

Konstrukcijski plastomeri u sanitarnoj tehnici

Kirin, Tomislav

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:894607>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO**

TOMISLAV KIRIN

**Konstrukcijski plastomeri u sanitarnoj
tehnici
ZAVRŠNI RAD**

KARLOVAC, 2018.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO**

TOMISLAV KIRIN

**Konstruktivski plastomeri u sanitarnoj
tehnici
ZAVRŠNI RAD**

Mentor:
Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

KARLOVAC, 2018.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J. J. Strossmayera 9
HR • 47000 Karlovac • Croatia
tel. +385 (0)47 843-510
fax. +385 (0)47 843-579
e-mail: referada@vuka.hr



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**: STROJARSTVO
(označiti)

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, 05.12.2017.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **TOMISLAV KIRIN**..... Matični broj: 0111415012

Naslov: KONSTRUKCIJSKI PLASTOMERI U SANITARNOJ TEHNICI

.....
Opis zadatka:

U završnom radu nakon kratkog uvoda, potrebno je u teorijskom dijelu rada obraditi polimerne materijale, sa naglaskom na svojstva polimernih materijala. Posebno obraditi konstrukcijske plastomere i njihovu primjenu u sanitarnoj tehnici.

U eksperimentalnom dijelu napraviti ispitivanje statičke vlačne čvrstoće za 3 vrste materijala koji se koriste u sanitarnoj tehnici, pa temeljem dobivenih rezultata analizirati sličnosti i razlike između pojedinih materijala, kao i odnos zahtijevanih i dobivenih vrijednosti.

Na kraju napisati odgovarajući zaključak.

Završni rad urediti prema pravilima Veleučilišta u Karlovcu.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

05.12.2017.

17.01.2018.

31.01.2018.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam ja – student Tomislav Kirin, OIB: 30114218946, matični broj: 0111415012, upisan u IV. semestar Specijalističkog diplomskog stručnog studija strojarstva, akademske godine 2016./2017., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, mag.ing.stroj. kojoj se ovim putem zahvaljujem.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima i prijateljima na potpori tijekom školovanja.

Tomislav Kirin

Karlovac, 12.01.2018.

SAŽETAK

U teoretskom dijelu ovoga rada opisani su polimerni materijali, njihova podjela i mehanička svojstva koja ih karakteriziraju. Opširnije su opisani konstrukcijski plastomeri koji se koriste u sanitarnoj tehnici, točnije poli(metil-metakrilat) i akrilonitril/butadien/stiren, najvažnija svojstva tih polimera, dodaci kojima su oplemenjeni i modificirani, njihova primjena i ponašanje kod izloženosti atmosferskim uvjetima i uvjetima povišenih temperatura.

U eksperimentalnom dijelu rada provodi se statički vlačni pokus na ispitnim uzorcima, točnije epruvetama normiranog oblika i dimenzija. Ispituju se poli(metil-metakrilat) oplemenjen dibutil ftalatom i butil akrilatom, Perspex poli(metil-metakrilat) i akrilonitril/butadien/stiren. U nastavku rada provedena je analiza i usporedba dobivenih rezultata s obzirom na zahtijevane vrijednosti statičkog vlačnog pokusa.

Ključne riječi: konstrukcijski plastomeri, poli(metil-metakrilat), akrilonitril/butadien/stiren.

SUMMARY

ENGINEERING THERMOPLASTICS IN SANITARY TECHNIQUE

The polymeric materials, distribution and characteristics of their mechanical properties are described in theoretical part of this work. Engineering thermoplastics used in sanitary technique are more described, precisely, poly(methyl methacrylate) and acrylonitrile/butadiene/styrene, the most important properties of this polymers, accessories with which are refined and modified, their usage and behaviour under atmospheric conditions and high temperature conditions.

In the experimental part of work we conduct a static tensile test on examples, precisely on tubes, which have standard shape and dimensions. Poly(methyl methacrylate) refined with dibutyl phthalate and butyl acrylate, Perspex poly(methyl methacrylate) and acrylonitrile/butadiene/styrene are examined. An analysis and comparison of the obtained results with regard to the required values are performed in continuation of this work.

Key words: engineering thermoplastics, poly(methyl methacrylate), acrylonitrile/butadiene/styrene.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| POPIS SLIKA | 9 |
| POPIS TABLICA | 11 |
| POPIS OZNAKA..... | 12 |
| POPIS PRILOGA | 13 |
| 1. UVOD..... | 14 |
| 1.1. Polimerni materijali | 14 |
| 1.2. Razvoj polimerstva u Hrvatskoj | 15 |
| 2. POLIMERI | 16 |
| 2.1. Uvodno o polimernim materijalima | 16 |
| 2.2. Stupanj polimerizacije | 17 |
| 3. POLIMERIZACIJA..... | 19 |
| 3.1. Lančana reakcija polimerizacije..... | 19 |
| 3.2. Stupnjevita reakcija polimerizacije..... | 20 |
| 3.3. Kopolimerizacija | 21 |
| 3.3.1. Kopolimeri..... | 22 |
| 3.3.2. Polimerne mješavine | 23 |
| 4. SVOJSTVA POLIMERNIH MATERIJALA..... | 24 |
| 4.1. Strukturna svojstva..... | 24 |
| 4.2. Fizikalna i mehanička svojstva polimernih materijala | 26 |
| 4.2.1. Fizikalna svojstva polimera | 26 |
| 4.2.2. Klasifikacija polimernih materijala prema svojstvima | 27 |
| 4.2.3. Mehanička svojstva polimernih materijala | 29 |
| 4.2.3.1. Kratkotrajna mehanička ispitivanja | 30 |
| 4.2.3.2. Dugotrajna mehanička ispitivanja | 35 |
| 4.2.3.3. Tvrdća polimernih materijala | 38 |
| 4.2.3.4. Žilavost polimernih materijala | 38 |
| 4.2.3.5. Tribološka svojstva..... | 40 |
| 5. PODJELA POLIMERA..... | 43 |
| 5.1. Osnovne podjele polimera..... | 43 |
| 5.1.1. Plastomeri..... | 44 |
| 6. KONSTRUKCIJSKI PLASTOMERI U SANITARNOJ TEHNICI..... | 46 |
| 6.1. Poli(metil-metakrilat) - PMMA..... | 46 |
| 6.1.1. Metil-metakrilat | 47 |
| 6.1.2. Proces proizvodnje poli(metil-metakrilata)..... | 47 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6.1.3. | Mehanička svojstva poli(metil-metakrilata)..... | 50 |
| 6.1.4. | Modificiranje poli(metil-metakrilata)..... | 51 |
| 6.1.5. | Primjena poli(metil-metakrilata) u proizvodnji kada i tuš kada | 52 |
| 6.1.5.1. | Butil akrilat | 53 |
| 6.1.5.2. | Dibutil ftalat | 53 |
| 6.1.5.3. | Prednosti sanitarnog poli(metil-metakrilata)..... | 53 |
| 6.1.6. | Proces dobivanja gotovog proizvoda | 54 |
| 6.2. | Akrilonitril/butadien/stiren | 55 |
| 6.2.1. | Stiren | 56 |
| 6.2.2. | Akrilonitril | 57 |
| 6.2.3. | Stiren/akrilonitril kopolimer (SAN) | 57 |
| 6.2.4. | Butadien | 59 |
| 6.2.5. | Polibutadien..... | 59 |
| 6.2.6. | Mehanička svojstva akrilonitril/butadien/stirena | 60 |
| 6.2.7. | Proizvodnja i primjena akrilonitril/butadien/stirena..... | 62 |
| 6.3. | ABS/PMMA, akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata)... | 64 |
| 6.3.1. | Proces koekstrudiranja..... | 64 |
| 6.3.2. | Svojstva i upotreba ABS/PMMA | 65 |
| 7. | POSTAVKA ZADATKA..... | 67 |
| 8. | EKSPERIMENTALNI DIO | 68 |
| 8.1. | Opis kidalice Shimadzu AG-X plus i programa TrapeziumX | 68 |
| 8.2. | Izrada uzoraka za statički vlačni pokus..... | 73 |
| 8.2.1. | Epruvete polimernih materijala za ispitivanje | 74 |
| 8.3. | Rezultati ispitivanja..... | 78 |
| 8.4. | Analiza rezultata..... | 83 |
| 9. | ZAKLJUČAK | 88 |
| | LITERATURA..... | 89 |
| | PRILOZI | 92 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Molekulni sastav najupotrebljavanijih polimera [4]..... | 16 |
| Slika 2. Utjecaj molekulne mase i stupnja polimerizacije na svojstva materijala [1]..... | 17 |
| Slika 3. Polimerizacija etena [3]..... | 19 |
| Slika 4. Nastajanje fenol formaldehidne smole [4] | 20 |
| Slika 5. Struktura umrežene fenol formaldehidne smole [4] | 21 |
| Slika 6. Kopolimerizacija akrilonitril/butadien/stirena [5]..... | 22 |
| Slika 7. Vrste kopolimera [4]..... | 22 |
| Slika 8. Veze kod polimernih materijala [1] | 25 |
| Slika 9. Stupanj kristalnosti polimera [1] | 25 |
| Slika 10. Termomehanička krivulja [1] | 26 |
| Slika 11. Sistematizacija svojstava polimernih materijala [1]..... | 27 |
| Slika 12. Hooke-ov dijagram "naprezanja-istezanja" polimernih materijala [2] | 31 |
| Slika 13. Opći Hooke-ov dijagram, "naprezanje-deformacija" [1] | 31 |
| Slika 14. Vrste krivulja pri vlačnom ispitivanju [1]..... | 32 |
| Slika 15. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala [2] | 34 |
| Slika 16. Prikaz ponašanja polimernih materijala kod dugotrajnog statičkog opterećenja [1] | 35 |
| Slika 17. Prikaz ponašanja polimernih materijala kod dinamičkog opterećenja [1] | 36 |
| Slika 18. Izokroni dijagram, "naprezanja - istezanja" [2]..... | 37 |
| Slika 19. Prikaz krivulje "naprezanje - deformacija", žilavog materijala [43] | 38 |
| Slika 20. Prikaz krivulje "naprezanje - deformacija", krhkog i žilavog materijala [8]..... | 39 |
| Slika 21. Prikaz ispitivanja udarnog rada loma Charpy i Izod metodom [43] | 40 |
| Slika 22. Određivanje faktora trenja [1]..... | 41 |
| Slika 23. Određivanje iznosa trošenja [1]..... | 42 |
| Slika 24. Prikaz abrazivnog trošenja materijala [7]..... | 42 |
| Slika 25. Oblici molekulne strukture osnovnih polimernih skupina [6] | 43 |
| Slika 26. Polimerizacija metil-metakrilata i nastajanje poli(metil-metakrilata) [9] | 46 |
| Slika 27. Molekulna struktura metil-metakrilata ($C_5H_8O_2$) [14]..... | 47 |
| Slika 28. Primjer serijskog lijevanja poli(metil-metakrilata) [9]..... | 48 |
| Slika 29. Lijepljenje zaštitne folije na gotovu PMMA ploču [9]..... | 49 |
| Slika 30. Prikaz ovisnosti naprezanja o istežanju PMMA [6] | 50 |
| Slika 31. Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi za PMMA [6] | 51 |
| Slika 32. PMMA zaštitne naočale i prozorski paneli [15]..... | 52 |
| Slika 33. Molekulna struktura butil akrilata ($C_7H_{12}O_2$) [16]..... | 53 |
| Slika 34. Molekulna struktura dibutil ftalata ($C_{16}H_{22}O_4$) [18]..... | 53 |
| Slika 35. PMMA kupaonska kada [19] | 54 |
| Slika 36. PMMA tuš kada [20]..... | 55 |
| Slika 37. Molekulna struktura akrilonitril/butadien/stirena [21]..... | 56 |
| Slika 38. Molekulna struktura stirena (C_8H_8) [22] | 56 |
| Slika 39. Molekulna struktura akrilonitrila (C_3H_3N) [24] | 57 |
| Slika 40. Molekulna struktura SAN kopolimera [26] | 58 |
| Slika 41. Molekulna struktura butadiena (C_4H_6) [28] | 59 |
| Slika 42. Molekulna struktura polibutadiena [30]..... | 60 |
| Slika 43. Golf loptica i guma proizvedeni od polibutadiena [31] | 60 |
| Slika 44. Prikaz ovisnosti naprezanja o istežanju s obzirom na temperaturu za ABS [6]..... | 61 |
| Slika 45. Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi za ABS [6] | 61 |
| Slika 46. Svojstva ABS monomera [32] | 62 |
| Slika 47. Lego kockice i kućište za usisavač, izrađeni od ABS [33]..... | 63 |
| Slika 48. Primjer koekstrudiranja polimernih materijala [37] | 64 |

| | |
|---|----|
| Slika 49. ABS/PMMA kupaonska kada [39] | 66 |
| Slika 50. Kidalica Shimadzu AG-X plus za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala | 68 |
| Slika 51. TrapeziumX program | 69 |
| Slika 52. Odabir konstantne vlačne sile i smjera sile | 69 |
| Slika 53. Odabir graničnog područja sile, kod ispitivanja | 70 |
| Slika 54. Postavljanje brzine ispitivanja od 80 N/sec | 70 |
| Slika 55. Odabir materijala i dimenzije epruvete, sanitarni poli(metil-metakrilat) | 71 |
| Slika 56. Odabir materijala i dimenzije epruvete, Perspex poli(metil-metakrilat)..... | 71 |
| Slika 57. Odabir materijala i dimenzije epruvete, ABS koekstrudiran slojem PMMA | 72 |
| Slika 58. Definiranje parametara koji će se mjeriti | 72 |
| Slika 59. Standard za izradu epruveta | 73 |
| Slika 60. Epruvete izrađene pomoću numeričko upravljano alata | 74 |
| Slika 61. Epruvete sanitarnog poli(metil-metakrilata), na kojima se vršilo ispitivanje..... | 75 |
| Slika 62. Dimenzije epruveta sanitarnog poli(metil-metakrilata) | 75 |
| Slika 63. Epruvete Perspex poli(metil-metakrilata) na kojima se vršilo ispitivanje | 76 |
| Slika 64. Dimenzije epruveta Perspex poli(metil-metakrilata)..... | 76 |
| Slika 65. Epruvete ABS koekstrudiranog slojem PMMA na kojima se vršilo ispitivanje | 77 |
| Slika 66. Dimenzije epruveta ABS koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata) | 77 |
| Slika 67. Epruvete sanitarnog poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja | 80 |
| Slika 68. Epruvete Perspex poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja..... | 81 |
| Slika 69. Prikaz presjeka loma epruveta Perspex poli(metil-metakrilata) | 81 |
| Slika 70. Epruvete ABS koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja | 82 |
| Slika 71. Dijagram statičkog vlačnog pokusa, najvećih izmjerenih vrijednosti epruveta | 85 |
| Slika 72. Dijagram statičkog vlačnog pokusa, najmanjih izmjerenih vrijednosti epruveta | 87 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Dodaci čistim polimerima [2] | 18 |
| Tablica 2. Primjeri dodataka i svrha njihove primjene [2] | 18 |
| Tablica 3. Uporabna svojstva polimernih materijala [2] | 28 |
| Tablica 4. Prednosti i nedostaci polimernih materijala [2] | 29 |
| Tablica 5. Pregled mehaničkih svojstava polimernih materijala [2] | 30 |
| Tablica 6. Orijentacijske vrijednosti modula elastičnosti polimernih materijala [2] | 34 |
| Tablica 7. Orijentacijske vrijednosti kritičnih istezanja polimernih materijala [2] | 37 |
| Tablica 8. Obilježja osnovnih skupina polimernih materijala [2] | 44 |
| Tablica 9. Najzastupljeniji plastomeri i njihova primjena [6] | 45 |
| Tablica 10. Rezultati ispitanih epruveta sanitarnog poli(metil-metakrilata) | 78 |
| Tablica 11. Rezultati ispitanih epruveta Perspex poli(metil-metakrilata) | 79 |
| Tablica 12. Rezultati ispitanih epruveta ABS koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata) | 79 |
| Tablica 13. Analiza rezultata sanitarnog poli(metil-metakrilata) | 83 |
| Tablica 14. Analiza rezultata Perspex poli(metil-metakrilata) | 83 |
| Tablica 15. Analiza rezultata akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem PMMA | 84 |

POPIS OZNAKA

| OZNAKA | ZNAČENJE |
|----------------------|--|
| T_g | temperatura staklišta |
| T_f | temperatura tečišta amorfnih plastomera |
| T_m | temperatura tečišta kristalastih plastomera |
| T_d | temperatura razgradnje |
| R_e | granica razvlačenja |
| R_m | vlačna čvrstoća |
| R_p | prekidna čvrstoća |
| E_p | prekidno istezanje |
| F_e | vrijednost sile na granici razvlačenja |
| F_m | vrijednost maksimalne sile |
| F_p | prekidna sila |
| ΔL | produljenje |
| A | izduženje |
| E | modul elastičnosti |
| S_0 | površina poprečnog presjeka |
| a | debljina epruvete |
| b | širina epruvete |
| σ | naprezanje |
| ε | istezanje |
| ε_0 | početno istezanje |
| ε_{uk} | ukupno istezanje |
| ε_p | plastično istezanje |
| ε_{et} | entropijsko istezanje |
| ε_{krit} | kritično istezanje |
| μ_s | faktor statičkog trenja |
| μ_r | faktor valjajućeg trenja |
| μ_k | faktor dinamičkog trenja |
| PE-LD | polietilen niske gustoće |
| PE-LLD | linearni polietilen niske gustoće |
| PE-HD | polietilen visoke gustoće |
| PP | polipropilen |
| PVC | poli(vinil-klorid) |
| PS | polistiren |
| PET | poli(etilen-tereftalat) |
| PA | poliamid |
| POM | poli(oksi-metilen) |
| PBT | poli(butilen-tereftalat) |
| PTFE | poli(tetrafluoretilen) |
| PMMA | poli(metil-metakrilat) |
| PC | polikarbonat |
| ABS | akrilonitril/butadien/stiren |
| ABS/PMMA | akrilonitril/butadien/stiren koekstrudirani slojem poli(metil-metakrilata) |
| SAN | stiren/akrilonitril |
| SBR | stiren-butadien guma |
| NBR | akrilonitril-butadien guma |

POPIS PRILOGA

| | |
|---|-----|
| Prilog 1. Tehnički list sanitarnog poli(metil-metakrilata) | 93 |
| Prilog 2. Tehnički list Perspex poli(metil-metakrilata) | 95 |
| Prilog 3. Tehnički list akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem PMMA | 96 |
| Prilog 4. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 1 | 97 |
| Prilog 5. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 2 | 98 |
| Prilog 6. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 3 | 99 |
| Prilog 7. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 4 | 100 |
| Prilog 8. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 5 | 101 |
| Prilog 9. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 6 | 102 |
| Prilog 10. Rezultati ispitivanja - sanitarni poli(metil-metakrilat), epruveta 7 | 103 |
| Prilog 11. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 1 | 104 |
| Prilog 12. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 2 | 105 |
| Prilog 13. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 3 | 106 |
| Prilog 14. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 4 | 107 |
| Prilog 15. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 5 | 108 |
| Prilog 16. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 6 | 109 |
| Prilog 17. Rezultati ispitivanja - Perspex, epruveta 7 | 110 |
| Prilog 18. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 1 | 111 |
| Prilog 19. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 2 | 112 |
| Prilog 20. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 3 | 113 |
| Prilog 21. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 4 | 114 |
| Prilog 22. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 5 | 115 |
| Prilog 23. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 6 | 116 |
| Prilog 24. Rezultati ispitivanja - ABS koekstrudiran slojem PMMA, epruveta 7 | 117 |

1. UVOD

1.1. Polimerni materijali

Polimeri su prirodne i sintetičke, organske i anorganske tvari i materijali čiji su osnovni sastojak makromolekule, zbog toga se nazivaju i makromolekulnim spojevima.

Riječ polimer potječe od riječi poly (mnoštvo, puno) iz grčkog jezika i meros (dio). Sama riječ obilježava makromolekulu koja se sastoji od velikog broja strukturnih jedinica, odnosno takozvanih mera koji se ponavljaju u makromolekuli.

Teško je točno rekonstruirati povijesni razvoj polimera i razvoj procesa proizvodnje polimernih tvorevina. Primjerice, arheologinja D. Hosler je tek 1999. godine otkrila postupak proizvodnje gumenih lopti u Srednjoj Americi, kojeg su Maje poznavale oko 1600. godine prije nove ere.

Prvo doba prapolimera smatra se i dobom polimera kao umjetničkih materijala. Time se želi naglasiti da su se tražili materijali koje se moglo lagano oblikovati i sa kojima su se mogla postići svojstva nepoznata u prirodi, a rabili su se za izradu umjetničkih djela. U spisima najmoćnijeg švicarskog poduzetnika toga doba, B. Schobingera (1500.-1585.) opisan je postupak proizvodnje umjetnog roga, što je danas poznata kazeinska plastika. Pritom B. Schobinger nije naglašavao postupak kao svoj izum, dakle kazeinski proizvodi stariji su od tog razdoblja. U 19. stoljeću mijenja se socijalna struktura pučanstva. Traže se jeftiniji materijali dostupni sve mnogobrojnijem, ali siromašnom stanovništvu. U osnovi, to je razdoblje polimera kao imitirajućih materijala ili surogata. Tako se na primjer pokušstvo za siromašnog čovjeka izrađivalo od papira i ljepenke.

Godine 1845. C. Schonbein nitrira celulozu i dobiva vrijednu sirovinu, nitrocelulozu. E.A. Parker 1865. godine patentira parkezin, umjetnu smolu načinjenu miješanjem nitroceluloze i kamfora. Upravo taj materijal pod nazivom celuloid postaje poznat po braći Hyatt, koji su od njega izrađivali biljarske kugle.

Krajem 19. stoljeća počela je i proizvodnja umjetne svile na osnovi nitroceluloze (rayon), a 1883. godine započelo se s proizvodnjom nitroceluloznih filmova.

Vulkaniziranje, odnosno proces umrežavanja kaučukovih smjesa sumporom potječe iz 1839. godine (Ch. Goodyear). Kaučukovu se smjesu praoblikovanjem zagrijavalo, što je omogućilo djelovanje sumpora kao umrežavala i time je stvorena rahlo umrežena trodimenzionalna struktura. Na taj način nastala je danas široko upotrebljiva guma.

Početak 20. stoljeća počinje razdoblje sintetskih polimera. Otkriven je galalit, kazeinska plastika na osnovi kazeina i formaldehida. Ubrzo zatim i fenol-formaldehid (bakelit) 1907., a 1909. Bayer započinje proizvodnju sintetskog izoprena.

U dvadesetim i tridesetim godinama 20. stoljeća počinje industrijska proizvodnja danas najraširenijih polimera: polietilena, poli(vinil-klorida) i polistirena. Poli(metil-metakrilat), poznat pod komercijalnim imenom Perspex proizvela je tvrtka ICI 1933. godine, 1938. godine slučajno je otkriven i danas dobro poznati teflon, točnije poli(tetrafluoretilen), otkrio ga je Roy Plunkett. Godine 1948. proizveden je akrilonitril/butadien/stiren, a posljednji masovni sintetizirani polimer, polipropilen, razvijen je 1956. godine. Od tada, polimerni materijali i tehnologija

njihove izrade iz godine u godinu postepeno napreduju, te polimerni materijali pronalaze sve veću primjenu. [1]

1.2. Razvoj polimerstva u Hrvatskoj

Dvadesetih godina 20. stoljeća u Hrvatskoj se započelo s preradbom smjesa na osnovi prirodnog kaučuka u kabelskoj industriji ELKI i sa proizvodnjom plastike u Preplamu.

Godine 1931. alatničar J. Čatić izradio je prve kalupe za izravno prešanje duromera za potrebe pogona koji je danas u sklopu tvornice Elektro-kontakt u Zagrebu. Godine 1945. počinje proizvodnja i prerada plastike i gume, točnije proizvodnja bakelita u Chromosu, a 1946. godine Jugovinil u Kaštel Sućurcu kreće sa proizvodnjom PVC-a. U Zagrebu je 1959. godine osnovana Organsko kemijska industrija (INA-OKI), a 1963. godine sa radom počinju postrojenja za proizvodnju etilena i polietilena. Zajedničkim ulaganjem tvrtke INA-OKI i Dow Chemical 1975. godine kreće izgradnja tvornice za proizvodnju polistirena. [40]

Krajem sedamdesetih godina 20. stoljeća s radom započinje tvornica za proizvodnju poliuretanske pjene ORIOFLEKS u Orioliku. Već tridesetih godina 20. stoljeća započela je proizvodnja strojeva i opreme za proizvodnju polimernih tvorevina. Tvornica strojeva u Belišću bila je niz godina proizvođač ubrizgavalica za injekcijsko prešanje. Godine 1956. započela je proizvodnju strojeva za preradu plastomera, a osamdesetih godina i za preradu duromera, kaučukovih smjesa i dijela dopunske opreme. Sada je ta tvornica samo pogon međunarodnog koncerna. Danas se u našoj zemlji proizvode samo kalupi za preradbu polimera. [1]

2. POLIMERI

2.1. Uvodno o polimernim materijalima

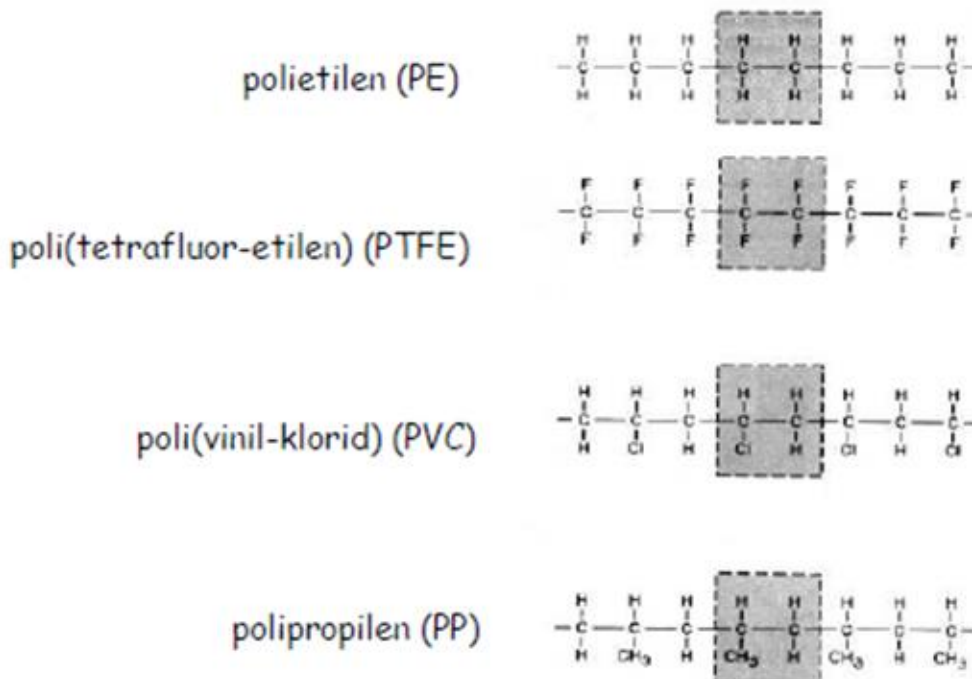
Polimeri su sve prirodne i sintetske tvari i materijali čiji je osnovni sastojak sustav makromolekula.

Makromolekula se sastoji od velikog broja ponavljajućih mera, odnosno strukturnih jedinica. Polimerne molekule sintetiziraju se iz odgovarajućih, najčešće nezasićenih tvari.

Monomer je tvar od koje se jednom od reakcija polimerizacije s molekulama iste ili različite konstitucije stvara polimerizat.

Meri su međusobno vezani kemijskim vezama u polimernoj molekuli, a njihov broj izražava se stupnjem polimerizacije. [1]

Na slici 1 prikazan je osnovni temeljni lanac najupotrebljavanijih polimera.

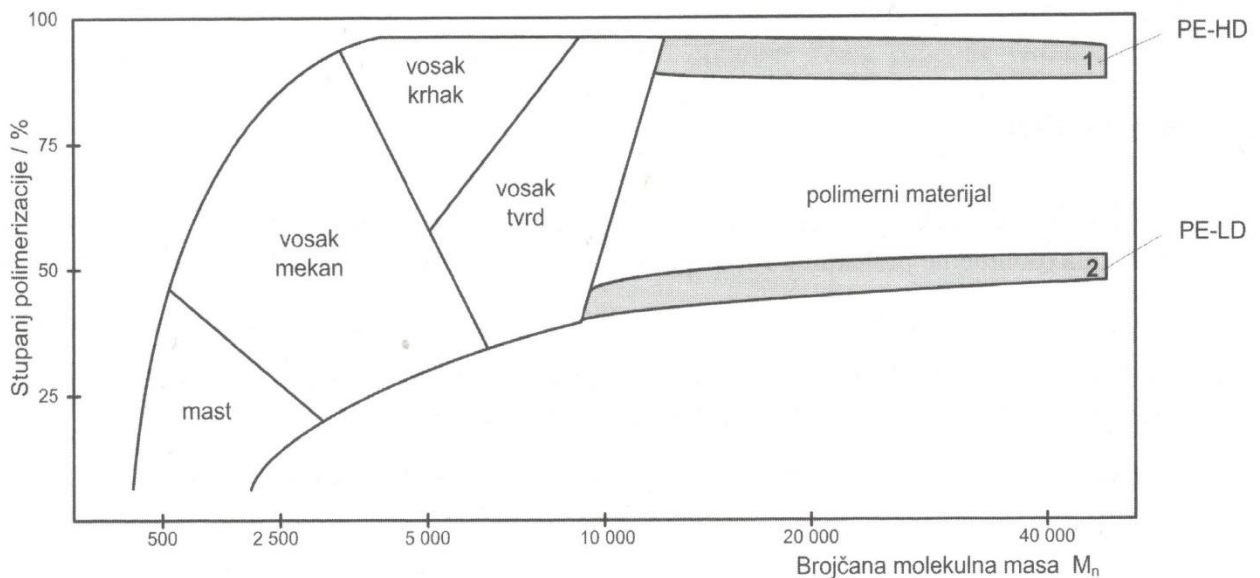


Slika 1. Molekulni sastav najupotrebljavanijih polimera [4]

2.2. Stupanj polimerizacije

Stupanj polimerizacije ovisi o uvjetima polimerizacije i bitno utječe na svojstva polimera (slika 2). Što je stupanj polimerizacije viši, uporabna svojstva nekog polimernog proizvoda su bolja. Međutim to se ne odnosi i na preradbeni svojstva polimernog materijala. Makromolekulni spojevi poput sintetskih polimera ne sastoje se od molekula određene molekulne mase, nego od smjesa molekula različitih veličina i masa.

S obzirom na promjenjivost stupnja polimerizacije, za polimer istog kemijskog sastava ni relativna molekulna masa nije konstantna. Nasuprot tome, za niskomolekulne tvari fizikalne veličine kao što su vrelište, ledište i molekulna masa predstavljaju konstantu i na tome se temelje mnogi postupci identifikacije tvari. Da bi se izračunala relativna molekulna masa polimera, potrebno je molekulnu masu ponavljane jedinice pomnožiti sa stupnjem polimerizacije. [1]



Slika 2. Utjecaj molekulne mase i stupnja polimerizacije na svojstva materijala [1]

Sustav makromolekula koji nastaje kao rezultat polimerizacije naziva se polimerizat i kao samostalan sve se rjeđe upotrebljava kao tehnički materijal. Polimerizat je u najvećem broju slučajeva tek osnovni sastojak polimernog materijala, a dodaju mu se raznovrsne niskomolekulne tvari i dodaci (tablica 1). Ti dodaci mogu imati velik utjecaj na svojstva polimera i najčešće se dodaju kako bi se naglasilo neko poželjno svojstvo i/ili kako bi se smanjio utjecaj nekog nepoželjnog svojstva (tablica 2). [2]

Tablica 1. Dodaci čistim polimerima [2]

| Naziv skupine dodataka | Primjeri dodataka |
|---------------------------------------|---|
| REAKCIJSKE TVARI | penila, dodaci za smanjenje gorivosti, umrežavala |
| DODACI ZA POBOLJŠANJE PRERADLJIVOSTI | maziva, odvajala, punila, toplinski stabilizatori, regulatori viskoznosti |
| MODIFIKATORI MEHANIČKIH SVOJSTAVA | omekšavala, punila, prijanjala, ojačala dodaci za povišenje žilavosti |
| MODIFIKATORI POVRŠINSKIH SVOJSTAVA | vanjska maziva, antistatici, regulatori adhezivnosti, dodaci za smanjenje sljubljanja i neravnina na površini |
| MODIFIKATORI OPTIČKIH SVOJSTAVA | bojila i pigmenti |
| DODACI PRODULJENE TRAJNOSTI PROIZVODA | svjetlosni stabilizatori, antioksidansi, antistatici, biocidi |
| OSTALO | mirisi i dezodoransi |

Tablica 2. Primjeri dodataka i svrha njihove primjene [2]

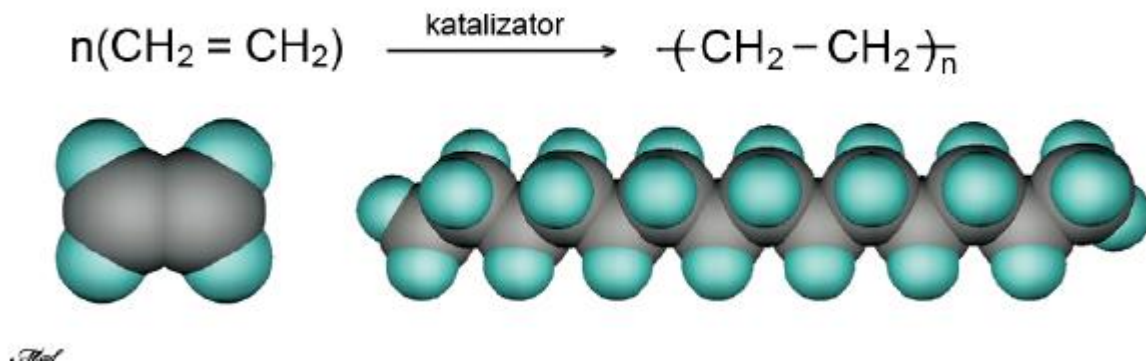
| Naziv dodatka | Svrha dodavanja |
|-------------------------|---|
| PUNILO | smanjenje cijene materijala, modificiranje preradbenih i toplinskih svojstava |
| OMEKŠAVALO | postizanje savitljivosti |
| OJAČALO | povećanje vlačne čvrstoće i vlačnog modula elastičnosti |
| STABILIZATOR | smanjenje utjecaja UV zraka i usporavanje starenja |
| ANTISTATIK | smanjenje elektrostatskog nabijanja |
| DODATAK ZA SAMOGASIVOST | postizanje samogasivosti |
| BOJILO, PIGMENT | postizanje željenog obojenja |

3. POLIMERIZACIJA

3.1. Lančana reakcija polimerizacije

Makromolekule kao osnovne strukturne jedinice polimera sadrže na tisuće mera, ponavljanih jedinica. Njihovo međusobno povezivanje može se odvijati različitim mehanizmima, ali se sve reakcije dobivanja polimera nazivaju reakcijama polimerizacije, one su egzotermni procesi i karakterizira ih veliko oslobađanje topline. [1]

Kao najjednostavniji primjer lančane reakcije polimerizacije može se navesti polietilen. Reakcija polimerizacije započinje otvaranjem dvostruke veze nezasićenog etena pri povišenom tlaku i temperaturi uz djelovanje inicijatora, ubrzivača reakcije polimerizacije (slika 3).



Slika 3. Polimerizacija etena [3]

Svaki od ugljikovih atoma ima po jedan nesporeni elektron koji se nastoji spariti. To se postiže povezivanjem ugljikovih atoma što dovodi do stvaranja makromolekule. Prilikom reakcije polimerizacije polimerni lanci rastu spontano jer se energija sustava snižava.

Prosječni stupanj polimerizacije polietilena ovisno o samome procesu kreće se između 3500 i 25000. Polimerizacija se najčešće odvija u otopini ili emulziji sve dok postoje neizreagirani monomeri. [1]

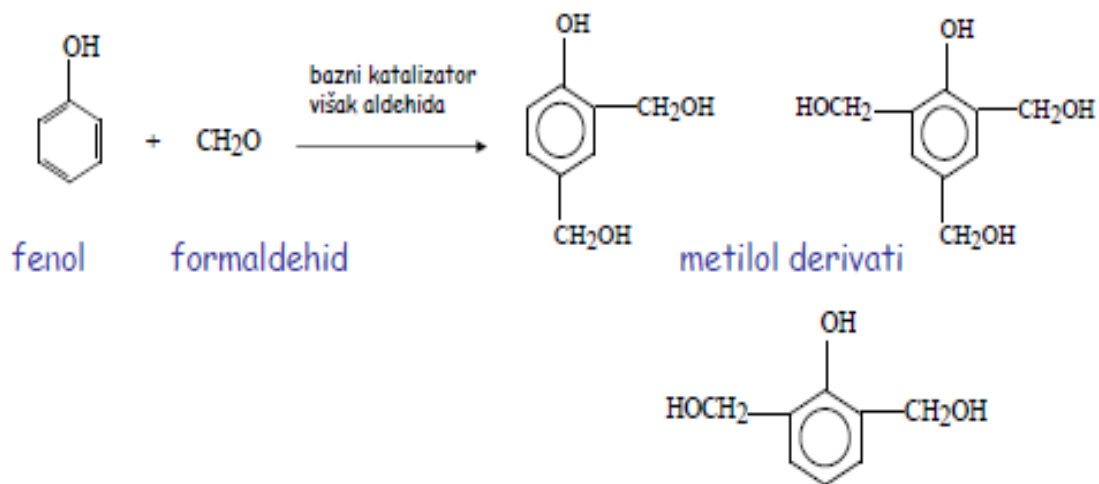
Karakteristike lančane polimerizacije su:

- tijekom reakcije koncentracija monomera stalno se smanjuje,
- uglavnom reagiraju jednaki monomeri i tada je kemijski sastav ponavljane jedinice jednak sastavu monomera,
- mogu reagirati i različiti monomeri, što dovodi do pregrupiranja atoma monomera.

