

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
DEPARTMAN ZA GRAFIČKO  
INŽENJERSTVO I DIZAJN



*Saša Petrović*

# KARAKTERIZACIJA KOMPOZITNIH NOSIOCA FLEKSO ŠTAMPARSKIH FORMI I NJIHOV UTICAJ NA KVALITET ŠTAMPE KARTONSKE AMBALAŽE

*Doktorska disertacija*

*Novi Sad, 2020*



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
DEPARTMAN ZA GRAFIČKO INŽENJERSTVO I DIZAJN



Saša Petrović

# Karakterizacija kompozitnih nosioca flekso štamparskih formi i njihov uticaj na kvalitet štampe kartonske ambalaže

- doktorska disertacija-

Novi Sad, 2020

Istraživanja realizovana u okviru disertacije su podržana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekat broj 451-03-68/2020-14/200156: "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a"

*"Ništa nije nemoguće za onoga ko ima volju pokušati."*

*Aleksandar Veliki*



## Zahvalnica

*Posebnu zahvalnost upućujem mentoru rada vanrednom profesoru dr Nemanji Kašikoviću na razumevanju, ukazanom poverenju, podršci u radu, korisnim savetima, zalaganju i veri u mene i moje ideje. Zahvaljujem se redovnom profesoru dr Dragoljubu Novakoviću, direktoru Departmana za grafičko inženjerstvo i dizajn, na podršci, zalaganju, savetima i usmeravanju moje karijere. Hvala i ostalim kolegama sa departmana na razumevanju, pomoći i prijateljstvu.*

*Veliku zahvalnost dugujem kompaniji Tetra Pak, njihovim fabrikama, razvojnim centrima i zaposlenima u Gornjem Milanovcu, Rubieri, Modeni, Lundu i Budaoršu koji su omogućili realizaciju najvećeg dela eksperimentalnog segmenta doktorske disertacije. Veliko hvala i kompanijama Tipoplastika d.o.o. (Gornji Milanovac), Spektar d.o.o. (Gornji Milanovac), Felix Böttcher GmbH & Co. KG (Keln) i Pre-Print d.o.o. (Novi Sad) na savetima i omogućavanju izvođenja dela merenja obuhvaćenih istraživanjem.*

*Hvala Boru Nedeljkoviću koji me je upoznao sa lepotama i izazovima flekso štampe i uvek bio dostupan i raspoložen za saradnju i deljenje stručnih i praktičnih saveta u mom radu i istraživanjima od samog početka studija.*

*Zahvaljujem se prijateljima koji su bili uz mene, uvek spremni da pomognu.*

*Posebnu zahvalnost dugujem porodici i Sandri koji su moja najveća podrška, oslonac i motivacija u svakom segmentu života. Ova disertacija je posvećena vama.*

Saša Petrović

## IZJAVA

*Ja, Saša Petrović, izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da ova doktorska disertacija predstavlja isključivo rezultate mog rada u saradnji sa mentorom, kao i da se temelji na mojim naučno-stručnim saznanjima i istraživanjima, oslanjajući se na navedenu literaturu.*

*Izjavljujem da nijedan deo ove doktorske disertacije nije napisan na neetičan i nedozvoljen način, koji bi bio u suprotnosti sa akademskom moralnošću, preuzimanjem ili prepisivanjem dela bilo kog necitiranog izvora, tuđih dela ili rezultata.*

*Autorska prava su utvrđena zakonom i opštim aktima.*

*Izjavljujem da su štampana i elektronska verzija doktorske disertacije istovetne, kao i da sam saglasan da se ova doktorska disertacija može staviti na trajni uvid u elektronskom obliku.*

---

*Potpis kandidata*



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Саша Петровић
Ментор, <b>МН:</b>	Ванр. проф. др Немања Кашиковић
Наслов рада, <b>НР:</b>	Карактеризација композитних носиоца флексо штампарских форми и њихов утицај на квалитет штампе картонске амбалаже
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	А.П, Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2020
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	11/202/432/34/47/99/0
Научна област, <b>НО:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Графичко инжењерство и дизајн
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Флексографија, слив носиоци, експлоатација, карактеризација, механичка својства, адхезивна својства, квалитет штампе, процесни параметри
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији је извршена карактеризација слив носиоца флексо штампарских форми и представљена су истраживања утицаја промене механичких и адхезивних својстава сливова на параметре квалитета штампе картонске амбалаже. Коришћене су две групе самолепљивих сливова (потпуно нови и сливови коришћени за штампу 5.000.000 м материјала). Циљеви истраживања су повећање предвидивости и константности квалитета штампаног производа и процеса производње картонске амбалаже, формирање препорука за употребу сливова различитих својстава и нивоа експлоатисаности и откривање у којим фазама и којим процесима долази до промена својстава сливова.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Др Драгољуб Новаковић, редовни професор
	Члан: Др Гојко Владић, ванредни професор
	Члан: Др Живко Павловић, ванредни професор
	Члан: Др Игор Мајнарић, ванредни професор
	Члан, ментор: Др Немања Кашиковић, ванредни професор
	Потпис ментора



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic Publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual material, printed
Contents code, <b>CC</b> :	Ph.D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Saša Petrović
Mentor, <b>MN</b> :	Assoc. Prof. Ph.D. Nemanja Kašiković
Title, <b>TI</b> :	Characterization of composite flexographic printing plate carriers and their influence on cardboard packaging print quality
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	A.P. Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2020
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	11/202/432/34/47/99/0
Scientific field, <b>SF</b> :	Graphic engineering and design
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Graphic engineering and design
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Flexography, sleeves, exploitation, characterization, mechanical properties, adhesive properties, print quality, process parameters
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	Research presented in this dissertation includes characterization of flexographic sleeves and the study of the influence of the changes in mechanical and adhesive properties of the sleeves on print quality parameters of the cardboard packaging. Two groups of self-adhesive sleeves were used (entirely new and sleeves used for printing of 5.000.000 m of material). Aims of the research are the increase in predictability and stability of the printed product quality and the production process of cardboard packaging, forming of the recommendations for the use of sleeves with different properties and levels of exploitation, as well as defining the phases and processes responsible for the changes in sleeve properties.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: Dragoljub Novaković, Ph.D. Full Professor
	Member: Gojko Vladić, Ph.D. Associate Professor
	Member: Živko Pavlović, Ph.D. Associate Professor
	Member: Igor Majnarić, Ph.D. Associate Professor
	Member, Mentor: Nemanja Kašiković, Ph.D. Associate Professor
	Mentor's sign

## Rezime

Fleksografija je tehnika štampe koja je, kao i sve tehnike štampe, zavisna od mnoštva parametara koji definišu proces i kvalitet krajnjeg proizvoda štampe. Pored toga, razvoj tehnologije doprinosi konstantnom porastu kvaliteta i produktivnosti fleksografije. Sa napretkom tehnologije javlja se i potreba za karakterizacijom komponenata procesa koje se javljaju u novim ili modifikovanim oblicima, pogotovu ako ni u prethodnim iteracijama nisu temeljno istražene.

Jedan od promenljivih parametara fleksografske štampe koji doživljavaju rapidan razvoj su i materijali za montažu štamparskih formi na slivove, kao i sami slivovi, pa se tako za sadašnji vrhunac tehnologije u oblasti slivova za fleksografiju smatraju tzv. Twinlock® slivovi.

U dosadašnjim istraživanjima praćene su promene većine parametara fleksografske štampe i vršena je kontrola parametara kvaliteta štampanog otiska. Međutim, parametri kvaliteta slivova nisu praćeni, niti su promene tih parametara dovođene u korelaciju sa kvalitetom krajnjeg proizvoda. Prethodno navedene činjenice ukazuju na potrebu za karakterizacijom slivova i praćenjem njihovih promena i uticaja promena na kvalitet krajnjeg proizvoda.

Na osnovu prethodnih zapažanja, kao glavni cilj istraživanja nameće se pronalaženje parametara putem kojih se blagovremeno, nedestruktivnim metodama može ustanoviti da li je sliv pogodan za upotrebu ili ga je potrebno reparirati. Očekivano je da dobijeni rezultati budu primenljivi i u praksi na industrijskom nivou proizvodnje, tokom procesne kontrole kvaliteta, kroz merenja standardnim uređajima na standardnim kontrolnim poljima.

Slivove je moguće okarakterisati pomoću više pojmova koji direktno utiču na njihova svojstva i kvalitet procesa i krajnjeg proizvoda. Najbitniji pojmovi su kompresibilni sloj i njegova mehanička svojstva, a u slučaju Twinlock® slivova i svojstva adhezije samolepljivog sloja. U području mehaničkih promena poroznog, kompresibilnog poliuretanskog sloja, glavni uzročnik je sam proces štampe gde slivovi trpe najveća opterećenja i ispoljeni su dejstvima komponenata iz različitih izvora. Mehaničke promene se u užem smislu odnose na promene kompresibilnosti, rezilijentnosti, tvrdoće, kao i na gubitke energije kroz zagrevanje. Kod promena u adheziji, koje su izrazito značajne u slučaju samolepljivog sloja Twinlock® slivova, kao glavni uzročnik se javlja proces montaže/demontaže flekso štamparskih formi tokom kog može doći do promene sastava samolepljivog sloja.

Sve prethodno spomenute vrste promena u određenoj meri mogu negativno da deluju na predvidivost i stabilnost procesa štampe, dok na kvalitet krajnjeg proizvoda mogu da deluju i negativno i pozitivno u zavisnosti od posmatranog parametra. Uticaj na stabilnost procesa štampe se može ispoljiti kroz pojavu kratkih zastoja, trajnih oštećenja flekso štamparskih formi ili promene temperature i viskoziteta štamparskih boja. Sa druge strane, kvalitet proizvoda može da pretrpi promene kroz porast tonskih vrednosti, optičku gustinu, uniformnost štampane površine, prenos boje (preklapanje), razliku u boji, izduženje rasterske tačke, efekat prstenaste rasterske tačke, njen prečnik i krzavost njenih ivica.

Istraživanjem je izvršena karakterizacija promena svih prethodno spomenutih mehaničkih, adhezivnih i parametara kvaliteta otiska i pronađeni su njihovi glavni uzročnici. Dovođenjem rezultata karakterizacije promena svojstava slivova i parametara kvaliteta otiska u korelaciju pronađeni su najpouzdaniji parametri i opisani su trendovi i vrednosti njihovih promena na osnovu kojih je moguće nedestruktivnim metodama ustanoviti stanje slivova. Pored toga, dobijeni rezultati pomažu prilikom odabira adekvatnih slivova prema tipu i nivou eksploataisanosti u odnosu na zahteve štampe definisane tipom dominantnog štampanog motiva.

**Ključne reči:** fleksografija, sliv nosioci, eksploatacija, karakterizacija, mehanička svojstva, adhezivna svojstva, kvalitet štampe, procesni parametri

## Abstract

Flexography is a printing technique which is, like all the other printing techniques, dependant on the variety of parameters defining the process and the quality of the printed product. Apart from that, the development of technology is continuously contributing to the growth in quality and the productivity of flexography. Following the development of the technology is a need for characterization of the new or modified components of the process, especially if they are not thoroughly investigated in their previous iterations.

One of the variable parameters of flexography experiencing rapid development are the materials for mounting the plates on the sleeves, and the sleeves themselves. The sleeve technology currently being considered as the "cutting edge" bears the name Twinlock® sleeves.

Changes in most of the flexographic printing parameters, as well as the print quality, have been monitored in the scientific research conducted so far. However, the sleeve quality parameters have not been previously monitored, and neither were their changes brought into correlation with the quality of the printed product. The above facts point to the need for characterization of sleeves and monitoring their changes and the impact of the changes on the quality of the printed product.

Based on previous observations, the main objective of the research is to find parameters which can be used in the non-destructive method for determination of the sleeve condition. The results are expected to be applicable in practice at the industrial level, during the process quality control through measurements by standard devices on standard control patches.

Sleeves can be characterized by a number of terms directly affecting their properties and the quality of the process and the end product. The most important ones are the compressible layer and its mechanical properties, and in the case of Twinlock® sleeves, the adhesive layer and its adhesive properties. The main cause of the changes in the mechanical properties of the, compressible polyurethane layer lies in the printing process, where the sleeves suffer the greatest stress and are exposed to the influence of various components from different sources. Mechanical changes relate to changes in compressibility, resilience, hardness, as well as the loss of energy through heat generation. The leading cause for the changes in adhesion properties, which are particularly significant in the case of the Twinlock® sleeve adhesive layer, lies in the mounting process of flexo printing forms, during which the composition of the adhesive layer may change.

All the above-mentioned changes can have a negative effect on the predictability and stability of the printing process. At the same time, the quality of the end product can be affected negatively or positively, depending on the parameter being observed. The impact on the stability of the printing process can be manifested through the occurrence of short-stops, permanent damage to printing forms, or changes in the temperature and viscosity of inks. On the other hand, product quality can undergo changes through tonal value increase, optical density, print uniformity, trapping, colour difference, slur, dot void, dot diameter and edge factor.

Characterization of changes of the previously mentioned mechanical, adhesion and print quality parameters was carried out through the research. Apart from that, the main causes were found for all of the changes. Bringing the results of the characterization of the changes of sleeve properties and print quality parameters into correlation enabled defining of the most reliable parameters and the trends and values of their changes, on the basis of which it is possible to establish the condition of the sleeves through non-destructive methods. In addition, the obtained results help in selecting adequate sleeves according to the type and level of exploitation, in relation to the printing requirements defined by the type of dominant printed motif.

**Keywords:** flexography, sleeves, exploitation, characterization, mechanical properties, adhesive properties, print quality, process parameters

## Spisak slika i grafika

Slika 2.1.1:	Osnovni elementi i princip rada fleksa štampe .....	4
Slika 2.2.1:	Poravnavanje štamparske forme na stolu i njeno prebacivanje i lepljenje na cilindar .....	6
Slika 2.2.2:	Poravnavanje štamparske forme pomoću pinova pre lepljenja na cilindar .....	7
Slika 2.4.1:	Princip funkcionisanja kompresibilnog sloja sliva pod pritiskom [FlintGroup, 2014a] .....	12
Slika 2.4.2:	Skica poprečnog preseka Twinlock® Medium sliva i uvećan prikaz unutrašnjosti kompresibilnog sloja [tesa, 2018] .....	13
Slika 2.4.3:	Vreme amortizacije Twinlock® slivova u zavisnosti od učestalosti upotrebe [Polymount International BV, 2009] .....	14
Grafik 2.5.1:	Prognoza proizvodnje poliuretana na svetskom nivou do 2020. godine [GVR, 2015] .....	16
Grafik 2.5.2:	Karakteristična kriva napon-deformacija poliuretanske pene niske gustine [Liu et al., 2019] .....	21
Grafik 2.5.3:	Zavisnost rasta deformacije pod konstantnim naponom i vremena [Molded Dimensions, LLC, 2019] .....	22
Grafik 2.5.4:	Ekperimentalno određivanje parametara gubitka energije za ciklus kompresije pri konstantnoj brzini deformacije [Hilyard, 1994] .....	23
Grafik 2.5.5:	Krive napon-deformacija JC pena različitih gustina (80, 90, 100 i 120) pri konstantnoj brzini deformacije [de Vries, 2009] .....	24
Slika 2.5.1:	Mikroskopski snimak pene sa a) otvorenim; b) zatvorenim ćelijama [Alzoubi, Al-Hallaj i Abu-Ayyad, 2014] .....	25
Slika 2.5.2:	Mikroskopski snimak ćelija a) nove; b) 30 godina stare pene [Lu, Neidig i Wyatt, 2016] .....	28
Slika 2.5.3:	Savijanje zidova ćelijskih elemenata paralelnih pravcu dejstva vektora sile .....	29
Slika 2.5.4:	Šematski prikaz deformacije ćelija usled a) elastičnog izvijanja; b) plastičnog urušavanja; c) krhkosti [Koohbor, Ravindran i Kidane, 2018] .....	29
Grafik 2.5.6:	Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih različitim nivoima maksimalne deformacije [Qi i Boyce, 2005] .....	35
Grafik 2.5.7:	Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih različitim brzinama deformacije [Qi i Boyce, 2005] .....	36
Grafik 2.5.8:	Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih cikličnim deformacijama $N =$ broj ciklusa [Qi i Boyce, 2005] .....	36

Grafik 2.5.9:	<i>Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih cikličnim deformacijama do različitih maksimalnih vrednosti deformacije – N = broj ciklusa [Qi i Boyce, 2005]</i> .....	37
Slika 2.6.1:	<i>Opšta hemijska struktura fitalata – R<sub>1</sub> i R<sub>2</sub> su C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub> za n = 4-15</i> .....	41
Grafik 2.6.1:	<i>Promena sile ljuštenja u odnosu na vreme trajanja testa (povećavanje pomeraja) [Stable Micro Systems, n.d.]</i> .....	44
Slika 2.7.1:	<i>Optička gustina i njena zavisnost od promene debljine sloja boje (m=1 i D<sub>∞</sub>=1.5)</i> .....	46
Slika 2.7.2:	<i>CIE L* a* b* prostor boja</i> .....	47
Slika 2.7.3:	<i>Istezanje rasterske tačke i nakupljanje boje na bočnim zidovima štampajućih elemenata [Flexo Expert, 2019]</i> .....	54
Slika 5.2.1:	<i>Skica preseka CLC/C papira i njegovi slojevi</i> .....	72
Slika 5.2.2:	<i>CDI Spark 4260 [Esko, 2013]</i> .....	73
Slika 5.2.3:	<i>Vianord EVO 4E [Vianord, 2015a]</i> .....	74
Slika 5.2.4:	<i>Vianord EVO 4IP [Vianord, 2015b]</i> .....	74
Slika 5.2.5:	<i>Vianord EVO 4DLF [Vianord, 2015c]</i> .....	75
Slika 5.2.6:	<i>VT Flex 175 ES mašina za štampu</i> .....	76
Slika 5.2.7:	<i>Aristomat SL 1317</i> .....	76
Slika 5.2.8:	<i>Leica RM2255 automatski rotacioni mikrotom [Leica, 2019]</i> .....	77
Slika 5.2.9:	<i>Univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX (Shimadzu Corporation, 2018)</i> .....	78
Slika 5.2.10:	<i>Univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala Zwick Roell zwickiLine 5kN [Zwick Roell, 2019]</i> .....	79
Slika 5.2.11:	<i>Agilent 6890 GC pećnica spojena sa 5975-N maseno selektivnim detektorom [Agilent, 2006]</i> .....	79
Slika 5.2.12:	<i>Olympus BX51 mikroskop [Olympus, 2004]</i> .....	80
Slika 5.2.13:	<i>Olympus XC50 kamera [Olympus, 2020]</i> .....	81
Slika 5.2.14:	<i>Sauter AGDA-100 digitalni durometar [Sauter GmbH, 2015]</i> .....	81
Slika 5.2.15:	<i>x-rite eXact spektrofotometar [x-rite, 2014]</i> .....	82
Slika 5.2.16:	<i>FAG Flex3Pro uređaj [FAG, 2019]</i> .....	82
Slika 5.2.17:	<i>Dizajn test karte za prvu fazu eksperimenta</i> .....	85
Slika 5.2.18:	<i>Sistem za identifikaciju promenljivih</i> .....	85
Slika 5.2.19:	<i>Dizajn test karte za treću fazu eksperimenta</i> .....	86
Slika 5.2.20:	<i>Štamparske forme montirane na smicanje</i> .....	88
Slika 5.2.21:	<i>Snimak rasterskih tačaka polja od 5% TV za a) cijan; b) magenta boju</i> .....	92



<i>Slika 5.2.22:</i>	<i>Postavka uzorka u uređaju tokom testova pri cikličnim kompresivnim opterećenjima.....</i>	<i>93</i>
<i>Slika 5.2.23:</i>	<i>Postavka uzorka u uređaju tokom testa probijanja iglom.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 5.2.24:</i>	<i>Postavka uzorka u uređaju tokom testa odlepljivanja ljuštenjem.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 6.1:</i>	<i>Algoritam izvođenja eksperimenta.....</i>	<i>96</i>
<i>Grafik 6.1.1:</i>	<i>Uporedni prikaz intenziteta uticaja parametara dužine štampe, tipa slivova i boje na porast tonskih vrednosti na polju od 4.3 % TV.....</i>	<i>97</i>
<i>Grafik 6.1.2:</i>	<i>Prikaz kombinovanog uticaj tipa sliva i dužine štampe na porast tonskih vrednosti na polju od 4.3 % TV.....</i>	<i>98</i>
<i>Grafik 6.1.3:</i>	<i>Uporedni prikaz intenziteta uticaja parametara dužine štampe, tipa slivova i boje na porast tonskih vrednosti na polju od 1.6 % TV.....</i>	<i>98</i>
<i>Grafik 6.1.4:</i>	<i>Tonske krive za kontrolnu tačku 1 - Crna.....</i>	<i>99</i>
<i>Grafik 6.1.5:</i>	<i>Tonske krive za kontrolnu tačku 1 - Magenta.....</i>	<i>99</i>
<i>Grafik 6.1.6:</i>	<i>Tonske krive za kontrolnu tačku 2 - Crna.....</i>	<i>100</i>
<i>Grafik 6.1.7:</i>	<i>Tonske krive za kontrolnu tačku 2 - Magenta.....</i>	<i>100</i>
<i>Grafik 6.1.8:</i>	<i>Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 1 Crna.....</i>	<i>101</i>
<i>Grafik 6.1.9:</i>	<i>Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 1 Magenta.....</i>	<i>101</i>
<i>Grafik 6.1.10:</i>	<i>Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 2 Crna.....</i>	<i>102</i>
<i>Grafik 6.1.11:</i>	<i>Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 2 Magenta.....</i>	<i>102</i>
<i>Grafik 6.2.1:</i>	<i>Promene vrednosti zaostatka deformacije tokom cikličnih opterećenja slivova.....</i>	<i>103</i>
<i>Grafik 6.2.2:</i>	<i>Promene vrednosti maksimalnog napona tokom cikličnih opterećenja slivova.....</i>	<i>104</i>
<i>Grafik 6.2.3:</i>	<i>Promene vrednosti Jungovog modula elastičnosti tokom cikličnih opterećenja slivova.....</i>	<i>105</i>
<i>Grafik 6.2.4:</i>	<i>Promene vrednosti histerezis gubitka tokom cikličnih opterećenja slivova.....</i>	<i>106</i>
<i>Grafik 6.2.5:</i>	<i>Histerezis petlje slivova tokom cikličnih opterećenja.....</i>	<i>106</i>
<i>Grafik 6.2.6:</i>	<i>Histerezis petlje slivova tokom cikličnih opterećenja uz zadržavanje deformacije.....</i>	<i>107</i>
<i>Grafik 6.2.7:</i>	<i>Promene vrednosti maksimalnog napona tokom cikličnih opterećenja slivova uz zadržavanje deformacije.....</i>	<i>107</i>
<i>Grafik 6.2.8:</i>	<i>Promene vrednosti histerezis gubitka tokom cikličnih opterećenja slivova uz zadržavanje deformacije.....</i>	<i>108</i>

Grafik 6.2.9:	<i>Kriva sila-put igle 1x sliva merena sa strane samolepljivog sloja.....</i>	<i>109</i>
Grafik 6.2.10:	<i>Kriva sila-put igle 320x sliva merena sa strane samolepljivog sloja.....</i>	<i>109</i>
Grafik 6.2.11:	<i>Kriva sila-put igle 1x sliva merena sa strane kompresibilnog sloja.....</i>	<i>110</i>
Grafik 6.2.12:	<i>Kriva sila-put igle 320x sliva merena sa strane kompresibilnog sloja.....</i>	<i>110</i>
Grafik 6.2.13:	<i>Kriva sila-pomeraj dobijena testom odlepljivanja ljuštenjem za 1x slivove.....</i>	<i>111</i>
Grafik 6.2.14:	<i>Kriva sila-pomeraj dobijena testom odlepljivanja ljuštenjem za 320x slivove.....</i>	<i>112</i>
Grafik 6.2.15:	<i>Uporedni prikaz GCMS hromatograma samolepljivog sloja 1x i 320x slivova.....</i>	<i>113</i>
Slika 6.2.1:	<i>Mikroskopski snimak poprečnog preseka Twinlock® sloja 1x slivova (100x uvećanje).....</i>	<i>114</i>
Slika 6.2.2:	<i>Mikroskopski snimak poprečnog preseka Twinlock® sloja 320x slivova (100x uvećanje).....</i>	<i>114</i>
Grafik 6.3.1:	<i>Krive porasta tonskih vrednosti uzoraka štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova.....</i>	<i>116</i>
Grafik 6.3.2:	<i>Krive porasta tonskih vrednosti uzoraka štampanih magenta bojom pomoću 1x i 320x slivova.....</i>	<i>116</i>
Grafik 6.3.3:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan.....</i>	<i>118</i>
Grafik 6.3.4:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan.....</i>	<i>118</i>
Grafik 6.3.5:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan.....</i>	<i>119</i>
Grafik 6.3.6:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan.....</i>	<i>119</i>
Grafik 6.3.7:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta.....</i>	<i>120</i>
Grafik 6.3.8:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta.....</i>	<i>120</i>
Grafik 6.3.9:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta.....</i>	<i>121</i>
Grafik 6.3.10:	<i>Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta.....</i>	<i>121</i>
Grafik 6.3.11:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi Cijan.....</i>	<i>122</i>
Grafik 6.3.12:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi Cijan.....</i>	<i>122</i>
Grafik 6.3.13:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna Cijan.....</i>	<i>123</i>
Grafik 6.3.14:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna Cijan.....</i>	<i>123</i>

Grafik 6.3.15:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi Magenta .....</i>	124
Grafik 6.3.16:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi Magenta .....</i>	124
Grafik 6.3.17:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna Magenta .....</i>	125
Grafik 6.3.18:	<i>Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna Magenta .....</i>	125
Grafik 6.3.19:	<i>Optičke gustine polja punog tona - Cijan.....</i>	126
Grafik 6.3.20:	<i>Optičke gustine polja punog tona - Magenta.....</i>	126
Grafik 6.3.21:	<i>Vrednosti preklapanja - Sekundarna plava boja.....</i>	127
Slika 6.3.1:	<i>Snimak polja sekundarne plave boje na 1. rolni štampanoj pomoću a) 1x; b) 320x slivova.....</i>	127
Slika 6.3.2:	<i>Snimak polja sekundarne plave boje na 7. rolni štampanoj pomoću a) 1x; b) 320x slivova.....</i>	128
Grafik 6.3.22:	<i>Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 1x slivovi - Cijan.....</i>	128
Grafik 6.3.23:	<i>Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Cijan.....</i>	129
Grafik 6.3.24:	<i>Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 1x slivovi - Magenta.....</i>	129
Grafik 6.3.25:	<i>Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Magenta.....</i>	130
Grafik 6.3.26:	<i>Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Cijan.....</i>	130
Grafik 6.3.27:	<i>Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Cijan.....</i>	131
Grafik 6.3.28:	<i>Poređenje vrednosti motlinga - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna Cijan.....</i>	131
Grafik 6.3.29:	<i>Poređenje vrednosti pokrivenosti - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna Cijan.....</i>	132
Grafik 6.3.30:	<i>Poređenje vrednosti ISO 13660 zrnčavosti - 1x i 320x slivovi 1. 5. i 7. rolna - Cijan .....</i>	132
Grafik 6.3.31:	<i>Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Magenta.....</i>	133
Grafik 6.3.32:	<i>Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Magenta.....</i>	133
Grafik 6.3.33:	<i>Poređenje vrednosti motlinga - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna Magenta .....</i>	134
Grafik 6.3.34:	<i>Poređenje vrednosti pokrivenosti - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna Magenta .....</i>	134
Grafik 6.3.35:	<i>Poređenje vrednosti ISO 13660 zrnčavosti - 1x i 320x slivovi 1. 5. i 7. rolna - Magenta .....</i>	135

<i>Slika 6.3.3:</i>	<i>Snimak polja punog tona cijan boje štampanog pomoću 1x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni.....</i>	<i>135</i>
<i>Slika 6.3.4:</i>	<i>Snimak polja punog tona cijan boje štampanog pomoću 320x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni.....</i>	<i>136</i>
<i>Slika 6.3.5:</i>	<i>Snimak polja punog tona magenta boje štampanog pomoću 1x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni.....</i>	<i>136</i>
<i>Slika 6.3.6:</i>	<i>Snimak polja punog tona magenta boje štampanog pomoću 320x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni.....</i>	<i>136</i>
<i>Grafik 6.3.36:</i>	<i>Poređenje efekta prstenaste rasterske tačke - 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Cijan.....</i>	<i>137</i>
<i>Grafik 6.3.37:</i>	<i>Poređenje efekta prstenaste rasterske tačke - 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Cijan.....</i>	<i>137</i>
<i>Grafik 6.3.38:</i>	<i>Poređenje efekata prstenaste rasterske tačke - 1x i 320x slivovi 1. rolna - Cijan.....</i>	<i>138</i>
<i>Grafik 6.3.39:</i>	<i>Poređenje efekata prstenaste rasterske tačke - 1x i 320x slivovi 7. rolna - Cijan.....</i>	<i>138</i>
<i>Grafik 6.3.40:</i>	<i>Vrednosti faktora istezanja rasterske tačke 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Cijan.....</i>	<i>139</i>
<i>Grafik 6.3.41:</i>	<i>Vrednosti faktora istezanja rasterske tačke 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Cijan.....</i>	<i>139</i>
<i>Grafik 6.3.42:</i>	<i>Poređenje faktora istezanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi 1. rolna - Cijan.....</i>	<i>140</i>
<i>Grafik 6.3.43:</i>	<i>Poređenje faktora istezanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi 7. rolna - Cijan.....</i>	<i>140</i>
<i>Grafik 6.3.44:</i>	<i>Vrednosti faktora istezanja rasterske tačke 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Magenta.....</i>	<i>141</i>
<i>Grafik 6.3.45:</i>	<i>Vrednosti faktora istezanja rasterske tačke 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Magenta.....</i>	<i>141</i>
<i>Grafik 6.3.46:</i>	<i>Poređenje faktora istezanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi 1. rolna - Magenta.....</i>	<i>142</i>
<i>Grafik 6.3.47:</i>	<i>Poređenje faktora istezanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi 7. rolna - Magenta.....</i>	<i>142</i>
<i>Grafik 6.3.48:</i>	<i>Vrednosti prečnika rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Cijan.....</i>	<i>143</i>
<i>Grafik 6.3.49:</i>	<i>Vrednosti prečnika rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Cijan.....</i>	<i>143</i>
<i>Grafik 6.3.50:</i>	<i>Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 1. rolna - Cijan.....</i>	<i>144</i>
<i>Grafik 6.3.51:</i>	<i>Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 7. rolna - Cijan.....</i>	<i>144</i>

Grafik 6.3.52:	<i>Vrednosti prečnika rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Magenta.....</i>	145
Grafik 6.3.53:	<i>Vrednosti prečnika rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Magenta.....</i>	145
Grafik 6.3.54:	<i>Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 1. rolna - Magenta.....</i>	146
Grafik 6.3.55:	<i>Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 7. rolna - Magenta.....</i>	146
Grafik 6.3.56:	<i>Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Cijan.....</i>	147
Grafik 6.3.57:	<i>Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Cijan.....</i>	147
Grafik 6.3.58:	<i>Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 1. rolna - Cijan.....</i>	148
Grafik 6.3.59:	<i>Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 7. rolna - Cijan.....</i>	148
Grafik 6.3.60:	<i>Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 1x slivovi - Magenta.....</i>	149
Grafik 6.3.61:	<i>Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna 320x slivovi - Magenta.....</i>	149
Grafik 6.3.62:	<i>Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 1. rolna - Magenta.....</i>	150
Grafik 6.3.63:	<i>Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi 7. rolna - Magenta.....</i>	150

## Spisak tabela

Tabela 2.4.1:	Svojstva Twinlock® slivova različite tvrdoće [Lingier i Meuris, 2012].....	13
Tabela 2.5.1:	Prednosti poliuretana u odnosu na druge materijale [PMA, 2019] .....	15
Tabela 2.5.2:	Poređenje svojstava termoset i termoplastičnih poliuretana [PMA, 2019].....	17
Tabela 2.6.1:	Kritični naponi kvašenja pojedinih polimera [Zisman, 1963].....	40
Tabela 5.2.1:	Karakteristike FlintGroup nyloflex FTP Digital štamparskih formi [Anderson & Vreeland, 2019b].....	71
Tabela 5.2.2:	Karakteristike CLC/C polukartona .....	72
Tabela 5.2.3:	Karakteristike Zecher raster slivova .....	73
Tabela 5.2.4:	Karakteristike ESKO CDI Spark 4260 uređaja [Esko, 2013] .....	74
Tabela 5.2.5:	Karakteristike Vianord EVO 4E uređaja [Vianord, 2015a].....	74
Tabela 5.2.6:	Karakteristike Vianord EVO 4IP uređaja [Vianord, 2015b].....	75
Tabela 5.2.7:	Karakteristike Vianord EVO4DLF uređaja [Vianord, 2015c].....	75
Tabela 5.2.8:	Karakteristike Aristomat SL 1317 CNC uređaja [ARISTO CNC Cutter, 2013] .....	76
Tabela 5.2.9:	Svojstva Leica RM2255 automatskog rotacionog mikrotoma [Leica, 2019].....	77
Tabela 5.2.10:	Karakteristike univerzalnog uređaja za testiranje mehaničkih svojstava materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX (Shimadzu Corporation, 2018).....	78
Tabela 5.2.11:	Karakteristike univerzalnog uređaja za testiranje mehaničkih svojstava materijala Zwick Roell zwickiLine 5kN [Zwick Roell, 2019] .....	79
Tabela 5.2.12:	Karakteristike Agilent 6890 GC pećnice spojene sa 5975-N maseno selektivnim detektorom [Agilent, 2006] .....	79
Tabela 5.2.13:	Karakteristike Olympus BX51 mikroskopa [Olympus, 2004].....	80
Tabela 5.2.14:	Karakteristike Olympus XC50 kamere [Olympus, 2020] .....	81
Tabela 5.2.15:	Karakteristike Sauter AGDA-100 digitalnog durometre [Sauter GmbH, 2015] .....	81
Tabela 5.2.16:	Karakteristike x-rite eXact spektrofotometra [x-rite, 2014].....	82
Tabela 5.2.17:	Glavna svojstva Olympus Stream softvera za analizu slike [Nanocenter, 2010].....	83
Tabela 5.2.18:	Mogućnosti FAG Flex3Pro pratećeg softvera za analizu slike [FAG, 2019] .....	84
Tabela 5.2.19:	Parametri izrade FlintGroup nyloflex FTP Digital štamparskih formi .....	86
Tabela 5.2.20:	Parametri štampe po kontrolnim tačkama.....	87

<i>Tabela 5.2.21:</i>	<i>Pozicioniranje štamparskih formi i redosled montaže slivova .....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 5.2.22:</i>	<i>Plan uzorkovanja štampanog materijala za prvu fazu eksperimenta.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 5.2.23:</i>	<i>Plan uzorkovanja štampanog materijala za treću fazu eksperimenta.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 6.2.1:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa probijanja 1x slivova sa strane samolepljivog sloja .....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 6.2.2:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa probijanja 320x slivova sa strane samolepljivog sloja .....</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 6.2.3:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa probijanja 1x slivova sa strane kompresibilnog sloja .....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 6.2.4:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa probijanja 320x slivova sa strane kompresibilnog sloja .....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 6.2.5:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa odlepljivanja ljuštenjem za 1x slivove.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 6.2.6:</i>	<i>Srednje vrednosti parametara testa odlepljivanja ljuštenjem za 320x slivove.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 6.2.7:</i>	<i>Debljine pojedinačnih slojeva Twinlock® sloja 1x i 320x slivova.....</i>	<i>115</i>

## Spisak skraćenica

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene (Akrilonitril butadien stiren)
AM	Amplitude Modulated Screening (Amplitudno modularno rastriranje)
BHT	Butylated hydroxytoluene (dibutilhidroksitoluen)
CNC	Computer Numerical Control (Računarska numerički upravljana mašina)
FM	Frequency Modulated Screening (Frekventno modularno rastriranje)
GC/MS	Gas chromatography-mass spectrometry (Gasna hromatografija-masena spektrometrija)
ISO	The International Organization for Standardization (Međunarodna organizacija za standardizaciju)
LAMS	Laser Ablation Mask (Sloj za uklanjanje laserskom ablacijom)
NIP	Zona dejstva pritiska između valjaka ili cilindara
OPP	Oriented Polypropylene (Orijentisani polipropilen)
PC	Polycarbonate (Polikarbonat)
PMMA	Poly (methyl methacrylate) (Poli (metil metakrilat))
PTV	Porast tonske vrednosti
PU	Polyurethane (Poliuretani)
RIP	Raster Image Processor (Uređaj za rastriranje)
SAD	Sjedinjene Američke Države
TP	Trial Point (Kontrolna tačka)
TV	Tonal Value (Tonska vrednost)
UFDF	Urethane Foam Dynamic Fatigue (Dinamički zamor uretanske pene)
USD	US Dollar (Američki dolar)



## Spisak skraćenica korišćenih u formulama i jednačinama

$A$	Procenat pokrivenosti površine rasterskim tačkama
$a^*$ i $b^*$	Hromatske koordinate boje
$C_I$	Konstanta dobijena testiranjem nekolicine uzoraka pena različitih gustina
$D$	Optička gustina
$D_I$	Optička gustina punog tona prve štampane boje
$D_2$	Optička gustina punog tona druge štampane boje
$D_\infty$	Maksimalna vrednost optičke gustine
$D_{OP}$	Optička gustina preštampanih boja
$D_R$	Optička gustina tonske površine
$D_V$	Optička gustina površine punog tona
$d\varepsilon/dt$	Brzina smicanja
$E$	Jungov modul (modul elastičnosti)
$E_s$	Jungov modul materijala zida ćelija
$F_D$	Procenat pokrivenosti površine
$F_{nom}$	Nominalna pokrivenost površine negativ filma
$k$	Parametrijski faktori - za efekte koji utiču na procenu razlike u boji
$k_{CS_C}$	Težinski koeficijenti zasićenosti
$k_{HSH}$	Težinski koeficijenti tona
$k_{LS_L}$	Težinski koeficijenti svetline
$L^*$	Svetlina
$m$	nagib krive $[(dD/D_\infty)/dz]$ u oblastima veoma tankih nanosa boje
$pi$	Pokrivenost površine izračunata sa pragom $i$
$PTV$	Porast tonskih vrednosti
$R$	Faktor reflektanse tonske površine
$R_0$	Procenat reflektovane svetlosti neštampane podloge
$R_I$	Procenat reflektovane svetlosti sa štampanog polja
$R_\infty$	Faktor reflektivnosti podloge za štampu
$R_T$	Faktor za preskaliranje $a^*$ - poboljšavanje tačnosti formule za sive boje
$R_V$	Faktor reflektanse površine punog tona
$S$	Koeficijenti - uticaj nedostataka CIE $L^*a^*b^*$ u vizuelnoj uniformnosti

$T$	Preklapanje
$T_g$	Temperatura ostakljivanja
$U_a$	Apsorbovana gustina energije
$U_d$	Gustina rasute energije
$U_d/U_a$	Histerezis
$U_s$	Gustina uskladištene energije
$w_i$	Težinski koeficijent
$z$	Debljina nanosa boje
$\Delta E^*$	Razlika u boji između dva stimulusa
$\varepsilon$	Deformacija
$\eta$	Koeficijent viskoznosti
$\rho^*$	Gustina pene
$\rho_s$	Gustina materijala zida ćelija od kog je pena sačinjena
$\sigma$	Napon

## Sadržaj

1	UVOD.....	1
1.1	Obrazloženje teme i okvir istraživanja .....	1
1.2	Pregled sadržaja disertacije.....	2
2	AKTUELNO STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA.....	3
2.1	Fleksografija.....	3
2.2	Proces montaže štamparskih formi.....	5
2.3	Obostrano lepljive trake.....	7
2.3.1	Fizička i mehanička svojstva obostrano lepljivih traka.....	7
2.3.2	Svojstva adhezije obostrano lepljivih traka.....	9
2.4	Slivovi i proces proizvodnje slivova .....	9
2.4.1	Twinlock® slivovi.....	12
2.5	Poliuretani.....	15
2.5.1	Dobijanje poliuretana.....	15
2.5.2	Tipovi poliuretana.....	16
2.5.2.1	Termoset i termoplastični poliuretani .....	16
2.5.2.2	Poliuretanske pene - tipovi, dobijanje i svojstva .....	17
2.5.3	Mehanička svojstva poliuretana .....	19
2.5.3.1	Kriva napon-deformacija.....	20
2.5.3.2	Rast deformacije pod konstantnim naponom i relaksacija napona .....	21
2.5.3.3	Histerezis .....	23
2.5.4	Parametri koji utiču na mehanička svojstva poliuretanskih pena.....	24
2.5.4.1	Gustina pene .....	24
2.5.4.2	Nivo i brzina deformacije.....	25
2.5.4.3	Uticaj mikrostrukture na svojstva pene pri različitim uslovima .....	27
2.5.4.4	Parametri koji utiču na rast deformacije pod konstantnim naponom i relaksaciju napona.....	31
2.5.4.5	Parametri i pojave koje utiču na histerezis, zamor i gubitak energije .....	31
2.6	Adhezija i adhezivi.....	38
2.6.1	Mehanizmi adhezije.....	38
2.6.1.1	Rozin i njegov uticaj na adhezivna svojstva.....	38
2.6.2	Adhezivi osetljivi na pritisak.....	39
2.6.2.1	Plasticizeri i njihov uticaj na adhezivna svojstva .....	40
2.6.3	Mogućnosti repozicioniranja i ponovnog lepljenja .....	41
2.6.4	Merenje adhezije i parametri koji utiču na adheziju.....	43

2.7	Parametri kvaliteta otiska kartonske ambalaže .....	45
2.7.1	Optička gustina .....	46
2.7.2	Razlika u boji .....	47
2.7.3	Porast tonskih vrednosti .....	48
2.7.4	Preklapanje .....	50
2.7.5	Uniformnost štampane površine .....	51
2.7.6	Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka .....	53
2.7.6.1	Efekat prstenaste rasterske tačke .....	53
2.7.6.2	Istezanje rasterskih tačaka .....	54
2.7.6.3	Prečnik rasterskih tačaka .....	55
2.7.6.4	Krzavost ivica rasterskih tačaka .....	55
2.8	Procesni parametri i njihov uticaj na parametre kvaliteta otiska .....	55
2.8.1	Montažni materijali .....	56
2.8.1.1	Obostrano lepljive trake .....	57
2.8.1.2	Slivovi .....	58
2.8.2	Raster valjci .....	58
2.8.3	Pritisak i brzina štampe .....	59
2.8.4	Temperatura .....	62
2.8.5	Viskozitet boje .....	63
3	PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA .....	65
3.1	Predmet istraživanja .....	65
3.2	Problem i cilj istraživanja .....	66
4	HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA .....	67
5	MATERIJALI I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....	69
5.1	Plan i faze istraživanja .....	69
5.2	Metodologija istraživanja .....	70
5.2.1	Materijali .....	70
5.2.1.1	Slivovi i obostrano lepljive trake za montažu flekso štamparskih formi .....	70
5.2.1.2	Štamparske forme .....	71
5.2.1.3	Podloga za štampu .....	72
5.2.1.4	Boje .....	72
5.2.1.5	Raster slivovi .....	73
5.2.2	Mašine i uređaji .....	73
5.2.2.1	Mašine/uređaji za pripremu za štampu i štampu .....	73
5.2.2.2	Uređaji za pripremu uzoraka .....	76
5.2.2.3	Merni uređaji .....	77
5.2.3	Softveri .....	83
5.2.4	Metode .....	84
5.2.4.1	Digitalna priprema za štampu, izrada štamparskih formi i štampa .....	84
5.2.4.2	Priprema uzoraka .....	89
5.2.4.3	Metode merenja .....	90

6	REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....	96
6.1	Ispitivanje uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže .....	97
6.1.1	Porast tonskih vrednosti na poljima od 4.3 % i 1.6 % tonske vrednosti .....	97
6.2	Karakterizacija i uticaj nivoa eksploataisanosti na svojstva slivova.....	103
6.2.1	Mehanička svojstva slivova pri kompresiji.....	103
6.2.1.1	Zaostatak deformacije .....	103
6.2.1.2	Maksimalan napon .....	104
6.2.1.3	Jungov modul elastičnosti .....	105
6.2.1.4	Histerezis gubitak.....	105
6.2.1.5	Relaksacija napona i histerezis gubitak pri kompresiji sa zadržavanjem deformacije.....	107
6.2.2	Mehanička svojstva slivova pri testu probijanja iglom.....	108
6.2.3	Adhezivna svojstva slivova.....	111
6.2.4	Sastav samolepljivog sloja slivova .....	112
6.2.5	Analiza mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova .....	113
6.2.6	Tvrdoća Twinlock® sloja slivova .....	115
6.3	Ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže .....	115
6.3.1	Denzitometrijska merenja i mehanički porast tonskih vrednosti .....	115
6.3.1.1	Ukupan porast tonskih vrednosti .....	115
6.3.1.2	Mehanički porast tonskih vrednosti .....	121
6.3.1.3	Optička gustina .....	125
6.3.1.4	Preklapanje .....	127
6.3.2	Kolorimetrijska merenja .....	128
6.3.2.1	Razlika u boji.....	128
6.3.3	Uniformnost štampane površine.....	130
6.3.4	Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka.....	137
6.3.4.1	Efekat prstenaste rasterske tačke .....	137
6.3.4.2	Istezanje rasterskih tačaka .....	139
6.3.4.3	Prečnik rasterskih tačaka .....	143
6.3.4.4	Krzavost ivica rasterskih tačaka.....	146
7	DISKUSIJA REZULTATA.....	151
7.1	Zaostatak deformacije.....	151
7.2	Maksimalan napon .....	151
7.3	Jungov modul elastičnosti.....	151
7.4	Histerezis gubitak .....	152
7.5	Relaksacija napona i histerezis gubitak pri kompresiji sa zadržavanjem deformacije .....	152
7.6	Mehanička svojstva slivova pri testu probijanja iglom .....	153
7.7	Adhezivna svojstva i sastav samolepljivog sloja slivova .....	153
7.8	Analiza mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova.....	154

7.9	Denzitometrijska merenja i mehanički porast tonskih vrednosti .....	155
7.9.1	Ukupan i mehanički porast tonskih vrednosti .....	155
7.9.2	Optička gustina .....	157
7.9.3	Preklapanje .....	157
7.10	Kolorimetrijska merenja .....	157
7.10.1	Razlika u boji .....	157
7.11	Uniformnost štampane površine .....	158
7.12	Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka .....	158
7.12.1	Efekat prstenaste rasterske tačke .....	158
7.12.2	Istezanje rasterskih tačaka .....	159
7.12.3	Prečnik rasterskih tačaka .....	160
7.12.4	Krzavost ivica rasterskih tačaka .....	160
8	ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA .....	162
9	NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI .....	168
10	LITERATURA .....	170
11	BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM .....	199

# 1 UVOD

## 1.1 Obrazloženje teme i okvir istraživanja

Pregledom postojećih istraživanja u oblastima materijala i procesnih parametara fleksografske štampe, parametara kvaliteta štampanog otiska i uticaja procesnih parametara na parametre kvaliteta, ustanovljeno je da nisu praćeni parametri kvaliteta slivova, niti su promene tih parametara dovođene u korelaciju sa promenama procesnih parametara i posredno parametara kvaliteta otiska. Takođe, uvođenjem novih tehnologija poput Twinlock® tehnologije slivova, javlja se potreba za njihovim upoređivanjem sa postojećim tehnologijama kroz analizu procesa proizvodnje i ključnih parametara kvaliteta otiska kao izlaznog proizvoda.

