

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Испитивање машинских конструкција

Број индекса: 324/2011

Сандра Н. Величковић

**Испитивање утицаја фактора спољашње
средине на механичка својства материјала
од пластичних маса**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да обради следеће теме:

- Полимерни материјали
- Механичка својства полимера
- Структура полиетилена
- Испитивање на затезање
- Факторни експеримент
- Опис експеримента и приказ резултата

Кандидат треба да учествује у изради епрувета које су потребне за испитивање на затезање. Такође је потребно да учествује у извођењу самог експеримента. Резултате испитивања треба статистички обрадити помоћу факторног експеримента и приказати помоћу дијаграма.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н., Машински материјали, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [2] Пантелић И., Увод у теорију инжењерског експеримента, Раднички универзитет Радивој Ћирпанов, Нови Сад 1976.
- [3] Недић Б., Ђукић В., Пластичне масе, Машински факултет, Крагујевац 2004.

Крагујевац, фебруар 2013.

ментор:

Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

САДРЖАЈ

ABSTRACT	I
РЕЗИМЕ	II
ПРЕДГОВОР.....	III
1. УВОД.....	1
2. ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ	3
2.1 Историјат развоја полимера	5
3. ВРСТЕ ПОЛИМЕРА	8
3.1 Додаци полимерним материјалима	10
4. ПОЛИЕТИЛЕН.....	12
4.1 Добијање полиетилена.....	13
4.2 Својства политилена	15
4.3 Врсте полиетилена	16
4.4 Производња полиетилена високе густине	17
5. МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ПОЛИМЕРА	18
6. ИСПИТИВАЊЕ НА ЗАТЕЗАЊЕ	24
7. ФАКТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТ	29
7.1 Двофакторни експеримент ограничене рандомизације.....	32
7.2 Факторни експеримент 3 ⁿ	34
8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	36
8.1 Планирање експеримента	36
8.1.1 Стандард.....	36
8.1.2 План експеримента.....	41
8.2 Извођење експеримента.....	41
8.3 Приказ резултата	46
8.4 Статистичка обрада података.....	52
9. ЗАКЉУЧАК.....	58
ЛИТЕРАТУРА.....	60

ABSTRACT

In scope of work the themes related to polymeric materials and processing of the experimental results obtained by tightening polyethylene are processed. The first chapters describe polymeric materials, their historical development, polyethylene and mechanical properties of polymers. The second part includes topics related to the implementation of the experiment and factoring experiment.

It is important to emphasize that the work contain experimental part. Specimens of high density polyethylene in tension at low temperatures with various speeds were examined. Statistical test results were analyzed and graphically displayed. For statistical analysis of the data it was used two factoring experiment with three levels.

The research showed that temperature has a greater influence on the speed test.

Key words: polymeric materials, polyethylene, mechanical properties, tensile testing, factoring experiment.

РЕЗИМЕ

У оквиру рада су обрађене теме везане за полимерне материјале и обраду експерименталних резултата добијених затезањем полиетилена. Прва поглавља описују полимерне материјале, њихов историјски развој, полиетилен и механичка својства полимера. Други део рада обухвата теме које се односе на спровођење експеримента и факторни експеримент.

Важно је нагласити да рад садржи и експериментални део. Испитиване су епрувете од полиетилена високе густине на затезање при сниженим температурама, различитим брзинама. Статистички су обрађени резултати испитивања и графички су приказани. За статистичку обраду података користи се двофакторни експеримент са три нивоа.

Испитивање је показало да већи утицај има температура од брзине испитивања.

Кључне речи: полимерни материјали, полиетилен, механичка својства, испитивање на затезање, факторни експеримент.

ПРЕДГОВОР

Полимерни материјали су нешто без чега се савремено друштво и живот човека у данашње време не може замислити. Понашање полимерних материјала при затезању је од примарне важности, јер даје информације о максималном дозвољеном оптерећењу које може довести до лома.

У инжењерској пракси експеримент је свакодневна метода истраживања или обављања стручног рада. Факторни експеримент представља статистичку методу за обраду експерименталних резултата када на предмет испитивања утиче више фактора са више нивоа. Коришћен је двофакторни експеримент са два фактора на три нивоа.

Испитиване су епрувете од полиетилена високе густине (Hostalen GC 7260) на затезање при различитим брзинама испитивања и температурама. Епрувете су добијене поступком бризгања у фабрици 21. Октобар у Крагујевцу. Испитивање је спроведено како би се утврдило који од фактора има већи утицај на пропадања кошева замрзивача. У лабораторији факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу су спроведена експериментална испитивања. Затезање је извршено на кидалици *ZWICK/ROELL Z 100*. Добијени резултати су статистички обрађени и графички приказани.

Овом приликом желим да се захвалим:

Ментору др Добривоју Ћатићу, ред. проф, на стручном вођењу, саветима и помоћи током израде мастер рада.

Такође се захваљујем и редовним професорима са катедре за Производно машинство др Србиславу Александровићу и др Драгану Адамовићу, који су омогућили извођење експеримента и помогли током испитивања у лабораторији Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Посебно се захваљујем фабрици „21. Октобар“ из Крагујевца која нам је изашла у сусрет и направила епрувете које су коришћене за испитивање на затезање.

А највише желим да се захвалим својим родитељима Ненаду и Дивни, брату Александру, сестри Ирени са својом породицом, комшијама Момиру и Љиљани и осталим најмилијима на стрпљењу и подршци током студирања и писања овог мастер рада.

Овај рад посвећујем пре свега мојој драгој мами која ми је била огромна подршка, током студирања и писања овог рада, али на велику жалост није доживела и одбрану овог рада.

1. УВОД

Историја науке о чврстоћи као гране примењене механике, уско је везана са историјским развитком материјалне културе човечанства [1]. По којим су принципима стари градитељи храмова, пирамида, лука и тако даље одређивали димензије својих конструкционих елемената и какве су машине за дизање и преношење великих терета употребљавали при њиховој изградњи није познато. Највероватније су се користили практичним искуством стеченим у току претходних векова.

Почетком двадесетог века производне потребе поставиле су пред науку низ нових проблема, који су се односили на разне гране механике, а посебно на чврстоћу техничких конструкција (бродови, ватрена оружја, разни типови нових машина и тако даље). Међутим, развој електромеханике као науке започео је заправо тек када су стечена основна сазнања о механичким својствима конструкционих материјала. Даљи развој те науке био је омогућен захваљујући великом и наглом развоју математике.

Према сачуваним записима, један од првих великих умова, који су се бавили проучавањем чврстоће техничких конструкција, био је Леонардо да Винчи (Leonardo da Vinci, 1452-1519). Међутим, прва систематка истраживања на подручју науке о чврстоћи вршио је Галилео Галилеј (Galileo Galilei, 1564-1642), који је био професор математике. Тадашњи нагли развој трговине захтевао је да се повећа носивост бродова, речна пловидба поставила је проблем градње већих канала, примена црног барута проблем градње ватреног оружја и тако даље. Било је потребно решавати нове и често сложене техничке проблеме. Показало се да је при прорачуну таквих конструкција неопходно потребно познавање чврстоће елемената тих конструкција, то јест, зависности њихових димензија од сила које на њих делују. Галилеј је први проучавао чврстоћу носача, вршећи практичне огледе са носачем укљештеним на једном крају, а оптерећеним на слободном крају. Резултате тих огледа објавио је у свом познатом делу „Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze“, штампаном 1638. године. Иако резултати његових истраживања нису тачни (претпоставио је да су напрезања у греди оптерећеној на савијење једнако распоређена у пресеку), јер у то време није још била позната зависност између оптерећења и деформација материјала, припада му заслуга да је започео еру експерименталног испитивања механичких својстава конструкционих елемената.

Закон зависности између оптерећења и деформација први је пронашао 1660. године енглески физичар Роберт Хук (Robert Hooke, 1635-1702). Тај свој проналазак објавио је

тек 1678. У књизи „De potentia restitutiva“ у облику закона: „Ut tensio sic vis“ (истезање је пропорционално сили). Хук је био професор геометрије у Лондону и један од оснивача познатог британског научног друштва „Royal Society“. Повод за проучавање еластичности материјала био је његов познати проналазак спиралне опруге као регулатора хода сатног механизма. До тада је за те сврхе служило само клатно. Иако је Хук свој закон пронашао већ 1660. године, објавио га је тек 1678. године у облику анаграма (ceiinossttuv) према обичају онога доба када још није постојала правна заштита проналазака. Тумачење тог анаграма дао је тек у својој књизи.

Независно од Хука, француски физичар Е. Мариот (E. Mariotte, 1620-1684) дошао је 1680. године до истог закона на основу својих експерименталних истраживања која су била наставак Галилејових проучавања.

Хук је својим законом поставио темељ на којем је касније изграђена математичка теорија еластичности и чврстоће, која се затим веома брзо развијала. Хуков закон је и данас основни закон науке о еластичности материјала, разуме се, уколико се ради о деформацијама у границама пропорционалности. Математичку формулацију Хуковог закона дао је 1807. године енглески научник Томас Јанг (Thomas Young, 1773-1829). По њему се коефицијент пропорционалности - модул еластичности при аксијалном оптерећењу - обично назива Јанговим модулом. Он је увео и појам тангенцијалног напрезања.

Из овог историјског прегледа види се, да су у почетним фазама развоја науке о чврстоћи веома важну улогу одиграли многи истакнути математичари и физичари. Они су истраживали основне физичке законе, поставили фундаменталне математичке зависности и поступке, пронашли нове методе и извршили потребне припреме за њихову практичну примену.

Значајни успеси што су касније, а посебно у новије време остварени на подручју те основне техничке дисциплине углавном су резултати научно – истраживачког рада многобројних инжењера, који се баве свестраним пручавањем те науке. Тај процес истраживања и даље је у току и наука о чврстоћи пружа могућности за још многа занимљива и корисна истраживања.

Последњих година дошло је до наглог пораста примене полимерних материјала у практично свим областима људских делатности. Полимерни материјали због својих специфичних својстава имају врло широке могућности примене.

Полиетилени су највише коришћени међу свим полимерима, захваљујући механичким особинама, лакој прерадљивости и широким могућностима употребе. Имају добру жилавост и одлична клизна својства. Полиетилен је отпоран је на ниске температуре, не апсорбује воду и одлично се заварује [2]. Примењују се у изради елемената отпорних на хабање, у процесној - хемијској и прехранбеној индустрији, као и за израду машинских делова који су изложени мањим оптерећењима.

Велики део истраживања у науци и инжењерству, а поготово у индустрији је емпиријско. Употреба статистичких метода планирања експеримената може знатно повећати ефикасност самог процеса експериментисања и довести до бољих и поузданијих закључака.

2. ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ

Под појмом полимерни материјали подразумевају се технички употребљиви материјали чију основу чине полимери. Врло ретко се полимерни материјали састоје само од полимера, већ најчешће садрже додатке за побољшавање карактеристика квалитета, ради олакшавања прераде или примене [3].

Полимерни материјали се данас убрајају у најважније техничке материјале. Они не служе више само као замена за традиционалне материјале (метал, дрво, керамика и стакло), јер се користе и за израду предмета који се раније нису производили од ових традиционалних материјала.

Назив полимер је сложеница грчких речи поли много и мерос део, што би значило “много делова”.

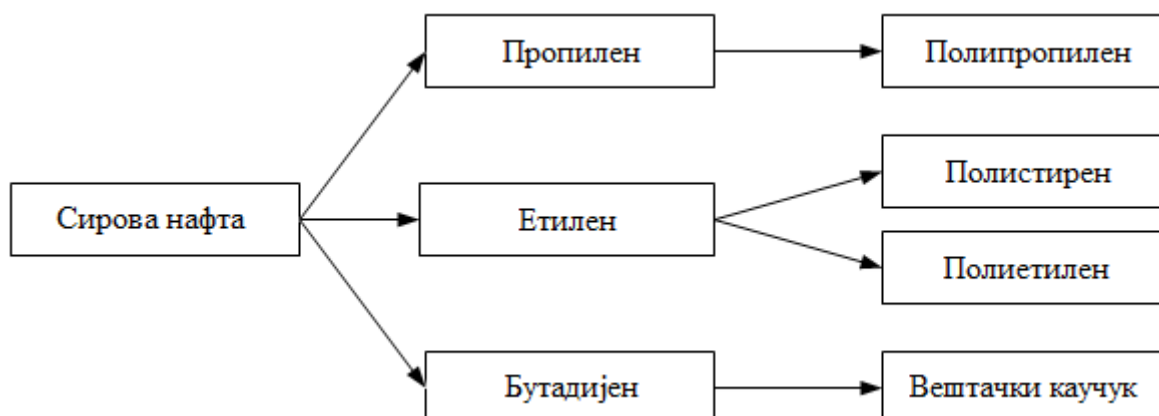
Пластичним масама се називају материјали који се добијају на бази високомолекуларних једињења (полимера) и имају у неком стању пластичност, која се потпуно или делимично губи при преласку на друге услове. Ово пружа могућност да се од тих материјала добију производи потребног облика применом метода, базираних на пластичној деформацији, на пример, пресовање пластичне масе која је претходним загревањем доведена у пластично стање; затим се ти производи користе у другим условима као еластична тела.

Ове материјале одликују њихова механичка својства која представљају комбинацију својства чврстих тела и течности. Они су чврсти и способни за велике механичке еластичне деформације. Својства полимера су условљена њиховом унутрашњом грађом.

Полазне сировине за производњу пластике могу бити минералног или органског порекла. Минералне сировине су нафта, угаљ и земни гас, од којих се најпре израђују основна хемијска једињења за даљу прераду. Ова се једињења различитим процесима преводе у полупроизоде који могу бити у облику гранула, праха, течности, смола, таблета [4]. Даљи процеси прераде ових полупроизвода у финалне производе (ливењем или пресовањем) утичу не само на промену структуре, већ такође и на промену хемијских веза које чине основу материјала.

Органске сировине за израду пластике могу бити биљног или животињског порекла. Полупроизоде и финални производи добијају се из фракције сирове нафте високе температуре кључања (око 300°C), тако да се те фракције загревају под високим притиском и при високој температури, те настаје распад великих молекула на мање погодне за индустрију вештачких производа.

Врсте полупроизвода и финалних производа који се добијају из сирове нафте приказани су на слици 2.1.

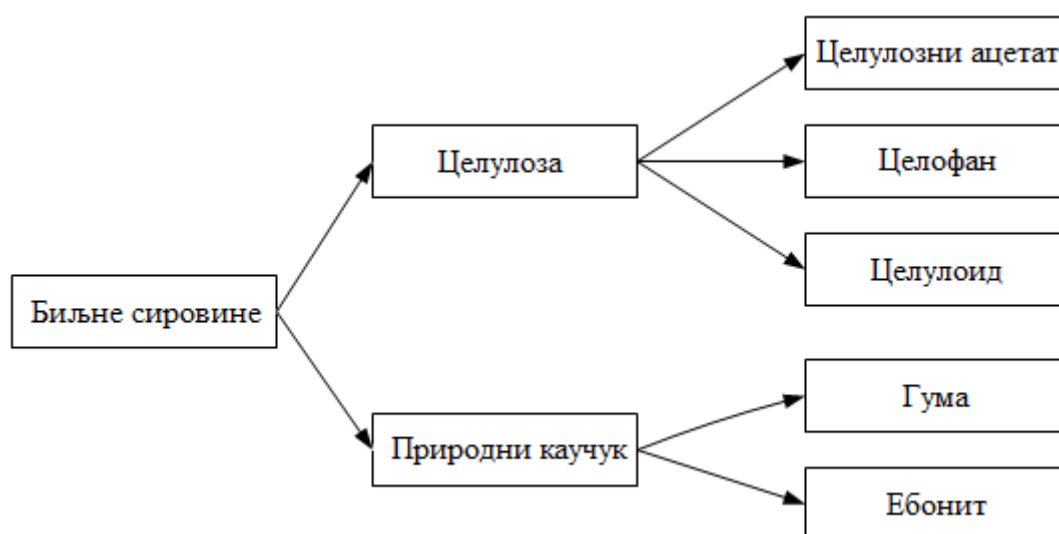


Слика 2.1 Шема полупроизвода и финалних производа који се добијају из сирове нафте

Поред сирове нафте, данас се све више користи као хемијска сировина земни гас у чији састав улази метан (око 90%), као и етан, пропан, бутан, пентан, хексан и њихови изомери, а такође и CO_2 , H_2 , CO , N_2 , H_2S и други. Земни гас се прерађује непотпуним сагоревањем или термичким разлагањем, (пиролизом при око 700°C). Непотпуним сагоревањем настаје ацетилен као и мешавина CO_2 и H_2 , погодна за синтезу уреје (карбамида) и амонијака. Путем пиролизе добија се етилен, пропилен, ацетилен, и друга једињења која се користе за даљу хемијску синтезу [5].

Из угља се добијају разна хемијска једињења такозване суве дестилације, (коксовање). Она се заснива на загревању угља без присуства ваздуха при температури од 1100 - 1300°C . У том процесу настају гасни производи, течни производи (такозване смоле) и чврсти производи (кокс).

Поред наведених минералних сировина, у индустрији полимерних материјала употребљавају се биљне и животињске сировине од којих се добијају финални производи шематски приказани на слици 2.2.



Слика 2.2 Шема добијања финалних производа од биљних и животињских сировина

На основу разноврсности својстава полимерних материјала и релативно кратког али наглог развоја полимерног инжењерства, као и велике могућности полимера да се комбинују с другим материјалима, тешко је укратко приказати могућности примене полимерних материјала. Најчешће коришћени полимерни материјали приказани су у табели 2.1.

Табела 2.1 Ознаке полимера

Полимери	Ознака
Полиетилен	PE
Полипропилен	PP
Полистирен	PS
Поливинилхлорид	PVC
Поливинилиденхлорид	PVDC
Полиетилентерефталат	PET
Полиамид	PA
Поликарбонат	PC
Полиуретани	PU

2.1 Историјат развоја полимера

Сматра се да је претеча полимера дрво, које је такође полимерни композит, једини који се користи у конструкцији од најранијих времена. Лепота ћилибара (окамењена смола), рогова и оклопа корњача (полимер кератин) су привукле дизајнере већ од 80. године пре Христа и учиниле да се осврт на њих настави током XIX века. Гума, која је донета у Европу 1550. године, била је већ позната и коришћена у Мексику. Њена употреба је порасла током XIX века делимично због широког спектра својстава која се постижу вулканизацијом, тако да се добија материјал еластичан попут латекса или чврст као ебонит. Права полимерска револуција се, међутим, одиграла почетком XX века са развојем бакелита, фенолика (1909. године) и синтетичке бутил гуме (1922. године). Све то је праћено брзим развојем науке о полимерима средином XX века. Готово сви полимери који су данас у широкој употреби развијени су за 20 година (од 1940. до 1960.). Међу њима су и широко распрострањени полимери попут полипропилена, полиетилена, поливинил хлорида и полиуретана, тако да се њихова заједничка масена годишња производња приближава оној за челик. Пројектовање са полимерима је данас сасвим уобичајено: они су сада важни као и метали у производима за домаћинство, аутомобилској индустрији и од скора у авио и свемирској индустрији. Употреба полимера у производима са високом поузданошћу и захтевима тражи додатни корак. Чисти полимери немају потребну крутост и не задовољавају својом чврстоћом тако да морају бити ојачани керамичким и стакленим влакнима и на тај начин настају композити [6].