3.2. Stupnjevita reakcija polimerizacije

Odvija se između funkcionalnih skupina monomera s postupnim povećanjem stupnja polimerizacije. Svaki stupanj je elementarna reakcija između funkcionalnih skupina, a funkcionalnost je broj potencijalno aktivnih mjesta u monomeru na kojima može doći do reakcije polimerizacije. Najzastupljenija stupnjevita reakcija polimerizacije je kondenzacijska polimerizacija kod koje je karakteristično da prilikom nastajanja polimera dolazi i do stvaranja niskomolekulnog nusprodukta. Taj nusprodukt najčešće je voda, ali mogu biti i spojevi poput CO_2 (ugličnog dioksida) ili H_2S (sumporovodika), ovisno o tome kakvi su po kemijskom sastavu monomeri koji ulaze u reakciju polimerizacije. Produkti kondenzacijske polimerizacije nazivaju se polikondenzati.

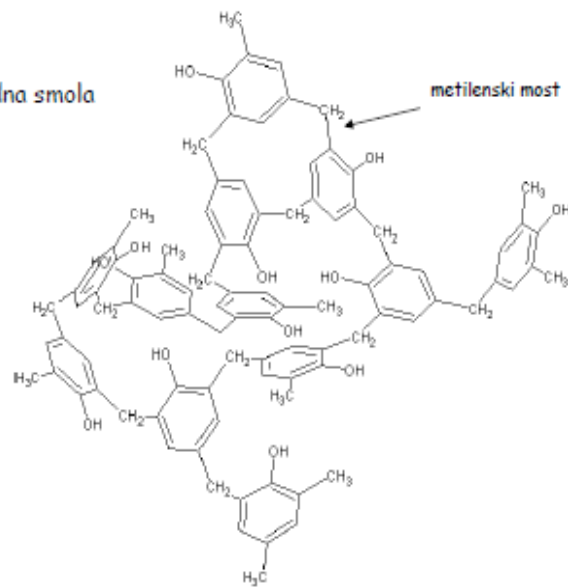
Dobar primjer kondenzacijske polimerizacije je reakcija nastajanja fenol-formaldehidne smole, u kojoj sudjeluju aromatski alkohol fenol i formaldehid (CH_2O). Reakcija se odvija u fazama, gdje se u prvoj fazi vežu fenol i formaldehid u linearnu molekulu uz izdvajanje vode. Kod druge faze dolazi do djelomičnog, a kod treće faze do potpunog umreženja strukture (slike 4 i 5). [1]



Slika 4. Nastajanje fenol formaldehidne smole [4]

očvršćivanje: polikondenzacijskom reakcijom (pri temp. višim od 130°C)

bakelit: prva fenol-formaldehidna smola



pretpostavljena struktura
umrežene smole (rezola)

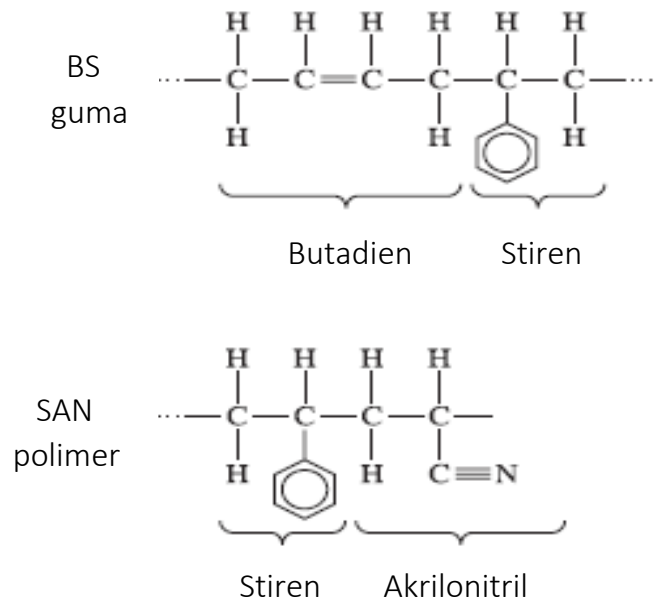
Slika 5. Struktura umrežene fenol formaldehidne smole [4]

Osim kondenzacijskih reakcija stupnjevite polimerizacije mogu se odvijati i poliadicijom. Reakcijom u kojoj ne dolazi do izdvajanja nusprodukta. Primjer takve polimerizacije je nastajanje poliuretana, gdje dolazi do reakcije između funkcionalnih skupina (izocijanata NCO i OH grupe). [1]

3.3. Kopolimerizacija

Kopolimerizacija je istovremena polimerizacija dva ili više monomera od kojih je svaki samostalno sposoban za polimerizaciju. Reakcija kopolimerizacije najdjelotvorniji je način modificiranja svojstava nekog polimera.

Jedan od često upotrebljivanih kopolimera je akrilonitril/butadien/stiren (ABS) koji nastaje kopolimerizacijom akrilonitrila, butadiena i stirena (slika 6). Akrilonitril cjelokupnom materijalu daje dobru kemijsku i toplinsku postojanost i žilavost. Butadien utječe na svojstvo otpornosti na udar, dok stiren omogućuje dobru prerađljivost i visok sjaj. [5]



Slika 6. Kopolimerizacija akrilonitril/butadien/stirena [5]

3.3.1. Kopolimeri

Ovisno o broju istovrsnih mera u makromolekuli mogu se razlikovati homopolimeri (izgrađeni od jednog tipa mera) i kopolimeri (imaju dva ili više mera). S obzirom na uvjete odvijanja reakcije kopolimeri mogu biti raspoređeni statistički, u blokovima, naizmjenično ili mogu biti cijepljeni (slika 7). [4]

- statistički (*eng. random*)



- naizmjenični (*eng. alternating*)



- blok (*eng. block*)



- cijepljeni (*eng. graft*)



Slika 7. Vrste kopolimera [4]

3.3.2. Polimerne mješavine

To su mješavine komercijalno raspoloživih homopolimera i kopolimera, bez ikakve kemijske reakcije.

Svojstva takvih mješavina ovise o tome jesu li polimeri kompatibilni i koji je njihov udio u smjesi. Kompatibilnost pojedinih polimernih parova u svrhu dobivanja mješavine dobrih svojstava moguće je poboljšati na više načina, najčešće je to dodavanjem kompatibilizatora ili kemijskim modificiranjem.

Polimerne mješavine dijele se na ujednačene, one imaju isti udio komponenata i modificirane, kod kojih manje zastupljena komponenta djeluje kao modifikator svojstava (npr. kaučukom modificirani polistiren). [1]

4. SVOJSTVA POLIMERNIH MATERIJALA

4.1. Strukturna svojstva

Svojstva polimernih materijala ovise o nizu parametara od kojih su najvažniji:

- kemijski sastav,
- pravilnost u rasporedu lanaca makromolekula,
- vrsta i veličina supstituenata,
- vrsta i učestalost polarnih grupa,
- vrsta i broj ogranaka,
- pojava umrežavanja,
- prisutnost vodikovih veza,
- fleksibilnost lanaca,
- molekularna masa,
- raspodjela molekularnih masa.

Utjecanjem na granatost makromolekula, uređenost strukture i na veličinu molekularne mase može se u širokim granicama varirati niz svojstava polimera koja su značajna za tehničku primjenu. [2]

Makromolekule su osnovne strukturne jedinice polimera i njihovim međusobnim povezivanjem nastaje polimer čija svojstva ovise o:

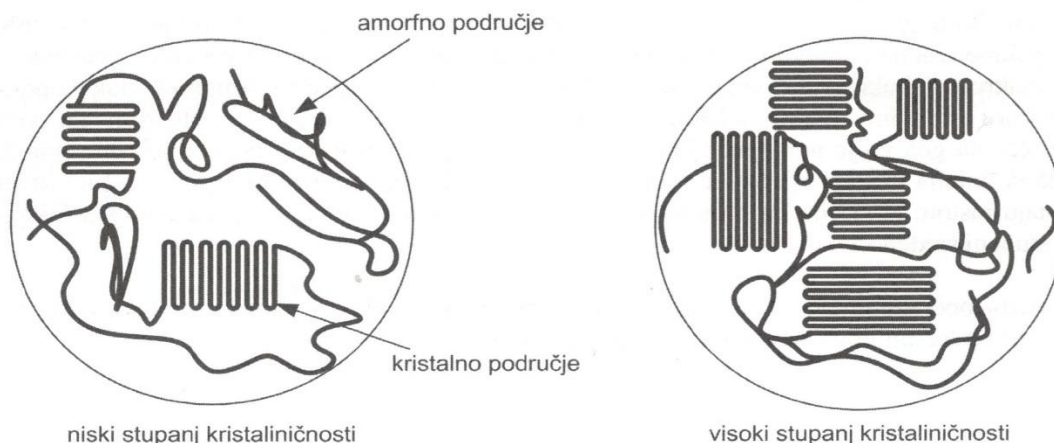
- prirodi veza između makromolekula,
- morfologiji.

Nastajanjem makromolekula, atomi se povezuju primarnim (međuatomnim, kemijskim), najčešće kovalentnim vezama, a makromolekule sekundarnim (međumolekulnim, fizikalnim) vezama. Sekundarne veze ostvaruju se pomoću stalnih Van der Waalsovih sila i pomoću promjenjivih dipola, odnosno Londonovih ili disperznih sila (slika 8). [1]

| VRSTA VEZA MEĐU MAKROMOLEKULAMA | STRUKTURA | PONAŠANJE PRI ZAGRIJAVANJU | GRUPA POLIMERA |
|---|----------------------------------|----------------------------|----------------|
| FIZIKALNE (Van der Waalsove, vodikove, Londonove privlačne sile) | AMORFNA LINEARNA KRISTALASTA | MEKŠA, TALI SE | PLASTOMERI |
| FIZIKALNE I KEMIJSKE | DJELOMIČNO UMREŽENA | MEKŠA, NE TALI SE | ELASTOMERI |
| KEMIJSKE (Kovalentne) | POTPUNO UMREŽENA | NE MEKŠA, NE TALI SE | DUROMERI |

Slika 8. Veze kod polimernih materijala [1]

Način slaganja makromolekula i njihov kemijski sastav znatno utječu na mogućnost sređivanja strukture polimera i na njegova svojstva. Stupanj sređenosti makromolekulne strukture polimernog materijala nazivamo stupnjem kristalnosti, on ovisi o građi makromolekule, uvjetima polimerizacije, duljini i grananju osnovnog lanca, a može varirati od 5 do 95% ukupnog volumena polimera (slika 9). [1]



Slika 9. Stupanj kristalnosti polimera [1]

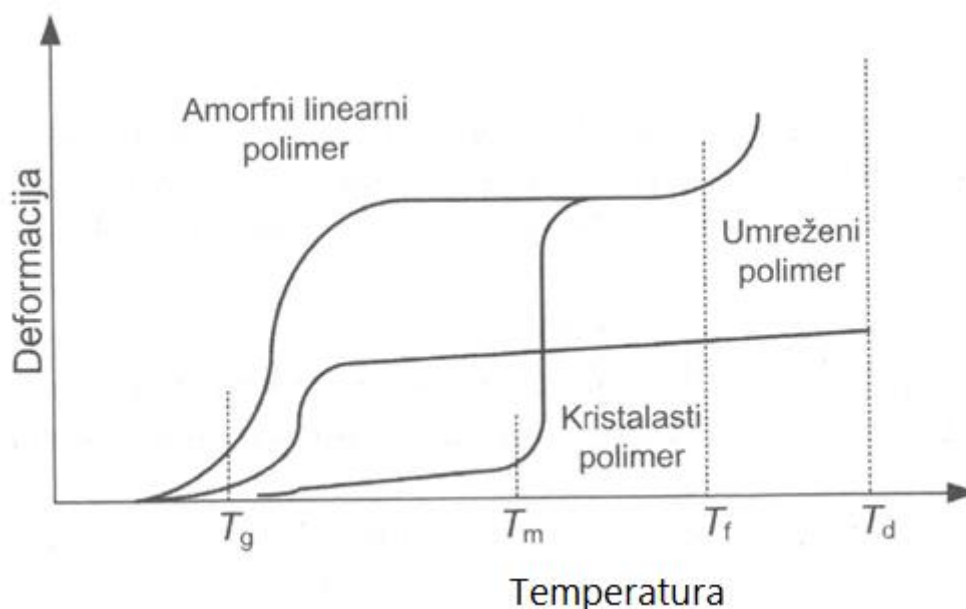
Suprotno kristalnom stanju je amorfno stanje kojega karakterizira nepravilan prostoran razmještaj, točnije izostanak stalnog i pravilnog poretka ili orijentiranja makromolekula u submikroskopskom području. S obzirom na orijentiranost lanaca amornog područja razlikujemo neorijentirane, djelomično orijentirane i visoko orijentirane lance.

4.2. Fizikalna i mehanička svojstva polimernih materijala

4.2.1. Fizikalna svojstva polimera

Proizvodnja polimernih tvorevina temelji se na zakonitostima elastične, plastične i viskozne deformacije, te promjenama zbog izmjene topline i kemijskih reakcija. Zbog deformacija, promjene strukture i kemijskih reakcija, svojstva gotovog proizvoda mogu se bitno razlikovati od svojstava polaznih polimernih i ostalih tvari, što zahtijeva dobro poznavanje mehaničkih, toplinskih i reoloških svojstava polimernih tvari i materijala u kapljevitom i čvrstom stanju u širokom rasponu temperatura i brzina deformacija.

Deformacija polimernog tijela ne ovisi samo o naprezanju već i o temperaturi, vremenu u kojem se deformacija opaža i brzini kojom se vanjska sila mijenja ili primjenjuje. Najbolji prikaz deformacije uzrokovane silom u ovisnosti o temperaturi prikazuje termomehanička krivulja (slika 10). Ovisno o temperaturi postoje tri različita fizička stanja: staklasto, gumasto i kapljevito stanje. [1]



Slika 10. Termomehanička krivulja (T_g -staklište, T_m -tečište kristalastih plastomera, T_f -tečište amornih plastomera, T_d -temperatura razgradnje) [1]

Prijelazi iz jednog u drugo stanje nisu tako oštri kao kod taljenja metalnih materijala. Postoje prijelazna temperaturna područja koja se prikazuju određenim temperaturama. Prijelaz iz staklastog (čvrstog) u gumasto stanje prikazuje se temperaturom staklišta T_g . Kod amornih plastomera prijelaz iz gumastog u kapljevito stanje prikazan je temperaturom tečišta T_f , dok se prijelaz u kapljevito stanje kod kristalastih plastomera prikazuje temperaturom tečišta T_m . Umreženi polimeri nemaju točku tečišta, umjesto toga dolazi do njihove razgradnje pri temperaturi razgradnje T_d .

Staklasto stanje označuje stanje amorfnih polimera u području nižem od staklišta. U ovom stanju spriječeni su procesi promjene mjesta cijele makromolekule i toplinsko gibanje segmenata lanaca i bočnih lanaca jedne makromolekule.

Gumasto stanje omogućuje gibanje segmenata lanaca i bočnih lanaca jedne makromolekule, što omogućuje istežanje dugačkih rahlo isprepletenih makromolekula u smjeru djelovanja vanjske sile (visoka elastičnost). Određeno je područjima temperature T_g i T_f .

Kapljevito stanje obilježeno je time da su atomi međusobno slobodno pokretljivi, ali su djelovanjem intermolekulnih sila toliko povezani da do gibanja dolazi promjenom mjesta cijele makromolekule i toplinskog gibanja segmenata lanaca i bočnih lanaca makromolekule. Promjena mjesta omogućena je oslobađanjem sekundarnih veza, posebno vodikovih mostova. Ovo stanje postoji iznad T_f . [1]

4.2.2. Klasifikacija polimernih materijala prema svojstvima

Svojstva materijala mogu se prikazati s različitih stajališta, što rezultira njihovim raznim klasifikacijama. Na slici 11 prikazana je sistematizacija svojstava polimernih materijala.



Slika 11. Sistematizacija svojstava polimernih materijala [1]

Stvarna svojstva definiraju materijal u prirodnim i tehničkim sustavima, što podrazumijeva fizikalna i kemijska ili iz njih izvedena svojstva. Odras su prirodnih znanosti i mjernih metoda te služe kao osnova pri svakom izboru materijala za određenu namjenu.

Atributivna svojstva opisuju materijal s aspekta tehničkih i društvenih sustava, tu spadaju estetska svojstva, cijena i modni trend, a važan su selektivni kriterij pri izboru materijala.

Procesna svojstva čine fizička i kemijska svojstva sirovina i proizvodnih strukturnih faza materijala, osnovna svojstva materijala, udarna svojstva i zamor materijala, obradljivost, dimenzijska stabilnost, zavarljivost, zapaljivost, toksičnost, antikoroziivnost, strukturne promjene materijala nastale tijekom uporabe i slično.

Proizvodna svojstva znače kombinaciju nekih unutrašnjih svojstava koja određuju sposobnost proizvodnje tvorevina, tijekom čije se proizvodnje polaznoj tvari dodaju brojna obilježja (oblik, orijentacija).

Uporabna svojstva ovise o proizvodnim postupcima i uvjetima, jer pri istom kemijskom sastavu polimernog materijala tvorevina može pokazivati razlike s obzirom na stupanj i obilježje orijentiranosti i kristalnosti te rekonstruiranost polimernog lanca na molekularnoj razini. [1]

U tablici 3 prikazan je pregled uporabnih svojstava polimernih materijala prema navedenoj sistematizaciji o kojima često treba voditi računa pri konstrukcijskoj primjeni istih. [2]

Tablica 3. Uporabna svojstva polimernih materijala [2]

| Uporabna svojstva | Naziv svojstva |
|-------------------|--|
| MEHANIČKA | čvrstoća, istežljivost, modul elastičnosti, tvrdoća, žilavost |
| TRIBOLOŠKA | faktor trenja, otpornost na trošenje |
| TOPLINSKA | toplinska vodljivost, temperatura omekšavanja, postojanost pri povišenoj temperaturi |
| ELEKTRIČNA | električna vodljivost, električni otpor, čvrstoća proboja, dielektrična svojstva |
| POSTOJANOST | kemijska postojanost |
| OSTALA SVOJSTVA | gustoća, propusnost svjetla, indeks loma, udio dodataka |

Tablica 4 prikazuje specifične prednosti i nedostatke polimernih materijala u odnosu prema drugim konstrukcijskim materijalima.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci polimernih materijala [2]

| Prednost | Nedostatak |
|--|---|
| mala gustoća | ovisnost svojstava o raznim utjecajnim faktorima |
| dobra kemijska postojanost | veća toplinska rastezljivost |
| dobra otpornost na trošenje | nizak modul elastičnosti |
| mali faktor trenja | mala površinska tvrdoća |
| dobro prigušivanje vibracija | podložnost starenju |
| dobra toplinska i elektroizolacijska svojstva | mala toplinska provodnost |
| preradljivost deformiranjem pri relativno malo povišenim temperaturama | utjecaj prerade na svojstva |
| ekonomična serijska izrada dijelova | neekonomična proizvodnja malih količina proizvoda |

4.2.3. Mehanička svojstva polimernih materijala

Mehanička svojstva određuju se brojnim statičkim i dinamičkim ispitivanjima. Kako bi se pri ispitivanjima uklonio utjecaj geometrije ispitivanog tijela, ispituju se epruvete propisanog oblika. Najkorisnija i najčešće primjenjivana metoda je utvrđivanje ponašanja u uvjetima naprezanje–deformacija.

Zbog makromolekulne prirode polimernih materijala to svojstvo se sa vremenom mijenja, pa se ispitivanja obavljaju i pri ponašanju naprezanje–deformacija–vrijeme. Opća metoda ispitivanja utjecaja sile na deformaciju i sklonost materijala prema lomu, koja omogućuje proučavanje cjelovitog ponašanja polimera od elastičnog istezanja do loma uključujući i sam lom, jest metoda vlačnog ispitivanja. Uređaj za ispitivanje je univerzalna kidalica, ispitno tijelo je epruveta, normiranog oblika, koja se rasteže uzduž glavne uzdužne osi konstantnom brzinom dok ne pukne, ili dok sila, ili produljenje, ne dosegnu predodređenu vrijednost.

Ovisno o vanjskim uvjetima, temperaturi i naprezanju, polimeri se mogu ponašati kao elastična tijela ili viskozne kapljevine. Uz viskoznost, u svakom je trenutku prisutna i viskoelastična komponenta deformacije. Viskoelastičnost je tipična za većinu polimernih materijala. Izuzetak su polimeri koji pokazuju samo viskoelastičnu deformaciju ili samo viskozno tečenje.

Najvažniji čimbenici koji određuju mehanička svojstva polimera su: prosječna molekularna masa, raspodjela molekularnih masa, stupanj reda kod amorfni polimera i stupanj kristalnosti. Mehanička svojstva polimera, koji sadrži različite dodatke, ovisit će uz ostalo i o vrsti dodatka, kompatibilnosti dodatka s polimerom, veličini čestica dodatka, raspodjeli tih čestica, i dr. Mehanička svojstva ovise i o vrsti primijenjene sile, a tri osnovna, najvažnija tipa sila su: vlačna, tlačna i smična. Također važne, ali puno kompleksnije su: savojna i torzijska sila. Deformacija polimera ima u općem slučaju tri komponente, elastičnu, viskoelastičnu i viskofluidnu deformaciju, a koliki je u nekom trenutku udio svake od komponenata u ukupnoj deformaciji ovisi o temperaturi, iznosu naprezanja i trajanju vanjske sile. [41]

Jedan od mogućih načina podjele mehaničkih svojstava polimernih materijala prikazan je u tablici 5.

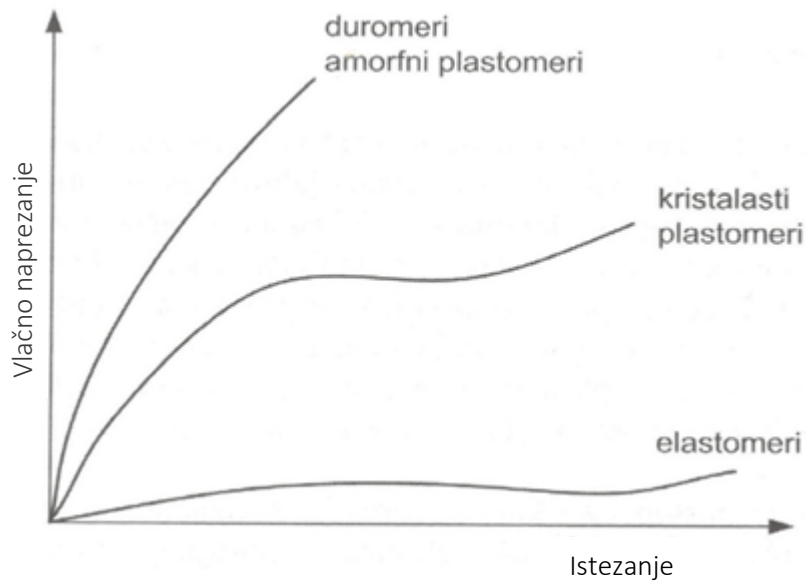
Tablica 5. Pregled mehaničkih svojstava polimernih materijala [2]

| MEHANIČKA SVOJSTVA | | | |
|-----------------------|--|------------------------------------|---|
| KRATKOTRAJNA SVOJSTVA | | DUGOTRAJNA SVOJSTVA | |
| udarno opterećenje | statičko opterećenje | statičko opterećenje | dinamičko opterećenje |
| žilavost | čvrstoća, modul elastičnosti i tvrdoća | statička izdržljivost (puzanje) | dinamička izdržljivost (umor materijala) |

4.2.3.1. Kratkotrajna mehanička ispitivanja

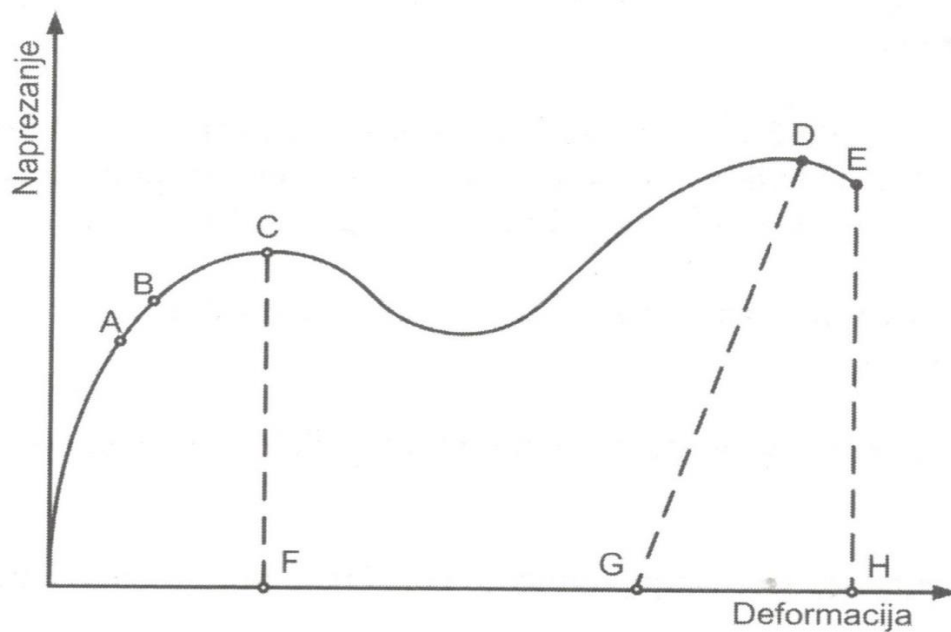
Kao kratkotrajno opterećenje definira se ono opterećenje pri kojem od početka ispitivanja, pa do kraja opterećivanja, odnosno loma ne prođe niti znatno više niti znatno manje od jedne minute. Iz te definicije proizlazi ovisnost mehaničkih svojstava o trajanju opterećenja.

Kod primjene polimera vrlo su važna mehanička svojstva materijala, a uzevši u obzir njihovu podjelu po osnovnim skupinama (plastomeri, duromeri, elastomeri) s obzirom na opterećenje kojem su izloženi i na strukturu od koje su izgrađeni, na Hooke-ovom dijagramu naprezanja i istezanja (slika 12) uočava se bitna razlika u njihovim svojstvima.



Slika 12. Hooke-ov dijagram "naprezanja-istezanja" osnovnih skupina polimernih materijala [2]

Pomoću Hooke-ovog dijagrama određuje se granica razvlačenja R_r , vlačna čvrstoća R_m i prekidna čvrstoća R_p , na način da se epruveta stegne u kidalici, a zatim se mjeri sila i produljenje (slika 13).

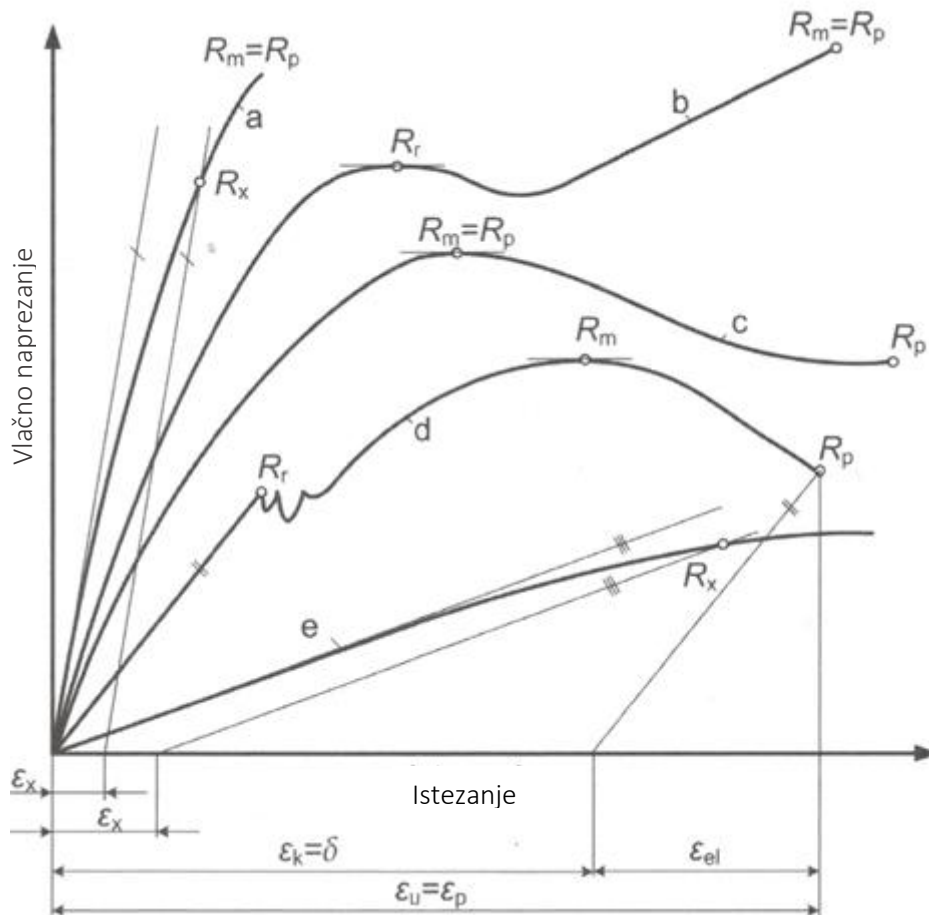


Slika 13. Opći Hooke-ov dijagram, "naprezanje-deformacija" [1]

Na slici 13 prikazana je A – granica proporcionalnosti, B – granica elastičnosti, C – granica tečenja, D – čvrstoća pri djelovanju maksimalnog opterećenja, E – nominalno naprezanje pri djelovanju sile koja razdvaja dijelove ispitka, F – deformacija pri granici tečenja, G – trajna deformacija po rasterećenju i H – ukupna deformacija. [1]

U slučaju vlačnog opterećenja, u odnosu na početnu duljinu određuje se ukupno (prekidno) istežanje (E_p).

Na slici 14 prikazano je nekoliko tipičnih oblika krivulja vlačnog „naprežanja – istežanja“, za različite materijale: a – sivi lijev ili polistiren, poli(metil-metakrilat), b – polietilen niske gustoće (PE-LD), c – poliamid (PA), d – niskouglični čelik, e – aluminij ili bakar.



Slika 14. Vrste krivulja pri vlačnom ispitivanju [1]

Granica razvlačenja je naprežanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R=F/A$). Djelovanjem sile na granici razvlačenja F_r , već pri malom povećanju istežanja dolazi do smanjenja sile, a produljenje se neproporcionalno povećava.

Konvencionalna granica razvlačenja je naprežanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istežanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuju granicu razvlačenja. Kod polimernih materijala dogovorena vrijednost trajnog istežanja je između 0,1 ili 1 %.

Vlačna čvrstoća je naprežanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete, ($R_m=F_m/A_0$).

Prekidna čvrstoća je naprežanje što ga izaziva prekidna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete, ($R_p=F_p/A_0$).

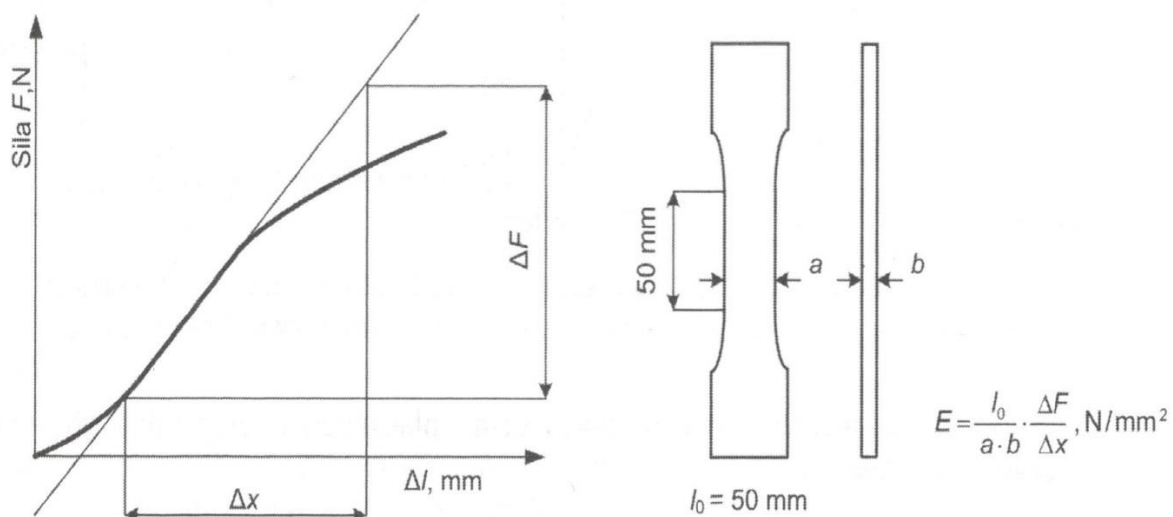
Konačno istezanje je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine epruvete.

Prekidno istezanje je omjer ukupnog (prekidnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete. [1]

Na oblik krivulje Hooke-ovog dijagrama (naprezanje-istezanje) polimernog materijala i na mehanička svojstva znatno utječu:

- molekulna i nadmolekulna struktura,
- intermolekulne vodikove veze - energija potrebna za kidanje vodikovih veza puno je veća od one za kidanje kovalentnih veza. Stoga intermolekulne vodikove veze u polimeru uzrokuju visoku vlačnu čvrstoću i visoko produljenje (obično visoku prekidnu čvrstoću prati malo produljenje).
- stupanj razgranatosti polimernih molekula - utječe na stupanj kristalnosti pa tako i na vlačna svojstva. Često kristalni polimeri imaju prekidno istezanje veće od amorfni, budući da kristalna područja djeluju kao ojačanje. Orijentiranjem amorfni i kristalni domena vlačna i prekidna čvrstoća se povećavaju. Umreženjem se dobivaju tvrdi i jaki polimeri.
- temperatura deformacije - isti polimer može biti lomljiv, žilav, bez ili s granicom razvlačenja, ili eventualno pokazivati hladno razvlačenje, ovisno o tome je li temperatura deformacije ispod ili iznad staklišta. Općenito, porastom temperature smanjuje se modul elastičnosti i naprezanje potrebno za istezanje uzorka.
- brzina deformacije - povećanjem brzine istezanja obično se smanjuje istezanje pri popuštanju materijala, ali se povećava prekidna čvrstoća. Polimerni lanci ne mogu se relaksirati budući da velike kinetičke jedinice nemaju dovoljno vremena za promjenu konformacije pa primjerice žilav materijal postaje krt.
- uvjeti procesa prerade polimera (izvlačenje, prešanje, itd.),
- aditivi (otapala, omekšavala, punila, ojačala i dr.),
- oblik uzorka (geometrijski oblik, film, folija, debljina uzorka),
- okolina u kojoj se materijal nalazi (ukoliko je izložen prisutnosti vlage, organskoj otopini ili otapalu). [41]

Važno je svojstvo i modul elastičnosti, koji je u općem slučaju faktor proporcionalnosti i označuje omjer između naprezanja i deformacije ($E=\sigma/\epsilon$). Određuje se postupnim povećanjem opterećenja koje djeluje na epruvetu te mjerenjem pripadnog produljenja. Uz pomoć Hooke-ovog dijagrama dolazi se do mogućnosti uočavanja linearnog područja proporcionalnog odnosa opterećenja i produljenja, te se primjenom odgovarajućih izraza za vlačno, odnosno savojno opterećenje mogu izračunati vrijednosti modula elastičnosti (slika 15). [2]



Slika 15. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala [2]

Ovisno o vrsti i strukturi polimernog materijala, razlikuje se vrijednost modula elastičnosti za svaki pojedini materijal. U tablici 6 prikazane su orijentacijske vrijednosti modula elastičnosti osnovnih skupina polimernih materijala.