Najveći deo pažnje tokom istraživanja će biti posvećen trenutno najmodernijoj dostupnoj tehnologiji slivova, odnosno Twinlock® tehnologiji. Odabir ove tehnologije je bitan iz razloga što ona spaja funkcije dva različita materijala korišćena u konvencionalnom postupku montaže štamparskih formi, odnosno slivova i obostrano lepljivih traka. Pored toga, karbonski otisak predstavlja jedan od parametara kojima sve veći broj preduzeća posvećuje veliku pažnju i u koji se ulažu značajni resursi. Twinlock® slivovi predstavljaju tehnologiju kojom je veoma lako moguće značajno smanjiti karbonski otisak, pa upravo oni i predstavljaju izbor sve većeg broja velikih preduzeća koja se bave fleksu štampom. Dodatni razlog odabira ove tehnologije je i povećan nivo stabilnosti procesa proizvodnje kroz eliminaciju obostrano lepljivih traka čija svojstva mogu značajnije varirati u zavisnosti od serije proizvodnje. Međutim, stabilnost svojstava Twinlock® slivova, kao i bilo kojih drugih slivova, kroz eksploataciju nije istražena, što predstavlja još jedan od razloga za sprovođenje ovog istraživanja.

Pored prethodnih razloga, pregledom relevantne literature je ustanovljeno da tokom procesa štampe nekada dolazi do promena sa nepoznatim uzrocima, a čiji se uticaj ispoljava i na parametre kvaliteta otiska. Jedan od mogućih i gotovo potpuno neistraženih uzročnika ovih promena su upravo slivovi. Prema tome se prvo javlja potreba za njihovom karakterizacijom i uticajem eksploatacije na promenu svojstava, a zatim i za ispitivanjem uticaja eksploatacije slivova na promenu procesnih parametara i parametara kvaliteta otiska.

Još jedan od razloga za sprovođenje istraživanja leži u činjenici da za karakterizaciju uticaja eksploatacije na mehanička svojstva poliuretanskih pena ne postoji kompletan metod koji bi opisao sve mehanizme koji su od značaja za istraživanje uticaja slivova na procesne i parametre kvaliteta otiska. Pored toga i samolepljivi sloj Twinlock® slivova, koji predstavlja najveću novinu u oblasti tehnologije montaže štamparskih formi je nepotpuno istražen, kao i tvrdnje proizvođača da je pravilnom upotrebom moguć beskonačan broj montaža štamparskih formi. Prema tome i za karakterizaciju samolepljivog sloja je potrebno pronaći metod koji bi pored promene adhezivnih svojstava podrazumevao i pronalazak uzročnika tih promena.

Uprkos pronalasku adekvatnih metoda za karakterizaciju slivova i uticaj eksploatacije na njihova svojstva, mogućnost njihove primene u praksi, izuzev pri razvoju novih ili unapređivanju postojećih sliv tehnologija je ograničena. Međutim, okvirima istraživanja su predviđena i različita merenja i analize parametara kvaliteta otiska. Rezultati merenja ovih parametara i njihovo dovođenje u korelaciju sa promenama svojstava slivova kroz eksploataciju bi trebalo da omogućе proveru stanja slivova nedestruktivnim i brzim metodama, čak i tokom procesne kontrole štampe.

Sprovedenjem istraživanja i poznavanjem mehanizama promena bi se pored povećanja predvidivosti kvaliteta štampane kartonske ambalaže, omogućila i veća kontrolisanost i stabilnost procesa proizvodnje kroz eventualne korekcije drugih procesnih parametara sa ciljem kompenzacije promena izazvanih slivovima. Takođe, bio bi omogućen i odabir adekvatnih slivova po pitanju tipa i nivoa eksploataisanosti u zavisnosti od dominantnih štampanih motiva. Detaljnim uvidom u mehanizme promena i pronalaskom manjkavosti trenutno najmodernijih tehnologija, dobijaju se mogućnosti kreiranja simulacija za predviđanje dugotrajnosti slivova i njihovog uticaja na kvalitet štampe prilikom razvoja novih tehnologija slivova.

Doprinos istraživanja se dakle ogleda u eliminaciji jedne od nepoznatih u procesu fleksografske štampe putem karakterizacije mehanizmima promena svojstava slivova kroz eksploataciju i njihovog uticaja na procesne i parametre kvaliteta otiska. Metode, kao i rezultati i zapažanja nastala tokom istraživanja mogu da budu iskorišćena tokom procesne kontrole štampe i pri razvoju novih ili unapređenju postojećih sliv tehnologija u cilju otklanjanja pronađenih manjkavosti.

## 1.2 Pregled sadržaja disertacije

Ova disertacija je koncipirana tako da sadrži dve glavne celine. Prva predstavlja teorijske osnove u oblastima istraživanja neophodne za uspešno definisanje hipoteza, a druga predstavlja eksperimentalni deo koji podrazumeva opis i definisanje korišćenih materijala i metodologije, predstavljanje rezultata, njihovu diskusiju, odgovore na hipoteze i zaključke istraživanja.

U delu disertacije koji se odnosi na aktuelno stanje u oblasti istraživanja (poglavlje 2) izvršena je podela na dve celine, prema prethodno definisanim predmetom i okvirima istraživanja.

U okviru prve celine (poglavlja 2.2 - 2.6) dat je pregled aktuelnih istraživanja u oblastima montaže flekso štamparskih formi sa akcentom na slivovima, poliuretana kao jednog od osnovnih gradivnih elemenata slivova, mehaničkih svojstava poliuretana, adheziva, mehanizama adhezije i uticajnih parametara na adhezivna svojstva materijala na osnovu čega se dobija osnov za definisanje sadržaja i ciljeva jedne od faza eksperimentalnog dela disertacije.

Druga celina (poglavlja 2.7 - 2.8) podrazumeva pregled aktuelnih istraživanja u oblastima parametara kvaliteta štampe, kao i procesnih parametara i njihovog uticaja na parametre kvaliteta štampe. Na taj način su dobijene osnove za definisanje glavnog cilja disertacije, kao i sadržaja i ciljeva druge dve faze eksperimentalnog dela disertacije.

Nakon definisanja predmeta, problema i ciljeva istraživanja (poglavlje 3) izvršeno je postavljanje hipoteza istraživanja (poglavlje 4) koje su zatim ispitane kroz tri faze eksperimentalnog dela istraživanja (poglavlje 5).

Pre razdvajanja eksperimentalnog dela na faze izvršen je detaljan opis materijala i metodologije istraživanja za celokupan eksperiment (poglavlje 5.2).

U nastavku eksperimentalnog dela istraživanja predstavljen je algoritam izvođenja eksperimenta sa pojedinačnim fazama i tokom istraživanja u zavisnosti od dobijenih rezultata za svaku fazu, kao i rezultati istraživanja razdvojeni po fazama (poglavlje 6).

Prva faza se tiče ispitivanja uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže (poglavlje 6.1), druga faza podrazumeva karakterizaciju i uticaj nivoa eksploataisanosti na svojstva slivova (poglavlje 6.2), dok se u okviru treće faze vrši ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže (poglavlje 6.3). Nakon prikaza rezultata pristupljeno je njihovoj diskusiji (poglavlje 7), izvođenju zaključaka (poglavlje 8) dovođenjem rezultata pojedinačnih faza istraživanja u korelaciju, kao i prikazu naučnog doprinosa istraživanja i mogućnostima primene rezultata i metodologije u praksi (poglavlje 9). Pregled korišćene literature (poglavlje 10) je dat na kraju rada.



## 2 AKTUELNO STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

### 2.1 Fleksografija

Uobičajeno je da se različiti procesi štampe koriste tokom proizvodnje grafičkih proizvoda poput brošura, knjiga, časopisa, plakata, postera, ambalaže... Konvencionalna štampa predstavlja jeftin i brz vid masovne proizvodnje proizvoda sa visokim zahtevima konzistentnosti [Huebler et al., 2002; Kempa et al., 2008]. Njen potencijal je takav da se sve više koristi pri štampi funkcionalnih proizvoda, odnosno uređaja [Sauer, Bornemann i Dorsam, 2011; Hecker i Breitung, 2013]. Predvidivost procesa štampe je za oba tipa proizvoda jedno od najbitnijih svojstava kojima se postiže željeni kvalitet i smanjuje procenat otpada. Međutim, kako je štampa oblast zahvaćena konstantnim i rapidnim razvojem novih materijala, tehnologija, pa i čitavih procesa, manjak poznavanja načina na koji oni funkcionišu i utiču na ostale procesne parametre doprinosi nedovoljno dobroj iskorišćenosti potencijala tehnologija, kao i promeni stabilnosti i ponovljivosti kvaliteta procesa štampe.

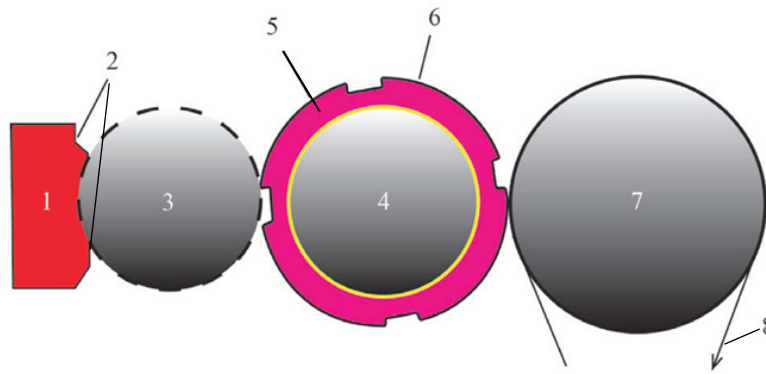
Fleksografski proces štampe se razvio iz leterpres tehnike štampe gde su štampani elementi bili izdignuti iznad površine osnove štamparske forme. Fleksografska štampa je nekada bila poznata kao "anilinska" štampa, ali 1952. promenila je ime u "fleksografija" [Todd, 1994a]. 1960-ih godina bila je najviše korišćena za štampu na lepenkama, ali sa razvojem je postala veoma zastupljena i u štampi različitih ambalažnih materijala i štampane elektronike [Kipphan, 2001; Brajnović, 2011]. U početku su štamparske forme izrađivane od gume mehaničkom obradom što ih je činilo veoma dugotrajnim, ali ne i visokokvalitetnim, pa su bile korišćene pretežno u štampi transportne ambalaže [Crouch, 1998]. Sa razvojem fotopolimernih štamparskih formi, automatizacijom i razvojem pratećih tehnologija, fleksografija se značajno približava kvalitetu ofset štampe. 2000-ih godina je kvalitet štampe impresionirao kupce ambalaže, pa je zabeležen veliki broj prelaza sa ofset na flekso štampu.

Fleksografija je proces reljefne štampe u smislu da se štampane površine na štamparskoj formi nalaze iznad neštampanih. Zbog upotrebe fleksibilnih štamparskih formi za štampu je dovoljan samo mali kontaktni pritisak da bi bio obezbeđen pravilan prenos boje [Novaković, Dedijer i Mahović Poljaček, 2010].

Današnji agregati za flekso štampu su prilično jednostavni i lako razumljivi. Glavna karakteristika im je kratak put boje koji se omogućava pomoću raster valjaka, dok su ostale komponente u zavisnosti od konstrukcije valjak nosač, rakel nož, komora za boju sa kamel rakelom, cilindar nosilac štamparske forme i pritisni cilindar.

Što se tiče podloga za štampu, najčešće korišćene su papir, polukarton, karton, lepenka, folije, plastični fleksibilni filmovi i celofan [Hallberg Hofstrand, 2006]. Ove podloge su veoma različite u aspektima površinskih svojstava i svojstava materijala u celosti.

Fleksografski proces štampe (slika 2.1.1) je zasnovan na prenošenju boje sa raster valjka na štampane (izdignute) elemente fotopolimerne štamparske forme, a sa njih na podlogu pri što manjem pritisku (engl. Kiss Print), jer se u suprotnom mogu pojaviti greške na otisku usled npr. pojačanog porasta tonskih vrednosti i može doći do deformacije štampanih elemenata forme. Pri pravilnom prenosu, neosušena boja ima debljinu od 2 do 15  $\mu\text{m}$  [Smyth, 2009].



*Slika 2.1.1: Osnovni elementi i princip rada flekso štampe 1. Komora za boju; 2. Rakel nož; 3. Raster valjak; 4. Cilindar nosilac štamparske forme; 5. Štamparska forma; 6. Boja na štampajućim elementima štamparske forme; 7. Pritisni cilindar; 8. Podloga na kojoj se štampa*

Flekso štampa ima puno prednosti. Neke od njih su:

- Mogućnost štampe na upojnim i neupojnim podlogama;
- Boje koje se brzo suše;
- Preštampavanje se vrši na gotovo potpuno suv sloj prethodno nanete boje čime se smanjuje reverzibilni efekat zaprljanja i loše preklapanje ili prenos boje na zadnju stranu podloge;
- Rezilijentne štamparske forme mogu da izdrže velike tiraže;
- Moguća je štampa sa različitim koracima ponavljanja na istim mašinama;
- Raster valjci omogućavaju veoma stabilan prenos boje;
- Može da se koristi za bešavnu štampu;
- Može da se koristi za štampu sa unutrašnje strane transparentnih materijala;
- Omogućava brzu pripremu mašine pri izmenama naloga;
- Relativno je profitabilna i pri štampi manjih naloga;
- Moguća je in-line završna grafička obrada za dobijanje širokog spektra proizvoda;
- Najperspektivnija je po pitanju razvoja tehnologije i dodatnog unapređenja već izuzetnog kvaliteta.

Međutim, postoje i određene mane ovog procesa:

- Problem ponovljivosti kvaliteta štampe i stabilnost procesa zbog međuzavisnosti mnoštva parametara;
- Potrebno je puno vremena za izradu i montažu štamparskih formi (umanjeno uvođenjem Twinlock® slivova i štamparskih formi koje ne zahtevaju sušenje);
- Porast tonskih vrednosti (povećana predvidivost upotrebom štamparskih formi sa tačkama sa ravnim vrhom);
- Tendencija pojave halo efekta;
- Različite pojave i problemi na različitim podlogama.

Kako su visok kvalitet, velike brzine proizvodnje i ekonomski aspekt stvari koje se danas podrazumevaju, fleksografija kao jedan od najprisutnijih procesa štampe u industriji ambalaže mora da isprati zahteve tržišta. To se najčešće postiže razvojem novih tehnologija koje olakšavaju ili ubrzavaju procese i doprinose kvalitetu gotovog proizvoda. Do 2020. godine, broj proizvoda odštampanih fleksno tehnikom štampe bi trebalo da dostigne broj od 5.81 biliona [Smyth i Mikhael, 2015]. Tržište fleksografske štampe je 2017. godine procenjeno na 164 milijarde USD, a prognoze su da će godišnji rast iznositi 2.3 % dostižući 2023. godine vrednost od 187 milijardi USD [Nelson, 2018]. Rapidan razvoj i modernizacija su izvršili uticaj i na tržište ambalaže, pa su i zahtevi za visokokvalitetnom reprodukcijom postepeno porasli [DFTA i Meyer, 2000]. Sa jedne strane proizvođači papira rade na unapređivanju strukturnih i površinskih karakteristika podloga za štampu, a sa druge strane proizvođači komponenata sistema za proces fleksno štampe su usmereni ka razvoju novih fleksno štamparskih formi, boja, načina graviranja raster valjaka, obostrano lepljivih traka i slivova, automatizaciji i in-line kontroli koji imaju značajan uticaj na kvalitet krajnjeg proizvoda [Mahović Poljaček, Cigula i Tomašegović, 2013].

Uprkos ekstenzivnim istraživanjima procesnih parametara fleksografije, uticaj određenih faktora na procesne parametre i parametre kvaliteta otiska i dalje nije dovoljno pojašnjen što onemogućava pouzdanu kontrolu procesa putem malog, odabranog broja parametara i polja za kontrolu. Varijabilnost pritiska u štampi ukazuje na to da postoji interakcija sa nekim parametrima materijala ili procesa koji i dalje nisu dovoljno istraženi, a konstantno uvođenje novih materijala i pratećih tehnologija u proces štampe svakako doprinosi nedovoljnoj istraženosti.

Jedna od nedovoljno istraženih komponenata procesa fleksno štampe su sliv nosioci štamparskih formi (slivovi). Slivovi su u opštem smislu cilindrične čaure koje se u zavisnosti od svoje uloge u procesu štampe postavljaju na odgovarajuće osovine unutar jedinica za štampu. U procesu fleksografske štampe postoji više elemenata koji se izrađuju u vidu slivova. Najzastupljeniji među njima su sliv nosioci štamparskih formi (ustaljen izraz za njih je "slivovi"), raster slivovi i bešavne sliv štamparske forme.. Uz svojstva slivova, nedovoljno je istražen i njihov uticaj na kvalitet štampe i stabilnost procesa štampe. Kao i kod većine pratećih tehnologija i u oblasti slivova dolazi do konstantnih inovacija. Najnoviji i najprisutniji trend na tržištu po pitanju slivova je prelaženje na tzv Twinlock<sup>®</sup> slivove, koji, iako postoje već duži vremenski period, tek u skorije vreme znatno dobijaju na značaju sa trendom povećanja njihove upotrebe na svetskom nivou.

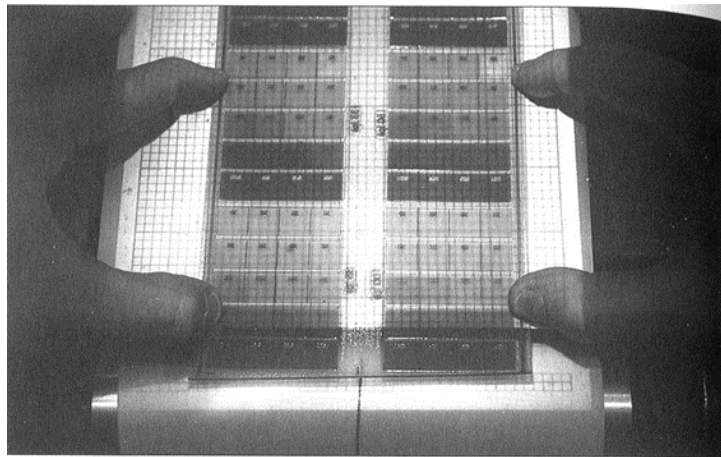
Svojstva materijala od kojih su sastavljeni pojedini slojevi slivova su solidno istražena u drugim oblastima primene nevezanim za štampu. Međutim, ponašanje ovih parametara u oblasti štampe, njihovi trendovi promene i moguć uticaj na stabilnost procesa štampe i kvalitet otiska nisu dovoljno istraženi. Dinamičke pojave u zoni štamparskog NIP-a mogu da izmene svojstva štamparskih formi i slivova trajno ili privremeno. Neka od ovih svojstava su istražena, pogotovu kod štamparskih formi, ali svojstva slivova i njihov uticaj na dalje promene procesnih parametara nisu objašnjeni uopšte ili su objašnjeni veoma oskudno i nedovoljno potkrepljeno činjenicama.

## 2.2 Proces montaže štamparskih formi

Proces montaže štamparskih formi podrazumeva pravilno pozicioniranje formi na sliv po x i y osi. Ukoliko su forme montirane pod pravilnim uglom, podešavanjem tokom štampe se bez problema može postići tačan registar. Kod fleksno štampe nije moguće naknadno podešavanje ugla. Štamparske forme se mogu izrađivati u jednom komadu za svaku boju ili kao posebne za svaku traku u koprintu. Izrada zasebnih štamparskih formi za svaku traku po širini sliva je bolji izbor zbog mogućnosti lepljenja štamparskih formi na smicanje. Na taj način se tokom montaže štamparskih formi izbegava stvaranje zazora po dužini sliva koji bi dovodio do odskakanja i pojačanih vibracija tokom štampe, što bi se negativno odrazilo na kvalitet otiska i dugotrajnost štamparskih formi i slivova.

Sistemi poravnavanja ploča mogu da se podele u tri kategorije: optički, sa registarskim pinovima ili pomoću kamera sa uveličanjem koje imaju označene ispravne pozicije za oznake registra. Podela postupaka po ovim kriterijumima nije stroga jer neki sistemi za montažu podrazumevaju više od jednog načina montaže.

**Optički sistemi** poravnavanja se oslanjaju na jednostavno vizuelno poravnavanje oznaka prema mreži linija. Najjednostavniji optički sistem poravnavanja podrazumeva linije ugravirane u sam cilindar, a operater treba samo da poravna vertikalne i horizontalne oznake na formi sa graviranim linijama. Drugi optički pristupi omogućavaju lepljenje štamparskih formi pod uglom od 90° putem pozicioniranja na tabaku ili stolu odakle se lepe i prebacuju na cilindar (slika 2.2.1).



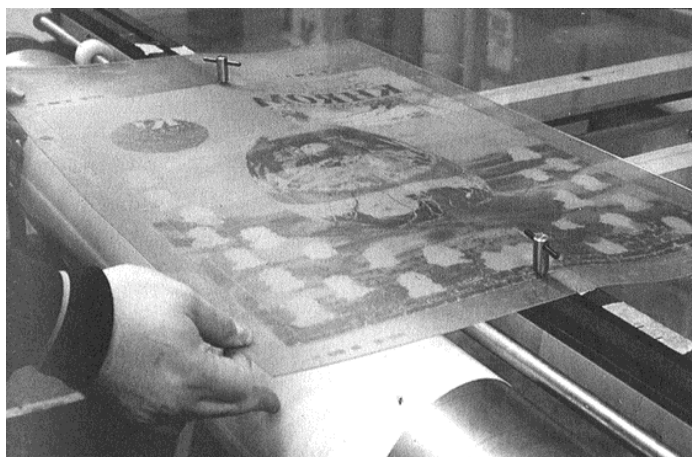
*Slika 2.2.1: Poravnavanje štamparske forme na stolu i njeno prebacivanje i lepljenje na cilindar*

Optički priferi montaže su uređaji koji su dosta dugo korišćeni. Dva takva uređaja su i Harley i Mosstype. Oni imaju sisteme ogledala koja omogućavaju operateru da poravna oznake na pločama sa mrežom na pritiskom cilindru uređaja. Operater koristi funkciju draftovanja da iscrta raspored formi. Za proveru registra, boja se nanosi na forme i izvršava se otiskivanje na tabak sa draftom. To se radi nakon montaže štamparskih formi za svaku boju tako da se na kraju dobije probni otisak.

Ovakvi uređaji zahtevaju veoma vešte operatere i puno vremena za montažu kompleksnih naloga. U praksi su zabeleženi slučajevi prepravki ovih uređaja dodavanjem sistema registra pomoću pinova ili videoscopa, omogućavajući tako preciznije podešavanje većom brzinom.

**Sistemi registra pomoću pinova** su opšteprihvaćeni sistem za poravnavanje slika u grafičkoj delatnosti. Nekada ovakve sisteme nije bilo moguće koristiti nakon izrade filma u fleksografskom procesu. Međutim, sa razvojem fotopolimernih ploča upotreba ovih sistema je moguća i u poravnavanju ploča na cilindrima ili drugim nosiocima poput slivova.

Sistemi registra pomoću pinova funkcionišu tako što se tabaci fotopolimernog materijala izbuše na istim mestima kao i film nakon oslikavanja. Nakon pozadinskog osvetljavanja, ploče sa postavljenim filmom se nanose na pinove pre početka glavnog osvetljavanja. Isti ti otvori na štamparskim formama se koriste prilikom montaže na cilindre. Štamparske forme mogu biti bušene i nakon osvetljavanja gde se za pravilno pozicioniranje otvora koriste sistemi mikroskopa i meta za ispravno inicijalno pozicioniranje ploča. Nakon bušenja ploče se nanose na pinove koji mogu da budu direktno na cilindru ili na zasebnim uređajima korišćenim za prenos štamparskih formi na nosioce (slika 2.2.2).



*Slika 2.2.2: Poravnavanje štamparske forme pomoću pinova pre lepljenja na cilindar*

**Video mikroskopi** predstavljaju treću, najmoderniju grupu sistema montaže štamparskih formi. Ovi sistemi se koriste i kao sastavni element sistema za montažu pomoću pinova. Međutim, kao individualan sistem oni preskaču korak bušenja štamparskih formi i omogućavaju precizno pozicioniranje forme iznad sliva i lepljenje bez bilo kakvih dodatnih koraka. Par mikro oznaka registra se izrađuje na svakoj štamparskoj formi, a uređaj za montažu ima najmanje dva video mikroskopa. Štamparska forma se postavlja tako da se oznake sa video mikroskopa preklope sa mikrooznakama na formama, nakon čega se forma spaja sa slivom pomoću obostrano lepljive trake ili u slučaju Twinlock® slivova neposrednim kontaktom sa samolepljivim slojem sliva.

## 2.3 Obostrano lepljive trake

Obostrano lepljiva traka je razvijena 1975. godine sa ciljem spajanja fotopolimernih štamparskih formi na cilindre nosioce štamparskih formi. Nekoliko kompanija je tada na tržište izbacilo i obostrano lepljive trake sa kompresibilnom penom. One su doprinele povećanju kompresibilnosti ispod montiranih štamparskih formi i pomogle su u poboljšanju ravnomernosti u pritiscima u NIP zoni tokom štampe, kao i u smanjenju porasta tonskih vrednosti [FFTA, 2000]. Kada pena istrpi pritisak, ona daje povratnu silu koja ostaje nepromenjena čak i nakon značajne promene njene debljine, dok kod čvrstih formi dolazi do kontinualnog rasta intenziteta povratne sile od momenta prvog kontakta.

### 2.3.1 Fizička i mehanička svojstva obostrano lepljivih traka

Kada je u pitanju kvalitet fleksografske štampe i stabilnost procesa štampe, jedan od najmanje razmatranih, a zapravo izuzetno bitnih faktora predstavljaju obostrano lepljive trake [Anderson & Vreeland, 2019a]. Pored njihove tvrdoće, presudan uticaj na kvalitet štampe igra i tvrdoća štamparskih formi. Jedan od najpotcenjenijih faktora je upravo kombinovani doprinos tvrdoća ova dva materijala kvalitetu štampanog otiska. Različiti rezultati štampe mogu biti postignuti kombinacijama različitih svojstava ovih materijala.

Mekše štamparske forme se bolje prilagođavaju površini. Tvrde štamparske forme se manje deformišu smanjujući tako porast tonskih vrednosti, međutim kod njih je česta pojava neodštampanih tačaka. Tvrde štamparske forme su bolje za štampu rastriranih površina, a upotreba veoma meke trake može dovesti do lošeg prenosa boje na podlogu i potrebe za povećavanjem pritiska. Nešto tvrđa traka bi doprinela kvalitetu štampe i isključila potrebu za

povećavanjem pritiska što doprinosi veku trajanja štamparskih formi i same trake. Ukoliko je traka previše tvrda, može doći do odskakanja prilikom štampe [FlexoTech, 2014]. Gustina i kompresibilnost pene variraju, ali generalno, mekše trake se koriste pri reprodukciji tonских vrednosti, a tvrde za štampu punih tonova da bi dale adekvatnu podršku elementima. Brojni su i proizvođači koji u određenoj meri spajaju kvalitete traka potrebne za štampu motiva sa kombinovanim tonским površinama i površinama punog tona.

Prema autorima [Joyce et al., 2014] porast širine linijskih elemenata je jedna od glavnih mana fleksografskog procesa štampe. Nastaje zbog sabijanja štamparske forme prilikom prenosa boje na podlogu, a uslovljena je i korišćenim tipom obostrano lepljive trake, kao i podešavanjem pritiska. Mekše obostrano lepljive trake rezultuju većim porastom debljine linija.

Obostrano lepljive trake za montažu fotopolimernih štamparskih formi su dostupne sa različitim nivoima tvrdoće i debljine zbog prilagođavanja uslovima štampe. Kvalitet trake ima značajan uticaj na krajnji otisak, a korišćenje pogrešne može dovesti do problema poput odizanja ivica štamparskih formi ili porasta tonских vrednosti.

Kompresibilne trake se sastoje od tankog sloja pene obostrano oslojenog adhezivom. Tanak sloj pene se ponaša kao amortizujući sloj koji smanjuje pritisak na pojedinim delovima štamparske forme [Lee, 1998]. Kako tvrdoća štamparske forme ima značajan uticaj na porast tonских vrednosti i optičku gustinu punih tonova, razvijene su trake različitih nivoa kompresibilnosti za različite rezultate štampe. Iako je formulacija ovih pena različita, njihova svojstva se najčešće definišu ključnim parametrima poput jačine, rezilijentnosti i stabilnosti [FlexoTech, 2014]. Obostrano lepljiva traka amortizuje vibracije i ublažava defekte na štampanom otisku koji na taj način nastaju [Anderson & Vreeland, 2019a].

Ključna svojstva traka moraju biti podešena tako da one odgovaraju velikom broju promenljivih poput podloge za štampu (film, polietilen, poliester, polipropilen, laminirani materijali, metalizirani materijali, premazni i nepremazni papiri...), štamparskih formi (termalne, solventne, na bazi vode, različitih tvrdoća), boja (na bazi rastvarača, vode, UV), brzine štampe i veličine tiraža. Glavne karakteristike su kompresija i oporavak trake od kompresije koji moraju da budu konzistentni kroz štampu čitavog naloga. Uzevši u obzir da test štampe koji sprovodi Lohmann kao jedan od najvećih proizvođača obostrano lepljivih traka podrazumeva brzinu od 900 m/min sa korakom ponavljanja od 500 mm, traka mora da se kompresuje i oporavi od kompresije 1800 puta u minuti. To znači da vreme po ciklusu iznosi 0.033 s [FlexoTech, 2014].

Za kvalitetnu štampu se pri montaži fotopolimernih štamparskih formi koriste tanke pene sa strukturom otvorenih ćelija. Debljina ovih pena se tipično kreće između 0.3 i 1 mm i u SAD se koristi u 90% slučajeva gde su potrebna amortizujuća svojstva obostrano lepljive trake. Međutim, uvođenje ovog sloja dovodi do varijacija u debljini obostrano lepljive trake po površini. Drugi problemi leže u činjenicama da su ovakve obostrano lepljive trake za jednokratnu upotrebu, da su podložne oštećenjima pri rukovanju, da nisu otporne na uobičajene rastvore korišćene u štampi i da je njihov učinak u štampi punih tonova relativno slab.

Opšteprihvaćeno je zapažanje da se kompresibilni sloj sa sistemom zatvorenih ćelija oporavlja brže i bolje od slojeva sa sistemom otvorenih ćelija (koji su dugotrajniji) i da što su ćelije loptastije, to je bolje oporavljanje od opterećenja [FlexoTech, 2014].

Što se tiče apsorpcije energije, otvoreni dizajn apsorbuje više, što znači da je elastičnost slojeva sa strukturom zatvorenih ćelija veća. Pored kompresibilnosti i elastičnost igra bitnu ulogu u kompenzaciji porasta tonских vrednosti. Pri istom nivou kompresibilnosti, poliuretanske trake imaju manju elastičnost od traka sa strukturom zatvorenih ćelija [Kilheny, 2008].



Nasuprot trakama sa kompresibilnim slojem, tvrde trake ne pokazuju amortizujuća svojstva i služe samo za spajanje štamparskih formi i slivova.

Istraživanjima je ustanovljeno da se upotrebom pet različitih obostrano lepljivih traka optička gustina površina punih tonova promeni od 1.34 do 1.66 [Lee, 1998].

### 2.3.2 Svojstva adhezije obostrano lepljivih traka

Drugi aspekt gde trake imaju izražen uticaj je odvijanje procesa štampe, gde je adekvatna adhezija štamparskih formi preduslov za stabilan proces.

Postavljanje trake na sliv može da se radi ručno uz upotrebu gumenog valjka ili pomoću mašina za montažu štamparskih formi, čime se ostvaruje uniformnije lepljenje bez mehurića vazduha. Funkcije koje adheziv treba da omogući su dobro spajanje sa slivom, adhezija štamparskih formi tako da ne dolazi do odizanja njihovih ivica, kao i uklanjanje štamparskih formi bez oštećenja, a u nekim slučajevima i ponovno korišćenje trake [FlexoTech, 2014].

Ukoliko je adheziv previše agresivan, ostavljaće neželjene tragove na slivu ili formama čime se produžava vreme čišćenja. To je svakako bolji slučaj od nedovoljne adhezije gde može da dođe do stvaranja mehurića i odizanja krajeva štamparskih formi čime opadaju stabilnost i kvalitet procesa štampe [Anderson & Vreeland, 2019a]. Greške nastale pri montaži neretko zahtevaju zaustavljanje mašine za štampu kako bi se njihovi uzročnici bezbedno otklonili.

Odizanje krajeva štamparskih formi je problem koji često nastaje zbog prodiranja boje između trake i štamparske forme ili pak rastvaranja adheziva pod dejstvom rastvora za čišćenje ili loše očišćenih štamparskih formi. Odizanje krajeva štamparskih formi dovodi do grešaka u registru čime kvalitet štampanog proizvoda postaje teže kontrolisati [Mark Andy, 2018].

Kako su brzine mašina za štampu sve veće, a tiraži sve manji, bitan akcenat se stavlja na smanjenje vremena za pripremu štampe. Shodno tome, obostrano lepljive trake moraju da omoguće brzu montažu i demontažu [Anderson & Vreeland, 2019a].

Scapa proizvodi trake sa akrilatnom tehnologijom što omogućava ostvarivanje i održavanje jakog spoja između trake i štamparske forme tokom procesa štampe. Ovakvi adhezivi imaju povećanu otpornost na dejstvo rastvora, a omogućavaju i lako repozicioniranje tokom procesa montaže i odlepljivanje sa slivova bez zaostataka materijala.

3M E i EH serije traka su dizajnirane tako da imaju mikro kanale po svojoj površini koji dozvoljavaju vazduhu da teče kroz adheziv, što pomaže u otklanjanju mehurića između trake i štamparske forme i između trake i sliva.

## 2.4 Slivovi i proces proizvodnje slivova

Flekso štamparske forme su tradicionalno bile montirane direktno na čelične cilindre fiksnog prečnika [Dunn, 2015a]. Cilindri za montažu štamparskih formi mogu biti integralni, sa mogućnošću demontaže (najčešće kod uskotračnih mašina) ili u vidu laganih slivova.

Integralni cilindri su najskuplji i sa najmanje promena u tačnosti dimenzija tokom životnog veka. Ovi cilindri se prave samo za jedan isti korak ponavljanja štampe i najčešće su jedinstveni za svaku mašinu za štampu.

Cilindri sa mogućnošću demontaže se sastoje od osovine i metalnih slivova obrađenih tako da odgovaraju tačnim koracima ponavljanja. Oni se montiraju na mašinu prema zahtevima naloga, zajedno sa odgovarajućim zupčanicima i ležajevima. Dakle, kod ovakvih cilindara je potrebna samo jedna osovina i set zupčanika za širok opseg koraka ponavljanja. Ovaj sistem je dominantan kod uskotračnih mašina.

Proces fleksografske štampe se proteklih godina razvio do nivoa gde po kvalitetu može da se uhvati u koštac sa procesima ofset i duboke štampe. Razvoj i implementacija tehnologije slivova je samo jedan od primera kako industrija smanjuje i eliminiše probleme varijabilnosti flekso štampe [Hershey, 2008].

Zadato podešavanje pritiska između štamparske forme i pritisnog cilindra rezultuje promenljivim pritiskom u dodirnoj zoni štamparskih formi i trake materijala u zavisnosti od površine štampanog motiva i u slučaju vulkaniziranih guma njihove kompresibilnosti. Prvi uzročnik promenljivog pritiska je neizbežan, ali varijacije u kompresibilnosti gume su prevaziđene upotrebom stabilnijih i po ponašanju predvidljivijih fotopolimernih materijala. Povećanje konzistentnosti koje donose fotopolimeri smanjuje potrebu za strukturalnom stabilnošću čeličnih cilindara i dozvoljava upotrebu slivova sačinjenih od laganih kompozitnih materijala [Dunn, 2015b]. Moguće su različite kombinacije zbog dostupnosti širokog spektra različitih materijala i metoda za njihovo sastavljanje u celinu. Kompoziti mogu da se podešavaju sa ciljem postizanja mnoštva različitih svojstava. Na primer, slivovi koji povećavaju kvalitet štampe, odnosno kompresibilni slivovi su sastavljeni od uretana koji prekriva osnovu kompozitnog sliva [FFTA, 2000; Smyth, 2009].

Lagani slivovi predstavljaju najbolje rešenje za mašine za štampu većih širina. Štamparske forme mogu da budu montirane direktno na telo sliva, a pored toga postoje i izvedbe gde je sliv prekriven vulkaniziranom gumom ili poliuretanom koji su zaduženi za postizanje željene rezilijentnosti ili za omogućavanje različitih koraka ponavljanja korišćenjem istih osovina i osnovnog tela sliva. Da bi slivovi mogli da se koriste u mašinama, osovine na koje se oni nanose su šuplje i opremljene sistemom za ispuštanje komprimovanog vazduha. Slivovi su dimenzionisani tako da vazduh koji se ispušta iz osovine može dovoljno da ih proširi i tako omogućujući jednostavno ručno postavljanje sliva na osovinu. Sa isključenjem sistema za ispuštanje komprimovanog vazduha sliv tesno naleže na osovinu bez mogućnosti proklizavanja ili pomeranja. Slivovi su uprkos svojim dimenzijama i dalje dovoljno lagani za manuelno rukovanje. Ovi slivovi mogu da se skladište sa sve namontiranih štamparskih formi za potrebe brze i jednostavne ponovne štampe istog naloga. Na ovaj način se ostvaruju uštede u montaži štamparskih formi i eventualnoj ponovnoj izradi štamparskih formi oštećenih pri demontaži.