Наука о полимерима почела се развијати 1929. године захваљујући пионирским радовима Студингера и Каротерса (Staudinger i Carothers). Од тада се део хемије назива макромолекуларна хемија, односно хемија полимера. У раздобљу између 1930. и 1940.

године, почела је и техничка примена полистирена, поливинил хлорида и полиметил метакрилата [7].

Пораст броја техничких материјала у временској скали је нелинеаран – скоро сви материјали који се данас користе су се појавили у последњих 100 година. Уочава се да се од каменог доба када се почело са два техничка материјала (каменом и дрветом) у металном добу он повећао на десетак (бакар, калај, арсен, гвожђе, графит, племенити метали, камен, дрво, вода, глина, биомаса и тако даље). Док је крајем IX века број доступних материјала инжењерима био јако мали – највише неколико стотина, за данашње савремено доба се процењује да је у употреби око 70 000 техничких материјала. Само у последњих 50-так година у употребу је ушло више нових материјала него у свим претходним вековима. Порасту броја техничких материјала има да се захвали освајању легура лаких обојених метала (алуминијум је почео да се користи у инжењерству почетком XX века) – сада их је на хиљаде, као и такозваних композитних материјала са високим перформансама – којих има на хиљаде. На располагању стоје и технички материјали у облику синтетичких полимера којих има преко 45 000.

Идеја да би полимерни материјали могли да проводе електричну струју до пре тридесетак година изгледала је потпуно апсурдно. Ипак, 1977. године Алан Хигер (Alan J. Heeger), Алан Мекдирмид (Alan G. MacDiarmid) и Хидејки Ширакава (Hideiki Shirakawa), потпуно су променили ово гледиште открићем да се полиацетилен, може учинити проводним скоро као и метал. Успели су да синтетизују полиацетилен чија је специфична електрична проводљивост* била реда величине 105 S/m (поређења ради проводљивост тefлона је реда величине од 6 до 10 S/m, а сребра 108 S/m). Ово револуционарно откриће отворило је потпуно ново интердисциплинарно научно поље, створивши предуслове за невероватне могућности практичне примене, стога им је Шведска Академија Наука доделила Нобелову награду за хемију за 2000. годину [8].

Иако је полиацетилен први откривени електропроводни полимер (*EPP*), са до сада највећим степеном кристаличности, због својих изразито лоших особина, као што су осетљивост на кисеоник и влагу као и тешкоће при обради, није нашао комерцијалну примену. До сада су синтетизовани и многи други *EPP* са много бољим особинама и различитим могућностима практичне примене, иако су њихове проводљивости значајно ниже у односу на први откривени *EPP*.

Врло брзо после бакелита уследило је добијање других полимерних материјала. Проналаском полиетилена у Енглеској начињен је пробој у индустрији паковања. Након многобројних истраживања откривене су нове технологије за добијање потпуно нових материјала, као и проширење примене постојећих [9].

Упоредо са експерименталним истраживањима у индустрији, текао је рад из области експерименталне и теоријске физике и хемије у многим научним установама, тако да је дошло до развоја теоријских модела добијања полимерних материјала. Низом експерименталних метода омогућено је да се макромолекули "виде" и на тај начин учине могућим за изучавање динамике полимерних система.

* Специфична електрична проводљивост (кондуктивност) је мера за способност материјала да проводи електричну струју. Јединица специфичне електричне проводљивости у SI систему је сименс по метру (S/m)

Производња пластичних маса у свету се сваке године вишеструко увећава. Данас производња знатно прелази 100 милиона тона, док је 1950. године износила испод једног милиона тона. Овакав раст производње није забележен ни код једног другог материјала, тако да је производња пластичних маса превазишла производњу свих метала заједно.

Полимерни материјали имају веома разноврсну структуру што представља основне проблеме при анализи утицаја полазних сировина и технолошких параметара на њихове карактеристике. Да би се ови утицаји одредили, потребно је познавање хемијских, механичких, термичких, електричних и других својстава пластичних маса, што подразумева обимна истраживања као и усавршавање метода за истраживања.

Нагли развој и примена полимерних материјала убрзао је развој многих других подручја људске делатности [3]. Данас се полимерни материјали примењују за производњу амбалаже, у електроиндустрији, електронској индустрији, у хемијској индустрији, бродоградњи, транспорту, авиоиндустрији и изради свемирских летелица, грађевинарству, пољопривреди и у области производње предмета опште употребе.

3. ВРСТЕ ПОЛИМЕРА

Подела полимерних материјала врши се на различите начине према различитим критеријумима. Према критеријуму њиховог понашања на повишеним температурама, полимери се деле на:

- пластомере (термопласте),
- дурупласте и
- еластомере (гума).

Поред тога, постоји још једна посебна група коју представљају еласто - пластомери. Заједнички назив пластомера и дурупласта је пластика.

Пластомер (термопласт) је врста полимерног материјала која се на повишеној температури топи [10]. Након завршеног процеса обликовања поново се може растопити, а затим обликовати и може се рециклирати. Поступци прераде ових материјала базирани су на промени њиховог стања загревањем и хлађењем (чврсто – растопљено – чврсто). Структура термопластичних материјала може бити аморфна, кристална и кристаласта. Најзаступљенији полимери из ове групе су полипропилен, ниске и високе густине, чија је структура кристаласта и поливинилхлорид чија је структура аморфна.

Дурупласти су полимерни материјали који се састоје од макромолекула који су густо просторно умрежени. При обликовању оваквих материјала одвија се хемијска реакција умрежавања. Накнадна прерада и рециклажа оваквих материјала није могућа. Дурупласти су нетопљиви и нерастворљиви материјали.

Еластомери (гума) су слабо просторно умрежени макромолекули. Финална структура еластомера настаје умрежавањем, то јест вулканизацијом, која се може извести у процесу обликовања производа или накнадно у посебном постројењу.

Еластопластомери су материјали чија је особина да се на собној температури понашају као еластомери а на повишеној, као термопластични материјали. Прерађују се на исти начин као и термопластични материјали.

За израду амбалажних материјала и амбалаже скоро искључиво се користе пластомери, односно термопластични полимерни материјали. У знатно мањој мери се користе дурупласти, а еластомери се користе као помоћни материјал за херметичко затварање стаклене и металне амбалаже [3].

Према начину прераде, полимери се деле на:

- термопластичне и
- термостабилне.

Термопластични полимери при загревању омекшају, тако да се могу прерађивати и обликовати, а након хлађења поново очврсну [11]. Поступак загревања и хлађења може се поновити више пута. Међутим, уколико се прекорачи одређена температура, долази до непожељних хемијских реакција, а тиме и знатне промене својстава полимера. Термопластични полимери имају малу топлотну постојаност и малу тврдоћу, а неки од њих релативно малу отпорност на деловање хемикалија, посебно киселина. Најпознатији полимери ове врсте су: полиетилен, поливинилхлорид, полистирен, полипропилен. Термопластични полимери имају линеарну структуру макромолекула.

Термостабилни полимери након загревања и хлађења неповратно очврсну у нетопив полимер. Ова својства настају као последица хемијских реакција умрежавања које настаје код загревања. Имају већу чврстоћу, тврдоћу и бољу топлотну постојаност него термопластични полимери, а отпорни су према хемикалијама. Најпознатији термостабилни полимери су: епоксиди, фенолформалдехиди, полиестери. Термостабилни полимери имају умрежену структуру макромолекула.

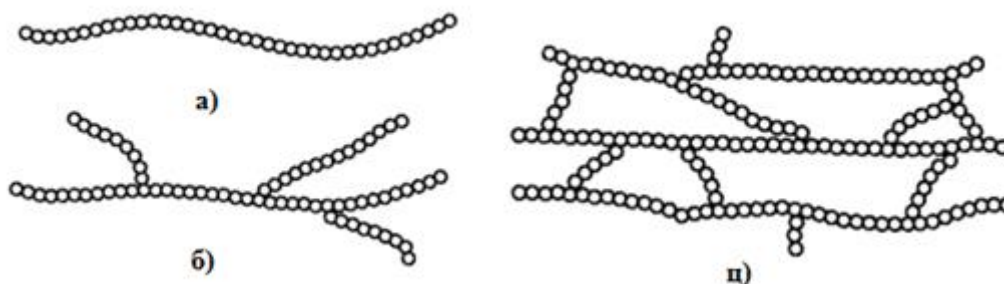
С обзиром на структуру полимери могу бити:

- линеарни,
- разгранати и
- умрежени.

Линеарни полимери настају повезивањем мономера у један континуални низ или ланац, тако да је сваки мер повезан само са два суседна мера (слика 3.1 а).

Разгранати полимери имају на неке од мера у главном ланцу везане краће бочне ланце (слика 3.1 б).

Умрежени полимери имају тродимензионалну просторну структуру. Састоје се од дугачких ланаца који су међусобно повезани попречним краћим ланцима (слика 3.1 ц).



Слика 3.1 Општи изглед макромолекула а) линеарни, б) разгранати и ц) умрежени

Један макромолекул може бити изграђен од једне или више врста мономера. Дакле, полимери се могу поделити на две основне групе:

- хомополимери који су изграђени само од једне врсте мономера. Типичан представник ове групе је полиетилен,
- кополимери који су изграђени од две или више врста мономера. Типичан представник ове групе је поливинилхлорид.

Добре особине полимерних материјала:

- мала густина,
- лако обликовање,
- отпорност према атмосферским условима и хемијским дејствима,
- отпорност према корозији,
- изолатори топлоте и електрицитета,
- способност пригушивања звука и
- лако се боје.

Лоше особине полимерних материјала:

- мала чврстоћа,
- димензионална нестабилност,
- мала топлотна отпорност, лако запаљиви и
- склоност ка старењу и разградњи.

Својства полимера се могу модификовати додацима.

3.1 Додаци полимерним материјалима

Вештачке материје као конструкциони материјали, поред основног састојка у виду вискополимерне супстанце, садрже и разнородне додатне материјале: стабилизаторе, пуниоце, пластификаторе и пигменте (за боје). Зависно од њихове врсте и количине, материјали засновани на истим основним састојцима показују знатне разлике у особинама [12].

Стабилизатори су супстанце које обезбеђују трајност високо полимерних хемијских једињења у случају дејства таквих спољашњих чинилаца као што су температура, видљиво или ултраљубичасто зрачење и тако даље.

Пуниоци су неутралне хемијске супстанце које се додају у циљу постизања тражених особина пластике: побољшања механичких особина, термичке или електричне проводљивости, отпорности на хабање и тако даље. С обзиром на облик, пуниоци могу бити:

- прашкасти – метални прах, графит, чађ, лика (vlakна испод коре дрвета), камено и дрвено брашно и кварцни песак,
- влакнасти – металне жице, vlakна: стаклена, азбестна, синтетичка, памучна и
- лиснати – фолије или металне мреже, тканине: стакласте, синтетичке, памучне, папир.

Неоргански пуниоци смањују запаљивост вештачких материјала, а посебно метални прах који још повећава термичку и електричну проводљивост, лика и азбест повећавају изолационе особине, графит поправља отпорност на хабање. Органски пуниоци, углавном дрвено брашно и тканине, повећавају својства јачине смола, док чађ у великој мери повећава својства јачине каучука.

Пластификатори (омекшивачи) су органска једињења, хемијски активна, која се понекад додају у веома великим количинама у циљу повећања пластичности производа.

Они делују физичко – хемијски или физички на грађу молекула, на пример, на рачун полиреакције са полимером што се најчешће испољава смањењем повезаност између молекула (“лабављењем” ланаца полимера). Као последица повећања покретљивости молекула често настаје снижење температуре омекшавања и преласка у стакласто стање. Захваљујући томе производ који је крт на температури околине, постаје додатком омекшивача пластификован. Као пластификатори углавном се користе органске киселине, амонијак, алкохол.

Пигменти се додају у циљу да производ добије одређену боју и у принципу не утичу на његове физичке особине.

4. ПОЛИЕТИЛЕН

Полиетилен (Polyethylene - *PE*) је једна од најкоришћенијих врста пластике. Први пут је откривен 1889. године али тада нико није знао чему може да служи. Откривен је случајно (поново), 1933. године, када су хемичари Ерик Фосет и Реџиналд Гибсон (Erik Foset i Redžinald Gibson) у Норвичу, у Енглеској, у хемијској индустрији Империал (Imperial Chemistry Industries), направили бели, воскасти материјал, "мајку пластике", који је временом, јер су се његове могућности наслућивале одмах, дорађиван и побољшаван. Производња је почела 1939. године и полиетилен је најпре коришћен у војне сврхе да би средином XX века пластика ушла у свакодневни живот [13].

Полиетилен најједноставнији је полиугљеноводоник, а уједно и један од најпознатијих и најважнијих материјала данашњице. Индустријски се производи полимеризацијом етилена, а лабораторијски се може добити и од диазометана [14].

Услови реакције полимеризације, пре свега притисак, одређују особине - тип полиетилена и његову каснију прераду и употребу.

Полиетилен ниске густине настаје полимеризацијом етилена на високом притиску (1500 - 3000 bar) уз присуство слободних радикала.

Полиетилен високе густине се производи полимеризацијом етилена на ниском притиску (око 42 bar) са катализатором.

Полиетилени су највише коришћени међу свим полимерима, захваљујући механичким особинама, лакој прерадљивости и широким могућностима употребе.

Добре особине које одликују полиетилен као материјал [15]:

- без мириса и укуса, физиолошки безопасан,
- мала маса, мала густина (испод 1g/cm^3), па плута по води,
- велика флексибилност (савитљивост),
- чврстоћа, жилавост, дуготрајност,
- одлична отпорност на већину хемикалија,
- отпорност на воду,
- отпорност на растворе соли, киселине, базе, алкоhole и бензин на температурама од $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- нерастворљив у свим органским растварачима на температури испод $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- слабо апсорбује воду и
- поседује добре електричне особине.

Полиетилен налази примену у широком дијапазону производа за широку потрошњу. Велики број врста полиетилена је нешкодљив па има широку примену у прехранбеној индустрији. У облику пене се користи за ублажавање вибрација и изолацију. Полиетилен плута, тако да се користи и у наутици. Такође се користи за производњу делова за намештај, делова рачунара, електронских компоненти, производа за употребу у спорту, одећу, саобраћајних знакова, кугли за куглање, цеви под притиском и тако даље. На слици 4.1 су приказани неки од производа где се користи полиетилен.



Слика 4.1 Производи од полиетилена високе густине

4.1 Добијање полиетилена

Једномолекуларна једињења - мономери имају својство да се под одређеним условима (одговарајућој температури и притиску) у присуству катализатора, спајају у макромолекуларна једињења која се називају полимери [14].

Разликују се природни полимери, који су саставни део биљака и животиња и синтетички полимери добијени хемијском прерадом и синтезом нискомолекуларних једињења (мономера).

Синтетички полимери се добијају синтезом мономера, а основне методе су:

- полимеризација,
- поликондензација и
- полиадиција.

Полимеризација је стварање макромолекула спајањем мономера без издвајања споредних продуката и прегруписавања атома у молекулу. Процес полимеризације се не сме прекидати, јер се не може на исти начин и наставити.

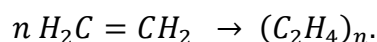
Посебан случај синтезе је полимеризација различитих мономера која се назива кополимеризација, при којој се стварају макромолекули састављени од основног састојка који се у полимеру углавном правилно понављају. Својства добијеног полимера се битно разликују од својстава компоненти (мономера), или од својстава њихове смеше.

Поликондензација је метода синтезе већег броја мономера у макромолекуле, уз издвајање споредних продуката, најчешће воде, амонијака и друге.

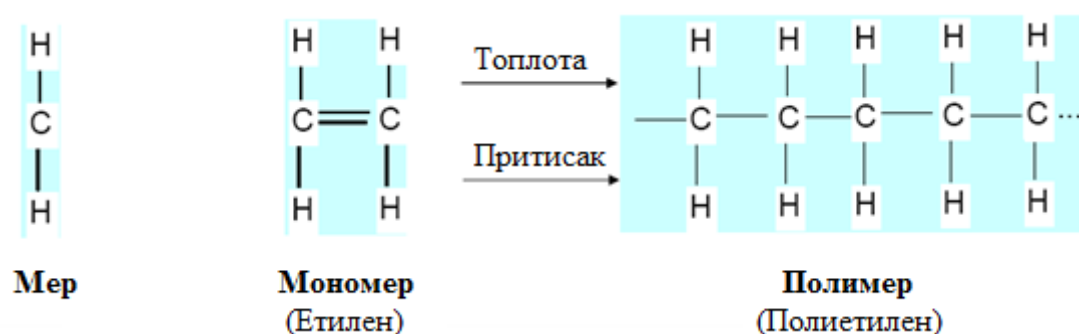
Синтеза при поликондензацији се може изводити ступњевито, па и са прекидима, који се могу у одређеним условима и наставити.

Полиадиција је метода синтезе која се одликује одсуством издвајања споредних продуката и могућношћу извођења у ступњевима, што указује да је то метода синтезе која се налази између полимеризације и поликондензације.

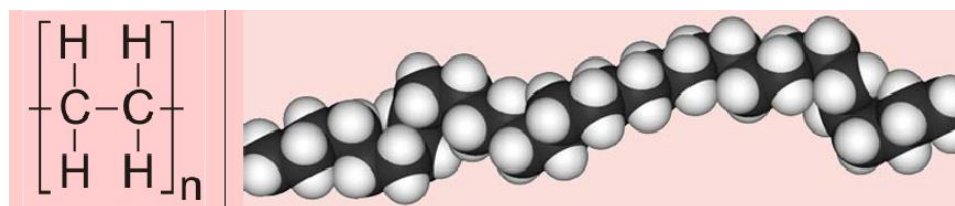
Полиетилен, најједноставнији је полимерни материјал [16]. Хомополимер се добија полимеризацијом мономера етена (стари је назив етена "етилен" $\Rightarrow$ "полиетилен"), уз раскидање двоструких веза атома угљеника:



Полиетилен садржи од $n = 3500$ – 25000 мономера а у наведеним једначинама n је степен полимеризације. На слици 4.2 је приказана структурна формула добијања полиетилена, а на слици 4.3 је дат приказ ланца полиетилена.



Слика 4.2 Структурне формуле: мера, мономера и полимера



Слика 4.3 Приказ полиетилена-3D

4.2 Својства политилена

Својства политилена зависе од његове структуре и адитива који се додају током производње. Најважнији структурни параметри, који директно утичу на својства полиетилена, јесу степен кристалности, просечна молекулска маса и подела молекулских маса.

