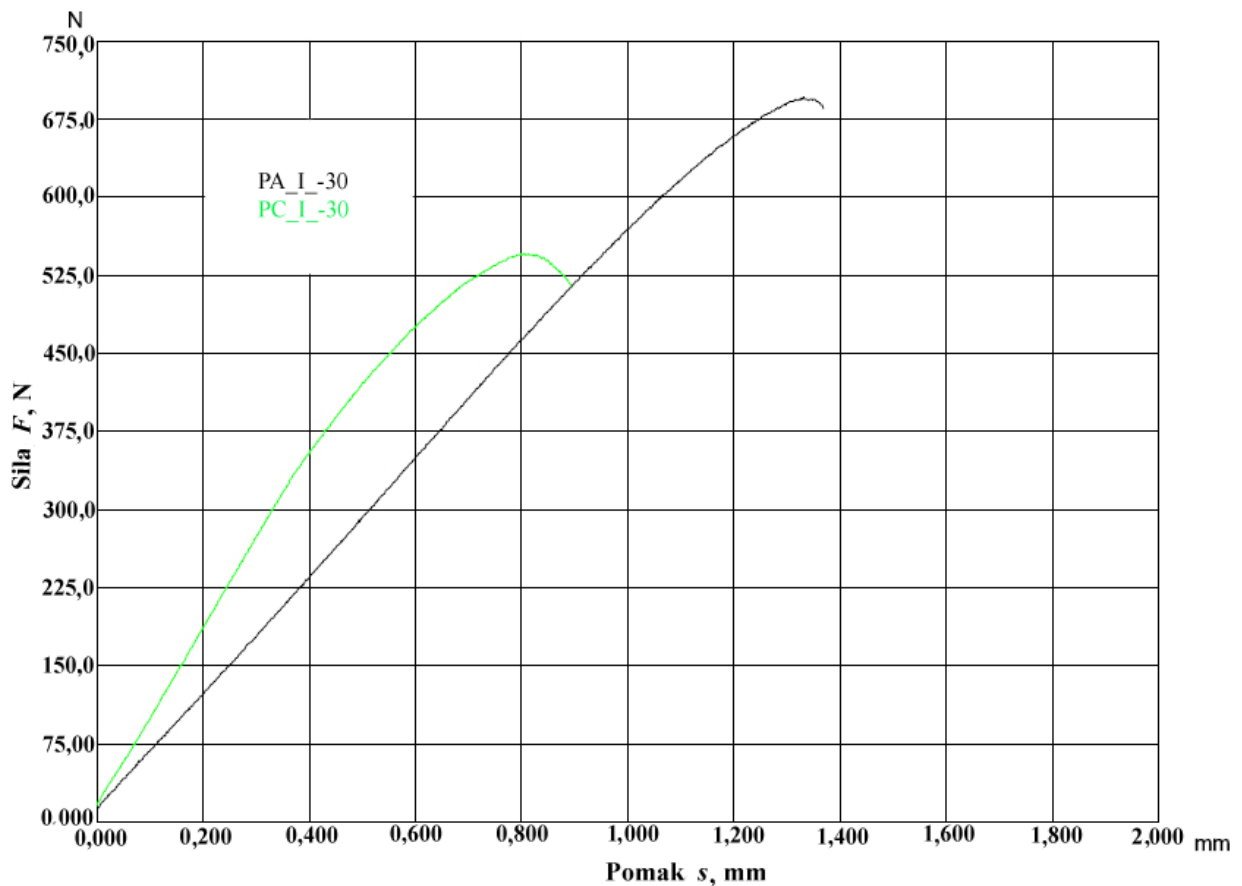


Slika 6.30. Dijagram sila-pomak za PA_I i PC_I pri 70 °C

Tablica 6.29. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri 70 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	PC_I	267
	PA_I	86

Pri niženoj temperaturi jednokomponentno ljepilo se pokazalo bolje u primjeni sa poliamidom, nego sa polikarbonatom. Slika 6.31 to zorno prikazuje. Tablica 6.30 prikazuje iznos prekidne sile za ova dva ispitna tijela.