Pored prethodno navedenih prednosti, slivovi se lako čiste i održavaju, zahtevaju manje prostora za skladištenje, smanjuju vreme pripreme mašine sa sati na minute, a cena im je kompetitivna u odnosu na čelik [Garduno, 2013].

Postoje i modularne izvedbe slivova koji su manje širine, a montiraju se na istu osovinu, to dozvoljava lako kombinovanje naloga pri koprintu. Prema patentu US8621995B2 jedan segment sliva za fleksografiju sa svoje jedne bočne strane ima ženski element za registraciju, a sa druge muški što dozvoljava njihovo spajanje na tačno određenom mestu bez mogućnosti odvojenog proklizavanja segmenata [Claes i Vanmaele, 2008].

Jedna od podela slivova je na bešavne slivove i slivove sa šavom. Kod bešavnih slivova je materijal koji se gravira i osvetljava već prethodno nanet na sliv što znači da ne postoji korak montaže, dok slivovi sa šavom podrazumevaju i obavezan korak montaže, odnosno lepljenja izrađenih ravnih štamparskih formi. Upotrebom bešavnih slivova se eliminišu problemi prouzrokovani procesom montaže štamparskih formi. Neki od njih su odizanje štamparskih formi, odskakanje, greške u registru i distorzija slike [Hershey, 2008]. U slučaju slivova sa šavom, veća debljina štamparskih formi kombinovana sa manjim prečnikom sliva povećava mogućnost nastanka grešaka u registru i distorzije.

Procenjuje se da je globalno tržište fleksografskih slivova vredno oko 100 milijardi eura godišnje i da raste između 4% i 5% godišnje. Jedan od udela u ovoj ekspanziji ima i činjenica da je fleksografija preuzela deo tržišta od drugih tehnika štampe poput duboke i ofset



štampe, kao i rast popularnosti ovog procesa na tržištu Azije. 95% slivova na tržištu je dizajnirano tako da omogućava montažu štamparskih formi pomoću obostrano lepljive trake, a ostatak čine bešavni slivovi [Trelleborg, 2017]. Nova tehnologija Twinlock® slivova rapidno preuzima deo tržišta konvencionalnih slivova kroz velike lance flekso štamparskih kompanija.

Prvi slivovi su razvijeni od strane Strachan Henshaw kompanije i bili su blago konični i korišćeni kao pritisni cilindri duboke štampe ili u procesima premazivanja podloge. Ovi slivovi su proizvođeni od fiberglasa. Pored tela samog sliva i osovina na koju se on montira je imala blago koničan oblik, kao što je prikazano patentnom US4144813A [Julian, 1976]. Prema patentu, sliv se ručno nanosio na koničnu osovinu sve dok ne bi došlo do zaglavljivanja na proširenom delu konične strukture. Tada dolazi do prekrivanja mlaznica koje izbacuju komprimovani vazduh i blago istežu telo sliva dozvoljavajući dalje nanošenje na osovinu. Prednost u dubokoj štampi je bila laka zamena pritisnog cilindra, a u procesima premazivanja ovi slivovi su imali ulogu nanosača premaza i imali su mogućnost lake upotrebe različitih formulacija gumenog omotača [Kroll, n.d.]. U oblasti fleksografije postojale su i tehnologije poput Mosstype omotača izrađenih od teških legura magnezijuma. Druge, naprednije tehnologije su koristile veoma tanke slivove sačinjene od nikla (Stork slivovi) ili biaksijalno orijentisanog poliestera (DuPont slivovi ili Xymid slivovi).

Slivovi koji su danas u upotrebi (tzv. paralelni slivovi) više nisu konični. Njihova upotreba je moguća i prepravkom integralnih cilindara putem bušenja otvora za izlaz komprimovanog vazduha. Najnovije mašine za štampu koriste jednu univerzalnu osovinu na koju se montiraju slivovi različitih prečnika na osnovu željenog koraka ponavljanja. Osnovni princip sliv tehnologije se koristi i kod raster valjaka, omogućavajući tako operaterima laku i brzu izmenu raster valjaka shodno potrebnoj linijaturi i obliku ćelija za štampu određenog naloga.

Slivovi se proizvode od različitih materijala. Najistaknutiji među njima su termoplastični ili termoset kompozitni materijali i nikal koji mogu biti ojačani vlaknima koja sprečavaju pucanje i razdvajanje.

Patentom US4903597 [Hoage i Borski, 1988] su obuhvaćeni slivovi od kompozitnih laminiranih materijala. Ovi slivovi mogu da premoste razliku između samo dve ili tri veličine koraka ponavljanja i mogu da postanu krhki prilikom vulkanizacije. Pored toga, njihova površina je tvrda što znači da je za dobar kvalitet štampe neophodno dodati kompresibilni sloj između njih i štamparskih formi.

Slivovi zaštićeni patentnom US4496434 [Morssinkhof, 1982] se izrađuju od nikla. Proizvode se samo u jednoj debljini što znači da je nemoguće prilagođavanje promeni koraka ponavljanja. Zbog izuzetno tankog zida od 0.127 mm ovaj sliv se lako savija ili oštećuje tokom montaže na osovinu čime postaje neupotrebljiv. Njegova tvrda površina takođe zahteva upotrebu kompresibilnog sloja između sliva i štamparske forme, a i dugotrajnost im je slaba.

Još jedna izvedba slivova je predstavljena u patentu US3978254A [Hoexter i Katz, 1975]. Ovi slivovi se formiraju pomoću tri laminirana sloja, od kojih je svaki formiran od helično namotane plastične trake. Dugotrajnost mu je ograničena, a zbog tvrdoće, kao i prethodno spomenute izvedbe, zahteva upotrebu kompresibilnog sloja.

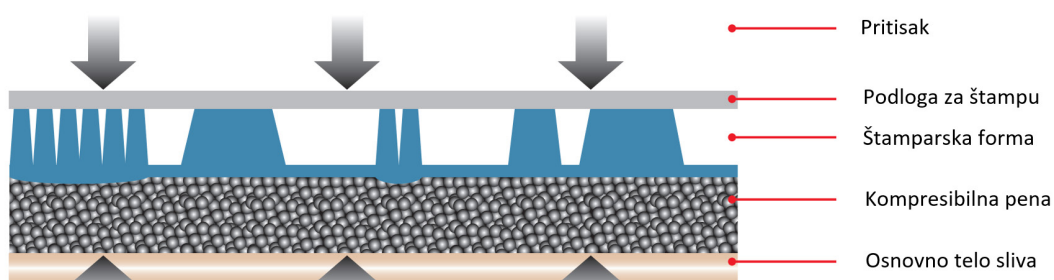
Patentom US5544584A [Thompson i Borski, 1996] je opisan proces proizvodnje slivova livenjem u kalupe poliuretanskog elastomernog materijala koji stvrdnjava pri niskim temperaturama. Za ove slivove je potrebno postaviti u kalup cilindrično osnovno telo sliva. Udaljenost površine tela budućeg sliva od zidova kalupa određuje njihov prečnik dimenzionisan prema željenom koraku ponavljanja. Materijal koji se lije u kalup stvrdnjava pri temperaturi ne višoj od 65 °C da ne bi došlo do oštećenja osnovnog tela sliva. Nakon toga se vrši odnošenje materijala sa površine sliva čime se on dovodi na željene dimenzije pri opsegu pritiska opisanom tzv. dužinom kontaktne zone od najmanje 0.38 mm bez vidljivog pada kvaliteta otiska.

Opseg pritiska je dakle dužina kontaktne zone do koje materijal može biti pritisnut tokom štampe bez osetnog pada u kvalitetu otiska. Debljina očvrslog zida od poliuretana iznosi oko 6.35 mm. Ovakvi slivovi su otporni na različita sredstva korišćena tokom štampe poput etanola, n-propanola, izopropanola, etil acetata i n-propil acetata. Očvršli sloj poliuretana ima tvrdoću od oko 10 do 45 Shore A skale i zaostatak deformacije pri jediničnom opterećenju od 0.06 do 0,4 kg u opsegu od 0.3 do 1.6 %. Ukupna varijacija debljine očvrslog poliuretanskog sloja po celoj dužini sliva nije veća od 25.4  $\mu\text{m}$ .

Posebna i za potrebe štampe visokog kvaliteta veoma bitna podgrupa slivova su veoma dugotrajni slivovi sa penastim amortizujućim slojem.

Tanki bešavni fotopolimerni slivovi sa permanentnim kompresibilnim slojem su osmišljeni tako da daju brojne prednosti u odnosu na konkurentne tehnologije. Primeri ove tehnologije su DuPont Cyrel Round Thin i Stork Print OptiFLEX slivovi. OptiFLEX slivovi su izrađeni od veoma tankog kompozitnog materijala (0.33 mm), bešavnog sloja fotopolimera i crnog LAMS sloja. Vlakna visokih performansi su neophodna za ovako tanku izvedbu, a prema tvrdnji proizvođača ova tehnologija omogućava veći radni vek štamparskih formi, veću brzinu štampe, eliminaciju odizanja štamparskih formi i troškova vezanih za kompresibilne obostrano lepljive trake, kao i bržu pripremu mašine za štampu. Kvalitet štampe je poboljšan kroz tačnost registra, visokokvalitetno i ponovljivo oslikavanje štamparskih formi, kao i veću dugotrajnost u odnosu na tehnologije sa odvojenom štamparskom formom i kompresibilnim slojem [Hershey, 2008].

Princip funkcionisanja kompresibilnih slivova na primeru rotec® kompresibilnih slivova je prikazan na slici 2.4.1. Pod dejstvom pritiska ćelijska struktura kompresibilnog sloja sliva se sabija ispod mesta na štamparskoj formi koja odgovara finim rasterskim površinama ili linijskim elementima, omogućavajući tako štampu bez značajne deformacije. Ispod površina koje predstavljaju pune tonove deformacija kompresibilnog sloja je manja usled raspoređivanja pritiska po većoj površini, što znači da će takve površine lepo nalegati na podlogu.



Slika 2.4.1: Princip funkcionisanja kompresibilnog sloja sliva pod pritiskom [FlintGroup, 2014a]

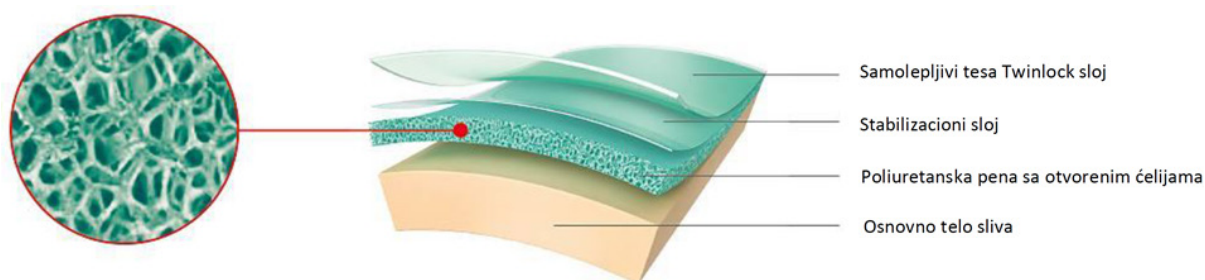
#### 2.4.1 Twinlock® slivovi

Predstavljanjem nove Twinlock® tehnologije slivova izvršen je veliki uticaj na proces montaže štamparskih formi u više od jednog aspekta.

Twinlock® slivovi u potpunosti isključuju potrebu za obostrano lepljivim trakama koje su promenljiva u procesu i mogu varirati po debljini. Takođe, smanjenjem otpada od upotrebe trake, Twinlock® smanjuje karbonski otisak što je oblast ka kojoj sve više kompanija usmerava značajne resurse. Pored toga, kompresibilni i samolepljivi Twinlock® slojevi mogu lako da se nanese na konvencionalne slivove, a povećanje prečnika koje sa sobom donose omogućava upotrebu tanjih ploča u odnosu na ploče korišćene pre oslojavanja [Flexolutions, 2019].

Još jedna prednost upotrebe Twinlock® slivova je isključenje mogućnosti oštećenja sliva skalpelom, što je bila česta nuspojava pri uklanjanju iskorišćene obostrano lepljive trake sa osetljivih konvencionalnih slivova. Otklanjanjem ove opasnosti po slivove ostvaruju se uštede jer oštećeni slivovi ne mogu biti ispolirani od ogrebotina, kao što je to slučaj sa čeličnim cilindrima [Garduno, 2013].

Tolerancije spoljašnjeg prečnika Twinlock® slivova su  $\pm 0.02$  mm. Ovaj proizvod je izgrađen od baznog sliva (polivest), na koji je nanet sloj 1.5 mm debele poliuretanske pene. Na penu je zatim nanet poliesterski stabilizacioni film kao nosilac umreženog, permanentno lepljivog akrilatnog fotopolimera debljine samo 0.5 mm dizajniranog tako da zadržava konzistentna adhezivna svojstva. Sa bočnih strana slivovi su zaptiveni i zaštićeni od uticaja rastvarača [Packaging & Converting Intelligence, 2017; Finna, 2019]. Skica poprečnog preseka sliva je prikazana na slici 2.4.2.



Slika 2.4.2: Skica poprečnog preseka Twinlock® Medium sliva i uvećan prikaz unutrašnjosti kompresibilnog sloja [tesa, 2018]

Poliuretanska pena je termoset i ima strukturu otvorenih ćelija koja omogućava apsorpciju odskakanja na štamparskoj mašini na efikasniji način nego što je to slučaj sa konvencionalnim obostrano lepljivim trakama sa strukturom zatvorenih ćelija [Polymount International BV, 2009]. Nasuprot standardnim penama sa strukturom zatvorenih ćelija koje se urušavaju pod pritiskom i zahtevaju učestalo podešavanje pritiska, Twinlock® ne pokazuje memorijska svojstva i veoma brzo se oporavlja od pritiska tokom štampe. Ovo omogućava korisnicima da povećaju svoju produktivnost povećanjem brzine mašine i pripreme i na taj način povećaju zaradu. U članku autora [Finna, 2019] se navodi da sloj poliuretanske pene ostaje kompresibilan nakon više godina upotrebe omogućavajući održavanje konstantnog kvaliteta štampe u dugačkom vremenskom periodu. Upravo ovaj sloj određuje svojstva, ponašanje i uticaj sliva na procesne parametre tokom štampe, a putem njih i na kvalitet otiska.

Za potrebe patenta W02014095361A1 [Lingier i Meuris, 2012] je izvršeno ispitivanje pojedinih karakteristika Twinlock® slivova sa kompresibilnim slojevima različite rezilijentnosti. Rezultati merenja debljine, kompresibilnosti i oporavka od deformacije su prikazane u tabeli 2.4.1.

Tabela 2.4.1: Svojstva Twinlock® slivova različite tvrdoće [Lingier i Meuris, 2012]

Tip sliva	Debljina	Kompresibilnost	Oporavak od deformacije
Twinlock® Soft	1.945 mm	12.19 %	75.32 %
Twinlock® Medium	2.069 mm	11.28 %	76.11 %
Twinlock® Hard	2.303 mm	8.20 %	76.58 %

Statička kompresija je merena pomoću sonde sa loptastim vrhom (2.7 mm), a uzorak je zadržavan u sabijenom stanju u trajanju od 5 min pod konstantnim pritiskom od 0.005 Pa. Oporavak od deformacije je meren nakon 1.2 i 15 s. Istraživanjem je dokazano da svi

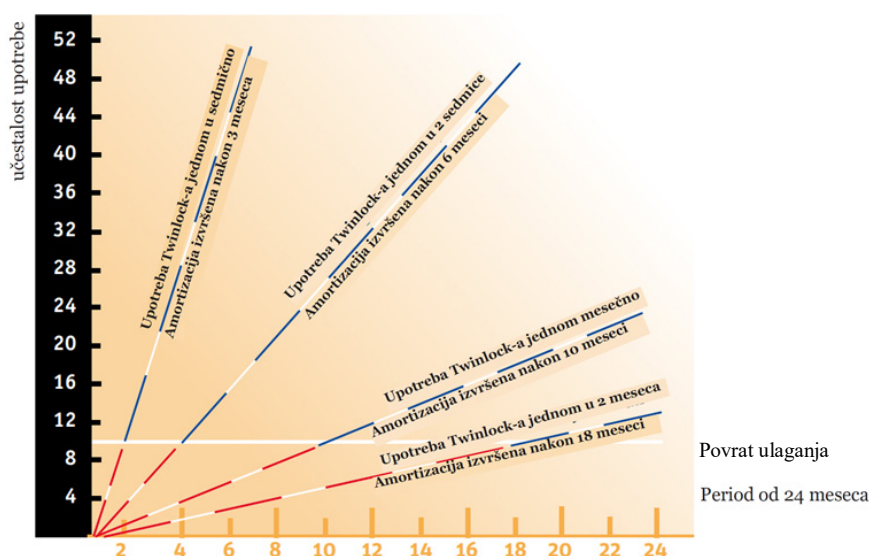
Twinlock® slivovi imaju sličnu i zadovoljavajuću rezilijentnost. Linijska struktura na punim tonovima je manje uočljiva u slučaju Twinlock® slivova sa tvrdom penom, odnosno kompresibilnim (rezilijentnim) slojem. Sa povećanjem tvrdoće opada i broj neodštampanih rasterskih tačaka [Lingier i Meuris, 2012].

Što se tiče korekcije kompenzacionih krivih, u članku koji je napisao [Finna, 2019] se navodi da ona nije potrebna. Naime, porast tonskih vrednosti može biti malo niži u području svetlih tonova (do 5 %), ali to se rešava podešavanjem pritiska na štampi pošto je sistem tolerantan na ovakva podešavanja zbog svojstava i debljine pene.

Poseban premaz od adhezivnog polimera čini mogućom montažu iznova i iznova bez upotrebe obostrano lepljive trake. Jednostavnim procesom čišćenja površine od ostataka boje, prašine i prljavštine se ponovo aktivira njena lepljivost i sliv je spreman za montažu novog seta štamparskih formi. Aktivator koji se koristi za čišćenje je alkohol sa visokom tačkom paljenja [Finna, 2019]. Koraci za montažu štamparske forme na Twinlock® sliv su znatno jednostavniji i zahtevaju manje vremena od koraka neophodnih za montažu štamparskih formi pomoću obostrano lepljivih traka. Postoji 5 koraka montaže:

1. Očistiti sliv;
2. Proveriti da štamparska forma nema oštre i grube ivice;
3. Očistiti donju stranu štamparske forme;
4. Postaviti prajmer na ivice štamparske forme;
5. Montirati štamparsku formu pomoću valjka za montažu [Polymount, 2018].

Povrat investicije može da se očekuje nakon 25 upotreba [Polymount, 2018]. Iako je jednokratna cena nabavke Twinlock® slivova 75 % viša od cene za respektivne konvencionalne tvrde slivove, godišnja cena potrošnih materijala je 94 % manja od cene za obostrano lepljive trake, čija cena kod velikih tiraža može biti i veća od cene samih konvencionalnih slivova. Sabiranjem svih troškova dolazi se do zaključka da su Twinlock® slivovi značajno jeftiniji od konvencionalnih slivova. Vreme amortizacije je zavisno od učestalosti upotrebe, kao što je prikazano na slici 2.4.3.



Slika 2.4.3: Vreme amortizacije Twinlock® slivova u zavisnosti od učestalosti upotrebe [Polymount International BV, 2009]

## 2.5 Poliuretani

Poliuretani (PU) predstavljaju posebnu grupu polimera koji su na više načina drugačiji od većine drugih tipova plastike i pronalaze široku upotrebu usled mogućnosti korišćenja velikog broja hemikalija tokom njihove sinteze, što rezultuje mnoštvom različitih struktura. Poliuretani su trenutno jedan od najuobičajenijih, najsvestranijih i najistraživanijih materijala na svetu [Zia et al., 2014]. Ovi materijali kombinuju izdržljivost i žilavost metala sa elastičnošću gume, što ih čini pogodnim alternativama za metal, plastiku i gumu u različitim proizvodima [Rafiee, 2015; Priscariu, 2011]. Naime, poliuretanski elastomeri su pronašli primenu i upotrebnu vrednost u velikom broju proizvoda različitih namena poput boja, tečnih premaza, elastomera, pena, obuće, nameštaja, točkova i guma, građevinskih materijala, mašina, sportske opreme, elektronike i mnogih drugih [Akindoyo et al., 2016; Engels et al., 2013]. Neki od oblika u kojima se PU danas javlja su samo unapređenja izuma nemačkog profesora dr Otto Bayer-a i njegovih saradnika [Bayer, 1947]. Poliuretanski elastomeri kombinuju odlična mehanička, fizička i hemijska svojstva, a pored toga su u znatnoj meri i biokompatibilni [Christenson, Anderson i Hiltner, 2007; Gunatillake et al., 2003; Kanyanta i Ivankovic, 2010]. Imaju visoku sposobnost oporavka od dejstva napona sabijanja i istezanja, a mogu i da izdrže izlaganje velikom broju faktora okruženja [Chattopadhyay i Webster, 2009; Zia, Bhatti i Bhatti, 2007]. Neke od prednosti poliuretana u odnosu na gumu, metal i plastiku su prikazane u tabeli 2.5.1.

Tabela 2.5.1: Prednosti poliuretana u odnosu na druge materijale [PMA, 2019]

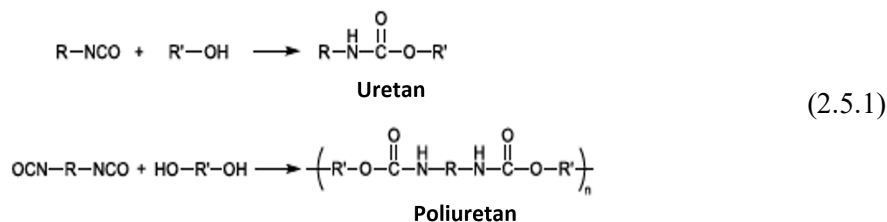
Poliuretan nasuprot gume	Poliuretan nasuprot metala	Poliuretan nasuprot plastike
Otpornost na abraziju	Lagani	Visoka otpornost na udare
Otpornost na sečenje i cepanje	Redukuju buku	Elastičnost
Bolje podnošenje tereta	Otpornost na abraziju	Otpornost na abraziju
Otpornost na ulja	Jeftinija proizvodnja	Promenljiv koeficijent trenja
Otpornost na ozon	Otpornost na koroziju	Rezilijentnost
Otpornost na radijaciju	Fleksibilnost	Jeftinija obrada
Širi opseg tvrdoća	Neprovodni	Otpornost na niske temperature
Mogućnost livenja u kalupe	Laki za oblikovanje	Redukuje buku

Međutim, poliuretanski elastomeri, kao i ostali organski polimeri nisu beskonačno stabilni pod svim uslovima. U nekim slučajevima mogu da pretrpe reakcije koje dovode do gubitka svojstava poput elastičnosti, zatezne čvrstoće, kompresibilnosti, boje ili oblika. Ove promene svojstava se najčešće pripisuju procesima degradacije ili starenja [Singh i Sharma, 2008], gde izloženost toploti, ozonu i učestalim mehaničkim naponima na dnevnoj bazi mogu značajno da izmene hemijski sastav i svojstva poliuretanskih elastomera i dovedu ih čak i do pucanja.

### 2.5.1 Dobijanje poliuretana

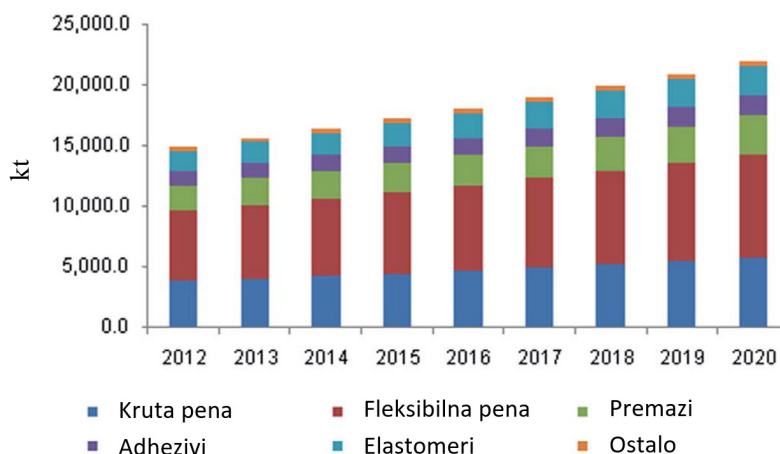
Poliuretanski polimeri su izgrađeni od organskih jedinjenja povezanih uretanskim vezama [Sonnenschein, 2014]. Uretanska grupa je glavna ponavljajuća jedinica u poliuretanima, a dobija se reakcijom alkohola (-OH) i izocijanata (NCO). Pored toga, poliuretani sadrže i druge grupe, kao što su etri, estri, urea i neka aromatična jedinjenja [Zia et al., 2014.; Chattopadhyay i Webster, 2009]. Kada je alkohol diol ili makrodiol, a funkcionalnost izocijana potiče od diizocijanata ili poliizocijanata, poliuretanski polimeri mogu da budu

sintetisani. Najjednostavnija formula poliuretana je linearna i prikazuje dobijanje uretana i poliuretana reakcijom između izocijanata i alkohola (formula 2.5.1).



## 2.5.2 Tipovi poliuretana

Uzevši u obzir raznovrsnost izvora iz kojih poliuretan može da bude sintetisan, kao i širok opseg primenljivosti, poliuretani mogu da se grupišu u nekoliko različitih klasa u odnosu na željena svojstva: kruti, fleksibilni, penasti, termoplastični, vodeni, vezivni, premazni, adhezivni, zaptivački i elastomerni [Szycher, 1999]. Presek udela različitih klasa poliuretana i prognoza za 2020. godinu na svetskom nivou su date na grafiku 2.5.1. Potrošnja poliuretana na svetskom nivou je procenjena na 60.5 milijardi USD tokom 2017., a procenjuje se da će do 2021. iznositi 79 milijardi USD [Statista, 2016].



Grafik 2.5.1: Prognosa proizvodnje poliuretana na svetskom nivou do 2020. godine [GVR, 2015]

### 2.5.2.1 Termoset i termoplastični poliuretani

Svojstva poliuretana najčešće zavise od tipa poliola i izocijanata koji ih sačinjavaju [Charlon et al. 2014]. Generalno posmatrano, mekši i elastičniji polimeri mogu da se proizvode upotrebom fleksibilnih, dugačkih segmenata poliola, a krući i čvršći polimeri se dobijaju pomoću intenzivnijeg umrežavanja. Kombinovanjem dužih lanaca sa srednjim nivoom umrežavanja dobijaju se polimeri koji su pogodni za proizvodnju penastih struktura [Tersac, 2007]. Umrežavanje uretanskih polimera i prepolimera podrazumeva reakciju izocijanatnih grupa (monomera, oligomera ili prepolimera) sa jedinjenjima (monomernim ili oligomernim) koja sadrže hidroksilnu -OH grupu [Saunders i Frisch, 1964]. Jedna od najbitnijih podela poliuretana je na termoplastične i termoset poliuretane [Chattopadhyay i Kothapalli, 2007]. U slučaju da treba dobiti termoplastične (linearne) poliuretane, izocijanati i aktivni materijali koji sadrže vodonik moraju da imaju funkcionalnost od tačno dva, a ako je potrebno dobiti termoset poliuretane, funkcionalnost bar jedne komponente mora biti veća od dva da bi bilo moguće umrežavanje.



Termoset poliuretani su polimeri koji ne mogu da budu pretopljeni i preformirani. Generalno su izdržljiviji od termoplastičnih poliuretana i pronalaze mesto u širokom spektru primena gde su potrebni rezilijentni ili materijali otporni na abraziju ili deformaciju nakon kompresije, kao što je to slučaj kod pena (fleksibilnih ili krutih) [PSI Urethanes Inc., 2019; Gotro, 2013].

Termoplastični poliuretani su polimeri koji mogu da budu pretopljeni i preformirani, koji su elastični i veoma fleksibilni što ih čini materijalima sa širokim spektrom primene [PSI Urethanes Inc., 2019].

Osnovne razlike između termoset i termoplastičnih poliuretana su prikazane u tabeli 2.5.2.

*Tabela 2.5.2: Poređenje svojstava termoset i termoplastičnih poliuretana [PMA, 2019]*

	Termoset poliuretani	Termoplastični poliuretani
Otpornost na abraziju	Viska otpornost na abraziju i sečenje	Dolazi do cepanja u abrazivnim uslovima
Otpornost na toplotu	Izdržava temperature od 250 °C bez problema	Omekšava, deformiše se i degradira na temperaturama višim od 250 °C
Tvrdoća	Širok opseg tvrdoća, pokriva A i D skalu	Uzak opseg tvrdoća samo u A skali
Mogućnost nošenja tereta	Izdržava velike težine po jedinici površine	Ne izdržava velike težine po jedinici površine bez uništenja materijala

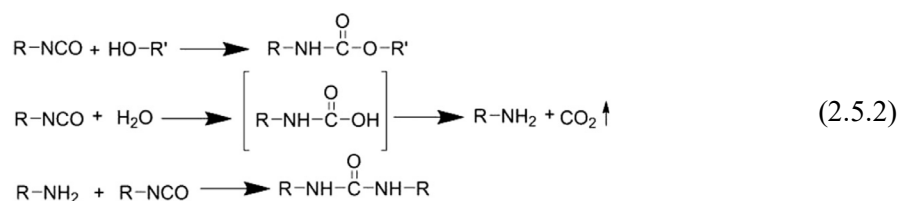
### 2.5.2.2 Poliuretanske pene - tipovi, dobijanje i svojstva

Među širokim spektrom mogućih vidova i oblika poliuretana, najzastupljenije su poliuretanske pene. Naime, tržište poliuretanskih pena je 2018. godine procenjeno na 50.21 milijardi USD, a očekuje se da će do 2023. godine dostići vrednost od 79.77 milijardi USD. [Markets and Markets, 2018]. Pored toga, poliuretanske pene čine polovinu tržišta polimernih pena [Szycher, 2006]. Prema mehaničkim svojstvima i gustinama umrežavanja, poliuretanske pene se klasifikuju u dve grupe, krute i fleksibilne [Randall i Lee, 2003; Wirpsza i Kemp, 1993]. Iako priprema ova dva tipa pena podrazumeva slične reakcije, razlike u njihovim svojstvima nastaju zbog razlika u reaktantima, pogotovu polioliima i izocijanatima [Ashida, 2007; Król, 2008; Defonseka, 2013]. Povećavanjem funkcionalnosti poliola bez promene molekularne mase dolazi do povećanja čvrstine pene, ali i do opadanja zatezne čvrstoće, otpornosti na kidanje i elongacije, dok povećanjem molekularne mase, a zadržavanjem funkcionalnosti poliola dolazi do povećanja zatezne čvrstoće i elongacije [Ashida, 2007]. Po pitanju varijacije u sastavu izocijanata, upotrebom aromatičnih izocijanata se dobija veća temperatura ostakljivanja ( $T_g$ ), Jungov modul i zatezna čvrstoća, ali i smanjenje izduženja pri pucanju i otpornosti na udarce. Upotrebom alifatičnih izocijanata dobijaju se gumoliki materijali sa većim izduženjem pri pucanju i nižom zateznom čvrstoćom [Javni, Zhang i Petrović, 2003].

Fleksibilne poliuretanske pene se dobijaju od suštinski istih sirovina koje se koriste pri dobijanju poliuretanskih elastomera, a to su polioliol, diizocijanat, voda, katalizator i površinski aktivna materija [Artavia i Macosko, 1994; Priester i Turner, 1994]. Najčešće se koriste polietarski ili poliesterski poliolioli sa funkcionalnošću od oko tri. Ne koriste se kratki produživači lanaca, a reakcije umrežavanja između poliola i poliizocijanata se odvijaju po standardnom mehanizmu. Umrežavanje je katalizovano pre svega pomoću kombinacije tercijarnih amina i organotina. Najveća razlika između fleksibilnih poliuretanskih pena i elastomera se ogleda u prisustvu naduvavajućeg agensa koji je za najveći broj poliuretanskih pena voda. Pene dobijene ekspanzijom pomoću vode su najčešće veće gustine. Pritisak u mehurićima ugljen dioksida

dovodi do povećanja zapremine pene 40 do 50 puta. Kada njihov zapreminski udeo premaši 75 % zidovi počinju da im se dodiruju formirajući poliedre. Potpuno razvijeni poliedri se sastoje od mreže međusobno povezanih finih strukturnih ligamenata koji predstavljaju kanale za tok vazduha. Strane poliedara su prekrivene tankim membranama koji prilikom reakcije geliranja pucaju i ćelije se otvaraju. Uklanjanje membrana može biti izvršeno i mehaničkim šokom ili hemijskim putem. Poprečni presek strukturnih ligamenata je najčešće u vidu trostranih hipocikloida, a na mestima spajanja se najčešće spajaju po četiri ligamenta [Gong, Kyriakides i Jang, 2005]. Krute poliuretanske pene se proizvode prema sličnom principu, sa razlikom u funkcionalnosti komponenata koja je preko četiri, da bi se postiglo izraženije umrežavanje, dok se naduvavanje najčešće izvodi fizičkim putem pomoću fluorouglenika.

Reakcije geliranja/polimerizacije (poliol-izocijanat) i naduvavanja/ekspanzije (izocijanat-voda) su gotovo istovremene (formula 2.5.2) [Randall i Lee, 2003; Ashida, 2007]. Reakcijom između poliola i izocijanata se formiraju uretanske veze. Za ekspanziju se koriste dva glavna tipa agenasa: fizički (rastvori sa niskim tačkama ključanja) koji ekspanduju polimer isparavanjem i hemijski koji ekspanduju polimer proizvodnjom ugljen dioksida [Singh, 2002]. Reakcijom izocijanata i vode nastaju amin i ugljen dioksid koji omogućavaju formiranje penaste strukture poliuretanskih pena. Amini nastavljaju da reaguju sa izocijanatima dajući urea veze. Međutim, da bi reakcije geliranja i naduvavanja bile adekvatno izbalansirane, moraju se koristiti i katalizatori. Iako je voda najčešće korišćeni agens za naduvavanje, u literaturi su zabeležene i upotrebe drugih agenasa [Randall i Lee, 2003; Wirpsza i Kemp, 1993].



Nekoliko parametara diktira morfologiju i mikrostrukturu poliuretanskih pena, a glavni među njima su tip poliola, izocijanata, katalizatora, agenasa za ekspanziju, kao i stepen formiranja međuveza nakon reakcije poliola i diizocijanata, segmentno pomeranje urea grupe, priroda interakcije poliola i uree [Akindoyo et al., 2016]. Statistička evaluacija uticaja formulacije na svojstva poliuretanskih pena nastalih od sirovog glicerola je izvršena od strane [Gama et al., 2016] gde je jedan od zaključaka da na mehanička svojstva poliuretanskih pena (povećanje Jungovog modula, čvrstoće i napona pri kompresiji) najveći uticaj ima sadržaj izocijanata. Fleksibilne poliuretanske pene su izgrađene od blokova kopolimera čija je fleksibilnost zasnovana na faznoj razdvojenosti mekih i tvrdih segmenata [Cinelli, Anguillesi i Lazzeri, 2013]. Uretani i urea sačinjavaju tvrde segmente, a polioli formiraju meke segmente [Shufen et al., 2006]. Stoga, poliuretanske pene mogu da se modifikuju i kroz namerno kontrolisanje odnosa ovih segmenata.

Iako korišćeni u manjim količinama, ništa manje važne nisu ni površinski aktivne materije. One smanjuju površinski napon, pomažu u emulgaciji nekompatibilnih sastojaka formulacije, pospešuju nukleaciju mehurića, stabilizuju ćelije i imaju značajan uticaj na veličinu ćelija i permeabilnost vazduha [Lee i Ramesh, 2004]. Oni određuju i građu otvorenih ćelija kroz kontrolisanje nivoa stanjivanja opni i sprečavanje cepanja izazvanog stanjivanjem, sve do momenta otvaranja ćelija [Gama, Ferreira i Barros-Timmons, 2018].

Prema istraživanju sprovedenom od strane autora [Gong, Kyriakides i Jang, 2005], morfologija ćelija je generalno neuređena i podrazumeva mnoštvo mogućih oblika Naime, nakon izvršavanja ekstrakcije 30 ćelija iz pene, pronađeni su poliedri sa 9-17 strana, a prosečan broj je



bio 13.7. Najbrojniji su bili poliedri sa 14 strana (njih 7), a zatim sa 15 i 13 strana. Strane su imale 3 do 7 ivica, sa prosečnim brojem od 4.94 ivice po strani. Prethodna zapažanja su u skladu sa zapažanjima autora [Matzke, 1946], koji je u svom radu okarakterisao 600 mehurića sapuna u peni i zabeležio prisustvo velikog broja nepravilnih poliedara.

Iako su mehanička svojstva poliuretanskih pena pogodna za veliki broj primena, podešavanje svojstava za nove zahteve i primene može da se izvrši i dodavanjem punioca i nanopunioca. Neki od punioca korišćenih za poboljšanje strukturalnih i mehaničkih svojstava poliuretanskih pena ispitanih u literaturi su i celuloza i lignocelulozna vlakna [Silva et al., 2010; Otto et al., 2017], staklena vuna, staklene mikrosfere i vlakna [Ibrahim Marhoon i Kais Rasheed, 2015; Yakushin, Bel'kova i Sevastyanova, 2012; Serban et al., 2016].

Gustina i čvrstoća pena su veoma bitni parametri. [Defonseka, 2013] u svom radu navodi da su pene veće gustine ujedno i izdržljivije jer sadrže više poliuretana. Ukoliko je pena čvršća, to ne mora nužno da znači i da je izdržljivija i dugotrajnija. Iako veća gustina kod pena generalno znači i veću čvrstoću, gustina i čvrstoća su ipak nezavisni parametri [Obi, 2017]. Međutim, u istraživanjima koje su sprovedli, autori [Gök et al., 2012] su došli do zaključka da je čvrstoća materijala direktno srazmerna njegovoj gustini.

### 2.5.3 Mehanička svojstva poliuretana

Kod polimera, parametri poput strukture lanaca, tipa grananja i molekularne mase su jedni od ključnih elemenata koji utiču na promene mehaničkih svojstava [Tang et al., 2001; Antić, Govedarica i Đongalić, 2003; Magniez, De Lavigne i Fox, 2010]. Razlike u mehaničkim svojstvima se umnogome ogledaju u ponašanju materijala tokom različitih deformacija.

Nauka koja se bavi proučavanjem deformacija i tečenja materijala u tečnom, istopljenom ili čvrstom stanju u kontekstu elastičnosti i viskoziteta materijala se naziva reologija. Ispitivanja se vrše deformisanjem materijala do tačno određenog nivoa i tačnim merenjem rezultujućeg napona razvijenog unutar materijala. Naponi koji se razvijaju su povezani sa svojstvima materijala kroz Hukove i Njutnove zakone [Luckenbach, n.d.]. Neki od najznačajnijih pojmova, pojava i zakona u reologiji su:

- **Elastičnost** - svojstvo materijala da skladišti energiju deformacije, najjednostavnije protumačeno kao sposobnost materijala da se nakon deformacije vrati u početno stanje;
- **Viskozitet** - mera otpornosti materijala na tečenje;
- **Viskoelastičnost** - odgovor materijala na nivo deformacije ili na silu kroz ispoljavanje elastičnih, viskoznih ili kombinacije ovih svojstava. Većina polimera je viskoelastična, a njihova mehanička svojstva pokazuju očiglednu zavisnost od vremena i temperature;
- **Napon** - raspodela sile po površini na koju dejstvuje;
- **Deformacija** - mera promene oblika materijala. Promena u deformaciji tokom vremena je brzina smicanja;
- **Hukov zakon** - definiše mehaničko ponašanje idealnog čvrstog tela dovođenjem u korelaciju deformacije ( $\epsilon$ ) sa rezultujućim naponom ( $\sigma$ ) putem faktora pod nazivom modul ( $E$  ili  $G$ ). Moduli su mera krutosti materijala (sposobnosti da se opire deformaciji). Hukova zona je linearna zona u kojoj se modul ne menja sa promenom deformacije;
- **Njutnov zakon** - korelacija slična Hukovom zakonu, ali za idealan viskozni fluid. U linearnu korelaciju se dovode napon ( $\sigma$ ) i brzina smicanja ( $d\epsilon/dt$ ), što je prikazano jednačinom (2.5.3)

$$\sigma = \eta \, d\varepsilon/dt \quad (2.5.3)$$

gde je  $\eta$  koeficijent viskoznosti.

Fluid je njutnovski ukoliko pri smicanju njegov viskozitet ne zavisi od brzine smicanja.

Polimeri se uglavnom ponašaju kao viskoelastični materijali, što ih smešta između viskoznih tečnosti i elastičnih čvrstih tela. Elastična čvrsta tela prate Hukove zakone, odnosno napon je proporcionalan deformaciji [Bhomwick, 2009].

Pored unutrašnjih događanja, veruje se da spoljašnji faktori poput brzine deformisanja takođe imaju veliki uticaj na mehanička svojstva i ponašanje polimera.

Termini koji se najčešće pojavljuju kod opisivanja mehaničkih svojstava su:

- **Granica elastičnosti** (proporcionalnosti) - najveći napon pri kom su napon i deformacija proporcionalni;
- **Jungov modul elastičnosti** - odnos napona i deformacije ispod granice elastičnosti;
- **Rezilijentnost** – jedna od manje poznatih mehaničkih karakteristika određena količinom energije ili rada skladištenog po jedinici zapremine na granici elastičnosti;
- **Kriva napon-deformacija** - grafik napona naspram deformacije kroz čitav opseg opterećivanja uzorka do njegovog propadanja.

### 2.5.3.1 Kriva napon-deformacija

Da bi se mehanička svojstva ispitala, potrebno je proučiti krive napon-deformacija poliuretanskih pena dobijene putem mehaničkih eksperimenata. Proteklih godina sproveden je značajan broj istraživanja mehaničkih svojstava poliuretanskih pena makroskopskim eksperimentima [Wang et al., 2017], koji su uglavnom podrazumevali testiranje kompresije [Koohbor, Kidane i Lu, 2016; Koohbor et al., 2016], zateznih karakteristika [Bharath Kumar et al., 2016; Yang et al., 2017] i mehaničkog zamora [Chen et al., 2012; Wang et al., 2016]. Pored toga za objašnjavanje makroskopskih svojstava su korišćene i mikrostrukture [Xu, Wang i Zhu, 2017; Guo et al., 2018]. Na mikro nivou, pojedina istraživanja su bila usmerena na analizu mikrostrukture sa SEM snimaka [Koohbor, Ravindran i Kidane, 2017; Bao et al., 2016].