Степен кристалности је мера за однос кристалне фазе према аморфној (слика 4.4), а зависи, између осталог, од гранатости макромолекула [17]. Наиме, полиетилинске макро-молекули нису само равноланчане, већ неки од водоникових атома могу бити замењени мањим или већим (краћим или дужим) угљеноводичним супституентом. Они онемогућују густо слагање ланчаних сегмената и потпунију кристализацију, па се с повећањем гранатости смањује степен кристалности.



Слика 4.4 Шематски приказ кристалних и аморфних подручја у полиетилену

Степену кристалности директно је пропорционална густина полиетилена. Како се густина може једноставно мерити, својства полиетилена се управо према његовој густини и оцењују. С порастом густине повећава се тачка топљења и већина механичких својстава, међу њима тврдоћа, затезна чврстоћа, издужење при кидању, отпор према пузању, крутост, а такође и хемијска постојаност. Осим тога, смањује се и пропусност течности и гасова. С друге стране, са порастом густине смањује се еластичност, провидност, жилавост и отпорност према настајању пукотина од напрезања.

Просечна молекулска маса полиетилена веома је важна, посебно што од ње зависи способност прераде полиетилена. Полиетилен са већом молекулском масом се генерално теже прерађује. Он показује боља механичка својства, на пример повећану ударну жилавост, чврстоћу на кидање и отпорност према корозији због пукотина од напрезања, а већа му је и хемијска постојаност.

Међутим, тврдоћа, савитљивост и чврстоћа на затезање не зависе уопште од износа просечне молекулске масе.

Расподела молекулских маса утиче такође на својства полиетилена и његову прерадљивост. Генерално, типови полиетилена са уском расподелом испољавају већу жилавост, чак и при нижим температурама, али се теже прерађују.

4.3 Врсте полиетилена

Полиетилен се групише у више различитих група зависно од густине и гранања у молекулу [18]. Механичке особине полиетилена могу се значајно разликовати у зависности од типа гранања, кристалне структуре и молекуларне тежине, постоје следеће врсте:

- полиетилен ултра-високе молекуларне тежине (engl. ultra high molecular weight polyethylene, *UHMWPE*),
- полиетилен ултра-ниске молекуларне тежине (engl. ultra-low molecular weight, *ULMWPE* или *PE-WAX*),
- полиетилен високе молекуларне тежине (engl. high molecular weight, *HMWPE*)
- полиетилен високе густине (engl. high density polyethylene, *HDPE*),
- умрежени полиетилен високе густине (engl. crosslinked polyethylene high density, *HDXLPE*),
- умрежени полиетилен (engl. crosslinked polyethylene, *PEX* или *XLPE*),
- полиетилен средње густине (engl. medium density polyethylene, *MDPE*),
- линеарни полиетилен ниске густине (engl. linear low density polyethylene, *LLDPE*),
- полиетилен ниске густине (engl. low density polyethylene, *LDPE*),
- полиетилен веома ниске густине (engl. very low density polyethylene, *VLDPE*) и
- хлорисани полиетилен (engl. chlorinated polyethylene, *CPE*).

Комерцијално најкоришћенији типови полиетилена су: *HDPE*, *LLDPE* и *LDPE*.

HDPE се дефинише густином већом или једнаком $0,941 \text{ g/cm}^3$. *HDPE* има низак степен гранања и карактерише га јача међумолекуларна сила то јест затезна снага. Смањење гранања обезбеђује се применом одговарајућих катализатора и услова приликом полимеризације. *HDPE* се користи у производњи амбалаже, боца за млеко, боца за детерџент, канти за смеће, водоводних цеви, играчака и тако даље.

Густина *LLDPE* је у опсегу од $0,915\text{-}0,925 \text{ g/cm}^3$. *LLDPE* линеарни полимер, са већим бројем кратких грана најчешће добијених кополимеризацијом етилена са кратким ланцима алфа-олефина. *LLDPE* има већу затезну чврстоћу, као и отпорност на убоде од *LLDPE*. Линеарни *LLDPE* омогућава дување филмова мање дебљине у односу на *LDPE*. Такође је отпорнији на спољашње услове који могу изазвати пуцање, али је и тежи за обраду од *LDPE* -а. *LLDPE* се користи у производњи фолија за облагање кеса, торби или папира (нпр. у месарској индустрији). Такође се користи за облагање каблова, играчке, поклопце, канте, контејнере, цеви и тако даље.

Густина *LDPE* је у опсегу од $0,910\text{-}0,940 \text{ g/cm}^3$. *LDPE* има висок степен како кратких тако и дугих ланаца, што значи да ланци нису ефикасно "упаковани" у кристалну структуру. Ово резултује мањом затезном чврстоћом и повећаном растегљивошћу. *LDPE* се користи у производњи контејнера и резервоара, кеса, фолија и тако даље.

4.4 Производња полиетилена високе густине

HDPE је први пут добијен 1890. године из диазометана, а његова комерцијална производња започела је 1956. године у фирми Филипс Петрулиам Ко (Phillips Petroleum Co).

За добијање *HDPE* - а се користе следећи поступци:

- полимеризација у раствору,
- суспензијска полимеризација и
- полимеризација у гасној фази.

Полимеризацијом у раствору се добија *HDPE* ниске молекулне масе. У реактор се континуално уводе мономер етен, растварач (циклохексан), катализатор и водоник при температури од 150 °C и притиску од 8 МПа, а време реакције је 5-10 минута. Као катализатори користе се *Ziegler-Natta* катализатори и катализатори на бази хромових оксида [19]. Добијен врућ полимерни раствор празни се из реактора у резервоар из којег затим испарава већи део растварача. Остатак растварача уклања се током даљег обликовања полимера (уситњавање, екструзија). Растварач се затим враћа у процес. Предност полимеризације у раствору је кратко време реакције и могућност употребе малих реактора. Негативна страна овог типа производње је сталан раст вискозности због пораста молекулних маса, па је у јако вискозним системима отежано мешање, а тиме и одржавање хомогености. Због тога је овим поступком могуће добити само *HDPE* нижих молекулних маса.

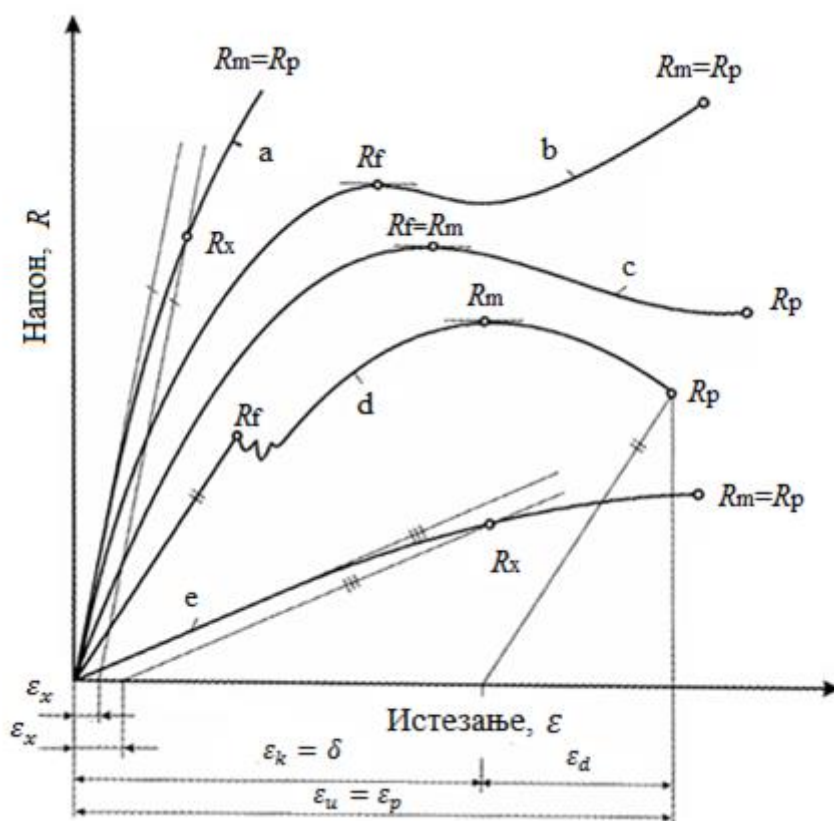
Суспензијска полимеризација најстарија је и најраширенија метода добијања *HDPE*-а. Развила га је компанија Филипс Петрулиам Ко 1961. године. За разлику од полимеризације у раствору суспензијском полимеризацијом могуће добити *HDPE* и ниских и веома високих молекулних маса. Поступак добијања је следећи: у реактор се континуално уводе мономер етен, суспензијско средство (изопентан или изобутан) и катализатор (хромови оксиди или *Ziegler-Natta* катализатори). Реакција се одвија при притиску од 3 МПа, а време реакције је 30-90 минута. За процес је врло важно ефикасно уклањање развијене топлоте и спречавање таложења полимера на зидовима реактора, што се постиже тако да суспензија *HDPE* -а и катализатора брзо струји кроз реактор. Добијени полимер континуално се одводи, затим се суши и гранулира. Конверзија је врло висока (95-98 %) што омогућује добијање линарног полиетилена веома високих молекулних маса (и до 500000 g/mol).

Полимеризација у гасној фази је најкасније уведен процес добијања *HDPE* -а, а започео је 1968. године у фирми Јунијан Карбајд (Union Carbide). Процес није захтеван и захтева ниске трошкове јер се изводи под релативно ниским притиском. За овај тип процеса потребан је реактор са флуидизованим слојем катализатора. Катализатор се континуално уводи у процес. Једнолика флуидизација постиже се протоком етена, а брзо струјање осигурава одвођење топлоте полимеризације. Непрореагирани етен враћа се у процес. Настали полимер континуално се одводи.

5. МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ПОЛИМЕРА

Различитим статичким и динамичким испитивањима одређују се механичка својства полимера, слично испитивањима металних материјала. Посебно су значајна испитивања на затезање, притисак, смицање, увијање и савијање [10].

При испитивању на затезање добија се дијаграм сличан дијаграму при испитивању металних материјала (слика 5.1).



Слика 5.1 Дијаграм затезања различитих материјала (метала и пластике) : а) сиви лив или PS, PMMA, UB, б) PE-LD, в) PA или PE, д) нискоугљенични челик, е) Al, Cu, PA

Дијаграм показује да поједини полимери имају битно другачији облик криве затезања у односу на челик и да се може десити да је чврстоћа при кидању већа од затезне чврстоће.

Механичка својства полимерних материјала су:

- жилавост,
- тврдоћа,
- истезање,
- притискивање,
- савијање и
- трење.

Полимери су вискоеластична тела. Зависно од спољашњих утицаја, температуре и напрезања, могу се понашати као еластична тела или као вискофлуидни материјал. Уз вискозност у сваком је тренутку присутна и вискоеластична компонента деформације.

Укупна деформација полимера под оптерећењем износи:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (5.1)$$

где је:

- ε_1 - еластична деформација,
- ε_2 - вискоеластична деформација и
- ε_3 - вискофлуидна деформација.

Еластична деформација (енергијска еластична деформација) са термодинамичког становишта је повратна деформација, што значи да се топлота настала механичким радом уопште не расипа [20]. Уопштено, током деформације еластичних материјала расте унутрашња енергија система, односно потенцијална енергија молекула, што доводи до реверзибилне промене дужине хемијских веза и величине валентних углова. Еластична деформација се јавља код аморфних полимера испод стакленог стања и кристалних полимера испод тачке топљења, а одликује се:

- линеарном зависношћу напрезања и деформације,
- независношћу од брзине деформације,
- малом деформацијом у односу на напрезање и
- малим издужењем до кидања.

Вискоеластична или гума ста деформација (ентропијска деформација) је повратна деформација. Молекулски механизам деформације састоји се у повећаном топлотном гibaњу, то јест већој покретљивости макромолекулских сегмената, што доводи до реверзибилног извођења макромолекула из равнотежне конформације*. Молекули су деформисањем доведени у стање вишег структурног реда то јест ниже ентропије, па је повратност одраз тежње ка повећању ентропије. Вискоеластична деформација одликује се врло сложенем зависношћу деформације и напона, а зависи и од времена деловања оптерећења.

Функције вискоеластичне деформације су:

- нелинеарна зависност напона и деформације,
- релативно велика деформација у односу на напон и
- врло велико издужење до кидања.

Ова деформација се јавља код аморфних полимера изнад стакленог стања и у растворима кристалних полимера. Не јавља се код нискомолекулних материјала, већ је специфична за одређене врсте полимерних материјала. Материјали код којих је

* Конформације су различити облици молекула који су последица ротације дела молекула око једноструке везе.

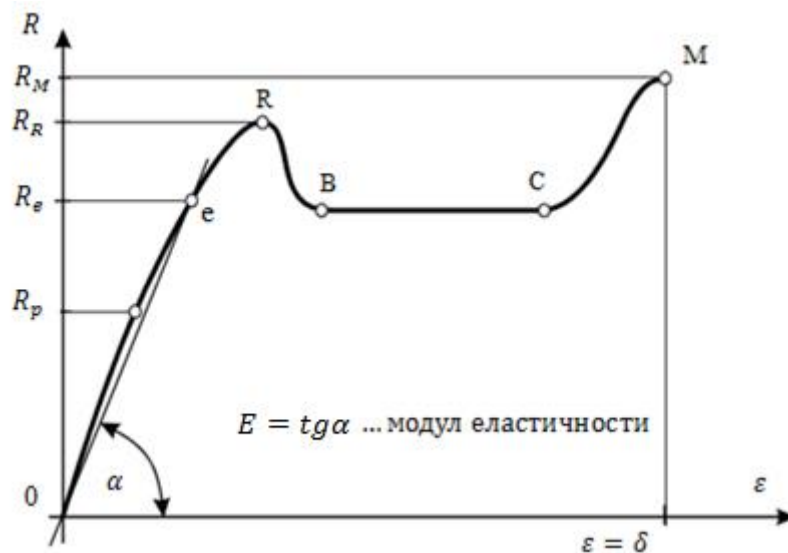
вискоеластична деформација доминантна називају се вискозноеластичним телима, код којих се деформације постепено развијају. Типична вискозноеластична тела су еластомери.

Вискофлуидна деформација или вискозно течење је неповратна деформација, а у полимеру се остварује кооперативнимгибањем сегмената макромолекула и премештањем центра масе макромолекула.

Функције вискофлуидне деформације су:

- нелинеарна зависност напона и брзине деформације и
- деформација се развија постепено и неограничено у времену.

Општи облик $R - \varepsilon$ (напон-издужење) дијаграма полимера приказан је на слици 5.2. Облик $R - \varepsilon$ дијаграма полимера у много већој мери зависи од брзине наношења оптерећења него код осталих грађевинских материјала. Што је већа брзина оптерећивања, тиме је мање подручје пузања, већи модул еластичности и тако даље.



Слика 5.2 Типичан $R - \varepsilon$ дијаграм полимерног материјала

На дијаграму се уочавају следеће ознаке:

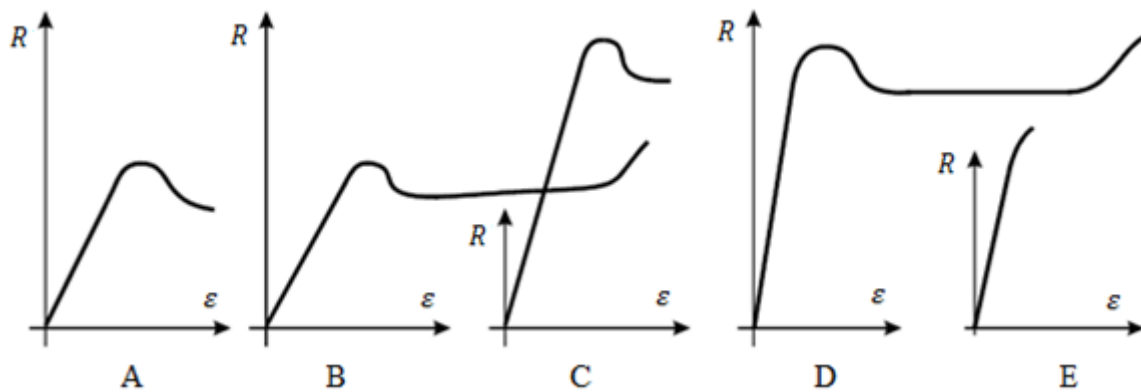
- R_p - граница пропорционалности,
- R_e - граница еластичности,
- R_R - граница развлачења,
- R_M - чврстоћа при кидању (затезна чврстоћа),
- $B - C$ - пузање (хладно течење) и
- $E = tg \alpha$ - модул еластичности.

Приликом испитивања одређује се Поасонов (Poisson) коефицијент и жилавост полимера која се дефинише као површина испод $R - \varepsilon$ криве, у подручју δ . С обзиром на облик дијаграма напон-издужење, полимери се разврставају у типове, према табели 5.1.

Табела 5.1 Типови полимера

Тип полимера		E	σ_R	σ_M	Δ
A	Савитљив и ломљив	Мали	мала	Мала	умерено
B	Савитљив и жилав	Мали	мала	Умерена	велико
C	Крут и чврст	Велики	велика	Велика	умерено
D	Крут и жилав	Велики	велика	Велика	велико
E	Крут и крт	Велики	нема	Умерена	мало

Типични облици $R - \epsilon$ криве приказани су на слици 5.3.

Слика 5.3 Типови $R - \epsilon$ дијаграма полимерних материјала

Један те исти полимер може се различито понашати, зависно од структуре молекула, надмолекуларне структуре, температуре, начина прераде, врсте и количине додатака и тако даље [11].

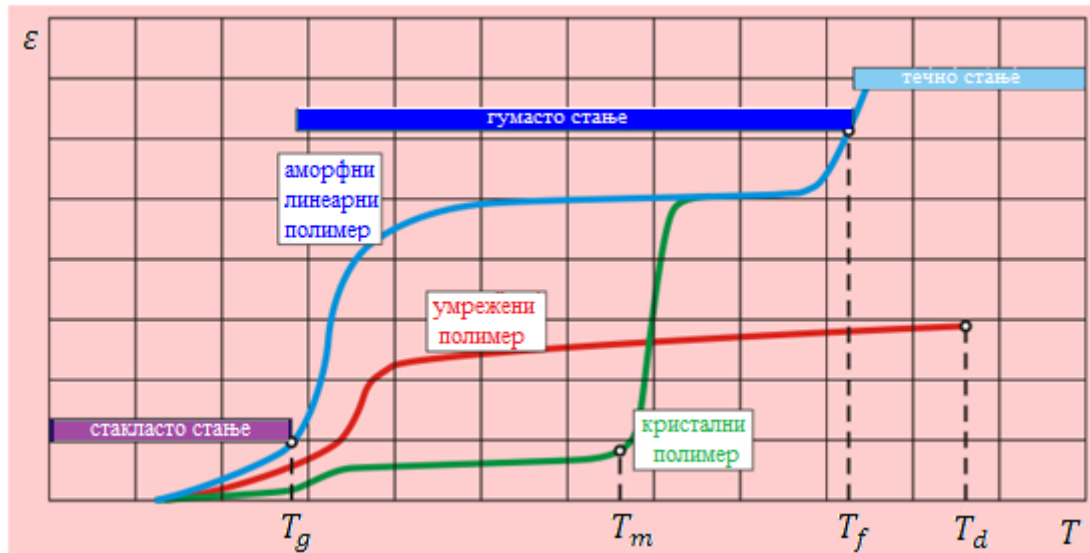
Поред оптерећења, деформисање тела од пластичне масе зависи од:

- брзине оптерећивања и трајања оптерећења и
- температуре, при чијем порасту долази до појаве фазних промена.