Tablica 6. Orijentacijske vrijednosti modula elastičnosti polimernih materijala [2]

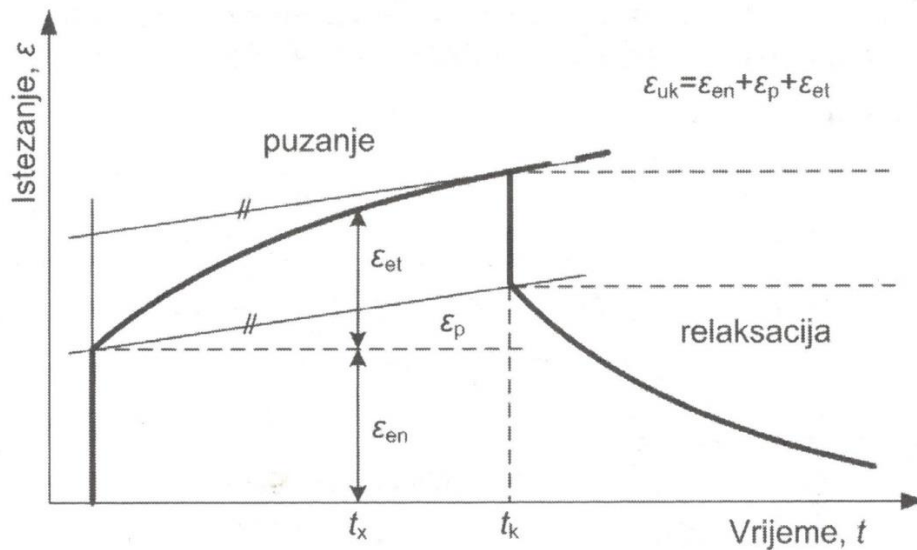
| Skupina polimernih materijala | | Modul elastičnosti, N/mm ² |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| PLASTOMERI | amorfni, neojačani | 2100 – 3500 |
| | amorfni, ojačani | Okolo 7000 |
| PLASTOMERI | kristalasti, neojačani | 150 – 3200 |
| | kristalasti, ojačani | 5000 – 11000 |
| ELASTOMERI | | 50 – 150 |
| DUROMERI | neojačani | 5000 – 12000 |
| | ojačani | 9000 – 15000 i više |

4.2.3.2. Dugotrajna mehanička ispitivanja

Za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala važno je poznavanje ponašanja materijala i u uvjetima dugotrajnog opterećenja, kod kojega razlikujemo statičko (dugotrajno nepromjenjivo) i dinamičko (dugotrajno ciklički promjenjivo opterećenje).

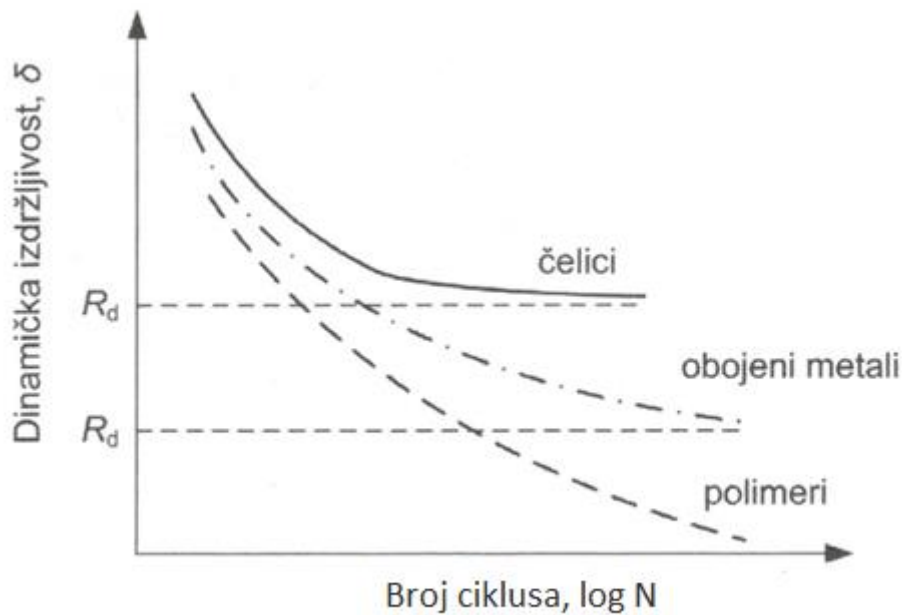
Kod dugotrajnog statičkog opterećenja javlja se puzanje, a kod dinamičkog opterećenja umor materijala, te se pojave mogu opisati statičkom i dinamičkom izdržljivošću. Statička izdržljivost je najveće dugotrajno statičko naprezanje, koje materijal, bez loma ili dostizanja granične deformacije može izdržati beskonačno dugo, a dinamička izdržljivost je najveće dinamičko naprezanje koje materijal može izdržati praktički beskonačno velik broj ciklusa, bez pojave loma.

Ponašanje polimernih materijala prilikom dugotrajnog statičkog opterećenja prikazano je na slici 16, gdje prilikom izlaganja materijala statičkom opterećenju nastaje puzanje, a nakon rasterećenja relaksacija, odnosno opuštanje. Početno istežanje materijala (ϵ_0) nastupa prilikom opterećivanja, a s naprežanjem je povezano sa izrazom kojim se definira modul elastičnosti. Faza puzanja vodi do pojmovna kao što su ukupno istežanje (ϵ_{uk}), plastično istežanje (ϵ_p) i entropijsko istežanje (ϵ_{et}). [2]



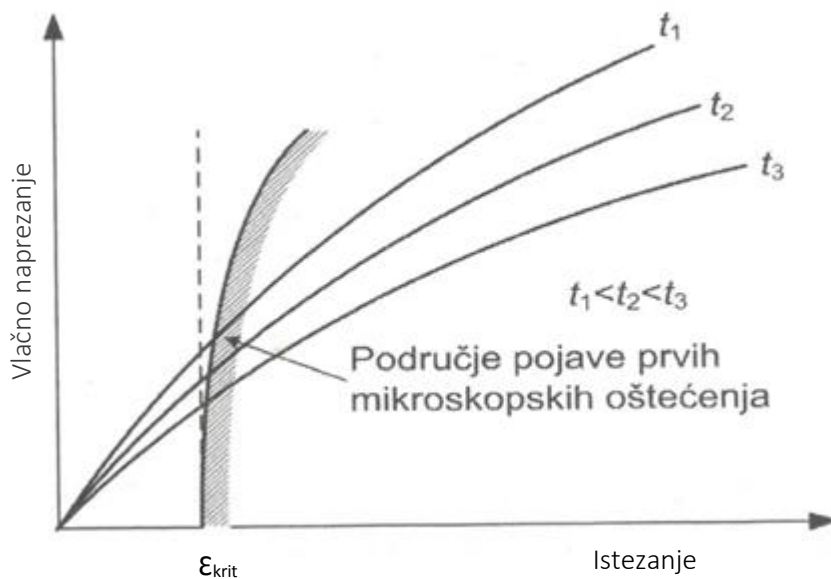
Slika 16. Prikaz ponašanja polimernih materijala kod dugotrajnog statičkog opterećenja [1]

Polimerni materijali izuzetno dobro prigušuju vibracije, što izaziva pojačano generiranje topline. Zbog niske toplinske vodljivosti povisuje se temperatura materijala, a mehanička svojstva polimernih materijala izravno ovise o temperaturi pa se rezultati ispitivanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju definiraju drugačije od drugih materijala. Na slici 17 tako treba uočiti različitost oblika Wohlerove krivulje koja omogućuje definiranje dinamičke izdržljivosti materijala, za čelike, obojene metale i polimere. Kod polimernih materijala tako treba uzeti u obzir i vremenski faktor kojim se označuje izdržavanje materijala samo na određeno vrijeme, odnosno na određen broj titraja bez puknuća.



Slika 17. Prikaz ponašanja polimernih materijala kod dinamičkog opterećenja [1]

Za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala važne su informacije koje proizlaze iz dijagrama „naprezanje – istezanje“. Na slici 18 prikazani su izokroni dijagrami koji sadrže krivulje koje pokazuju ovisnost „naprezanje – istezanje“ za opterećenja različitog vremenskog trajanja, najkraće vremensko opterećenje označeno je sa t_1 , dok su izrazima t_2 i t_3 označena postupno duža trajanja opterećenja. Vidljivo je kako u uvjetima dugotrajnog statičkog opterećenja pri sobnoj temperaturi, a još prije pri povišenim temperaturama, dolazi do mikroskopskog oštećivanja materijala. Zbog toga se definira kritično istezanje (ϵ_{krit}), kao vrijednost istezanja kod kojega niti nakon vrlo dugog trajanja opterećenja ne dolazi do pojave mikroskopskih oštećenja. [2]



Slika 18. Izokroni dijagram, "naprezanja - istezanja" [2]

U tablici 7 prikazane su orijentacijske vrijednosti kritičnih istezanja nekih polimernih materijala.

Tablica 7. Orijentacijske vrijednosti kritičnih istezanja polimernih materijala [2]

| Polimerni materijal | Kritično istezanje, % | Stanje |
|---|-----------------------|--------------------|
| Poli(vinil-klorid) | 0.8 – 1 | amorfno stanje |
| Poli(metil-metakrilat) | 0.8 – 1 | |
| Polikarbonat | 0.8 – 1 | |
| Polistiren | 0.2 – 0.3 | kristalasto stanje |
| Poli(oksimetilen) | 2 | |
| Poli(propilen) | 2 | |
| Polietilen niske gustoće | 4 | |
| Polietilen visoke gustoće | 2 – 3 | ojačani duromer |
| Nezasićena poliesterska smola + ojačalo | 0.4 – 0.6 | |

4.2.3.3. Tvrdća polimernih materijala

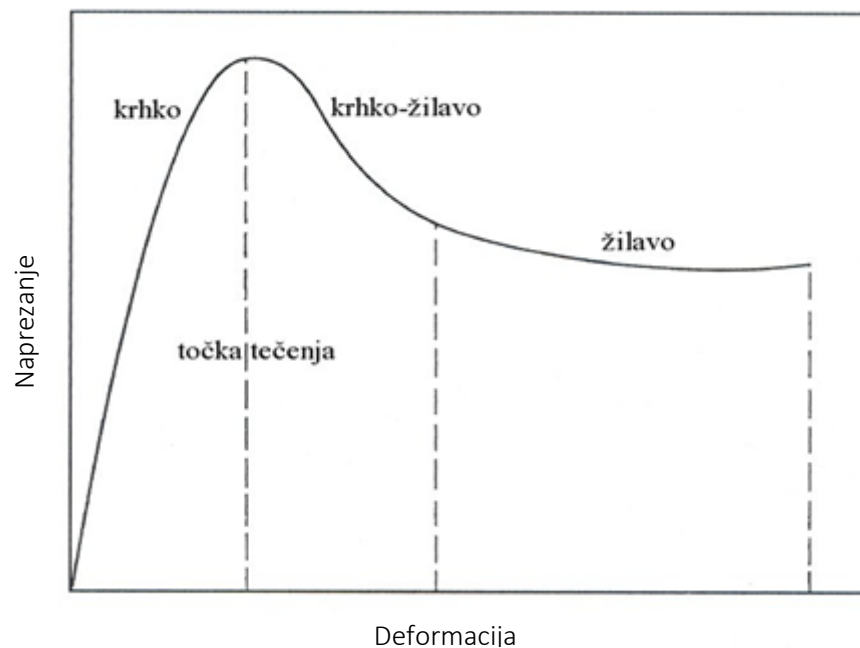
Tvrdoća je odgovor materijala na silu penetratora, odnosno otpornost materijala prema prodiranju drugog, tvrdjeg tijela. Uz pomoć podataka o tvrdoći polimernog materijala može se načiniti brza procjena čvrstoće i krutosti. Iz podatka o tvrdoći može se saznati koliko je materijal otporan na oštećivanje, trošenje i kakva je njegova obradivost. Rezultati mjerenja tvrdoće ovisni su o površini ispitnog tijela i o strukturnim nehomogenostima u materijalu.

Najzastupljenija metoda ispitivanja tvrdoće polimernih materijala je metoda utiskivanjem kuglice gdje uređaj mora biti postavljen i ispitivan sukladno normi HRN G.S2.143-1986, ISO 7619-1986. Tvrdoća polimernih materijala ispituje se i metodom po Shoreu A, HRN GS2.125-1986, koja se rabi kod ispitivanja mekših elastomera i ostalih elastičnih polimera, dok se metodom po Shoreu D G.S2.525-1984, ISO 868-1985 ispituju tvrdi uzorci.

Metodom po Barcolu, ASTM D2583, EN59 određuje se tvrdoća kod vrlo tvrdih polimera, poput ojačanih duromera i ostalih kompozita. Metoda po Rockwellu, ASTM D785 primjenjuje se za mjerenje tvrdoće krutih polimera, a upotrebljavaju se i ostale metode mjerenja tvrdoće poput Vickers i Knoop-Tukon metode. [1]

4.2.3.4. Žilavost polimernih materijala

Pojam žilavosti usko je povezan s pojmom trajne (plastične) deformacije i pojavom loma. Prema prisutnosti odnosno odsutnosti plastične deformacije u neposrednoj blizini loma razlikuju se krhki i žilavi lom, prema tome polimerni materijali dijele se na krhke i žilave (slika 19).



Slika 19. Prikaz krivulje "naprežanje - deformacija", žilavog materijala [43]

Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom predstavlja mjeru žilavosti materijala. Površina ispod krivulje naprezanje-deformacija pokazuje koliko je energije potrebno za deformaciju i lom materijala u uvjetima statičkog vlačnog opterećenja.

Kod žilavog loma prisutna je snažna plastična deformacija u svim koracima širenja pukotine sve do loma. Nastaje pri malim brzinama širenja pukotine i pri naprezanju većem od granice razvlačenja materijala. Kod krhkog loma, djelovanje naprezanja ne rezultira plastičnom deformacijom već samo elastičnom i početna mikropukotina brzo se širi duž određene kristalne ravnine (slika 20). Osim sklonosti nekih polimernih materijala krhkom lomu, on se javlja kod sniženih i niskih temperatura i velikih brzina prirasta naprezanja. Svojstvo žilavosti polimera moguće je poboljšati dodavanjem potrebnih modifikatora koji poboljšavaju strukturu materijala. [42]

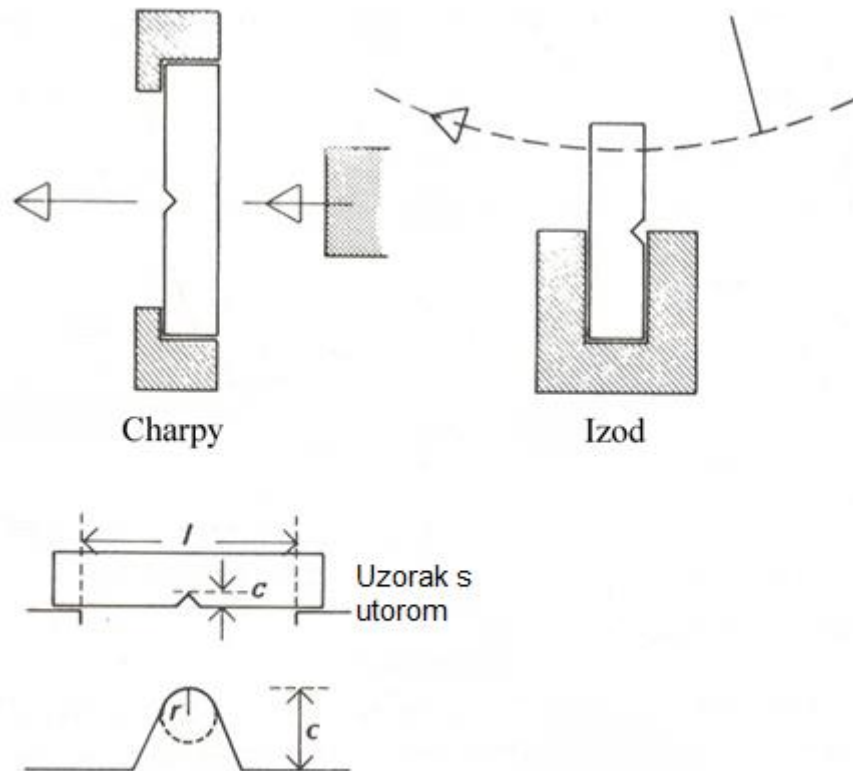


Slika 20. Prikaz krivulje "naprezanje - deformacija", krhkog i žilavog materijala [8]

Različite karakteristike žilavosti općenito definiraju sposobnost polimernog materijala da apsorbira energiju preko plastične deformacije odnosno da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala prema lomu. Mjere za žilavost predstavljaju različite karakteristike mehaničkih svojstava, koje se utvrđuju ispitivanjima uzoraka, u pravilu u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitni uzorci mogu biti glatki ili sa zarezom ovisno o karakteristici koja se ispituje. [42]

Udarni rad loma (mjerna jedinica: J) utvrđuje se po Charpy ili Izod metodi (slika 21) na ispitnim uzorcima kvadratnog presjeka s utorom (zarezom) u obliku slova U ili V tako da je oznaka udarnog rada loma KU ili KV, na način da bat udara u učvršćeni ispitni uzorak i izaziva njegov lom. Kod polimernih materijala uzorci mogu biti neurezani. Ukoliko se na ispitnim

uzorcima primjenjuje metoda po Izodu, uređaj mora biti postavljen i ispitan sukladno normi ASTM D256-A9, a prema Charpyu sukladno normi EN 10045-1:1990, HRN EN 10045-1:2003. [1]

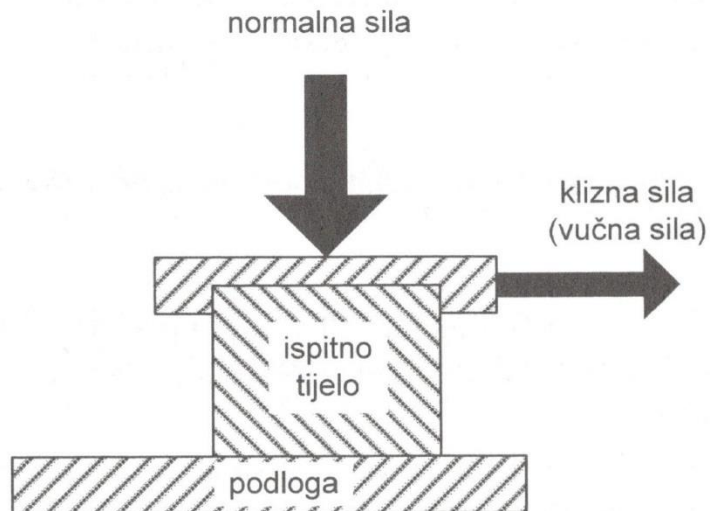


Slika 21. Prikaz ispitivanja udarnog rada loma Charpy i Izod metodom [43]

4.2.3.5. Tribološka svojstva

Prilikom dodira dvaju čvrstih tijela i njihovog gibanja pojavljuje se sila koja se suprotavlja relativnom gibanju ili težnji prema gibanju njihovih površina u dodiru, drugim riječima pojavljuje se trenje.

Kod takvog gibanja kinetička energija pretvara se u toplinsku energiju i ovisi o svojstvima tarnog para. Trenje definiramo faktorom trenja, koji je bezdimenzijska vrijednost omjera tarne sile između dva tijela i pritiskne sile (slika 22). Faktor trenja kod glatkih polimernih materijala može biti manji od 0.05, a u suprotnom slučaju, kod veće zahvaćenosti tarnog para i veći od 2.5. [1]



Slika 22. Određivanje faktora trenja [1]

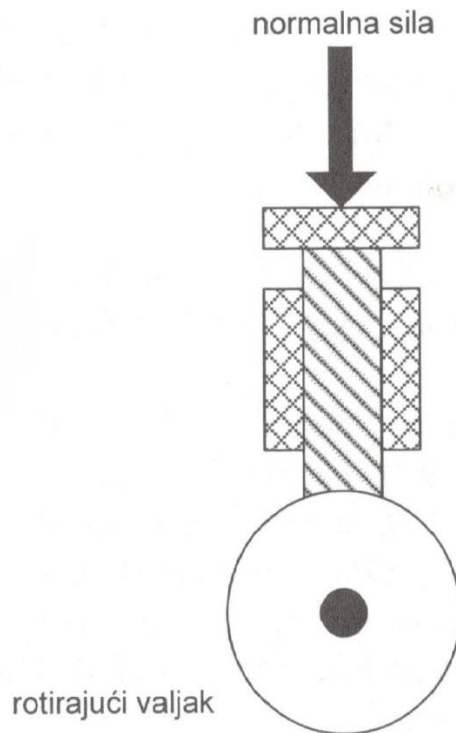
Razlikujemo dvije vrste trenja, statičko i dinamičko.

Statičko trenje pojavljuje se kada se tijela u međusobnom dodiru ne gibaju jedno prema drugome (npr. kreda i ploča). Najčešće je statičko trenje više nego dinamičko. Faktor statičkog trenja označava se s μ_s .

U statičko trenje svrstava se i tzv. valjajuće trenje koje se javlja u slučaju kada se objekt valja prema podlozi (npr. automobilski kotači, prema podlozi). Ovaj oblik trenja svrstava se u statičko trenje jer je vrlo malen dio pneumatika u dodiru s podlogom dok se pneumatik vrti. Faktor valjajućeg trenja označava se s μ_r .

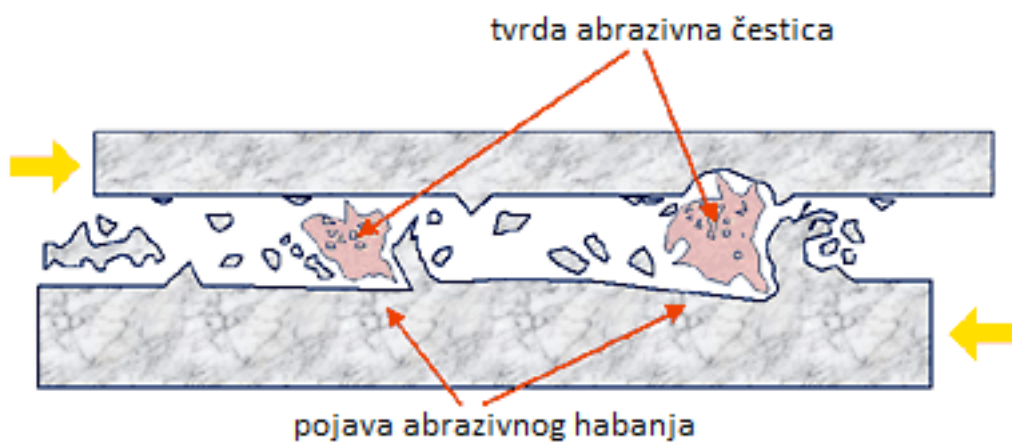
Dinamičko (kinetičko) trenje pojavljuje se kada se dva objekta kreću jedan prema drugome i međusobno se taru. Faktor dinamičkog trenja označava se s μ_k . Dinamičko trenje možemo opisati kao klizajuće (klizanje knjige po stolu), tekućinsko (trenje čvrstog objekta koji se kreće kroz tekućinu ili zrak) i kao električni otpor (trenje atoma u elektroničkim krugovima). [1]

Ovisno o materijalima, trenje može uzrokovati trošenje, odnosno postupno oštećenje koje nastupa na dodirnoj površini dvaju tijela koja se međusobno gibaju pri normalnim radnim uvjetima. Ispituje se pritiskivanjem ispitnog uzorka na rotirajući valjak (slika 23).



Slika 23. Određivanje iznosa trošenja [1]

Razlikujemo četiri vrste trošenja: abrazivsko, adhezijsko, trošenje zbog zamora materijala i tribokemijsko (trošenje zbog kemijskih promjena u graničnom sloju). Za polimerne materijale posebno je zanimljivo abrazivsko trošenje, odnosno trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama (slika 24).



Slika 24. Prikaz abrazivnog trošenja materijala [7]

5. PODJELA POLIMERA

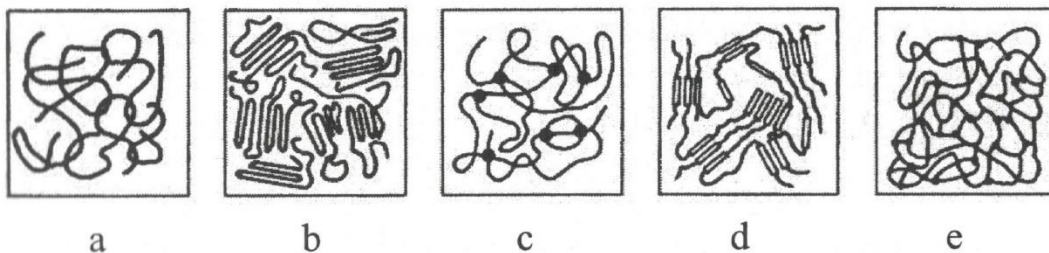
5.1. Osnovne podjele polimera

Prema postanku polimeri mogu biti:

- prirodni (polisaharidi, bjelančevine, kaučuk),
- sintetski organski [polipropilen, polietilen, polistiren, poli(metil-metakrilat), poliamid, poli(vinil-klorid), polikarbonat],
- sintetski anorganski (polisilani, polifosfazeni, silikoni).

Najviše je prihvaćena podjela polimera koja se zasniva na njihovu ponašanju pri povišenim temperaturama. Tako razlikujemo plastomere, elastomere i duromere.

Podjela polimera djelomično se zasniva i na uređenosti molekulne strukture, budući da glavna svojstva proizlaze iz nje. Strukturna uređenost na nadmolekulnoj razini odnosi se na raspored i međusobnu povezanost polimernih molekula. Te molekule u prostoru mogu biti djelomično pravilno raspoređene i tada se govori o amorfnoj strukturi plastomera. Polimerni lanci mogu biti i prostorno umreženi, što je slučaj kod duromera i elastomera (slika 25). [6]



Slika 25. Oblici molekulne strukture osnovnih polimernih skupina [6]

Slika 25 prikazuje: a) amorfnu strukturu plastomera, b) kristalastu strukturu plastomera, c) kemijski umreženu strukturu elastomera, d) fizikalno umreženu strukturu elastomera, e) amorfnu prostorno umreženu strukturu duromera. [6]

Uzevši u obzir ponašanje i strukturu polimernih materijala pri povišenim temperaturama, razlikuju se tri skupine polimernih materijala:

1. PLASTOMERI – specifično svojstvo im je to da prilikom zagrijavanja omekšavaju, postepenim porastom temperature raste i nepravilno gibanje atoma oko njihovih ravnotežnih položaja što dovodi do prekida veza među atomima. Zagrijavanjem najprije slabe sekundarne veze što omogućuje, tzv. tečenje plastomera (lakše uzajamno pomicanje lanaca makromolekula). Hlađenjem, sekundarne veze ponovno se uspostavljaju i materijal se vraća u prvobitno stanje. Ovaj proces je reverzibilan do određene temperaturne granice koja ovisi o materijalu koji se podvrgava tom procesu.

2. ELASTOMERI – zbog svojih strukturnih svojstava u stanju su podnijeti velika istezanja, čak i do više stotina postotaka od svoje početne duljine, na sobnoj temperaturi, a nakon rasterećenja vraćaju se u početni oblik. Karakterizira ih mala tvrdoća ali i velika elastičnost.
3. DUROMERI – materijali koji prilikom zagrijavanja mekšaju i kod samog procesa zagrijavanja dovode neumreženi duromer do umrežavanja, a tijekom nekog vremena pri uvjetima povišene temperature dolazi do njegovog otvrdnuća. Daljnje povišenje temperature vodi do razlaganja duromera bez prethodnog mekšanja.

Također, postoje i elastoplastomeri, odnosno polimerni materijali koji na povišenim temperaturama teku poput plastomera, a na niskim temperaturama se ponašaju kao elastomeri. Taljivi su i topljivi materijali koji bubre, prerađuju se postupcima tipičnim za plastomere, a uporabna svojstva su im slična svojstvima elastomera.

U tablici 8 navedena su obilježja spomenutih skupina polimernih materijala.

Tablica 8. Obilježja osnovnih skupina polimernih materijala [2]

| Naziv | Obilježja obzirom na: | | | Makromolekule |
|------------------|-----------------------|------------|----------|--------------------------|
| | Taljenje | Topljenje | Bubrenje | |
| DUROMERI | netaljivi | netopljivi | ne bubre | gusto prostorno umrežene |
| PLASTOMERI | taljivi | topljivi | bubre | linearne i granate |
| ELASTOMERI | netaljivi | netopljivi | bubre | rahlo prostorno umrežene |
| ELASTOPLASTOMERI | taljivi | topljivi | ne bubre | rahlo prostorno umrežene |

5.1.1. Plastomeri

Plastomeri su najzastupljenija skupina polimera sa udjelom od oko 90% ukupne proizvodnje polimernih materijala. Prema stupnju uređenosti strukture mogu biti amorfni i kristalasti.

Za njih je tipično da prilikom zagrijavanja i utjecajem povišene temperature dolazi do njihovog omekšavanja. Nakon faze omekšavanja, daljnjim zagrijavanjem se tale i u tom stanju moguće ih je oblikovati u željeni oblik. Hlađenjem se ponovno skrućuju i ovisno o vrsti stvaraju amorfnu ili kristalastu strukturu, uz to zadržavaju svojstva koja su imali u početnom obliku, prije zagrijavanja. Taj proces može se ponavljati više puta, ali pritom je važno zadržavanje konačne temperature prilikom zagrijavanja. Temperatura mora ostati ispod kritične vrijednosti za određeni polimerni materijal kako ne bi došlo do njegovog razlaganja.

U odnosu na polimere iz drugih skupina, plastomeri imaju relativno visoku čvrstoću, pogodni su za oblikovanje što omogućuje dobivanje proizvoda različitih oblika, a za razliku od duromera moguće ih je spajati i postupcima zavarivanja. [6]

Više od 80% svjetske proizvodnje plastike čine polietilen niske gustoće (PE-LD), linearni polietilen niske gustoće (PE-LLD), polietilen visoke gustoće (PE-HD), polipropilen (PP), amorfni poli(vinil-klorid) (PVC), polistiren (PS) te poli(etilen-tereftalat) (PET).

Za slučajeve u kojima svojstva navedenih plastomera za široku uporabu zbog određenih razloga ne zadovoljavaju zahtjevima, na raspolaganju se nalazi skupina konstrukcijskih plastomera, u koju spadaju poliamidi (PA 6 i PA 66), poli(oksi-metilen) (POM), poli(butilen-tereftalat) (PBT), poli(tetrafluoretilen) (PTFE), poli(metil-metakrilat) (PMMA), polikarbonat (PC) i akrilonitril/butadien/stiren (ABS). Navedena skupina konstrukcijskih plastomera nudi znatno bolja svojstva važna za tehničku primjenu, ali samim time zahtijeva i višu cijenu. Dobiveni su oplemenjivanjem osnovnog materijala raznim dodacima kako bi se dobila određena kombinacija svojstava. [6]

U tablici 9 navedeni su najzastupljeniji plastomeri i svrha njihove primjene.

Tablica 9. Najzastupljeniji plastomeri i njihova primjena [6]

| Naziv | Kratica | Karakteristične primjene |
|------------------------------|---------|---|
| Akrilonitril/butadien/stiren | ABS | kućišta aparata i strojeva, igračke, dijelovi strojeva |
| Poliamid | PA | strojni dijelovi, dijelovi kućišta aparata, medicinska oprema |
| Poli(butilen-tereftalat) | PBT | dijelovi crpki, električne instalacije, strojni dijelovi |
| Polikarbonat | PC | zamjena za staklo, električni dijelovi, medicinska oprema |
| Polietilen visoke gustoće | PE-HD | spremnici za kemikalije, vodu, otpad |
| Polietilen niske gustoće | PE-LD | pakiranja, vrećice, spremnici |
| Poli(metil-metakrilat) | PMMA | prozirni konstrukcijski elementi, zamjena za staklo |
| Poli(oksi-metilen) | POM | zupčanci, strojni dijelovi, dijelovi ležaja |
| Polipropilen | PP | spremnici, cijevi, dijelovi električnih aparata |
| Polistiren | PS | spremnici, rezervoari, cijevi, kućišta |
| Poli(tetrafluoretilen) | PTFE | oprema za procesnu industriju, ležajevi, brtve |
| Poli(vinil-klorid) | PVC | cijevi za vodu, kanalizacijske cijevi, folije, elektroizolacija |
| Stiren/akrilonitril | SAN | pribor za jelo, posuđe, dijelovi hladnjaka |

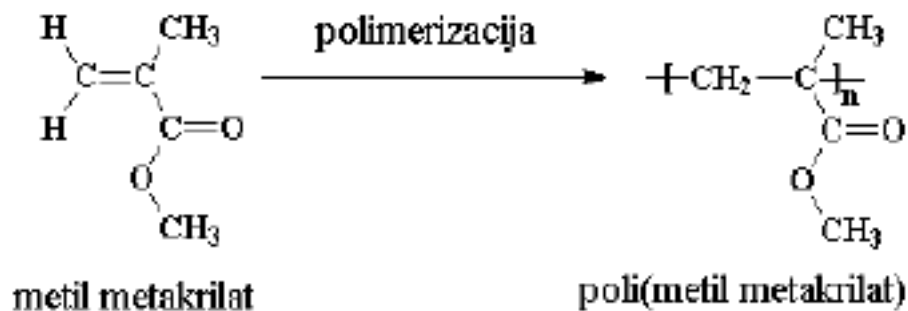
6. KONSTRUKCIJSKI PLASTOMERI U SANITARNOJ TEHNICI

6.1. Poli(metil-metakrilat) - PMMA

Poli(metil-metakrilat) amorfni je polimerni materijal iz porodice plastomera (relativne gustoće 1.19 g/cm^3), poznatiji kao akril ili akrilno staklo. S kemijske strane sintetički je polimer metil-metakrilata.

Povijesno gledajući, iz akrilne kiseline koja je kreirana 1843. godine, od koje je kasnije izvedena i metakrilna kiselina (1865. godine), te reakcijom između metakrilne kiseline i metanola, kao rezultat, dobiven je ester metil-metakrilat za kojeg se ispostavilo da je monomer poli(metil-metakrilata), (slika 26).

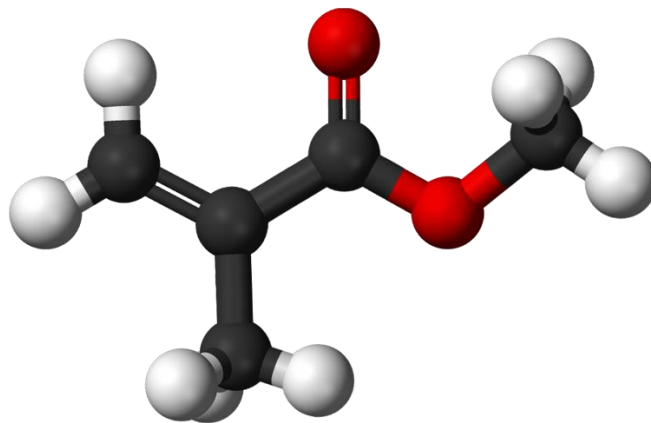
PMMA je otkriven 1872. godine, a prvi put komercijalno upotrebljen 1933. godine, tada je dobio i danas poznate komercijalne nazive Perspex i Plexiglas. Godine 1936. tvrtka Imperial Chemical Industries (danas poznata pod nazivom Lucite International) prva je započela proizvodnju i komercijalnu upotrebu akrilnog sigurnosnog stakla. Tijekom Drugog svjetskog rata primjenjuje se i za izradu prozora borbenih aviona. Zbog odlične postojanosti u morskoj vodi ubrzo se počinje upotrebljavati na prozorima podmornica, a u novije vrijeme nalazi primjenu u mnogim granama industrije. Spada u obitelj sintetičkih ili umjetnih plastičnih materijala, koji sadrže jedan ili više derivata akrilne kiseline, tvrd je i visokootporan na UV zračenja i atmosferske promjene. Lako je bojiv, moguće ga je lijevati, rezati, bušiti i toplinski oblikovati. Ova svojstva čine ga idealnim materijalom za izradu avionskih prozora, automobilskih svjetala, prometnih i reklamnih znakova. [9]



Slika 26. Polimerizacija metil-metakrilata i nastajanje poli(metil-metakrilata) [9]

6.1.1. Metil-metakrilat

Metil-metakrilat ester je metakrilne kiseline i bezbojna tekućina oštrog mirisa. Relativne gustoće 0.94 g/cm^3 , tališta na -48°C i vrelišta na 101°C . Molekulna struktura metil-metakrilata prikazana je na slici 27.



Slika 27. Molekulna struktura metil-metakrilata ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) [14]

Metil-metakrilat može biti dobiven na nekoliko načina. Uobičajen proces dobivanja metil-metakrilata je reakcija acetona i natrijeva cijanida, koja producira cijanohidrin. Cijanohidrin reagira sa metilnim alkoholom i proizvodi metil-metakrilat.

Slični monomeri poput metil akrilata i akrilonitrila mogu se pridružiti metil-metakrilatu kako bi formirali akrilnu plastiku drugačijih svojstava, tvoreći kopolimer. Baš kao kod metil-metakrilata, središnja dva ugljikova atoma spojena su dvostrukom vezom i kod oba malo prije spomenuta monomera ta veza razdvaja se tijekom polimerizacije i spaja se sa ugljikovim atomom drugih molekula. Upravo ta sličnost omogućuje proizvodnju kopolimera boljih elastičnih i mehaničkih svojstava. [9]

6.1.2. Proces proizvodnje poli(metil-metakrilata)

PMMA nastaje reakcijom monomera metil-metakrilata sa katalizatorom (organski peroksid) koji započinje reakciju i omogućuje polimerizaciju metil-metakrilata, ali na kraju nije dio gotovog polimernog materijala.