Važno je napomenuti da je mehaničko ponašanje pena tokom istezanja drugačije. Pena na primer može pokazivati plastičnost pri sabijanju, a krhkost pri istezanju usled koncentracije napona na pukotini [Gibson i Ashby, 1999]. Twinlock<sup>®</sup> slivovi su pored sabijanja tokom montaže štamparskih formi i štampe podvrgnuti i silama istezanja pri odlepljivanju štamparskih formi, što može dovesti do oštećenja strukture kompresibilnog poliuretanskog sloja.

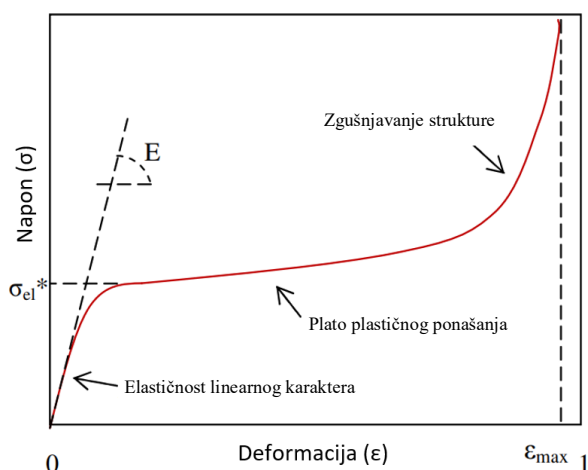
U polju teorije su za opisivanje kompresionih krivih napon-deformacija poliuretanskih pena predloženi i brojni modeli. Oni mogu da se podele u dve grupe. Jedni od njih su teoretski [Gibson i Ashby, 1999; Kontou, Spathis i Kefalas, 2012; Safari et al., 2012; Río i Rodríguez, 2012; Omar, Akil i Ahmad, 2011a; Lu, Huang i Yuan, 2015; Kim et al., 2017], a drugi su fenomenološki [Rusch, 1970; Avalor, Belingardi i Ibba, 2007; Dar et al., 2014; Chen et al., 2015; Yonezu et al., 2016; Azizi, Davies i Bajaj, 2012]. Na primer, [Gibson i Ashby, 1999] su koristili statistički mikromehanički model da bi opisali ponašanje pri kompresiji. Naime, oni su se bavili deformacijama pojedinačnih strukturnih ligamenata unutar penastog materijala. [Río i Rodríguez, 2012] su eksperimentalno istraživali odgovor na kompresivno mehaničko opterećivanje polimera, kao funkciju brzine deformisanja i temperature. Za objašnjenje fenomena omekšavanja i očvršćavanja pena pod kompresivnim opterećenjem, autori [Kim et al., 2017] su predložili viskoelastični model.

U radu [Liu et al., 2019] vršen je uniaksijalni test kompresije prema ASTM D1621-10 standardu [ASTM International, 2010] na penama različitih gustina i nosivosti. Prema autorima [Srivastava i Srivastava, 2014] gustina ima glavni uticaj na mehanička svojstva. Prema tome, pene mogu da se u odnosu na razlike u procesu kompresivnog propadanja podele na poliuretanske pene niske gustine i poliuretanske pene visoke gustine.

Za razliku od fizičkih modela, fenomenološki modeli poput onih korišćenih u istraživanju autora [Fang et al., 2009], koji koriste kratku jednačinu ili jednačine kao konstitutivni model, su pogodniji za inženjerske primene. Mehaničko ponašanje mnogih polimera je već eksperimentalno proučeno i razvijeni su modeli za npr. PC, ABS, PMMA [Cao, Wang i Wang, 2014; Boyce, Parks i Argon, 1988; Duan et al., 2002; Louche et al., 2009].

Kod poliuretanskih pena, mikrostruktura određuje makroskopska mehanička svojstva materijala [Liu et al., 2019].

Karakteristična kriva napon-deformacija poliuretanske pene niske gustine dobijena uniaksijalnom kompresijom uzorka pri brzini od 10 mm/min u radu [Liu et al., 2019] je prikazana na grafiku 2.5.2. Kao što se na grafiku vidi, kriva može da se podeli na tri dela. Prvi deo predstavlja fazu elastičnosti linearnog karaktera, drugi predstavlja fazu plastične deformacije, a treći fazu zgušnjavanja structure materijala. U prvoj i trećoj fazi napon značajno raste sa promenom deformacije, dok u drugoj fazi napon poliuretanske pene raste sporo u odnosu na deformaciju. Generalno verovanje je da faza elastičnosti linearnog karaktera i faza zgušnjavanja structure pokazuju elastična svojstva, a faza plastične deformacije plastična svojstva [Avalle, Belingardi i Ibba, 2007]. Jungov modul može da se pronađe postavljanjem linije kroz region koji odgovara reakciji elastičnog karaktera na krivoj napon-deformacija i određivanjem nagiba te linije. Modul platoa plastičnog ponašanja se pronalazi na sličan način postavljanjem linije kroz region platoa plastičnog ponašanja. Napon plastičnog kolapsa se nalazi u tački preseka ove dve linije. Za elastomerne pene, ova presečna tačka se naziva napon elastičnog kolapsa [de Vries, 2009].



Grafik 2.5.2: Karakteristična kriva napon-deformacija poliuretanske pene niske gustine [Liu et al., 2019]

### 2.5.3.2 Rast deformacije pod konstantnim naponom i relaksacija napona

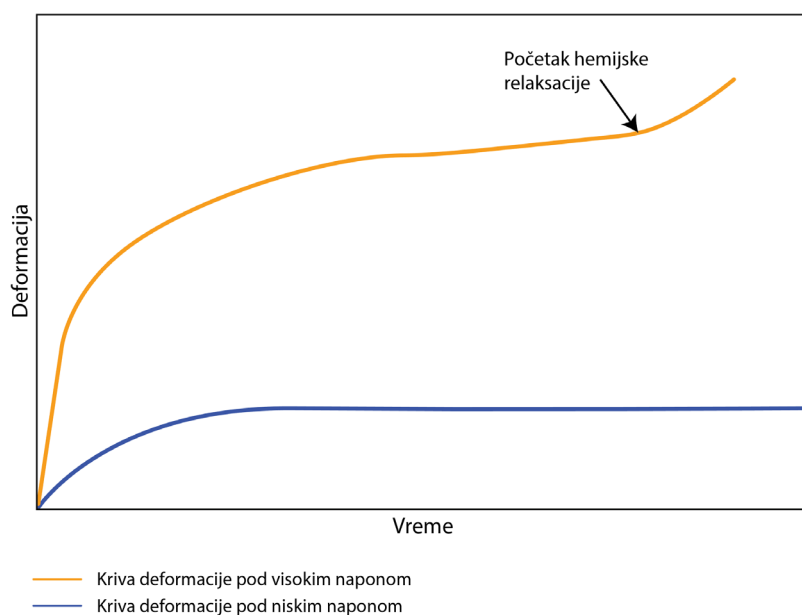
Zadržavanjem elastomera u deformisanom stanju na bilo koji vremenski period dolazi do dve promene. Jedna od njih je rast deformacije pod konstantnim naponom, a druga je relaksacija napona, odnosno pad napona pod konstantnom deformacijom. Do njih dolazi pri bilo kom nivou napona pri kompresivnim, zateznim i opterećenjima smicanja. Vrednosti su im različite za svaki tip opterećenja i veće su pod zateznim naponom u odnosu na jednak napon sabijanja.

Rast deformacije pod konstantnim naponom se izražava u procentima kao ukupna deformacija od koje je oduzeta inicijalna deformacija, u odnosu na inicijalnu deformaciju. Prema tome, određivanje rasta deformacije se vrši nakon zadržavanja uzorka pod konstantnim naponom u vremenskom intervalu koji može iznositi minut, pet minuta ili i ceo dan. Isprva, deformacija rapidno raste, a zatim usporava do relativno uniformnog odnosa [ELIS, n.d.]. Izloženost velikom opterećenju na duže periode vremena može nakon povećanja deformacije da dovede i do većih promena koje mogu da dovedu do pucanja materijala [Molded Dimensions, LLC, 2019].

Na grafiku 2.5.3 je prikazana zavisnost rasta deformacije pod konstantnim naponom i vremena i ukazano je na postojanje dva različita procesa [Derham, Southern i Thomas, 1970].

Prvi je fizička, odnosno primarna relaksacija koja potiče od preslaganja molekula polimera i čestica punioca dok deformisani elastomer prilazi ravnotežnom stanju. Istraživanja rasta deformacije pod konstantnim naponom su pokazala da gotovo linearna zavisnost rasta deformacije po logaritmovanom vremenu važi i za ciklične testove i statičke testove, mada kod dinamičkih deformacija brže raste [Lewis, 1980].

Drugi proces je hemijska, odnosno sekundarna relaksacija izazvana cepanjem veza umreženog elastomera pod dejstvom napona. Glavna degradacija potiče od oksidacije, međutim pri povišenim temperaturama dolazi i do izraženijeg anaerobnog starenja gde dolazi do pucanja temperaturno nestabilnih međuveza. Za razliku od fizičke degradacije, zavisnost hemijske degradacije i vremena je linearna i temperaturno više zavisna, tako da pri normalnim temperaturama ponašanje elastomera diktira fizička relaksacija, a da bi i uticaj hemijske relaksacije postao primetan mora da prođe neko vreme [Lewis, 1980].



*Grafik 2.5.3: Zavisnost rasta deformacije pod konstantnim naponom i vremena [Molded Dimensions, LLC, 2019]*

Povećanje deformacije prema tome može biti umanjeno smanjivanjem napona i izbegavanjem visokih temperatura [Molded Dimensions, LLC, 2019].

Pre zone gde može nastati pucanje materijala, sa uklanjanjem napona, uzorak će pokušati da se vrati na svoje prvobitne dimenzije. Taj povrat nije potpun, a nepovraćeni deo se naziva trajna deformacija.

Relaksacija napona predstavlja pad napona pri konstantnoj deformaciji tokom određenog vremenskog perioda. Najčešće se prikazuje kao procenat napona koji je preostao nakon proizvoljnog vremenskog perioda pri zadatoj temperaturi [Molded Dimensions, LLC, 2019].

Uobičajeni standardi za merenje rasta deformacije pri konstantnom naponu su ASTM D2990 i ASTM E139 [ELIS, n.d.].

### 2.5.3.3 Histerezis

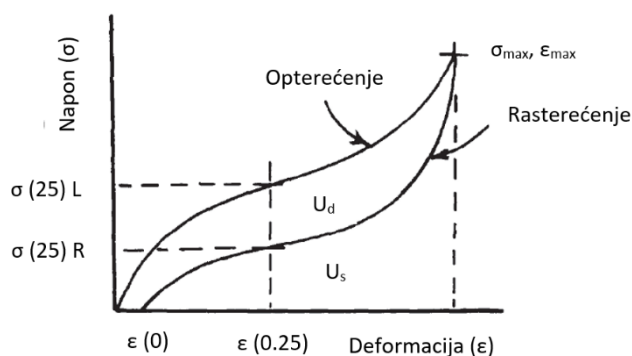
Da bi se postigla deformacija materijala neophodna je određena količina energije. Oporavak od deformacije takođe iziskuje određenu količinu energije. Za poliuretane odnos vraćene energije tokom oporavka od deformacije i energije koja je izazvala deformaciju se naziva rezilijentnost poliuretana.

Materijal koji je idealno elastičan će tokom oporavka od deformacije vratiti svu energiju. Međutim, viskozni materijali će vratiti manje energije tokom oporavka jer se deo ulazne energije gubi u formi toplote. Gubitak energije usled unutrašnjeg trenja unutar elastomera se naziva histerezis i jednak je procentu gubitka energije po ciklusu [Gallagher, 2019]. Materijal visoke rezilijentnosti će delovati veoma “živo” jer se sva uložena energija vraća. Materijal niske rezilijentnosti deluje “umrtvljeno” jer se uložena energija gubi u formi toplote.

Histerezis petlja koja ukazuje na nivo kašnjenja deformacije za naponom se definiše kao gubitak energije po jedinici zapremine materijala [Lei et al., 2014].

Statička deformacija tipične fleksibilne poliuretanske pene sa otvorenim ćelijama je prikazana zatvorenom petljom napon-deformacija pri konstantnoj brzini deformacije (grafik 2.5.4). Površina ispod petlje opterećenja predstavlja apsorbovanu gustinu energije  $U_a$  ( $J/m^3$ ), površina ispod krive rasterećenja odgovara gustini uskladištene energije  $U_s$ , a površina oivičena histerezis petljom predstavlja gustinu rasute energije  $U_d$  [Hilyard, 1994]. Materijal se karakteriše odnosom energija  $U_d/U_a$  (poznatije kao histerezis) i  $U_d/U_s$ . Kada je ciklus deformacije obavljen pri konstantnoj brzini deformacije, važi da je  $U_a = U_d + U_s$  iz čega se izvlači odnos prikazan formulom 2.5.4.

$$U_d/U_s = U_d/U_a - 1 \quad (2.5.4)$$



Grafik 2.5.4: Eksperimentalno određivanje parametara gubitka energije za ciklus kompresije pri konstantnoj brzini deformacije [Hilyard, 1994]

Za linearne viskoelastične materijale, kada ciklično opterećenje dostigne ravnotežu (histerezis petlja napon-deformacija se stabilizuje), napon i deformacija se menjaju sinusoidalno, međutim deformacija kasni za naponom sa određenom faznom razlikom [Lu, Neidig i Wyatt, 2016].

Rastojanje između krive opterećenja i krive rasterećenja za elastomerne materijale raste sa porastom brzine deformacije. Kada bi promene napona bile ekstremno spore, ova dva dela krive bi se spojila i elastomer bi delovao kao da je idealno elastičan materijal sa istom vrednošću maksimalnog napona kao idealno elastičan materijal. Međutim, to nije slučaj, pa je prostor oivičen sa ova dva dela krive, poznatiji kao histerezis petlja, proporcionalan količini generisane toplote [MacPhee, 1998].

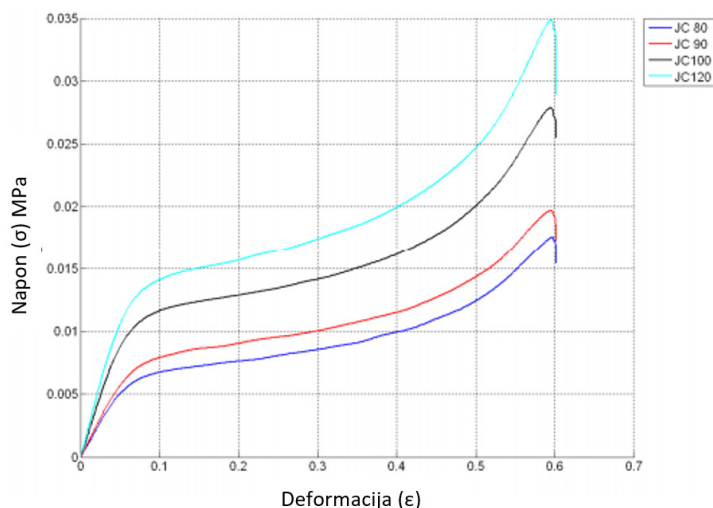
## 2.5.4 Parametri koji utiču na mehanička svojstva poliuretanskih pena

### 2.5.4.1 Gustina pene

Gustina je težina po jedinici zapremine. Najčešće se izražava u  $\text{g/cm}^3$ , dok se podaci o njoj mogu dobiti od uzorka bilo koje veličine. Gustina nije u relaciji sa veličinama pora. Naime, pene sa grubim i finim porama mogu da imaju jednaku gustinu. Gustina takođe ne predstavlja meru čvrstoće, krutosti ili mogućnost nošenja opterećenja. To je definisano putem mere deflekcije kompresivne sile koja je definisana naponom koji je potreban da se uzorak drži kompresovanim za 25 % nakon jednog minuta. Što je vrednost napona veća, to je veća sposobnost nošenja opterećenja [QFP, 2019].

Autori [Chen et al., 2015] su zaključili da ekspanđovani polistiren veće gustine ima veći kapacitet apsorpcije energije nego kada mu je gustina manja.

[De Vries, 2009] kroz istraživanje definiše uticaj relativne gustine pene na krivu napon-deformacija (grafik 2.5.5). Sa povećanjem gustine, raste i Jungov modul, modul platoa plastičnog ponašanja i napon elastičnog kolapsa, a smanjuje se deformacija pri kojoj počinje zgušnjavanje strukture. Više o mehanizmima koji do toga dovode biće navedeno u uticaju mikrostrukture, odnosno ćelija u materijalu.



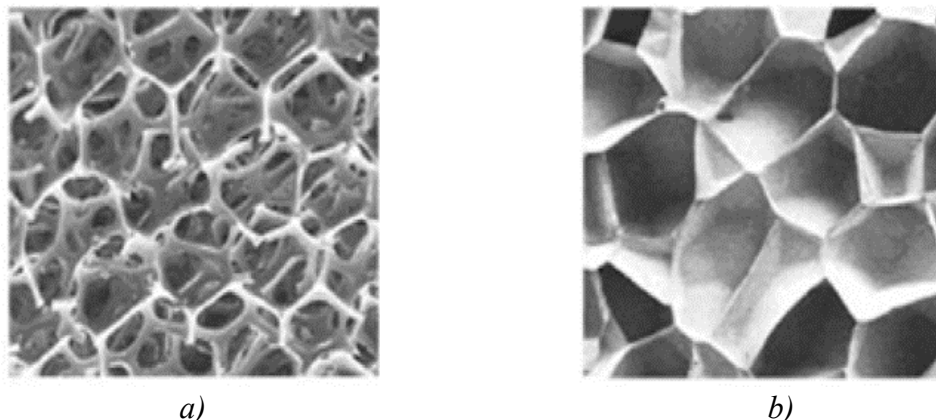
Grafik 2.5.5: Krive napon-deformacija JC pena različitih gustina (80, 90, 100 i 120) pri konstantnoj brzini deformacije [de Vries, 2009]

Granica elastičnosti raste gotovo 100 % sa porastom gustine pene od samo 20 % [Lu, Neidig i Wyatt, 2016].

Gustina pene se kontroliše količinom gasa ispuštenog tokom reakcije vode sa izocijanatom [Saint-Michel et al., 2006].



Prema autorima [Alzoubi, Al-Hallaj i Abu-Ayyad, 2014] elastična svojstva zavise od relativne gustine pene, oblika i veličine poprečnog preseka strukturnih ligamenata, Jungovog modula i Poasonovog koeficijenta. Pene poput fleksibilne poliuretanske pene su ćelijske čvrste supstance čija se mikrostruktura sastoji od mreže strukturnih ligamenata (otvorene ćelije) ili panela (zatvorene ćelije) što je prikazano na slici 2.5.1. Šupljine koje su njima oivičene stvaraju ćelije koje su ispunjene gasom, tečnošću ili su samo otvorene.



Slika 2.5.1: Mikroskopski snimak pene sa a) otvorenim; b) zatvorenim ćelijama [Alzoubi, Al-Hallaj i Abu-Ayyad, 2014]

U radovima autora [Gibson i Ashby, 1988] i [Alzoubi, Tanbour i Al-Waked, 2011] su opisani uticaji gustine pene na mehanička svojstva ćelijskih čvrstih tela sa zatvorenim i otvorenim ćelijama. [Gibson i Ashby, 1982] su opisali odnose gustina kao funkciju modula elastičnosti prema odnosima jačina granica elastičnosti pena sa otvorenim ćelijama za region elastičnosti linearnog karaktera na način prikazan formulom 2.5.5.

$$E^*/E_s = C_1(\rho^*/\rho_s)^2 \quad (2.5.5)$$

gde je  $E^*$  Jungov modul pene,  $E_s$  Jungov modul materijala zida ćelija,  $\rho^*$  i  $\rho_s$  su respektivno gustine pene i materijala zida ćelija od kog je pena sačinjena, a  $C_1$  je konstanta dobijena testiranjem nekolicine uzoraka pena različitih gustina.

Na svim uzorcima pena su izvršeni uniaksijalni kvazi-statički testovi kompresije. Zaključeno je da Jungov modul elastičnosti raste sa povećanjem gustine pene. Modul elastičnosti rapidno raste kod uzoraka pena sa većim gustinama, a naponi izmereni na 5 % i 70 % deformacije rastu uporedo sa gustinom [Alzoubi, Al-Hallaj i Abu-Ayyad, 2014].

Eksperimentalno je dokazano da histerezis [Kreter, 1985; Lee, 1985; Cavender, 1990] i pad napona usled zamora [Dwyer, 1976; Courtney, Charlton i Seal, 1989] opadaju sa rastom gustine pene. Ovi zaključci su potkrepljeni opservacijama autora [Dwyer, 1976] koji je pokazao da kod fleksibilnih poliuretanskih pena, redukovanje gustine nije glavni razlog povećanog zamora (odnosno pada napona) već su to nivoi vode i fizičkih naduvavajućih agenasa koji utiču na izdržljivost pene. On je zaključio da pene veće gustine pokazuju manji gubitak zbog zamora, a samim tim i manji histerezis kroz smanjivanje sadržaja uree u čvrstom polimeru.

#### 2.5.4.2 Nivo i brzina deformacije

Prema [Molded Dimension, LLC., 2019] sa porastom inicijalne deformacije raste i nivo rasta deformacije pod konstantnim naponom.

Na primeru komercijalno dostupne poliuretanske pene sa otvorenim ćelijama u radu [de Vries, 2009] je pokazano da je zona elastične promene u početku linearna, ali da nakon deformacije od oko 4 % nagib krive napon-deformacija počinje da opada i na deformaciji od oko 10 % formira plato elastičnog kolapsa. Pri deformaciji od oko 60 % dolazi do zgušnjavanja strukture. Nakon kompresije, uzorak pene se gotovo potpuno vraća na početne dimenzije što znači da je deformacija potpuno elastična. Pri deformaciji od oko 60 % primećena je i relaksacija napona. Te tri karakteristične zone krive napon-deformacija pri sabijanju su tipične za elastomerne pene [Gibson i Ashby, 1988].

Pored nivoa deformacije, brzina deformacije može da ima veliki uticaj na mehanička svojstva polimera. Kako se primena polimera proširila, tako je i uticaj faktora brzine deformacije kod istraživača počeo da zavređuje veću pažnju. Proteklih godina je razvijeno više eksperimentalnih pristupa proučavanju uticaja brzine deformacije na mehanička svojstva polimera [Sarva et al., 2007; Río i Rodríguez, 2010; Mulliken i Boyce, 2006]. Jedna od najvažnijih karakteristika koje se koriste za procenu mehaničkih svojstava materijala je kriva napon-deformacija. Polimeri se mogu svrstati u različite klase prema parametrima u oblasti granice elastičnosti.

[Lu, Neidig i Wyatt, 2016] su eksperimentalno zaključili da su Jungov modul i napon elastičnog izvijanja pene očigledno zavisni od brzine deformacije. Vrednosti Jungovog modula i napona elastičnog izvijanja pri brzini deformacije od  $200 \text{ s}^{-1}$  su oko petostruko, odnosno dvostruko veći od onih na  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . Prilikom otklanjanja opterećenja primetno je izraženo histerezis ponašanje gde deformacija pri povratku kasni za naponom, ali nakon dovoljno vremena vraća se na nulu sa malom trajnom deformacijom.

U istraživanju autora [Omar, Akil i Ahmad, 2011a] svi testirani uzorci su pokazali rastući trend u naponu granice elastičnosti sa porastom brzine deformacije. Nasuprot tome, deformacija na granici elastičnosti se značajno smanjuje sa porastom brzine deformacije. Ovaj pad se pripisuje porastu adiabatične temperature unutar uzorka sa povećanjem brzine deformacije [Omar, Akil i Ahmad, 2011b; Guo i Li, 2007] gde akumulirana toplota oslabljuje materijal. Još jedno objašnjenje ovog fenomena dali su autori [Nakai i Yokoyama, 2008] gde je on direktno povezan sa akumuliranjem mikro oštećenja tokom deformisanja. Autori su naveli da što je veća brzina deformacije, to je ozbiljnija šteta koja je načinjena uzorku pošto mora da nastane više pukotina zbog adaptacije većih deformacija pri većim brzinama. Rezultat je da kombinacija obe pojave prouzrokuje pad deformacije svih polimernih materijala pri granici elastičnosti sa porastom brzine deformacije.

Teoretski, pod udarnim opterećenjima sabijanje može da bude klasifikovano na sabijanje sa visokom ili niskom energijom [Omar, Akil i Ahmad, 2011a]. Veruje se da sabijanje sa visokom energijom obično dovodi do momentalnog otkaza materijala. Međutim, oštećenja od sabijanja sa niskom energijom se teško detektuju, a mogu dovesti do iznenadnih i katastrofalnih otkaza. Kapacitet apsorbovane energije je bio jedan od glavnih parametara u radu [Omar, Akil i Ahmad, 2011a]. Apsorpcija energije se najčešće određuje merenjem površine ispod krive napon-deformacija do određene deformacije. U prethodno navedenom radu, ova granica deformacije je iznosila 2.5 %. Odnos između apsorbovane energije i brzine deformacije je takav da energija deformacije raste sa porastom brzine. Autori su primetili da testirani polimeri imaju različite krive napon-deformacija i na osnovu toga su razvrstani u klase elastičnih i krtih polimera. Zaključci koji se izvode iz njihovog istraživanja su da mehanička svojstva polimera umnogome zavise od brzine deformacije. Napon na granici elastičnosti, modul kompresije i kompresivna snaga rastu proporcionalno sa porastom brzine deformacije, a deformacija pri granici elastičnosti nasuprot njima pokazuje postepen pad.



[Wang et al., 2016] su sprovedeli kvazi statičke i ciklične testove deformisanja polikarbonatnog ABS pri različitim brzinama deformacije ( $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  i  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>) i različitim temperaturama (20, 50 i 80 °C). Testovi cikličnog kompresovanja su sprovedeni pri različitim brzinama deformacije ( $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  i  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>) na sobnoj temperaturi (20 °C). Nivo deformacije je iznosio najmanje 80 %. Zaključeno je da na mehaničko ponašanje polikarbonatnog ABS u velikoj meri utiče brzina deformacije, ali i temperatura prilikom podvrgavanja monotonom opterećenju. Napon granice elastičnosti značajno raste sa porastom brzine deformacije ili sa padom temperature, a napon pri većim brzinama deformacije raste brže nego pri manjoj brzini deformacije. Takođe, pri većim brzinama deformacije je i Jungov modul značajno veći. Ponašanje pri cikličnom testu je takođe zavisno od brzine deformisanja i nije linearno elastično pri otpuštanju i ponovnom sabijanju. Sa porastom brzine deformacije raste i napon pri sabijanju i ponovnom sabijanju nakon otpuštanja.

Kada se ekspanđovani polistiren podvrgne sabijanju, vazduh koje je zarobljen unutar ćelija se kompresuje i stvara se viskozna sila. Viskozne sile rastu sa brzinom deformacije [Ouellet, Cronin i Worswick, 2006]. [Croop i Lobo, 2009] su otkrili da je ponašanje ekspanđovanog polistirena takvo da je on krući pošto vazduh zarobljen unutar ćelija stvara „jastučice” usled nemogućnosti da napusti materijal pri visokim brzinama deformacije. [Chakravarty et al., 2003] su ustanovili da je za promene svojstava penastih materijala pri deformacijama veće brzine zaslužna promenljiva priroda gasa pri sabijanju. Uticajem brzine deformacije su se u svom radu bavili i [Di Landro, Sala i Olivieri, 2002]. Oni su otkrili da sa velikim porastom brzine deformacije blago raste i modul elastičnosti materijala. Takođe, napon na granici elastičnosti i napon platoa plastičnog ponašanja rastu sa porastom brzine deformacije [Tedesco, Ross i Kuennen, 1993]. Sličnu stvar su zapazili i [Song et al., 2005] kada su rekli da sa porastom brzine deformacije raste i modul elastičnosti. [Chen et al., 2015] su istraživanjem došli do zaključka da kada je brzina deformacije veća od 113 s<sup>-1</sup>, kompresivna snaga ekspanđovanog polistirena raste rapidno, ali se nivo deformacije pri zgušnjavanju strukture smanjuje. Jungov modul ne pokazuje značaju zavisnost od brzine deformacije u testiranom rasponu brzina (1-280 s<sup>-1</sup>).

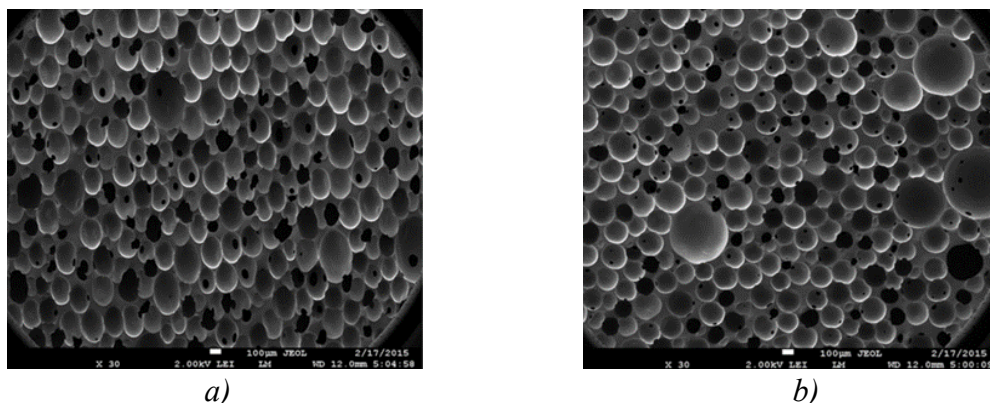
Sprovođenjem eksperimenata na poroznom polipropilenu (94 % poroznosti) sa sistemom zatvorenih ćelija [Yonezu et al., 2016] su otkrili da makroskopska kriva napon-deformacija pokazuje zonu platoa kada materijal istrpi plastičnu deformaciju, kao i da je uticaj brzine deformacije izražen u ponašanju materijala u zoni platoa.

#### **2.5.4.3 Uticaj mikrostrukture na svojstva pene pri različitim uslovima**

Poznato je da su na makroskopskom nivou polimerne pene veoma osetljive na brzinu deformacije. Za veliki broj polimernih pena je zabeležena eksponencijalna zavisnost napona pri otkazivanju materijala i brzine deformacije [Ouellet, Cronin i Worswick, 2006]. Takođe je poznato da prelaz u osetljivosti na brzinu deformacije ovih materijala uglavnom nastupa pri brzinama većim od 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, gde napon otkaza i modul elastičnosti materijala rapidno prate rast brzine deformacije [Song et al., 2005; Zhao, 1997; Nagy, Ko i Linholm, 1974; Yi et al., 2006; Mulliken i Boyce, 2006; Koohbor, Kidane i Lu, 2016].

Veliki broj istraživanja koja obuhvataju mikrostrukturu pena sa otvorenim ćelijama je pokazao da je većina ćelija unutar pene u nekoj meri izdužena u određenom pravcu koji potiče iz procesa proizvodnje. Tomografijom X-zracima, [Perrot, Panneton i Olny, 2007] su izmerili proporciju od 1.26 do 1.56 kod aluminijumskih pena sa otvorenim ćelijama. [Jang, Kraynik i Kyriakides, 2008] i [Gong, Kyriakides i Jang, 2005] su istražili geometrijske karakteristike čitave serije poliester uretanskih pena sa otvorenim ćelijama. Istraživanja su podrazumevala geometriju ćelija i strukturnih ligamenata, kao i raspored materijala u ligamentima i čvorovima. Zaključak koji su izveli je da je anizotropni odnos generalno između 1.2 i 1.5.

[Lu, Neidigk i Wyatt, 2016] su u svom istraživanju koristili uzorke nove i pene stare 30 godina. Iako je prosečna veličina ćelija gotovo jednaka veličini ćelija nove pene (200  $\mu\text{m}$ ), oblik ćelija je za nijansu drugačiji. Naime, ćelije nove pene imaju ovalan oblik (slika 2.5.2).



*Slika 2.5.2: Mikroskopski snimak ćelija a) nove; b) 30 godina stare pene [Lu, Neidigk i Wyatt, 2016]*

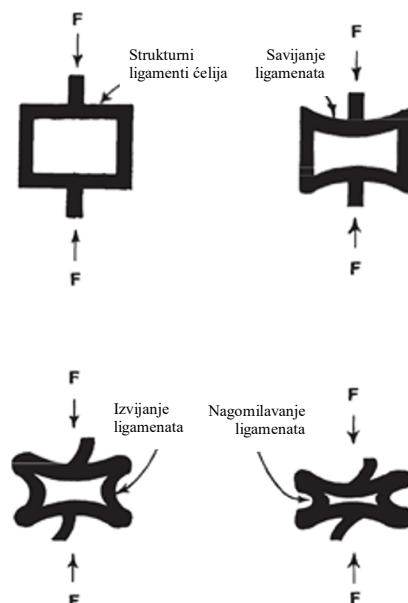
Prema modelu autora [Gibson i Ashby, 1988] pene sa zatvorenim ćelijama su opisane kao složene kockaste strukture izgrađene od strukturnih ligamenata i zidova. Čvrstoća zatvorenih ćelija je zavisna od tri komponente. Fleksibilnosti ligamenata (kao kod pena sa otvorenim ćelijama), istezanja zidova ćelija i pritiska gasa zarobljenog u ćelijama. [Saint Michel et al., 2006] i [Lu, Huang i Yuan, 2015] su otkrili da pene sa otvorenim ćelijama sa sekcijama jednakostraničnih trouglova pokazuju znatno veću asimetričnost u snazi od onih sa kvadratnim ili kružnim sekcijama, dok su kružne sekcije pokazale najmanju asimetričnost.

Izražena osetljivost polimernih pena na brzinu deformacije ima dva izvora. Jedan je ispuštanje gasa zarobljenog unutar ćelija (kod strukture zatvorenih ćelija), a drugi je mehanički odziv čvrstog roditeljskog materijala [Sun i Li, 2015]. Prvi izvor je glavni uzročnik koji doprinosi izraženoj osetljivosti pena sa sistemom zatvorenih ćelija na brzinu deformacije, kao i njihovom očvršćavanju [Di Landro, Sala i Olivieri, 2002; Bouix, Viot i Lataillade, 2009; Mondal, Goel i Das, 2009].

[Bouix, Viot i Lataillade, 2009] su istražili doprinos ispuštanja gasa na osetljivost na brzinu deformacije i očvršćavanje ekspanđovane polipropilenske pene sa zatvorenim ćelijama izvođenjem kvazi statičkog i dinamičkog testa na potopljenim uzorcima. Analiza je vršena u odnosu na formiranje vazдушnih mehurića na površini uzoraka kao posledici ispuštanja gasa koji prati deformaciju i pucanje zatvorenih ćelija unutar materijala.

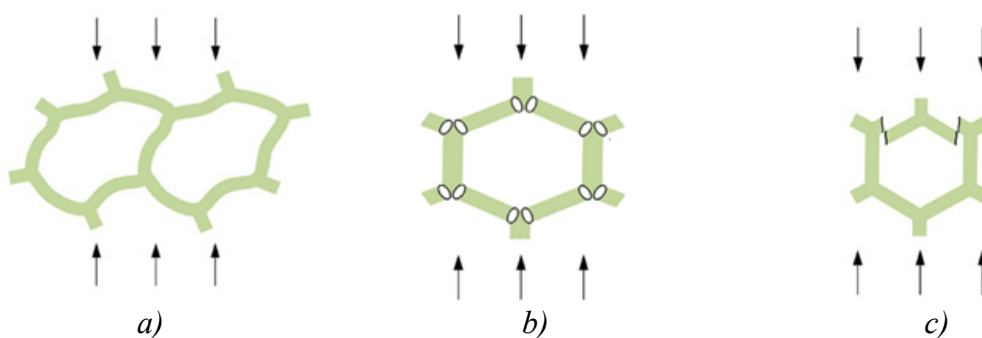
Doprinos mehaničkog ponašanja roditeljskog polimernog materijala na makroskopski odziv na deformaciju pene je istraživao najviše kroz deformaciono ponašanje na ćelijskom nivou. Međutim, većina istraživanja iz oblasti, vršenih na tako malim dimenzijama se zasniva na mikromehaničkim simulacijama bez eksperimentalnih dokaza [Pal, Maiti i Subhash, 2010; Alkhader i Vural, 2008; Brydon et al., 2005; Mills et al., 2009; Li, Gao i Roy, 2003].

Relativno sveža teoretska proučavanja su pokazala da je deformacija pri malim silama (manjim od napona elastičnog izvijanja) povezana sa savijanjem ćelijskih elemenata (slika 2.5.3) [Gibson i Ashby, 1988; Warren i Kraaynik, 1988] pre nego sa normalnom deformacijom strukturnih ligamenata paralelnih vektoru sile, kao što je to ranije bila pretpostavka, npr. u radu autora [Gent i Thomas, 1963].



Slika 2.5.3: Savijanje zidova ćelijskih elemenata paralelnih pravcu dejstva vektora sile

[Koohbor, Ravindran i Kidane, 2018] su pokazali da pri uslovima gde nema značajnog uticaja brzine deformacije na jačinu i modul elastičnosti roditeljskog polimera, dolazi do nadmetanja elastičnog izvijanja i otkazivanja usled krtosti unutar tanjih zidova ćelija. Elastično izvijanje je verovatniji mod otkaza u zonama gde su zidovi ćelija veoma tanki. Sa druge strane, otkazivanje zbog krtosti je evidentno dominantan mod otkaza unutar debljih zidova ćelija. Pored toga, oni su dokazali da kako raste brzina deformacije, tako opada razlika između kritičnih napona za sve modove otkaza materijala. Dakle, iako je mod otkaza usled krtosti (slika 2.5.4. c) glavni mod otkaza za sve brzine deformacije, šanse da do otkaza dođe usled elastičnog izvijanja (slika 2.5.4. a) i/ili plastičnog kolapsa (slika 2.5.4. b) rastu. Preklapanje ovih modova pri većim brzinama deformacije nastaje zbog značajnijeg porasta napona na granici elastičnosti (otkaza) roditeljskog polimera. Iako modul elastičnosti materijala raste, njegov rast nije iste brzine kao rast napona na granici elastičnosti. Kako je elastično izvijanje zasnovano na elastičnom odgovoru zidova ćelija na deformaciju, njegov rast pri porastu brzine deformacije je manje značajan. To dovodi do preklapanja krivih tri moda otkaza pri većim brzinama. Globalna deformacija i brzina deformacije na uzorku na makro nivou se značajno razlikuju (najmanje za jednu magnitudu su manje) od onih na lokalnom nivou zidova ćelija.



Slika 2.5.4: Šematski prikaz deformacije ćelija usled a) elastičnog izvijanja; b) plastičnog kolapsa; c) krtosti [Koohbor, Ravindran i Kidane, 2018]

Elastični odziv linearnog karaktera kod pena je kontrolisan savijanjem zidova ćelija, a u slučaju zatvorenih ćelija istežanjem zidova ćelija. Jungov modul ( $E$ ) je inicijalni nagib krive napon-deformacija polimerne pene. Za male deformacije, pena će imati elastičan odziv. U toj zoni, napon kompresije može da se izrazi putem jednačine 2.5.6.

$$\sigma = E_x \varepsilon \quad (2.5.6)$$

gde je  $\sigma$  napon, a  $\varepsilon$  deformacija.

Prilikom kompresovanja, plato plastičnog ponašanja je povezan sa kolapsom ćelija. Plato je različit za elastomerne i elastoplastične pene. Kod elastomernih pena plato je određen elastičnim izvijanjem [Gibson i Ashby, 1999]. Kod čistih elastomernih pena nema plastične deformacije, ali elastoplastični materijali imaju i zonu plastičnosti.

Kada ćelije pretrpe gotovo potpun kolaps, naspramni zidovi ćelija se dodirnu i dalja deformacija kompresuje samo čvrsto telo čime se dobija poslednja zona rapidno rastućeg napona u odnosu na deformaciju poznatija kao zona zgušnjavanja strukture sa nagibom koji se približava Jungovom modulu punih polimera pri limitu deformacije.

Ukoliko je gustina niska, pene sa otvorenim ćelijama se deformišu pre svega putem izvijanja zidova ćelija. Sa rastom relativne gustine ( $R > 0.1$ ) doprinos jednostavnog istežanja ili sabijanja zidova ćelija postaje značajniji. U literaturi postoje modeli koji predviđaju Jungov modul pene na osnovu oblika ćelija u strukturnom nizu, poput strukture pčelinjeg saća [Mills, 2007; Gibson i Ashby, 1988]. U praksi oblici ćelija i strukturni nizovi nisu takvi.

Kod pena sa zatvorenim ćelijama, zidovi ćelija se uvijaju i izdužuju pri kontaktu, a membrane koje formiraju lice i naličje ćelije se istežu, povećavajući doprinos aksijalne čvrstoće zidova ćelija modulu elastičnosti. Ukoliko se membrane ne pocepaju, sabijanje vazduha unutar ćelija takođe povećava čvrstoću. Prema tome, za Jungov modul postoje tri glavna kontributora inicijalnoj čvrstoći pena [de Vries, 2009].

Pri kompresiji kriva napon-deformacija za polimerne pene ima protežući plato pri naponu koji se ne menja značajno. Ovaj nivo napona se naziva napon elastičnog kolapsa, a nagib platoa predstavlja modul platoa. Elastični kolaps kod pena je prouzrokovan elastičnim izvijanjem zidova ćelija. Kada se elastomerna pena sa otvorenim ćelijama sabija, zidovi ćelija će se polako savijati do kritičnog napona pri kom će doći do izvijanja.

Drugi činilac koji doprinosi zavisnosti od brzine deformacije potiče od fluida u ćelijama pene. Kada se pena sabija, fluid se deformiše ili biva primoran da teče iz ćelije u ćeliju. U penama sa otvorenim ćelijama, vazduh se izbacuje van pene tokom sabijanja. To izaziva viskozne sile koje su zavisne od brzine deformacije [de Vries, 2009].

Za razliku od uticaja na mehanička svojstva pena, veličina ćelija umnogome utiče na svojstva tečenja vazduha. Kod pena sa zatvorenim ćelijama ovo je nevažno sve dok membrane ne popucaju puštajući tako vazduh unutar pene. Kada se pena sa otvorenim ćelijama sabija, vazduh se istiskuje iz nje što zahteva određeni rad koji se suprotstavlja viskoznim silama. Što su deformacije brže, to je tok vazduha brži, a samim tim i uloženi rad da se savladaju viskozne sile.

Skochdopole i Ruben su dali kvalitativni model kojim sugerišu da vazduh unutar ćelija i mikrostruktura polimera sa zatvorenim ćelijama deluju paralelno pri deformaciji. Model je jednostavan i baziran je na dodatku napona polimerne strukture naponu koji potiče od vazduha unutar ćelija [Mills, 2007].