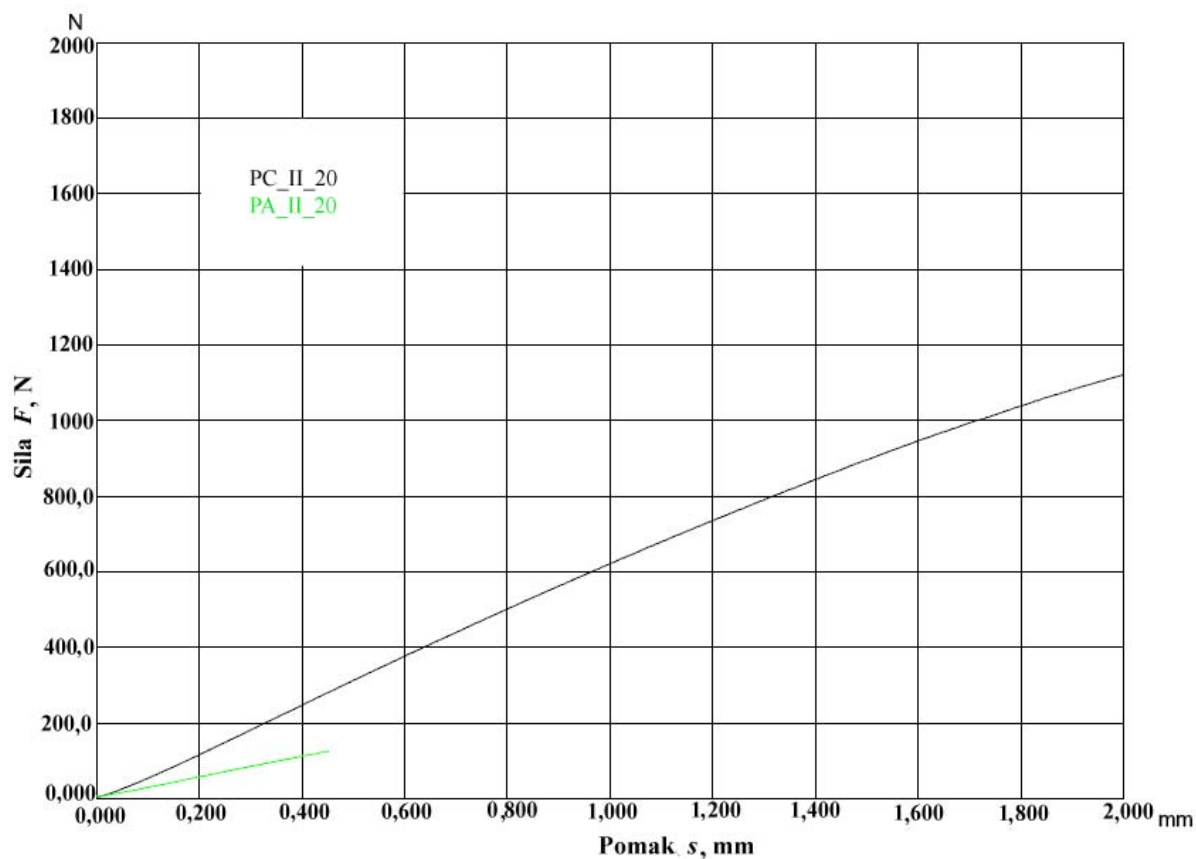


Slika 6.31. Dijagram *sila - pomak* za PA_I i PC_I pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 6.30. Prekidna sila za PA_I i PC_I pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	PC_I	542
	PA_I	696

Kao i za jednokomponentno ljepilo, za dvokomponentno ljepilo je također provedeno ispitivanje pri sve tri temperature kako bi se vidjelo s kojim materijalom se ostvaruje veća prekidna sila lijepljenog spoja. Slika 6.32 prikazuje dijagram *sila - pomak* za dvokomponentno ljepilo primjenjeno na poliamid i polikarbonat. Zelena krivulja predstavlja poliamid, što znači da je pri sobnoj temperaturi dvokomponentno ljepilo puno učinkovitije u kombinaciji sa polikarbonatom.