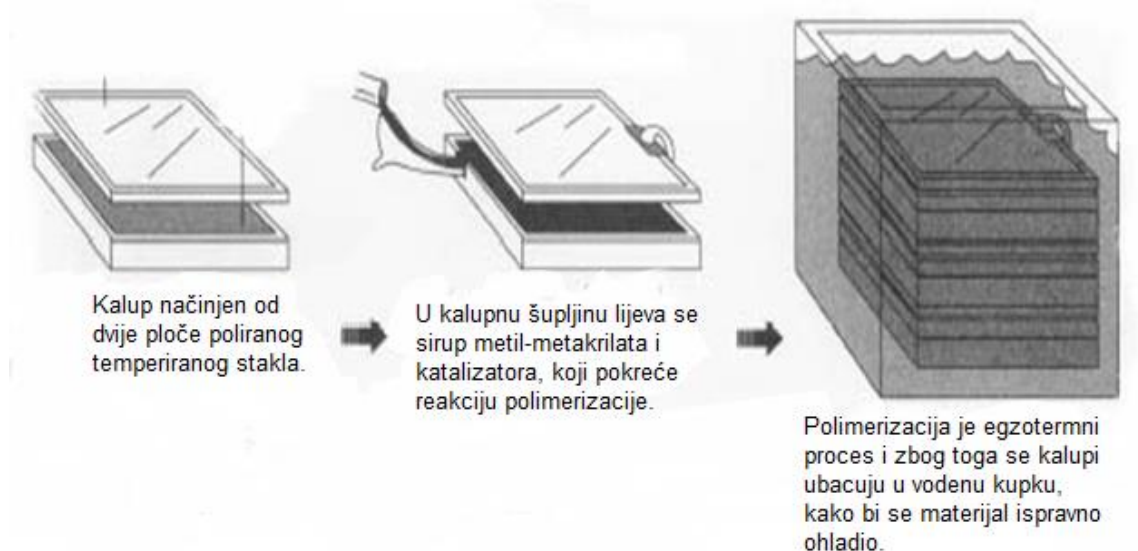
Relativno je tvrd i krut u odnosu na ostale polimere, moguće ga je polirati, ali osjetljiv je na koncentracije naprezanja. Moguće ga je i laminirati s poli(vinil-kloridom) kako bi se povećala žilavost, a kao poluproizvod može se kupiti u obliku ploča, šipki ili cijevi. Primarni proizvođači oblikuju ga procesima lijevanja i ekstrudiranja.

PMMA ploče mogu se dobiti serijskim i kontinuiranim procesom lijevanja u kojem metil-metakrilat polimerizira.

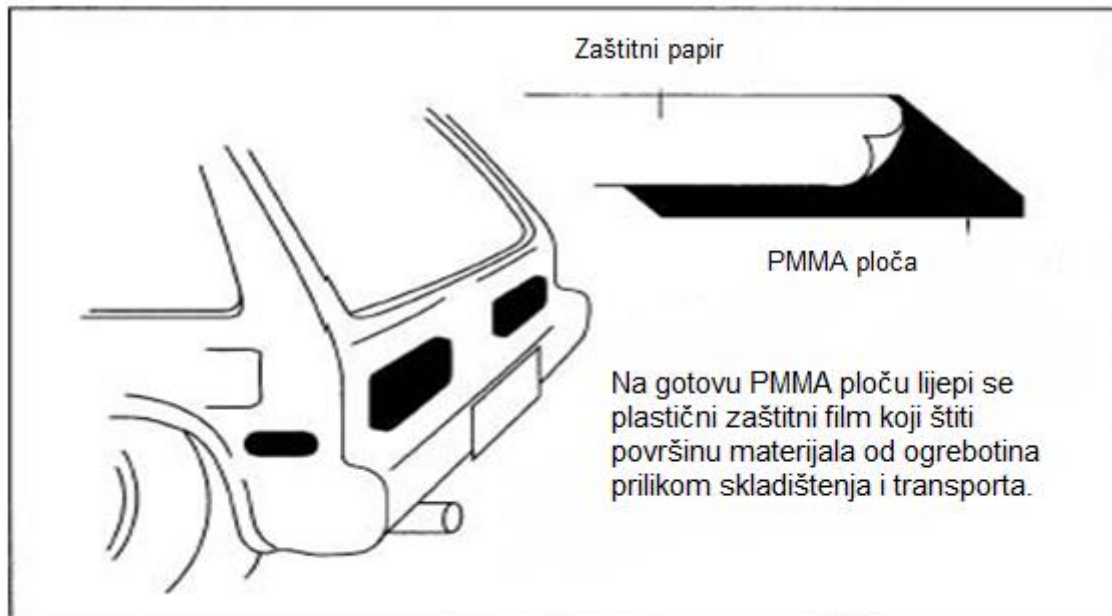
Serijsko lijevanje, najučestaliji je proces proizvodnje PMMA ploča (slika 28):

- odvija se u kalupima načinjenima od dvije ploče poliranog temperiranog stakla, naslaganim jednima na druge, a u kalupnu šupljinu lijeva se sirup metil-metakrilata i katalizatora,
- nakon toga kalup se zatvara, zabrtvi i ugrijava na temperaturu koja potpomaže katalizatoru pokrenuti reakciju polimerizacije. Kako je polimerizacija egzotermni proces, ona oslobađa toplinu koja zagrijava kalup. Oslobođenu toplinu potrebno je prigušiti, na način da se kalupi hlade zrakom ili se ubacuju u vodenu kupku, kako bi se materijal ispravno hladio i stvorio kvalitetan polimer. Vrijeme procesa hlađenja ovisi o debljini akrilnih ploča,
- nakon procesa hlađenja kalupi se otvaraju, čiste i pripremaju za novi proces polimerizacije,
- PMMA ploče zatim se podvrgavaju procesu normalizacije, gdje ih se ugrijava na temperaturu oko 140°C na nekoliko sati kako bi se reducirala moguća nakupljena naprezanja koja su hlađenjem ostala zarobljena u strukturi materijala,
- posljednji korak ovog procesa je prekontrolirati ploču i na gotovu PMMA ploču naljepiti plastični zaštitni film koji štiti površinu materijala od ogrebotina prilikom skladištenja i transporta (slika 29). [9]

Na ovaj način moguće je proizvesti prozirne ili obojene panele debljine i do 10 cm.



Slika 28. Primjer serijskog lijevanja poli(metil-metakrilata) [9]



Slika 29. Lijepljenje zaštitne folije na gotovu PMMA ploču [9]

Kontinuirano lijevanje slično je serijskoj proizvodnji samo se kod ove vrste procesa proizvode manje i tanje PMMA ploče, pa je proces izrade vremenski puno kraći.

Postupak ekstrudiranja, moderniji je i omogućava veću dimenzijsku točnost i proizvodnost od postupka lijevanja. Rastaljene polimerne granule istiskuju se kroz mlaznicu koja proizvodu daje oblik. Na ovaj način moguće je proizvesti ploče debljine do 1,2 centimetra. Nakon ekstrudiranja u materijalu se javljaju zaostala toplinska naprezanja na što je potrebno pripaziti ukoliko je ploča namijenjena daljnjem toplinskom oblikovanju.

Proces proizvodnje akrilne plastike sadrži visoko toksične supstance koje zahtijevaju veliki oprez i pažljivo rukovanje prilikom izrade gotovog materijala. Proces polimerizacije ove vrste zbog stvorene topline može rezultirati i eksplozijom ukoliko nije optimiziran, a sama polimerizacija ispušta otrovne pare. Plastik ovr vrste nije lako reciklirati, nije biorazgradiva i može biti lako zapaljiva. [9]

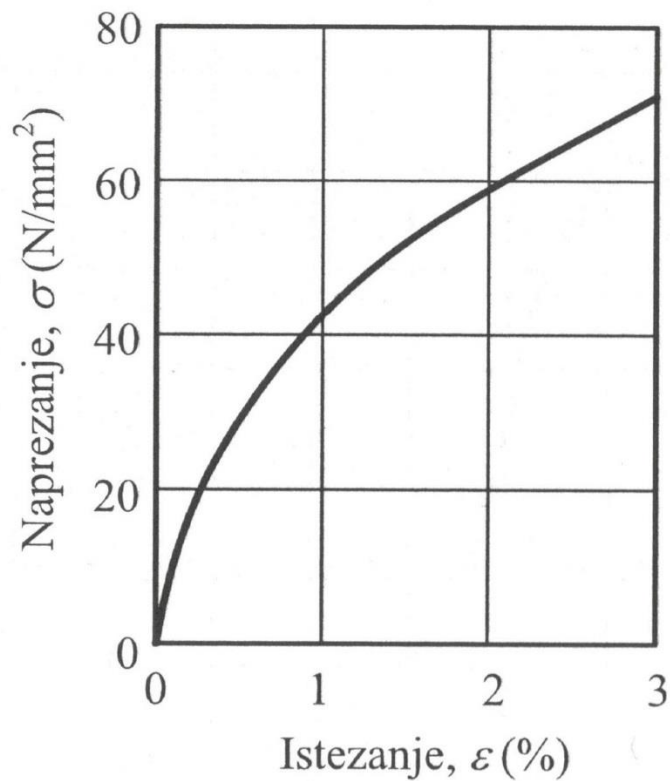
6.1.3. Mehanička svojstva poli(metil-metakrilata)

Poli(metil-metakrilat) konstrukcijski je plastomer, amorfne strukture, čija je temperatura staklastog prijelaza oko 100°C. Granične temperature primjene ovog plastomera su:

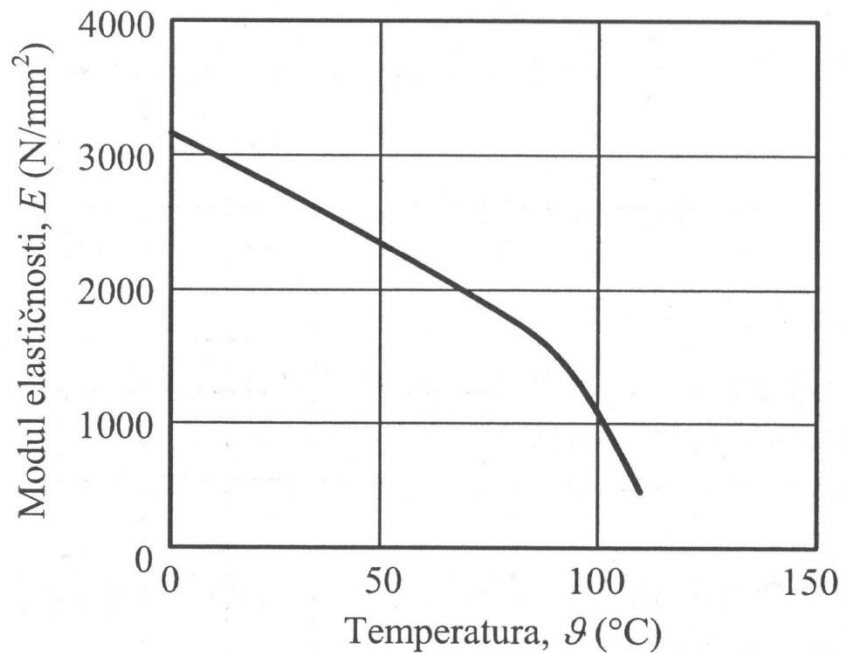
- za kratko vrijeme, približno 90°C
- za duže vrijeme, približno 65°C

Karakteristična svojstva PMMA su: visoka transparentnost s velikom otpornošću na djelovanje UV-zraka, otpornost na atmosferske uvjete i postojanost u morskoj vodi. [6]

Na slikama 30 i 31 prikazan je odnos naprezanja i istezanja poli(metil-metakrilata) i modul elastičnosti u ovisnosti o temperaturi.



Slika 30. Prikaz ovisnosti naprezanja o istezanju PMMA [6]



Slika 31. Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi za PMMA [6]

6.1.4. Modificiranje poli(metil-metakrilata)

Čisti PMMA rijetko se može naći u komercijalnoj upotrebi kao konačan proizvod. Uglavnom je modificiran drugim monomerima i dodacima koji dopunjuju njegova svojstva. Upravo zbog toga i temperatura staklišta PMMA varira od 85°C do 170°C.

Tako se u strukturu PMMA često dodaje:

- butil akrilat koji poboljšava otpornost na udar,
- dibutil ftalat koji poboljšava svojstvo plastičnosti materijala,
- metakrilna kiselina koja povišuje temperaturu staklišta,
- razni omekšivači koji omogućavaju svojstva lakše izrade materijala i snizuju temperaturu staklišta,
- boje koje zaštićuju materijal od UV zračenja,
- punila koja materijalu daju veću isplativost kod proizvodnje i drugi dodaci. [10]

Poli(metil-metakrilat) svoju primjenu pronašao je u medicini, kod izrade znakova, spremnika, kućišta za električnu opremu, stražnjih svjetala na automobilu, ležaljka za plažu, namještaja i optičkih medija, dok se PMMA bez dodanih bojila primjenjuje u proizvodnji leća, akvarija, prozirnih dijelova kokpita, prozora aviona, zaštitnih ograda na terenu za hokej, u izradi zaštitnih naočala i prozora (slika 32), te u sanitarnoj industriji za izradu panela i vrata tuš kabina.



Slika 32. PMMA zaštitne naočale i prozorski paneli [15]

Komercijalna imena PMMA: Acrive, Acrylite, Acryrex, Altuglas, Cyrolite, Diakon, Glasflex, Goldrex, Lucite, Lucryl, Optix, Oroglas, Perspex, Plexiglas, Plexit, Sumiplex.

6.1.5. Primjena poli(metil-metakrilata) u proizvodnji kada i tuš kada

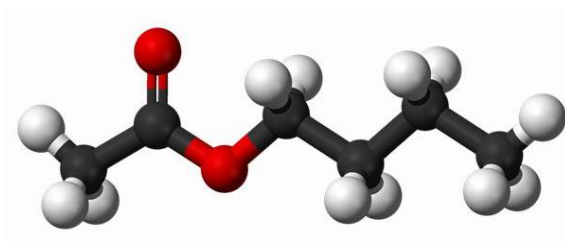
Posljednjih dvadesetak godina PMMA se primjenjuje u izradi kupaonskih i tuš kada. Najprije se koristio ekstrudirani PMMA koji je bio lakši od keramičkih i metalnih kada, lakše se oblikovao, a samim time i montirao u kupaonice. Ipak, uz navedene prednosti, ekstrudirani PMMA je imao dosta nedostataka (lako puca, s vremenom žuti, a ogrebotine koje nastanu normalnom uporabom gotovo je nemoguće ukloniti).

Nedugo zatim u uporabu je ušao lijevani sanitarni PMMA koji se dobiva drugačijim postupkom proizvodnje od ekstrudiranog poli(metil-metakrilata). Ima praktički neograničen vijek trajanja uz nepromijenjena svojstva neovisno o izloženosti vanjskim čimbenicima (toplina, sunce, hladnoća, prašina itd.). Usprkos njenoj minimalnoj težini i debljini, gotovo ga je nemoguće slomiti. Zbog svojih kvalitetnih osobina, površinu kupaonskih kada teško je ogrepsti i oštetiti tijekom normalne uporabe, a ukoliko se to dogodi, materijal se jednostavno vraća u prvobitno stanje pomoću brusnog papira visoke granulacije. [11]

Sanitarni PMMA koji se koristi u ove svrhe oplemenjen je butil akrilatom koji ovome materijalu poboljšava otpornost na udar i dibutil ftalatom koji mu poboljšava svojstvo plastičnosti. [12]

6.1.5.1. Butil akrilat

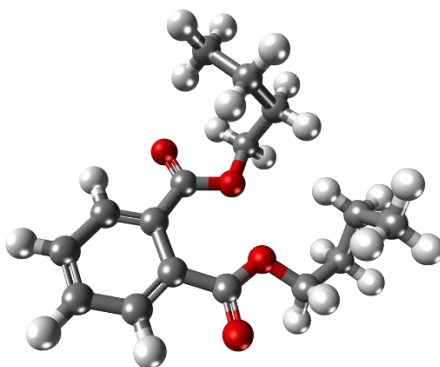
Butil akrilat je bezbojna tekućina karakteristična snažna mirisa, točke tališta na -64°C , a vrelišta na 147°C . Lako se miješa sa mnogim organskim otapalima, lako polimerizira i donosi dobra svojstva monomeru s kojim reagira tijekom polimerizacije, od kojih je naznačajnije povećanje otpornosti na udar. Često se koristi u proizvodnji homopolimera i kopolimera poput metakrilata, akrilonitrila, vinil acetata, vinil klorida, stirena, butadiena i mnogih drugih monomera, kao i u proizvodnji boja, brtvila, premaza, ljepljiva, goriva i tekstila. Molekulna struktura butil akrilata prikazana je na slici 33. [13]



Slika 33. Molekulna struktura butil akrilata ($\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_2$) [16]

6.1.5.2. Dibutil ftalat

Dibutil ftalat je često upotrebljiv plastifikator, bezbojna ili pomalo žuta tekućina uljane strukture, čija je točka tališta na -35°C , a točka vrelišta na 340°C . Najčešće se koristi za poboljšavanje svojstava žilavosti mnogih polimera, kod proizvodnje ljepljiva, brtvila i smjesa za fugiranje. Molekulna struktura dibutil ftalata prikazana je na slici 34. [17]



Slika 34. Molekulna struktura dibutil ftalata ($\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$) [18]

6.1.5.3. Prednosti sanitarnog poli(metil-metakrilata)

Kupaonske i tuš kade izrađene od lijevanog sanitarnog poli(metil-metakrilata) imaju mnoštvo prednosti nad keramičkim i metalnim tipovima istih, kao na primjer:

- zahvaljujući kvaliteti i savitljivosti ovog materijala, toplinskim oblikovanjem moguće je dizajnirati ergonomične oblike kupaonskih kada,
- gotov PMMA proizvod daleko je lakši od keramičkih i metalnih tipova kupaonskih i tuš kada,
- održavanje je puno jednostavnije, potrebno je samo periodično ispiranje prljavštine neabrazivnim sredstvima,
- površina PMMA kupaonskih kada iznimno je glatka i postojana na molekularnoj razini, pa se bakterije i ostali patogeni elementi na njoj ne nakupljaju. [11]

6.1.6. Proces dobivanja gotovog proizvoda

PMMA kupaonske i tuš kade dobivene su procesom toplinskog oblikovanja u kojem se PMMA ploče zagrijavaju na visoku temperaturu kako bi se mogle oblikovati pomoću vakuma i dizajniranih kalupa. Na kraju ovog dijela procesa dobiva se tzv. ljuska ili vanjski oblik kade. Ta ljuska je još uvijek presavitljiva pa ju je potrebno ojačati. Ojačavanje kupaonskih i tuš kada odvija se pomoću procesa nanošenja smole i staklene vune preko donjeg dijela ljuske i iverice postavljene na ključna mjesta. Vrlo je bitno da se slojevi ovih ojačavajućih materijala nanesu ravnomjerno i u savršenoj količini kako bi krajnji proizvod bio predviđene težine i čvrstoće. Zadnji korak uključuje proces završne obrade, kontrole i pakiranja i kupaonska kada je spremna za komercijalnu upotrebu (slike 35 i 36). [11]



Slika 35. PMMA kupaonska kada [19]



Slika 36. PMMA tuš kada [20]

6.2. Akrlonitril/butadien/stiren

Akrlonitril/butadien/stiren (ABS) je dvofazni sustav kopolimera SAN (kopolimer stirena i akrilonitrila) i fino dispergiranih čestica elastomera polibutadiena.

Proizveden je i stavljen u komercijalnu upotrebu 1940-ih godina, od tada njegova prodaja i potražnja iz godine u godinu rastu, te s vremenom postaje jedan od vodećih konstrukcijskih plastomera u svijetu. Godine 1982. upotreba akrilonitril/butadien/stirena u pojedinim zemljama u SAD-u varirala je u prosjeku, po osobi od 0.3 do 1.5 kg. Prodaja akrilonitril/butadien/stirena u SAD-u 1989. godine iznosila je 1.2 milijarde funti. Od tog razdoblja potražnja za konstrukcijskom plastikom i akrilonitril/butadien/stirenom svake godine rasla je za 4%, a 2006. godine iznosila je 1.6 milijarda funta.

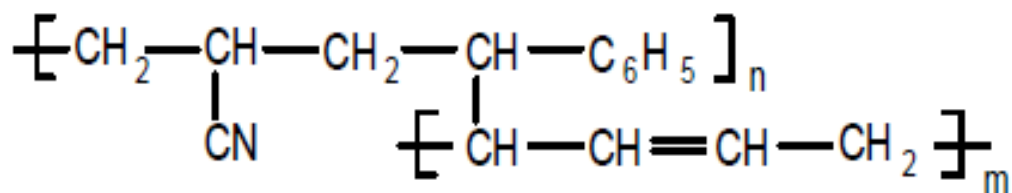
Godine 2001. od svih vrsta konstrukcijske plastike, ABS je dostigao najveću potrošnju u svijetu (28.8%). [21]

ABS sadrži 21% do 27% akrilonitrila, 12% do 25% butadiena i 54% do 63 % stirena.

Stiren i akrilonitril kopolimerizacijom tvore stiren/akrlonitril (SAN) kopolimer čiji omjer uglavnom iznosi 70/30, S/AN. SAN je tipični kopolimer sa izvrsnom kemijskom otpornošću, višom površinskom tvrdoćom i žilavošću. Komercijalnu primjenu kao kopolimer nalazi u proizvodnji kućišta za baterije, jednokratnih upaljača i kućnih potrepština, dok butadien

polimerizacijom tvori polibutadien (sintetsku gumu) koji akrilonitril/butadien/stirenu daje otpornost na udar, bolju žilavost i veću otpornost na niske temperature.

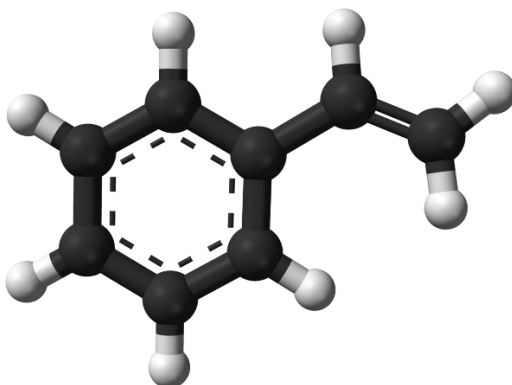
Sva tri monomera koja tvore ABS od posebne su važnosti i materijalu daju drugačija svojstva. Molekulna struktura akrilonitril/butadien/stirena prikazana je na slici 37. [21]



Slika 37. Molekulna struktura akrilonitril/butadien/stirena [21]

6.2.1. Stiren

Stiren je tekući ugljikovodik dobiven dehidrogeniranjem etilbenzena (derivata ugljena). Bezbojna je i slatkasto aromatizirana tekućina koja lako isparava, relativne gustoće 0.909 g/cm³, čija je točka tališta na -31°C, a vrelišta na 145°C. Monomer je polistirena i nekoliko drugih kopolimernih spojeva. Molekulna struktura stirena prikazana je na slici 38.



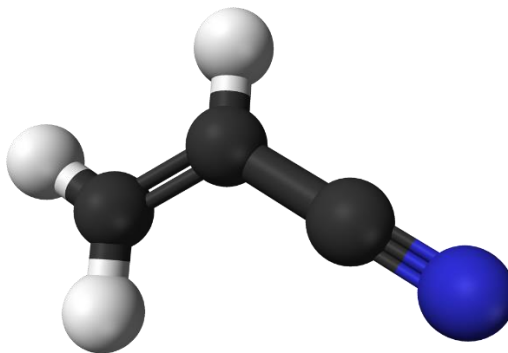
Slika 38. Molekulna struktura stirena (C₈H₈) [22]

Proces dehidrogenizacije etilbenzena otkriven je 1930-ih godina, a njegova proizvodnja bitno se povećala 1940-ih godina kada se masovno počeo koristiti u proizvodnji sintetske gume.

Prisutnost vinilnih grupa omogućuje stirenu da pod utjecajem topline i katalizatora lako polimerizira u polimer polistiren i kopolimere od kojih su najpoznatiji ABS, stiren-butadien (SBR) i stiren/akrilonitril (SAN). [23]

6.2.2. Akrilonitril

Akrilonitril je bezbojna, zapaljiva, reaktivna tekućina otkrivena od strane francuskog kemičara Charlesa Mourea 1893. godine. Relativne gustoće od 0.81 g/cm^3 , čija točka tališta iznosi $-84 \text{ }^\circ\text{C}$, a vrelišta 77°C . Na slici 39 prikazana je molekulna struktura akrilonitrila.

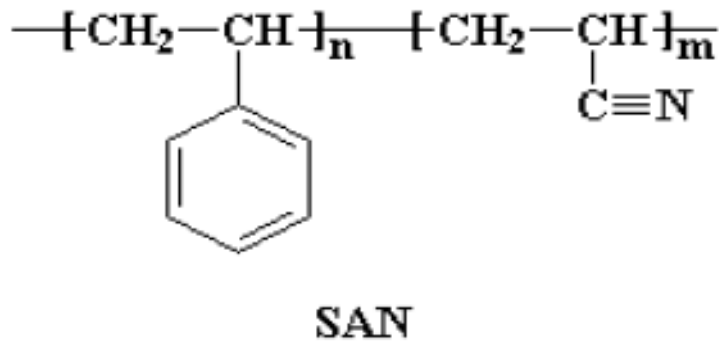


Slika 39. Molekulna struktura akrilonitrila ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$) [24]

Proces proizvodnje akrilonitrila sastoji se od oksidacije propilena u prisutnosti amonijaka i katalizatora. Akriilonitril polimerizacijom tvori polimer poliakrilonitril (PAN) i kopolimere poput stiren/akrilonitrila (SAN), akrilonitril/butadien/stirena (ABS), akrilonitril/stiren/akrilata (ASA), akrilonitril-butadiena (NBR), a koristi se i u proizvodnji akrilnih vlakana. [25]

6.2.3. Stiren/akrilonitril kopolimer (SAN)

Stiren/akrilonitril je plastomer koji čini prvu fazu akrilonitril/butadien/stirena, a sastoji se od statistički raspoređenih monomernih jedinica stirena i akrilonitrila. Dobiva se kopolimerizacijom monomera stirena i monomera akrilonitrila. Polimerizacija se odvija u suspenziji i slična je polimerizaciji polistirena (događa se na temperaturi od 70 do $90 \text{ }^\circ\text{C}$). Udio akrilonitrila u toj suspenziji iznosi $20 - 30 \%$, a najčešće je omjer stiren/akrilonitril, $76/24 \%$. Udio akrilonitrila veći od 30% nije poželjan jer daje žutu nijansu materijalu. Na slici 40 prikazana je molekulna struktura SAN kopolimera. [26]



Slika 40. Molekulna struktura SAN kopolimera [26]

Svojstva stiren/akrilonitrila ovise o udjelu akrilonitrila, povećanjem njegova udjela (do 30 %) u materijalu se poboljšava:

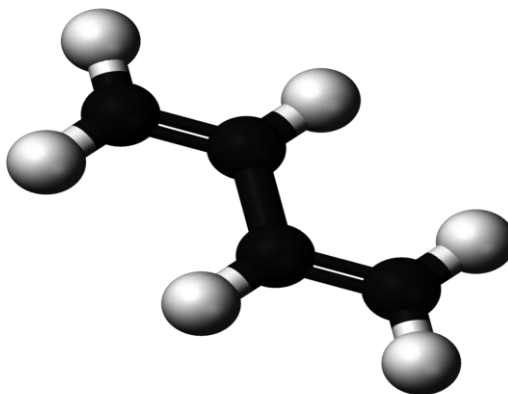
- otpornost na kemikalije,
- toplinska i UV postojanost,
- svojstva površine,
- viskoznost taljevine i tvrdoća,
- savojna čvrstoća i žilavost.

Primjena ovog kopolimera slična je kao i primjena polistirena (dijelovi hladnjaka, kozmetička ambalaža, kuhinjski pribor), a razlika između polistirena i SAN kopolimera vidljiva je u gore navedenim poboljšanim svojstvima, kojima doprinosi visoki udio akrilonitrila u materijalu.

Ovaj kopolimer najčešće se prerađuje injektiranjem, ekstrudiranjem, puhanjem i prešanjem. [27]

6.2.4. Butadien

Butadien je nezasićeni ugljikovodik, predstavnik diena, bezbojan, lako zapaljiv i vrlo reaktivan plin koji lako polimerizira. Na slici 41 prikazana je molekularna struktura butadiena.

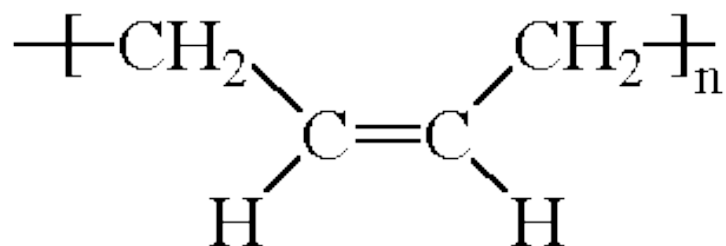


Slika 41. Molekulna struktura butadiena (C_4H_6) [28]

Industrijski se pripravlja iz smjese C_4 -ugljikovodika, koji potječu od nafte i prirodnog plina, a najzastupljeniji proces proizvodnje butadiena je ekstrakcija ugljikovodika koja se događa pri visokim temperaturama gdje ugljikovodici otpuštaju vodik i stvaraju kompleksnije ugljikovodične spojeve, uključujući i butadien. Butadien se nakon toga izolira od ostalih tipova ugljikovodika koji su nastali pod istim uvjetima, pomoću destilacije uz upotrebu otapala poput acetonitrila ili furfurala. Butadien je monomer koji polimerizacijom tvori polibutadien, i kopolimere akrilonitril/butadien/stiren (ABS), akrilonitil-butadien gumu (NBR) i stiren-butadien gumu (SBR). [29]

6.2.5. Polibutadien

Polibutadien je druga faza kopolimera akrilonitril/butadien/stirena, poznat je pod nazivom umjetna guma, a dobiva se polimerizacijom butadiena. Sintetički je elastomer i nekristalizirajući polimer niskog staklišta ($-90^\circ C$) i nezasićenih dvostrukih veza. Najvažnije svojstvo mu je visoka otpornost na habanje, zbog čega se uvelike koristi u proizvodnji guma. Osim toga, koristi se i kao dodatak drugim materijalima sa svrhom povećanja žilavosti i otpornosti na udar. Uglavnom se dodaje polistirenu i akrilonitril/butadien/stirenu. Na slici 42 prikazana je molekularna struktura polibutadiena. [1]



Slika 42. Molekulna struktura polibutadiena [30]

Polibutadien se primjenjuje u izradi guma, kao modifikator drugim plastičnim materijalima i u izradi golf loptica (slika 43).



Slika 43. Golf loptica i guma proizvedeni od polibutadiena [31]

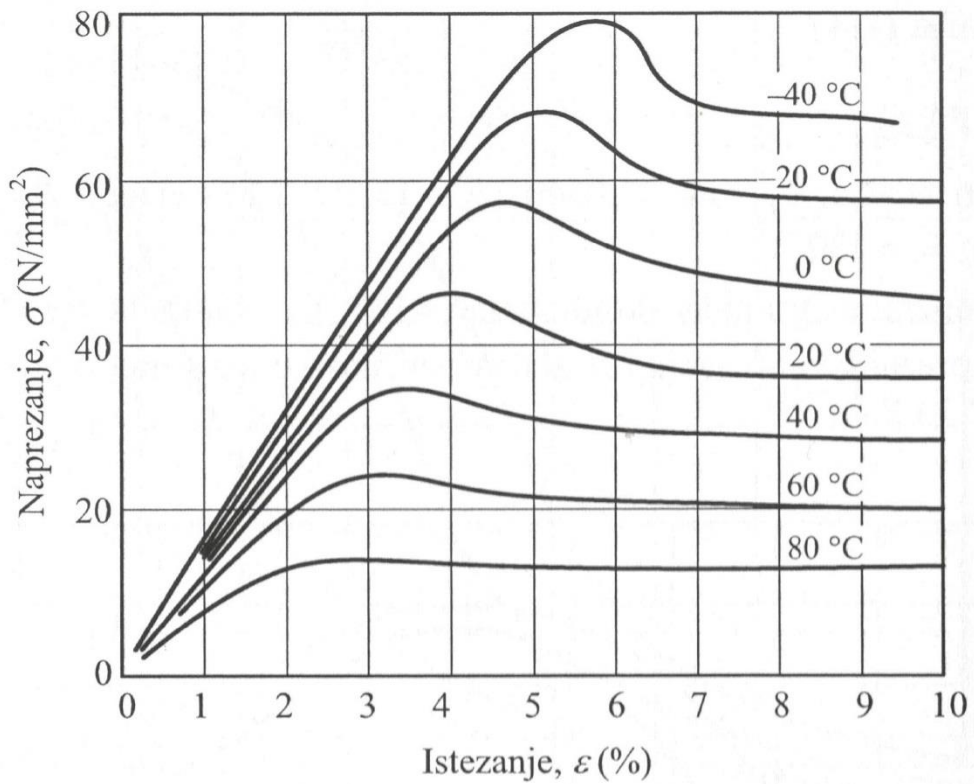
6.2.6. Mehanička svojstva akrilonitril/butadien/stirena

Akrilonitril/butadien/stiren, konstrukcijski je kopolimer amorfne strukture i temperature staklastog prijelaza između 105 i 125°C. Granične temperature primjene ovog plastomera su:

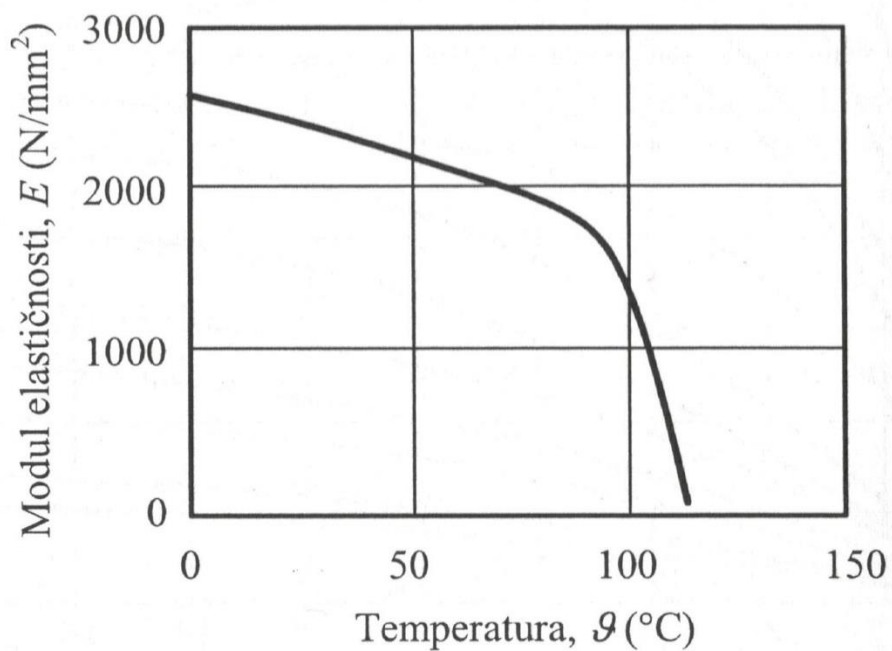
- za kratko vrijeme, približno 95°C
- za dugo vrijeme, približno 85°C

Karakteristična svojstva akrilonitril/butadien/stirena su: visoka čvrstoća, tvrdoća i krutost, dobra dimenzijska stabilnost, dobra otpornost na abraziju, osjetljivost na djelovanje UV-zraka, laka zapaljivost i slaba postojanost pri višim temperaturama. [6]

Na slikama 44 i 45 prikazan je odnos napreznja i istežanja akrilonitril/butadien/stirena s obzirom na temperaturu i modul elastičnosti u ovisnosti o temperaturi.



Slika 44. Prikaz ovisnosti naprezanja o istezanju s obzirom na temperaturu za ABS [6]

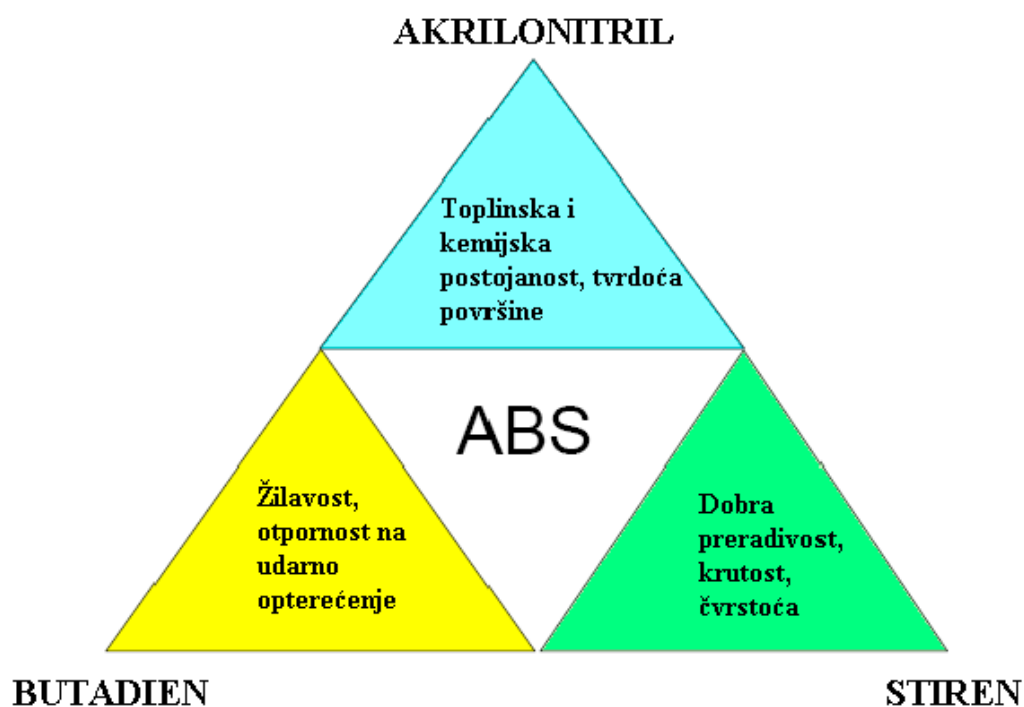


Slika 45. Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi za ABS [6]

6.2.7. Proizvodnja i primjena akrilonitril/butadien/stirena

ABS nastaje emulzijom, sastoji se od dvije faze, prvu fazu čini kopolimer stiren/akrilonitril (SAN) koji tvori kontinuiranu matricu, dok se druga faza sastoji od raspršenih čestica polibutadiena koje imaju sloj SAN kopolimera usađenog (nalijepljenog) na svoju površinu. Vezivna matrica stiren/akrilonitrila čini navedene dvije faze kompatibilnima. [21]

Stiren monomer akrilonitril/butadien/stirenu daje dobru mogućnost prerade, akrilonitril mu daje krutost, otpornost na toplinu, kemikalije i otpornost na starenje dok butadien čini proizvod žilavijim, otpornijim na niske temperature i na udar. Promjena u proporcijama komponenata akrilonitril/butadien/stirena i dodavanje pojedinih aditiva može dovesti do različitih tipova sa specifičnim svojstvima. ABS ima slabu otpornost na vremenske uvjete pa se stoga preporučuje samo za primjenu u interijeru (slika 46). [32]



Slika 46. Svojstva ABS monomera [32]

Akrilonitril/butadien/stiren koristi se u temperaturnom opsegu između -20°C i $+85^{\circ}\text{C}$, otporan je na velik dio kiselina, alkala, koncentriranu klorovodoničnu i fosfornu kiselinu, alkohole, životinjske, biljne i mineralne masti, ali mu štete koncentrirana sumporna i dušična kiselina. Akrilonitril/butadien/stiren rastvorljiv je u esterima, ketonima, etilen dikloridu ili acetonu. [34]

Među najvećim proizvođačima akrilonitril/butadien/stirena su Trinseo, LG Chem, Chi-Mei i Styrolution. Relativno je jeftin materijal, cijena mu je slična kao i polimernim materijalima polipropilena i polikarbonata.