U istraživanju autora [de Vries, 2009] je uočeno da brzina deformacije utiče na Jungov modul ispitivane polimerne pene sa otvorenim ćelijama. Taj uticaj potiče iz unutrašnjosti materijala, odnosno od polimernih zidova ćelija. Prema tome, izveden je zaključak da je Jungov modul određen parametrima materijala zidova ćelija i kompleksnom mikrostrukturom pene, kao i brzinom deformacije. Zbog toga bi zonu elastičnog odziva linearnog karaktera bilo ispravnije nazvati viskoelastičnom zonom. Za ispitivanu penu je primećeno da Jungov modul raste sa povećanjem brzine deformacije i da u većini zona krive veličina uzorka nema uticaj, kao i da tok vazduha ne doprinosi značajno nivou napona. Gušće pene (sa porama manje veličine) će doprineti uticaju toka vazduha usled većih sila viskoziteta i rada koji je potreban za istiskivanje vazduha.

#### **2.5.4.4 Parametri koji utiču na rast deformacije pod konstantnim naponom i relaksaciju napona**

[Tobushi et al., 2002] su istraživali pojave rasta deformacije pod konstantnim naponom i relaksacije napona polimerne memorijske pene. Zaključili su da je rast deformacije veći ukoliko je inicijalna deformacija manja. Takođe, rast deformacije i oporavak od deformacije su veoma izraženi na temperaturama manjim od temperature ostakljivanja ( $T_g$ ). Pored toga, zaključili su da je nakon izvesnog vremena relaksirani napon proporcionalan inicijalnom naponu. Nivo relaksacije napona je veliki ispod temperature  $T_g$ , ali je iznad te temperature mali. Nivo relaksacije napona je takođe veliki ako je i brzina deformacije velika. Sa velikim deformacijama i zadržavanjem konstantnog napona iznad temperature  $T_g$  dolazi do nepovratne deformacije. Kada se konstantno zadržava velika deformacija iznad temperature  $T_g$ , dolazi do gotovo potpune relaksacije napona i deformacija se fiksira.

Nivo relaksacije napona zavisi i od istorije deformacija materijala i temperaturnih fluktuacija tokom merenja [Derham, 1973].

Prema [Molded Dimension, LLC., 2019] opterećivanje koje dopušta povremene periode oporavka materijala će dovesti do manjeg rasta deformacije pri konstantnom naponu od kontinualnog opterećivanja. Međutim, kontinualno vibraciono opterećivanje će dovesti do povećanog rasta deformacije pri konstantnom naponu zbog generisanja unutrašnje toplote. Takođe, nakon izvesnog vremenskog perioda rast deformacije pri konstantnom naponu dostiže plato i postaje gotovo konstantan, a sam nivo rasta predstavlja funkciju nivoa napona.

[Qi i Boyce, 2005] su tokom opterećivanja i rasterećivanja materijala periodično zaustavljali testiranje na 60s pri deformacijama od 20 %, 40 %, 60 % i 80 % i merili odziv napona, odnosno relaksaciju napona pri konstantnoj deformaciji. Tokom opterećivanja, napon je opadao u fazama zadržavanja deformacije, dok je tokom rasterećivanja napon u fazama zadržavanja rastao. Ovo ponašanje je tipično ponašanje zavisno od vremena za neke konvencionalnije elastomerne materijale (npr. u istraživanjima autora [Lion, 1996] i [Bergstrom i Boyce, 1998]).

[Petrů i Novák, 2017] su različite tipove poliuretanskih pena podvrgavali deformacijama od 10 %, 25 %, 50 % i 65 % u trajanjima od 3600s i pritom merili relaksaciju napona. Iz njihovog istraživanja se izvodi zaključak da bez obzira na vrstu poliuretanske pene, relaksacija napona raste sa porastom inicijalne deformacije.

#### **2.5.4.5 Parametri i pojave koje utiču na histerezis, zamor i gubitak energije**

Histerezis i gubitak energije kod fleksibilnih poliuretanskih pena je određen hemijskim sastavom, morfologijom matrice čvrstog polimera, strukturom ćelija, okruženjem (temperatura i relativna vlažnost), fluidom zatvorenim unutar strukture ćelija (gas ili tečnost) i prirodom načinjene deformacije. U prirodu načinjene deformacije spadaju tip deformacije (najčešće jednostavna kompresija), nivo deformacije, brzina deformacije i istorija prethodnih deformacija.

Gubitak energije kod poliuretanskih pena sa otvorenim ćelijama se pripisuje narednim procesima [Hilyard, 1994]:

- Viskoelastično ponašanje čvrstog polimera pri malim lokalnim deformacijama;
- Relaksacija napona čvrstog polimera pri većim deformacijama i oporavak strukturnih ligamenata ćelija od elastičnog izvijanja;
- Tok fluida, pojava koja postoji kako pri većim, tako i pri manjim dinamičkim deformacijama.

Kao i kod svih mehaničkih svojstava fleksibilnih pena, rasuta energija  $U_d$  i odnosi energija  $U_d/U_a$  i  $U_d/U_s$  pod kvazi-statičkom kompresijom su veoma zavisni od deformacije. Odnos energija isprva raste sa porastom maksimalne deformacije do gotovo ujednačenih vrednosti pri maksimalnoj deformaciji većoj od 20 %. U prošlosti je ovo ponašanje u najvećoj meri bilo pripisivano nestabilnom kolapsu (izvijanju) elemenata ćelija. Međutim, ustanovljeno je da elastični kolaps dovodi do apsorbovanja energije, ali ne i do značajnog rasipanja. Prema tome, statički histerezis kod fleksibilnih poliuretanskih pena je najpre u vezi sa viskoelastičnim oporavkom izvijenih elemenata ćelija, što je proces predvođen morfologijom i međumolekularnim vezama u matrici čvrstog polimera, pogotovu u tvrdim segmentima [Hilyard, 1994]. Ovi morfološki faktori se manifestuju kroz jaku korelaciju histerezisa i gubitka nosivosti tokom cikličnog opterećivanja, gubitka nosivosti zbog relaksacije napona i modula elastičnosti čvrstog polimera.

[Hilyard, 1994] je takođe pokazao da je pri maksimalnoj deformaciji od 40 % odnos energija  $U_d/U_s$ , kao i ostali parametri slabo zavisani od čvrstoće pene.

Poređenjem površina zahvaćenih histerezis petljama i faktorima gubitaka pri konstantnoj temperaturi, autori [Lei et al., 2014] su ustanovili da povećanjem gustine umrežavanja dolazi do većih gubitaka energije tokom deformacija pene izazvanih spoljašnjim silama.

Nivo histerezisa opada sa smanjenjem gustine pene, međutim ovakvo ponašanje nije direktno u vezi sa smanjenjem gustine već načinom na koji se to smanjenje postiže, odnosno povećavanjem sadržaja vode u formulaciji što pored smanjenja gustine dovodi i do većeg sadržaja tvrdih segmenata [Hilyard, 1994].

Autori [Yonezu et al., 2016] su istraživali elastična svojstva polimerne pene niske gustine cikličnim testom ispod napona na granici elastičnosti (koji je za testirani materijal iznosio 0.6 MPa). Maksimalan napon je iznosio 0.25 MPa, a minimalan 0.025 MPa što znači da nije bilo potpunog rasterećenja. Pri minimalnom naponu, test je stopiran na 30 min sa ciljem prekidanja viskoelastičnog oporavka pene. Testom od 11 ciklusa, primećeno je da tokom prvog ciklusa dolazi do naglog rasta krive opterećenja i primetne histerezis petlje. Već u narednim testovima, krive opterećenja i rasterećenja postaju linearne sa malom histerezis petljom. Jungov modul je meren kao funkcija rednog broja ciklusa i zaključeno je da sa rastom rednog broja ciklusa prvo dolazi do rasta Jungovog modula, a potom i do stabilizacije njegovih vrednosti.

Elastomer bez punioca je gotovo idealno hiperelastičan, odnosno ima mali histerezis i slabu zavisnost od brzine deformacije. Međutim, dodatkom nanopunioca koji značajno ojačavaju i očvršćuju polimer, dolazi i do nuspojava memorijskih karakteristika, povećanja histerezisa i omekšavanja. Za male dinamičke deformacije omekšavanje je poznatije kao Payne efekat [Payne, 1962] koji se opisuje nepovratnim slomom krute mreže punioca [Rendek i Lion, 2010]. Sličan fenomen je prisutan i pri većim deformacijama, a istražen je od strane autora [Mullins i Tobin, 1965]. Što je veća deformacija kojoj je materijal podvrgnut, to je njegov odgovor mekši. Promena u odgovoru materijala nije trenutna već zahteva nekoliko ciklusa da bi se stabilizovala. Objašnjenje Mullins efekta leži u kompleksnom pomeranju i strukturnoj reorganizaciji čestica punioca i polimerne mreže [Vilgis, Heinrich i Kluppel, 2009].



Pored Mullins efekta, naglašen histerezis je još jedno svojstvo karakteristično za elastomere sa puniocima. Pretpostavka je da se strukture polimer-punioic sukcesivno raskidaju pri određenoj sili i momentalno ponovo vezuju pri nultom naponu. Sa povećanjem deformacije, ovaj mehanizam stvara dodatnu komponentu sile čime raste i ukupna sila. Tokom rasterećenja on smanjuje ukupnu silu generišući tako histerezis. Zaostali napon nastaje iz struktura koje su ostale napregnute pri nultoj deformaciji. Mehanizmi raskidanja i ponovnog povezivanja su pokrenuti naponom. Ukoliko sila nije prisutna, broj pojava raskidanja i ponovnog vezivanja je jednak. Histerezis pokazuje slabu zavisnost od brzine deformacije [Plagge i Klüppel, 2017].

[Russo i Thomas, 1983] su istraživali niz poliuretana sa različitim udelom tvrdog segmenta izvođenjem mehaničkih testova pri malim brzinama deformacije. Otkrili su da sa povećanjem sadržaja tvrdih segmenata raste i inicijalni modul jačine materijala, a opada izduženje pri pucanju. [O'Sickey, Lawrey i Wilkes, 2002] su evaluirali mehanička svojstva poliuretana i poliuree u uskom opsegu sadržaja tvrdog segmenta (6.3 % i 9 % težinskog udela) i zaključili da udeo tvrdog sadržaja ima mali uticaj na morfologiju i mehanička svojstva mekih segmenata u ispitivanom opsegu.

[Qi i Boyce, 2005] su sprovedli studiju ponašanja napon-deformacija pri velikim deformacijama za termoplastične poliuretane pri niskim brzinama deformacije dokumentujući zavisnost ponašanja od vremena i omekšavanje izazvano deformisanjem.

[Autori Yi et al., 2006] su posmatrali krivu napon-deformacija za tri vrste poliuretana i poliureu tokom opterećivanja i rasterećivanja i primetili su postojanje histerezisa u svim slučajevima. Kriva rasterećenja je nelinearna pri svim brzinama deformacije. Poliuretani 1 i 2 koji su imali visok sadržaj tvrdog segmenta su pokazali veliki zaostatak deformacije (20 % i 40 % u odnosu na inicijalnu deformaciju). Poliuretan 3 i poliurea su imali zaostatak deformacije od 10 %, međutim, oporavak od svih zaostalih deformacija je potpun u roku od par časova nakon testa.

Pojava cikličnog omekšavanja je takođe prisutna pri cikličnom testu opterećenja sa periodima oporavka od zaostale deformacije od 180 s. Krive napon-deformacija pri rasterećenju pokazuju značajno veći nivo usaglašenosti u poređenju sa krivama opterećenja, a u odnosu na krivu inicijalnog opterećenja izuzev u slučaju poliuretana 2 koji suštinski ne doživljava omekšavanje.

Za omekšavanje termoplastičnog poliuretana izazvano deformacijom je ustanovljeno da je povezano sa reorganizacijom tvrdog segmenta pod deformacijom, što je zaključeno i u radovima autora [Qi i Boyce, 2005] i [Bonart i Muller-Riederer, 1981]. Krive napon-deformacija cikličnog opterećenja pokazuju da nakon par ciklusa dolazi do stabilizacije putanje ovih krivih. U slučaju poliuretana 1 i 3 na krivama se vidi da uprkos značajnom omekšavanju tokom prvih par ciklusa, krive rasterećenja pokazuju relativnu nezavisnost od rednog broja ciklusa, odnosno da ponašanje napon-deformacija pri rasterećenju ne zavisi od istorije deformacije. To je primećeno i u istraživanjima [Qi i Boyce, 2005], a pored toga, autori [Yi et al., 2006] tvrde da zaostala deformacija takođe nije zavisna od istorije deformisanja.

U radu autora [Gong, Kyriakides i Jang, 2005] prikazano je da cikličnim testom opterećenja i rasterećenja polimerne pene sa otvorenim ćelijama u trajanju od 6 ciklusa sa 5 min relaksacije između ciklusa dolazi do izvesnih promena. Kako je polimer viskoelastičan, histerezis petlja je inicijalno otvorena, ali vremenom uz relaksaciju materijala dolazi i do zatvaranja petlje. Prvi ciklus daje najveći inicijalni modul i plato, a drugi ciklus pokazuje značajan pad u naponu platoa (Mullins efekat omekšavanja), dok su oscilacije napona tokom daljih ciklusa male i kriva se stabilizuje. Materijal se nakon 48 h u potpunosti oporavlja. U testiranom opsegu napona, na nivou pojedinačnog ligamenta, materijal nakon prvog ciklusa gotovo da pokazuje linearnu elastičnost, a prisutnost histerezis petlje je najviše zbog zavisnosti od brzine deformacije.

Rezultati istraživanja koje su sproveli [Petruš i Novák, 2017] su potvrdili da sa smanjenjem debljine materijala, sila potrebna za sabijanje materijala do željene deformacije raste. Takođe je primećeno da između ciklusa opterećenja i rasterećenja dolazi do pojave histerezisa, a da između prvog i drugog ciklusa dolazi do značajnog pada sile usled relaksacije materijala.

Histerzis polimera je povezan sa njegovom temperaturom ostakljivanja  $T_g$  koja predstavlja prelaznu tačku gde se ponašanje materijala menja od čvrstog, krutog, staklastog materijala (temperature ispod  $T_g$ ) ka mekšem gumenkastijem materijalu (temperature iznad  $T_g$ ). Blizu  $T_g$ , krutost rapidno opada sa temperaturom, a histerezis raste [Ferry, 1980]. Do ovoga dolazi zato što su pojedini segmenti lanaca fleksibilni, dok su neki drugi malo manje pokretni. Kretanje jednih pored drugih izaziva gubitke energije [Gareth, Arnold i Griffiths, 2011].

Histerzis je u radu autora [Gareth, Arnold i Griffiths, 2011] određen merenjem površine između krivih opterećenja i rasterećenja u odnosu na površinu ispod krive opterećenja. Histerezis blago raste sa povećanjem brzine deformacije, a dosta značajnije sa smanjenjem temperature okruženja.

U radu autora [Lu, Neidigk i Wyatt, 2016] je navedeno da su fleksibilne pene generalno u gumenkastom stanju na sobnoj temperaturi, a da se modul elastičnosti i napon pri granici elastičnosti lagano menjaju sa temperaturom. Kada se približi temperaturi ostakljivanja materijala, male promene u brzini deformacije ili temperaturi mogu da dovedu do velikih promena prethodno spomenutih parametara. Histerezis petlja testa izvođenog na 0 °C je evidentno veća od one dobijene tokom testa na 20 °C. Najveće kašnjenje faze nastaje pri temperaturi od -20 °C, a moduli skladištenja i gubitka rapidno rastu sa smanjenjem temperature. Podaci njihovog istraživanja pokazuju da pena postaje kruća i da rasipa više energije na nižim temperaturama i višim frekvencijama.

Autori [LeFever i McEvoy, 2001] su ispitivali da li je za predviđanje dugotrajnosti poliuretanske pene reprezentativnije svojstvo histerezis gubitka ili gustine. Ispitivanja su vršena na uzorcima 5 različitih gustina od kojih je svaki formulisan tako da ima veći i manji histerezis gubitak. Veći histerezis gubitak je postizan korišćenjem većih količina vode, kopolimera i drugih dodataka. Kako je formulacija sa većim histerezisom 300 % čvršća od one sa nižim, korelacija između gustine i histerezis gubitka nije na visokom nivou. Na sličan način, pene sa velikom razlikom gustine (28 kg/m<sup>3</sup>) i čvrstoće na 25 % kompresije su pokazale isti histerezis gubitak. To je dobro jer ukoliko dugotrajnost treba da ima jaku korelaciju sa jednim od parametara, onda taj parametar ne sme da ima jaku korelaciju sa drugim parametrom. Korelacija između gustine i histerezis gubitka ipak postoji, što se ogleda u činjenici da se sa povećanjem gustine histerezis gubitak smanjuje kako za uzorke sa formulacijom koja daje veći histerezis gubitak, tako i za one sa manjim histerezis gubitkom. Nakon cikličnog testa kompresije od 50.000 ciklusa frekvencijom od 8 Hz sinusoidalno sa pikovima koji odgovaraju nepromenljivom minimalnom i maksimalnom naponu, autori su pristupili merenju procentualnog gubitka u debljini, napona pri 50 % kompresovanosti i merenju promene deformacije pri istom naponu. Na taj način su dobijene promenljive za izračunavanje tzv. *UFDF* broja koji se koristi za procenu mehaničke dugotrajnosti pene, putem jednačine 2.5.7.

$$UFDF = 5 \times \text{Gubitak visine} + 1.5 \times \text{Gubitak napona} + 4 \times \text{Promena deformacije pri istom naponu} \quad (2.5.7)$$

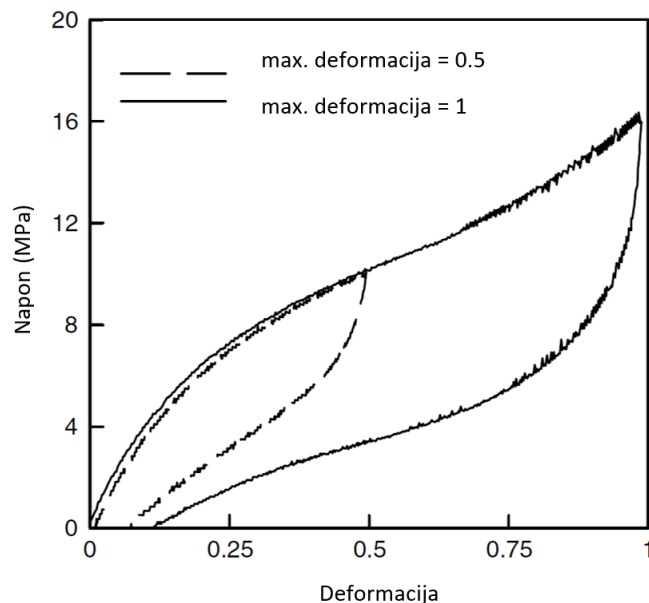
Histerzis gubitak je pokazao značajno veću korelaciju sa *UFDF* brojem i svakom njegovom komponentom od gustine.



Mišljenje je da su mehanizmi odgovorni za statički histerezis isti kao oni koji dovode do zamora, a kako zamor utiče na nosivost očekivano je i postojanje veze između nosivosti i histerezisa [Hilyard, 1994]. Zamor je mera pada u nosivosti materijala izražena u formi procentualnog gubitka [QFP, 2019]. Vrednosti napona pri opterećenju za  $n+1$ . ciklus pri deformacijama manjim od maksimalne su manje od vrednosti napona u  $n$  ciklusu. Memorijski efekat je takav da je maksimalan napon pri maksimalnoj deformaciji relativno konstantan, a kriva rasterećenja u  $n+1$ . ciklusu ima gotovo istu putanju kao kriva rasterećenja u  $n$  ciklusu. Prema tome, ciklično opterećivanje do maksimalne deformacije utiče na krivu opterećenja, ali njegov uticaj na krivu rasterećenja je veoma mali što dovodi do smanjenja histerezisa. Pri malim gubicima nosivosti, vrednosti odnosa energija su bile gotovo jednake, ali su razlike između njih rasle sa porastom gubitka nosivosti [Hilyard, 1994].

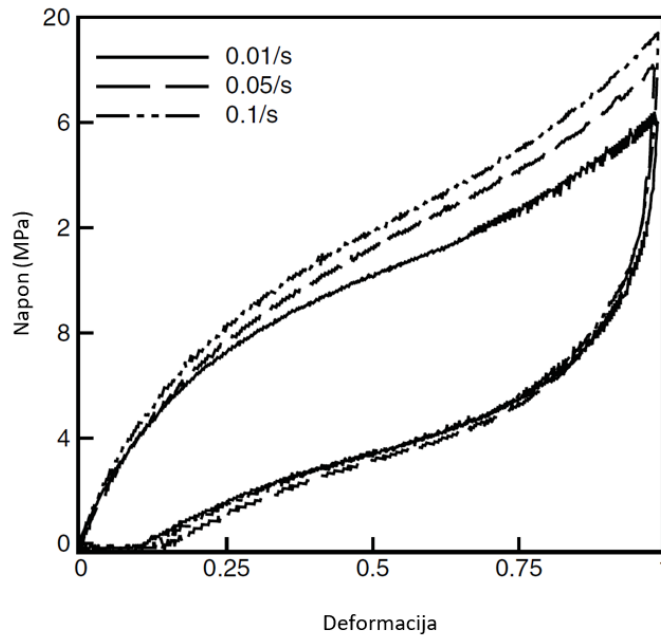
[Moreland, Wilkes i Turner, 1991] pripisuju gubitak nosivosti i histerezis narušavanju domena tvrdih segmenata u matrici poliuretanskog polimera. Zaključak je da tokom faze rasterećenja ciklusa, energija skladištena unutar domena mekih segmenata nije dovoljno velika da nadoknadi energiju isporučenu čvrstim segmentima [Hilyard, 1994].

Autori [Qi i Boyce, 2005] su u svom radu istraživali više parametara. Najpre su uzorke podvrgavali različitim nivoima deformacije (dvostruka razlika u maksimalnoj deformaciji). Krive opterećenja su pokazale postojanje istih karakterističnih zona, a krive rasterećenja su stvorile velike histerezis petlje (grafik 2.5.6) sa zaostalom deformacijom koja je merena nakon što su uzorci ostavljeni da odleže 60s. Zaostala deformacija je bila oko 3 puta veća kod uzoraka koji su deformisani dvostruko više.



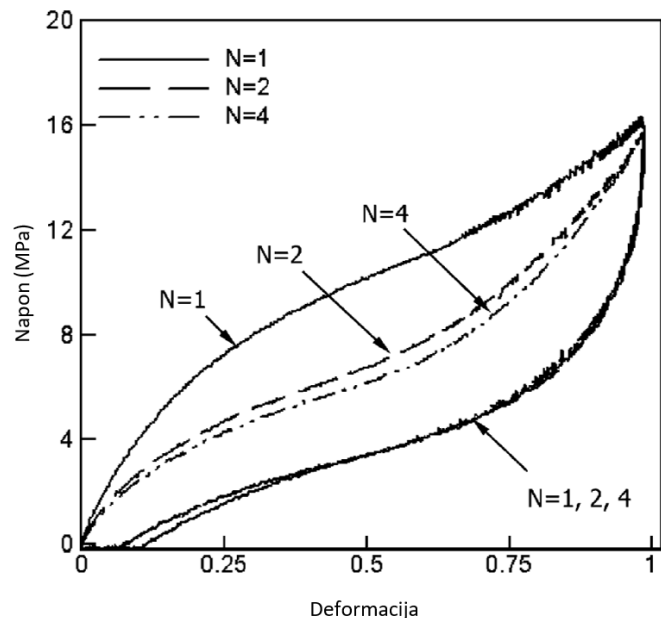
*Grafik 2.5.6: Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih različitim nivoima maksimalne deformacije [Qi i Boyce, 2005]*

Kod krivih opterećenja sa porastom brzine deformacije rastao je i nivo napona (grafik 2.5.7), dok su krive rasterećenja pratile gotovo istu putanju što znači da je faza rasterećivanja daleko manje zavisna od brzine izvođenja testa. Zaostatak deformacije se smanjivao sa porastom brzine deformacije.



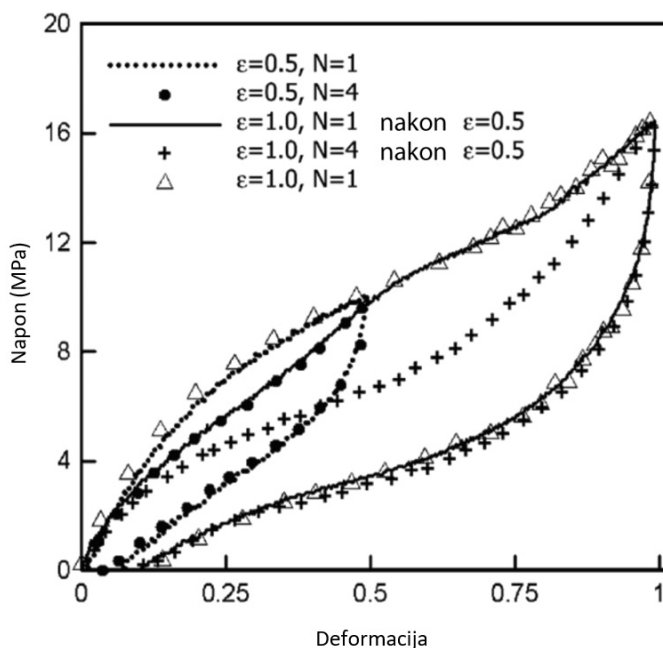
Grafik 2.5.7: Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih različitim brzinama deformacije [Qi i Boyce, 2005]

Kriva napon-deformacija se stabilizuje nakon par ciklusa sa najviše omekšavanja tokom prvog ciklusa. Sve krive rasterećenja prate istu putanju pri istoj maksimalnoj deformaciji, bez obzira na redni broj ciklusa (grafik 2.5.8). Omekšavanje zavisi od istorije deformacije gde veća deformacija dovodi do većeg omekšavanja. Zaostatak deformacije nastaje pre svega nakon prvog ciklusa, bez značajnih promena visine nakon pratećih ciklusa. Na istraživanim materijalima je do stabilizacije histerezisa dolazilo nakon samo 4 ciklusa.



Grafik 2.5.8: Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih cikličnim deformacijama  $N$  = broj ciklusa [Qi i Boyce, 2005]

Cikličnom deformacijom (grafik 2.5.9) uzoraka do manje deformacije, a odmah potom deformacijom istih uzoraka do dvostruko veće deformacije može da se primeti da kriva opterećenja za veću deformaciju prati “omekšanu” krivu opterećenja manje deformacije. Približavanjem tački maksimalne manje deformacije napon se približava maksimalnom naponu pri manjoj deformaciji. Nakon te tačke, kriva opterećenja veće deformacije prati putanju koju ispisuje kriva uzorka testiranog bez prethodnog cikličnog testa pri manjoj deformaciji i materijal se ponaša kao svež materijal. Materijal ponovo doživljava omekšavanje i kriva počinje da prati krivu omekšanog materijala koji nije podvrgavan prethodnoj manjoj deformaciji. Ovakvo ponašanje pokazuje jaku zavisnost materijala od istorije deformacije.



Grafik 2.5.9: Histerezis petlje uzoraka podvrgnutih cikličnim deformacijama do različitih maksimalnih vrednosti deformacije -  $N$  = broj ciklusa [Qi i Boyce, 2005]

Pomeranje histerezis petlje dopušta procenjivanje akumulirane deformacije tokom odgovarajućeg ciklusa. Promena u širini i površini histerezis petlje dozvoljava procenu veličine reverzibilne deformacije i energije rasute tokom cikličnog opterećivanja [Rie, 1987]. Energija rasuta unutar uzorka tokom ciklusa je utrošena na formiranje defekata ili je oslobođena u vidu toplote [Rie, 1987; Schijve, 2009].

U eksperimentu sprovedenom od strane [Senatov et al., 2016] pauza u opterećivanju je dovela do vraćanja visine uzorka 20 % do 40 %, međutim krive promene visine (zaostale deformacije) su se vraćale na stare vrednosti i putanje nakon 200 ciklusa od nastavka testa.

Prema mestu koje zauzima u procesu štampe i mogućim uticajima na kvalitet otiska, sliv najpre može da se uporedi sa gumenim omotačem korišćenim u ofset štampi. Gumeni omotač ofset štampe je na sličan način kao i sliv podeljen na dve komponente: lice (transfer boje) i telo (najčešće troslojne ili četvoroslojne konfiguracije). Lice je sačinjeno od 100 % gume, a telo je kompozitna struktura sačinjena od tekstila i gume ili poliuretana koji spajaju slojeve. Kada se meri tvrdoća ovih materijala, preporuka je meriti sa strane lica.

Kod kompresibilnih osfetskih gumenih omotača, kompresibilnost je parametar koji najviše utiče na dinamičke performanse štampe i kvalitet otiska. Kompresibilnost je za ofsetne gumene omotače definisana kao sposobnost smanjenja zapremine materijala pod opterećenjem [Trelleborg, n.d.].

Održavanje kompresibilnosti u adekvatnom opsegu će sprečiti prekomerne pritiske tokom štampe i produžiti životni vek štamparskih formi. Pored toga, rezilijentnost bi trebalo da bude takva da omogući ofsetnom gumenom omotaču brz oporavak od opterećenja ili udaraca sa ciljem izbegavanja vidljivih defekata u kvalitetu štampe.

## 2.6 Adhezija i adhezivi

Adhezivi su materijali naneti na površinu sa ciljem spajanja sa drugom površinom [Ebnesajjad, 2014]. Adhezija je međuatomska i međumolekularna interakcija pri dodiru dve površine [Poisson et al., 2006]. To je pojava koja podrazumeva hemiju površina, fiziku, reologiju, hemiju polimera, analizu napona, fiziku polimera i analizu pucanja. Istraživanja u oblasti su fokusirana ka pronalaženju jednog mehanizma koji bi u potpunosti objasnio fenomen adhezije [Kinloch, 1980; Yosomiya et al., 1989; Beholz, Aronson i Zand, 2005; Lippert i Dickinson, 2003; Pukánszky i Fekete, 1999]. Za mehanizam adhezije je odavno poznato da zavisi od površinskih karakteristika materijala. U poslednje vreme postoji povećan interes ka razvoju polimernih i epoksidnih smola zbog povoljnosti njihovih svojstava kao smeša i kao slojeva na površini materijala [Sargent, 2005; Swadener, Liechti i Lozanne, 1999; Dixon et al., 1998, Clint, 2001; Grundmeier i Stratmann, 2005; Hutchinson i Iglauer, 2006].

### 2.6.1 Mehanizmi adhezije

Molekularno vezivanje je najšire prihvaćeni mehanizam za objašnjavanje adhezije dve površine koje su u kontaktu. Ono podrazumeva međumolekularne sile poput dipol-dipol interakcija, van der Valsove sile i hemijske interakcije u vidu jonske i kovalentne veze. Jačina adhezije se putem ovog mehanizma objašnjava kroz sile između površina i prisustvo polarnih grupa [Sharpe, 1993]. Povezivanje na molekularnom nivou zahteva blizak kontakt između površina, međutim, zbog prisustva raznih defekata, pukotina i vazdušnih džepova ostvarivanje kontakta mora da bude potpomognuto [Kinloch, 1980]. Ostvarivanje kontakta može da se potpomogne dejstvom pritiska ili dodatkom supstanci koje adhezivu poboljšavaju svojstva koja su poželjna za ostvarivanje kvalitetnog kontakta, npr. fleksibilnost, adekvatan viskozitet, adheziona lepljivost...

Ukoliko supstanca deluje lepljivo i potrebno je uložiti napor da bi se odvojio prst sa njene površine, kao što je to slučaj kod adhezivnog sloja Twinlock® slivova, onda se govori o svojstvu lepljivosti. Kontrolisanje lepljivosti materijala je veoma bitno u velikom broju oblasti primene, pa je tako kod adheziva osetljivih na pritisak pogodan visok nivo lepljivosti. Visok nivo lepljivosti se povezuje sa jakim viskoelastičnim disipacijama unutar polimera [Patrick, 1969; Good i Gupta, 1988].

Prema tome, adhezivna lepljivost je sposobnost momentalnog povezivanja u trenutku dodira površine adherenda i adheziva [Abdel-Raouf i Abdul-Raheim, 2018; Fattah, 1996]. Za povećanje lepljivosti se koriste različite materije poput terpena i ugljovodoničnih smola, a u odnosu na njih estri rozina (kolofonijuma) pokazuju bolje adhezivne sposobnosti.

#### 2.6.1.1 Rozin i njegov uticaj na adhezivna svojstva

Rozin je termoplastična, čvrsta, biorazgradiva prirodna smola koja se ekstrahuje iz drveta bora [Satturwar et al., 2003; Liu, Xin i Zhang, 2010; Sahu et al., 1999]. Njen glavni sastojak su rezinske kiseline, a opšta formula je  $C_{20}H_{30}O_2$ .

Inkorporiranjem rozina u polimere dolazi do povećanja njihove lepljivosti. Neki od ovih polimera su etilen-vinil acetat kopolimeri [Takemoto, 2000; Barrueso-Martinez, 2003] prirodna guma [Fujita et al., 1998] i termoplastični elastomeri [Kim, Kim i Yoon, 2004; Yang et al., 2006], poliuretani, gde derivati rozina hemijski učestvuju u rastu polimera [Aran-Ais et al., 2005].

Dominanta varijacija rozina ima alicikličnu strukturu i naziva se hidrogenizovani rozin. Njegova karboksilna grupa može da reaguje sa velikim brojem drugih grupa dajući tako strukture koje dovode do bolje adhezije za različite materijale mehanizmima molekularnih veza [Awaja et al., 2009]. To je dokazano i u radu autora [Liu, Nie i He, 2016] gde je sintetisan novi tip bifunkcionalnog poliuretanskog akrilata pomoću hidrogenizovanog rozina, diizocijanata i hidroksietil akrilata. Novodobijeni poliuretanski akrilat je pokazao poboljšanje u svojstvima adhezije za šta su zadužene imid-urea grupe.

## 2.6.2 Adhezivi osetljivi na pritisak

Fotopolimerne flekso štamparske forme se lepe na adhezivni polimerni sloj Twinlock<sup>®</sup> sliva. Njegov način dobijanja i sastav su strogo čuvana tajna, međutim, po svojim svojstvima, načinu upotrebe i glavnim karakteristikama pokazuje određene sličnosti sa pojedinim vrstama adheziva osetljivih na pritisak. Formulacija Twinlock<sup>®</sup> adhezivnog sloja po sastavu ima sličnosti sa adhezivima osetljivim na pritisak koji su bazirani na akrilatu. Naime, za proizvodnju akrilatnih adheziva osetljivih na pritisak koji se koriste za jednostrano i obostrano lepljive trake se koriste akrilati i drugi pogodni monomeri poput vinil acetata, izooktil akrilata, akril amida i akrilonitrila koji grade akrilatni kopolimer sa optimizovanim svojstvima adhezije. Njemu se za poboljšanje kohezije mogu dodati i agensi za stvaranje međuveza [Satas, 1989; Khanjani, Zohuri i Gholami, 2014; Khanjani et al., 2013; Czech i Milker, 2005].

Adhezivi osetljivi na pritisak su generalno tanki slojevi elastomerne osnove koja može biti od prirodne gume, akrilata, vinil etara, silikona... Da bi se elastomernoj osnovi pojačala adhezija potrebno je dodati pojačivače lepljivosti u vidu smola niske molekularne mase (npr. rozin) [Satas, 1989].

Kvalitet adhezije adheziva osetljivih na pritisak je određen putem tri glavna svojstva: lepljivost, jačina ljuštenja i otpornost na smicanje. Adhezivni sloj Twinlock<sup>®</sup> slivova zbog prirode upotrebe najviše zavisi od parametara lepljivosti i jačine ljuštenja. Lepljivost je ključno svojstvo ovih adheziva jer predstavlja sposobnost brzog formiranja veze merljive jačine pri kontaktu materijala bez dejstva pritiska [Zosel, 1991].

Za ostvarivanje kvalitetnog spajanja pomoću adheziva osetljivih na pritisak neophodan je dobar kontakt između površina kako zbog lepljivosti tako i zbog olakšanog dejstva sila koje ostvaruju povezivanje (van der Valsove, kiselinske, donor-primalac...) [Satas, 1989; Benedek i Feldstein, 2008]. Kod čvrstih deformabilnih tela, kvalitet kontakta zavisi pre svega od pritiska isporučenog pri kontaktu i od sila koje pritom nastaju, npr. van der Valsove [Gay i Leibler, 1999]. Visok viskozitet adheziva osetljivih na pritisak zahteva da se spajanje materijala vrši uz pritisak radi boljeg raspoređivanja adheziva po površini adherenda [Benedek i Feldstein, 2008].

Van der Valsove sile igraju značajnu ulogu u adhezivnim procesima polimernih materijala. Polimerni materijali mogu čak biti sintetisani tako da hemijski interaguju sa površinom kroz formiranje donor-primalac veza, vodoničnih ili kovalentnih veza [Mark, 2007]. Međutim, kod adheziva osetljivih na pritisak do adhezije dolazi pri kontaktu površina uglavnom bez hemijski reakcija [Benedek, 2004a; Khanjani et al. 2014; Petrie, 2000; Creton, 2003].

U grani nauke koja se bavi adhezijom polimera se istražuju dva različita koraka: formiranje adhezivne veze i fizička jačina adhezivne veze, odnosno raskidanje adhezivne veze.

Sile privlačenja između lanaca za većinu lanaca mogu da budu opisane putem van der Valsovih privlačnih sila. Prema tome, gustina kohezivne energije polimera i površinska energija (energija koja je potrebna da se molekul premesti iz smeše na površinu [Baldan, 2012]) su niske u poređenju sa većinom neorganskih materijala gde su dominantne druge vrste međumolekularnih sila.

Za ostvarivanje dobre adhezije neophodan je dobar kontakt između površina adheziva i adherenda. Manji kontaktni ugao indikuje da je površina pogodnija za ostvarivanje boljeg kontakta i bolje adhezije. [Zisman, 1963] je povezao koncept merenja kontaktnog ugla kvašenja i definiciju parametara vezanih za površinsku energiju polimera, odnosno kritični napon kvašenja. Vrednosti kritičnog napona kvašenja za nekolicinu polimera su dati u tabeli 2.6.1. Zismanov kriterijum kvašenja navodi da površinska energija adheziva mora da bude manja od kritičnog napona kvašenja adherenda da bi adheziv mogao da ostvari kompletno kvašenje, odnosno dobar kontakt sa adherendom. Pošto polimeri imaju nižu površinsku energiju od većine čistih neorganskih površina, ovaj uslov nije teško ispuniti. Međutim, kada se radi o adheziji između polimera, treba obratiti posebnu pažnju na svojstva adheziva i adherenata. Adhezija između polimera može da bude ostvarena i mehanizmom interdifuzije čime se ostvaruju jake veze između materijala, međutim ovo je jako teško zbog niske entropije [Mark, 2007].

*Tabela 2.6.1: Kritični naponi kvašenja pojedinih polimera [Zisman, 1963]*

Polimer	Kritični naponi kvašenja
Poli(tetrafluoroetilen)	18 mJ/m <sup>2</sup>
Poli(dimetilsiloksan)	21 mJ/m <sup>2</sup>
Poli(propilenn)	28 mJ/m <sup>2</sup>
Poli(etilen)	31 mJ/m <sup>2</sup>
Poli(vinil hlorid)	38 mJ/m <sup>2</sup>
Umrežena epoksidna smola	43 mJ/m <sup>2</sup>
Poli(etilen teraftalat)	45 mJ/m <sup>2</sup>

Fleksibilniji materijali ostvaruju bolji kontakt pri dejstvu pritiska prilikom spajanja. Iz tog razloga se prilikom sinteze adhezivnih materijala osetljivih na pritisak u formulaciju dodaju i plasticizeri.

Pored toga u radovima autora [Benedek, 2004a], [Benedek, 2006b] i [Benedek, 2006c] je dokazano da se lepljivost i otpornost polimera na odlepljivanje ljuštenjem povećavaju dodatkom agenasa za lepljivost (smola) ili plasticizera.

### **2.6.2.1 Plasticizeri i njihov uticaj na adhezivna svojstva**

Plasticizeri su organske tečnosti ili čvrste materije koje se u kompatibilni polimer ubacuju tokom topljenja ili difuzijom, sa ciljem smanjenja interakcije između molekula i poboljšavanjem njihove molekularne pokretljivosti što smanjuje površinsku energiju. Postoji nekoliko teorija koje objašnjavaju plasticizaciju, ali suština svih njih je u sposobnosti plasticizera da smanje polimer-polimer privlačenje lanaca i omoguće veću pokretljivost polimernih lanaca [SpecialChem, 2019].

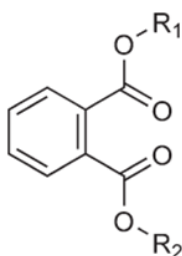
Upotreba plasticizera u poboljšavanju performansi adheziva osetljivih na pritisak je poznata praksa [Satas, 1989, pp. 470-472/329-331; Satas, 1982, pp. 290-296/325]. Neka od poboljšanja kod akrilatnih adheziva sa dodatim plasticizerima se ogledaju u povećanju sile razdvajanja i lakšem ostvarivanju lepljivosti zbog povećane mekoće. Potrebu za plasticizerima diktiraju željene karakteristike adheziva prilikom krajnje upotrebe, kao i tipovi polimera na kojima su adhezivi zasnovani [Arndt, McBride i Conner, 2014].



U radu autora [Felton i McGinity, 1997] dokazano je da tip i koncentracija plasticizera utiču na adhezivna svojstva akrilatnog polimera. Povećanje jačine adhezije je postignuto povećanjem koncentracije trietil citrata sa 20 % na 30 %, koja je dovela do povećanja elastičnosti filma i smanjenja unutrašnjih napona u polimeru.

Plasticizeri utiču na viskozitet, smanjuju  $T_g$  proizvoda i snižavaju modul elastičnosti [Chemceed, 2017]. U radu autora [Zadhoush, Alsharif i Esmailzadeh, 2004] pokazano je da plasticizeri imaju veliki uticaj na reološka svojstva polimera i da je u mnogim slučajevima potrebno smanjiti ili povećati viskozitet odabirom adekvatnih plasticizera.

Ftalati i teraftalati su dobar primer efektnih plasticizera. Ftalati su estri 1,2-dibenzen dikarboksilne kiseline sa opštom strukturom prikazanom na slici 2.6.1. Ova grupa podrazumeva plasticizere poput butil benzil ftalata, diizononil ftalata i dioktil teraftalata koji povećavaju fleksibilnost polimera visoke molekularne mase [Chemceed, 2017; Peijnenburg, 2008].