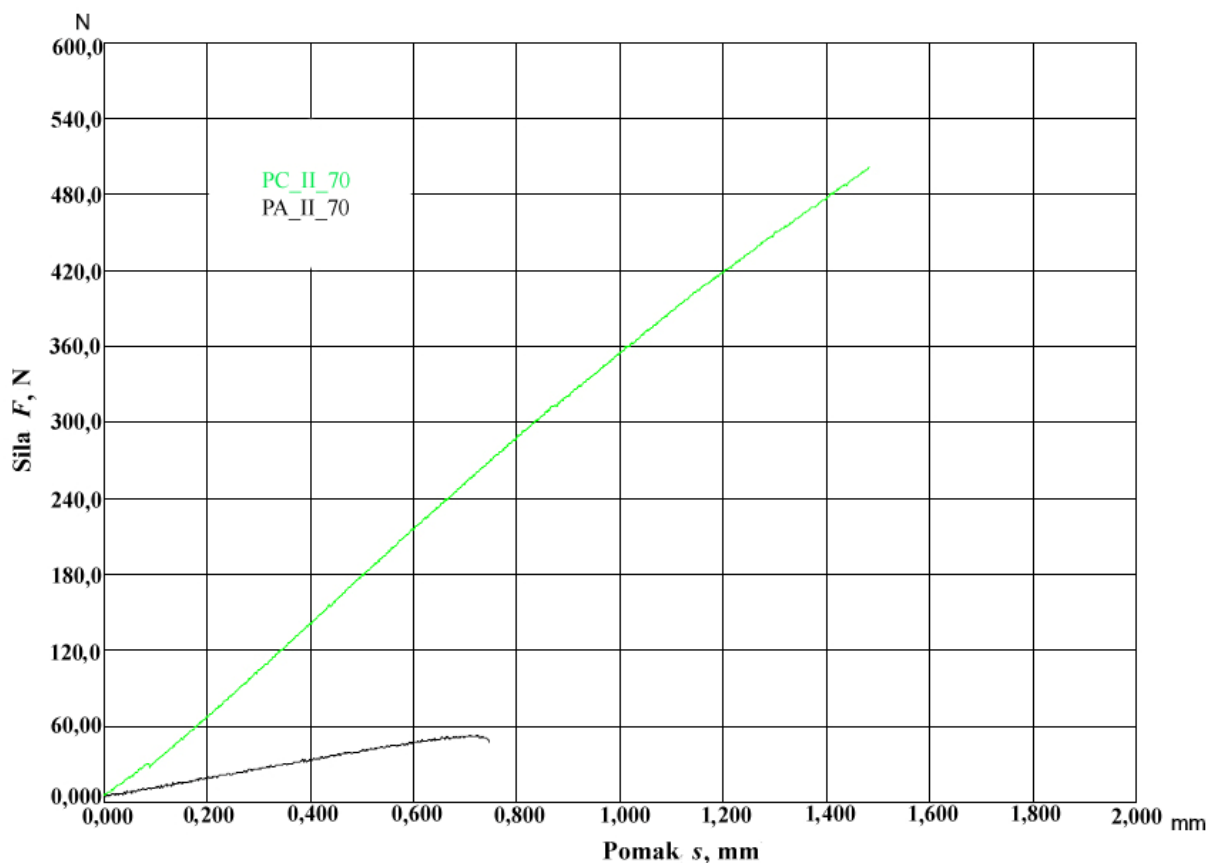
Slika 6.32. Dijagram sila - pomak za PA_II i PC_II pri 20 °C

Tablica 6.31 prikazuje vrijednosti prekidne sile za PA_II i PC_II lijepljene spojeve pri sobnoj temperaturi.

Tablica 6.31. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri 20 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
20	PC_II	1121
	PA_II	125

Slika 6.33 prikazuje dijagram sila - pomak za povišenu temperaturu i lijepljeni spoj kojeg čine dvokomponentno ljepilo i poliamid, odnosno polikarbonat. Iz njega je vidljivo da je pri povišenoj temperaturi polikarbonat, kojeg predstavlja zelena krivulja, puno bolja opcija za lijepljenje sa dvokomponentnim ljepilom, nego poliamid.