Tipične primjene akrilonitril/butadien/stirena su:

- opće: igračke (slika 47), roba široke potrošnje, telefoni, zaštitne kacige,
- automobilska industrija: unutarnji paneli na vratima, stupovi, obrubi sjedišta, rešetke, ploče s instrumentima, kućišta za ogledala,
- uređaji za kućanstvo: kućišta uređaja za kućanstvo, kućišta za usisavače (slika 47), kontrolne ploče bijele tehnike,
- ekstrudirani: tepisi, tuš kade, kupaonske kade, krovovi traktora, obrubi namještaja, unutarnja oplata za hladnjake, koferi. [34]



Slika 47. Lego kockice i kućište za usisavač, izrađeni od ABS [33]

ABS se može prerađivati postupcima ekstrudiranja, kalendriranja i injekcijskog prešanja, a od ukupne proizvodnje akrilonitril/butadien/stirena, oko 90% materijala dobiveno je postupcima injekcijskog prešanja i ekstrudiranja. Prednost ovog kopolimera je što se na vrlo lagan način mogu dobiti komplicirani oblici gotovog proizvoda.

Odličan je za postupke toplinskog oblikovanja i oblikovanja puhanjem koji omogućuju izradu dijelova aparata za gašenje požara, industrijskih kontejnera, policia za hladnjake i zaštitnih kaciga. [34]

Svojstva akrilonitril/butadien/stirena mogu biti dodatno poboljšana miješanjem sa drugim polimernim materijalima tvoreći materijale poput ABS/PC, ABS/PMMA ili ABS/PVC [akrilonitril/butadien/stiren, koekstrudirani slojem polikarbonata, poli(metil-metakrilata) ili poli(vinil-klorida)], što omogućuje korištenje ovog materijala u željene svrhe.

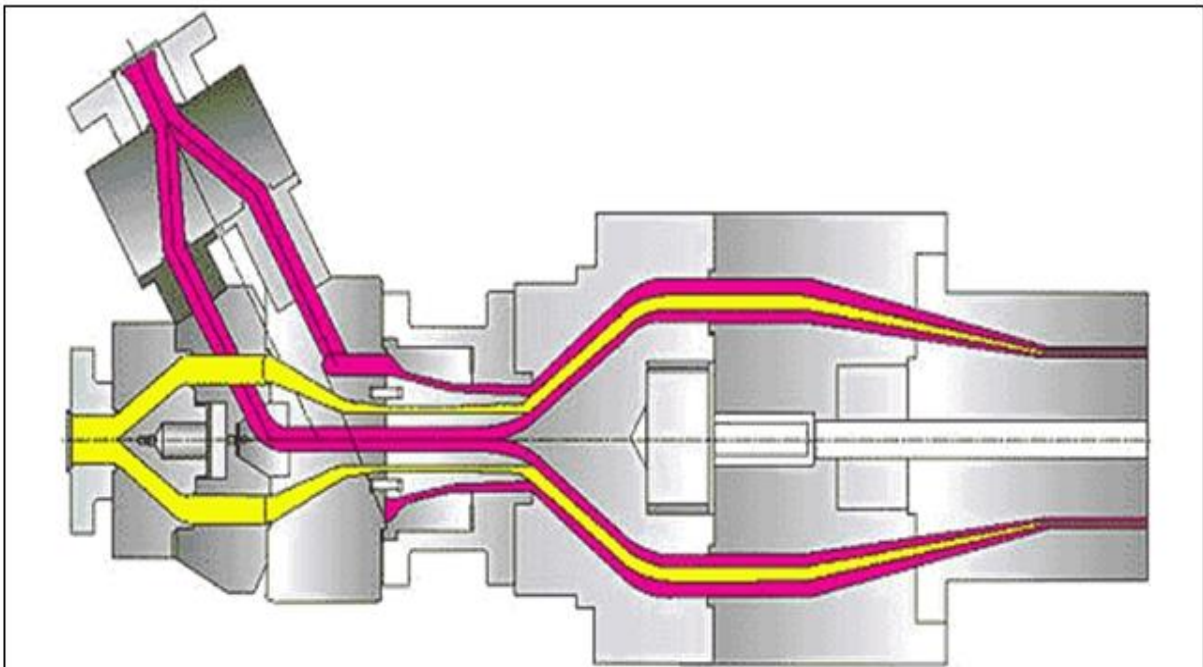
6.3. ABS/PMMA, akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata)

6.3.1. Proces koekstrudiranja

ABS/PMMA je polimerni materijal akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata), koji zadržava temeljnu čvrstoću akrilonitril/butadien/stirena, a sloj poli(metil-metakrilata) pridonosi mu zaštitu od UV zračenja, otpornost na starenje i na promjenu boje pod utjecajem atmosferskih uvjeta. Pogodan je za vanjsku i unutarnju uporabu (za razliku od akrilonitril/butadien/stirena koji nije namijenjen vanjskoj uporabi). Relativna gustoća ovog materijala iznosi $1,1 \text{ g/cm}^3$, temperatura toplinskog oblikovanja iznosi $180 - 190 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura omekšavanja materijala je oko 100°C . [35]

Koekstrudiranje je postupak proizvodnje različitih višeslojnih plastomernih polimera (slika 48). Ovaj proces proizvodnje omogućuje dobivanje ABS/PMMA. Na početku procesa polimerni materijali nalaze se u obliku granula, ubacuju se u ekstruder i zagrijavaju, što rezultira njihovim omekšavanjem, zatim se istiskuju kroz mlaznice ekstrudera u obliku viskozne tekućine. Tako zagrijani i omekšani polimerni materijali utiskuju se u isti kalup što omogućuje spajanje polimernih materijala drugačijih boja i mehaničkih svojstava.

Nakon koekstrudiranja, materijal se hladi pomoću zraka ili vodene atmosfere i rezanjem dimenzionira na željenu veličinu. [36]



Slika 48. Primjer koekstrudiranja polimernih materijala [37]

Koekstrudiranju nisu podložni svi plastični materijali, jer dobar dio njih neće pravilno adhezirati sa drugim, što ovisi o njihovoj kemijskoj strukturi. Isto tako prilikom ovog procesa treba obratiti posebnu pažnju na temperaturu tališta pojedinih polimernih materijala koji se koriste u procesu koekstrudiranja. Materijale čije se vrijednosti tih temperatura uvelike razlikuju nije moguće koekstrudirati.

S druge strane u slučaju ABS/PMMA adhezija slojeva prilikom ovoga procesa je izvanredna što rezultira dobivanjem višeslojnog polimernog materijala željenih svojstava, čije slojeve nije moguće razdvojiti. [37]

6.3.2. Svojstva i upotreba ABS/PMMA

Karakteriziraju ga mehanička svojstva srednjih vrijednosti, visoka krutost i dobra fizikalna svojstva.

Prednosti ove vrste materijala su:

- otpornost na ogrebotine i UV zračenje,
- lagana bojivost,
- lagana mogućnost toplinskog oblikovanja,
- vrlo dobra otpornost na udar,
- cjenovna isplativost,
- laka ljepljivost,
- laka zavarljivost.

Svoju primjenu nalazi u:

- automobilske industriji,
- proizvodnji kućišta,
- izradi ortopedskih pomagala,
- poljoprivredi,
- medicini,
- industrijske proizvodnji,
- proizvodnji kupaonskih sadržaja,
- proizvodnji kupaonskih i tuš kada (slika 49). [38]



Slika 49. ABS/PMMA kupaonska kada [39]

Pogodan je za upotrebu u izradi kupaonskih i tuš kada upravo u ovom obliku, gdje je koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata) koji povećava njegovu otpornost na UV zračenje, na atmosferske promjene i koji zaštićuje njegovu strukturu. Običan ABS kopolimer bez sloja poli(metil-metakrilata) sklon je nakupinama kamenca i promjeni boje kroz određeno vrijeme upotrebe.

7. POSTAVKA ZADATKA

U teoretskom dijelu navedena je podjela polimernih materijala, njihov povijesni razvoj i mehanička svojstva pojedinih polimernih materijala s naglaskom na skupinu poznatu pod nazivom „konstrukcijski plastomeri“ i na polimere koji se koriste u proizvodnji sanitarne opreme.

U eksperimentalnom dijelu rada, statičkim vlačnim pokusom ispitani su polimerni materijali koji se primjenjuju u proizvodnji sanitarne opreme, točnije, u proizvodnji kupaonskih i tuš kada. Polimeri od kojih su izrađene epruvete, čija je vlačna čvrstoća ispitana na kitalici Shimadzu AG X-plus su:

- sanitarni poli(metil-metakrilat) oplemenjen butil akrilatom koji ovome materijalu poboljšava svojstvo otpornosti na udar i dibutil ftalatom koji mu poboljšava svojstvo plastičnosti,
- akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata) koji gotovom proizvodu daje potrebnu otpornost na kamenac, štetna UV-zračenja i atmosferske uvjete, (ABS/PMMA),
- i vrsta poli(metil-metakrilata) poznata pod nazivom Perspex.

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. Opis kidalice Shimadzu AG-X plus i programa TrapeziumX

Ispitivanje materijala statičkim vlačnim pokusom obavljeno je na kidalici Shimadzu AG-X plus mjernog područja do 100 kN.

Računalom upravljana kidalica omogućuje provođenje ispitivanja, zapisivanje rezultata u elektronskom obliku i dobivanje Hookov-a dijagrama na temelju dobivenih rezultata ispitanih materijala.

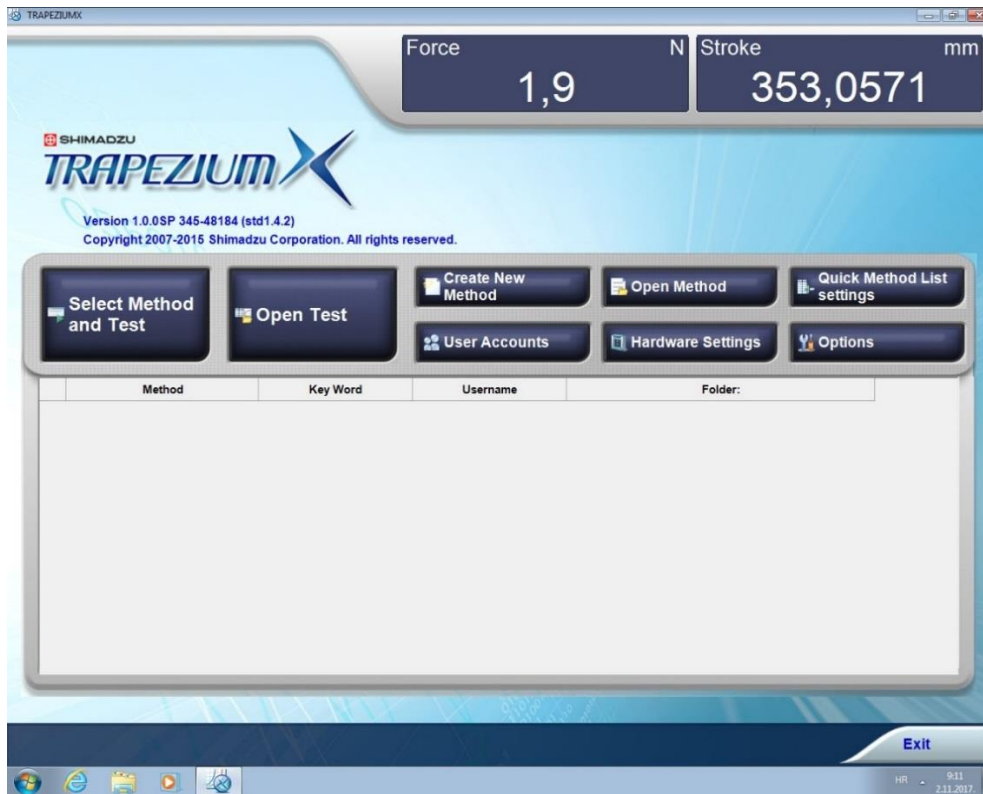
Specifikacije kidalice Shimadzu AG-X plus:

- mjerno područje do 100 kN,
- ispitivanje na vlak, tlak i savijanje,
- mogućnost ispitivanja plošnih epruveta 0-21 mm (100/50 kN),
- mogućnost ispitivanja okruglih epruveta D4-D24 (100/50kN).

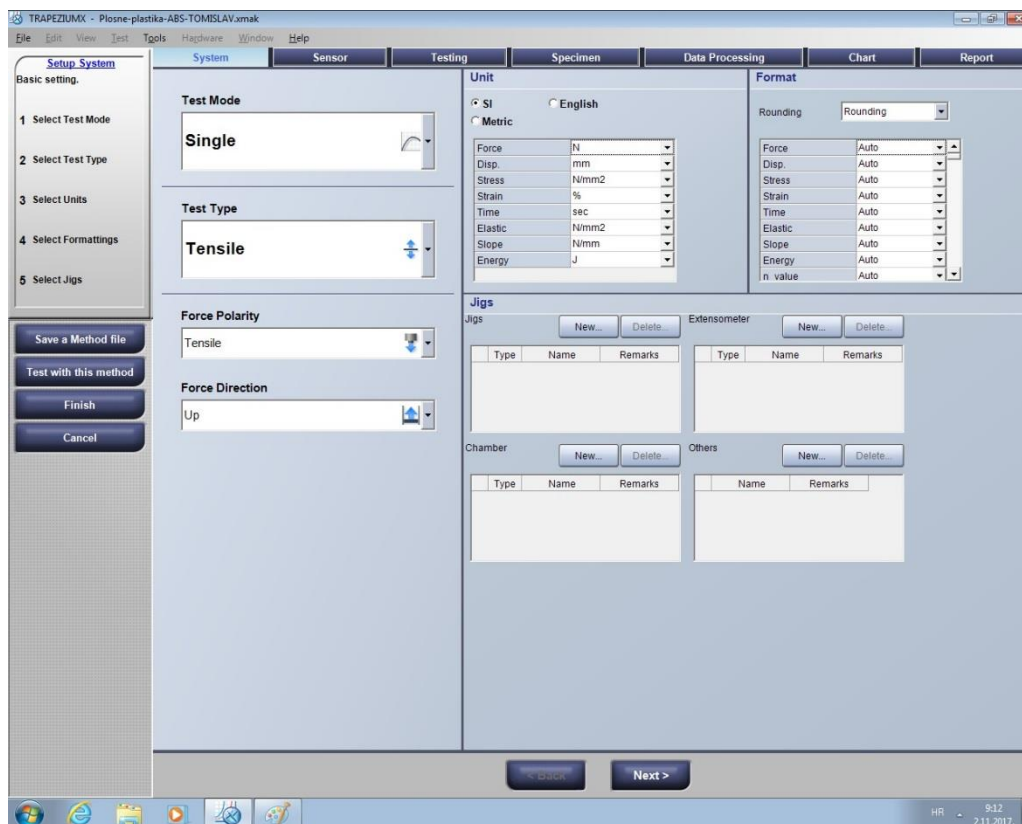
Kidalica SHIMADZU AG-X plus (slika 50) tijekom svog ispitivanja koristi program TrapeziumX (slika 51). Prije samog ispitivanja, u programu TrapeziumX potrebno je odabrati tip, odnosno način ispitivanja, u ovom slučaju radi se o vlačnom ispitivanju konstantne sile (slika 52), granično područje sile ispitivanja (slika 53) i brzinu ispitivanja (slika 54).



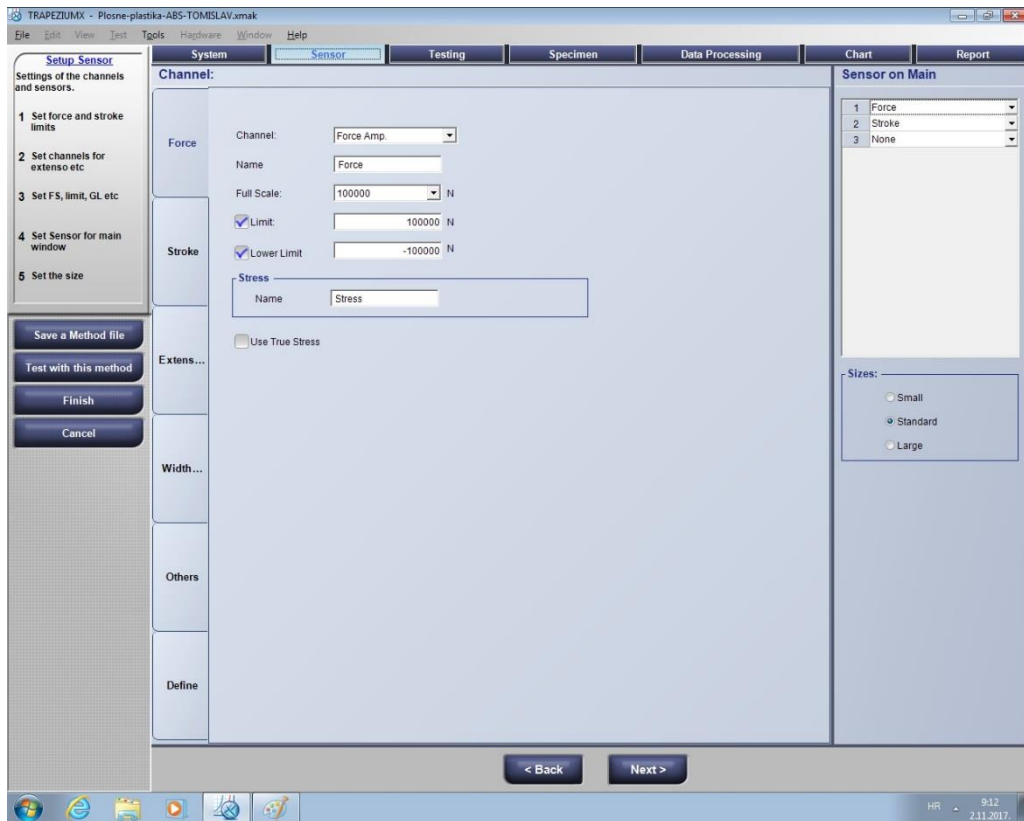
Slika 50. Kidalica Shimadzu AG-X plus za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala



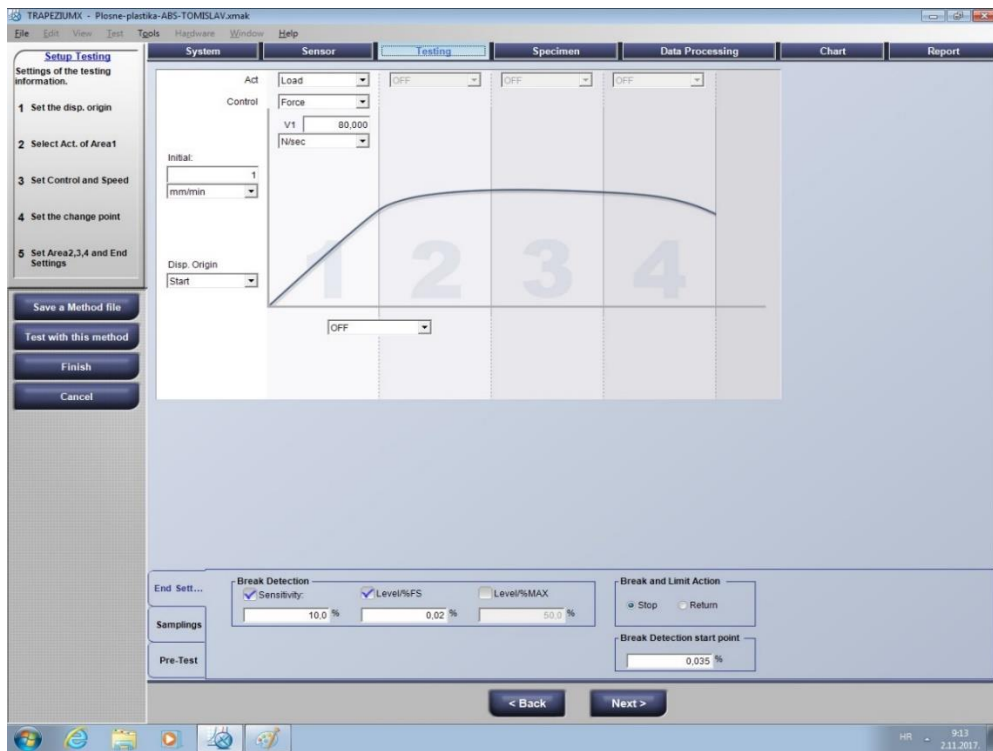
Slika 51. TrapeziumX program



Slika 52. Odabir konstantne vlačne sile i smjera sile

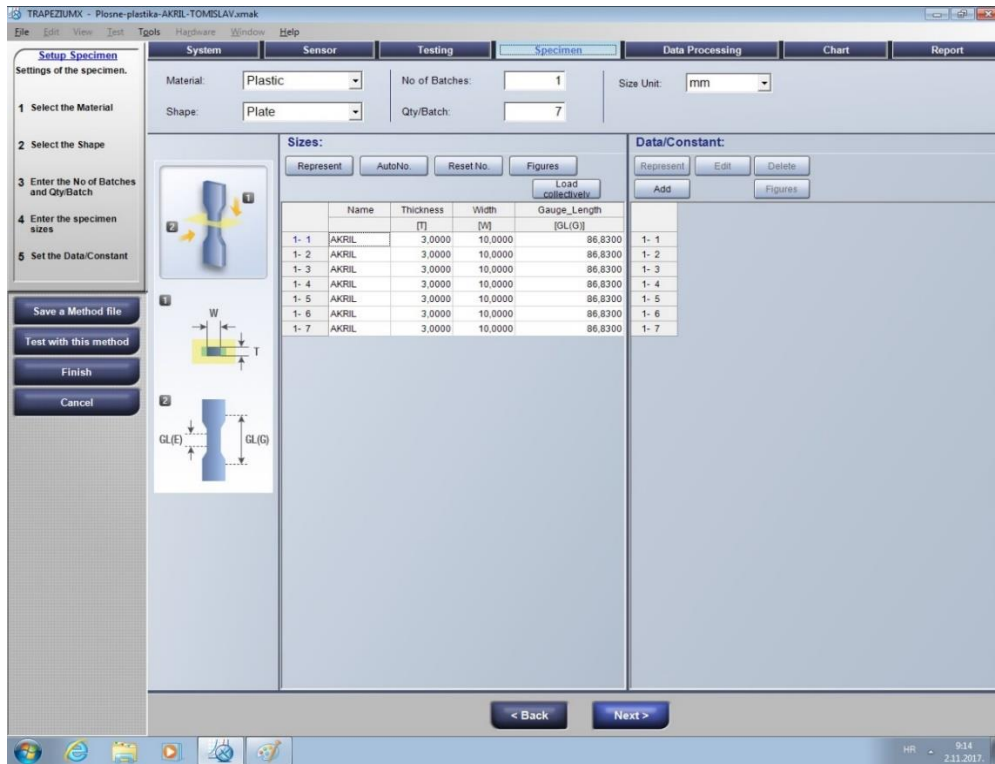


Slika 53. Odabir graničnog područja sile, kod ispitivanja

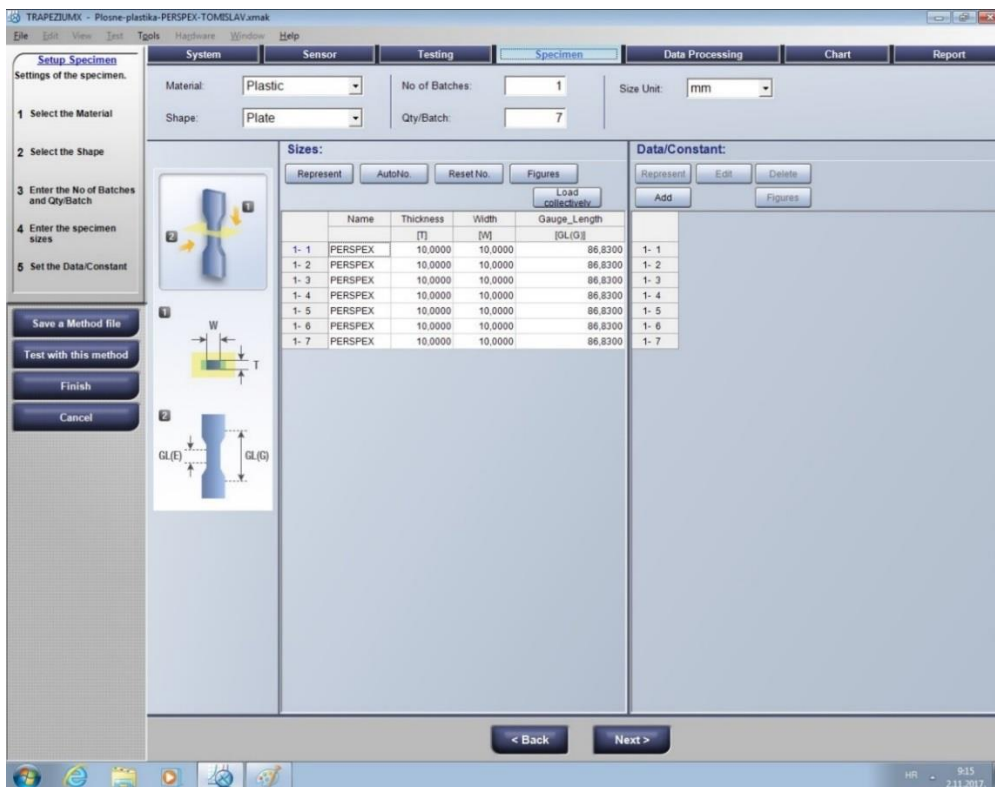


Slika 54. Postavljanje brzine ispitivanja od 80 N/sec

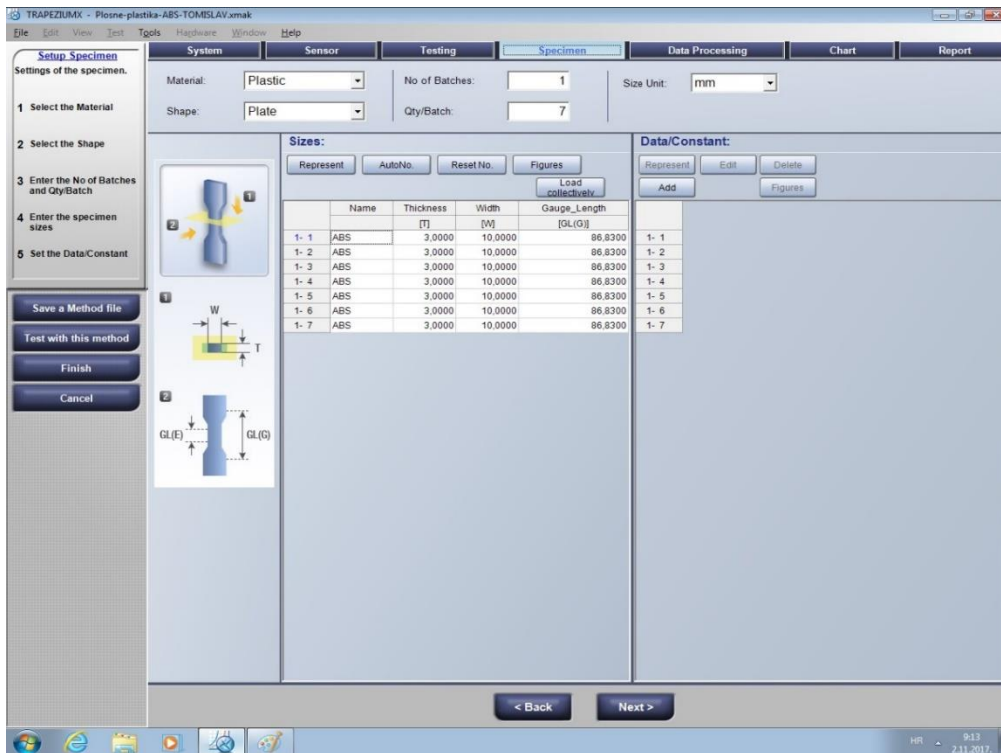
Slike 55, 56 i 57 prikazuju vrstu materijala, oblik i dimenziju epruvete, a slika 58 prikazuje definiranje parametara koji će se mjeriti.



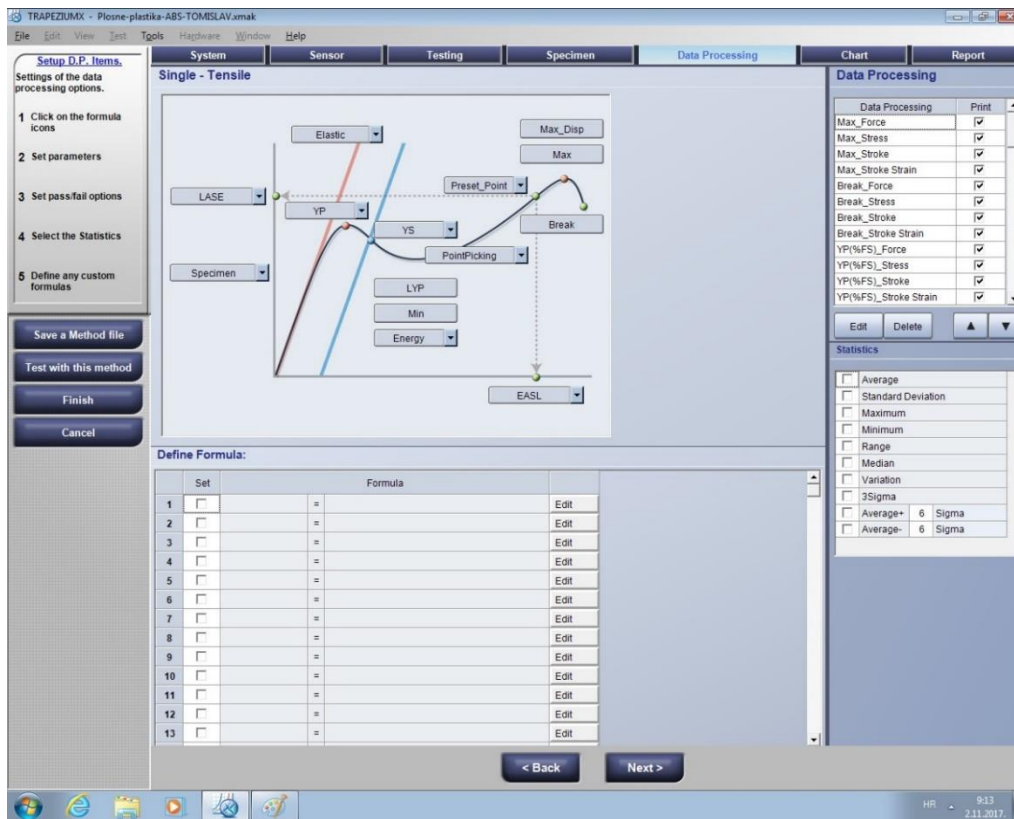
Slika 55. Odabir materijala i dimenzije epruvete, sanitarni poli(metil-metakrilat)



Slika 56. Odabir materijala i dimenzije epruvete, Perspex poli(metil-metakrilat)



Slika 57. Odabir materijala i dimenzije epruvete, ABS koekstrudiran slojem PMMA

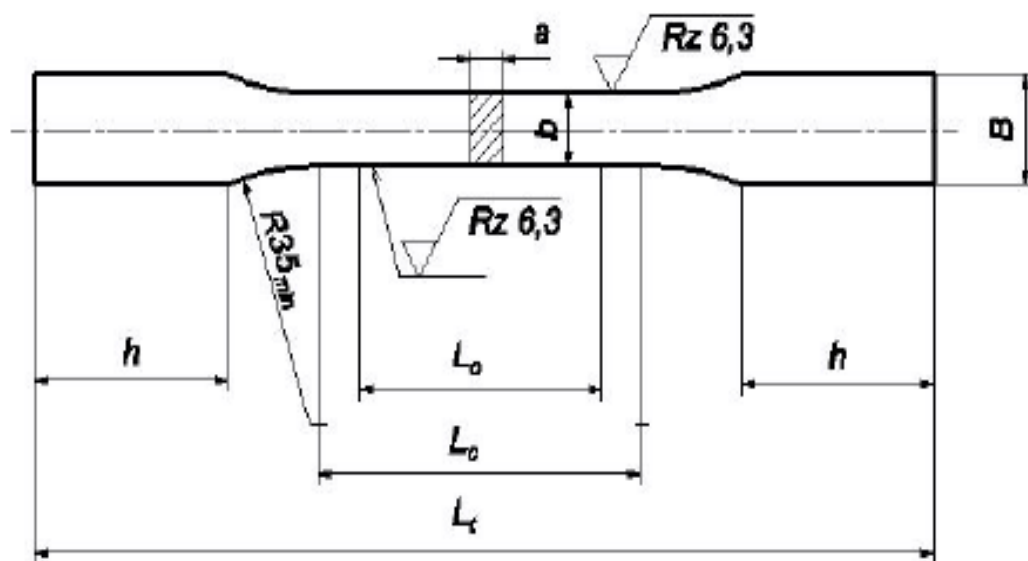


Slika 58. Definiranje parametara koji će se mjeriti

8.2. Izrada uzoraka za statički vlačni pokus

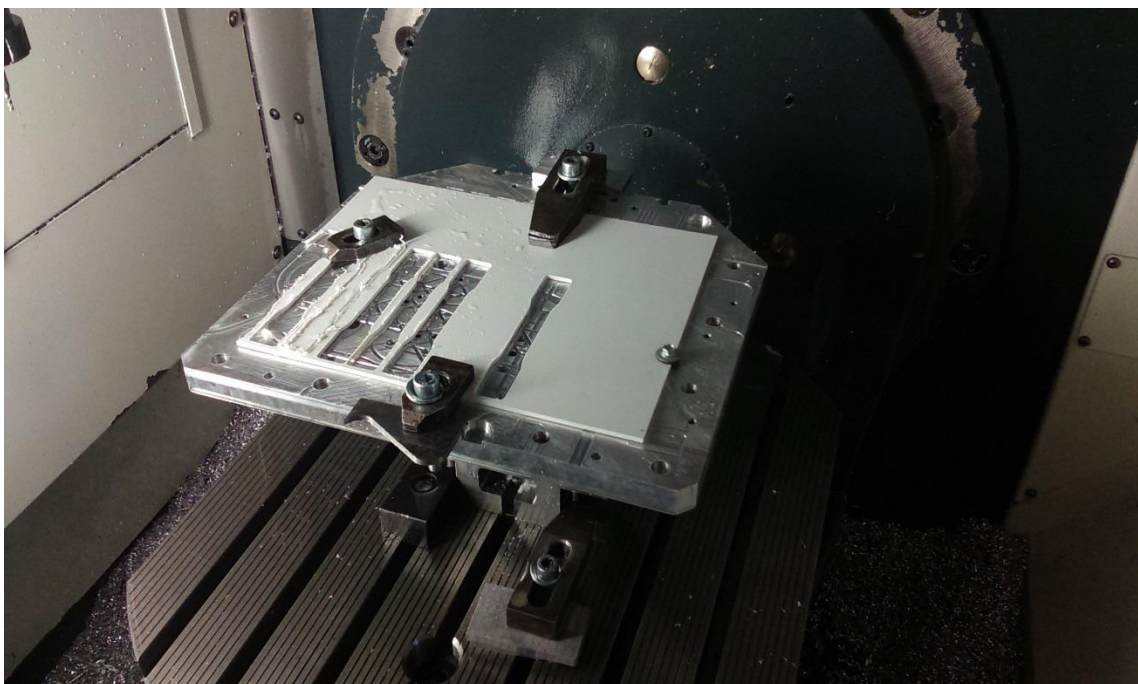
Za ispitivanje vlačne čvrstoće korištena je plosnata epruveta oblika E (slika 59). Za svaki materijal izrađeno je po sedam epruveta, pomoću numeričko upravljanoj alatnog (CNC) stroja (slika 60), koje su podvrgnute statičkom vlačnom ispitivanju.