Slika 2.6.1: Opšta hemijska struktura ftalata - R1 i R2 su  $C_nH_{2n+1}$  za  $n = 4-15$

### 2.6.3 Mogućnosti repozicioniranja i ponovnog lepljenja

Jedan od glavnih razloga poređenja Twinlock<sup>®</sup> adhezivnog sloja i adheziva osetljivih na pritisak, pored izražene adhezivne lepljivosti i pritiska neophodnog pri lepljenju štamparskih formi je naravno i mogućnost skidanja i ponovnog lepljenja štamparskih formi veliki broj puta i to bez promene u svojstvu adhezije, prema rečima proizvođača [tesa, 2018].

Kod adheziva osetljivih na pritisak, pored onih koji omogućavaju permanentu adheziju postoje i posebne grupe adheziva sa mogućnostima repozicioniranja ili pak ponovnog lepljenja uz izražene adhezivne sile.

Mogućnost repozicioniranja i ponovnog lepljenja su posebni slučajevi odlepljivanja gde mora da bude omogućeno odlepljivanje adherenda ili i odlepljivanje i ponovno lepljenje. Mogućnosti proizvodnje odlepljivih adheziva bazirane na promenama formulacije su detaljno opisane u radovima autora [Benedek, 2000] i [Czech, 2006]. U suštini, niska otpornost na odlepljivanje ljuštenjem se postiže upotrebom čvršćih monomera i izbegavanjem monomera koji mogu da pokrenu specifičnu adheziju. Takođe, visoka molekularna masa i međuumrežavanje smanjuju otpornost na odlepljivanje. [Benedek, 1999] navodi da dodatkom agenasa za međuumrežavanje otpornost na odlepljivanje opada drastično (70-90 %). Na primer, u prisustvu benzofenonskih terminalnih grupa kod akrilnih estara, reakcija međuumrežavanja se svodi na dodavanje atoma vodonika bočne alkil grupe akrilnog segmenta na karbonilnu grupu benzofenonske bočne grupe [Benedek, 1999].

Mogućnost repozicioniranja je karakteristika koja zavisi od starenja gde je glavni preduslov sporo pojačavanje adhezije između površina. U ovom slučaju, pojačavanje otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem je samo odloženo ili usporeno, ali nije i ograničeno nekom apsolutnom vrednošću tako da repozicionirajući adhezivi mogu ujedno da budu i permanentni.

Za razliku od repositionirajućih, kod adheziva sa mogućnošću ponovnog lepljenja odlepljivanje mora da bude moguće nezavisno od starosti, što znači da pojačavanje otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem ima ograničenu maksimalnu vrednost [Benedek, 2008]. Pored toga, ponovno lepljenje mora da se odvija bez poteškoća što znači da tehnologije proizvodnje ovih vrsta adheziva moraju da budu takve da ne narušavaju mogućnost trenutnog slepljivanja (adheziona lepljivost) proizvoda.

Ukoliko će se vršiti odlepljivanje i ponovno lepljenje, adheziv mora da ima drugačije podešena reološka svojstva. Kod adheziva koji će biti podvrgnuti namernom odlepljivanju, neophodno je omogućiti razdvajanje nakon koga adheziv ne ostaje na površini adherenda. Pored toga, vrednosti za odlepljivanje ljuštenjem bi trebalo da budu nešto niže i permanentnog karaktera (bez povećavanja vremenom). Ako su željena svojstva i planirana primena poznati, moguće je formulirati reološka svojstva tako da adhezivi budu permanentnog karaktera ili sa mogućnošću odlepljivanja i ponovnog lepljenja [Benedek, 2004a; Benedek, 2006a; Chum, Ling i Vargas, 1987].

Prema [PSTC, 1974] da bi adhezivni proizvod bio okarakterisan da ima mogućnost reaplikacije, adhezivom oslojen papirni supstrat mora da bude bez poteškoća odvojen i odlepljen sa kontaktne površine i reapliciran još najmanje osam puta na površinu papirnog adherenda bez značajnog smanjenja adhezivnih svojstava. Merenja u njihovom radu su sprovedena sa papirom gramature  $70 \text{ g/m}^2$  na koji je naneto  $7 \text{ g/m}^2$  adheziva. Testom odlepljivanja (ljuštenja) pod uglom od  $180^\circ$  brzinom  $300 \text{ mm/min}$  prilikom prvog odlepljivanja izmerene su vrednosti od  $110 \text{ g}$ , nakon 50 odlepljivanja  $85 \text{ g}$  i nakon 100 odlepljivanja  $75 \text{ g}$ . U radu autora [Lehmann i Curts, 1974] testiranje mogućnosti odlepljivanja i ponovnog lepljenja adheziva osetljivog na pritisak na papiru je vršeno merenjem vrednosti prilikom odlepljivanja na uzorcima koji su lepljeni i odlepljivani 50 i 100 puta. U nekim slučajevima se za proizvode sa mogućnošću ponovnog lepljenja koriste i umrežene strukture sa smanjenom kontaktnom površinom adheziva [Miyasaka et al., 1985]. U takvim formulacijama takođe mogu da se koriste čestice polimernih punioca osetljivih na pritisak čiji je prečnik od  $0.5$  do  $300 \mu\text{m}$ . Za poboljšanje efekta odlepljivosti čestica, u formulacije mogu da se dodaju i jonski niskolepljivi monomeri [Shuman i Burns, 1988].

Prema patentu koji su prijavili [Otter i Watts, 1990], korišćeni adhezivi imaju nizak nivo prvobitne lepljivosti i adhezivna svojstva koja omogućavaju materijalu da se zalepi na površinu pod dejstvom pritiska i sa nje otkloni pre razvoja veće sile adhezije. Inicijalno materijal je odstranjiv bez oštećenja adherenda ili zaostataka adheziva na adherendu. Inicijalno vreme gde materijal ima prethodno spomenuta svojstva iznosi najmanje 15 do 30 minuta. Nakon tog vremena, sile adhezije bi trebalo da se pojačaju dovoljno za ostvarivanje permanente veze.

Mogućnost repositioniranja i ponovne aplikacije su svojstva koja zavise od razvoja otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem. Adhezivi sa visokom vrednošću otpora na odlepljivanje ljuštenjem takođe mogu biti pogodni za repositioniranje. Autori [Lin et al., 2007] su u svom radu opisali adheziv koji da gotovo uopšte nema lepljivost i ima visoku vrednost otpornosti na ljuštenje, a koristan je u primenama gde je potrebno repositionirati proizvod pre potpune adhezije.

Adhezivi iz grupe adheziva osetljivih na pritisak se koriste čak i u proizvodnji ambalaže (pre svega za pakovanje prehrambenih proizvoda) u vidu etiketa ili klapni osetljivih na pritisak [Forcinio, 2016].



## 2.6.4 Merenje adhezije i parametri koji utiču na adheziju

Direktne metode za merenje adhezije poput testa odlepljivanja povlačenjem na gore [Hull, Colligon i Hill, 1987], testa odlepljivanja ljuštenjem [Lacombe, 2006; Buchwalter i Greenblatt, 1985], savijanjem [Damayanti et al., 2005], testa klizanjem [Lee et al., 2014; Xiang i Komvopoulos, 2013], grebanjem, nanoindentacijom [Sánchez et al., 1999] su destruktivne metode kojima se meri intenzitet sile neophodne da se izazove pucanje, cepanje ili delaminacija površine kojom su materijali u kontaktu. Njima se dobijaju informacije o makroskopskim deformacijama na kontaktu površina poput promena u sili naspram pomeraja. Mnoge direktne metode merenja adhezivne snage daju kvalitativne rezultate, dok testovi poput odlepljivanja ljuštenjem i povlačenja na gore daju kvantitativnu karakterizaciju/opis adhezije.

Lepljivost je svojstvo adheziva osetljivog na pritisak da za sebe veže adherenda neposredno nakon kontakta, ponekad sa isporučenim malim vrednostima pritiska. Međutim, eventualno podizanje ivica ili odvajanje flekso štamparskih formi sa slivova se često dešava i primeti tek tokom procesa štampe stvarajući zastoje, pa je tako za karakterizaciju adhezivnih sposobnosti Twinlock® slivova od svojstva lepljivosti daleko relevantnije svojstvo odlepljivanja ljuštenjem, koje se procenjuje nakon relativno dugog vremena kontakta adheziva i adherenda na koje se delovalo pritiscima srednjih ili jačih vrednosti.

Test odlepljivanja ljuštenjem je dobro poznata metoda merenja mehaničkih (adhezivnih) svojstava na dodiru površina, osmišljena pre 65 godina od strane Spies [Wei, 2004; Spies, 1953], koja se usled svoje jednostavnosti i lakoće korišćenja smatra veoma efikasnom.

Jačina ljuštenja predstavlja sposobnost materijala da se opire silama koje pokušavaju da ga razdvoje (razdvajanjem fleksibilne i krute ili dve fleksibilne površine). Prilikom testa se uglavnom mere prosečna sila po jedinici širine uzorka i maksimalna sila potrebna za razdvajanje spojenih površina [Sekulić, 2008].

Sila ljuštenja (otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem) se meri prilikom odvajanja adherenda ili adhezivnog materijala pod određenim uglom u odnosu na površinu lepljenja, najčešće 90° ili 180°. Merenjem otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem pomoću testa sa uglom od 180° se dobijaju vrednosti koje uključuju i zateznu čvrstoću i smicanje, dok je testom sa uglom od 90° u vrednost uključena samo zatezna čvrstoća. Kao i kod lepljivosti, merenje adhezije prilikom ljuštenja zahteva da je prvo adekvatno sproveden korak slepljivanja [Khanjani, Zohuri i Gholami, 2014; Khanjani et al., 2013].

Ljuštenje opada sa opadanjem ugla, pa je tako otpornost na odlepljivanje ljuštenjem pod uglom od 90° oko dva puta veća (usled povećanja napona smicanja) od otpornosti pri testu pod uglom od 180° [Fukuzawa i Uekita, 1999]. U radu autora [Benedek, 2004b] je međutim dokazano da je otpornost na ljuštenje pod uglom od 180° veća nego pod uglom od 90°. Kod ugla od 180° merenja zavise od svojstava materijala adherenda [Fukuzawa i Uekita, 1999]. Veća vrednost ljuštenja će se dobiti u slučaju debljih i čvršćih materijala [Zorll, 1976]. U slučaju mekših nosećih materijala, npr. mekani PVC, vrednosti ljuštenja će biti tačnije ukoliko su dobijene testom pod uglom od 90° [Wiest, 1966]. Prema autoru [Sehgal, 1985] otpornost na odlepljivanje ljuštenjem pod uglom od 180° raste proporcionalno sa porastom debljine i krutosti nosećeg materijala.

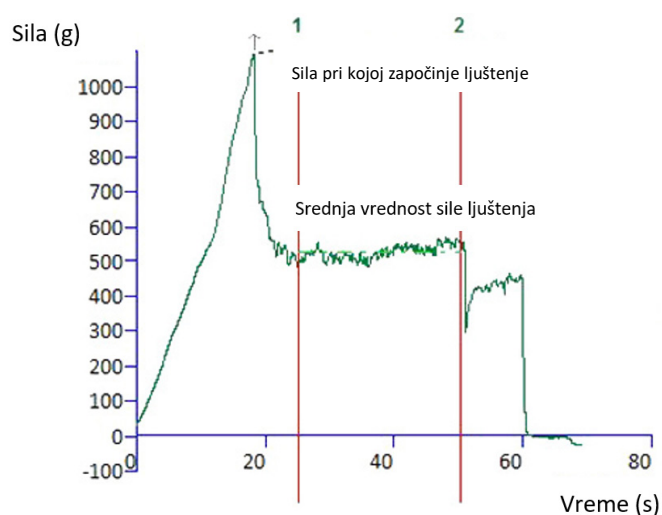
Ukoliko je brzina ljuštenja niska, otpornost će najviše zavisiti od adhezije, a ako je pak visoka, onda će na vrednosti otpornosti uticati i deformacije. Pa tako, usled viskoelastičnih svojstava adheziva osetljivih na pritisak i mehaničkih svojstava nosećih materijala, sila adhezije zavisi od brzine odvijanja ljuštenja [Benedek, 2004b; Lim i Kim, 2006; Benedek, 2004a; Benedek, 2006c].

Otpornost na odlepljivanje ljuštenjem se određuje prema standardima ASTM D-3370-78, PSTC-1 i FINAT FTM 1 i 2. Prema ASTM D3330 standardu, uzorak oslojen adhezivom širine 2.54 cm treba aplicirati na horizontalnu površinu čiste ploče od nerđajućeg čelika sa najmanje 12.7 cm dužine gde je ostvaren kvalitetan kontakt površina. Sve neravnine i vazdušni džepovi između površina se istiskuju gumenim valjkom, a otpornost na odlepljivanje ljuštenjem se meri pomoću kidalice.

U radu autora [Brooks et al., 2001] otpornost na odlepljivanje ljuštenjem je merena upotrebom ASTM D3330/D3330 M-99 Standard Test metode (metoda za merenje otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem traka osetljivih na pritisak). Adhezija lateksa u radu autora [Schultz i Kofira, 2001] je testirana upotrebom ASTM D897, a u radu autora [Ouyang et al., 2001] upotrebom ASTM D330-90 standarda. Iako postoje standardne metode za merenje otpornosti na odlepljivanje ljuštenjem, česta je i upotreba modifikovanih metoda, poput modifikacije metode merenja pod uglom od 90° sa tzv. nemačkim točkom, gde se testirani materijal umesto na horizontalnu čeličnu pločicu montira na čelični točak određenog prečnika koji svojom konstrukcijom omogućava konstantnost ugla odlepljivanja od 90°. Ovakva postavka se koristi kod merenja jačine adhezije traka, filmova oslojenih adhezivom, folija, laminiranih materijala, plastičnih i papirnih filmova prema DIN 53357 standardu. Kako se uzorak odlepljuje sa podloge montirane na testni točak, obavezno je da uzorci budu fleksibilni [Thwing-Albert, n.d.].

Eksperimentalno je ustanovljeno da sila ljuštenja varira kao funkcija pomeraja ljuštenja i da svoju maksimalnu vrednost ne dostiže nužno tokom stabilizovane faze ljuštenja već je često dostiže u inicijalnoj fazi.

Primer krive koja pokazuje promenu sile ljuštenja kroz trajanje testa (povećavanje pomeraja) je prikazan na grafiku 2.6.1. Na krivoj se razlikuju tri zone: prva (inicijalna) zona pokazuje rast sile do početka odvajanja površina materijala, druga faza predstavlja pad u sili nakon početka odvajanja, a treća faza je stabilizovan proces odlepljivanja ljuštenjem gde sila ostaje pretežno konstantna kroz vreme trajanja testa. Upravo ta sila izmerena tokom treće faze predstavlja silu odlepljivanja ljuštenjem.



*Grafik 2.6.1: Promena sile ljuštenja u odnosu na vreme trajanja testa (povećavanje pomeraja)  
[Stable Micro Systems, n.d.]*

Poredivši sile ljuštenja u stabilizovanom delu procesa odlepljivanja, ustanovljeno je da sila raste sa porastom brzine ljuštenja, a u slučaju fiksne brzine opada sa povećanjem ugla ljuštenja [Peng et al., 2014].

Prema autorima [Sauer, 2011], [Kim, Kim i Kim, 1989] i [Wei i Zhao, 2008] sila ljuštenja isprva raste tokom inicijalne faze, a onda opada i stabilizuje se na konstantnu vrednost tokom daljeg procesa ljuštenja. Maksimalna sila ljuštenja je najčešće vidljivo veća od sile merene tokom stabilizovane faze testiranja, pogotovu kod nosioca koji pokazuju relativno veliku krutost pri savijanju i povećava se sa povećanjem krutosti. To se dešava zato što sa povećanjem debljine nosioca raste i energija savijanja unutar njega sve dok tangencijalni ugao nosioca na frontu dejstva sile ne bude usklađen sa uglom ljuštenja. Za razliku od nosioca veće debljine i krutosti, kod nosioca relativno niske krutosti, sila odlepljivanja ljuštenjem monotono raste u inicijalnoj fazi i dostiže svoju maksimalnu, a ujedno i konstantnu vrednost tokom stabilizovane faze [Peng i Chen, 2015].

Prema autorima [Chen et al., 2011] sila ljuštenja se definiše kao prosečna sila merena između pomeraja od 20 i 60 mm. Slična preporuka može da se pronađe i kod [Admet, 2019]. Naime, prosek sila treba uzimati tek nakon pomeraja od 2.54 cm, a do pomeraja od 15.24 cm. Na taj način se iz proračuna uklanja maksimalna sila izmerena tokom inicijalne faze koja zavisi od različitih dodatnih parametara. Npr. u radu autora [Chen et al., 2011] kriva ljuštenja pokazuje mali pad nakon inicijalne faze što ukazuje na otkaz papira kao substrata. Dokaz da pad u sili ljuštenja (iako drastičniji nego kod [Chen et al., 2011]) tokom inicijalne faze indikuje otkaz substrata, a ne spoja je dat i u radu autora [Zhao i Pelton, 2005]. Isključivanje maksimalne sile iz faze inicijacije tokom proračuna sile ljuštenja je praktikovano i od strane [Shimadzu, 2019] gde su tokom testiranja odlepljivanja ljuštenjem pod uglom od 90° vršenog brzinom od 300 mm/min u obzir uzete samo vrednosti sila izmerene nakon inicijalnih 25 mm pomeraja.

## **2.7 Parametri kvaliteta otiska kartonske ambalaže**

Procenjivanje kvaliteta štampe je generalno težak zadatak. Odabir merljivih parametara kontrole kvaliteta zavisi od namene krajnjeg proizvoda i očekivanja korisnika. Parametri kvaliteta se kontrolišu kako tokom procesne, tako i tokom završne kontrole. Najčešće mereni parametri tokom procesne i završne kontrole su optička gustina, sjaj i porast tonskih vrednosti. Motling (engl. Print Mottle) je parametar koji se ređe meri zbog poteškoća pri interpretaciji rezultata i njihovog dovođenja u vezu sa svojstvima materijala i parametara procesa proizvodnje. Cilj merenja parametara kvaliteta je kvantifikacija finalnog izgleda štampanog proizvoda. Pravilnim korišćenjem različitih uređaja se dobijaju rezultati koji uz dobru interpretaciju daju objektivni pandam subjektivnoj ljudskoj proceni kvaliteta.

Istraživači koji evaluiraju uticaj promenljivih na kvalitet otiska najčešće biraju jedan ili više parametara kvaliteta štampe čiju će promenu posmatrati. [Chalmers, 1998] je posmatrao promene optičke gustine, [Armel i Cusdin, 2001] motling, [Göttsching i Ness, 1997] neodštampane tačke, a [Miller, 1997] neravnomernost nanosa boje. [Lindström, Dölling i Poustis, 1994] i [Steadman, Woodall i Lesniak, 1993] su analizirali optičku gustinu i neravnomernost nanosa boje. [Zang i Aspler, 1995] su analizi pridodali i rezultate merenja sjaja, a [Pommice, Poustis i Lalanne, 1989] su analizu kvaliteta otiska izvršili merenjima optičke gustine i porasta tonskih vrednosti. Veći broj parametara u svojim istraživanjima su analizirali [Ginman i Tainen, 1988] i [Jensen, 1989]. Njihov fokus je bio na parametrima optičke gustine, kontrasta, sjaja, porasta tonskih vrednosti i neravnomernosti nanosa boje. Što se tiče motlinga, [Aspler et al., 1998] su ga u svom istraživanju pridružili parametrima porasta tonskih vrednosti i kvaliteta očitavanja bar kodova.

## 2.7.1 Optička gustina

Optička gustina je jedan od najvažnijih parametara za sve tehnike štampe. Ona grubo ukazuje na to koliko je boje preneto na podlogu. Ukoliko je optička gustina niska, otisak će izgledati bledo i neizražajno, a ukoliko je optička gustina previsoka dolazi do spajanja tačaka na tonskim površinama [Johansson, Lundberg i Ryberg, 2011]. Optička gustina ( $D$ ) je povezana sa refleksijom na način prikazan jednačinom 2.7.1.

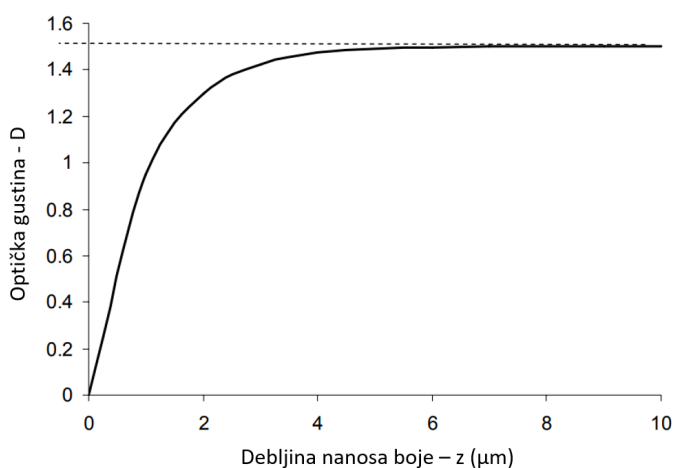
$$D = \log_{10} \frac{R_0}{R_1} \quad (2.7.1)$$

gde je  $R_1$  procenat reflektovane svetlosti sa polja punog tona ili polja tonskih vrednosti, a  $R_0$  procenat reflektovane svetlosti neštampane podloge [Gustavson, 1997; Kipphan, 2001]. Percipirana jačina obojenja nije linearno zavisna od odnosa procenata reflektovane svetlosti, već po logaritamskoj funkciji.

Kako sloj boje na podlozi raste, tako raste i optička gustina sa vrednosti od 0, gde na podlozi uopšte nema boje, do maksimalne vrednosti optičke gustine  $D_\infty$  iznad koje nema daljeg rasta sa porastom debljine sloja boje. Ova zavisnost je određena jednačinom 2.7.2 [Tollenaar i Ernst, 1962].

$$D = D_\infty(1 - e^{-mz}) \quad (2.7.2)$$

gde  $m$  predstavlja nagib krive  $[(dD/D_\infty)/dz]$  (slika 2.7.1) u oblastima veoma tankih nanosa boje, a  $z$  predstavlja debljinu nanosa boje. U istraživanju [Havlinová et al., 2000] su zaključili da se najviša vrednost  $D_\infty$  postiže na premaznim, glatkim podlogama visokog nivoa svetline i niskog nivoa penetracije.



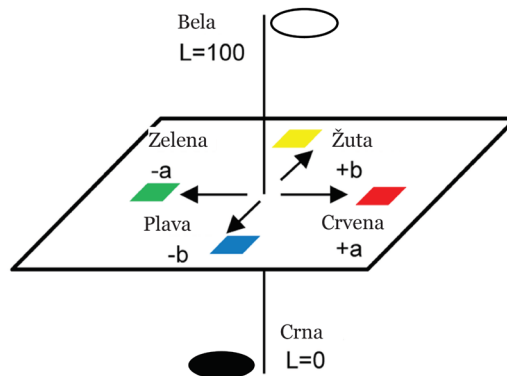
Slika 2.7.1: Optička gustina i njena zavisnost od promene debljine sloja boje ( $m=1$  i  $D_\infty=1.5$ )

Optička gustina se najčešće meri pomoću denzitometara koji očitavaju procenat reflektovane svetlosti talasnih dužina koje su pretežno apsorbovane od strane boje [Leach i Pierce, 1999]. Merenje je moguće i pomoću spektrofotometara koji generalno mere faktor reflektanse u opsegu 360 do 740 nm talasne dužine svetlosti u koracima od 10 nm. Odabirom specifične talasne dužine moguće je meriti reflektansu komponente svetlosti koja se najviše apsorbuje u boji.

## 2.7.2 Razlika u boji

Razlika u boji dva posmatrana objekta može biti predstavljena kao perceptualna razlika i izračunata razlika. Perceptualna razlika je psihofizička razlika opažena posmatranjem objekata od strane posmatrača. Izračunata razlika je zavisna od načina označavanja boja i korišćenog prostora boja. Boja je stimulus koji se može predstaviti tačkom u prostoru, a razlika u boji  $\Delta E^*$  između dva stimulusa funkcioniše po principu računanja udaljenosti između tačaka koje predstavljaju stimuluse [Mokrzycki i Tatom, 2011].

Jednačine za računanje razlike u boji postoje već godinama. 1976. CIE komisija je objavila prvu međunarodno priznatu jednačinu za računanje razlike u boji. Ova formula poznatija kao  $\Delta E^*_{ab}$  ili  $\Delta E^*_{76}$  je označila razliku u boji od  $\Delta E^*=1$  kao najmanju razliku uočljivu od strane ljudskog oka. Ova formula je korišćena dugi niz godina od strane ISO u njihovim standardima za grafičke tehnologije, na primer ISO 12647-2 standardu za probne otiske. Korišćenje ove jednačine je podrazumevalo upotrebu standardnih izvora svetlosti i standardnog posmatrača. Najvažniji standardni izvori svetlosti u grafičkoj industriji su D50 i D65. Standardni posmatrač je osnova prosečne ljudske reakcije na podražaj koji izaziva svetlost određenih talasnih dužina, bez anomalija. Prostor boja korišćen u ovoj formuli je CIE  $L^*a^*b^*$ . Kod  $L^*a^*b^*$  prostora boja,  $L^*$  predstavlja svetlinu, dok su  $a^*$  i  $b^*$  hromatske vrednosti boje (slika 2.7.2). Pozitivne vrednosti za  $a^*$  znače da je boja više crvena, a negativne da je više zelena, dok pozitivne vrednosti za  $b^*$  znače da je boja više žuta, a negativne da je više plava. U samom središtu dijagrama nalazi se vertikalna osa koja je ahromatska, a sa udaljavanjem  $a^*$  i  $b^*$  koordinata od nje raste i zasićenje boje [Hunt i Pointer, 2011].



Slika 2.7.2: CIE  $L^*a^*b^*$  prostor boja

Uvođenje  $L^*a^*b^*$  načina označavanja boja od strane CIE komisije je izvršeno sa ciljem uređivanja i standardizacije do tada raznovrsnih načina označavanja boja i jednačina za računanje razlike u boji [CIE, 1986].  $\Delta E^*_{ab}$  razlika u boji se izračunava putem formule 2.7.3.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2.7.3)$$

Pošto je ljudski sistem vida osetljiviji na promene u zasićenosti nego u svetlini, to znači da će iste razlike u boji između dve žute i dve zelene boje vizuelno delovati dosta drugačije [Techkon, 2018]. Sa tim na umu, 1994. godine CIE je izvršila reviziju  $\Delta E^*_{ab}$  formule i uvela  $\Delta E^*_{94}$  formulu (2.7.4). Ova formula koristi  $L^*C^*h^*$  način označavanja boje za izračunavanje razlike u boji.

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (2.7.4)$$

U jednačini figurišu dva seta koeficijenata bazirana pretežno na podacima o toleranciji iz RIT/Dupont istraživanja boja za automobile [Techkon, 2018].  $k$  koeficijenti su poznatiji kao parametrijski faktori i tiču se efekata koji utiču na procenu razlike u boji.  $S$  grupa koeficijenata je pridružena sa ciljem uračunavanja uticaja nedostataka CIE  $L^*a^*b^*$  u vizuelnoj uniformosti [Billmeyer, 2000].

$\Delta E_{94}^*$  je svakako bolje približavala brojne vrednosti razlike u boji načinu na koji ih percipira ljudsko oko. Međutim, imala je nedostatke u tačnosti u plavo-ljubičastim delovima spektra. Upravo zbog toga je 2000. godine izvršena još jedna revizija kojom je uvedena formula  $\Delta E_{00}^*$ .

$\Delta E_{00}^*$  formula sadrži tzv. rotacijski odnos za plavo-ljubičasti deo spektra čime adresira nedostatke  $\Delta E_{94}^*$  formule. Dodatkom korekcionog (rotacionog) faktora jednačini  $\Delta E_{94}^*$  dobijena je formula za računanje razlike u boji  $\Delta E_{00}^*$  prikazana jednačinom 2.7.5.

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)} \quad (2.7.5)$$

Iz jednačine se vidi da su  $LCh$  vrednosti sada transformisane u  $L'C'h'$ . Način na koji je to izvršeno su detaljno opisali [Sharma, Wu i Dalal, 2005]. Pet korekcionih faktora  $L^*a^*b^*$  prostora boja u ovoj formuli su: težinski koeficijenti svetline  $k_L S_L$ , težinski koeficijenti zasićenosti  $k_C S_C$  i težinski koeficijenti tona  $k_H S_H$ , interaktivni odnosi između razlika u zasićenosti i tonu uvedeni za poboljšavanje tačnosti formule u slučaju plavih boja i  $R_T$  faktor koji služi za preskalaranje  $a^*$  ose CIE  $L^*a^*b^*$  prostora boja u cilju poboljšavanja tačnosti formule u slučaju sivih boja.

### 2.7.3 Porast tonskih vrednosti

Porast tonskih vrednosti je neizbežna pojava na rasterskim tačkama do koje dolazi tokom štampe. On predstavlja razliku u veličini rasterskih tačaka na otisku i digitalnom fajlu, odnosno njihovo povećanje do kojeg dolazi tokom faza pripreme za štampu i štampe. Porast tonskih vrednosti nikada ne treba kompenzovati u potpunosti zbog prirode ljudskog oka koja očekuje određeni porast tonskih vrednosti [Bould et al., 2004]. Nizak porast tonskih vrednosti je pokazatelj visokog kvaliteta štampe [Youssef, 2015].

Tokom štampe, štampane rasterske tačke se proširuju kao posledica dejstva pritiska pre svega u zoni štamparskog NIP-a. U toj zoni pored kompresovanja podloge za štampu dolazi i do kompresovanja elemenata štamparske forme, što vodi do deformacije rasterskih elemenata na štamparskoj formi i shodno tome povećanja štampanih rasterskih tačaka. Ovaj porast tonskih vrednosti, pogotovu u flekso štampi je upotpunjen i posledicama razlivanja boje na podlozi tokom njenog stiskanja u zoni štamparskog NIP-a. Ove dve pojave, uz pojavu razlivanja boje usled razlika u slobodnim površinskim energijama podloge i boje su glavni činioci kojima je određen mehanički porast tonskih vrednosti [Mesic, 2006]. Mehanički porast tonskih vrednosti prema tome predstavlja razliku između realne veličine rasterskih elemenata na otisku i na štamparskim formama.

Deformacija rasterskih elemenata na štamparskoj formi nastaje usled dva mehanizma. Prvi je bočno proširenje površine tačke pod pritiskom. Intenzitet ovog proširenja je određen



Poasonovim koeficijentom ( $\nu$ ). Poasonov koeficijent se definiše kao odnos deformacije u poprečnom pravcu ( $\epsilon_r$ ) i deformacije u uzdužnom pravcu ( $\epsilon_L$ ) [Nelsen i Landel, 1994]. Kod štamparskih formi koje imaju visok Poasonov koeficijent usled svoje gotovo nekompresibilne prirode, bočno proširenje predstavlja mehanizam koji značajno doprinosi porastu tonskih vrednosti. Drugi mehanizam je deformacija koja je određena bočnim zidovima štampajućih elemenata koji u određenoj meri bivaju pridruženi površini elemenata prilikom prenosa boje pod pritiskom. Pri određenom pritisku, nivo deformacije uzrokovane bočnim zidovima je određen Jungovim modulom elastičnosti fotopolimerne štamparske forme. Za krut materijal sa visokim Jungovim modulom, deformacije bočnih zidova gotovo da nema. Kriva porasta tonskih vrednosti usled deformacije bočnih zidova pokazuje da kod svetlih tonova sa porastom tonskih vrednosti dolazi do naglog pada udela deformacije bočnih zidova u porastu tonskih vrednosti jer rasterski elementi dobijaju strukturnu jačinu. Međutim, pri ulasku u oblast srednjih tonova, udeo deformacije bočnih zidova u porastu tonskih vrednosti ponovo raste zbog povećanja obima tačaka [Bould, Claypole i Bohan, 2004]. Nakon toga, udeo ove deformacije ponovo počinje da konstantno opada usled povećanja jačine strukture i smanjenja veličine bočnih zidova zbog sve većeg spajanja rasterskih elemenata u svojim osnovama.

Ova dva mehanizma pri različitim uslovima imaju različite udele u ukupnom porastu tonskih vrednosti. Deformacija štamparske forme je najizraženija u veoma svetlim tonovima gde mali rasterski elementi i velike dubine reljefa udruženo čine strukturu elemenata nestabilnom i veoma podložnom deformaciji. Ovo je veoma problematična činjenica pogotovu pri štampi vinjeta (fina tonskih prelaza čija pokrivenost opada do nule) u predelima najsvetlijih tonova, koji zbog porasta tonskih vrednosti ne mogu da budu reprodukovani. Pored toga, linijatura rastera je još jedan od ključnih parametara gde sa porastom linijature rastera opada površina rasterskih tačaka, ali raste zbir obima rasterskih tačaka na posmatranoj površini (sa  $0.0044 \mu\text{m}^{-1}$  za 10 % pokrivenosti pri 39.4 linija/cm na  $0.0077 \mu\text{m}^{-1}$  za istu pokrivenost pri linijaturi od 68.9 linija/cm). Ovo rezultuje povećanjem porasta tonskih vrednosti usled deformacije bočnih zidova, dok deformacija usled bočnog proširenja površine rasterskog elementa nije pogođena promenom linijature. Porast tonskih vrednosti usled bočnog proširenja površine rasterskog elementa raste sa porastom pokrivenosti, međutim ovaj porast se kompenzuje padom porasta usled deformacije bočnih zidova, što rezultuje malom promenom u ukupnom porastu tonskih vrednosti [Bould, Claypole i Bohan, 2004].

Sa porastom dubine štampajućih elemenata, ugao bočnih ivica raste i one postaju strmije, što rezultuje manjim porastom tonskih vrednosti usled deformacije bočnih zidova. Međutim, ovakvi elementi strmih bočnih ivica i dubokog reljefa najčešće imaju užu osnovu što ih čini podložnijim drugim vidovima deformacije koje mogu da rezultuju povećanjem porasta tonskih vrednosti [Liu, Guthrie i Bryant, 2002]. Uticaj ugla nagiba bočnih zidova je u svom istraživanju uočio i [Gotsick, 2014] gde je krivljenje rasterskih elemenata dovelo do izdužavanja rasterskih tačaka i shodno tome značajnog porasta tonskih vrednosti. [Johnson et al., 2009] međutim nisu primetili uticaj ugla nagiba bočnih zidova na prenos boje, ali su kao mogućnost naveli da se pad deformacije bočnih zidova rasterskih elemenata i povećanje mogućnosti nastanka drugih deformacija međusobno anuliraju.

Za ublažavanje velikog skoka u optičkoj gustini pri rastu pokrivenosti u fleksografskom procesu je najbolje koristiti okrugli oblik tačke pri rastriranju. Okrugle tačke se ne dodiruju sve do 65 % pokrivenosti površine za simetrične ili 75 % za asimetrične. Porast tonskih vrednosti je zbog toga manji u tamnijim srednjim tonovima i lakše ga je kontrolisati i kompenzovati [Lee, 1998].

Drugi tip porasta tonskih vrednosti do koga uvek dolazi pri merenju svojstava na osnovu udela reflektovane svetlosti je optički porast tonskih vrednosti. On nastaje zbog

rasipanja svetlosti unutar podloge. Kao posledica rasipanja svetlosti, određeni udeo ostaje zarobljen ispod rasterske tačke i apsorbovan od strane boje što dovodi do opažajnog rasta površine tačke. Parametri koji utiču na optički porast tonских vrednosti su bočno rasipanje svetlosti i spektralna transmitansa boje. Površinska refleksija takođe može indirektno da utiče na optički porast tonских vrednosti.

[Yule i Nielsen, 1951] su proučavajući optički porast tonских vrednosti ustanovili da Murray-Davies formuli nedostaje optički porast tonских vrednosti, pa su formuli dodali empirijski faktor  $n$ . [Yang, Lenz i Kruse, 2001] su istraživanjem ustanovili da nivo penetracije boje takođe utiče na optički porast tonских vrednosti. Naime, što je penetracija boje veća, to je optički porast tonских vrednosti manji.

Ukupan porast tonских vrednosti može da se izračuna merenjem faktora reflektanse tonske površine ( $R$ ) u odnosu na faktor reflektanse površine punog tona ( $R_V$ ) i reflektivnosti podloge za štampu ( $R_\infty$ ). Procenat pokrivenosti površine rasterskim tačkama ( $A$ ) je onda iskazan putem Murray-Davies formule [Murray, 1936] prikazane jednačinom 2.7.6.

$$R = AR_V + (1 - A)R_\infty \quad (2.7.6)$$

U ovoj formuli ( $A$ ) se iskazuje putem jednačine 2.7.7.

$$A = \frac{(R - R_\infty)}{(R_V - R_\infty)} \quad (2.7.7)$$

Procenat pokrivenosti površine ( $F_D$ ) se iskazuje formulom 2.7.8.

$$F_D [\%] = \left[ \frac{(1 - 10^{-D_R})}{(1 - 10^{-D_V})} \right] \times 100\% \quad (2.7.8)$$

Gde su  $D_R$  i  $D_V$  optička gustina tonske površine i površine punog tona respektivno.

Porast tonских vrednosti se na kraju može izračunati putem formule 2.7.9.

$$PTV = F_D - F_{nom} \quad (2.7.9)$$

gde je  $F_{nom}$  nominalna pokrivenost površine negativ filma. Ova formula je validna ukoliko u konačnu vrednost porasta tonских vrednosti treba da bude uključen i optički porast pošto na merenja utiču i optička svojstva podloge.

[Bould, Claypole i Bohan, 2004] su na osnovu istraživanja koje su sprovedeli zaključili da razlivanje boje nosi najveći deo porasta tonских vrednosti u fleksografskom procesu štampe. Deformacija bočnih zidova ima srednji nivo uticaja, a bočno proširenje tačke ima samo mali uticaj na porast tonских vrednosti kao jedan od parametara putem kojih štamparske forme utiču na porast tonских vrednosti.

## 2.7.4 Preklapanje

Preklapanje se definiše kao sposobnost boje da se prihvati na sloj prethodno štampane boje [Zjakić, 2007].

U grafičkim tehnologijama višebojni otisci se postižu principom subtraktivne sinteze boja gde se različiti tonovi boja postižu štampom punih tonova ili tonских površina [Field, 1999].



Preklapanje se smatra veoma bitnim parametrom procesne kontrole. To je zato što su važne prepoznatljive boje poput crvene na jabukama, zelene od trave, plave na nebu u reprodukciji boja gotovo uvek dobijene preštampavanjem dve boje. Preklapanje pomaže u kvantifikaciji načina interakcije dve procesne boje tokom štampe. Dobro prihvatanje boje zavisi od reoloških svojstava (viskozitet i lepljivost) boje koja se preštampava, od debljine filma boje i od redosleda boja prilikom štampe. Ukoliko se promeni vrednost preklapanja i ton preštampanih boja će se gotovo sigurno promeniti [Chung i Hsu, 2008]. Preklapanje je definisano Brunner-ovom jednačinom (2.7.10) i izraženo je u procentima [Stanton i Radencic, 2001].

$$T = \frac{1-10^{-D_{OP}}}{1-10^{-(D_1+D_2)}} \times 100\% \quad (2.7.10)$$

gde je  $D_{OP}$  optička gustina preštampanih boja,  $D_1$  optička gustina punog tona prve štampane boje, a  $D_2$  optička gustina punog tona druge štampane boje. Prilikom merenja koristi se filter komplementaran drugoj štampanoj boji.

Fleksografske boje na bazi vode su najčešće formulisane sa smolama rastvorivim u vodi pod baznim uslovima (amonijak i alkanolamini se koriste kao rastvarajući agensi) i pokazuju pH između 8 i 9. Kiselost podloge neutrališe rastvarajuće amine i u isto vreme započinje i sušenje boje. Ono je pogodno i poželjno kod višebojne štampe da bi se eliminisao tzv. Perl efekat (formiranje kapljica drugog sloja boje na prvom) i omogućilo dobro preklapanje [Leloup, 2002].

Jedan od defekata na otisku koji se najčešće može uočiti kod preštampanih boja je manifestovan u vidu stvaranja kanala ili manjih i većih rupica u sloju preštampane boje. Ova pojava nije preterano izražena pri niskim brzinama štampe jer se razdvajanje boje odvija stabilno i glatko prema principima hidrodinamike. Međutim, iznad kritične brzine, na dodirnoj površini zona vazduha i boje na izlasku iz štamparskog NIP-a dolazi do destabilizacije usled koje nastaju i defekti [MacPhee, 1997]. [Rabaud, Couder i Michalland, 1991] su ovu nestabilnost u štampi podveli pod veću grupu hidrodinamičkih defekata koju su opisali [Saffman i Taylor, 1958] čije ime i dalje nosi. Saffman-Taylor nestabilnost nastaje kada manje viskozni fluid (u datom slučaju vazduh) prolazi preko dodirne zone u viskoziji fluid (u datom slučaju boja) formirajući na taj način kanale u nanetom sloju boje. Ovaj defekt se generalno može podvesti pod kategoriju neuniformnosti površine [Mathes, 2011].

### 2.7.5 Uniformnost štampane površine

Uniformnost površine je možda jedan od faktora sa najviše uticaja na ukupan kvalitet štampe. Uniformnost štampe je samo drugi izraz za nivo ravnomernosti optičkih gustina i sjaja. Tradicionalno, uniformnost površine se evaluirala procenom varijacije reflektanse na štampanom otisku. Iako je amplituda varijacije u reflektansi najvažniji aspekt uniformnosti površine, na nju mogu da utiču i drugi aspekti. Pošto ljudsko oko ima tendenciju prilagođavanja preovladavajućim uslovima sredine koju posmatra, pri proceni uniformnosti površine je važno uzeti u obzir i aspekte srednje vrednosti nivoa faktora reflektanse, sadržaj prostorne frekvencije, strukturu neuniformnosti i varijacije boje [Fahlcrantz, 2005].

U zavisnosti od tipa neuniformnosti, u literaturi se može pronaći puno različitih načina kvantifikacije ove pojave [Galton, 2004; Dube et al. 2005; Hallberg, Odeberg Glasenapp, Lestelius, 2005; Sadovnikov et al., 2005; Barros i Johansson, 2007; Rosenberger, 2010; Galton i Rosenberg, 2007].

Motling predstavlja vidljivu heterogenost štampanog otiska i blisko je povezana sa neravnomernostima nastalim pri prenosu i apsorpciji boje [Hallberg Hofstrand, 2006; Johansson i Norman, 1996]. Sa druge strane, na prenos i apsorpciju boje utiču podloga za štampu, svojstva

boje i uslovi štampe poput pritiska ili brzine štampe. Izvor motlinga može da bude neravnomeran premaz na podlozi za štampu što rezultuje neujednačenom apsorpcijom boje od strane podloge. Loši uslovi (podešavanja parametara) štampe su takođe jedan od potencijalnih uzročnika motlinga putem varijacija u debljini prenetog sloja boje. Boja bi trebalo da ima dobra svojstva tečljivosti da bi njen sloj mogao lepo da se izravna nakon izlaska iz zone stamparskog NIP-a. Transparentnost boje je takođe jedan od potencijalnih uzročnika motlinga [Todd, 1994b].