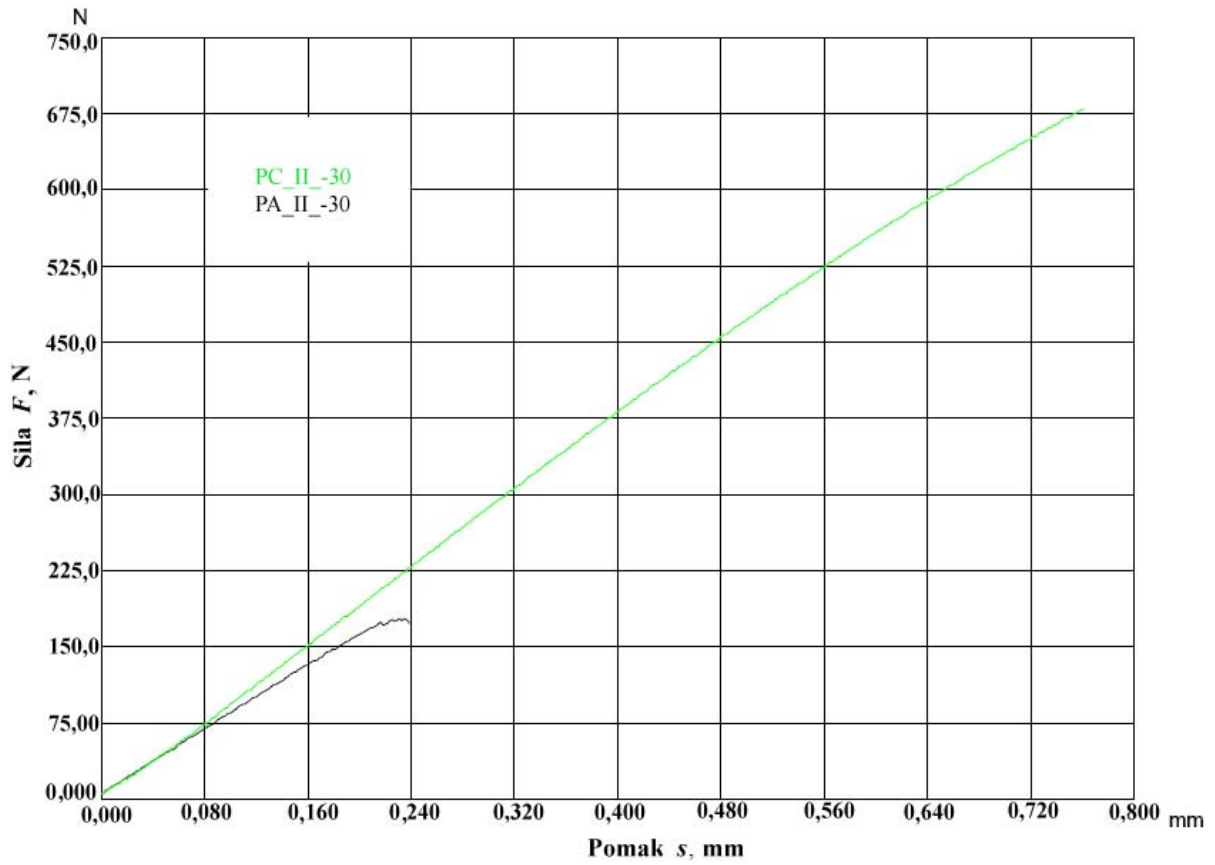


Slika 6.33. Dijagram *sila-pomak* za PA_II i PC_II pri 70 °C

Tablica 6.32. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri 70 °C

Temperatura θ [°C]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
70	PC_II	502
	PA_II	53

I na kraju, preostaje vidjeti pri sniženoj temperaturi, koji materijal daje čvršći spoj zajedno sa dvokomponentnim ljepilom, poliamid ili polikarbonat. Slika 6.34 ukazuje da je to polikarbonat. Tablica 6.33 prikazuje prekidnu silu za PA_II i PC_II pri 70 °C, iz čega je jasno da je polikarbonat taj koji daje čvršći spoj u kombinaciji sa dvokomponentnim ljepilom pri sniženoj temperaturi.