Epruvete nisu u cijelosti izrađene prema standardu s obzirom da su ploče Perspex materijala iz kojih su izrađene epruvete, bile deblje od standarda, a sve ostale epruvete, sanitarnog poli(metil-metakrilata) i akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata) izrađene su prema standardu.



| | |
|---|---|
| a – debljina epruvete, mm | L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm |
| b – širina epruvete, mm | L_c – ispitna duljina epruvete |
| B – širina glave epruvete ($\approx 1,2 b + 3$ mm) | ($L_c \geq L_0 + 1,5 \sqrt{S_0}$), mm |
| h – visina glave epruvete ($\approx 2 b + 10$ mm) | L_t – ukupna duljina epruvete, mm |

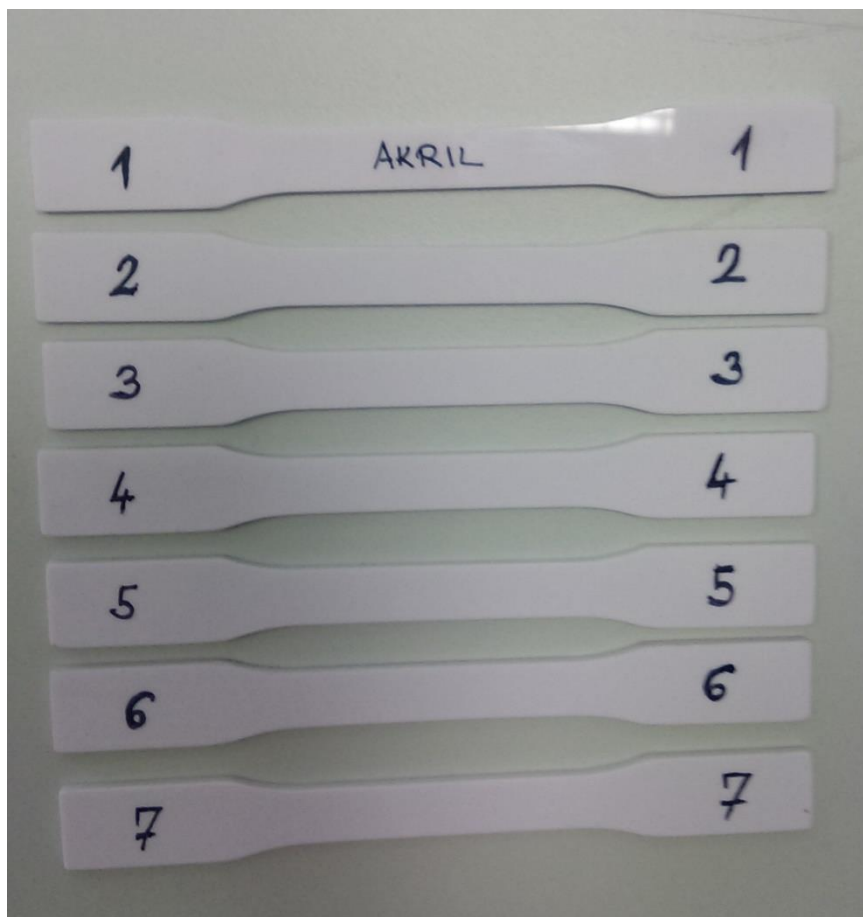
Slika 59. Standard za izradu epruveta



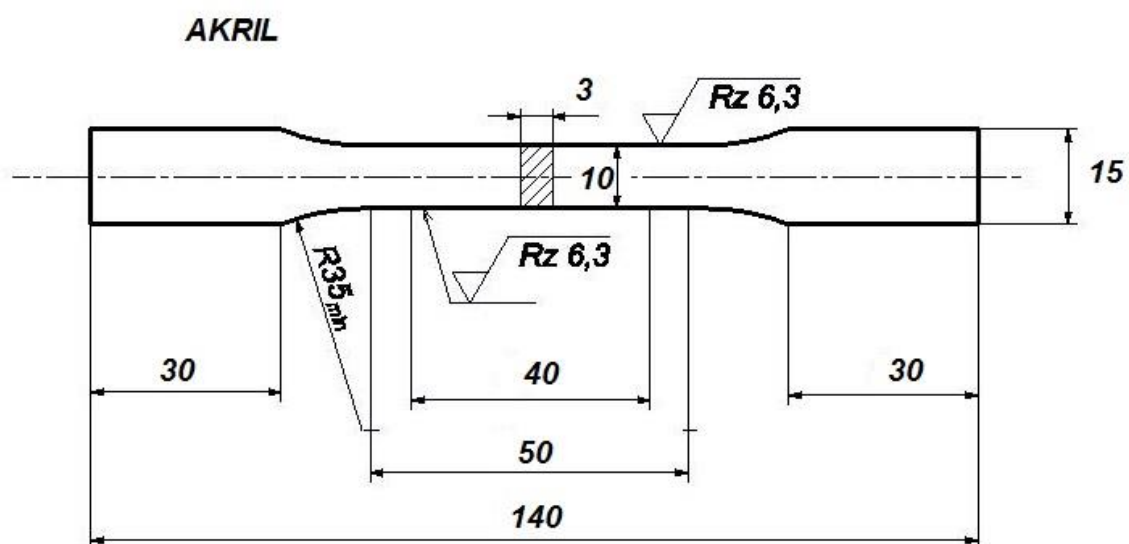
Slika 60. Epruvete izrađene pomoću numeričko upravljano alata stroja

8.2.1. Epruvete polimernih materijala za ispitivanje

Na epruvetama sanitarnog poli(metil-metakrilata), (slika 61), Perspex poli(metil-metakrilata), (slika 63) i akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata), (slika 65), provodi se ispitivanje statičkog vlačnog pokusa. Uz prikazane epruvete priložene su i njihove dimenzije, koje su vidljive na slikama 62, 64 i 66.



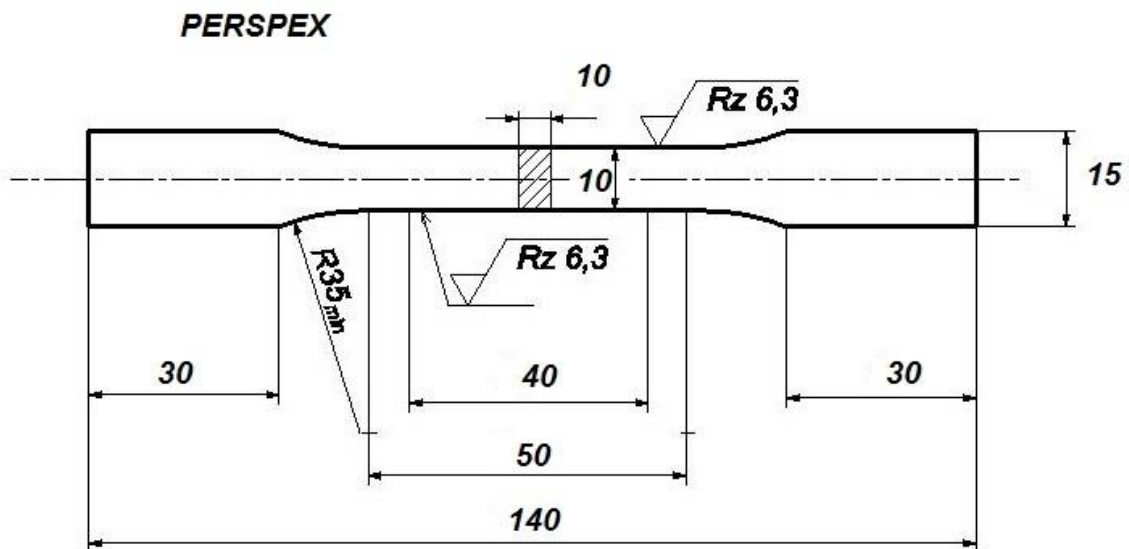
Slika 61. Epruvete sanitarnog poli(metil-metakrilata), na kojima se vršilo ispitivanje statičkog vlačnog pokusa



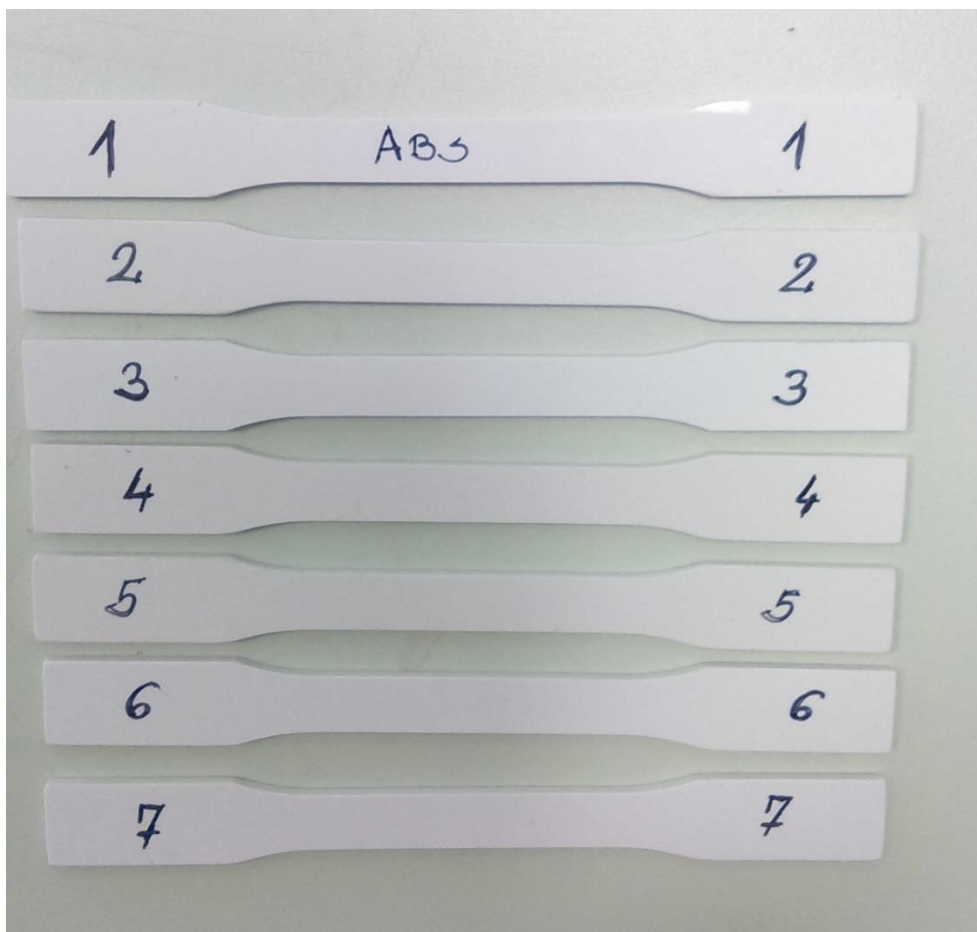
Slika 62. Dimenzije epruveta sanitarnog poli(metil-metakrilata)



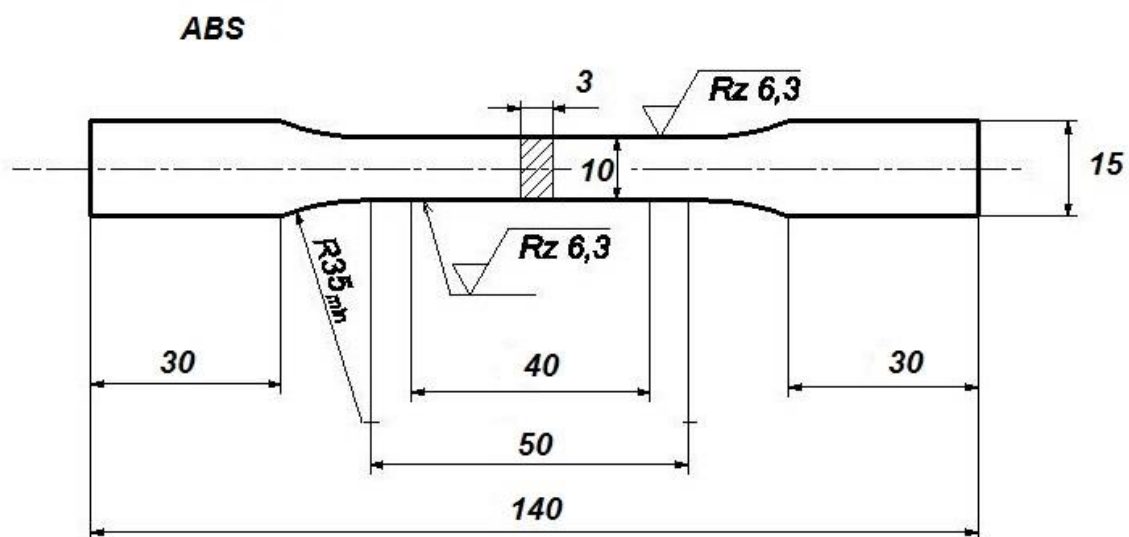
Slika 63. Epruvete Perspex poli(metil-metakrilata) na kojima se vršilo ispitivanje statičkog vlačnog pokusa



Slika 64. Dimenzije epruveta Perspex poli(metil-metakrilata)



Slika 65. Epruvete akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata) na kojima se vršilo ispitivanje statičkog vlačnog pokusa



Slika 66. Dimenzije epruveta akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata)

8.3. Rezultati ispitivanja

Vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i izduženja dobivene su preko formula:

$$S_0 = a \cdot b ; [mm^2] \rightarrow \text{površina poprečnog presjeka}$$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} ; \left[\frac{N}{mm^2} \right] \rightarrow \text{granica razvlačenja}$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} ; \left[\frac{N}{mm^2} \right] \rightarrow \text{vlačna čvrstoća}$$

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} ; \left[\frac{mm}{mm} \right] \rightarrow \text{vrijednost istežanja nakon kidanja}$$

$$A = \varepsilon_u \cdot 100 ; [\%] \rightarrow \text{vrijednost konačnog istežanja (izduženje)}$$

U tablicama 10, 11 i 12 ispisane su vrijednosti (spomenutih materijala) dobivene prilikom ispitivanja vlačne čvrstoće.

Tablica 10. Rezultati ispitanih epruveta sanitarnog poli(metil-metakrilata)

| Sanitarni poli(metil-metakrilat) | Najveća sila F _m [N] | Granica razvlačenja R _{p0.1} [N/mm ²] | Vlačna čvrstoća R _m [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|----------------------------------|------------------------------------|--|--|--------------------|
| Epruveta 1 | 2693.48 | 60.1541 | 89.7826 | 6.0028 |
| Epruveta 2 | 1190.07 | - | 39.6691 | 2.17077 |
| Epruveta 3 | 2642.31 | 59.0287 | 88.0771 | 5.21776 |
| Epruveta 4 | 2802.77 | 61.8908 | 93.4257 | 5.88422 |
| Epruveta 5 | 2719.07 | 60.5525 | 90.6356 | 6.16785 |
| Epruveta 6 | 2281.25 | 55.7799 | 76.0418 | 4.20611 |
| Epruveta 7 | 2351.25 | 53.2940 | 78.3751 | 4.24227 |

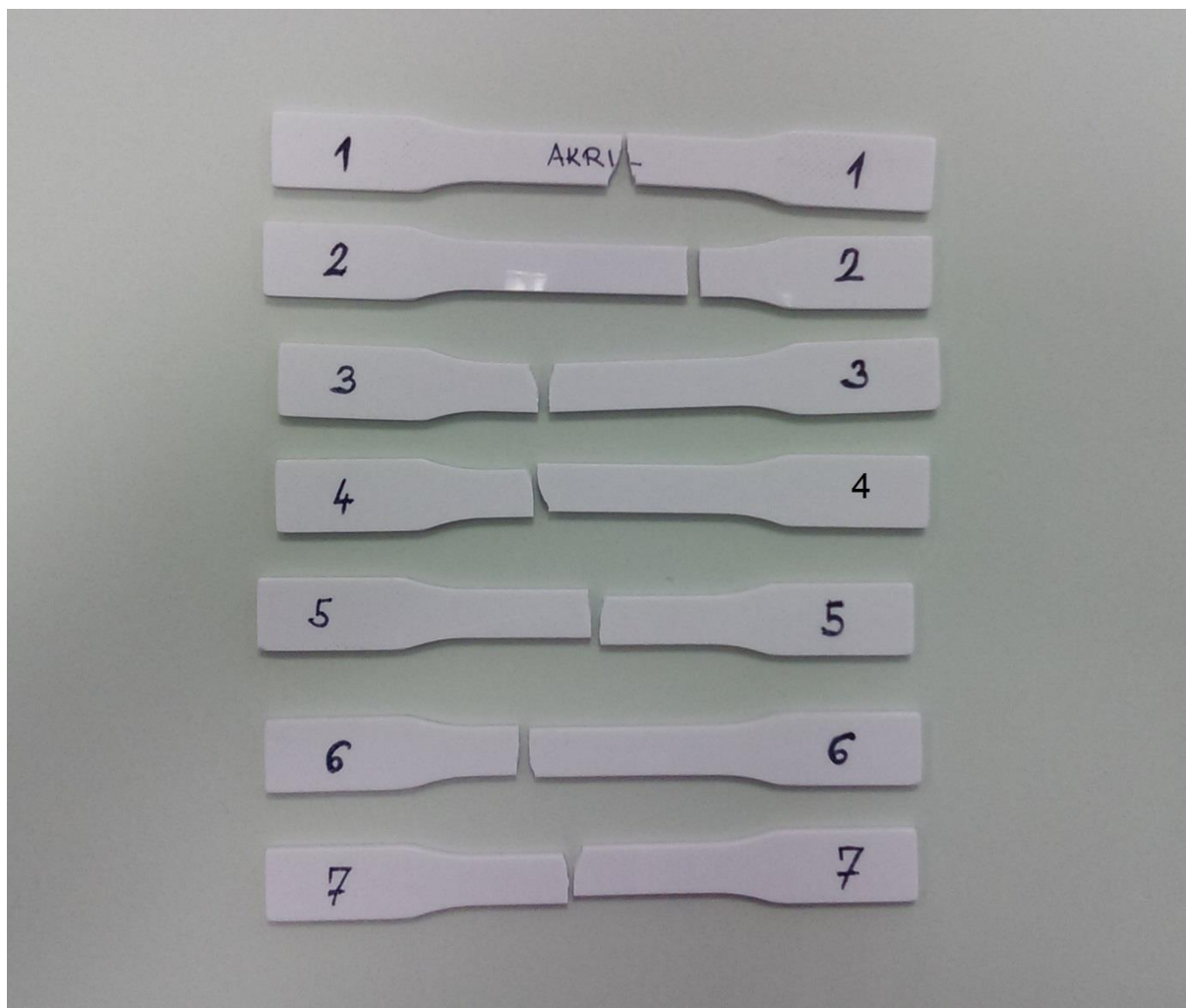
Tablica 11. Rezultati ispitanih epruveta Perspex poli(metil-metakrilata)

| Perspex poli(metil-metakrilat) | Najveća sila Fm [N] | Granica razvlačenja R _{p0.1} [N/mm ²] | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|--------------------------------|---------------------|--|---|-----------------|
| Epruveta 1 | 8112.56 | 60.5172 | 81.1256 | 7.30114 |
| Epruveta 2 | 7567.63 | 55.2390 | 75.6763 | 7.01152 |
| Epruveta 3 | 7865.18 | 57.7577 | 78.6518 | 6.97822 |
| Epruveta 4 | 7753.01 | 54.0938 | 77.5301 | 7.40336 |
| Epruveta 5 | 8379.35 | 57.5350 | 83.7935 | 8.03155 |
| Epruveta 6 | 7677.44 | 51.8092 | 76.7744 | 6.80993 |
| Epruveta 7 | 7916.67 | 53.8753 | 79.1667 | 7.11234 |

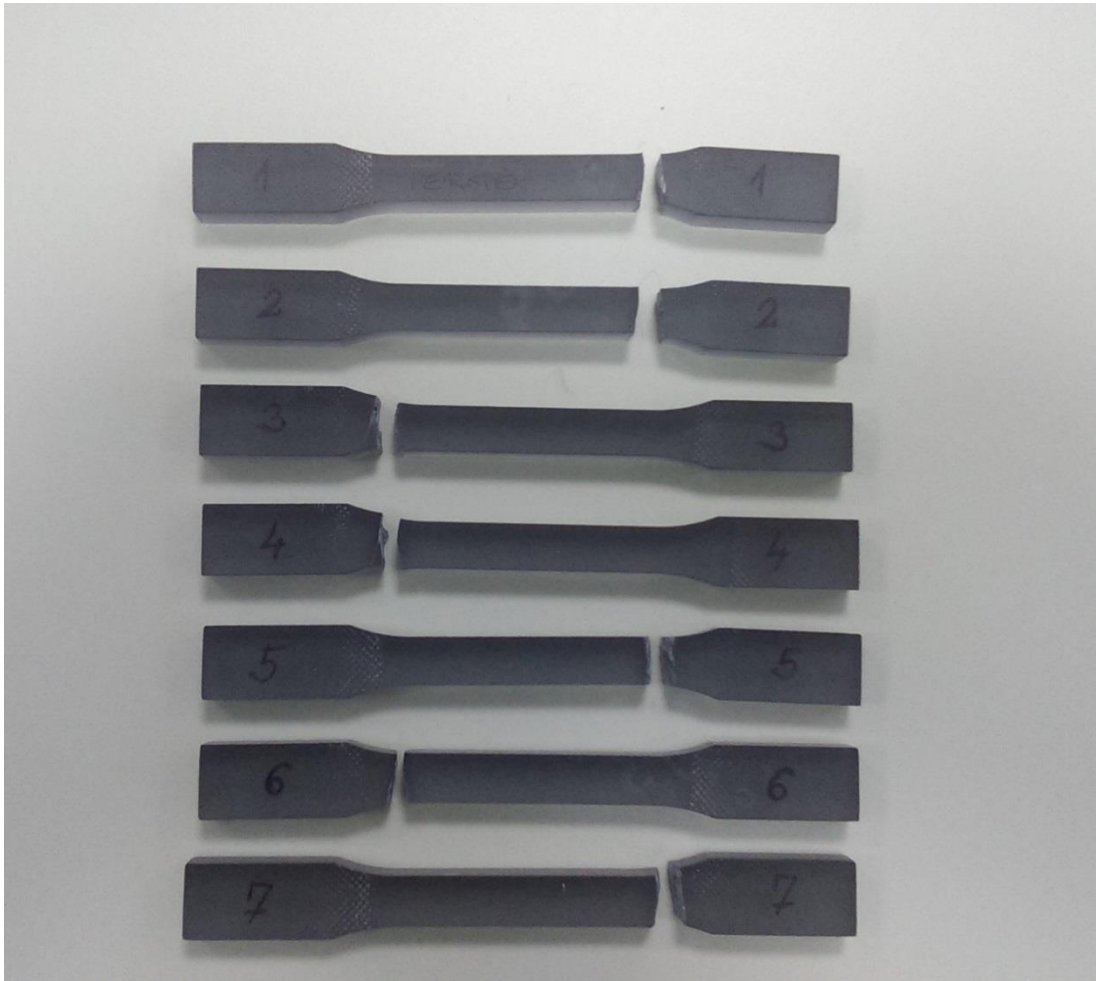
Tablica 12. Rezultati ispitanih epruveta akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata)

| ABS koekstrudiran slojem PMMA | Najveća sila Fm [N] | Granica razvlačenja R _{p0.1} [N/mm ²] | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|-------------------------------|---------------------|--|---|-----------------|
| Epruveta 1 | 1526.04 | 47.6419 | 50.8679 | 3.73227 |
| Epruveta 2 | 1525.18 | 47.4527 | 50.8393 | 6.43801 |
| Epruveta 3 | 1524.94 | - | 50.8314 | 3.66247 |
| Epruveta 4 | 1457.88 | 43.7668 | 48.5961 | 5.48351 |
| Epruveta 5 | 1449.65 | 43.1368 | 48.3216 | 3.97707 |
| Epruveta 6 | 1535.26 | 47.3330 | 51.1752 | 5.69345 |
| Epruveta 7 | 1436.87 | 44.2696 | 47.8956 | 6.73433 |

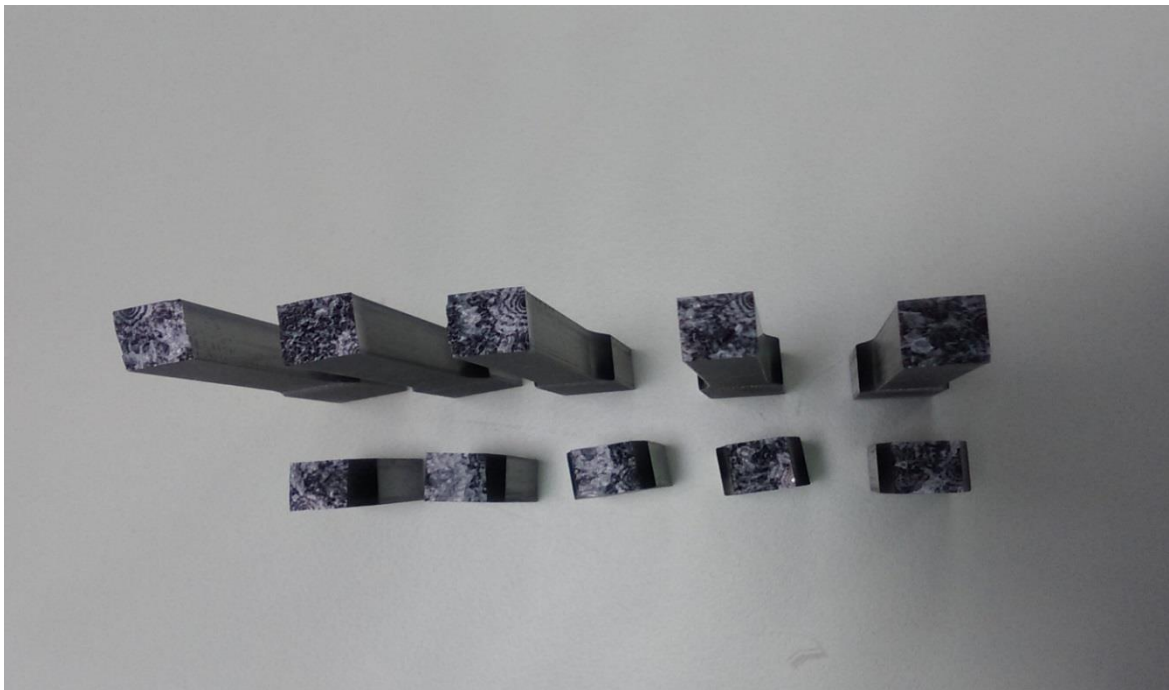
Slike 67, 68 i 70 prikazuju izgled epruveta nakon ispitivanja, a slika 69 prikazuje izgled presjeka loma epruveta Perspex poli(metil-metakrilata).



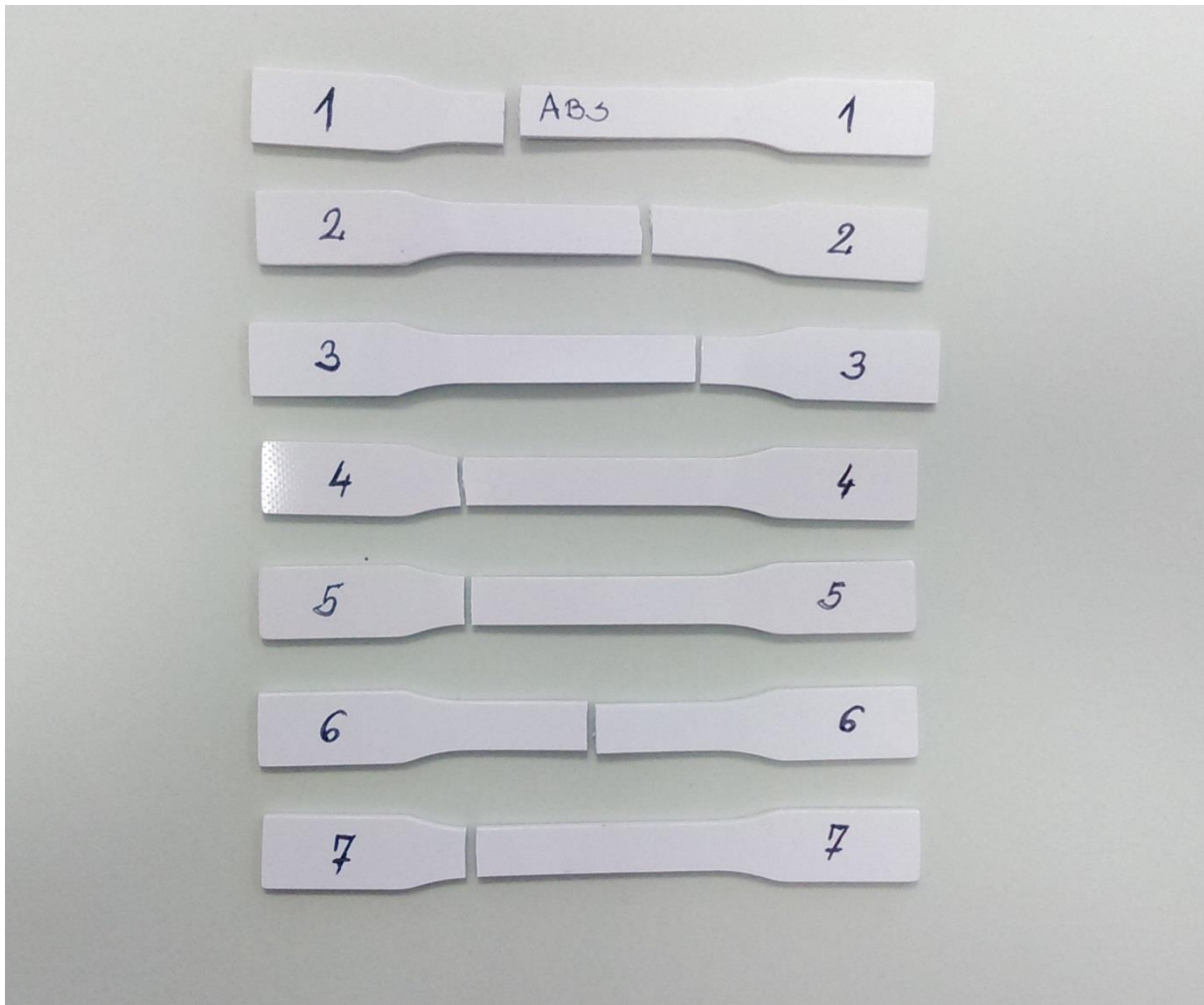
Slika 67. Epruvete sanitarnog poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja



Slika 68. Epravete Perspex poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja



Slika 69. Prikaz presjeka loma epraveta Perspex poli(metil-metakrilata)



Slika 70. Epruvete akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata), nakon ispitivanja

8.4. Analiza rezultata

U tablici 13, analizi rezultata sanitarnog poli(metil-metakrilata), zahtijevane vrijednosti vlačne čvrstoće i izduženja postavljene su po vrijednostima tehničkog lista sanitarnog poli(metil-metakrilata) priloženog u prilogima (na kraju rada).

Usporedbom izmjerenih vrijednosti ispitanih epruveta u odnosu na zahtijevane vrijednosti vidljivo je kako su sve epruvete postigle zahtijevane vrijednosti, osim epruvete 2 (označene narančastom bojom), čije su vrijednosti vlačne čvrstoće i izduženja daleko ispod postavljenih zahtijevanih vrijednosti. Za pretpostaviti je kako je na ispitanoj epruveti došlo do oštećenja materijala, što je uzrokovalo njezin lom prije postizanja zadanih vrijednosti vlačne čvrstoće.

Tablica 13. Analiza rezultata sanitarnog poli(metil-metakrilata)

| Sanitarni poli(metil-metakrilat) | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|----------------------------------|--|--------------------|
| Zahtijevana vrijednost | 69.000 | > 4 % |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 1 | 89.7826 | 6.0028 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 2 | 39.6691 | 2.17077 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 3 | 88.0771 | 5.21776 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 4 | 93.4257 | 5.88422 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 5 | 90.6356 | 6.16785 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 6 | 76.0418 | 4.20611 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 7 | 78.3751 | 4.24227 |

U tablicama 14 i 15 prikazana je usporedba zahtijevanih i izmjerenih vrijednosti Perspex poli(metil-metakrilata), čije su vrijednosti vidljive u tablici 14 i akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata), tablica 15. Zahtijevane vrijednosti vlačne čvrstoće i izduženja postavljene su po vrijednostima tehničkih listova ovih materijala, priloženih u prilogima (na kraju rada).

Usporedbom izmjerenih vrijednosti ispitanih epruveta u odnosu na zahtijevane vrijednosti vidljivo je kako su sve epruvete postigle zahtijevane vrijednosti.

Tablica 14. Analiza rezultata Perspex poli(metil-metakrilata)

| Perspex poli(metil-metakrilat) | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|----------------------------------|--|--------------------|
| Zahtijevana vrijednost | 75.000 | > 4 % |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 1 | 81.1256 | 7.30114 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 2 | 75.6763 | 7.01152 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 3 | 78.6518 | 6.97822 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 4 | 77.5301 | 7.40336 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 5 | 83.7935 | 8.03155 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 6 | 76.7744 | 6.80993 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 7 | 79.1667 | 7.11234 |

Tablica 15. Analiza rezultata akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata)

| ABS koekstrudiran slojem PMMA | Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] | Izduženje A [%] |
|----------------------------------|--|--------------------|
| Zahtijevana vrijednost | 38.000 | - |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 1 | 50.8679 | 3.73227 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 2 | 50.8393 | 6.43801 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 3 | 50.8314 | 3.66247 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 4 | 48.5961 | 5.48351 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 5 | 48.3216 | 3.97707 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 6 | 51.1752 | 5.69345 |
| Izmjerena vrijednost, epruveta 7 | 47.8956 | 6.73433 |

U nastavku analize rada za svaku vrstu ispitanih polimernih materijala, priloženi su dijagrami statičkog vlačnog pokusa epruveta koje su pokazale najmanje i najveće vrijednosti.

Na slici 71 prikazan je dijagram statičkog vlačnog pokusa, sa izmjerenim vrijednostima epruveta ispitanih materijala, točnije, epruveta koje su pokazale najveće vrijednosti vlačne čvrstoće. Na dijagramu su prikazane:

- epruveta 4, sanitarnog poli(metil-metakrilata),
- epruveta 5, Perspex poli(metil-metakrilata),
- epruveta 6, akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata).

Priloženi dijagram prikazuje kako sanitarni poli(metil-metakrilat) ne pokazuje granicu razvlačenja i ima višu vrijednost prekidne i vlačne čvrstoće, od strukturno sličnog Perspex poli(metil-metakrilata) koji također ne pokazuje granicu razvlačenja (granica razvlačenja ovih materijala prikazana je konvencionalnom granicom razvlačenja, $R_{p0.1}$). Vrijednost izduženja Perspex poli(metil-metakrilata) veća je od vrijednosti sanitarnog poli(metil-metakrilata), a zbog amorfne strukture, oba materijala imaju iste vrijednosti vlačne i prekidne čvrstoće.

Najmanja vrijednost vlačne čvrstoće izmjerena je kod akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata). Kod ovog materijala vidljiva je granica razvlačenja, ali i različite vrijednosti prekidne i vlačne čvrstoće, što daje do znanja kako ovaj materijal u strukturi ima udio kristalne faze.