Uniformnost površine se najčešće procenjuje putem metoda analize slike gde se optički signal razdvaja u različite prostorne frekvencije. Ključni deo većine modela je srednja vrednost optičke gustine  $D$  i njena standardna devijacija po površini uzorka. Uniformnost površine može da se izračuna kroz analizu Furijeovih transformacija varijacija u intenzitetima faktora reflektanse u x-y ravni sa slika snimljenih npr. ravnim skenerom. Rezultat se najčešće predstavlja kao koeficijent varijacije, a varijacije se beleže za prostorni opseg talasnih dužina 1-8 mm [Johansson, 1999]. Prema ISO 13660:2001 standardu, neuniformnost je standardna devijacija optičke gustine ili merenja reflektansi duž velikog uzorka, sa zrnčavošću definisanom kao standardnom devijacijom varijacija više frekvencije unutar merenog polja, a neuniformnost je standardna devijacija srednjih vrednosti duž velikog broja odvojenih polja. Naime, za merenje uniformnosti pokrivanja površine bojom se koristi 100 pločica dimenzija 1.27 x 1.27 mm. Neravnomerna pokrivenost se potom računa kao standardna devijacija medijan vrednosti koeficijenta refleksije [International Organization for Standardization, 2001].

U fleksografiji, smanjenje uniformnost površine može nastati usled nedovoljno čistih glavnih komponenti procesa štampe unutar mašine ili zbog neodgovarajuće kombinacije boje i podloge za štampu. Tipični problemi koji dovode do smanjenja uniformnosti štampane površine su nestabilan viskozitet boje, visoka hrapavost podloge za štampu, neravnomerna debljina, neravnomerna svojstva apsorpcije podloge, nehomogena površina stamparske forme, neadekvatno odabran raster valjak ili loša kombinacija brzine i pritiska štampe [Fahlcrantz, 2005; Holmvall i Uesaka, 2008].

Fleksografski proces je čuven po osetljivosti na dejstvo sile nastale između stamparske forme i podloge pri njihovom kontaktu. Pri tolikom nivou osetljivosti, varijacije u silama pritiska (usled varijacija u debljini podloge za štampu) koje relativno često nastaju dovode do varijacija u porastu tonskih vrednosti i prenosu boje što značajno utiče na varijacije uniformnosti površine. Ovo bi moglo da se ublaži upotrebom adekvatne obostrano lepljive trake za montažu stamparskih formi sa kompresibilnim slojem koji bi mogao da amortizuje oscilacije u debljini podloge i održavanjem pritiska tako da je ostvaren Kiss Print kojim se umanjuje mehanički porast tonskih vrednosti [Teleman et al., 2005].

U svom istraživanju uniformnosti štampane površine, [Kawasaki, Ishisaki i Yoshimoto, 2009] su primetili da na premaznom papiru nije bilo značajne neuniformnosti punih tonova, ali u slučaju tonskih površina jeste. To ih je navelo da pomisle da pored transfera boje postoji još mehanizama koji utiču na uniformnost površine štampanih tonskih vrednosti. Na osnovu toga postavili su hipotezu (koju su i potvrdili) da neuniformnost optičkog porasta tonskih vrednosti prouzrokuje neuniformnost štampanih polja tonskih vrednosti. To su pretpostavili tek nakon što su ustanovili da se neuniformnost štampe tonskih površina javlja i uprkos činjenicama da su oblici i optičke gustine rasterskih tačaka bile izuzetno ravnomerne.

Uniformnost površine može da se kvantifikuje na više načina. Neki od njih su bazirani na merenju varijacija u optičkim gustinama (primer dat jednačinom 2.7.11) pri čemu se varijacije u slučaju globalno viših vrednosti optičkih gustina tretiraju kao manje značajne od onih gde su varijacije takve da pojedina merenja pokazuju čak i optičku gustinu od 0. Drugi su bazirani na pokrivenosti (primer dat jednačinom 2.7.12) i vođeni činjenicom da je ljudsko oko osetljivije na veće neodštampane površine nego na manje. Neke manje površine ljudsko oko

čak uopšte ne može da registruje, pa se kvantifikacija ovim putem bazira na merenju srednje vrednosti veličina neodštampanih površina sa izuzetkom onih koje su manje od rezolucije ljudskog oka. Treći, usmereni ka zrnčavosti površine, su pre svega orijentisani ka izračunavanju standardne devijacije optičke gustine merene veliki broj puta na poljima malih površina (primer dat jednačinom 2.7.13) [FAG, 2019].

$$Motling = \sqrt{\frac{1}{v} * \sum_{i=1}^n (wi * pi)} \times 100\% \quad (2.7.11)$$

gde je:

$$v = \sum_{i=1}^n wi$$

$wi$  = težinski koeficijent

$pi$  = pokrivenost površine izračunata sa pragom  $i$

$$Pokrivenost = \frac{\text{Zbir veličina svetlih površina}}{\text{Ukupan broj svetlih površina}} \quad (2.7.12)$$

$$ISO 13660 \text{ zrnčavost} = \text{Standardna devijacija optičkih gustina} \quad (2.7.13)$$

## 2.7.6 Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka

### 2.7.6.1 Efekat prstenaste rasterske tačke

Prstenaste rasterske tačke su tačke koje, kako im i ime kaže, imaju prstenast oblik usled nedostatka boje u njihovom središtu. Generalna pretpostavka je da su uzrokovane izbacivanjem boje ka spolja, odnosno dalje od vrha rasterskog elementa tokom kontakta sa podlogom za štampu, ova pretpostavka je potkrepljena činjenicom da su ovi defekti izraženiji pri štampi sa većim pritiscima [Mathes, 2012]. Još jedno objašnjenje ovog efekta dato od strane [Hornschuh, 2005] je da na početku štampe samo ivice konkavnih rasterskih elemenata prenose boju. Kako štampa napreduje, središte rasterskog elementa takođe počinje da prenosi boju pa se efekat prstenaste rasterske tačke smanjuje. U praksi efekat prstenaste rasterske tačke se često poistovećuje sa tzv. halo efektom [Mathes, 2012].

Halo efekat prema [Mathes, 2012] predstavlja okvirnu liniju elementa dobijenu nagomilavanjem boje. Prema [Hamblyn, 2004], halo efekat se reprezentuje rasterskim tačkama sa neodštampanim delovima u unutrašnjosti. Njegova pretpostavka je da, iako je rasterski element konveksan pri vrhu, prilikom kontakta sa podlogom dolazi do formiranja konkavnog oblika. Hidrodinamički efekat stiskanja filma boje između štamparske forme i podloge za štampu dovodi do pojave nadpritiska u zoni vrha štamparske forme. Taj pritisak je veći od pritiska na ivicama rasterskog elementa i dovodi do urušavanja središta rasterskog elementa. Sada konkavno središte rasterskog elementa zatvara boju u svojoj unutrašnjosti, a boja koja se nalazila ispod novostvorenog ruba udubljenja rasterskog elementa biva istisnuta napolje, ostavljajući tako delove ispod ruba rasterskog elementa neodštampanim. Smatralo se da je glavni doprinos pojavi ove deformacije u različitoj mekoći polimera. Naime, polimer u središtu rasterskog elementa je mekši, što može da bude posledica procesa osvetljavanja ili naponom uzrokovanog otvrdnjavanja polimera na ivicama rasterskog elementa pri opterećenju. To je potkrepljeno činjenicom iz rada [Hamblyn, 2015] gde je navedeno da je ova deformacija izraženija pri većim pritiscima i brzinama štampe.

Faktor neodštampanih površina unutar tačkaka se računa tako što se površine niske optičke gustine unutar tačkaka mere i upoređuju sa površinom cele rasterske tačke. Vrednosti se izražavaju u procentima i računaju pomoću jednačine 2.7.14 [FAG, 2019].

$$\text{Faktor neodštampanih površina} = \left( \frac{\text{Sr.vr.neodštampanih površina tačkaka}}{\text{Sr.vr.površina tačkaka}} \right) \times 100\% \quad (2.7.14)$$

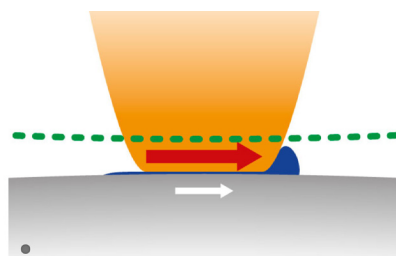
### 2.7.6.2 Istezanje rasterskih tačkaka

Istezanje rasterskih tačkaka nastaje razmazivanjem boje prilikom štampe. Rasterske tačke bivaju deformisane u smeru štampe tako da poprimaju izdužen, elipsast oblik. Ovo je prouzrokovano proklizavanjem u zoni kontakta štamparske forme i podloge za štampu. Rasterske tačke izgledaju izduženo i sa neodštampanim ili svetlijim delom sa manje boje u unutrašnjosti tačke. Pored deformacije tačke, prateća pojava je i nakupljanje boje na bočnim zidovima štampajućih elemenata odmah ispod ravni njihove površine (slika 2.7.3) [Flexo Expert, 2019].

Ukoliko u zoni štamparskog NIP-a, gde dolazi do kompresije obostrano lepljivih traka ili slivova i štamparskih formi, brzina okretanja na površini štamparske forme nije sinhronizovana sa brzinama površina raster valjka i podloge, površina štamparske forme će proklizavati, a boja će se razmazivati.

U zavisnosti od položaja površine štamparske forme u odnosu na korak ponavljanja (razlika u prečnicima stvarnog obima i obima koraka ponavljanja) štamparska forma u odnosu na površinu štampane podloge može da se kreće sporije ili brže.

Razlozi brzog kretanja štamparske forme mogu da budu prevelika debljina ili tvrdoća štamparske forme, obostrano lepljive trake ili sliva. Razlozi sporijeg kretanja štamparske forme mogu da budu suviše tanke ili meke štamparske forme, obostrano lepljive trake ili slivovi.



Slika 2.7.3: Istezanje rasterske tačke i nakupljanje boje na bočnim zidovima štampajućih elemenata [Flexo Expert, 2019]

Faktor istezanja se računa kao procentulano prikazan odnos dužine i širine rasterske tačke na način predstavljen jednačinom 2.7.15 [FAG, 2019].

$$\text{Istezanje rasterske tačke} = \left( \frac{\text{Dužina rasterske tačke}}{\text{Širina rasterske tačke}} \right) \times 100\% \quad (2.7.15)$$

U ofset štampi se takođe teži jednakim prečnicima cilindara merenim do sredine štamparskog NIP-a da bi na površini imali jednake brzine. Sile koje dejstvuju na cilindre su takve da dovode do deformacija koje menjaju prečnike cilindara u zoni štamparskog NIP-a. Međutim, ofsetne gume su najčešće dovoljno elastične i rezilijentne da ublaže ove deformacije i dozvole manje varijacije u brzinama na površinama cilindara [MacPhee i Lester, 1986]. U fleksografiji tu ulogu imaju kompresibilni slojevi slivova ili obostrano lepljivih traka.

### 2.7.6.3 Prečnik rasterskih tačaka

Najosnovnija razlika između tačaka je razlika u njihovoj veličini. Pošto se prilikom obrade fajlova u RIP sistemima koriste različite vrste rasterskih tačaka, poređenje njihove veličine je najlakše izvršiti poređenjem dimenzija zamišljenih krugova iste površine kao tačka, tačnije poređenjem njihovih prečnika [FAG, 2019].

### 2.7.6.4 Krzavost ivica rasterskih tačaka

Krzavost, odnosno neravnomernost ivica rasterskih tačaka i drugih štampanih elemenata je jedan od karakterističnih defekata oblika rasterkih tačaka u flekso štampi. Ona potiče od kombinacije dejstva više parametara. Najveći uzročnici ove pojave su prenos većih količina boje i pritisak. Jači pritisak između štamparske forme i podloge za štampu dovodi do razlivanja viška boje van predviđene površine štampe. Takođe, preniska linijatura raster valjka ili prevelik pritisak između raster valjka i sliva sa štamparskim formama dovode do prenosa veće količine boje [Luminite, 2018].

Višak boje koji nije u potpunosti prenet na podlogu počinje da se suši na štamparskim formama. Nagomilavanje zasušene boje dovodi do smanjenja kvaliteta i efikasnosti, a pored neravnomernih ivica može da dovede i do porasta tonskih vrednosti, spajanja rasterskih tačaka na otisku, halo efekta ili prstenaste rasterske tačke.

Kako je problem neravnomernih ivica rasterske tačke umnogome prouzrokovan i ubrzanim sušenjem boje, boji bi trebalo dodati usporivače sušenja.

Neravnomernost ivica rasterskih tačaka se definiše pomoću faktora ivica koji predstavlja procentulano izražen odnos obima realne rasterske tačke i obima idealnog kruga iste površine kao rasterska tačka kao što je prikazano u jednačini 2.7.16 [FAG, 2019].

$$Krzavost\ ivice = \left( \frac{Prosečan\ obim\ realnih\ rasterskih\ tačaka}{Obim\ idealnog\ kruga} \right) \times 100\% \quad (2.7.16)$$

U idealnom slučaju, vrednost faktora ivice bi iznosila 100 %, a što je veća procentualno izražena vrednost to je i neravnomernost ivica rasterskih tačaka veća, a kvalitet štampe manji [Harri, 2009].

## 2.8 Procesni parametri i njihov uticaj na parametre kvaliteta otiska

Kvalitet fleksografske štampe zbog prirode korišćenih materijala zavisi od velikog broja procesnih parametara i parametara materijala. Procesni parametri koji utiču na kvalitet procesa i štampanog otiska su prisutni u svim fazama proizvodnje.

U pripremi za štampu ti parametri su: način rastriranja, linijatura rastera, raspored elemenata kroz uticaj na odskakanje, podešavanja pri kreiranju separacija.

Procesni parametri koji utiču na kvalitet tokom same štampe su: konfiguracija mašine, mehanička preciznost mašine koja podrazumeva koncentricitet, uniformnost prečnika i paralelnost cilindara, kao i usklađenost rada elemenata odnosno njihov registar, brzina, pritisak u zoni štamparskog NIP-a, pritisak u zoni prenosa boje sa raster valjka na štamparsku formu, zategnutost trake materijala, kontrola registra, veličina tiraža, ambijentalni uslovi sa fokusom na temperaturu, vlažnost vazduha i vibracije.

Ključni element u sistemu za transport boje je raster valjak, a njegova svojstva koja mogu da utiču na kvalitet odvijanja procesa štampe i samog štampanog proizvoda su: linijatura,

zapremina, odnos dubine i površine ćelija, oblik i geometrija ćelija, orijentacija ćelija, pohabanost, materijal od kojih su sačinjeni, pre svega svojstva njegove poroznosti, hrapavosti, površinskog napona i sposobnosti otpuštanja boje, kao i kvalitet čišćenja.

Drugi element značajan za prenos boje je i rakel nož, a njegova svojstva su: materijal od kog je sačinjen, oblik vrha, konfiguracija, ugao oštrenja.

Boja je pored podloge za štampu ključni materijal, a njena najbitnija svojstva su: tip boje (definisano načinom sušenja), viskozitet, pH vrednost, brzina sušenja, reologija, razvoj lepljivosti, polaritet čestica pigmenta, otpornost na uticaj svetlosti i otpornost na trljanje i preslikavanje.

Podloga za štampu kao medijum na koji se nanosi boja može da bude sačinjena od različitih materijala i shodno tome da poseduje različite, za proces štampe bitne grupe svojstava. U slučaju podloga koje se koriste za štampu kartonske grafičke ambalaže ta svojstva su: hrapavost, odnosno topografija, sposobnost apsorpcije koja je definisana kapilarnošću i poroznošću, kompresibilnost, površinska energija, hemijska uniformnost, pH, sadržaj vlage i optička svojstva, pre svega belina i boja.

Nosilac slike i posrednik u prenosu boje između raster valjka i podloge su štamparske forme. Za proces štampe najbitnija svojstva ovih fotopolimernih materijala su: sastav, struktura, debljina, tvrdoća, rezilijentnost, hrapavost, oblik rasterskog elementa.

Da bi se štamparske forme namontirale potrebni su slivovi i obostrano lepljive trake. Ova dva činioca u procesu fleksografske štampe su najmanje ispitana, ali imaju itekako veliku mogućnost uticaja na stabilnost i kvalitet procesa štampe i samog štampanog otiska. Njihova najbitnija svojstva su: sastav, struktura, debljina, varijacija u debljini, rezilijentnost, temperaturna stabilnost, kompresibilnost i adhezivna svojstva.

Istraživači su se bavili proučavanjem uticaja većine ovih parametara, održavajući ostale parametre konstantnim. [Zang i Aspler, 1995], [Göttsching i Ness, 1997] i [Miller, 1997] su proučavali uticaj svojstava podloge za štampu. Proučavanjem uticaja boje su se bavili [Ginman i Tiainen, 1988], [Jensen, 1989] i [Steadman, Woodall i Lesniak, 1993]. Uticajem pritiska kao izolovanog faktora su se u svom istraživanju bavili [Pommice, Poustis i Lalanne, 1989]. Pojedini istraživači su se bavili i zajedničkim uticajem dva ili više parametara, pa su tako [Lindström, Dölling i Poustis, 1994] proučavali uticaj brzine štampe i raster valjaka na parametre kvaliteta otiska. Kombinovani uticaj boje i pritiska je istraživao [Chalmers, 1998]. Uticaj različitih kombinacija boje, štamparskih formi i pritiska su istraživali [Aspler et al., 1998] i [Armel i Cusdin, 2001].

### **2.8.1 Montažni materijali**

Kao što je objašnjeno u poglavlju 2.7.3. (Porast tonskih vrednosti) na osnovu istraživanja koje su sprovedeli [Bould, Claypole i Bohan, 2004], mehanička deformacija štamparskih formi tokom štampe zavisi od dva svojstva fotopolimernog materijala, Poasonovog koeficijenta i Jungovog modula elastičnosti.

Jungov modul je dinamičko svojstvo i on raste sa porastom pritiska u zoni štamparskog NIP-a ili tokom cikličnih opterećenja, odnosno materijal doživljava otvrdnjavanje prouzrokovano naponom [Mirle, 1989; Bould, Claypole i Bohan, 2004; Hamblyn, 2004]. Ovo mehaničko svojstvo dovodi do smanjenja intenziteta deformacije i tako smanjuje porast tonskih vrednosti [Meyer, Durholz i Butterich, 1996; Liu, Guthrie i Bryant, 2004; Hamblyn, 2004; Johnson et al., 2009]. Istovremeno, očvršćavanjem površina punih tonova se smanjuje prilagođavanje štamparske forme neravninama smanjujući tako prenos boje i optičku gustinu [Johnson et al., 2003]. Što je štamparska forma deblja, to može da izdrži veću kompresiju [Mirle 1989; Holmvall i Uesaka, 2007].



Tanje štamparske forme međutim donose sa sobom prednosti, pa je trend takav da se sve više teži njihovoj upotrebi. Da bi se omogućio visok kvalitet štampe, ovakve štamparske forme se prilikom montaže lepe na obostrano lepljive trake sa kompresibilnim slojem ili na slivove sa kompresibilnim slojem. Prema tome, tvrdoća štamparske forme mora da se posmatra u sklopu sa slivom i obostrano lepljivom trakom jer oni menjaju elastičnost celog sistema [Meyer, Durholz i Butterich, 1996; Holmvall i Uesaka, 2007]. Pri pritisku od 1 MPa, sliv sa kompresibilnim slojem je doživeo deformaciju od 9 %, a tvrđe i mekše štamparske forme oko 1 %. Ovo znači da je deformacija rasterskog elementa u kontaktu sa podlogom minimalizovana. Upotreba kompresibilne pene u fleksografiji je prisutna u svim oblastima, od štampe lepenki do širokotračne štampe fleksibilne ambalaže [Kilhenny, 2007].

Pojedinačna svojstva materijala korišćenih za montažu štamparskih formi u velikoj meri utiču na ukupnu tvrdoću kombinacije forma/materijal za montažu, utičući tako značajno na performanse štamparske forme.

[Laurent, 2002] je istraživao uticaj različite debljine štamparskih formi na porast tonskih vrednosti. Zaključio je da razlika u debljini od 0.015 mm između štamparskih formi dovodi do promene u porastu tonskih vrednosti, pre svega u srednjim tonovima (između 20 % i 60 %). Srednja vrednost razlike u porastu tonskih vrednosti u toj oblasti je iznosila 4.7 %.

Pored toga, proučavanjem uticaja tvrdoće štamparskih formi (izražene u Shore A) na transfer boje uočena je razlika u porastu tonskih vrednosti. Pri razlici u tvrdoći od 4 Shore A, u oblasti srednjih tonova (između 20 % i 60 %) može da se očekuje razlika u porastu tonskih vrednosti od 4 do 5 % [Laurent, 2002].

### 2.8.1.1 Obostrano lepljive trake

Često se glavni uzrok za varijacije u kvalitetu štampe traži u štamparskim formama, a zapravo se veliki broj puta uzrok može pronaći u neravnomernosti obostrano lepljive trake ili u zarobljenom vazduhu u vidu mehurića.

Najčešća svojstva na koja utiče obostrano lepljiva traka su:

- Optička gustina i uniformnost punih tonova;
- Porast tonskih vrednosti i struktura rasterske tačke;
- Razmazivanje i pojava neodštampanih linija [FTA, 2014].

Za kompresibilnu obostrano lepljivu traku dimenziona stabilnost pri promeni temperature, zaostatak deformacije, kompresibilnost i rezilijentnost su najbitniji parametri kako u štampi tako i u određivanju njene debljine i tolerancije na oscilacije u debljini. Traka se često tretira kao sekundarni element, međutim njen uticaj na kvalitet štampe i procesa je itekako primetan. Za trake deblje od 0.2 mm dozvoljene tolerancije debljine su najčešće takve da prevazilaze razlike u debljini koje u slučaju štamparskih formi dovode do razlike u porastu tonskih vrednosti od oko 5 %. Studija sprovedena od strane DFTA-TZ [Meyer, 1996] je pokazala da su za kompresibilne obostrano lepljive trake debljine 0.3 mm i 0.55 mm tolerancije 0.02 mm ili 0.035 mm respektivno, dok su stvarne devijacije najčešće u pozitivnom smeru.

[Hamblyn, 2015] je eksperimentalno došla do zaključka da se nešto tvrđa obostrano lepljiva traka manje kompresuje tokom dejstva pritiska. To znači da štamparska forma mora više da se deformiše u kontaktu sa podlogom. Sa porastom kontaktne zone, raste i istiskivanje boje u štamparskom NIP-u. Mekša obostrano lepljiva traka nasuprot tome rasterećuje štamparsku formu kroz veće sabijanje njenog kompresibilnog sloja. Ovo je bitno kod štampe tonskih površina jer se tako izbegava distorzija i dobija oštija štampana rasterska tačka.

Ukoliko se ovakvoj postavci doda i raster valjak visoke zapremine, uticaj na optičku gustinu kroz istiskivanje boje postaje još izraženiji.

### 2.8.1.2 Slivovi

U slučaju slivova, većina sertifikata garantuje okruglost sa tolerancijom 0.025 mm, a tolerancije za spoljašnji prečnik su  $\pm 0.02$  mm. Ove tolerancije su nezavisne od prečnika i dužine sliva. [Laurent, 2002] je testirao dva sliva sa razlikom u prečniku od 0.013 mm i izmerio je razliku u porastu tonskih vrednosti od 2.2 % u oblasi između 20 % i 60 % tonskih vrednosti.

Važnost svojstava slivova u određivanju kvaliteta otiska je istaknuta i u istraživanju koje su sproveli [Petrović i Kašiković, 2018]. Autori su eksperimentalno došli do zaključka da od ispitivanih parametara (boja, tip sliva, veličina tiraža) svojstva slivova imaju najznačajniji uticaj na porast tonskih vrednosti. Naime, slivovi sa kompresibilnom penom srednjeg stepena tvrdoće su pokazali značajno veći porast tonskih vrednosti, pogotovu u svetlim tonovima od slivova sa mekšim kompresibilnim slojem ili obostrano lepljive trake montirane na tvrdi sliv.

### 2.8.2 Raster valjci

Raster valjci su glavne komponente koje omogućavaju tzv. kratak put boje. Oni su zaduženi da prenesu tačnu količinu boje iz svojih ćelija na štampajuće elemente štamparske forme. Izrađeni su od čeličnog ili aluminijumskog jezgra i oslojeni keramikom ili karbonskim vlaknima. Raster valjci su u novije vreme pretežno zamenjeni raster slivovima koji su šuplji unutra, a oslojeni su takođe keramikom i karbonskim vlaknima sa ćelijama koje su gravirane najčešće pomoću lasera.

Odabir raster valjaka značajno utiče na kvalitet štampe kroz postignutu optičku gustinu i porast tonskih vrednosti.

Veličina ćelija koje prenose boje i prekrivaju čitavu površinu raster valjaka i slivova se kreće u opsegu od desetak do više desetina mikrona. Višak boje sa površine raster valjaka i slivova se uklanja pomoću rakel noževa [Laden, 1997].

Količina prenete boje zavisi od svojstava raster valjaka ili slivova i reoloških svojstava boje. Najbitniji parametri raster valjaka koji mogu da utiču na kvalitet štampanog otiska su: linijatura (linija/cm) koja određuje broj ćelija na površini valjka ili sliva, kapacitet ( $\text{cm}^3/\text{m}^2$ ), oblik, dubina, otvorenost (širina), debljina zida ćelija, odnos dubine i širine ćelija, ugao unutrašnjih zidova ćelija, površinska svojstva raster valjaka (zavisna od svojstava materijala kojim je oslojen).

Opseg linijatura raster valjaka najčešće korišćenih u procesima štampe se kreće od 80 do 500 linija/cm [Dunn, 2015a; FFTA, 2014]. Ukoliko bi za potrebe štampe sa finim detaljima bio odabran raster valjak ili sliv niske linijature i većeg kapaciteta, porast tonskih vrednosti bi bio suviše izražen, a svetli tonovi bi postali gotovo nemogući za reprodukciju. Suviše visoka linijatura rastera bi nasuprot tome dovela do smanjenog prenosa boje i gubitka optičke gustine.

Kapacitet je svojstvo pomoću kog se određuje količina boje koju raster valjak ili sliv prenosi na štamparsku formu. Važno je napomenuti da se ćelije raster valjaka pri prenosu boje nikada ne prazne do dna i da u njima zaostaje između 40 % i 60 % boje koju nose. Najčešće korišćeni raster valjci imaju kapacitet od 0.95 do 13.5  $\text{cm}^3/\text{m}^2$  [FFTA, 2014]. Rast u kapacitetu raster valjka vodi ka rastu optičke gustine usled povećanja količine boje dostupne za prenos, ali i ka većem porastu tonskih vrednosti [Damroth et al., 1996; Lindholm et al., 1996; Fouche i Blayo, 2001; Hamblyn, 2004; Beynon, 2007; Bould et al., 2011].



Prenos boje između raster valjka ili sliva i štamparske forme je pored toga određen i geometrijom samih ćelija [Hamblyn, 2004; Cherry, 2007; Bould et al., 2011] gde manje ćelije pružaju veći otpor pri izvlačenju boje iz njih. Danas najčešće korišćena geometrija ćelija podrazumeva šestougao oblik poprečnog preseka (poput pčelinjeg saća kako se drugačije i naziva). Prečnik ćelije je parametar koji utiče na kvalitet štampanog otiska, a direktno je zavisn od linijature. Bitno je da bude manji od prečnika najmanjeg štampanog elementa na štamparskoj formi, jer u suprotnom dolazi do potapanja štampanih elemenata u ćelije čime se boja ne prenosi samo na površinu, već i na bočne zidove, a to doprinosi porastu tonskih vrednosti koji nastavlja da raste kako vreme odmiče [Laden, 1997].

Površinska svojstva materijala kojim su oslojeni raster valjci i slivovi takođe utiču na količinu i ujednačenost prenosa boje. Najčešće korišćeni keramikom oslojeni raster valjci bi trebalo da imaju poroznost površine manju od 1 %, uniformnu nanešenost i visok površinski napon [Izdebska, 2016].

Kao što je to slučaj sa svim materijalima, svojstva raster valjaka se menjaju sa njihovom upotrebom. Jedini nepromenljivi parametri su linijatura i ugao graviranja ćelija, a drugi parametri poput prethodno navedenih površinskih svojstava materijala, kapaciteta, geometrije ćelija se menjaju usled habanja raster valjaka u najvećoj merni prouzrokovanog rakel noževima. Njihovo habanje je pri normalnim okolnostima veoma sporo i pad količine prenete boje biva postepeno manji. Drugi razlog za smanjen prenos boje može biti i postojanje zaostale osušene boje unutar ćelija čime se direktno smanjuje njihova zapremina. Shodno tome, raster valjke treba temeljno čistiti i blagovremeno slati na reparaciju.

### 2.8.3 Pritisak i brzina štampe

Podšavanje pritiska je kritična tačka fleksografskog procesa štampe sa ciljem ostvarivanja pravilnih rasterskih tačaka, sprečavanja nastanka halo efekta i kontrole porasta tonskih vrednosti. Podloga za štampu se kreće između cilindra nosioca štamparske forme i pritisnog cilindra, a razmak, odnosno NIP između njih mora da bude optimalan da bi bio ostvaren i optimalan pritisak štampe [FTA, 2003]. Idealan za štampu je veoma mali pritisak, odnosno tzv. Kiss Print pritisak. To je najmanji pritisak štamparske forme na podlogu potreban za štampu jasne slike (oko 0.1016 mm dubine kontakta materijala u štamparskom NIP-u) [Bould et al., 2004].

Mnoge inovacije u fleksografskoj tehnologiji su usmerene ka pritiscima u štampi [Johnson, 2003]. Prenos boje na podlogu je jedan od ključnih parametara u procesu flekso štampe [Johnson i Peter, 2003].

Kako je štamparska forma fleksibilna, logična posledica povećanog pritiska je deformacija geometrije rasterskih tačaka koje umesto kružnog zadobijaju elipsast oblik. Rasterski elementi na standardnim digitalnim štamparskim formama su u istraživanju [Hamblyn, 2015] bili veoma osetljivi na promene pritiska i prouzrokovali su veći porast tonskih vrednosti. Numeričkim modelovanjem rasterskih elemenata bez boje je prikazano da što je njihov vrh ravniji, to je ravnomernije i raspoređivanje pritiska na njihovoj površini, a i dublje unutar materijala čime se smanjuje udeo deformacije bočnih ivica. Prema [Borbély i Szentgyörgyvölgyi, 2011] denzitometrijske vrednosti najviše pogođene varijacijama pritiska su tonske vrednosti, oblik rasterskih tačaka i gradacija tonova.

Ukoliko je pritisak suviše nizak, može se desiti da detalji u svetlim tonovima ne budu preneti. Veće vrednosti pritiska nasuprot tome mogu dovesti do razmazivanja boje oko ivica štampanih površina. Što je veći pritisak, to su rasterski elementi podložniji deformaciji i istiskivanju boje van što rezultuje porastom tonskih vrednosti [Boonprasisit, 2006].

Istraživanjima uticaja pritiska na štampu na OPP materijalu je dokazano da pritisak između štamparske forme i pritisnog cilindra ima najveći uticaj na reprodukciju tonских vrednosti sa značajnim rastom optičke gustine [Bohan et al., 2003; Du, 2009]. Rast pritiska u ovoj zoni značajno utiče na mehaničke deformacije štampajućih elemenata gde rasterski elementi sa okruglim vrhom pokazuju manje konzistentne rezultate i veću osetljivost na promene pritiska od elemenata sa ravnim vrhom.

[Valdec, Zjakić i Milković, 2013] su zaključili da je sa povećanjem pritiska porast tonских vrednosti u slučaju štamparskih formi sa rasterskim elementima sa zaboljenim vrhom izraženiji od porasta tonских vrednosti na štamparskim formama sa rasterskim elementima sa ravnim vrhom (12 % porasta pri tonским vrednostima od 40 % za okrugle vrhove pri linijaturi od 380 linija/cm i 4 % pri istim uslovima za ravne vrhove). Takođe, u svom istraživanju su zabeležili da se najveći porast tonских vrednosti događa u oblastima sa pokrivenošću manjom od 3 % usled kolapsa rasterskih elemenata. Oni su uranjali u ćelije raster valjka preuzimajući tako na sebe višak boje. U slučaju elemenata sa okruglim vrhom, širenje boje na podlozi je znatno više uticalo na veličinu štampane rasterske tačke gde je pritisak jači na sredini rasterskog elementa što dovodi do istiskivanja boje i stvaranja halo efekta.

Rezultati istraživanja koje su sproveli [Valdec, Milković i Čerepinko, 2018] su pokazali da sa porastom pritiska opada debljina sloja boje na podlozi. To je bio glavni razlog neuniformnosti optičke gustine na celoj površini rasterske tačke odštampane štamparskim formama sa elementima sa okruglim vrhom. U sredini rasterske tačke je dolazilo do smanjenja debljine sloja boje, a na obodima je dolazilo do akumulacije boje što prouzrokuje porast tonских vrednosti.

[Bould, Claypole i Bohan, 2003] su ispitivali uticaj pritiska na kvalitet štampe pri tri različite linijature rastera. Mehanički porast tonских vrednosti je bio najveći pri najvećem pritisku i najvećoj linijaturi rastera. Pritisak je imao veći uticaj na porast tonских vrednosti od linijature rastera.

[Hannah, 1951] je istraživao kontakt između čvrstih i mekših valjaka u štamparskom NIP-u zaključivši da na profil pritiska najviše utiču debljina kompresibilnog elastomernog sloja i širina kontakta.

[Bould, Claypole i Bohan, 2004] navode da porast tonских vrednosti raste sa porastom pritiska i da je ta pojava sa svakim povećanjem pritiska izraženija u slučaju svetlih tonova, dok u slučaju tamnih tonova nije. To je autore navelo na zaključak da u oblastima svetlih tonova dolazi do oba glavna mehanizma mehaničke deformacije rasterskih elemenata dok je u slučaju tamnih tonova prisutan samo jedan od njih. Autori takođe navode da pritisak u flekso štampi ima najveći uticaj na porast tonских vrednosti i da do njega dolazi više usled razlivanja boje nego deformacije elemenata štamparskih formi. Sa povećanjem brzine štampe dolazi do smanjenja porasta tonских vrednosti jer boja nema dovoljno vremena da se razliva u zoni štamparskog NIP-a.

[Olsson et al., 2006] su tokom istraživanja zapazili da rasterske tačke imaju veći prečnik u smeru štampe nego u poprečnom smeru. Pri niskim pritiscima dolazi do sužavanja tačaka u poprečnom pravcu što je najverovatnije posledica kombinovanog uticaja kretanja podloge kroz zonu štamparskog NIP-a i istovremenog pritiskanja podloge štamparskom formom čime dolazi do deformacije rasterskih elemenata. [Lagerstedt i Kolseth, 1995] su u svom istraživanju došli do sličnog zapažanja. Naime, sa povećanjem sile pritiska dolazilo je do znatnog istežanja, pa čak i spajanja rasterskih tačaka u smeru kretanja podloge.

Kako je za kvalitetnu štampu potreban mali pritisak, to znači da sve promene u ekscentričnosti i devijacije u prečniku sliva ili pritisnog cilindra dovode do potrebe povećanja pritiska da bi se njihov uticaj na otisak ublažio. To vodi ka deformacijama i ostalim pojavama koje prouzrokuju porast tonских vrednosti. Da bi ovakvo povećanje pritiska bilo ublaženo,

opterećenje sa štamparskih formi mora da bude preneto na kompresibilni sloj slivova ili obostrano lepljivih traka. Na ovaj način se ublažava deformacija štampajućih elemenata i razlivanje boje uzrokovano većim pritiskom.

[Johnson et al., 2003] su eksperimentalno pokazali da se prenos boje povećava sa povećanjem pritiska, a da opada sa povećanjem brzine. Pored toga, ustanovili su da se prenos boje razlikuje između mekših i tvrdih štamparskih formi, iako je zaključeno da glavne deformacije nastaju u kompresibilnom sloju sliva. Ovo su objasnili većim mogućnostima mekše štamparske forme da se prilagodi površini podloge za štampu, čime se povećava kontaktna površina.

Pojedini istraživači međutim dejstvo pritiska karakterišu drugačije. [Bohan et al., 2003] navode da je uticaj pritiska u zoni štamparskog NIP-a manje bitan od uticaja pritiska u drugim kontaktnim zonama mašine. Naime, povećanjem pritiska između komore za boju i raster valjka se poboljšava prenos boje. Ovo je objašnjeno dejstvom opterećenja na rakel noževe čime se menja njihov ugao naleganja na raster valjak. U njihovim istraživanjima je zabeleženo i smanjenje prenosa boje sa rastom pritiska između štamparske forme i raster valjka, ali nije dato detaljnije objašnjenje ove pojave.

Pritisak između štamparske forme i podloge za štampu utiče na hrapavost poroznih podloga. Veće sile pritiska sabijaju mrežu vlakana i poravnavaju ih povećavajući tako kontaktnu površinu boje i podloge. Povećanje pritiska takođe dovodi do bočnog razlivanja boje na površini i u slučaju poroznih podloga do njenog prodiranja u podlogu kapilarnom sorpcijom [Fetsko i Walker, 1955; Walker i Fetsko, 1955; De Grâce i Mangin, 1983; Johnson et al., 2003; Hamblyn, 2004; Beynon, 2007; Bould et al., 2011].

[Schaeffer, Fisch i Zettlemyer, 1963] su zaključili da do poboljšanja prenosa boje dolazi sa povećanjem brzine i pritiska. Proučavajući prenos boje u zavisnosti od svojstava podloge i uslova štampe, [De Grâce i Mangin, 1983] su ustanovili da povećanjem pritiska dolazi do utiskivanja veće količine boje u podlogu (novinski papir), ali sa prevelikim pritiskom dolazi do zatvaranja pojedinih pora čime se prenos boje smanjuje.

[Schaeffer, Fisch i Zettlemyer, 1963] su takođe zapazili da pri niskim brzinama štampe veće sile pritiska negativno utiču na prečnike kapilara. Usled dužeg vremena koje podloga pri niskim brzinama štampe provodi u zoni štamparskog NIP-a, sile pritiska je deformišu zatvarajući joj pore i smanjujući tako prenos boje usled smanjene mogućnosti apsorpcije vezivnog sredstva.

Sa povećanjem brzine štampe se smanjuje i vreme koje podloga provodi u zoni štamparskog NIP-a (tipično mereno milisekundama), a kako se u zoni štamparskog NIP-a boja utiskuje u pore podloge, sa smanjenjem vremena dolazi i do smanjenja prenosa boje [Fetsko i Walker, 1955; Walker i Fetsko, 1955; De Grâce i Mangin, 1983; Zang, 1992; Damroth et al., 1996; Fouche i Blayo, 2001; Johnson et al., 2003; S. Hamblyn, 2004]. Suprotno tom zapažanju, [Quinn et al., 1997] i [Olsson et al., 2007] zapažaju rast u prenosu boje sa porastom brzine štampe. To objašnjavaju činjenicom da se provođenjem manje vremena u zoni štamparskog NIP-a podloga manje kompresuje čime njene pore ostaju otvorene za prihvatanje veće količine boje.

U mnogim istraživanjima je primećen rast optičke gustine zajedno sa rastom pritiska u opsegu nižih vrednosti. U istraživanju uticaja pritiska na kvalitet štampe folija, [Borbély i Szentgyörgyvölgyi, 2011] su zaključili da optička gustina ne raste zajedno sa pritiskom. Međutim, u rasponu viših vrednosti rast optičke gustine je isprva manje naglašen, a potom dostiže i maksimalnu vrednost [Mirle, 1989; Johnson et al., 2003; Hamblyn, 2004; Holmvall i Uesaka, 2008]. [Fetsko i Walker, 1955] su istraživanjem uticaja pritiska na proces štampe došli do zaključka da procenat boje prenet sa štamparske forme raste sa porastom pritiska, a

[Bould et al., 2004] su zaključili da pri velikim pritiscima nakon jednog momenta prestaje rast prenosa boja. [Olsson et al., 2006] navode da se najviše vrednosti optičke gustine postižu pri srednjim vrednostima pritiska.

Veliki broj autora je u svojim istraživanjima došao do zaključka da se povećanjem pritiska u zoni štamparskog NIP-a poboljšava i prenos boje, a tome doprinosi veliki broj različitih mehanizama [Bohan et al., 2003; Johnson et al., 2003; Hamblyn, 2004; Beynon, 2007; Cherry, 2007; Holmvall i Uesaka, 2008]. Pri većim pritiscima štamparska forma može bolje da naleže na podlogu, povećavajući tako zonu kontakta. Pored toga, u slučaju poroznih, nestišljivih podloga povećava se količina u podlogu utisnute i imobilisane boje, ostvarujući tako manju zavisnost od odnosa delova boje prenetih na podlogu i zaostalih na štamparskoj formi nakon razdvajanja.

Povećanjem sile pritiska se doprinosi postizanju uniformnije štampe na više načina. Povećanjem kontaktne površine se smanjuje udeo neodštampanih delova podloge na finalnom otisku. Bočno razlivanje boje i težnja za ostvarivanjem zatvorenog filma boje takođe rastu.

Međutim, kako promena sile pritiska utiče na proces razdvajanja boje, mogu se javiti problemi u vidu različitih ponavljajućih motiva, pre svega kod boja na bazi vode.

#### 2.8.4 Temperatura

Tokom štampe, temperatura u fleksografskoj mašini raste kao posledica trenja rakel noža i raster valjka, pumpanja boje i trenja u različitim NIP zonama između cilindara. Sve ovo utiče na svojstva boje i najčešće i na kvalitet štampe.

[Fernández, Muñoz i Santamaria, 1998] i [Rentzhog i Fogden, 2005] su istraživali reološka svojstva boje pri promenama temperature i zaključili su da odziv prati Areniusov odnos. Pored toga Rentzhog i Fogden su uočili i razlike u ponašanju boja sa različitim pigmentima, gde je cijan boja znatno osetljivija na temperaturne varijacije od crne.

Temperatura utiče na boju na dva načina. Jedan od njih je smanjivanjem viskoziteta, čime se pospešuje razlivanje i apsorpcija boje. Drugi se ogleda u povećanju jačine veze sa podlogom koja prati povišenje temperature. Ovo može da utiče na kvalitet kroz smanjenje sjaja bržim vezivanjem boje za podlogu [Olsson et al., 2007].