При константном оптерећењу с порастом температуре повећавају се деформације.

Дефинисана су три посебна агрегатна стања пластичних маса (слика 5.4):

- стакласто - као и код стакла, деформације су сразмерно мале, настају тренутно, могу се приближно описати Хуковим законом и повратне су;
- гумасти - деформације су сразмерно велике, потребно је одређено време за њихово настајање и нестајање (престанак оптерећења) и повратне су;
- течни стање - маса се гiba у смеру деловања оптерећења неповратно се деформише (течење).



Слика 5.4 Дијаграм са три посебна агрегатна стања

Температуре одвијања промена агрегатних стања аморфних полимера називају се:

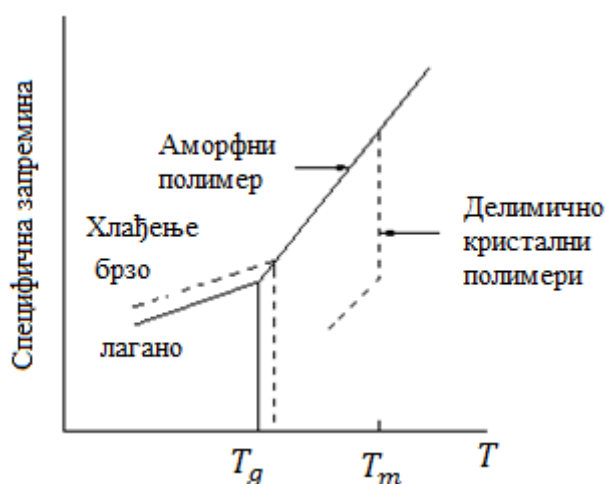
- стакласто, T_g (engl. glass - стакло): стакласто стање $\Rightarrow$ гумаasto стање,
- течност, T_f (engl. fluid - течност): гумаasto стање $\Rightarrow$ течност стање,
- топљиво, T_m (engl. melting - топљења): кристалоasto стање $\Rightarrow$ аморфно стање.

Промене агрегатних стања нису скоковите него се одвијају у одређеним температурним интервалима који се описују с карактеристичним температурама (норме). Са T_d (engl. degradation – разградња) је означена температура на којој долази до разградње полимера.

Прелаз полимерних материјала у растоп има велики практични значај јер се они обликују деформисањем у омекшаном стању. Полимери аморфне структуре немају одређену тачку топљења, али јасно показују промене својих механичких својстава у једном уском температурном интервалу. На ниским температурама они су тврди, крути, крти и стакласти, док на повишеним температурама прелазе у гумаeno стање.

На слици 5.5 је шематски приказана крива зависности специфичне запремине од температуре за полимере са аморфном структуром, као што су акрилати или поликарбонати, који имају температуру прелаза у стакласто стање, али немају тачку топљења и полимере са делимично кристалном структуром, као што су полиетилени и најлон са јасно одређеном тачком топљења [21]. Температура прелаза у стакласто стање за неке полимерне материјале дата је у табели 5.2.

Насупрот полимерима са аморфном структуром полимери са делимично кристалном структуром имају јасно одређену температуру топљења (слика 5.5). Температура топљења за неке полимерне материјале дата је у табели 5.2.



Слика 5.5 Шематски приказ криве специфична запремина-температура, за аморфне и делимично кристалне структуре полимера са температуром прелаза у стакласто стање, T_g и температуром топљења T_m

Табела 5.2 Температуре топљења и прелаза у стакласто стање неких полимера

Полимер	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_g, ^\circ\text{C}$
Полиетилен ниске густине	115	-120
Полиетилен високе густине	137	-120
Поливинил хлорид	175-212	87
Полипропилен	168-176	-16
Полистирен	240	85-125
Полиакрилонитрил	320	107
Полиметилметакрилат		90-105
Тефлон	327	
Акрилонитрил-бутадиен-стирен терполимер		88-125
Ацетал	181	-85
6,6 Најлон	265	50
Ацетат целулозе	230	
Поликарбонат	230	145
Полиестар	255	75
Силикон		-123

6. ИСПИТИВАЊЕ НА ЗАТЕЗАЊЕ

Механичка својства полимерних материјала карактеристични су параметри који описују понашање материјала под дејством механичке силе и слабљење материјала у условима употребе [20]. Методе испитивања могу се поделити у две основне групе: испитивање зависности напон - деформација у кратком времену (краткотрајно оптерећење) и испитивање зависности напон - деформација у дугом времену (дуготрајно оптерећење).

Испитивање зависности напон - деформација током краткотрајног оптерећења укључује следеће поступке:

- испитивање отпорности на затезање (затезна чврстоћа),
- испитивање отпорности на савијање (чврстоћа на савијање),
- испитивање отпорности на притисак (притисна чврстоћа) и
- испитивање отпорности на удар (чврстоћа на жилавост).

Испитивање зависности напон - деформација током дуготрајног оптерећења може бити двојако: испитивање уз константну деформацију и испитивање уз константни напон и оно укључује следеће поступке:

- испитивање пузања,
- испитивање релаксације напона,
- испитивање статичког замора материјала и
- испитивање динамичког замора материјала.

Метода испитивања механичких својстава, која омогућује проучавање понашања полимера до лома укључујући и сам лом, јесте метода испитивања затезањем.

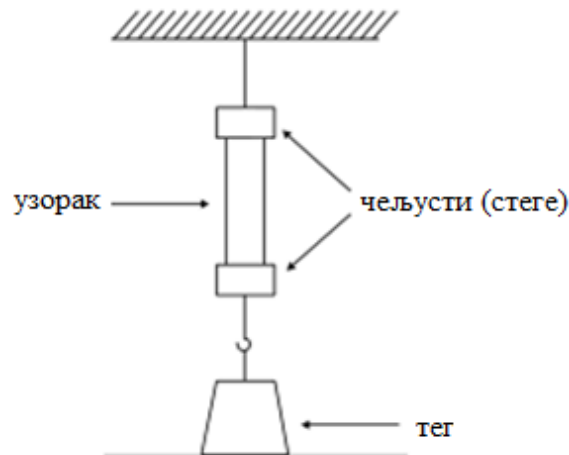
Испитивање затезањем се изводи на [22]:

- нормалним (собним) температурама (на $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$):
 - одређивање својстава отпорности и
 - одређивање способности деформације;
- повишеним температурама:
 - са краткотрајним загревањем,
 - са дуготрајним загревањем,
 - испитивање на пузање и
 - испитивање на релаксацију;
- сниженим температурама.

За испитивање затезањем потребно је имати:

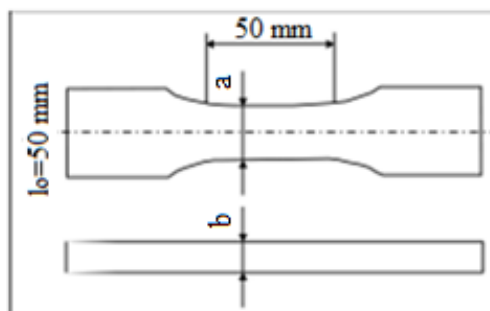
- узорак - "епрувету" за испитивање,
- машину – "кидалицу",
- прибор за мерење (помично мерило, микрометар) и
- познавати технику испитивања.

Испитивање на затезање се заснива на спором затезању епрувете стандардног облика и димензија на уређају који се зове кидалица. Она је опремљена динамометром за мерење силе и писачем који у сваком моменту записује зависност издужења од силе. Принцип рада кидалице шематски је приказан на слици 6.1 [20].

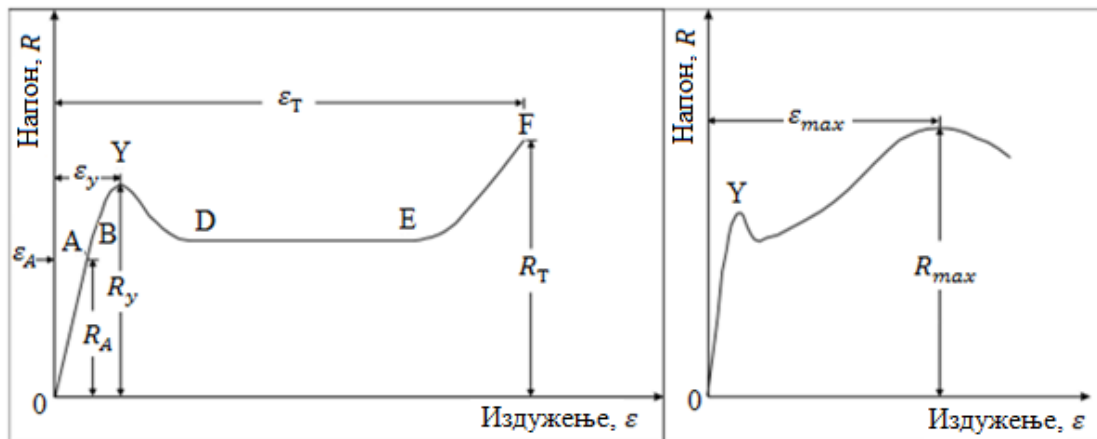


Слика 6.1 Принципијски дијаграм рада кидалице

Испитивано тело, епрувета, стандардног облика (слика 6.2), истезе се дуж главне уздужне осе константном брзином док не дође до лома, или док сила или издужење не достигну претходно одређену вредност. За време испитивања мери се сила која настаје при затезању епрувете, као и њено издужење, што се приказује кривом напон - издужење, слика 6.3. Крива обухвата неколико карактеристичних подручја.



Слика 6.2 Епрувета за испитивање на затезање; a и b су ширина односно дебелина епрувете

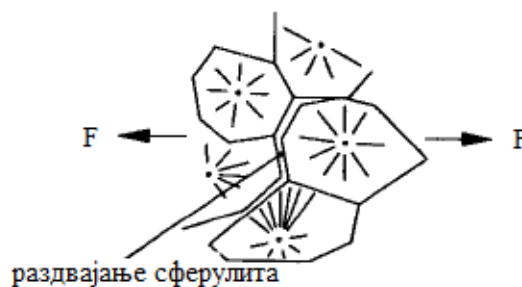


Слика 6.3 Општи облик криве напон - издужење и крива са израженом затезном чврстоћом (R_{max}); 0A - област пропорционалности, 0B - област еластичности, Y - граница течења, DE - област хладног течења, F - кидање материјала

Област пропорционалности (0A) обухвата деформацију која се у потпуности покорава Хуковом (Hook) закону, то јест напон је пропорционалан истезању. Границу пропорционалности, то јест напрезање након којег однос напрезања и истезања више није константан, тешко је проценити на кривој.

Област еластичности (0B) је област унутар кога материјал показује еластична својства. Престанком деловања спољашње силе, која изазива деформацију, материјал ће се тренутно вратити у првобитно стање. Границу еластичности експериментално је тешко одредити.

Граница течења (Y) (engl. yield point) изразита је тачка на кривој. То је граница након које у процесу деформације испитиваног тела нагло опада његово напрезање, настају микронапрсине (engl. crack) а материјал попушта због промене унутрашње структуре (промене оријентације макромолекуларних ланаца). На пример, код кристаластих полимера микронапрсине настају у граничном слоју између суседних површина зрна, настаје такозвани бели лом, слика 6.4. Иреверзибилан процес настао након границе течења доводи до неповратне, пластичне деформације полимера.



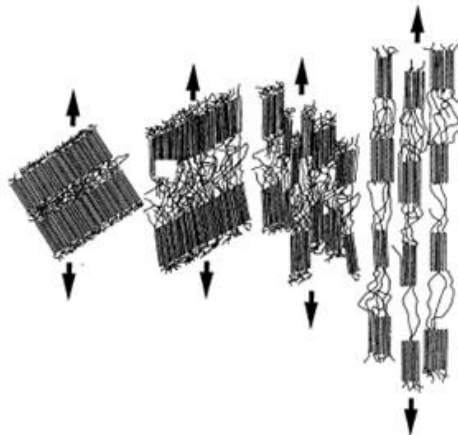
Слика 6.4 Настајање микронапрсина у граничном слоју између сферулита

Област хладног развлачења (DE) (engl. cold drawing) представља повећање истезања при готово константном напону. Процес је сличан течењу полимера, а како се јавља при температури нижој од стакластог стања назива се хладним развлачењем. Хладно развлачење је последица два процеса. Прво, код жилаве, аморфне пластике хладно развлачење настаје због екстензивне оријентације сегмената и ланаца у смеру истезања епрувете, пропраћене значајним вискоеластичним течењем. Друго, код кристаластих полимера с аморфном фазом изнад стакластог стања, преуређење ланаца у подручју

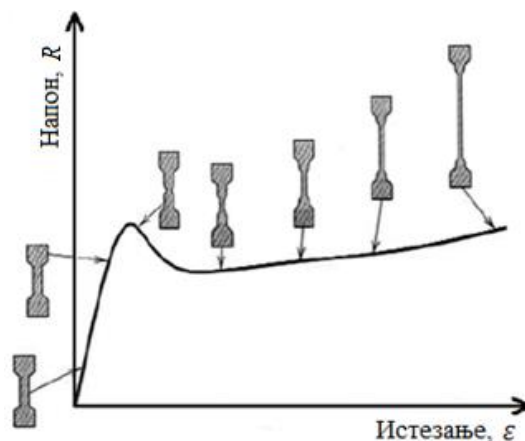
хладног развлачења је комплексно, а започиње настајањем "сужења" (engl. neck). Наиме, након једноличног истезања епрувете за неколико процената, уместо лома на неком месту епрувете долази до сужења пресека. Тачније, на месту почетка попуштања (у близини врха микронапрслине) долази до екстензивног преуређења полимерних ланаца. Најпре се аморфна подручја потпуно издуже, а затим долази до клизања, нагињања и савијања ламела. Даљом деформацијом ламеле пуцају и оријентишу се у смеру деловања силе, формирајући фибриле од наизменично поређаних једнаких блокова кристала и истегнутих аморфних подручја, слика 6.5.

Сужење, које се на кривој уочава након тачке Y , одржи се на одређеној димензији па се даљим истезањем преноси дуж епрувете док цела епрувета не пређе у сужење (максимална оријентација ланаца дуж целе епрувете), слика 6.6. При томе истезање достигне и до сто процената од своје првобитне дужине. Стога се по завршетку процеса преуређења ланаца формира пуно дужа, тања и јача полимерна структура (vlakно, филм). Очвршћивање материјала због оријентације макромолекула је основни принцип производње полимерних влакана велике чврстоће.

Појава хладног течења може се лако демонстрирати. На пример, ако се трака полиетиленског филма (по могућности са штампом) лагано истегне рукама (при собној температури), након истезања настаће сужење неколико процената. Материјал се затим може издужити од два до пет пута своје првобитне дужине.



Слика 6.5 Механизам преоријентације кристалистких структура током настајања "сужења"



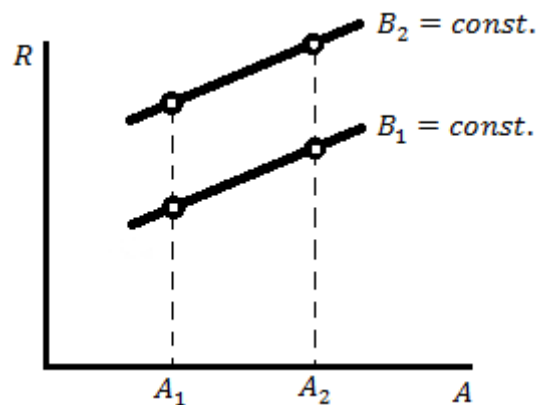
Слика 6.6 Облик истегнуте епрувете кристалног полимера у различитим фазама дијаграма напон-издужење

Ако се хладно развучена епрувета извади из чељусти кидалице, неће се спонтано стегнути него ће углавном задржати постигнуту димензију (доћи ће само до повраћаја еластичног истезања од неколико процената). Загревањем изнад стакластог стања епрувета ће се вратити готово на почетну димензију. Наиме, сегменти оријентисани у смеру деловања силе топлотним ће сегибањем вратити у енергијски повољнију конформацију. Феномен хладног течења формално је једнак вискоеластичној деформацији (промени конформација молекула топлотним кретањем).

У подручју EF (слика 6.3) напон се повећава, то јест материјал очвршћава (због оријентације макромолекула по целој епрувети) до лома. Механизам истезања сличан је оном у првом делу криве, али примењен на потпуно оријентисан материјал. Истезање епрувете износи такође само неколико процената.

7. ФАКТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТ

При истраживању детерминисаних појава највећи значај има једнофакторни експеримент. Поред многих појава које зависе само од једног фактора, једнофакторни експеримент се у класичном приступу користи као основа и у експериментима са више фактора [23]. Разлика између класичног и једнофакторног експеримента је само у рандомизацији нивоа фактора, која је код једнофакторног експеримента обавезна, што условљава да се ефекти спољних фактора, као случајне величине, обухватају грешком експеримента. Експерименти са више фактора разликују се још више од класичних експеримената. Ако се контролишу, на пример, два фактора A и B и сваки од њих има два нивоа A_1, A_2, B_1 и B_2 , у класичном експерименту се варира само један фактор док се други задржава на константном нивоу (на пример $B_1 = const.$). На тај начин се експеримент своди на једнофакторни. Затим се такав експеримент обавља на другом нивоу фактора ($B_2 = const.$). Резултати таквог експеримента приказани су на слици 7.1.



Слика 7.1 Експеримент са два фактора

Може се уочити да у првој и другој серији експеримената спољни услови не морају бити исти, а ефекат им није случајан.

Код факторног експеримента истовремено се варирају оба фактора. Тако би у наведеном примеру са два фактора и два нивоа за сваки било $2 \cdot 2 = 4$ комбинација нивоа фактора: $A_1B_1, A_2B_1, A_1B_2, A_2B_2$.

Редослед комбинација нивоа фактора бира се на случајан начин (рандомизовано). Као и код једнофакторног експеримента, овде се уводи понављање експерименталних јединица за исту комбинацију нивоа фактора, што омогућује процену грешке експеримента.

Факторни експеримент означава се производом нивоа фактора, који управо показују колики је укупан број комбинација нивоа фактора. Тако да ће, на пример, експеримент са три фактора, од којих један има три нивоа, други четири и трећи четири, бити означен: $3 \cdot 4 \cdot 4 = 48$. То значи да има 48 комбинација нивоа фактора.

Када постоји адитивност ефекта фактора, математички модел експеримента гласи:

$$x_{ijk} = \mu + A_i + B_j + \varepsilon_{ijk}, \quad (7.1)$$

где је:

μ — општа вредност за сва посматрања * када нема утицаја фактора ни грешке,

A_i — фактор i - тог нивоа,

B_j — фактор j - тог нивоа и

ε_{ijk} — укупна грешка експеримента.