Vrijednosti izmjerene na prikazanim epruvetama:

Epruveta 4, sanitarni poli(metil-metakrilat)

$$F_{p0.1} = 1856.72 \text{ N}$$

$$R_{p0.1} = 61.8908 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_{p0.1} = 2.67235 \text{ mm}$$

$$A_{p0.1} = 3.07769 \%$$

$$F_m = F_p = 2802.77 \text{ N}$$

$$R_m = R_p = 93.4257 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_m = \Delta L_p = 5.10927 \text{ mm}$$

$$A_m = A_p = 5.8842 \%$$

Epruveta 5, Perspex poli(metil-metakrilat)

$$F_{p0.1} = 5753.50 \text{ N}$$

$$R_{p0.1} = 57.5350 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_{p0.1} = 3.95340 \text{ mm}$$

$$A_{p0.1} = 4.55303 \%$$

$$F_m = F_p = 8379.35 \text{ N}$$

$$R_m = R_p = 83.7935 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_m = \Delta L_p = 6.97379 \text{ mm}$$

$$A_m = A_p = 8.0315 \%$$

Epruveta 6, akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata)

$$F_{p0.1} = 1419.99 \text{ N}$$

$$R_{p0.1} = 47.3330 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_{p0.1} = 2.50013 \text{ mm}$$

$$A_{p0.1} = 2.87933 \%$$

$$F_m = 1535.26 \text{ N}$$

$$R_m = 51.1752 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_m = 4.94363 \text{ mm}$$

$$A_m = 5.69345 \%$$

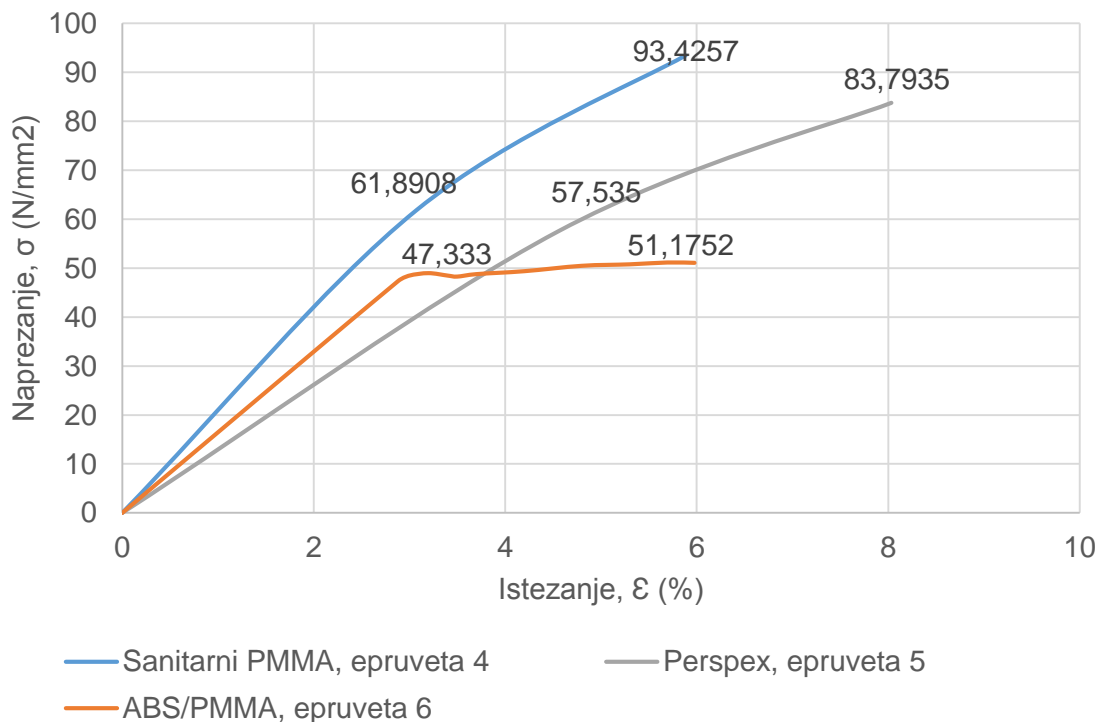
$$F_p = 1533.14 \text{ N}$$

$$R_p = 51.1048 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta L_p = 5.19075 \text{ mm}$$

$$A_p = 5.97806 \%$$

Najveće izmjerene vrijednosti ispitanih epruveta



Slika 71. Dijagram statičkog vlačnog pokusa, najvećih izmjerenih vrijednosti ispitanih epruveta

Na slici 72 prikazan je dijagram statičkog vlačnog pokusa, sa izmjerenim vrijednostima epruveta ispitanih materijala, koje su pokazale najmanje vrijednosti vlačne čvrstoće od svih ispitanih epruveta. Na dijagramu su prikazane:

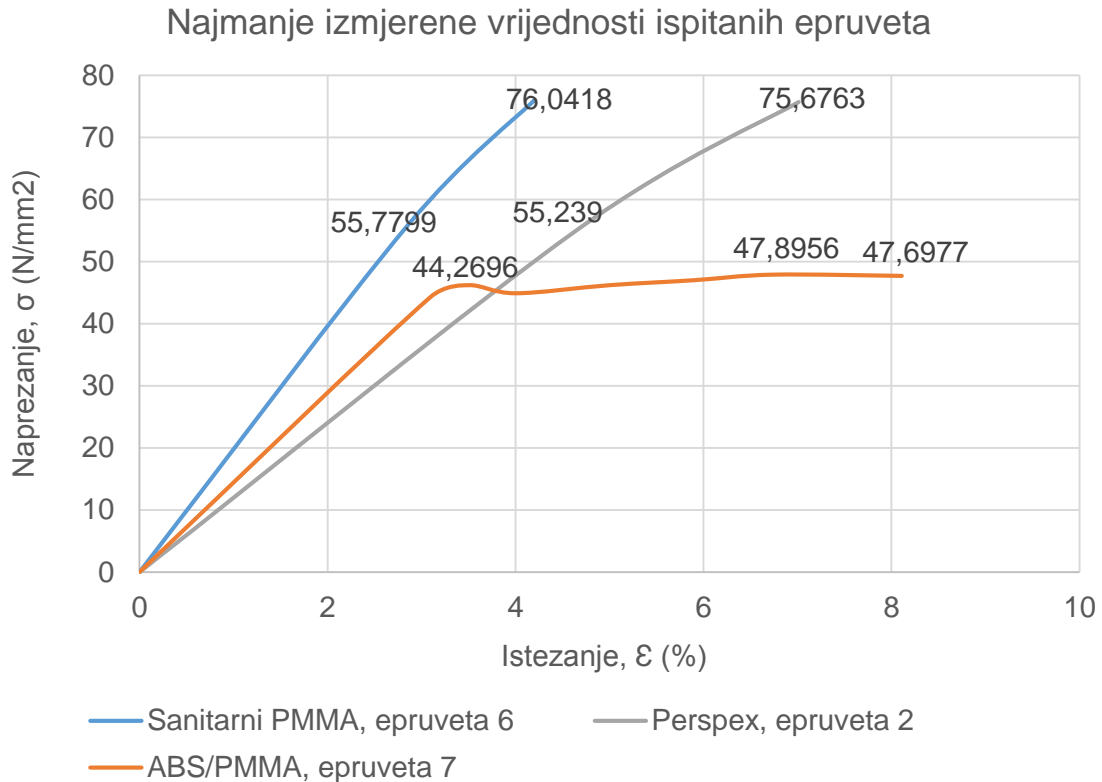
- epruveta 6, sanitarnog poli(metil-metakrilata),
- epruveta 2, Perspex poli(metil-metakrilata),
- epruveta 7, akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata).

Priloženi dijagram prikazuje kako, od tri ispitana materijala, Perspex poli(metil-metakrilat) i sanitarni poli(metil-metakrilat) ne pokazuju granicu razvlačenja (granica razvlačenja ovih materijala prikazana je konvencionalnom granicom razvlačenja, $R_{p0.1}$). Sanitarni poli(metil-metakrilat) ima najveću vrijednost prekidne i vlačne čvrstoće i najmanju vrijednost izduženja.

Akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata) pokazuje najveću vrijednost izduženja materijala, od materijala priloženih u dijagramu. Zbog udjela kristalne faze u svojoj strukturi, pokazuje granicu razvlačenja, a unatoč tome ima različite vrijednosti prekidne i vlačne čvrstoće, za razliku od Perspex i sanitarnog poli(metil-metakrilata), čije su vrijednosti prekidne i vlačne čvrstoće identične i čija struktura je amorfna.

Vrijednosti izmjerene na prikazanim epruvetama:

| Epruveta 6, sanitarni poli(metil-metakrilat) | Epruveta 2, Perspex poli(metil-metakrilat) | Epruveta 7, akrilonitril/butadien/stiren koekstrudiran slojem poli(metil-metakrilata) |
|--|--|---|
| $F_{p0.1} = 1673.40 \text{ N}$ | $F_{p0.1} = 5523.90 \text{ N}$ | $F_{p0.1} = 1328.09 \text{ N}$ |
| $R_{p0.1} = 55.7799 \text{ N/mm}^2$ | $R_{p0.1} = 55.2390 \text{ N/mm}^2$ | $R_{p0.1} = 44.2696 \text{ N/mm}^2$ |
| $\Delta L_{p0.1} = 2.47529 \text{ mm}$ | $\Delta L_{p0.1} = 4.05377 \text{ mm}$ | $\Delta L_{p0.1} = 2.68665 \text{ mm}$ |
| $A_{p0.1} = 2.85073 \%$ | $A_{p0.1} = 4.66863 \%$ | $A_{p0.1} = 3.09415 \%$ |
| $F_m = F_p = 2281.25 \text{ N}$ | $F_m = F_p = 7567.63 \text{ N}$ | $F_m = 1436.87 \text{ N}$ |
| $R_m = R_p = 76.0418 \text{ N/mm}^2$ | $R_m = R_p = 75.6763 \text{ N/mm}^2$ | $R_m = 47.8956 \text{ N/mm}^2$ |
| $\Delta L_m = \Delta L_p = 3.65217 \text{ mm}$ | $\Delta L_m = \Delta L_p = 6.08810 \text{ mm}$ | $\Delta L_m = 5.84742 \text{ mm}$ |
| $A_m = A_p = 4.2061 \%$ | $A_m = A_p = 7.0115 \%$ | $A_m = 6.73433 \%$ |
| | | $F_p = 1430.73 \text{ N}$ |
| | | $R_p = 47.6911 \text{ N/mm}^2$ |
| | | $\Delta L_p = 7.04233 \text{ mm}$ |
| | | $A_p = 8.11048 \%$ |



Slika 72. Dijagram statičkog vlačnog pokusa, najmanjih izmjerenih vrijednosti ispitanih epruveta

Ukupno gledajući, usporedbom priloženih dijagrama i vrijednosti zabilježenih u tablicama analize rezultata uočava se kako je sanitarni poli(metil-metakrilat) zabilježio najveće vrijednosti vlačne čvrstoće. Slične, ali nešto niže vrijednosti vlačne čvrstoće izmjerene su i kod Perspex poli(metil-metakrilata). S obzirom na sličnost u strukturi oba spomenuta materijala, približne vrijednosti vlačne čvrstoće su očekivane.

Bitno je napomenuti kako oba materijala zbog svoje amorfne strukture ne pokazuju granicu razvlačenja, ona je zbog toga prikazana konvencionalnom granicom razvlačenja dogovorene vrijednosti trajnog istezanja od 0.1%. Amorfna struktura ovih materijala rezultira i istim vrijednostima vlačne i prekidne čvrstoće ispitanih epruveta.

Najniže vrijednosti vlačne čvrstoće izmjerene su kod akrilonitril/butadien/stirena koekstrudiranog slojem poli(metil-metakrilata), koji za razliku od sanitarnog i Perspex poli(metil-metakrilata) u strukturi ima udio kristalne faze. Iz tog razloga pokazuje granicu razvlačenja, a samim time i različite vrijednosti vlačne i prekidne čvrstoće. Udio kristalne faze ovog polimernog materijala rezultat je udjela konstituenata akrilonitril/butadien/stirena, čiji postoci prilikom proizvodnje spomenutog kopolimera variraju, ovisno o svrsi primjene materijala.

9. ZAKLJUČAK

Konstruktivski plastomeri su materijali čija mehanička svojstva dosta ovise o uvjetima kojima su ti materijali izloženi, točnije o temperaturnim uvjetima, načinu prerade, izloženosti vodi ili otapalu i modifikatorima dodanim u strukturu polimernog materijala.

Širok spektar primjene omogućuju im dodaci i modifikatori svojstava, upravo oni poboljšavaju njihove fizikalne i mehaničke karakteristike i čine ih otpornima na uvjete kojima čisti polimerni materijali, bez negativnog učinka, ne bi mogli biti izloženi. Također, u svrhu poboljšanja svojstava mogu polimerizirati sa više monomera i stvoriti kopolimerni materijal poboljšanih strukturnih vrijednosti. Primjer kopolimera poboljšanih svojstava je akrilonitril/butadien/stiren opisan u ovome radu, koji u kombinaciji sa poli(metil-metakrilatom) čini savršen materijal za primjenu u sanitarnoj tehnici.

Zbog specifičnih svojstava poli(metil-metakrilata) i akrilonitril/butadien/stirena i mogućnosti njihovog lakog toplinskog oblikovanja, oba materijala našla su široku primjenu ne samo u sanitarnoj industriji, već i u velikom broju drugih industrijskih grana. Tako je ove materijale moguće koristiti u domaćinstvu, za potrebe u kojima su izloženi vanjskim atmosferskim utjecajima i morskoj vodi, na dugi niz godina bez promjene njihovih svojstava.

LITERATURA

- [1] A. Rogić, I. Čatić, Polimeri i polimerne tvorevine
- [2] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof, Svojstva i primjena materijala
- [3]<https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjw2v26jrbXAhVBORoKHYQtB6oQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Feskola.chem.pmf.hr%2Fudzbenik%2Fu41%2F20%2520polimeri.pdf&usg=AOvVaw0DUGyiTkYgH55h3HCLOWYC>
- [4]<https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjosaDjbbXAhXCtBoKHXICD7EQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fstudentski.hr%2Fsystem%2Fmaterials%2F9%2Fada642f58f51231d5edad4fdd6edbe3a9c38c613.zip%3F1439380764&usg=AOvVaw2dFo19pOVswCjyKcnaKFed>
- [5]https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiB1_irj7bXAhWGLhoKHbMmAK8QFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fhome.ufam.edu.br%2Fberti%2Fnanomateriais%2F0495296023MaterialsEnginee.pdf&usg=AOvVaw0_tn8hlyAFbFFL0mPLAcj0
- [6] B. Križan, R. Basan, Polimerni konstrukcijski elementi
- [7] <http://www.maziva.org/wp-content/uploads/Slika-2.3-1.png>
- [8] https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDilavost#/media/File:Brittle_v_ductile_stress-strain_behaviour.png
- [9] <http://www.madehow.com/Volume-2/Acrylic-Plastic.html>
- [10] britannica.com/polymethylmetacrylate
- [11] <https://www.aquaestil.hr/hr/zanimljivosti/19-vise-o-akrilnim-kupaonskim-kadama.html>
- [12] <http://lucitespaandbath.com/wp-content/uploads/2016/12/SafetyDataSheet.pdf>
- [13]http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_099c/0901b8038099c431.pdf?filepath=acrylates/pdfs/noreg/745-00109.pdf&fromPage=GetDoc
- [14] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/Methyl-methacrylate-3D-balls.png>
- [15] <http://www.agrotehnika.hr/media/1221/naocale.jpg>
- [16] <https://sc01.alicdn.com/kf/HTB11hwiKXXXXXc3XFXXq6xXFXXX0/Butyl-Acrylate-CH2CHCOOCH2CH2CH2CH3-CAS-NO-141-32.jpg>
- [17] <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/factsheets/chemical-name/dibutyl-phthalate-dbp>
- [18] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/68/Benzyl-butyl-phthalate-3D-balls.png/400px-Benzyl-butyl-phthalate-3D-balls.png>
- [19]<https://www.uredisvojd.com/pictures/products/8cf1d18ab080e3485e57748b5628b9a7.jpg>

- [20] <http://www.reta.hr/upload/images/modules/catalog/gallery/original/140-laguna-2.jpg>
- [21] <https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjj-vGxoLbXAhVIIcAKHXtAAS0QFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fprints.utm.my%2F2710%2F1%2F71820.pdf&usg=AOvVaw0VzOOAc9wW8KJpCqpymz2G>
- [22] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Styrene-3D-balls.png>
- [23] Hrvatska enciklopedija, Broj 10 (SI-To), str. 255.. Za izdavača: Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb 2008.g]
- [24] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Acrylonitrile-3D-balls.png>
- [25] <https://www.britannica.com/science/nitrile#ref122136>
- [26] https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjjkM_FobbXAhWsCMAKHXAICJgQFggkMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.fkit.unizg.hr%2F_download%2Frepository%2FDiMP__3_predavanje_2016_2017%255B1%255D.pdf&usg=AOvVaw165lkHm5UxYrdlUrZmXYyo
- [27] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/DiMP__4_predavanje_2016_2017%5B1%5D.pdf
- [28] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Trans-butadiene-3D-balls.png>
- [29] Sun, H.P. Wristers, J.P. (1992). Butadiene. In J.I. Kroschwitz (Ed.), Encyclopedia of Chemical Technology, 4th ed., vol. 4, pp. 663–690. New York: John Wiley & Sons.
- [30] <http://pslc.ws/macrog/images/pb01.gif>
- [31] http://www.kmdbabic.com/Repository/images/opci-sadrzaji/obnovaGuma-M729EVO_Velika.jpg
- [32] <https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjrnlKRorbXAhUmJMAKHR7YAIQQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.idistub.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F01%2FMANUAL-ABS-DURAFLO.pdf&usg=AOvVaw2hKbbYC5Eps2FwBMNZA6Pm>
- [33] <https://sh-s7-live-s.legocdn.com/is/image/LEGOMKTG/missing-pieces>
- [34] <http://www.resinex.hr/polimer-vrste/abs.html>
- [35] http://plasticer.de/recybase/docs/19876_1373545390.pdf
- [36] <https://www.youtube.com/watch?v=Z4w0JZif3-w>
- [37] <https://www.tehnologijahrane.com/enciklopedija/barijerni-viskobarijerni-ambalazni-materijali>
- [38] <https://www.ggplastics.com/products/pmma-abs-acrylic-capped-abs>
- [39] https://www.aquaestil.hr/images/kupaonske_kade_big.jpg
- [40] Gašperčić, I., Prilozi za povijest industrije plastike u Hrvatskoj: Proizvodnja poli(vinilklorida)

[41] Struktura i svojstva polimera, T. Kovačić, Udžbenici sveučilišta u Splitu, Split, 2010.

[42] „Materijali I“ Vinko Ivušić, Mladen Franz, Đurđica Španiček, Lidija Ćurković , Udžbenici sveučilišta u Zagrebu 2011

[43]<https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjrnIKRorbXAhUmJMAKHR7YAIQQFgguMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.idistub.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2015%2F01%2FMANUAL-ABS-DURAFLO.pdf&usg=AOvVaw2hKbbYC5Eps2FwBMNZA6Pm>

PRILOZI

Lucite International XL Sanitary Ware Acrylic Sheet

Category : Polymer , Thermoplastic , Acrylic (PMMA)

Material Notes:

Lucite® XL continuous-cast cross-linked acrylic sheet is specially formulated for deep-draw thermoforming. It is used primarily for production of spas. Benefits: Smooth surface; Infinite colors and effects; Hardwearing; Exceptional quality; 100% recyclable; Enhanced functionality. Information provided by Lucite International

| Physical Properties | Metric | English | Comments |
|---|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Density | 1.19 g/cc | 0.0430 lb/in ³ | ASTM D792 |
| Water Absorption | 0.25 % | 0.25 % | ASTM D570 |
| Linear Mold Shrinkage | <= 0.025 cm/cm | <= 0.025 in/in | |
| Mechanical Properties | Metric | English | Comments |
| Hardness, Rockwell M | 95 | 95 | ASTM D785 Procedure A |
| Tensile Strength | 62.0 - 69.0 MPa | 8990 - 10000 psi | specimen type 1, 5 mm/mn; ASTM D638 |
| Elongation at Break | 4.0 - 5.0 % | 4.0 - 5.0 % | |
| Modulus of Elasticity | 3.172 GPa | 460.1 ksi | |
| Flexural Strength | 110.3 MPa | 16000 psi | ASTM D790 (Method 1, Procedure A) |
| Compressive Yield Strength | 111 MPa | 16100 psi | ASTM D695 |
| Shear Strength | 59.6 MPa | 8640 psi | |
| Izod Impact, Notched | 0.160 J/cm | 0.300 ft-lb/in | ASTM D256 method C |
| Thermal Properties | Metric | English | Comments |
| CTE, linear | 70.0 $\mu\text{m/m-}^{\circ}\text{C}$ | 38.9 $\mu\text{in/in-}^{\circ}\text{F}$ | ASTM D696 |
| Specific Heat Capacity | 1.47 J/g- $^{\circ}\text{C}$ | 0.351 BTU/lb- $^{\circ}\text{F}$ | ASTM C351 |
| Thermal Conductivity | 0.209 W/m-K | 1.45 BTU-in/hr-ft ² - $^{\circ}\text{F}$ | ASTM C177-76 |
| Maximum Service Temperature, Air | 80.0 $^{\circ}\text{C}$ | 176 $^{\circ}\text{F}$ | |
| Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi) | 86.0 $^{\circ}\text{C}$ | 187 $^{\circ}\text{F}$ | ASTM D648 |

Flammability, UL94

| Electrical Properties | Metric | English | Comments |
|------------------------|--|--|----------------------------|
| Volume Resistivity | 1.00e+15 ohm-cm | 1.00e+15 ohm-cm | ASTM D257 |
| Surface Resistance | <= 1.00e+14 ohm @Temperature 28.0 Å°C | <= 1.00e+14 ohm @Temperature 82.4 Å°F | 75% RH; ASTM D257 |
| Dielectric Constant | 3.0 @# of Cycles 1000 | 3.0 @# of Cycles 1000 | ASTM D150 |
| | 3.0 @# of Cycles 1.00e+6 | 3.0 @# of Cycles 1.00e+6 | ASTM D150 |
| | 4.0 @# of Cycles 60.0 | 4.0 @# of Cycles 60.0 | ASTM D150 |
| Dielectric Strength | 20.0 kV/mm | 508 kV/in | short time test; ASTM D149 |
| Processing Properties | Metric | English | Comments |
| Processing Temperature | 170 - 190 Å°C | 338 - 374 Å°F | thermoforming temperature |

Chemical identity of the substance

Poly(Methyl methacrylate/Butyl acrylate)

CAS No.

25852-37-3

| Substance identity | %W/W | CAS No. |
|--|------|------------|
| Poly(Methyl methacrylate/Butyl acrylate) | ~97 | 25852-37-3 |
| Methyl methacrylate | ~1 | 80-62-6 |
| Dibutyl phthalate | >0.1 | 84-74-2 |

Perspex® CC Technical Data Sheet

Perspex® CC is an acrylic sheet, manufactured by the continuous cast method of production and only available (in Europe) through Lucite International. It offers unique performance benefits during fabrication and in service.

| Property | Test Method | Units | Values |
|--|-------------|------------------------------------|-------------------|
| General Properties | | | |
| Density | ISO 1183 | - | 1.19 |
| Rockwell Hardness | ISO 2039-2 | M scale | 100 |
| Water Absorption | ISO 62 | % | 0.3 |
| Flammability | UL94 | - | HB |
| Mechanical Properties | | | |
| Tensile Strength | ISO 527 (5 | MPa | 75 |
| Elongation at Break | mm/min) | % | >4 |
| Flexural Strength | ISO 527 (5 | MPa | >115 |
| Flexural Modulus | mm/min) | MPa | 3200 |
| Impact Strength – Charpy (unnotched) | ISO 178 (2 | kJ.m^{-2} | 12 |
| Izod Impact Strength | mm/min) | kJ.m^{-2} | 2 |
| Thermal Properties | | | |
| Vicat Softening Point | ISO 179 | °C | >105 |
| Coefficient of Thermal Expansion (Linear) | ISO 180/1A | $\text{X } 10^{-5}. \text{K}^{-1}$ | 7.7 |
| Optical Properties | | | |
| Light Transmission | ISO 306 A | | >92 |
| Refractive Index | ASTM D696 | % (3mm) | 1.49 |
| Electrical Properties | | | |
| Surface Resistivity | ASTM D1003 | | >10 ¹⁴ |
| Electrical Strength | ISO 489 A | $\Omega.\text{m}^{-2}$ kV.mm-1 | 15 |
| | IEC 93 | | |
| | IEC 243 | | |



...Il tuo partner per i Materiali Termoplastici

TECHNICAL SHEET MP3

ACRYLAC 500 PX

This product is obtained by a process of extrusion of layers of ABS (copolymer of STYRENE, BUTADIENE, ACRYLONITRILE) and of PMMA (polymer of METHYLMETHACRYLATE). It is characterised by medium mechanical strength, high rigidity, and good physical properties. The layer of PMMA gives the product an excellent appearance, high resistance to abrasion, and, if it is coloured, protection from UV rays, which slows its ageing and colour change. It is extruded in sheets in a wide range of colours, smooth, and in different sizes of embossing grains.

| PROPERTY | TEST METHOD | | | VALUE | |
|----------------------------------|-------------|---------|----------|-------|-------------------|
| | ISO | DIN | ASTM | | |
| SPECIFIC WEIGHT | 1183 | 53479 | D-792 | 1,10 | g/cm ³ |
| TRACTION | | | | | |
| Yield strength | R-527 | - | D-638 | 45 | N/mm ² |
| Elastic modulus | R-527 | - | D-638 | 1940 | N/mm ² |
| Ultimate tensile strength | R-527 | - | D-638 | 38 | N/mm ² |
| IMPACT STRENGTH | | | | | |
| Charpy at 23°C impact side: PMMA | 179/1fa | 53453 | - | 22 | KJ/m ² |
| Charpy at 23°C impact side: ABS | 179/1fa | 53453 | - | 10 | KJ/m ² |
| SOFTENING TEMPERATURE | | | | | |
| Vicat | 306A | | D-1525-B | 110 | °C |
| HDT A | 75/A | 53461-A | D-648 | 100 | °C |

To the best of our present knowledge, the data refers to the neutral material (uncoloured and without additives) and is only indicative, since the properties of the finished product, in comparison with the properties of the granular materials, can undergo variations due to the processes of extrusion, thermoforming, and ageing, and to the presence of colorants and additives.

The information and data cited here do not constitute nor imply, in general terms, any guarantee or obligation on the part of MP3.

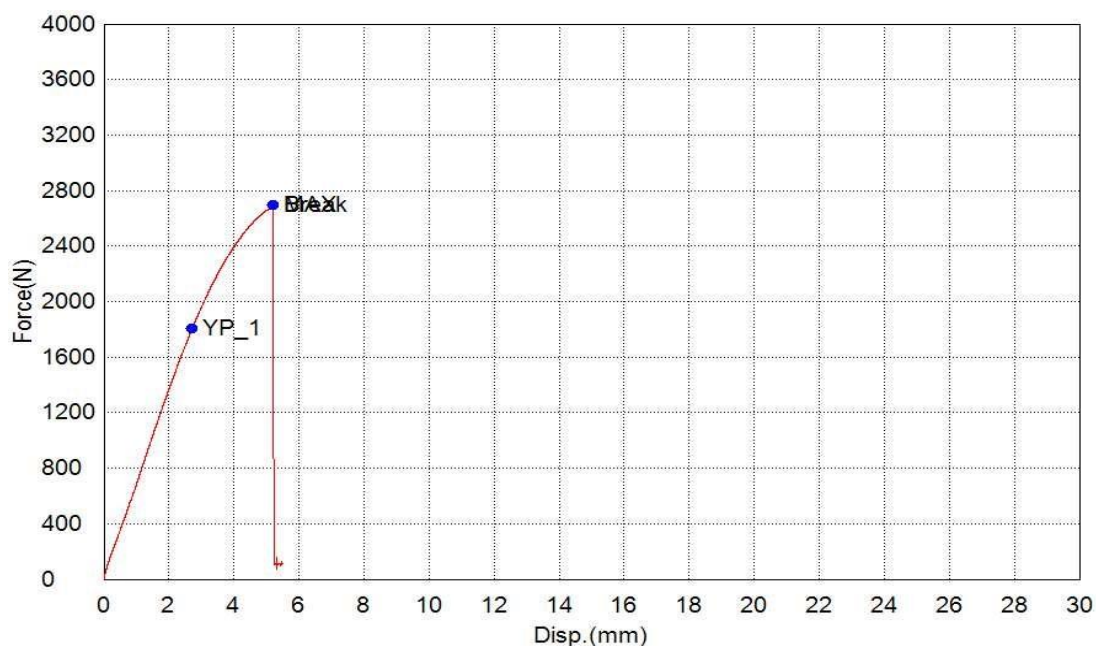
Issued: 13 July 1995
Revised: 29 Mai 2006

MP3 - Industria Coestruzione Laminati Plastici
I.L.P.A. srl - Divisione MP3
Via Muzza Spadetta, 36 - 40053 Bazzano (BO) - Italy
Tel: +39 051 6715811 - Fax: +39 051 6715907
E-mail: info@ilpa-mp3.com
Internet: http://www.ilpa-mp3.com

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

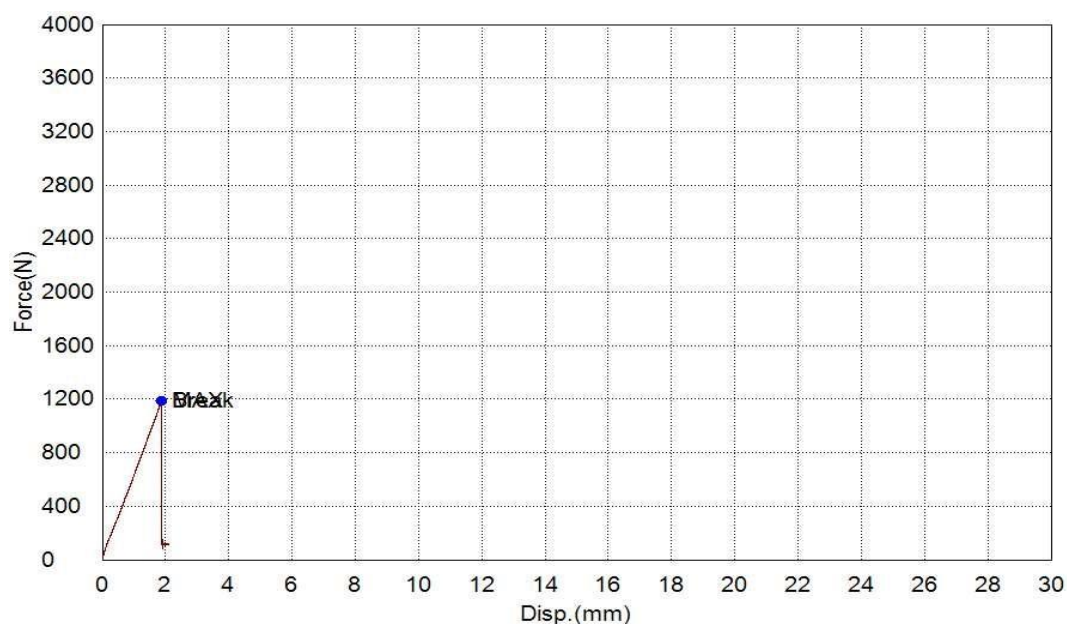
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2693,48 | 89,7826 | 5,21004 | 6,00028 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2693,48 | 89,7826 | 5,21004 | 6,00028 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1804,62 | 60,1541 | 2,71271 | 3,12416 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

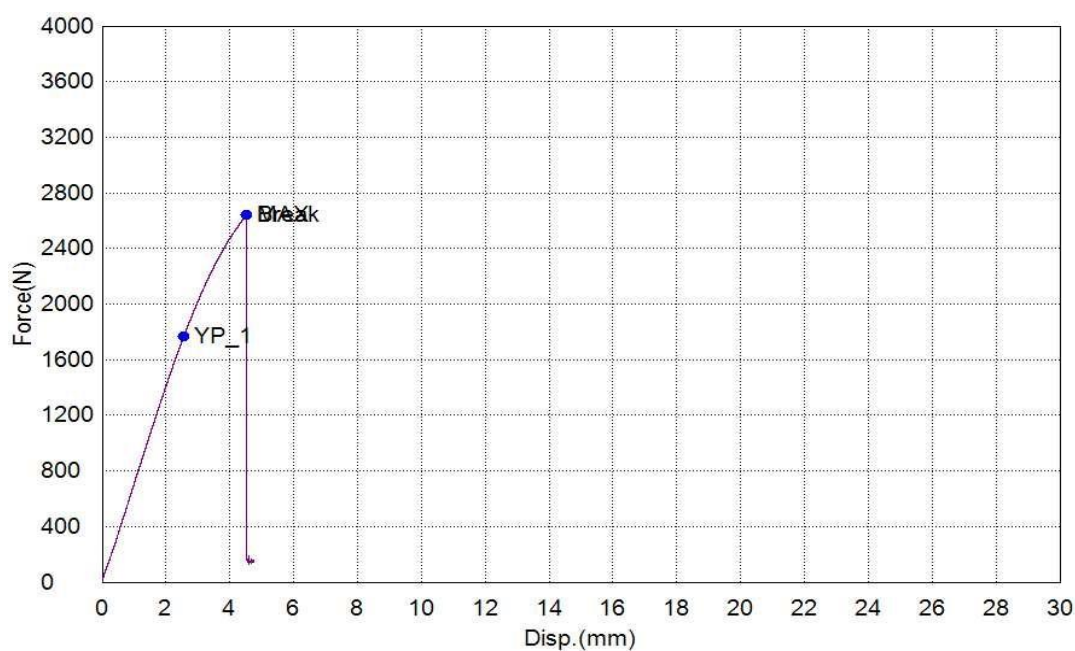
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1190,07 | 39,6691 | 1,88488 | 2,17077 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1190,07 | 39,6691 | 1,88488 | 2,17077 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

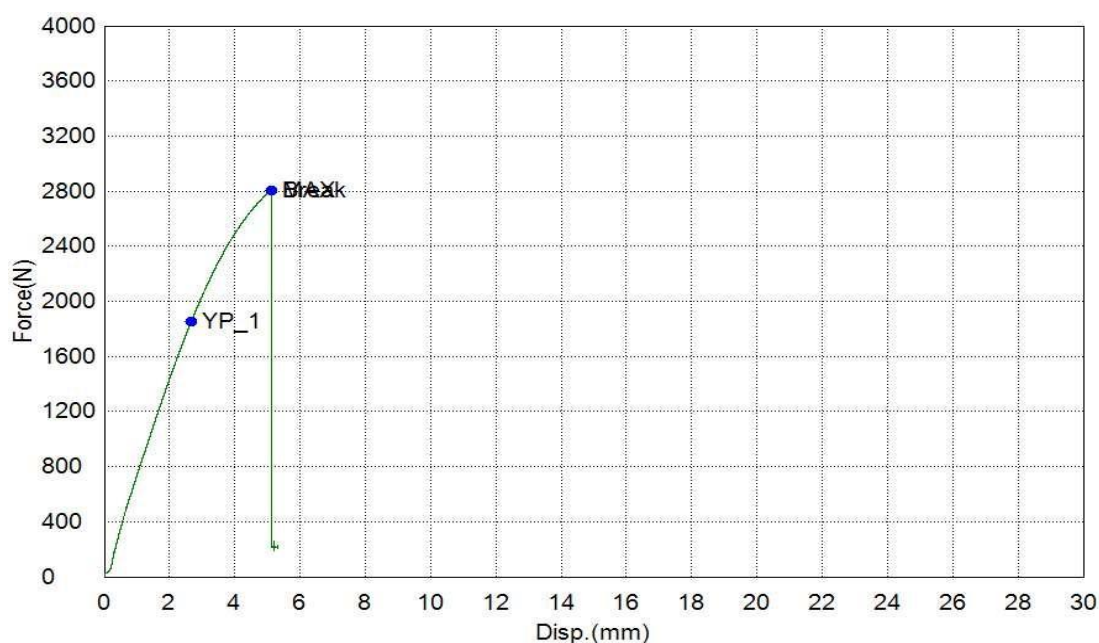
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2642,31 | 88,0771 | 4,53058 | 5,21776 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2642,31 | 88,0771 | 4,53058 | 5,21776 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1770,86 | 59,0287 | 2,56381 | 2,95268 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručilatelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

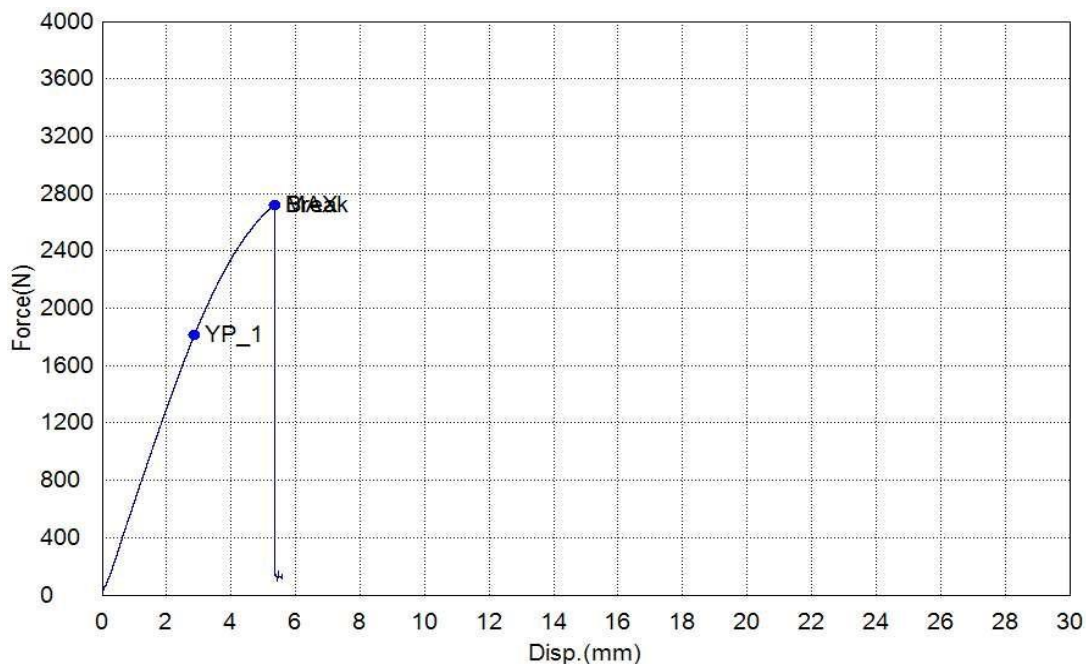
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2802,77 | 93,4257 | 5,10927 | 5,88422 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2802,77 | 93,4257 | 5,10927 | 5,88422 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1856,72 | 61,8908 | 2,67235 | 3,07769 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