Slika 6.34. Dijagram *sila-pomak* za PA_II i PC_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 6.33. Prekidna sila za PA_II i PC_II pri $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$]	Ispitno tijelo	Prekidna sila F [N]
-30	PC_II	679
	PA_II	178

7. ZAKLJUČAK

Zbog niza prednosti koje lijepljenje ima pred ostalim načinima spajanja, sve se češće koristi u industrijskoj proizvodnji. Stoga je to zanimljivo područje, točnije lijepljenje polimera, postalo predmetom proučavanja ovog rada. S obzirom da su polimeri kao vrsta konstrukcijskog materijala široko i još uvijek do kraja neistraženo područje, a izbor ljepila je iz dana u dan sve veći, cilj je bio ispitati svojstva lijepljenih spojeva i njihovu ovisnost o vrsti ljepila, materijala koji se lijepi i temperaturi primjene takvog lijepljenog spoja.

Uz uporabu najsuvremenije opreme za statičko vlačno ispitivanje, u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu provedena su ispitivanja prema međunarodnoj normi ISO 4587, uz prošireni raspon uporabne temperature na $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dobiveni su zanimljivi podaci iz kojih se može puno doznati o utjecaju temperature okoliša na čvrstoću lijepljenog spoja, kao i vrste ljepila, odnosno osnovnog materijala.

Općenito, pri višim temperaturama lijepljeni spoj ima veće istežanje, a prekidna sila, odnosno nosivost, je smanjena. Nasuprot tome, pokazalo se da pri sniženim temperaturama lijepljeni spoj podnosi više prekidne sile.

Konkretno, za ova dva ljepila i dvije vrste osnovnog materijala koji su korišteni u pokusu, pokazalo se da je za lijepljenje poliamida kvalitetniji izbor jednokomponentno ljepilo, dok je za lijepljenje polikarbonatnih materijala povoljnije dvokomponentno ljepilo. Ovo ispitivanje je potvrdilo još jednu činjenicu, a to je da mala razlika u pripremi površine može imati ogroman utjecaj na čvrstoću lijepljenog spoja. Jednako tako se pokazalo da čvrstoća lijepljenog spoja jako ovisi o vrsti materijala za lijepljenje te vrsti ljepila.

Prilikom ispitivanja javljali su se određeni problemi u održavanju temperature okoliša konstantnom. Posebno je to bilo izraženo pri niskim temperaturama, gdje se zbog vremena izgubljenog na stezanje ispitnih tijela u hvataljke kidalice komora za temperiranje ugrijava i po nekoliko stupnjeva, pa je bilo potrebno dosta vremena da se temperatura ponovno ustabilji i da se ispitna tijela protemperiraju, što je usporavalo sam tijek ispitivanja. Za buduća ispitivanja bilo bi neophodno pronaći način za brže stezanje ispitnih tijela u hvataljke kako bi se ostavilo što manje prostora za nagle oscilacije temperature u komori za temperiranje.

LITERATURA

1. Kožuh, Z., Kralj, S., Cvirn, Ž.: *Tehnologij lijepljenja, Dio I. Zavarivanje*, 1997., 40/3., 85-94
2. Raos, P., Lucić, M.: *Konstruktivsko lijepljenje*, Autorizirana predavanja, Slavonski Brod, 2003
3. N.N: <http://hrcak.srce.hr/file/14336>, *Ispitivanje čvrstoće lijepljenih spojeva polimernih laminata*, 27.10.2008.
4. Kožuh, Z., Kralj, S., Cvirn, Ž., *Tehnologija lijepljenja, Dio II.*, Zavarivanje, 1997., 40/4., 159–170
5. N.N: <http://www.hobbyart-chemaco.hr/upload/silikipistoljpatex.jpg> 26.9.2008.
6. Čatić, I., *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
7. Hrvatski zavod za norme, *International standard ISO 4587*, third edition 2003-03-15
8. Čatić, I., Čatić, R., Jarm, V., Kostial-Štambuk, A.: *Rječnik polimerstva, englesko-hrvatski i hrvatsko-engleski*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2000.
9. N.N: <http://www.goodfellow.com/content.aspx?id=48> 14.10.2008.
10. N.N:http://www.akd-tools.gr/xmsAssets/File/TDS/TEROSON/terostat_9220.pdf 14.10.2008.
11. N.N: http://www.promteh-rostov.ru/upload/Teroson_9220.jpg 14.10.2008.
12. N.N: http://www.henkel.ru/rur/content_data/Epoxy_Catalogue_2007.pdf 14.10.2008.