Међутим, не мора увек постојати адитивност ефекта фактора. У таквим случајевима не важи назначени математички модел и факторни експеримент се не може без посебних мера применити. Противници савременог планираног експеримента потпуно оспоравају применљивост факторног експеримента за случајеве са више од једног фактора, при чему им је неадитивност главни аргумент.

Заслугом једног од оснивача планираног експеримента, Р. Фишера (R. Fischer), уведен је у математички модел дат изразом (7.1) члан AB_{ij} :

$$x_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (7.2)$$

који је индикатор постојања међудејства, а коригује ефекте фактора до мере адитивности. Ово представља приближавање, у многим инжењерским експериментима допуштено, тим пре што се на тај начин користе све предности факторног експеримента. Ако је међудејство занемарљиво мало, може се укључити са својим степеном слободе у грешку експеримента, што повећава сигурност процене ефекта фактора.

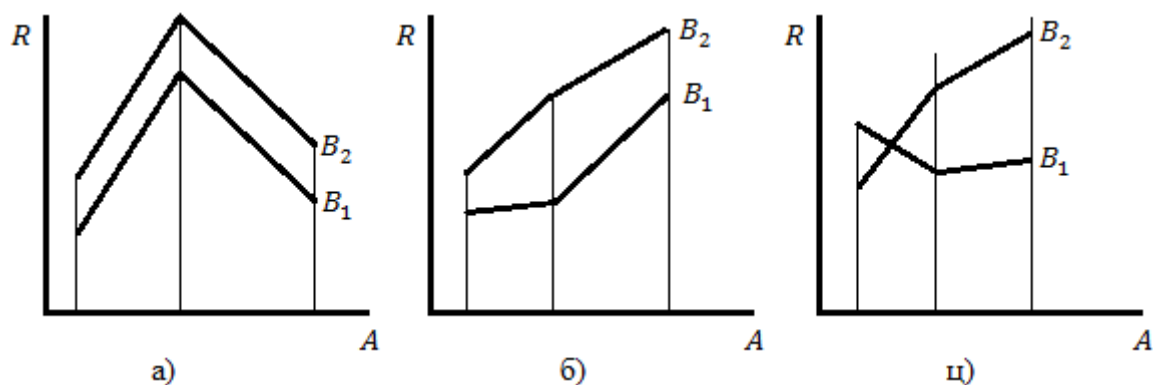
Међудејство је најпростије дефинисати и објаснити графички. Нека величина R зависи од два фактора A и B :

$$R = f(A, B). \quad (7.3)$$

При овоме резултати могу бити приказани у равни као на слици 7.2 а) и б) на којима су нивои фактора B параметри.

Ако су линије у графикону паралелне, нема међудејства између фактора A и B (слика 7.2 а). Ако линије нису паралелне (слика 7.2 б) или се секу (слика 7.2 ц), постоји међудејство. Значајан је случај када постоји међудејство и у посматраном опсегу варирања фактора не долази до пресека линије. Тада је погодном трансформацијом координата, могуће знатно смањење ефекта посматраног међудејства које доводи до тога да постане незначајно. Ово је битно у сложенијим експериментима, нарочито ако има фактора са случајним нивоима.

* Величина μ се назива истинита вредност.



Слика 7.2 Приказ резултата у равни а) нема међудејства између фактора А и В, б) и ц) постоји међудејство између фактора А и В

У инжењерским истраживањима факторни експерименти су обично сложени. Ту је, пре свега, реч о више фактора који увећавају тешкоће експеримента. Стога је значајно озбиљно разматрање избора фактора. За ову сврху је погодно знати шему поделе фактора на врсте коју је дао Д. Кокс (D. Cox):

- фактори поступка и
- фактори класификације.

Фактори поступка су они који, посредно или непосредно, мењају систем а који могу бити дефинисани из познатих законитости у испитиваној појави. Између њих треба разликовати три врсте.

Први су фактори од непосредног интереса у које спадају, пре свега, основни фактори који непосредно производе законитости у процесу. Њихово истраживање је основни циљ експеримента, поготову ако је замишљено да се преко њих управља процесом.

Други су фактори који могу изменити дејство основног фактора или разјаснити дејство основног фактора.

У трећу врсту фактора спадају фактори који су последица експерименталне технике.

Фактори класификације могу бити:

- групе спољних али неизбежних фактора који су физички значајни али чији нивои нису предвидљиви (не могу се контролисати) и
- спољни фактори који утичу на измене услова појединих експерименталних јединица и који нису контролисани, а утичу на резултат.

Успех експеримента је, пре свега, у правилном избору основних фактора (фактора поступка, третмана) и подешености плана експеримента спољним факторима (факторима класификације). Ово је често врло сложен процес и грешка било које врсте при избору фактора и типа плана експеримента смањује ефекат експеримента а у граничном случају може довести и до заблуде.

Основна предност факторног експеримента и његово основно обележје је да су сви нивои једног фактора комбиновани са свим нивоима осталих фактора. У условима факторног експеримента, ако се изабере повољан тип плана, знатно се може повећати ефикасност експеримента. Тако да се у предности још убраја и процене међудејства.

Док је мана факторног експеримента управо његова гломазност, нарочито ако има више фактора и њихових нивоа. И предности и недостаци факторног експеримента расту са порастом броја фактора.

7.1 Двофакторни експеримент ограничене рандомизације

Има дуготрајних експеримента код којих није могуће употребити све рандомизирани експерименталне јединице из једног захвата. Неки експерименти се морају обављати више дана. Или, ако је експеримент дужи а захтева непрекидан ток у све три смене, не може га обавити једно лице већ више њих. Овде редослед дана или редослед потребних људи ометају потпуно рандомизацију. У том случају постоји предлог да се део експеримента у једном дану или који обавља исти човек назове блок и да сваки блок представља по једно понављање за све нивое фактора (реплику).

Математички модел потпуно рандомизираниог експеримента са два фактора гласи:

$$x_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{k(ij)}. \quad (7.4)$$

У овом експерименту обавља се $k = 1, 2, \dots, n$ понављања. Ако се овакав експеримент разбије на блокове тако да буде $k = 1, 2, \dots, n$ блокова (уместо понављања). Утицај дана или утицај радника на резултате експеримента се мора увести у математички модел фактор R_k :

$$x_{ijk} = \mu + R_k + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{k(ij)}, \quad (7.5)$$

где је:

R_k — ефекат утицаја блока,

$A_i + B_j + AB_{ij}$ — ефекат фактора и

$\varepsilon_{k(ij)}$ — укупна грешка експеримента.

Утицај блока или реплике не може се рандомизирати, али комбинације нивоа фактора су унутар сваког блока рандомизирани.

За факторни експеримент са два фактора A (са три нивоа) и B (са два нивоа), који има могуће комбинације нивоа:

$$A_1B_1 \quad A_1B_2 \quad A_2B_1 \quad A_2B_2 \quad A_3B_1 \quad A_3B_2,$$

могу се направити четири реплике у којима су ове комбинације рандомизирани:

$$\begin{array}{llllll} R_1 & A_1B_2 & A_3B_1 & A_3B_2 & A_2B_1 & A_1B_1 & A_2B_2, \\ R_2 & A_2B_2 & A_1B_1 & A_3B_2 & A_2B_1 & A_1B_2 & A_3B_1, \\ R_3 & A_2B_1 & A_3B_2 & A_1B_2 & A_3B_1 & A_2B_2 & A_1B_1, \\ R_4 & A_1B_1 & A_3B_1 & A_3B_2 & A_2B_1 & A_1B_2 & A_2B_2. \end{array}$$

Пошто реплика са својим ефектом улази у математички модел као дејство спољног фактора, није могућа процена грешке јер она има степен слободе нула. Математичко очекивање средњег квадрата је дато у табели 7.1.

Табела 7.1 Математичко очекивање средњег квадрата

Извор промене	Степен слободe	3	2	4	1	Математичко очекивање средњег квадрата
		F	F	S	S	
		i	j	k	m	
R_k	3	3	2	1	1	$\sigma_e^2 + 6\sigma_R^2$
A_i	2	0	2	4	1	$\sigma_e^2 + 8\sigma_{RA}^2 + 8\sigma_A^2$
RA_{ik}	6	0	2	4	1	$\sigma_e^2 + 2\sigma_{RA}^2$
B_j	1	3	0	4	1	$\sigma_e^2 + 3\sigma_{RB}^2 + 12\sigma_B^2$
RB_{jk}	3	3	0	1	1	$\sigma_e^2 + 3\sigma_{RB}^2$
AB_{ij}	2	0	0	4	1	$\sigma_e^2 + \sigma_{RAB}^2 + 4\sigma_{AB}^2$
RAB_{ijk}	6	0	0	1	1	$\sigma_e^2 + \sigma_{RAB}^2$
Грешка	0	1	1	1	1	σ_e^2
Сума	23					

Ознаке коришћене у табели 7.1 имају следеће значење:

- σ_e^2 – дисперзија грешке,
- σ_R^2 – дисперзија реплика,
- σ_A^2 – дисперзија фактора A ,
- σ_B^2 – дисперзија фактора B ,
- σ_{RA}^2 – дисперзија реплика и фактора A ,
- σ_{RB}^2 – дисперзија реплика и фактора B и
- σ_{RAB}^2 – дисперзија реплика и фактора A и B .

Ако не постоји знатно дејство између реплика и фактора A и B , може се узети да је:

$$\sigma_{RA}^2 = \sigma_{RB}^2 = \sigma_{RAB}^2 = 0, \quad (7.6)$$

па ће се на тај начин остварити 15 степени слободe за грешку. Уколико горње дисперзије и нису нула, оне ће се на овај начин измешати са грешком.

За овај случај математичко очекивање је дато у табели 7.2

Табела 7.2 Математичко очекивање

Извор промена	Степен слободe	Математичко очекивање средњих квадрата
R_k	3	$\sigma_e^2 + 6\sigma_R^2$
A_i	2	$\sigma_e^2 + 8\sigma_A^2$
B_j	1	$\sigma_e^2 + 12\sigma_B^2$
AB_{ij}	2	$\sigma_e^2 + 4\sigma_{AB}^2$
Грешка	15	σ_e^2
Сума	23	

7.2 Факторни експеримент 3^n

Факторни експеримент 3^n има n фактора од којих је сваки са три нивоа. У овом експерименту нивои су фиксни, а могу бити квалитативни или квантитативни. Ова врста плана је, због својих добрих особина, често основа сложених планова, иако има мањи значај него план 2^n за исти сврху.

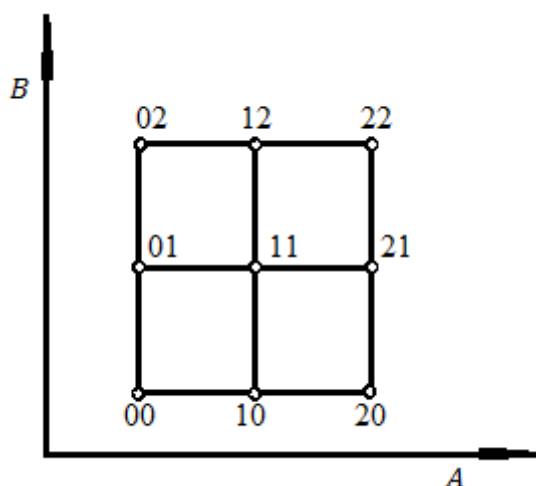
У експерименту 3^2 има два фактора са три нивоа, дакле укупно девет комбинација нивоа фактора. Нивои фактора се деле на три врсте: доњи ниво (ознака 0), основни ниво (ознака 1) и горњи ниво (ознака 2). Математички модел оваквог плана, ако нема понављања на истом нивоу фактора, гласи:

$$x_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (7.7)$$

и у њему се грешка меша са узајамним дејством. Ако се за сваку комбинацију нивоа понови читавање $k = 1, 2, \dots, n$ пута, може се издвојити грешка експеримента а математички модел гласи:

$$x_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{k(ij)}. \quad (7.8)$$

Означавање комбинација нивоа фактора приказано је на слици 7.3.



Слика 7.3 Комбинација нивоа фактора

У ознакама на слици прва цифра означава ниво фактора A а друга ниво фактора B .

Овде је могућа класична дисперзиона анализа која за ефекте A и B даје по два степена слободе, док за узајамно дејство измешано са грешком експеримента остаје 4 степена слободе, ако нема понављања за сваку комбинацију нивоа.

Ако су нивои фактора квантитативни и ако је интервал између нивоа константан, могућа је лака провера линеарних и квадратних ефеката. Да се ова анализа обави, бирају се коефицијенти за резултате код појединих комбинација нивоа фактора према следећем:

- за линеарне ефекте -1 за доњи, 0 за нормални и +1 за горњи и
- за квадратне +1 за доњи, -2 за нормални и +1 за горњи.

Поступак је сличан као и код експеримента 2^n , а шема коефицијената је дата у табели 7.3.

Табела 7.3 Шема коефицијената

Фактори	Комбинација нивоа фактора									$\sum c_i^2$
	00	01	02	10	11	12	20	21	22	
A_l	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	6
A_{kv}	1	1	1	-2	-2	-2	1	1	1	18
B_l	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	6
B_{kv}	1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1	18
$A_l B_l$	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1	4
$A_l B_{kv}$	-1	2	-1	0	0	0	1	-2	1	12
$A_{kv} B_l$	-1	0	1	2	0	-2	-1	0	1	12
$A_{kv} B_{kv}$	1	-2	1	-2	4	-2	1	-2	1	36

8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

8.1 Планирање експеримента

8.1.1 Стандард

Одређивање затезних својстава полимерних материјала дефинисано је према стандарду ISO 527-1:1996 [24].

Овај део стандарда ISO 527 служи за утврђивање општих принципа за одређивање затезних својстава пластике и пластичних композита при дефинисаним условима.

Дефинисано је неколико различитих врста епрувета за испитивање (тест узорака) које одговарају различитим врстама материјала, које су детаљније описане у ISO 527.

Методe се користе да се испитају понашања епрувета при затезању и за утврђивање затезне чврстоће, модула еластичности и других аспеката односа напона и деформација при дефинисаним условима.

Методe се примењује на следеће врсте материјала:

- чврсте и получврсте ливене и екструдиране термопластичне материјале, укључујући и оне са пунилом и влакном ојачане материјале; чврсте и получврсте термопластичне фолије и филмове;
- чврсте и получврсте ливене термоотпорне материјале, укључујући и оне са пунилом и влакном ојачане материјале; чврсте и получврсте термоотпорне фолије, укључујући и ламинате;
- термоочврсле и термопластичне композите ојачане влакнима са једносмерним или не једносмерним уграђеним ојачањима попут тепиха, тканине, тканог *ровинга* (дуг и узак сноп влакана), сечене нити, комбинације и са хибридниm ојачањима, *ровинга* и млевена влакна; фабрички пресвучене фолије и
- термоотпорне течне кристале полимера.

Ова метода није погодна када се користе крути вишеслојни материјали или сендвич структуре које садрже више слојева различитих материјала.

Дефиниције

Мерена дужина, L_0 - почетна дужина између мерних ознака епрувете (дужина неоптерећене епрувете) која се користи за испитивање, облик епрувете се може видети у релевантном делу ISO 527, изражава се у милиметрима (mm).

Брзина испитивања, v – брзина раздвајања чељусти машине за испитивање у току испитивања изражава се у милиметрима по минути (mm/min).

“Затезно напрезање” (називно) R – затезна сила (оптерећење) F на јединицу почетне површине најмањег попречног пресека епрувета A_0 , у било ком тренутку испитивања.

Напон, $R (\sigma)$ - затезна сила по јединици површине попречног пресека по дужини, која делује на епрувету у сваком тренутку при испитивању. Изражен је у мегапаскалима (МПа).

Затежући напон (напон на граници пропорционалности), R_y - први напон код кога се повећање деформације јавља без повећања напона, изражен је у мегапаскалима (МПа), може бити мањи од максималног могућег напона (слика 8.1, криве b и c).

Напон кидања, R_B - напон при коме се епрувета кида (слика 8.1), изражена је у мегапаскалима (МПа).

Затезне чврстоћа, R_M - максимални напон који може да издржи епрувета приликом испитивања на затезање (слика 8.1), изражена је у мегапаскалима (МПа).

Напон који доводи до издужења x (%), R_z - напон при коме деформација достиже одређену вредност x изражену у процентима је изражен у мегапаскалима (МПа), може се мерити на пример, ако на кривој напон - деформација није изражена граница течења (слика 8.1, крива d). У овом случају, x се узима из одговарајућег стандарда или се усваја договором заинтересованих страна. Међутим, x мора бити мањи од напона који одговара затезној чврстоћи, у сваком случају.

Релативно издужење, ϵ - издужење епрувете по јединици њене почетне мерне дужине. Изражава се као бездимензиони однос, или у процентима (%). Користи се за деформације до горње границе течења, као и за деформације ван границе течења.

Релативно издужење на граници течења, ϵ_y – издужење настало при напрезању на граници течења (слика 8.1, криве b и c), изражено је као бездимензиони однос, или у процентима (%).

Релативно издужење при кидању, ϵ_B – издужење настало при напону који изазива кидање, ако се кида без границе течења (слика 8.1, криве a и d) изражава се као бездимензиони однос, или у процентима (%) ако се кида након границе течења.

Релативно издужење при затезној чврстоћи (максималном оперећењу), ϵ_M – релативно издужење у тачки које одговара затезној чврстоћи, ако се то деси, без или на граници течења (слика 8.1, криве a и d) изражава се као бездимензиони однос или проценат (%) за напон који је већи од вредности напона на граници течења.