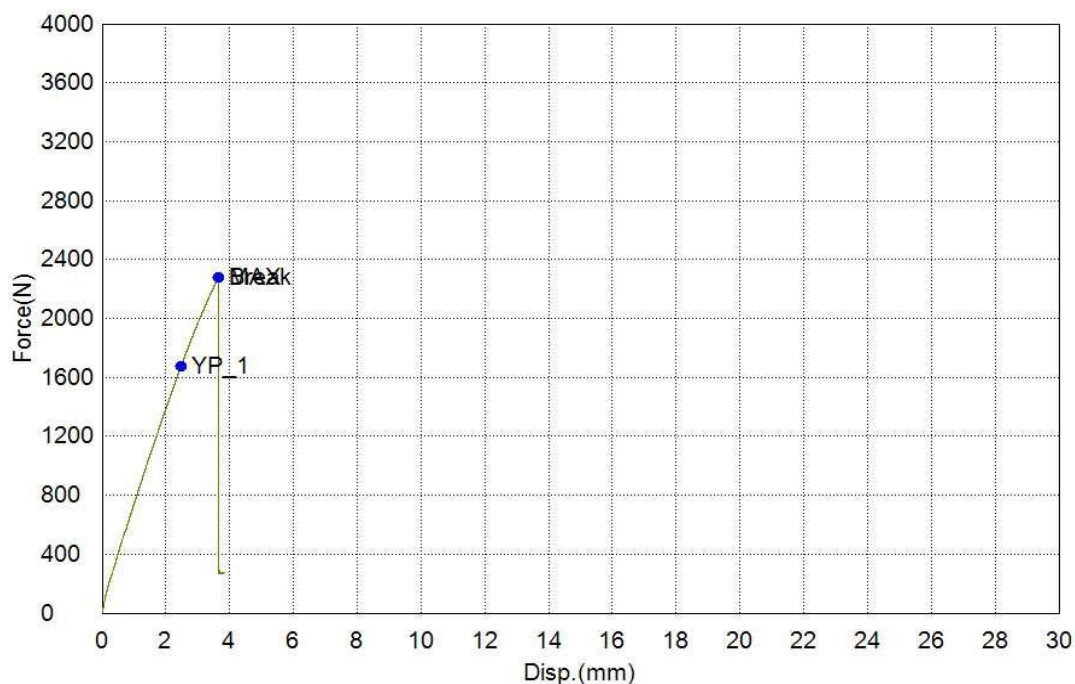
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2719,07 | 90,6356 | 5,35554 | 6,16785 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2719,07 | 90,6356 | 5,35554 | 6,16785 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1816,58 | 60,5525 | 2,86919 | 3,30437 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

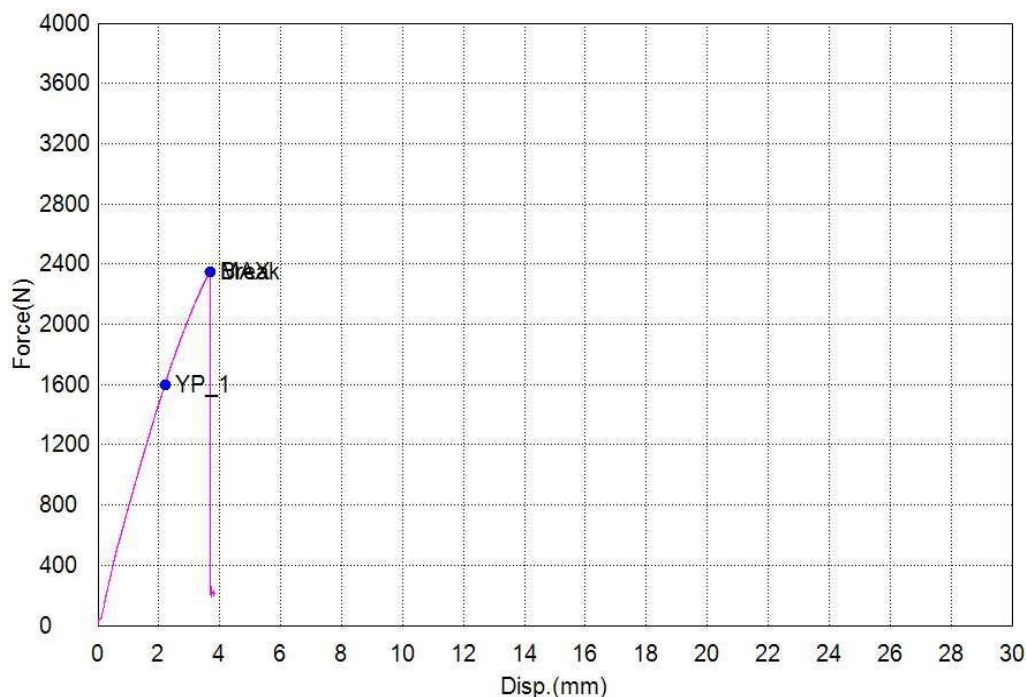
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2281,25 | 76,0418 | 3,65217 | 4,20611 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2281,25 | 76,0418 | 3,65217 | 4,20611 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1673,40 | 55,7799 | 2,47529 | 2,85073 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | AKRIL | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

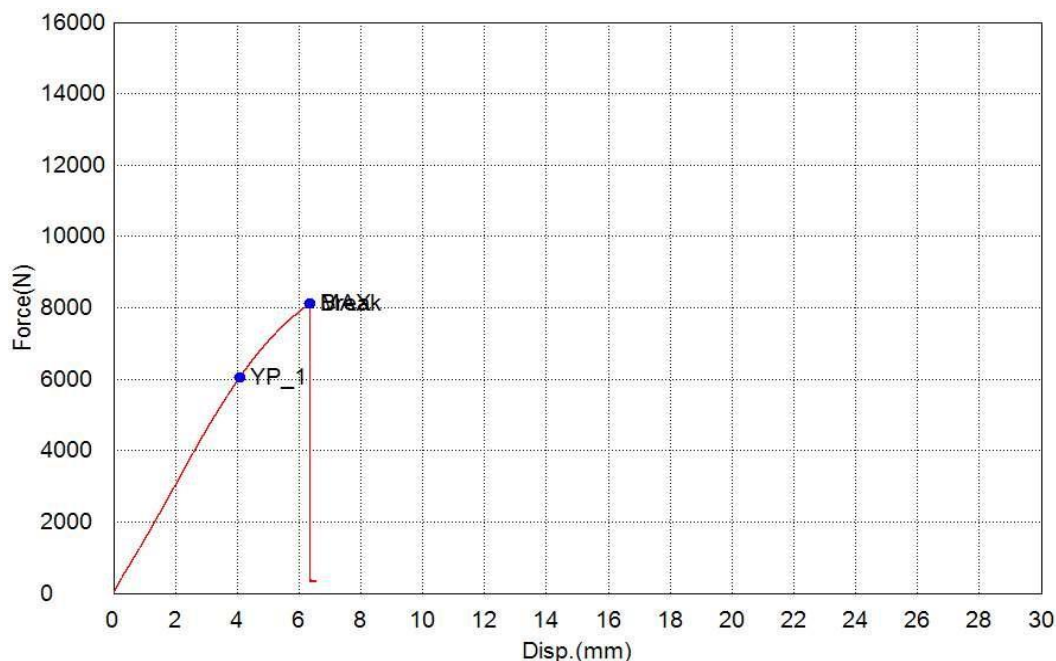
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2351,25 | 78,3751 | 3,68356 | 4,24227 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 2351,25 | 78,3751 | 3,68356 | 4,24227 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | 1598,82 | 53,2940 | 2,19938 | 2,53297 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| AKRIL | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

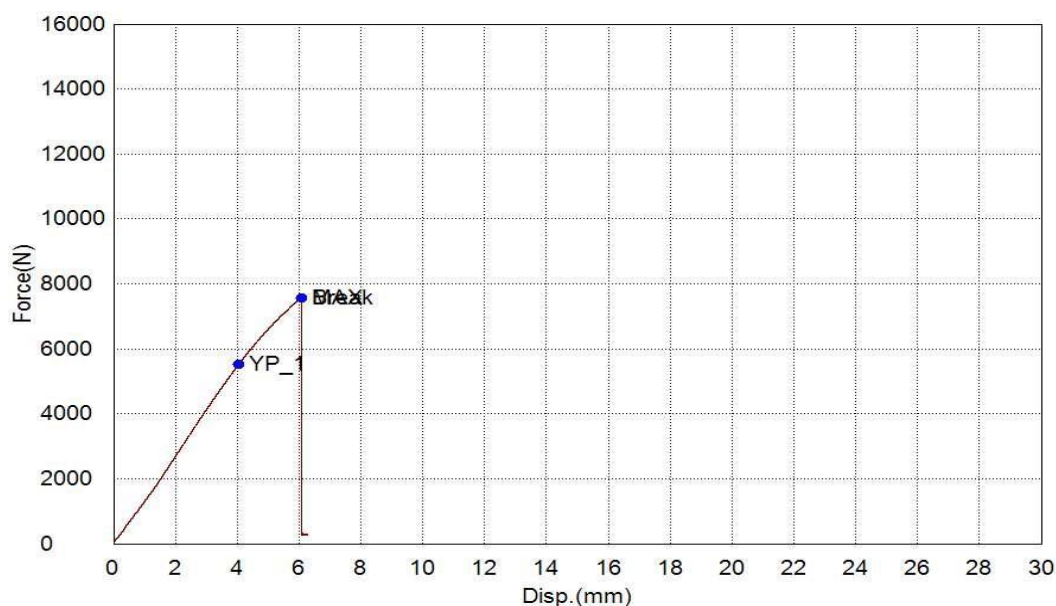
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 8112,56 | 81,1256 | 6,33958 | 7,30114 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 8112,56 | 81,1256 | 6,33958 | 7,30114 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 6051,72 | 60,5172 | 4,08033 | 4,69922 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

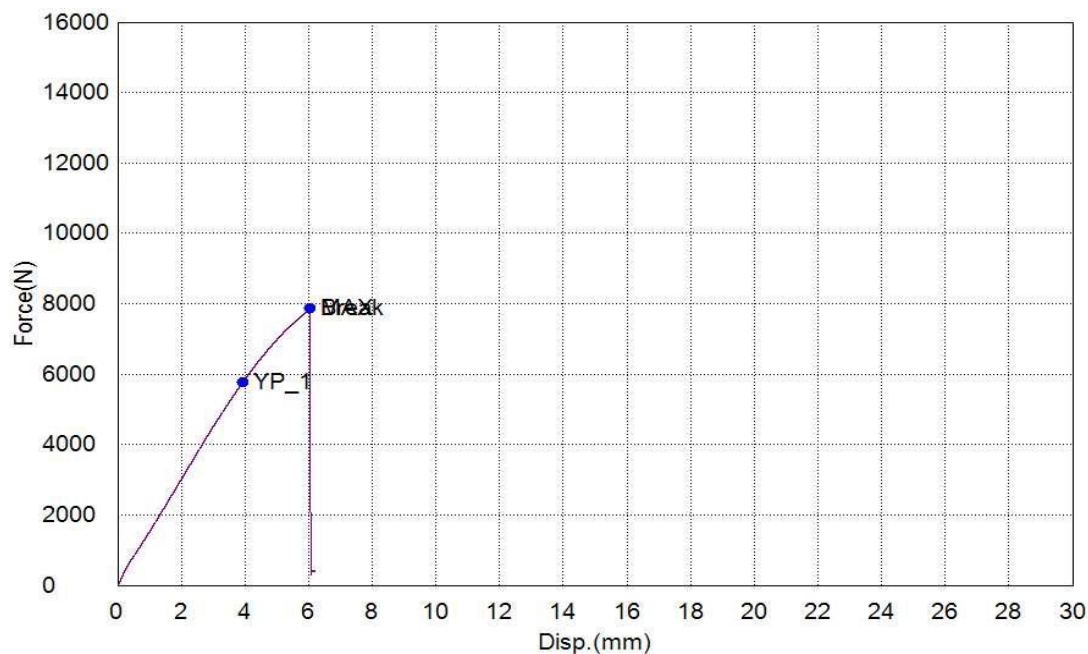
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7567,63 | 75,6763 | 6,08810 | 7,01152 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7567,63 | 75,6763 | 6,08810 | 7,01152 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5523,90 | 55,2390 | 4,05377 | 4,66863 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

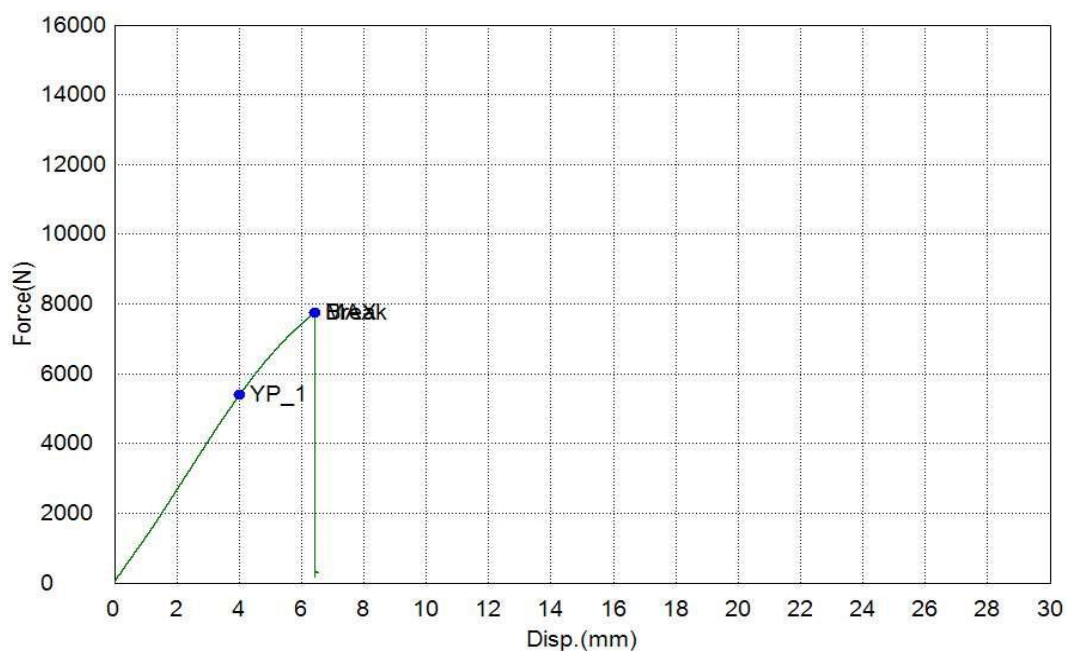
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7865,18 | 78,6518 | 6,05919 | 6,97822 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7865,18 | 78,6518 | 6,05919 | 6,97822 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5775,77 | 57,7577 | 3,94004 | 4,53765 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

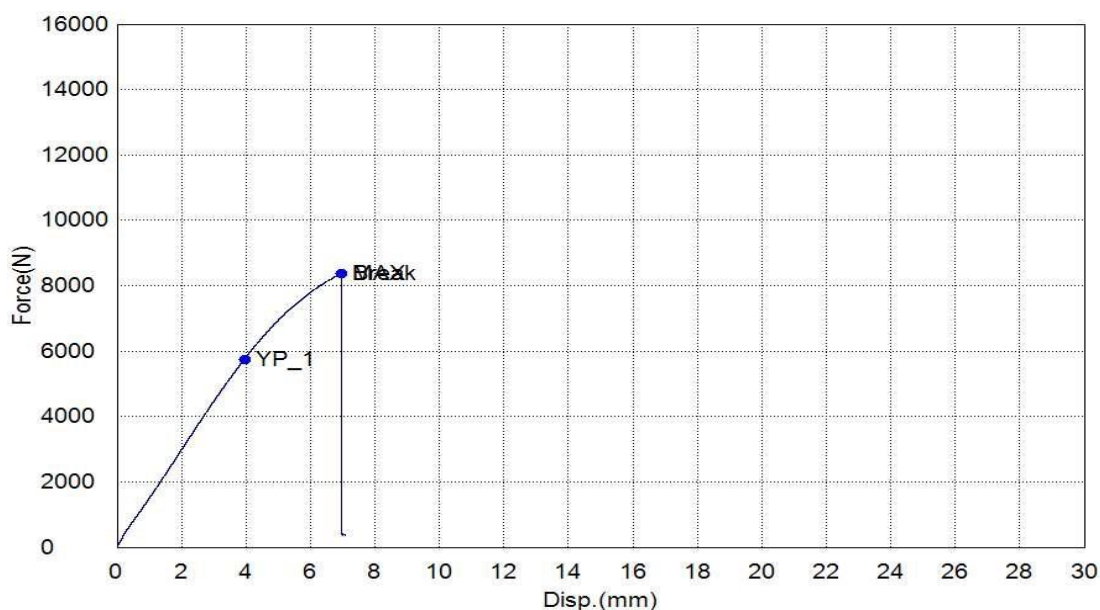
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7753,01 | 77,5301 | 6,42833 | 7,40336 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7753,01 | 77,5301 | 6,42833 | 7,40336 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5409,38 | 54,0938 | 4,02475 | 4,63521 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

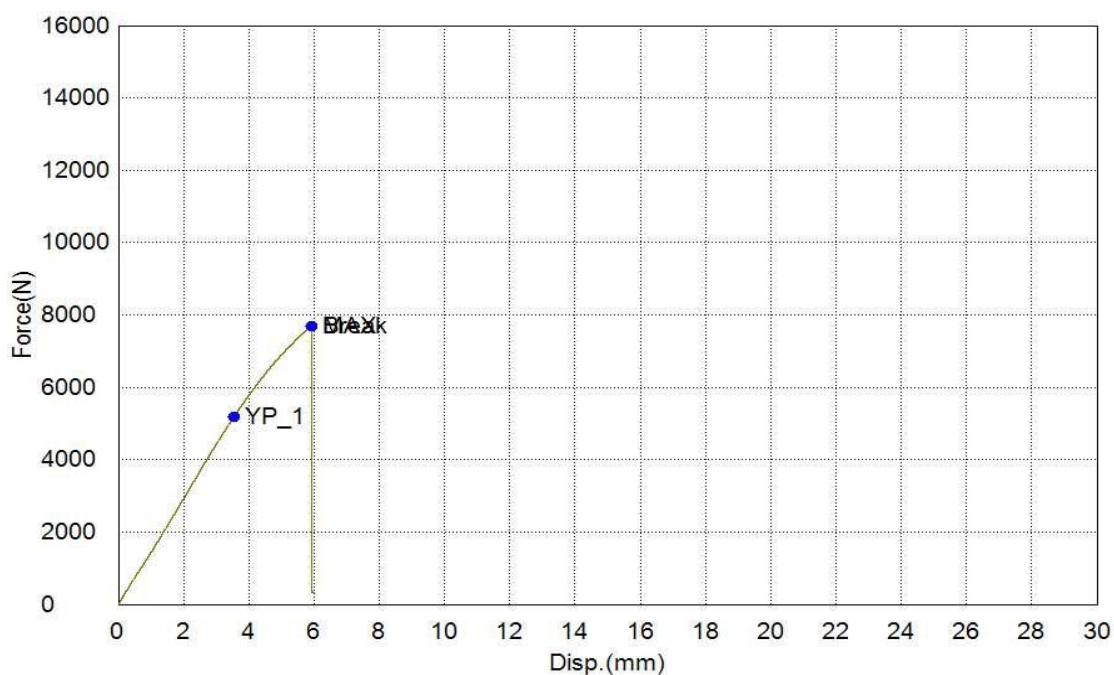
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 8379,35 | 83,7935 | 6,97379 | 8,03155 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 8379,35 | 83,7935 | 6,97379 | 8,03155 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5753,50 | 57,5350 | 3,95340 | 4,55303 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

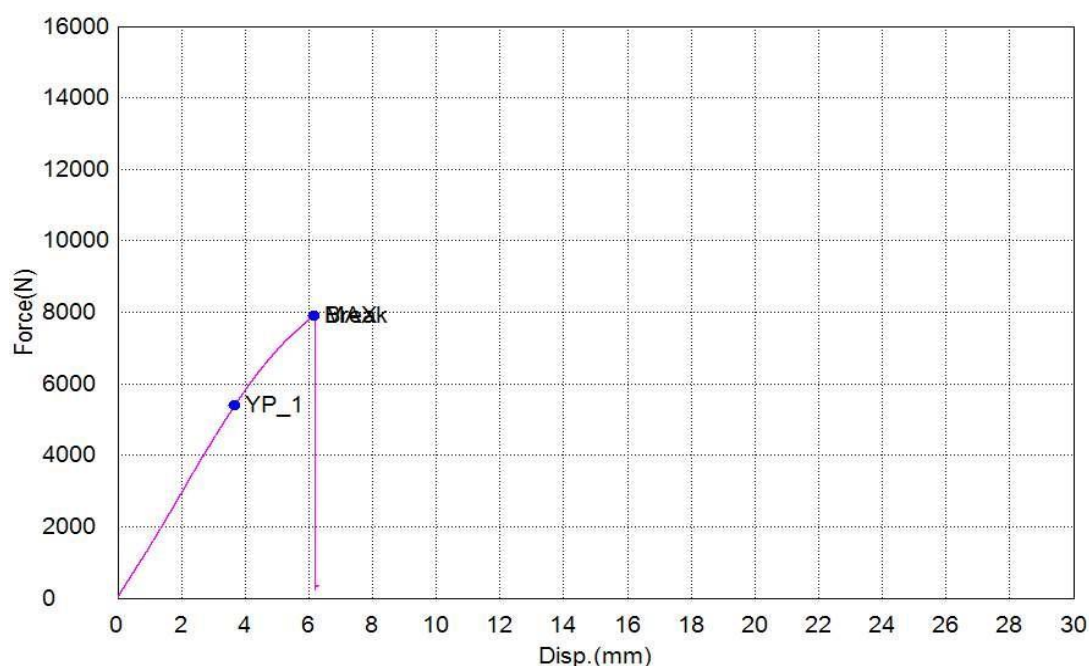
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7677,44 | 76,7744 | 5,91306 | 6,80993 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7677,44 | 76,7744 | 5,91306 | 6,80993 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5180,92 | 51,8092 | 3,54167 | 4,07885 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | PERSPEX | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

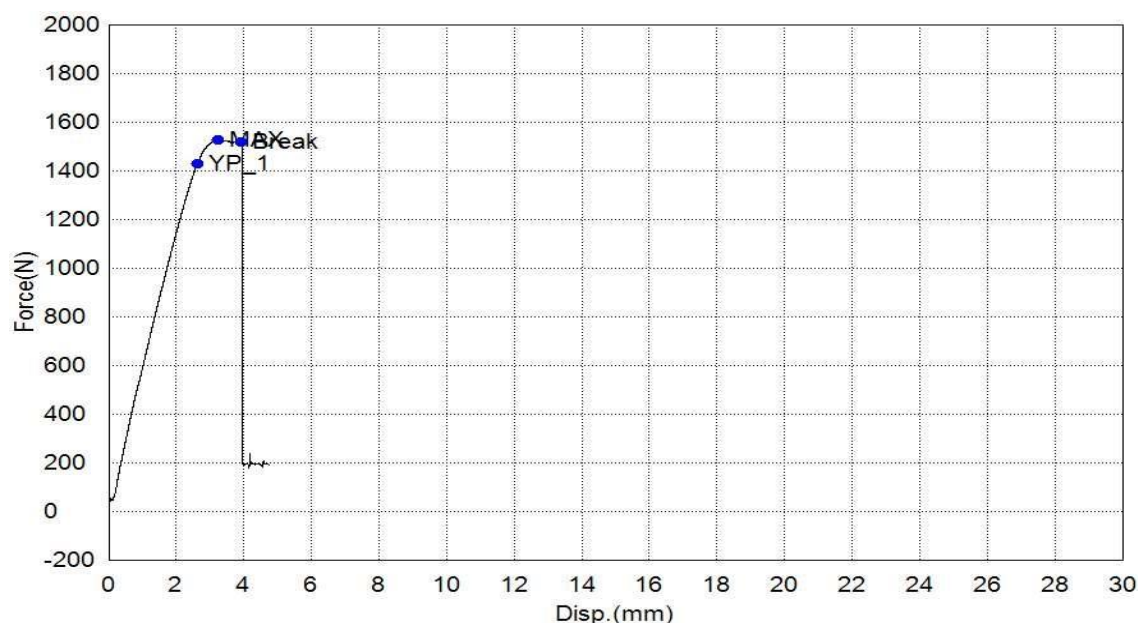
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7916,67 | 79,1667 | 6,17565 | 7,11234 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 7916,67 | 79,1667 | 6,17565 | 7,11234 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | 5387,53 | 53,8753 | 3,66863 | 4,22507 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| PERSPEX | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

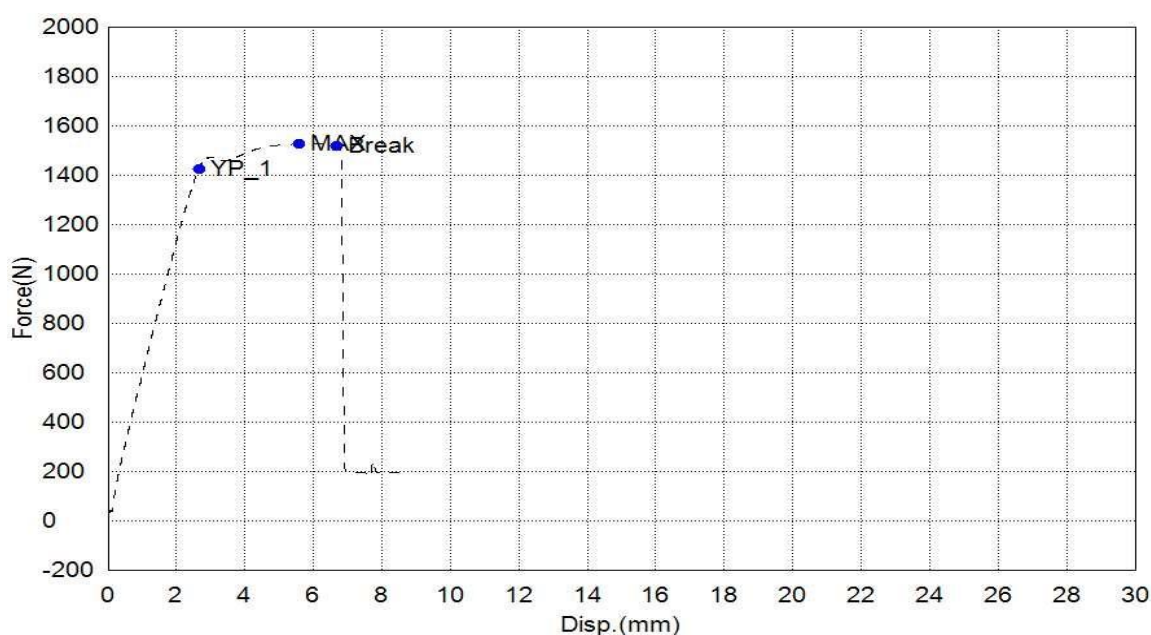
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1526.04 | 50.8679 | 3.24073 | 3.73227 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1519.14 | 50.6380 | 3.91294 | 4.50644 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1429.26 | 47.6419 | 2.63360 | 3.03306 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

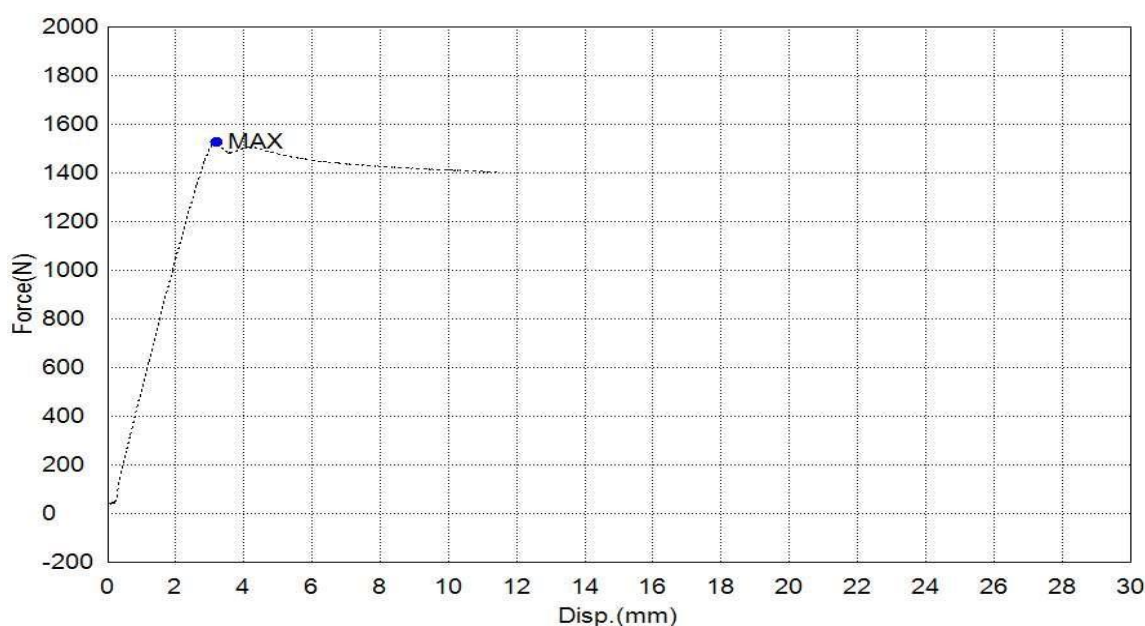
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1525.18 | 50.8393 | 5.59013 | 6.43801 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1518.23 | 50.6078 | 6.69275 | 7.70788 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1423.58 | 47.4527 | 2.65181 | 3.05403 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

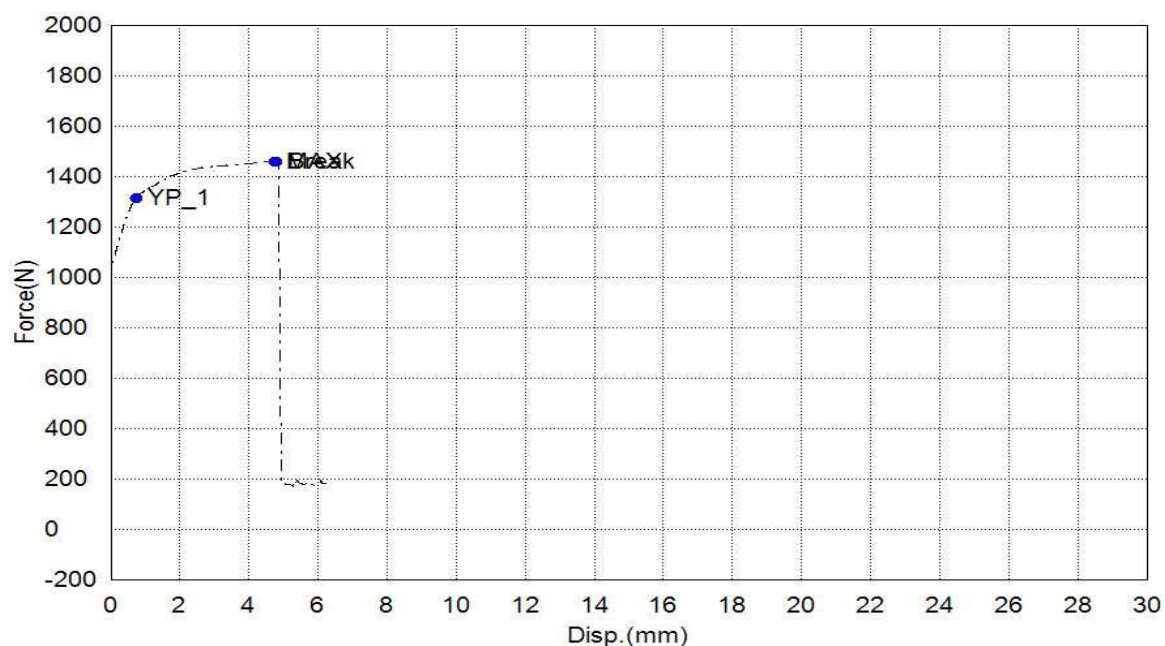
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1524.94 | 50.8314 | 3.18013 | 3.66247 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

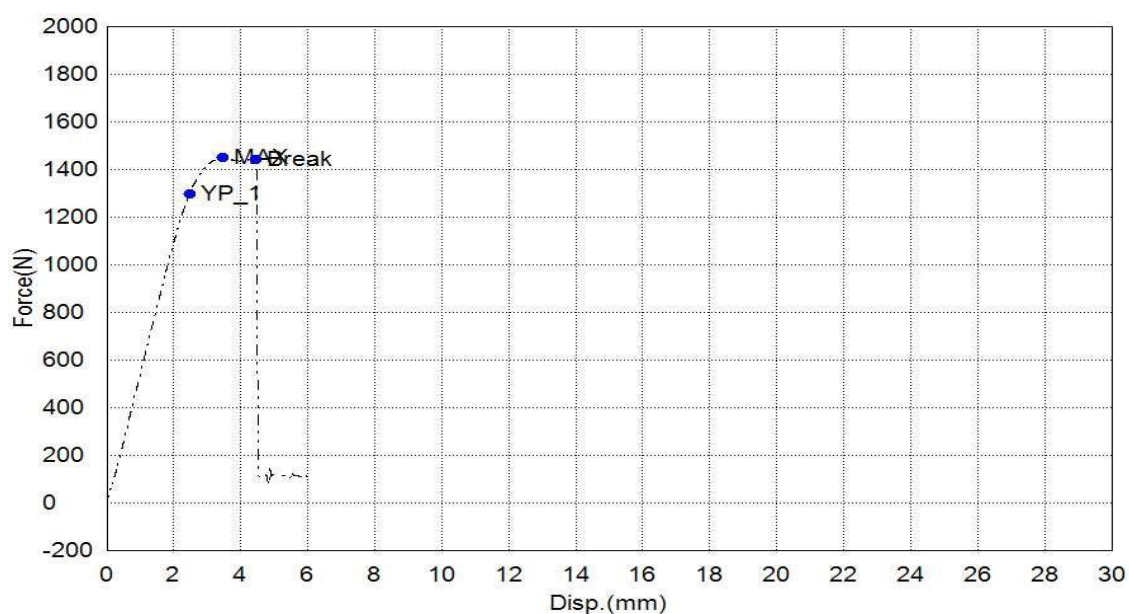
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1457.88 | 48.5961 | 4.76133 | 5.48351 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1457.61 | 48.5871 | 4.78413 | 5.50976 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1313.00 | 43.7668 | 0.72975 | 0.84044 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

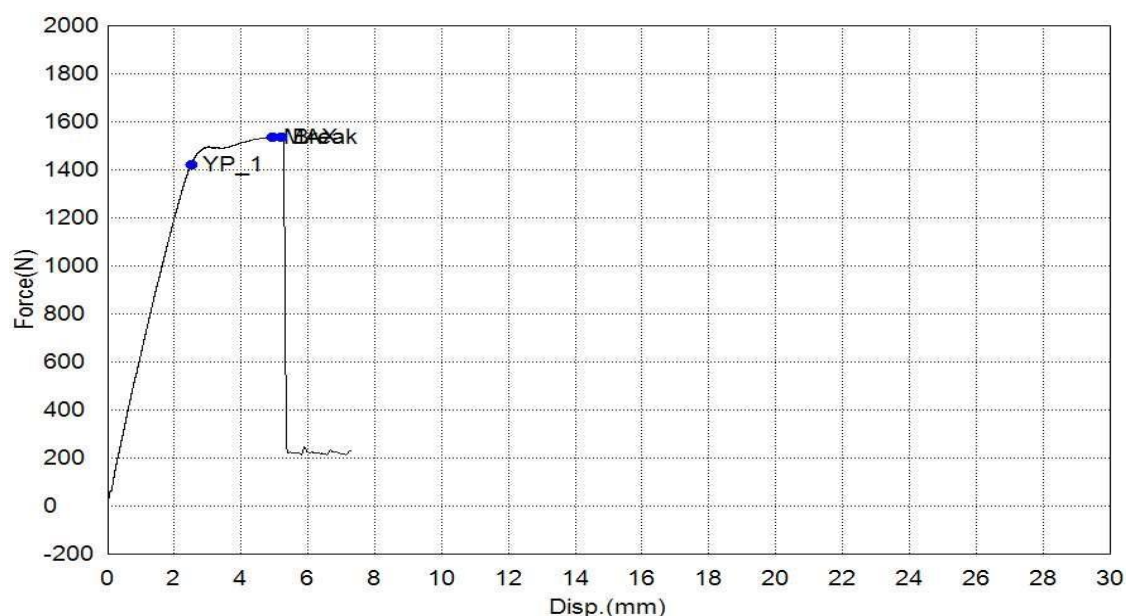
| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1449.65 | 48.3216 | 3.45329 | 3.97707 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1441.38 | 48.0461 | 4.43252 | 5.10483 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1294.10 | 43.1368 | 2.46360 | 2.83727 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1535.26 | 51.1752 | 4.94363 | 5.69345 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1533.14 | 51.1048 | 5.19075 | 5.97806 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1419.99 | 47.3330 | 2.50013 | 2.87933 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |



IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

| | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| Radni nalog | | Naručitelj | Veleučilište u Karlovcu |
| Broj crteža | | Narudžba br. | |
| Materijal | ABS | Količina | 1/7 |
| Norma | | Tehnički propis | |
| Broj šarže | | Broj probe | |
| Dimenzija | | Toplinska obrada | |
| Predmet | | Brzina ispitivanja | 80 N/sec |
| Datum ispitivanja | 02.11.2017. | Norma | |

| Name | Max_Force | Max_Stress | Max_Stroke | Max_Stroke Strain |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parameters | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas | Calc. at Entire Areas |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1436.87 | 47.8956 | 5.84742 | 6.73433 |
| Name | Break_Force | Break_Stress | Break_Stroke | Break_Stroke Strain |
| Parameters | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 | Sensitivity: 10 |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1430.73 | 47.6911 | 7.04233 | 8.11048 |
| Name | YP(%FS)_Force | YP(%FS)_Stress | YP(%FS)_Stroke | YP(%FS)_Stroke Strain |
| Parameters | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | 1328.09 | 44.2696 | 2.68665 | 3.09415 |
| Name | YS1_Force | YS1_Stress | YS1_Stroke | YS1_Stroke Strain |
| Parameters | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % | 0,2 % |
| Unit | N | N/mm2 | mm | % |
| ABS | -- | -- | -- | -- |