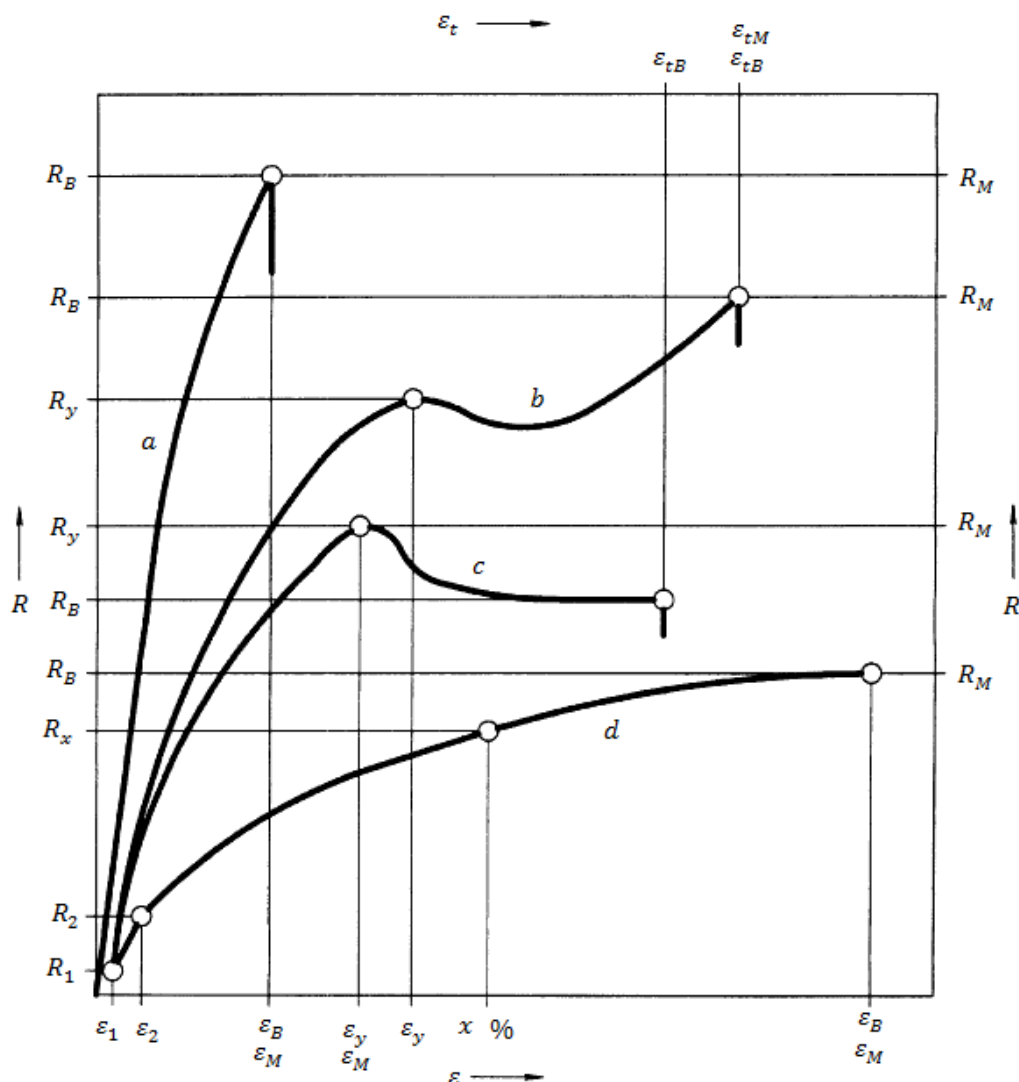
Номинално релативно издужење, ϵ_t - истезање епрувете по јединици првобитне измерене дужине, односно растојања између чељусту. Изражава се као бездимензиони однос или у процентима (%). Оно представља укупно релативно издужење које се одвија дуж слободне дужине епрувете.

Номинално релативно издужење при кидању, ϵ_{tB} – номинално релативно издужење при оптерећењу које доводи до лома, уколико се епрувета ломи након растерећења (слика 8.1, криве b и c) изражава се као бездимензиони однос или у процентима (%) за лом без растерећења.

Номинално релативно издужење при затезној чврстоћи, ε_{tM} - номинално релативно издужење при затезној чврстоћи, ако се јави након растерећења (слика 8.1, крива *b*) изражава се као бездимензиони однос или у процентима (%) за вредности чврстоће без или на граници течења.

Модул еластичности при затезању; Јангов (Young) модул, E_t - однос разлике напона R_2 и R_1 са одговарајућом разликом релативних издужења чије су вредности $\varepsilon_2 = 0,0025$ и $\varepsilon_2 = 0,005$ (слика 8.1, крива *d*) изражава се у мегапаскалима (МПа), ова дефиниција се не односи на филмове и гуме.

НАПОМЕНА 1: За одређивање модула еластичности E_t помоћу рачунарске опреме користи се две различите тачке на кривој напон - издужење, тачке могу бити замењене линеарном регресионом анализом која се примењује на делу криве између поменутих тачака.



Слика 8.1 Дијаграм напон-издужење за полимерне материјале

Опрема

Машина за испитивање затезних својстава полимерних материјала мора да задовољи ISO 5893 и испуни услове који следе:

- Брзина испитивања

Машина за испитивање затезањем мора бити у стању да одржава брзину испитивања, као што је наведено у табели 8.1.

Табела 8.1 Препоручене брзине испитивања

Брзина mm/min	Толеранције %
1	$\pm 20^a$
2	$\pm 20^a$
5	± 20
10	± 20
20	± 10
50	± 10
100	± 10
200	± 10
500	± 10
^a Ове толеранције су мање од наведених у ISO 5893	

- Челоусти (стеге)

Челоусти за држање епрувете морају бити везани на машину тако да се главна оса епрувете поклапа са правцем истезања кроз центар склопа држача. Ово се може постићи, на пример, помоћу центрирајућих пинова у држачима. Мора се спречити клизање епрувете, колико је год могуће, у односу на држаче, а то се најбоље изводи помоћу одговарајуће врсте држача који одржава или повећава притисак на епрувети. На систему за стезање не сме доћи до пуцања држача.

Број епрувета за испитивање

Најмање пет пробних епрувета треба тестирати за сваки од потребних праваца испитивања и за разматрање својстава (модул еластичности, истезање и слично). Број мерења може бити више од пет, ако је потребна већа прецизност средње вредности. То је могуће да се процени путем интервала поверења (95% вероватноће, ISO 2602) [25].

Епрувете које се ломе на проширеном делу епрувете или које се шире на истом делу ће бити одбачене и остале епрувете ће бити тестиране.

Подаци који се добијају код епрувета где се јавља проклизавање челоусти, или где долази до грешке до 10 mm код било које челоусти, или где је очигледно грешка довела до превременог лома, не укључују се у анализу. Понављање испитивања се спроводи на новим епруветама. Подаци, међутим, неће бити искључени из анализе из било ког другог разлога, као што је променљивост тих података у функцији променљиве природе материјала који се тестира.

Облик и димензије епрувета

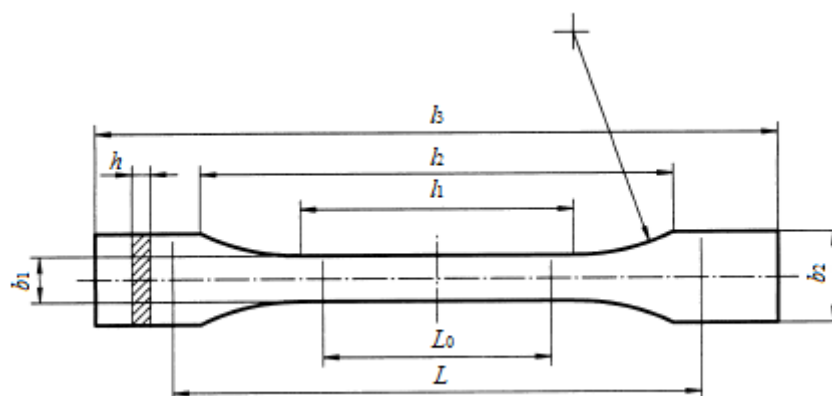
Где год је могуће, епрувета ће бити у облику звона врсте *1A* и *1B* као што је приказано на слици 8.2. Тип *1A* је кориснији за директно обликовани вишенаменски тест узорак, тип *1B* за обрађене узорке.

Припрема епрувета

Епрувете морају бити припремљене у складу са релевантним спецификацијама. Када ниједана не постоји, или ако није другачије назначено, епрувете ће бити директно клипно или убризгавано обликоване од материјала, у складу са ISO 293, ISO 294 или ISO 295, по потреби, или обрађене у складу са ISO 2818 од плоча које су биле компресоване или убризгавањем обликоване од базе.

Све површине епрувете морају бити без пукотина, огреботина или других недостатака. Епрувете које се израђују из готових производа узимају се са равних површина или ако таквих површина нема, онда са површина које имају што мању закривљеност.

Димензије епрувете



Слика 8.2 Тип епрувете 1A

На слици 8.2 су:

- l_3 - укупна дужина епрувете, најмање 150 mm,
- l_1 - дужина суженог паралелног дела 80 ± 2 mm,
- b - ширина суженог паралелног дела $10 \pm 0,2$ mm,
- r - радијус 20 до 25 mm,
- l_2 - дужина између паралелних страна 104 до 113 mm,
- b_2 - ширина крајева $20 \pm 0,2$ mm,
- b_1 - ширина суженог дела $10 \pm 0,2$ mm,
- h - дебелина $4 \pm 0,2$ mm,
- L_0 - размак између мерних ознака (мерна дужина) $50 \pm 0,5$ mm и
- L - почетни размак између чељусти 115 ± 1 mm.

Остали типови епрувета, као и њихове димензије које се налазе у стандарду ISO 527, овде нису приказани јер нису коришћени за испитивање.

8.1.2 План експеримента

Потребно је испитати механичка својства полиетилена на сниженим температурама при различитим брзинама испитивања. Епрувете треба израдити од исте масе од којих се израђују кошеви замрзивача који су у последње време били проблем код многих потрошача те врсте беле технике. Проблем који се јавља код кошева је тај што временом долази до сакупљања кошева. Кошеви нису могли да издрже предвиђени терет и једноставно су пропадали на дно замрзивача после извесног периода употребе. Овим испитивањем је потребно сагледати понашање материјала при различитим температурама на различитим брзинама и на тај начин доћи до закључка шта је узрок тог проблема.

Испитивања треба спровести у лабораторији која је опремљена потребном опремом за ову врсту испитивања. Потребно је имати довољан број епрувета дефинисаним стандардом, машину на којој ће се вршити испитивање на затезање (кидалица). Потребно је хладити епрувете, у случају да не постоји комора на самој кидалици за снижене температуре, мора се обезбедити: посуда у којој ће се епрувете хладити, течност за хлађење епрувети (ацетон и суви лед), мерач температуре – термометар и пинцета којом ће се vadити охлађене епрувете из кадице и постављати у чељуст кидалице. Не треба обезбеђивати посебне уређаје за записивање података уколико је сама кидалица повезана са рачунарском опремом, која помоћу софтвера врши снимање и обраду добијених података.

8.2 Извођење експеримента

Испитивање епрувета на затезање је вршено у лабораторији Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Материјал и припрема епрувета

Материјал који се користи за израду кошева за замрзиваче је полиетилен високе густине (Hostalen GC 7260) од кога су и израђене епрувете које се испитују на затезање. Машина „IDRA“ се користи за бризгање епрувети, приказана је на слици 8.3. Епрувете су израђене бризгањем под притиском од 100 bar при температури од 210 °C, док је време хлађења 35 s. Поступак бризгања епрувета од материјала *Hostalen GC 7260* је изведен у предузећу 21. Октобар у Крагујевцу.



Слика 8.3 Машина за бризгање пластичних маса

Изглед епрувете добијене бризгањем која се користи за ову врсту испитивања је приказан на слици 8.4.



Слика 8.4 Изглед епрувете за испитивање

Hostalen GC 7260 је полиетилен високе густине који се користи у општој намени. Бризгањем се добијају делови као што су затварачи, делови играчака, делови за купатила и различите врсте паковања [26]. *Hostalen GC 7260* показује добро течење и високу крутост и користи се за ињекционо бризгање и друге процесе конверзије. Овај материјал није намењен за употребу у медицинске и фармацеутске сврхе. Карактеристике *Hostalena GC 7260* приказане су у табели 8.2.

Табела 8.2 Карактеристике материјала

Физичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Густина	0,960	g/cm ³	ISO 1183
Брзина протока отопљене масе			ISO 1133
190°C/2,16 kg	8,0	g/10 min	
190°C/5,0 kg	23	g/10 min	
FNCT ² (50 °C)	2,5	H	Интерна метода
Карактеристике тврдоће	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Тврдоћа по Шору (<i>Shore</i>), скала <i>D</i>	61		ISO 868
Тврдоћа притиском кутле по Бринелу (<i>Brinell</i>)	58,0		ISO 2039 – 1
Механичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Модул затезања	1450	МПа	ISO 527 – 2
Напон кидања	30,0	МПа	ISO 527 – 2
Напон затезања	7,0	%	ISO 527 – 2
Карактеристике при удару	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Отпорност на жилавост по Шарпију (<i>Charpy</i>)			ISO 179 / 1eA
-30°C	4,5	kJ/m ²	
23°C	4,0	kJ/m ²	
Термичке карактеристике	Номинална вредност	Јединица	Метода испитивања
Викерсова температура омекшавања	74,0	°C	ISO 306/B50

Опрема

Машина која је коришћена за испитивање је *ZWICK/ROELL Z 100*, док је њен пуни назив компјутеризовани мерни систем за испитивање материјала *ZWICK/ROELL Z 100*. Сама врши записивање резултата испитивања преко рачунара и одговарајућег софтвера који обрађује те податке.

Карактеристике кидалице приказане су у табели 8.3, а на слици 8.5 приказан је изглед кидалице.

Табела 8.3 Најважније карактеристике машине - ZWICK/ROELL Z 100

Димензије носећег рама	
Висина	2369 mm
Ширина	960 mm
Укупна висина	2484 до 3294 mm
Погонски систем, брзина и тачност	
Брзине (V_{nom})	0,0005 до 200 mm/min
Прецизност од подешене брзине	0,003 % од V_{nom}
Корак резолуције	0,0206 μm
Тачност позиционирање	< 1,0 μm
Мерно - управљачка електроника	
Опсег мерења	0,2 до 165 % од номиналне вредности мерења
Брзина снимања тест података	500 Hz
Резолуција на 100% номиналне вредности мерења	162 000 поена (на 500 Hz)
Улаз мерења	Диференцијал
Мерење силе	
Номинална сила	100 kN
Мерно подручје	DIN EN ISO 7500-1 grade 1: Н 400.00 до 100.00 kN DIN EN ISO 7500-1 grade 0.5: 2,00 kN до 100,00 kN
Резолуција машине	0,16% до 0,4%
Резолуција силе	1 N
Екстензометар, сензор за мерење издужења	
Уређај за мерење дужине	10 до 100 mm
Тачност	DIN EN 10002 T4 grade 1.
Пнеуматске стезне чељусти са мануелним активирањем	
Сила стезања	180 kN (на 10 bar радног притиска) 110 kN (на 6 bar радног притиска)
Максимална ширина отвора	30 mm
Величина чељусти	пречник 78 mm



Слика 8.5 Изглед кидалице

Испитивање затезањем се врши на сниженим температурама, па је потребно обезбедити кидицу у којој се хладе епрувете, ацетон, суви лед и термометар који може да мери на температуре испод 0°C .

Поступак извођења експеримента

Епрувете се хладе на температурама 0 , -20 и -40°C и испитују се различитим брзинама од 10, 20, 50, 100 и 200 mm/min . Пошто је температура у замрзивачу око -20°C управо из тог разлога се и врши испитивање епрувете на већ поменутих температурама. Епрувете се хладе у посуди са ацетоном, где се додаје одговарајућа количина сувог леда како би се постигла одговарајућа температура (слика 8.6). Температура се мери термометром. Потребно је да се одржава константна температура одређено време за сваку серију испитивања, како би све епрувете биле изложене подједнаким условима.



Слика 8.6 Хлађење епрувете

Затим се пинцентом из кидице епрувета вади и ставља у кидалицу односно у чељусти кидалице (слика 8.7). Притисак чељусти кидалице је равномерно распоређен на све четири чељусти и износи 3 bar. На машини постоје механички граничници који

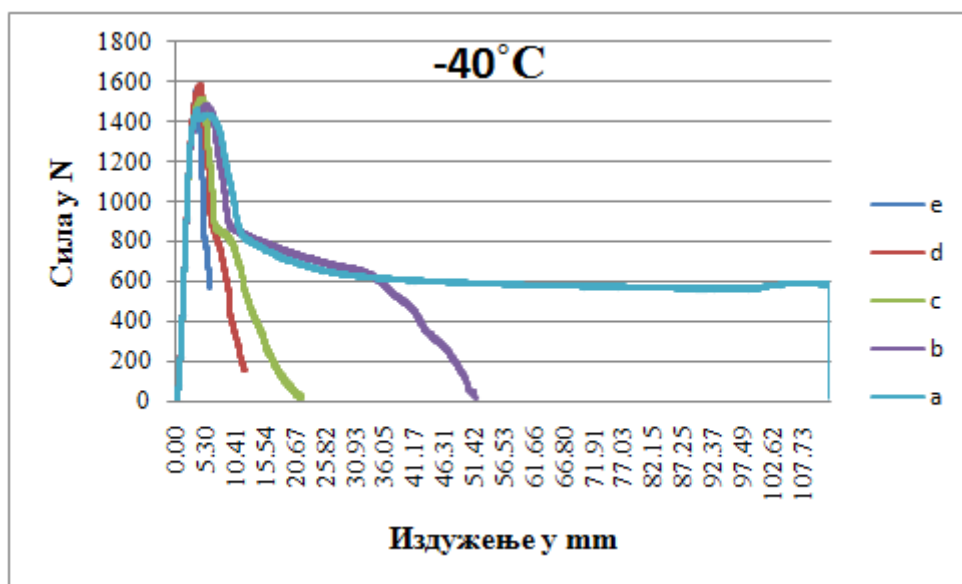
омогућавају постављање епрувете у вертикалан положај. Подешавање растојања између чељусту врши се како би се омогућило постављање епрувете између равни чељусту и подешава се аутоматски преко софтвера.



Слика 8.7 Епрувета у чељустима кидалице

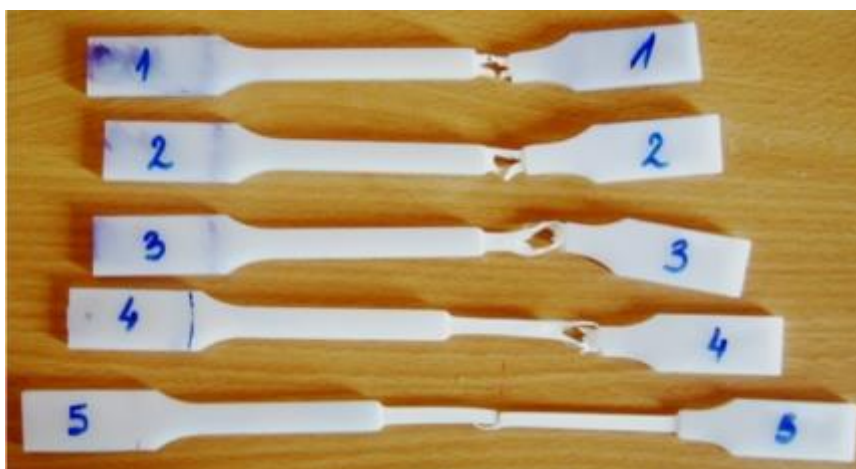
8.3 Приказ резултата

Прво се вршило испитивање епрувета на -40°C при различитим брзинама испитивања дефинисаним стандардом (табела 8.1). На дијаграму (слика 8.8) приказани су резултати испитиваних епрувета на температури од -40°C при брзинама од 10, 20, 50, 100 и 200 mm/min. Крива *a* представља истезање епрувете при брзини од 10 mm/min, крива *b* истезање при брзини од 20 mm/min, крива *c* од 50 mm/min, крива *d* од 100 mm/min, док крива *e* представља истезање брзином од 200 mm/min.



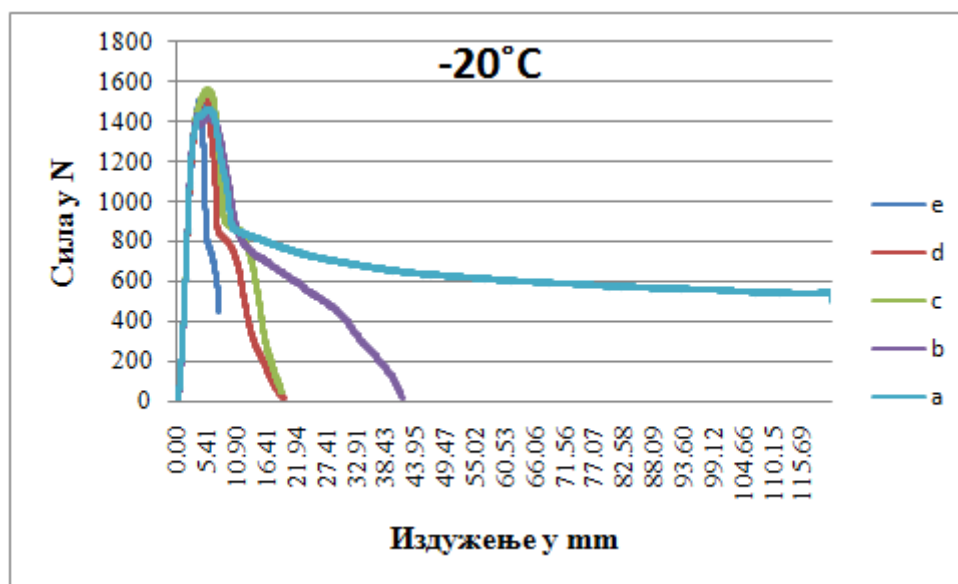
Слика 8.8 Дијаграм истезања на $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$: а - истезање епрувете брзином 10 mm/min , б - истезање епрувете брзином 20 mm/min , с - истезање епрувете брзином 50 mm/min , д - истезање епрувете брзином 100 mm/min , е - истезање епрувете брзином 200 mm/min

На слици 8.9 дат је приказ епрувета након испитивања, где је бројем 1 означена епрувета при брзини од 200 mm/min , бројем 2 епрувета покидана при брзини од 100 mm/min и тако даље, до епрувете означене бројем 5 која је испитивана при брзини од 10 mm/min .



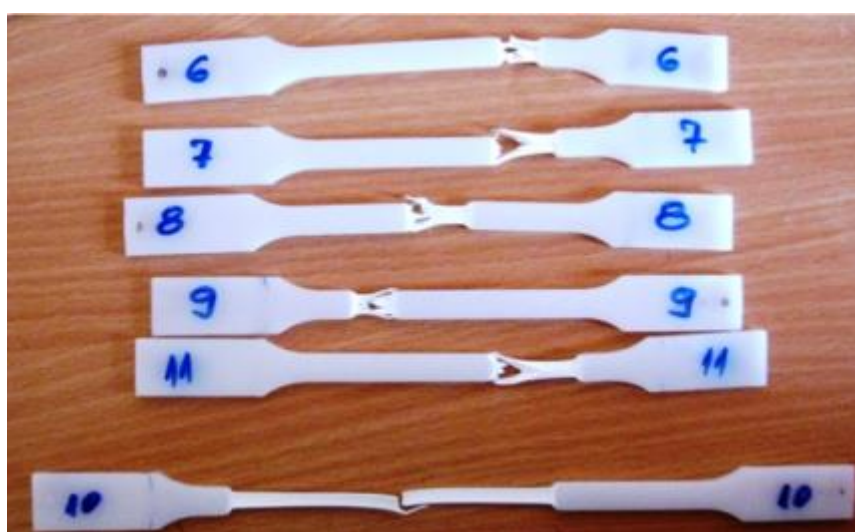
Слика 8.9 Изглед епрувета након кидања при температури од $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Након испитивања на $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ вршено је испитивање на $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ различитим брзинама. На дијаграму (слика 8.10) приказане су вредности испитивања на температури од $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и криве од а до е представљају брзине испитивања од најмање до највеће респективно.



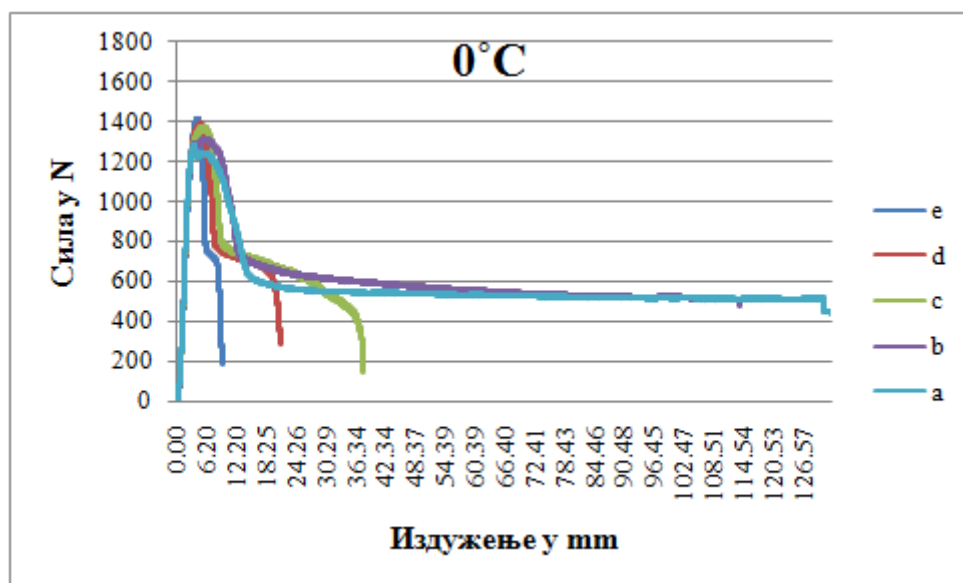
Слика 8.10 Дијаграм истезања на -20°C : a - истезање епрувете брзином 10 mm/min , b - истезање епрувете брзином 20 mm/min , c - истезање епрувете брзином 50 mm/min , d - истезање епрувете брзином 100 mm/min , e - истезање епрувете брзином 200 mm/min

Приликом испитивања епрувета на температури од -20°C дошло је до неочекиваног лома епрувете под редним бројем 9, која је испитивана брзином од 20 mm/min . Претпоставља се да је узрок лома епрувете израда током бризгања, јер је била међу последњим бризганим епруветама из те серије или се дуже хладила у калупу од осталих. Такође, постоји могућност да се епрувета дуже хладила у кадици пре испитивања од осталих епрувети па је због тога дошло до неочекивано брзог лома епрувете. Због овога се поновило испитивање епрувете при брзини од 20 mm/min и добило се очекивано издужење, поновљено испитивање при овој брзини је са епруветом означеном под редним бројем 11. Док је епрувета под редним бројем 10 испитивана при брзини од 10 mm/min . На слици 8.11 су приказане све епрувете које су испитиване на температури од -20°C .



Слика 8.11 Изглед епрувета након кидања при температури од -20°C

Последње испитивање са хлађењем је вршено на температури од 0°C . На слици 8.12 је приказан дијаграм са кривама које показују истезање при истим брзинама као и у претходним испитивањима. Слика 8.13 показује изглед епрувета након кидања.



Слика 8.12 Дијаграм истезања на 0°C : a - истезање епрувете брзином 10 mm/min, b - истезање епрувете брзином 20 mm/min, c - истезање епрувете брзином 50 mm/min, d - истезање епрувете брзином 100 mm/min, e - истезање епрувете брзином 200 mm/min



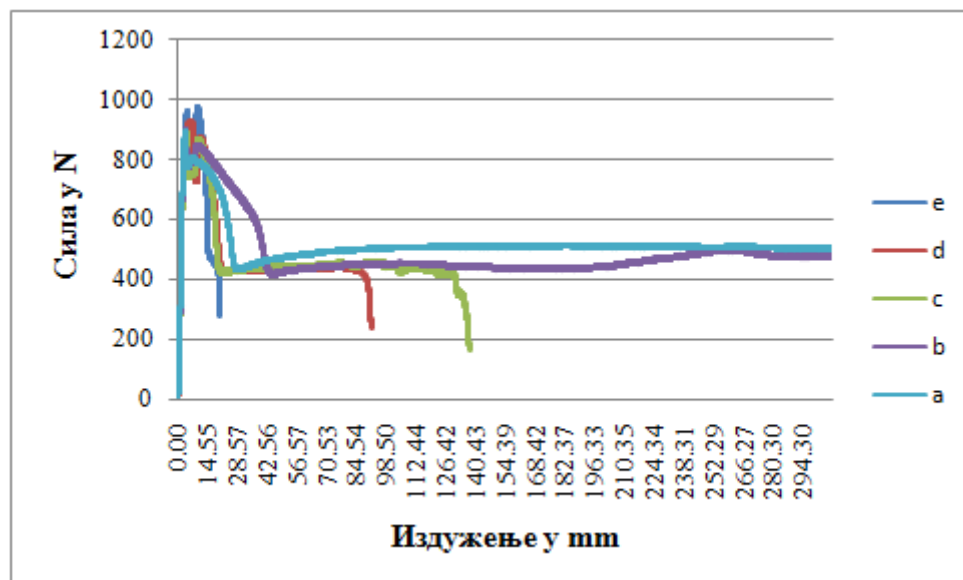
Слика 8.13 Изглед епрувета након кидања при температури од 0°C

Епрувете под редним бројевима 15 и 16 су испитиване брзинама од 20 и 10 mm/min, због уштеде на времену, а уједно и нереалног приказа резултата оне су принудно покидане сечењем. За ово испитивање и обраду података потребни су резултати затезне чврстоће, а не сила при којој долази до кидања, јер је она код полимерних материјала мања од затезне чврстоће, па је могуће изазвати лом сечењем. Дакле, у овом случају није потребно чекати да дође до лома епрувете при малим брзинама, јер приликом затезања епрувете долази и до загревања епрувете и због спољашњих услова и због трења које се јавља у самом материјалу приликом затезања.

Пошто су спроведена испитивања на сниженим температурама, вршено је испитивање на собној температури при истим брзинама као и у претходним испитивањима.

Испитивање на собној температури извршено је да би се видело понашање полиетилена у односу на понашање полиетилена при ниским температурама. Уочавају се знатно већа издужења при мањим брзинама испитивања, као и што се очекивало. При малим брзинама долази до загревања материјала, због трења које се јавља у самом материјалу приликом затезања.

Резултати испитивања приказани су на слици 8.14, а на слици 8.15 је приказана епрувета након кидања.

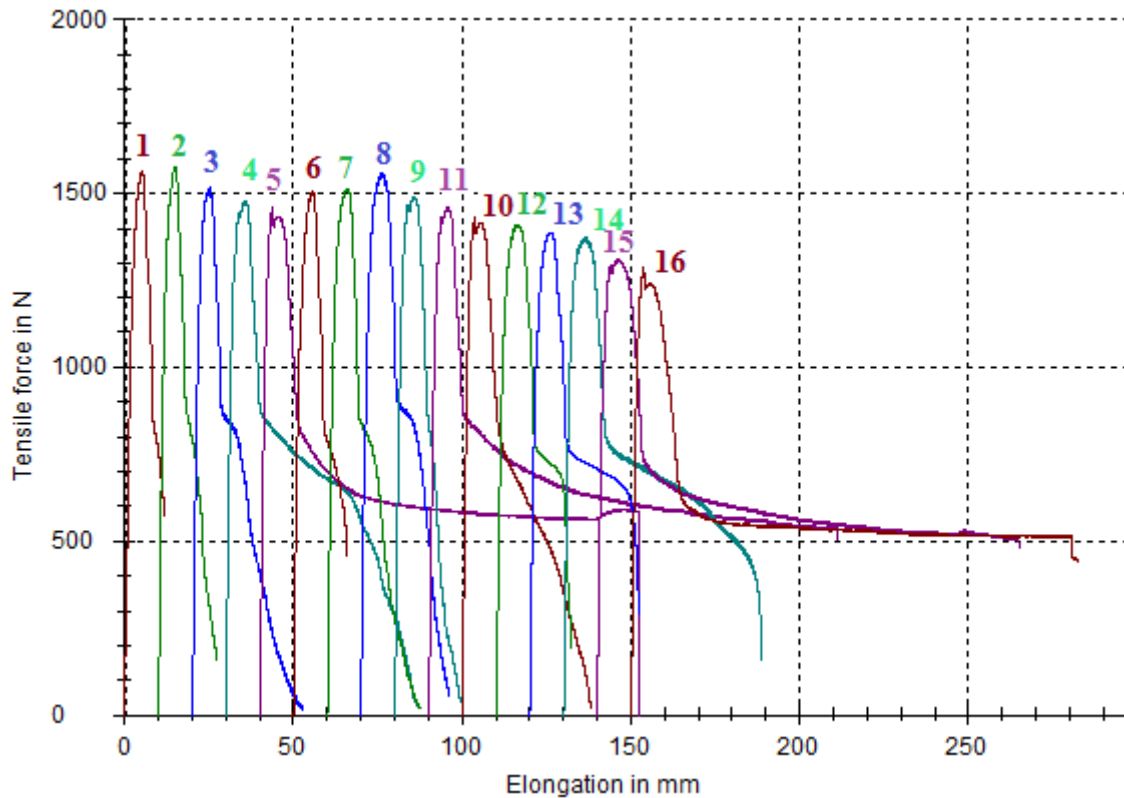


Слика 8.14 Дијаграм истезања на собној температури: a - истезање епрувете брзином 10 mm/min, b - истезање епрувете брзином 20 mm/min, c - истезање епрувете брзином 50 mm/min, d - истезање епрувете брзином 100 mm/min, e - истезање епрувете брзином 200 mm/min

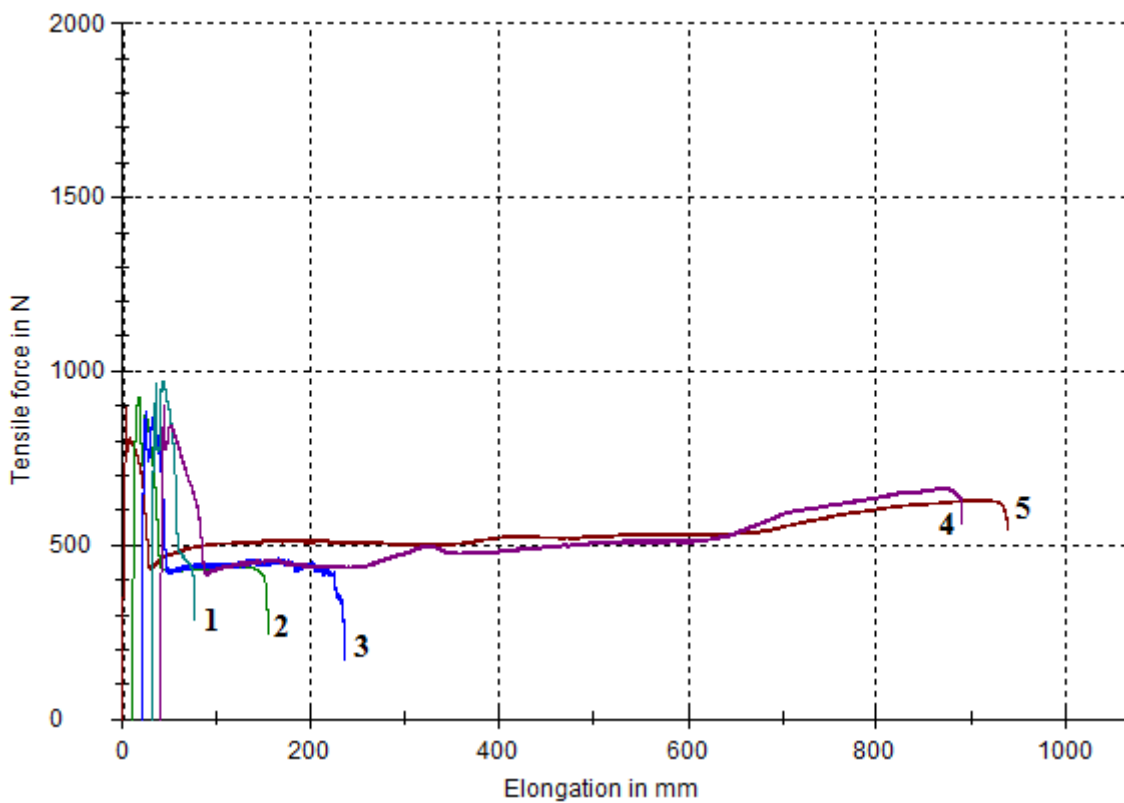


Слика 8.15 Изглед епрувета након кидања испитиваних на собној температури

Дијаграми који су претходно приказани су направљени на основу резултата добијених у екселу (Excel) које даје софтвер повезан са машином након завршеног испитивања. Софтвер *Text Expert* такође даје дијаграме за све серије испитивања, добијене криве на сниженим температурама су приказане на дијаграму слике 8.16, а на собној температури на слици 8.17. *Text Expert* поред дијаграма пружа доступне податке добијене испитивањем као што су затезна чврстоћа, напон на граници пропорционалности и номинална процентуална издужења.



Слика 8.16 Дијаграми добијени испитивањем на сниженим температурама у Text Expert, где су са бројевима од 1 до 16 означени редни бројеви епрувета по серијама



Слика 8.17 Дијаграми добијени испитивањем на собној температури у Text Expert: 1-200 mm/min, 2-100 mm/min, 3-5 mm/min, 4-20 mm/min, 5-10 mm/min

Табела 8.3 Резултати добијени испитивањем свих серија

Температура °C	Брзина mm/min	Редни број серије	$R_{p0,2}$ MPa	R_m N/mm ²	A_g %	A %
Снижене температуре	-40	200	25,63	39,11	3,66	13,93
		100	26,10	39,47	3,33	21,62
		50	25,72	37,88	3,83	40,73
		20	25,81	36,96	4,38	70,65
		10	25,96	36,48	2,08	-
	-20	200	24,82	37,64	4,10	19,05
		100	24,98	37,84	4,35	34,76
		50	25,84	38,91	4,66	32,79
		20	25,81	37,27	4,25	25,28
		20	25,47	36,51	4,36	150,44
		10	25,92	35,78	1,94	47,76
	0	200	23,77	35,25	4,90	27,81
		100	23,88	34,68	4,60	39,83
		50	24,09	34,31	5,27	73,12
		20	24,09	32,77	5,01	155,10
		10	24,34	32,11	2,04	164,77
Собна температура	200	1	19,69	22,39	1,52	1172,43
	100	2	19,39	23,19	5,08	180,09
	50	3	19,46	22,17	2,31	270,49
	20	4	19,54	24,29	11,47	57,93
	10	5	19,59	22,53	1,82	1061,74

8.4 Статистичка обрада података

Факторни експеримент 3^n се користи за обраду претходно добијених резултата. Број 3 представља број нивоа, а n број фактора у овом случају $n = 2$, што значи да постоје 2 фактора (температура и брзина). Разматраће се деловање поменутих фактора на затезну чврстоћу која је изражена у МПа. Температуре испитивања које су статистички обрађене су 0°C, -20°C и -40°C, док су испитиване брзине 50 mm/min, 100 mm/min и 200 mm/min.

Брзина је означена са A , а температура са B . Доњи ниво температуре и брзине означава се са 0, основни ниво са 1 а горњи ниво са 2. При чему је са 0 означена температура од 0°C, са бројем 1 је означена температура од -20°C и температура од -40°C означена као горњи ниво односно бројем 2. Док су брзине од 50 mm/min означена са 0, од 100 mm/min са 1 и брзина 200 mm/min са 2. У табели 8.4 приказани су резултати испитивања, кодирани заменом $x^* = x - 37,84$.

Табела 8.4 Резултати испитивања

Температура	Брзина А			SB
	0	1	2	
0	-3,53	-3,16	-2,59	-9,28
1	1,07	0	-0,2	0,87
2	0,04	1,63	1,27	2,94
SA	-2,42	-1,53	-1,52	OS = -5,47

Сума за сваки ниво фактора износи:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}, \quad (8.1)$$

па ће општа сума бити:

$$OS = S_1 + S_2 + \dots + S_j + \dots + S_k = \sum_{j=1}^k S_j. \quad (8.2)$$

Израчунавање опште суме квадрата се може упростити увођењем помоћних величина A и K које се рачунају помоћу израза:

$$A = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{j=1}^k x_{ij}^2, \quad (8.3)$$

$$K = \frac{(OS)^2}{N}, \quad (8.4)$$

док је општа сума квадрата једнака:

$$OSK = A - K. \quad (8.5)$$

Општа сума квадрата

$$OSK = (-3,53)^2 + (-3,16)^2 + (-2,59)^2 + 1,07^2 + 0^2 + (-0,2)^2 + 0,04^2 + 1,63^2 + 1,27^2 - \frac{(-5,47)^2}{1 \cdot 3 \cdot 3} = 31,2864$$

Поједине суме квадрата се рачунају на основу израза:

$$SKA = \sum_{i=1}^a \frac{SA^2}{nb} - \frac{OS^2}{nab}, \quad (8.6)$$

$$SKB = \sum_{j=1}^b \frac{SB^2}{na} - \frac{OS^2}{nab}, \quad (8.7)$$

$$SKAB = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{SAB^2}{n} - \sum_{i=1}^a \frac{SA^2}{nb} - \sum_{j=1}^b \frac{SB^2}{na} + \frac{OS^2}{nab}, \quad (8.8)$$

где је:

OS — општа сума,

OSK — општа сума квадрата,

SKA — сума квадрата фактора A ,

SKB — сума квадрата фактора B ,

$SKAB$ — двојно дејство (добива се одузимањем суме квадрата фактора A и суме квадрата фактора B од опште суме квадрата),

n — број поновљања на сваком нивоу фактора,

a – број нивоа фактора A и

b – број нивоа фактора B .

Поједине суме квадрата на основу експерименталних резултата

$$SKA = \frac{(-2,42)^2 + (-1,53)^2 + (-1,52)^2}{3} - \frac{(-5,47)^2}{1 \cdot 3 \cdot 3} = 0,17806$$

$$SKB = \frac{(-9,28)^2 + (0,87)^2 + (2,94)^2}{3} - \frac{(-5,47)^2}{1 \cdot 3 \cdot 3} = 28,4497$$

$$SKAB = 31,2864 - 0,17806 - 28,4497 = 2,6593$$

Обрада резултата приказана је у табелама 8.5 и 8.6.

Табела 8.5 Приказ резултата суме квадрата и средњег квадрата

Избор промене	Степен слобде	Сума квадрата	Средњи квадрат	v_0	c
					за $V = 95\%$
A	2	0,17806	0,0893	0,1343	6,94
B	2	28,4497	14,2248	21,397	6,94
AB	4	2,6593	0,6648		
S	8	31,2864			

Добијено је да је $v_0 = 21,397 > 6,94$ на основу чега се може закључити на основу дисперзионе анализе да највећи утицај на затезну чврстоћу има температура, док брзина нема утицаја. Добијени резултат задовољава и вероватноћу од $V = 99\%$ за коју је $c = 18$. Даље истраживање би могло да се спроведе са једнофакторним експериментом.

Табела 8.6 Шема коефицијената

Фактори	Комбинације услова									$\sum c_{mj}^2$
	00	01	02	10	11	12	20	21	22	
A_l	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	6
A_{kv}	1	1	1	-2	-2	-2	1	1	1	18
B_l	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	6
B_{kv}	1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1	18
$A_l B_l$	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1	4
$A_l B_{kv}$	-1	2	-1	0	0	0	1	-2	1	12
$A_{kv} B_l$	-1	0	1	2	0	-2	-1	0	1	12
$A_{kv} B_{kv}$	1	-2	1	-2	4	-2	1	-2	1	36
Резултати	-3,53	1,07	0,04	-3,16	0	1,63	-2,59	-0,2	1,27	-5,47

У табели 8.6 коришћене ознаке у првој колони табеле за факторе имају следеће значење:

A_l – линеарни ефекат фактора A ,

A_{kv} – квадратни ефекат фактора A ,

B_l – линеарни ефекат фактора B ,

B_{kv} – квадратни ефекат фактора B ,

$A_l B_l$ – линеарно узајамно дејство фактора A и B ,

$A_l B_{kv}$ – узајамно дејство линеарног ефекта фактора A и квадратног ефекта фактора B ,

$A_{kv} B_l$ – узајамно дејство квадратног ефекта фактора A и линеарног ефекта фактора B и

$A_{kv} B_{kv}$ – узајамно дејство квадратног ефекта фактора A и квадратног ефекта фактора B .

При одређивању компоненти међудејства могуће је начинити разне комбинације:

$$\begin{aligned} & \text{lin } A \times \text{lin } B, \\ & \text{lin } A \times kv B, \\ & kv A \times \text{lin } B, \\ & kv A \times kv B, \text{ итд.} \end{aligned}$$

За одређивање компоненти линеарног и квадратног дејства треба све вредности из табеле 8.6 помножити са одговарајућим коефицијентима.

Линеарни и квадратни ефекат фактора A

$$\begin{aligned} A_l &= -3,53 \cdot (-1) + 1,07 \cdot (-1) + 0,04 \cdot (-1) + (-3,16) \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 1,63 \cdot 0 + (-2,59) \\ &\quad \cdot 1 + (-0,2) \cdot 1 + 1,27 \cdot 1 = 0,9 \\ A_{kv} &= -3,53 \cdot (1) + 1,07 \cdot 1 + 0,04 \cdot 1 + (-3,16) \cdot (-2) + 0 \cdot (-2) + 1,63 \cdot (-2) \\ &\quad + (-2,59) \cdot 1 + (-0,2) \cdot 1 + 1,27 \cdot 1 = -0,88 \end{aligned}$$

Линеарни и квадратни ефекат фактора B

$$\begin{aligned} B_l &= -3,53 \cdot (-1) + 1,07 \cdot 0 + 0,04 \cdot 1 + (-3,16) \cdot (-1) + 0 \cdot 0 + 1,63 \cdot 1 + (-2,59) \\ &\quad \cdot (-1) + (-0,2) \cdot 1 + 1,27 \cdot 1 = 12,22 \\ B_{kv} &= -3,53 \cdot 1 + 1,07 \cdot (-1) + 0,04 \cdot 1 + (-3,16) \cdot 0 + 0 \cdot (-2) + 1,63 \cdot 1 + (-2,59) \cdot 1 \\ &\quad + (-0,2) \cdot (-2) + 1,27 \cdot 1 = -8,08 \end{aligned}$$

Комбинације узајамног дејства фактора A и B

$$\begin{aligned} A_l B_l &= -3,53 \cdot 1 + 1,07 \cdot 0 + 0,04 \cdot (-1) + (-3,16) \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 1,63 \cdot 0 + (-2,59) \\ &\quad \cdot (-1) + (-0,2) \cdot 0 + 1,27 \cdot 1 = 0,29 \\ A_l B_{kv} &= -3,53 \cdot (-1) + 1,07 \cdot 2 + 0,04 \cdot (-1) + (-3,16) \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 1,63 \cdot 0 + (-2,59) \\ &\quad \cdot 1 + (-0,2) \cdot (-2) + 1,27 \cdot 1 = 4,71 \\ A_{kv} B_l &= -3,53 \cdot (-1) + 1,07 \cdot 0 + 0,04 \cdot 1 + (-3,16) \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 1,63 \cdot (-2) + (-2,59) \\ &\quad \cdot (-1) + (-0,2) \cdot 0 + 1,27 \cdot 1 = -2,15 \\ A_{kv} B_{kv} &= -3,53 \cdot 1 + 1,07 \cdot (-2) + 0,04 \cdot (1) + (-3,16) \cdot (-2) + 0 \cdot 4 + 1,63 \cdot (-2) \\ &\quad + (-2,59) \cdot 1 + (-0,2) \cdot (-2) + 1,27 \cdot 1 = -3,49 \end{aligned}$$

Средњи квадрати линеарног и квадратног ефекта фактора A се рачунају на основу образаца:

$$SKA_l = \frac{A_l^2}{\sum c_{mj}^2}, \quad (8.9)$$

$$SKA_{kv} = \frac{A_{kv}^2}{\sum c_{mj}^2}. \quad (8.10)$$

Средњи линеарни и квадратни ефекти фактора A

$$SKA_l = \frac{0,9^2}{6} = 0,135$$

$$SKA_{kv} = \frac{(-0,88)^2}{18} = 0,043$$

Средњи квадрати линеарног и квадратног ефекта фактора B се рачунају на основу образаца:

$$SKB_l = \frac{B_l^2}{\sum c_{mj}^2}, \quad (8.11)$$

$$SKB_{kv} = \frac{B_{kv}^2}{\sum c_{mj}^2}. \quad (8.12)$$

Средњи линеарни и квадратни ефекти фактора B

$$SKB_l = \frac{12,22^2}{6} = 24,88$$

$$SKB_{kv} = \frac{(-8,08)^2}{18} = 3,627$$

Средњи квадрати комбинација линеарних и квадратних вредности фактора A и B се рачунају на основу образаца:

$$SKA_l B_l = \frac{A_l B_l^2}{\sum c_{mj}^2}, \quad (8.13)$$

$$SKA_l B_{kv} = \frac{A_l B_{kv}^2}{\sum c_{mj}^2}, \quad (8.14)$$

$$SKA_{kv} B_l = \frac{A_{kv} B_l^2}{\sum c_{mj}^2}, \quad (8.15)$$

$$SKA_{kv} B_{kv} = \frac{A_{kv} B_{kv}^2}{\sum c_{mj}^2}. \quad (8.16)$$

Средњи квадрати комбинација линеарних и квадратних вредности фактора A и B

$$SKA_l B_l = \frac{0,29^2}{4} = 0,021$$

$$SKA_l B_{kv} = \frac{4,71^2}{12} = 1,8486$$

$$SKA_{kv} B_l = \frac{(-2,15)^2}{12} = 0,3852$$

$$SKA_{kv} B_{kv} = \frac{(-3,49)^2}{36} = 0,021$$

Дисперзиона анализа дата је у табели 8.7.

Табела 8.7 Приказ резултата дисперзионе анализе

Извор промена		Степен слободе		Сума квадрата	Средњи квадрати	v_0	c
A		2		0,17806		0,1343	6,94
	A_l		1		0,135		
	A_{kv}		1		0,043		
B		2		28,4497		21,397	6,94
	B_l		1		24,88		
	B_{kv}		1		3,627		
AB		4		2,6593			
	$A_l B_l$		1		0,021		
	$A_l B_{kv}$		1		1,8486		
	$A_{kv} B_l$		1		0,3852		
	$A_{kv} B_{kv}$		1		0,3383		
Сума		8		31,2864			

На основу добијених резултата испитивања и статистичке обраде података, дисперзионом анализом, долази се до закључка да значајан утицај има само температура, док брзина испитивања веома мало утиче на ова експериментална испитивања.

9. ЗАКЉУЧАК

Полимерни материјали су значајни технички материјали. Имају широк опсег својстава, од којих многа не поседује било који други материјал и у већини случајева су релативно јефтини. Коришћење пластика за техничке конструкције пружа многе предности које обухватају смањење броја делова путем конструкције са полимерним материјалима, смањењем броја завршних операција, упрошћавањем монтаже, уштеду на маси, смањивање буке, и у неким случајевима изостављање потребе за подмазивањем. Полимерни материјали су такође веома корисни за многе електричне конструкције, углавном због одличних изолационих својстава.

Количина полимерних материјала који се користе у индустрији знатно расте у последњим годинама. Дobar пример повећаног индустријског коришћења пластика је производња аутомобила. Због својих многих изузетних и различитих својстава полимерни материјали све више замењују делове који су израђени од метала. Ова замена метала полимерним материјалима могућа је захваљујући предностима полимерних материјалима као што су: висока специфична чврстоћа, велике конструктивне и производне могућности, широк избор боја, прозрачност и на крају релативно ниска цена.

Експериментални рад изискује одређене издатке за материјал који се троши, израду објекта, набавку инструмената, утрошак енергије и велики број часова рада. Задатак је да се уз минималне трошкове добије што више поузданих информација.

На основу спроведених испитивања и добијених резултата може се закључити да на пропадање кошева израђених од полиетилена високе густине највише утиче температура, јер при њој постају кртији, док брзина кидања не представља значајан фактор када се врши испитивање на сниженим температурама.

Мада ако се узме у обзир да кошеви у замрзивачу поред ниских температура трпе и велика оптерећења и ако се разматра да они нису стално изложени при тој температури на пример када замрзивач не ради. Даља истраживања би могла да се спроведу управо из тих разлога. Епрувете се могу прво хладити на температуру на којој ради замрзивач одређени временски период, затим их изложити собној температури и овај процес поновити неколико пута како би се добили реалнији резултати. Након овог процеса епрувете се могу испитивати на затезање и упоредити са резултатима добијеним овим експериментом.

Статистичка обрада резултата је могла да се одради и са једнофакторним експериментом јер се закључило да температура има већи утицај од брзине. Резултати

експеримента могу се приказати дијаграмски за једну брзину на различитим температурама.

При извођењу ових испитивања дошло је до проблема приликом мерења температуре епрувете постављеној у чељустима кидалице, помоћу уређаја за безконтактно мерење температуре СТ8855. Уређај није могао измерити температуру јер је ласер пролазио кроз епрувету због прозирности полиетилена. Тако да се термометром мерила температура ацетона у кадици и узимала се мања температура од измерене за 10°C, због загревања епрувете приликом преношења и постављања у чељуст кидалице.

Што се тиче саме израде епрувете, кроз ова испитивања дошло се до закључка да постоји разлика између првих бризганих епрувета и последњих у механичким својствима. Могући узрок овог проблема је сама машина за бризгање због постојања могућности за неусклађеност између температуре бризгања и потребног притиска бризгања епрувете. Због овог могућег проблема за даља истрживања и анализу могуће је применити ФМЕА анализу на машину која бризга епрувете и на тај начин се открио проблем неисправног процеса бризгања.

Такође се закључује приликом испитивања на затезање да је на свим испитиваним епруветама долазило до лома на страни епрувете која је ближа уливном језгру. Претпоставља се да је разлог томе само хлађење епрувете приликом израде јер је на том делу калупа спорије хлађење.

Недостатак приликом ових испитивања је тај што кидалица на којој се вршило испитивање не поседује комору у коју би се вршило хлађење епрувета на тачно сниженој температури, а самим тим би добијени резултати били тачнији и поузданији.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Barjanac D., Nauka o čvrstoći, Zagreb, 1966.
- [2] Polietilen, <http://www.top-plast.rs/pe.html>, preuzeto marta 2013.
- [3] Polimerni materijali, <http://www.prozorivrata.com/materijali/polimeri>, preuzeto februara 2013.
- [4] Група аутора, Инжењерско технички приручник, 6. Књига, Рад, Београд, 1971.
- [5] Адамовић Д., Полимерни материјали, Предавање, Машински факултет, Крагујевац, 2009.
- [6] Историјат техничких материјала, <http://www.znrfak.ni.ac.rs/>, Универзитет у Нишу, Факултет заштите на раду, preuzeto marta 2012.
- [7] Eles-Ljubić V., Akrapović I., Termoplastične mase, Ljubljana, 1971.
- [8] Provodna plastika elektroprovodni polimeri, Tehnološki-metalurški fakultet Beograd, <http://www.saznajkako.rs/index.php/nauna-dostignua/64-qprovodna-plastikaq-elektroprovodni-polimeri>, preuzeto februara 2013.
- [9] Недић Б., Ђукић В., Пластичне масе, Машински факултет, Крагујевац 2004.
- [10] Ćatić I., Proizvodnja polimernih tvorevina, Biblioteka polimerstvo-serija zelena, Zagreb, 2006.
- [11] Polimerni materijali, <http://www.gradst.hr/Portals/9/docs/katedre/Gradjevinski%20materijali/web/POLIMERNI%20%20MATERIJALI.pdf>, preuzeto februara 2013.
- [12] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н., Машински материјали, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [13] Polietilen, <http://magnahim.com/node/220>, preuzeto marta 2013.
- [14] Polimeri, <http://www.hip-petrohemija.com/prodaja/polimeri.67.html>, preuzeto marta 2013.
- [15] Polietilen, <http://www.petreciklaza.com/Sta-je-PE-polietilen-od-koga-se-pravi-plasticna-ambalaza-47.html>, preuzeto marta 2013.
- [16] Polimerni materijali, <http://www.ffri.uniri.hr/~zvonomir/Materijali/07Polimeri.pdf>, preuzeto februara 2013.
- [17] Jović A., Mehaničke osobine termoplastičnih masa, Универзитет у Зеници Машињски факултет, Zenica, 2008.
- [18] Polietilen, <http://www.plastikainfo.com/tehnologija/vrste-polietilena-polyethylene-pe>, preuzeto marta 2013.
- [19] Minić L., Diplomski rad, Utjecaj ekstrudiranja toplinske karakteristike polietilena visoke gustoće, Sveučilište u Splitu Hemijsko-Tehnološki fakultet, Split, 2010.
- [20] Ковачић Т., Структура и својства полимера, Свеучилиште у Сплиту, Split 2010.
- [21] Ђорђевић В., Машински материјали, Први део, Машински факултет, Београд, 2000.

- [22] Вежбе из предмета Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2008/2009.
- [23] Пантелић И., Увод у теорију инжењерског експеримента, Раднички универзитет Радивој Ћирпанов, Нови Сад, 1976.
- [24] ISO 527-1, *Plastics - Determination of tensile properties*, Part 1: General principles, 1996.
- [25] ISO 527-2, *Plastics - Determination of tensile properties*, Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, 1996.
- [26] Hostalen GC 7260, <http://www.ides.com/>, preuzeto april 2013.