[Podhajny, 1990] je ustanovio da temperature na površini raster valjaka mogu da iznose više od 50 °C usled trenja raster valjka i rakel noža.

[Nordström, 2000] je proučavao promene temperature na primeru mašina za bezvodnu ofset štampu. Zaključio je da temperatura u jedinici za nanos boje počinje da raste već nakon par minuta i dostiže ujednačen nivo oko 30 min nakon puštanja mašine u rad. U ostalim delovima, povećanja temperature mogu da se događaju kroz period od više sati ili iznenadno, a povećanjem temperature se vrši uticaj na svojstva boje koja su bitna za štampu, a to su viskozitet i površinski napon [Nordström i Johnson, 2002].

[Olsson et al., 2007] su istraživali uticaj povišene temperature unutar mašine za flekso štampu na prenos boje, vezivanje boje i kvalitet štampe. Kvalitet štampe su evaluirali koristeći se parametrima optičke gustine, sjaja, motlinga i prenosa boje. Po pitanju viskoziteta boje, ustanovili su da on sa porastom temperature opada, a optička gustina raste. U zoni štamparskog NIP-a, pritisak utiskuje vezivno sredstvo u podlogu čime parcijalno imobilisuje boju. Kako viskozitet opada sa porastom temperature, tako raste i lakoća isparavanja vodene komponente. Brže isparavanje vodi ka debljim slojevima imobilisane boje u zoni štamparskog NIP-a [Cozzens et al., 1965]. Kako do razdvajanja filma boje dolazi u imobilisanom delu, porast njegove debljine svakako promovira bolji prenos boje čime se objašnjava povećanje optičke gustine.

Po pitanju porasta tonskih vrednosti, [Olsson et al., 2007] su uočili pad porasta tonskih vrednosti sa porastom temperature. Objašnjenje ove pojave su potražili u činjenici da sa smanjenjem viskoziteta boje pri višoj temperaturi dolazi do lakše apsorpcije vezivnog sredstva od strane podloge i bržeg vezivanja i imobilizacije sloja boje, sprečavajući tako njeno razlivanje po površini podloge. Pored toga, ubrzano isparavanje potpomaže bržoj imobilizaciji koja doprinosi smanjenju porasta tonskih vrednosti.

Za uniformnost štampane površine [Olsson et al., 2007] su uočili trend povećanja sa porastom temperature u oblastima gde su površine koje izazivaju neuniformnost manje od 1 mm. Međutim, kada su veličine ovih površina od 1 do 8 mm, tada dolazi do smanjenja uniformnosti. Objašnjenje povećanja uniformnosti malih površina je potkrepljeno činjenicom da sa porastom temperature opada viskozitet boje, čime ona postaje pokretnija i sposobnija da prekrije manje nepravilnosti u nanosu boje. Međutim, u slučaju većih površina, pokretljivost boje nije dovoljno veća da bi ih boja prekrila pre nego što dođe do njene imobilizacije, što rezultuje smanjenom ili jednakom uniformnosti štampane površine. Pri većim brzinama štampe, uniformnost površine raste bez obzira na veličine problematičnih površina. Naime, pri povećanju brzine dolazi do povećane učestanosti smicanja što dodatno smanjuje viskozitet. Pored toga, kretanje sloja boje uzrokovano većim brzinama pomaže u raspoređivanju boje smanjujući tako neuniformnost, pogotovu onu prouzrokovanu manjim površinama.

### 2.8.5 Viskozitet boje

Viskozitet je svojstvo fluida da se opire tečenju. Viskozitet boje i površinski napon utiču na prenos boje i njeno fiksiranje na podlozi za štampu [Davies i Claypole, 2006; Schaeffer, Fisch i Zettlemoyer, 1963]. Što je niži viskozitet boje, to su veće šanse da će se ona razlirati po neporoznoj podlozi ili penetrirati u pore porozne podloge za štampu [Fetsko i Walker, 1955; Walker and Fetsko, 1955; Damroth et al., 1996]. Pad viskoziteta boje u najvećoj meri nastaje zbog tanjenja boje smicanjem kao posledice velikih brzina štampe [Zang, 1992], ali može da bude i rezultat povećanja temperature. Primera radi, autori [Dejidas i Destree, 2005] u okviru svojih istraživanja navode da porast temperature od 5.5 °C može da dovede do smanjenja viskoziteta boje na bazi vode od čak 50 %.

[Olsson et al., 2007] su u svom istraživanju primetili da boja nižeg viskoziteta bolje penetrira u porozne podloge za štampu čime se imobilizuju veće količine boje. Pošto razdvajanje boje nastaje u boji tokom njene mobilne faze (faze prenosa), relativan prenos boje se povećava. Pored toga, nizak viskozitet boje doprinosi i boljem razlivanju i poravnavanju sloja boje, smanjujući tako manje neravnine.

[Walker i Fetsko, 1955] su u svom istraživanju takođe ukratko prodiskutovali uticaj viskoziteta vezivnog sredstva na prenos boje, navodeći da niži viskozitet vezivnog sredstva naizgled poboljšava prenos boje. Međutim, ovo zapažanje nije u potpunosti pokriveno istraživanjem.

Istraživanje koje su sprovedli [Walker i Fetsko, 1955] su upotpunili [Taylor i Zettlemoyer, 1958] istraživši kako na prenos boje utiču promene u njenim fizičkim i hemijskim svojstvima. Njihovo istraživanje je bilo fokusirano na produblivanje znanja o mehanizmu razdvajanja mokrog filma boje između štamparske forme i podloge za štampu na izlasku iz štamparskog NIP-a. Razdvajanje boje je pospešeno varijacijama u viskozitetu unutar tankog sloja boje. Ove varijacije su prouzrokovane višim temperaturama i/ili intenzivnijim i bržim smicanjem što čini koheziju boje slabijom u predelu koji je bliže podlozi smanjujući tako količinu prenete boje.

Interesantni su zaključci istraživanja koje je sproveo [Beynon, 2007] jer se razlikuju od zaključaka mnogih drugih istraživača. Naime, on je sprovođenjem eksperimenata zaključio da smanjenje optičke gustine koje prati smanjenje viskoziteta boje nastaje zbog smanjenja koncentracije pigmenta i smanjenja transfera boje. Međutim, u podacima koje je priložio se može videti da dolazi do povećanja transfera boje sa smanjenjem viskoziteta. Pored toga, on je ispitao zavisnost parametara viskoziteta i pokrivenosti površine pronasavši jaku zavisnost. Beynon navodi da smanjenje viskoziteta dovodi do smanjenja razlivanja boje u oblastima svetlih i srednjih tonova, na poroznim podlogama. Tu pojavu je opravdao boljim hidrauličkim utiskivanjem boje u podlogu (po dubini) nego bočnom širenju. Kao uzročnik primećenog razlivanja boje u tamnim tonovima predloženo je nagomilavanje boje u oblastima neštampajućih površina.

[Hsu, 1962] u svom radu navodi da je kada je viskozitet boje veći, uticaj brzine štampe i pritiska manji. On je takođe zaključio da veći viskozitet boje znači manji nivo penetracije boje u podlogu, iako na to umnogome utiče i poroznost podloge za štampu. Što se penetracije boje tiče, zaključio je da ona raste sa povećanjem količine boje na štamparskoj formi, ali do određene mere, odnosno do momenta kada podloga postane zasićena bojom.

Uticaj razlike u viskozitetu boje na preklapanje se ispoljava posredno, putem ubrzanog sušenja boje nanete na podlogu, čineći tako da preklapanje po svojim vrednostima bude bliže preklapanju pri štampi mokro na suvo, koje je bolje od preklapanja pri štampi mokro na mokro.

## 3 PREDMET, PROBLEM I CILJ ISTRAŽIVANJA

### 3.1 Predmet istraživanja

Fleksografska štampa je tehnika štampe koja je, kao i sve tehnike štampe, zavisna od mnoštva parametara koji definišu kvalitet procesa i krajnjeg proizvoda štampe. Pored toga, razvoj tehnologije doprinosi konstantnom porastu kvaliteta i produktivnosti fleksografije. Sa napretkom tehnologije javlja se i potreba za karakterizacijom komponenata procesa koje se javljaju u novim, modifikovanim oblicima, pogotovu ako ni u prethodnim iteracijama nisu temeljno istražene.

Jedan od promenljivih parametara fleksografske štampe, koji doživljavaju rapidan razvoj su i materijali za montažu flekso štamparskih formi na slivove, kao i sami slivovi. Za sadašnji vrhunac tehnologije u oblasti slivova za fleksografiju smatraju tzv. Twinlock® slivovi.

Slivove je moguće okarakterisati pomoću više pojmova koji direktno utiču na njihova svojstva i kvalitet procesa i krajnjeg proizvoda. Najbitniji pojmovi su kompresibilni sloj i njegova mehanička svojstva, a u slučaju Twinlock® slivova i svojstva adhezije samolepljivog sloja i flekso štamparske forme. Mehanička svojstva slivova i promena mehaničkih svojstava slivova kroz eksploataciju umnogome vrše uticaj na stabilnost procesa štampe, a posredno i na kvalitet i predvidivost kvaliteta krajnjeg proizvoda.

Slivovi se sastoje od čvrstog osnovnog tela i poliuretanskog kompresibilnog sloja različitog nivoa poroznosti i sastava koji im u najvećoj meri određuje mehanička svojstva i užu oblast upotrebe. Na površinu sliva se lepe montažni materijali u vidu obostrano lepljivih traka, a u slučaju Twinlock® slivova, na kompresibilni sloj je direktno postavljen adhezivni samolepljivi sloj za višekratnu upotrebu.

Tokom procesa montaže flekso štamparskih formi i štampe, slivovi trpe različita opterećenja i moraju da ispune različite zahteve. Postoji veliki broj parametara koji tokom eksploatacije slivova mogu da prouzrokuju promene u njihovim svojstvima koja su garantovana od strane proizvođača, a samim tim i promene u kvalitetu procesa i samog proizvoda.

U području mehaničkih promena poroznog, kompresibilnog poliuretanskog sloja, glavni uzročnik je sam proces štampe gde slivovi trpe najveća opterećenja i ispoljeni su dejstvima komponenata iz različitih izvora. Mehaničke promene se u užem smislu odnose na promene kompresibilnosti, rezilijentnosti, tvrdoće, kao i na gubitke energije kroz zagrevanje. Kod promena u adheziji, koje su izrazito značajne u slučaju samolepljivog sloja Twinlock® slivova, kao glavni uzročnik se javlja proces montaže/demontaže flekso štamparskih formi tokom kog može doći do promene sastava samolepljivog sloja.

Sve prethodno spomenute vrste promena u određenoj meri mogu negativno da deluju na predvidivost i stabilnost procesa štampe, dok na kvalitet krajnjeg proizvoda mogu da deluju i negativno i pozitivno, u zavisnosti od posmatranog parametra. Uticaj na stabilnost procesa štampe može da se ispolji kroz pojavu kratkih zastoja, trajnih oštećenja flekso štamparskih formi ili promene temperature i viskoziteta štamparskih boja. Sa druge strane, kvalitet proizvoda može da pretrpi promene kroz porast tonskih vrednosti, optičku gustinu, uniformnost štampane površine, prenos boje (preklapanje), razliku u boji, izduženje rasterske tačke, efekat prstenaste rasterske tačke, njen prečnik i krzavost njenih ivica.



*Predmet istraživanja je karakterizacija flekso štamparskih slivova i njihovog uticaja na kvalitet štampe kartonske ambalaže. Karakterizacija slivova (pre svega Twinlock® slivova) za flekso štampu se tiče definisanja mehaničkih promena poliuretanskog kompresibilnog sloja novih i intenzivno korišćenih slivova tokom laboratorijskih ispitivanja, kao i promena u adheziji i udelu komponenata samolepljivog sloja Twinlock® slivova. Pored toga, istraživanje podrazumeva i praćenje parametara kvaliteta krajnjeg proizvoda tokom procesa štampe za obe vrste slivova, u više kontrolnih tačaka. Analiza mikroskopskih snimaka uzoraka slivova i štampanih uzoraka takođe predstavlja predmet istraživanja.*

### **3.2 Problem i cilj istraživanja**

Uvođenjem novih tehnologija se javlja potreba za njihovim upoređivanjem sa postojećim tehnologijama kroz analizu procesa proizvodnje i ključnih parametara kvaliteta otiska kao izlaznog proizvoda.

U do sada sprovedenim istraživanjima praćene su promene većine parametara fleksografske štampe i vršena je kontrola parametara kvaliteta štampanog otiska. Međutim, u dosadašnjim istraživanjima nisu praćeni i parametri kvaliteta slivova niti su promene tih parametara dovođene u korelaciju sa kvalitetom krajnjeg proizvoda.

Prethodno navedene činjenice ukazuju na potrebu za karakterizacijom parametara slivova, praćenje njihovih promena i uticaja promena na kvalitet krajnjeg proizvoda, kao i pronalazak parametara putem kojih se blagovremeno, nedestruktivnim metodama indirektno može ustanoviti da li je sliv pogodan za upotrebu ili ga je iz određenih razloga potrebno reparirati.

Mehanička svojstva poliuretana koji je gradivni materijal kompresibilnog sloja slivova, njegov zamor, životni vek, kao i parametri koji na njih utiču su u velikoj meri istraženi u različitim područjima i za različite vrste i formulacije poliuretana. Međutim, značaj poliuretana i kompresibilnog sloja slivova izgrađenog od njega u oblasti fleksografske štampe je od strane naučne zajednice delimično i u grubim crtama prepoznat, ali gotovo potpuno neistražen.

Pored toga, svojstva adhezije montažnih materijala u području grafičke tehnologije, pogotovu samolepljivog sloja Twinlock® slivova kao nove tehnologije su takođe nepotpuno istraženi i na taj način predstavljaju još jedan od parametara procesa čije promene i uticaj na kvalitet procesa i proizvoda nisu definisani.



## 4 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Pregledom i analizom relevantne literature, kao i analizom i dovodenjem dobijenih rezultata u korelaciju očekivano je potvrđivanje ili opovrgavanje postavljenih hipoteza.

### Hipoteza 1.

*Twinlock® slivovi predstavljaju validnu zamenu za postojeću tehnologiju tvrdih slivova sa kompresibilnim obostrano lepljivim trakama, posmatrano kroz aspekte jednostavnosti procesa i kvaliteta proizvoda, sa preduslovom da je njihov tip odabran shodno zahtevima procesa štampe koje diktira vrsta preovlađujućeg štampanog motiva.*

### Hipoteza 2.

*Svojstva slivova se menjaju tokom eksploatacije u procesima montaže i demontaže flekso štamparskih formi i fleksografske štampe tako što sa porastom broja montaža i demontaža flekso štamparskih formi dolazi do degradacije adhezije samolepljivog sloja, a sa porastom tiraža odštampanog pomoću slivova dolazi do degradacije mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova.*

### Hipoteza 3.

*Degradacija adhezije samolepljivog sloja nepovoljno utiče na stabilnost procesa fleksografske štampe, a degradacija mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova utiče na parametre kvaliteta štampanog otiska tako što neke od njih poboljšava, neke pogoršava, a neke ostavlja nepromenjenim.*

### Hipoteza 4.

*Moguće je definisati parametre kvaliteta štampanog otiska i trend njihove promene koji u kontrolisanom procesu štampe direktno ukazuju na promenu mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova.*

Osnovni cilj istraživanja je karakterizacija flekso štamparskih slivova i njihovog uticaja na parametre kvaliteta štampe kartonske ambalaže sa svrhom povećanja predvidivosti i konstantnosti kvaliteta štampanog proizvoda, kao i stabilnosti procesa proizvodnje kartonske ambalaže. Karakterizacijom slivova se pored toga stiče uvid u međuzavisnost mehanizama promene procesnih parametara i njihovog uticaja na promene parametara kvaliteta otiska i stabilnosti procesa proizvodnje. Dodatni cilj je formiranje preporuka za upotrebu slivova različitih svojstava i nivoa eksploatacisanosti u zavisnosti od zahteva štampe (tipa dominantnog motiva). Pored tih preporuka, cilj je ustanoviti u kojim fazama i kojim procesima dolazi do promena svojstava slivova da bi se na njih obratila posebna pažnja tokom proizvodnje u cilju produžavanja veka trajanja ovih materijala kroz pravilno rukovanje.

Očekuje se da će rezultati, odgovori na hipoteze i zaključci izvedeni iz istraživanja osim teorijski i naučno biti lako primenljivi i na industrijskom nivou, sa mogućnošću lake implementacije u procesnu kontrolu štampe nedestruktivnim metodama ispitivanja upotrebom standarnih uređaja za kontrolu denzitometrijskih i kolorimetrijskih parametara ili putem softverske analize slike štampanog otiska.

U cilju provere postavljenih hipoteza sprovedena su eksperimentalna istraživanja u tri faze, prema prethodno razvijenoj metodologiji.

## 5 MATERIJALI I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Pregledom sprovedenih istraživanja u oblastima svojstava poliuretana i parametara kvaliteta fleksografske štampe, uz poseban osvrt na planiranu primenljivost rešenja na industrijskom nivou proizvodnje, definisan je plan istraživanja podeljen u tri glavne faze, izvršen je odabir adekvatnih materijala, kao i razvoj i odabir najpogodnijih metoda za ispitivanje ciljnih parametara pojedinačnih faza istraživanja. U okviru razvoja metodologije izvršen je prikaz korišćenih materijala, uređaja i mašina i pratećih softvera. U istraživanju je razvijen i korišćen veći broj metoda počevši od metoda vezanih za štampu uzoraka, metoda ispitivanja svojstava kompresibilnog poliuretanskog sloja slivova pri cikličnim testovima kompresije, metoda ispitivanja mehaničkih svojstava kompresibilnog poliuretanskog sloja slivova pri probijanju iglom, metoda ispitivanja adhezivnih svojstava samolepljivog sloja slivova praćena metodom ispitivanja sastava samolepljivog sloja slivova, metoda analize mikroskopskih snimaka Twinlock® sloja slivova, metoda ispitivanja tvrdoće slivova, denzitometrijske i kolorimetrijske metode ispitivanja kvaliteta štampanih uzoraka, metode kvantifikacije parametara kvaliteta štampe putem softverske analize slike sa fokusom na uniformnost štampane površine i kvalitet oblika rasterskih tačaka.

### 5.1 Plan i faze istraživanja

U cilju provere postavljenih hipoteza i efikasnog postizanja definisanih ciljeva izvršena je podela eksperimenta u tri glavne faze:

- Ispitivanje uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže kroz:
  - pregled postojećih tehnologija montaže štamparskih formi,
  - kreiranje uzoraka uz upotrebu konvencionalnih i najmodernijih dostupnih sliv tehnologija montaže štamparskih formi,
  - analiza uticaja tiraža, boje i odabrane sliv tehnologije na porast tonskih vrednosti.
- Karakterizacija i uticaj nivoa eksploitanosti na svojstva slivova kroz:
  - pregled stanja u srodnim oblastima istraživanja,
  - analizu mehaničkih svojstava slivova pri kompresiji,
  - analizu mehaničkih svojstava slivova pri testu probijanja iglom,
  - analizu adhezivnih svojstava slivova,
  - analizu sastava samolepljivog sloja slivova,
  - analizu mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova,
  - ispitivanje tvrdoće Twinlock® sloja slivova.

- Ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže kroz:
  - pregled stanja u oblastima istraživanja stabilnosti procesa fleksografske štampe i kvaliteta štampanih proizvoda,
  - analizu denzitometrijskih merenja,
  - analizu kolorimetrijskih merenja,
  - analizu uniformnosti štampane površine,
  - analizu parametara kvaliteta oblika rasterskih tačaka.

## 5.2 Metodologija istraživanja

Ovim poglavljem obuhvaćena je karakterizacija materijala, uređaja, softvera, kao i pregled metoda korišćenih u eksperimentalnom delu istraživanja.

### 5.2.1 Materijali

Materijali korišćeni u eksperimentalnom delu istraživanja obuhvataju slivove, obostrano lepljive trake, štamparske forme, podlogu za štampu, boje i raster slivove. Karakteristike korišćenih materijala su date u nastavku poglavlja, kao i oznake materijala koji predstavljaju izvor dobijanja uzoraka za pojedine faze istraživanja.

#### 5.2.1.1 Slivovi i obostrano lepljive trake za montažu flekso štamparskih formi

Za potrebe ispitivanja uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže korišćene su sliv tehnologije koje predstavljaju dva glavna pravca u procesu montaže flekso štamparskih formi:

- konvencionalni rotec® Premium slivovi bez kompresibilnog sloja, sa poliuretanskom površinom tvrdoće 75 Shore D [FlintGroup, 2014b].
  - na rotec® Premium slivove postavljana je kompresibilna obostrano lepljiva traka 3M E1320H, debljine 0.51 mm sa tehnologijom adhezivnog sloja koja pomaže u sprečavanju odizanja štamparskih formi sa slivova tokom štampe. Njena tvrdoća iznosi 63 Shore A [TechMedia, 2010].
- tesa Twinlock® Soft slivovi nižeg nivoa tvrdoće čije karakteristike nisu precizno definisane od strane proizvođača. Po svojstvima bi trebalo da omoguće zamenu rotec® Soft kompresibilnih slivova, 3M obostrano lepljivih traka serija 11 i 12, Lohmann obostrano lepljivih traka serija Duploflex 4 soft i Duploflex 5.1 ili tesa obostrano lepljivih traka 52118, 52017, 52117, 52223, 52022, 52122, 52222. Pogodni su za upotrebu sa štamparskim formama debljine 1.14 ili 1.7 mm. Njihova svojstva bi trebalo da daju najbolje rezultate u slučaju da štampani motivi pretežno pripadaju površinama nižih tonskih vrednosti [tesa, 2015].
- tesa Twinlock® Medium srednjeg nivoa tvrdoće. Karakteristike Twinlock® Medium slivova nisu precizno definisane od strane proizvođača. Međutim, prema navodima proizvođača, Twinlock® Medium slivovi bi po svojstvima trebalo da omoguće zamenu rotec® Medium kompresibilnih slivova, 3M obostrano lepljivih traka serija 10, 13 i 19, Lohmann obostrano lepljivih traka serija Duploflex 4 medium, Duploflex 5.2 i Duploflex 5.3, kao i tesa obostrano lepljivih traka 52015, 52115, 52021, 52121.

Na osnovu podataka dostupnih za rotec® Medium slivove [FlexoTech, 2019], tvrdoća kompresibilnog sloja Twinlock® slivova iznosi 50 Shore A, a na osnovu podataka za tesa 52015 obostrano lepljivu traku ovi slivovi su pogodni za upotrebu sa štamparskim formama debljine 1.14 i 1.7 mm. Njihova svojstva bi trebalo da daju najbolje rezultate u slučaju da štampa zahteva postojanje površina tonskih vrednosti i punih tonova na štamparskim formama montiranim na iste slivove [tesa, 2015].

Za potrebe delova istraživanja fokusiranih na karakterizaciju i uticaj nivoa eksploataisanosti na svojstva slivova, kao i na ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže korišćeni su tesa Twinlock® Medium slivovi. Razlog korišćenja ovih slivova leži u činjenici da se u većini slučajeva na istom slivu nalaze štamparske forme sa površinama tonskih vrednosti i površinama punih tonova. Upravo zbog toga ova podgrupa nove Twinlock® tehnologije slivova predstavlja izbor većine velikih kompanija prilikom prelaska sa konvencionalnih na moderne tehnologije, među kojima se ističu i kompanije Tetra Pak i Tipoplastika kao vodeće u oblasti štampe ambalaže u Srbiji.

Jedan set Twinlock® Medium slivova je sačinjen od potpuno novih slivova (u nastavku označavani kao 1x slivovi), a drugi set od 320 puta korišćenih slivova (u nastavku označavani kao 320x slivovi) koji su korišćeni za štampu oko 5.000.000 m materijala. Tokom eksploatacije slivovi nisu bili izlagani dejstvu ozona koji može da izazove procese degradacije njihovih svojstava.

### 5.2.1.2 Štamparske forme

Na slivove su montirane štamparske forme nyloflex FTP Digital proizvođača FlintGroup razvijene specijalno za Tetra Pak. Njihove karakteristike i proces izrade odgovaraju FlintGroup nyloflex FTF Digital štamparskim formama koje su dostupne i komercijalno. Razlika je u njihovoj boljoj prilagođenosti bojama na bazi vode korišćenih pri štampi na upojnim podlogama.

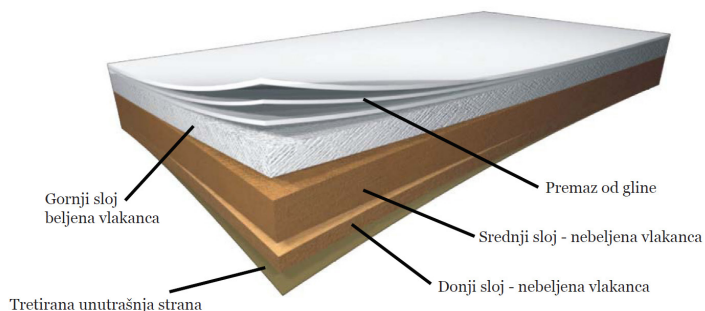
Ove štamparske forme imaju promenjen sastav polimera koji im omogućava da standardnim procesom izrade, na standardnim uređajima ostvare štampajuće elemente ravnog vrha sa površinskom teksturom prisutnom na ploči bez potrebe za dodatnim rastriranjem za povećanje mikrohrapavosti površine. Karakteristike štamparske forme koje definiše proizvođač su date u okviru tabele 5.2.1. Štamparske forme su skladištene i korišćene prema preporukama proizvođača. Ove štamparske forme su odabrane zato što su tačke sa ravnim vrhom manje podložne porastu tonskih vrednosti prouzrokovanim oblikom tačke na formi [Petrović, Novaković i Đurđević, 2018].

*Tabela 5.2.1: Karakteristike FlintGroup nyloflex FTP Digital štamparskih formi [Anderson & Vreeland, 2019b]*

Materijal osnove	Poliesterski film
Dimenzije	1000 x 1500 mm
Ukupna debljina	1.7 mm
Tvrdoća prema DIN 53505	62 Shore A
Dubina reljefa	0.5 - 0.8 mm
Tonski opseg; pri linijaturi	1 - 98 %; 60 linija/cm
Finoća linije	100 µm
Prečnik izolovane tačke	200 µm

### 5.2.1.3 Podloga za štampu

Podloga na koju se štampalo je CLC/C višeslojni polukarton (slika 5.2.1) premazan glinom (kalcijum-karbonat) koji ima glatku površinu. Njegova svojstva su prikazana u tabeli 5.2.2. Ovaj tip podloge je korišćen da bi se izbegla neuniformna štampa (u vidu neodštampanih delova) usled površinske hrapavosti nepremazanih podloga. Izgrađen je u najvećoj meri od nebeljenih vlakana zbog uštede na ceni, ali sa slojem beljenih vlakana uz samu površinu i premazom od gline za postizanje dobrih rezultata po pitanju kvaliteta štampe.



Slika 5.2.1: Skica preseka CLC/C papira i njegovi slojevi

Tabela 5.2.2: Karakteristike CLC/C polukartona

Sila savijanja	315 mN
L* koordinata boje	93
a* koordinata boje	0
b* koordinata boje	2.3
Indeks upijanja sa strane	0.36 kg/m <sup>2</sup>
Sadržaj vlage	7.4 %
Gramatura	278 g/m <sup>2</sup>
Debljina	420 μm
Gustina	660 kg/m <sup>3</sup>
Otpornost na čupanje	292 kPa
Hrapavost (R <sub>a</sub> )	2.25 μm

### 5.2.1.4 Boje

Korišćene boje (crna i magenta za prvu; cijan i magenta za treću fazu eksperimenta) su boje proizvođača Flint, PremoNova na bazi vodotopivih pigmenata i vodenih rastvarača koje zadovoljavaju Swiss Ordinance 817.023.21 regulativu. U njihov sastav ulaze:

- etil acetat (5 - 10 %),
- 1-metoksi-2-propanol (<15 %),
- 1-propoksipropan-2-ol (1 - 5 %),
- titanijum helat (0.25 - 1 %).

Pigmenti magenta boje su se u praksi pokazali kao higroskopni, pa je za održavanje viskoziteta boje potrebno dodavati vodu. Radni viskozitet boje tokom štampe je sistemom za automatsku regulaciju viskoziteta održavan na 15.5 mPas (Ford-4), a pH vrednost na 9. Boje se suše penetracijom i isparavanjem.

### 5.2.1.5 Raster slivovi

Korišćene raster slivove za nanos boja na štamparsku formu proizvodi Zecher. Karakteristike korišćenih raster slivova su date u tabeli 5.2.3.

Tabela 5.2.3: Karakteristike Zecher raster slivova

Materijal	Keramika
Ugao graviranja	60°
Linijatura	360 linija/cm
Oblik ćelija	Heksagonalni
Zapremina ćelija	3.8 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>

Varijacija zapremine ćelija merena putem Troika Anicam uređaja na 5 mesta duž raster slivova nije veća od 5 %.

### 5.2.2 Mašine i uređaji

Za potrebe eksperimenta su pored laboratorijskih uređaja korišćene i mašine za industrijski nivo proizvodnje. Sa ciljem lakšeg snalaženja, uređaji su podeljeni u naredne grupe: mašine/uređaji za pripremu za štampu i štampu, uređaji za pripremu uzoraka i merni uređaji.

#### 5.2.2.1 Mašine/uređaji za pripremu za štampu i štampu

Zbog kompleksnosti procesa izrade štamparskih formi u delu pripreme za štampu je korišćen veliki broj mašina i uređaja, dok je za samu štampu korišćena jedna. Sve mašine se koriste za industrijski nivo proizvodnje.

#### ESKO CDI Spark 4260 uređaj za oslikavanje štamparskih formi

Za oslikavanje je korišćen ESKO CDI Spark 4260 uređaj sa spoljašnjim bubnjem (slika 5.2.2). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.4.



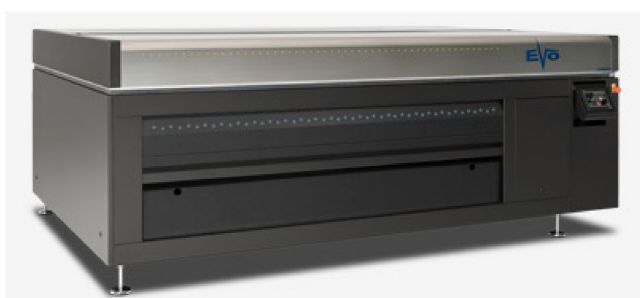
Slika 5.2.2: CDI Spark 4260 [Esko, 2013]

*Tabela 5.2.4: Karakteristike ESKO CDI Spark 4260 uređaja [Esko, 2013]*

Princip rada	Sa spoljašnjim bubnjem
Tip lasera	Fiber laser visokog intenziteta, prva klasa
Formati ploča	Najviše 1067 x 1524 mm
Debljine ploča	0.76 mm - 6.35 mm
Linijatura oslikavanja	Do 200 lpi
Tonske vrednosti	1 - 99 %
Rezolucija	2000 - 4000 ppi

### **Vianord EVO 4E uređaj za predosvetljavanje i glavno osvetljavanje štamparskih formi**

Predosvetljavanje i glavno osvetljavanje su vršeni na uređaju Vianord EVO 4E (slika 5.2.3). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.5.



*Slika 5.2.3: Vianord EVO 4E [Vianord, 2015a]*

*Tabela 5.2.5: Karakteristike Vianord EVO 4E uređaja [Vianord, 2015a]*

Dimenzije	2640 x 1740 x 1060 mm (2450 mm otvorenog poklopca)
Napajanje	230 V; 50/60 Hz; 4.5 kW; 14 A
Debljina ploča	Do 7 mm
Težina	920 kg
Maksimalna veličina ploče	1200 x 1600 mm
Kompresor	Najmanje 7 bar

### **Vianord EVO 4IP uređaj za razvijanje štamparskih formi**

Razvijanje štamparskih formi je vršeno u uređaju Vianord EVO 4IP (slika 5.2.4). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.6.



*Slika 5.2.4: Vianord EVO 4IP [Vianord, 2015b]*

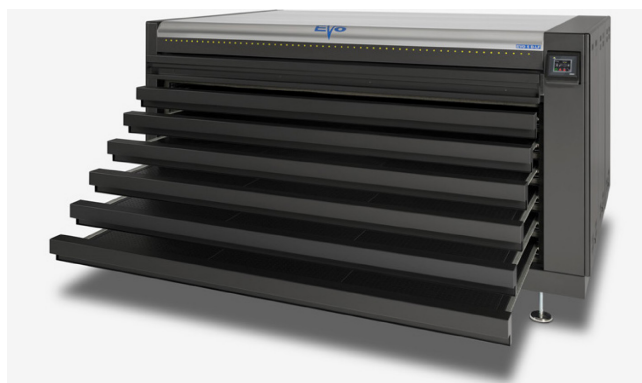


Tabela 5.2.6: Karakteristike Vianord EVO 4IP uređaja [Vianord, 2015b]

Dimenzije	4860 x 2200 x 1060 mm
Napajanje	230 V; 50/60 Hz; 7.5 kW; 21 A
Debljina ploča	Do 7 mm
Sredstvo za ispiranje	Najmanje 134 l, a najviše 170 l za rad
Težina	2100 kg
Maksimalna veličina ploče	1200 x 1600 mm
Kompresor	Najmanje 7 bar
Izduv	1 x 140 mm - 600 m <sup>3</sup> /h

### Vianord EVO 4DLF uređaj za sušenje i naknadno osvetljavanje štamparskih formi

Sušenje i naknadno osvetljavanje štamparskih formi je vršeno u uređaju Vianord EVO 4DLF (slika 5.2.5). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.7.



Slika 5.2.5: Vianord EVO 4DLF [Vianord, 2015c]

Tabela 5.2.7: Karakteristike Vianord EVO4DLF uređaja [Vianord, 2015c]

Dimenzije	1670 x 2030 x 1060 mm (2450 mm otvorenog poklopca)
Napajanje	230 V; 50/60 Hz; 9.5 kW; 26 A
Debljina ploča	Do 7 mm
Težina	1040 kg
Maksimalna veličina ploče	1200 x 1600 mm
Izduv	2 x 140 mm - 1200 m <sup>3</sup> /h i 60 mm - 80 m <sup>3</sup> /h

### VT Flex 175 ES mašina za fleksografsku štampu

Štampa uzoraka je vršena na mašini VT Flex 175 ES (slika 5.2.6) gde je svaki obrtni deo pokretan zasebnim servo motorom. Mašina je projektovana isključivo za potrebe Tetra Pak-a u saradnji sa proizvođačem Tresu. Mašina je projektovana za brzine štampe do 800 m/min, dok maksimalna širina štampe iznosi 1.700 mm. Jedinice za boju su opremljene sistemima za automatsku regulaciju i održavanje viskoziteta boje što je od izuzetnog značaja za potrebe treće faze eksperimenta. Na mašini je moguće koristiti slivove različitih obima, a za potrebe eksperimenta njihov obim je iznosio 660 mm.



*Slika 5.2.6: VT Flex 175 ES mašina za štampu*

### 5.2.2.2 Uređaji za pripremu uzoraka

Eksperimentom su predviđena merenja velikog broja parametara upotrebom različitih metoda i uređaja. Različite grupe uređaja i standardi zahtevaju različite oblike uzoraka za merenja. Shodno tome, za kreiranje uzoraka za merenja su korišćeni uređaji čije su glavne karakteristike date u nastavku.

#### Aristomat SL 1317 CNC uređaj

Aristomat SL 1317 CNC uređaj (slika 5.2.7) je korišćen za isecanje uzoraka za ispitivanje: mehaničkih svojstava slivova pri kompresiji, mehaničkih svojstava slivova pri testu probijanja iglom, adhezivnih svojstava slivova i tvrdoće. Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.8.



*Slika 5.2.7: Aristomat SL 1317*

*Tabela 5.2.8: Karakteristike Aristomat SL 1317 CNC uređaja [ARISTO CNC Cutter, 2013]*

Debljina materijala	Najviše 35 mm
Statička ponovljivost	$\pm 0.02$ mm/m pri 20°
Brzina	1400 mm/s
Ubrzanje	1.1 G
Maksimalna radna površina	1300 x 1700 mm
Dimenzije	2110 x 2580 x 1140 mm

### Leica RM2255 automatski rotacioni mikrotom

Priprema uzoraka za generisanje i analizu mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova je vršena isecanjem pomoću Leica RM2255 automatskog rotacionog mikrotoma (slika 5.2.8). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.9.



Slika 5.2.8: Leica RM2255 automatski rotacioni mikrotom [Leica, 2019]

Tabela 5.2.9: Karakteristike Leica RM2255 automatskog rotacionog mikrotoma [Leica, 2019]

Podešavanje debljine segmenta	0,5 - 100 $\mu\text{m}$ 0,5 do 5 $\mu\text{m}$ sa 0,5 $\mu\text{m}$ inkrementom 5 do 20 $\mu\text{m}$ sa 1 $\mu\text{m}$ inkrementom 20 do 60 $\mu\text{m}$ sa 5 $\mu\text{m}$ inkrementom 60 do 100 $\mu\text{m}$ sa 10 $\mu\text{m}$ inkrementom
Podešavanje debljine segmenta sečenja	1 - 600 $\mu\text{m}$ 1 do 10 $\mu\text{m}$ sa 1 $\mu\text{m}$ inkrementom 10 do 20 $\mu\text{m}$ sa 2 $\mu\text{m}$ inkrementom 20 do 50 $\mu\text{m}$ sa 5 $\mu\text{m}$ inkrementom 50 do 100 $\mu\text{m}$ sa 10 $\mu\text{m}$ inkrementom 100 do 600 $\mu\text{m}$ sa 50 $\mu\text{m}$ inkrementom
Pomeranje objekta	24 mm $\pm$ 1 mm, pomoću step motora
Vertikalni pomeraj	70 mm
Maksimalna veličina uzorka (DxVxŠ)	50 x 60 x 40 mm

#### 5.2.2.3 Merni uređaji

Eksperimentalni deo istraživanja kroz svoje faze obuhvata veći broj merenja koja za cilj imaju karakterizaciju različitih materijala i tipova uzoraka. Korišćeni uređaji se mogu podeliti u dve grupe:

- uređaji za karakterizaciju slivova
  - Shimadzu Compact Tabletop EZ-LX univerzalni uređaj,
  - Zwick Roell zwickiLine 5 kN univerzalni uređaj,
  - Agilent 6890 GC pećnica spojena sa 5975-N maseno selektivnim detektorom,
  - Olympus BX51 mikroskop sa Olympus XC50 kamerom,
  - Sauter AGDA-100 digitalni durometar.

- uređaji za karakterizaciju kvaliteta štampanog otiska
  - x-rite eXact spektrofotometar,
  - FAG Flex3Pro uređaj sa kamerom.

Prva grupa uređaja je korišćena za potrebe merenja u drugoj fazi eksperimenta, a druga grupa uređaja je korišćena za potrebe merenja u prvoj i trećoj fazi eksperimenta.

### Shimadzu Compact Tabletop EZ-LX univerzalni uređaj

Za merenja mehaničkih svojstava kompresibilnog poliuretanskog sloja Twinlock® Medium slivova pri testovima cikličnog kompresivnog opterećenja i cikličnog kompresivnog opterećenja sa zadržavanjem minimalne i maksimalne deformacije korišćen je Shimadzu Compact Tabletop EZ-LX univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala (slika 5.2.9). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.10.



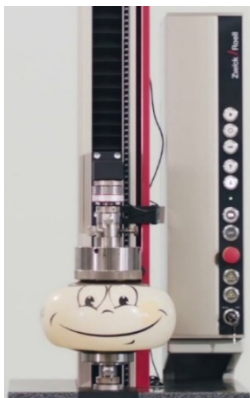
Slika 5.2.9: Univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX [Shimadzu Corporation, 2018]

Tabela 5.2.10: Karakteristike univerzalnog uređaja za testiranje mehaničkih svojstava materijala Shimadzu Compact Tabletop Testing EZ-LX [Shimadzu Corporation, 2018]

Maksimalni kapacitet testiranja	5 kN
Opseg brzine kretanja glave za testiranje	0.001 - 1000 mm/min
Preciznost brzine kretanja glave za testiranje	± 0.1% od zadate brzine
Maksimalna brzina povratka glave za testiranje	1500 mm/min
Preciznost testiranja (high precision type)	± 0.5% (u skladu sa JIS B 7721 class 0.5, ISO 7500-1 class 0.5, EN 10002-2 grade 0.5 i ASTM E4 standardima)
Preciznost testiranja (standard precision type)	± 1% (u skladu sa JIS B 7721 class 1, ISO 7500-1 class 1, EN 10002-2 grade 1 i ASTM E4 standardima)
Kalibracija sile testiranja	Automatska

### Zwick Roell zwickiLine 5 kN univerzalni uređaj

Za merenja mehaničkih svojstava Twinlock® sloja preuzetog sa Twinlock® Medium slivova pri testu otpornosti na probijanje iglom, kao i za testiranje svojstava adhezije korišćen je Zwick Roell zwickiLine 5 kN univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala (slika 5.2.10). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.11.



*Slika 5.2.10: Univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala Zwick Roell zwickiLine 5kN [Zwick Roell, 2019]*

*Tabela 5.2.11: Karakteristike univerzalnog uređaja za testiranje mehaničkih svojstava materijala Zwick Roell zwickiLine 5kN [Zwick Roell, 2019]*

Maksimalni kapacitet testiranja	5 kN
Opseg brzine kretanja glave za testiranje	0.0005 - 600 mm/min
Frekvencija prenosa podataka	2000 Hz
Maksimalna brzina povratka glave za testiranje	1500 mm/min
Preciznost testiranja	$\pm 0.5\%/1\%$ (u skladu sa JIS B 7721 class 0.5/1, ISO 7500-1 class 0.5/1, EN 10002-2 grade 0.5 i ASTM E4 standardima)
Rezolucija merenja	24-bit

### Agilent 6890 GC pećnica spojena sa 5975-N maseno selektivnim detektorom

Ispitivanje sastava samolepljivog sloja slivova vršeno je pomoću Agilent 6890 GC pećnice spojene sa 5975-N maseno selektivnim detektorom (slika 5.2.11). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.12.



*Slika 5.2.11: Agilent 6890 GC pećnica spojena sa 5975-N maseno selektivnim detektorom [Agilent, 2006]*

*Tabela 5.2.12: Karakteristike Agilent 6890 GC pećnice spojene sa 5975-N maseno selektivnim detektorom [Agilent, 2006]*

6890 GC pećnica	
Temperatura rerne	4-450 °C
Platoi rerne	6/7
Elektronsko pneumatska kontrola	Automatska regulacija pritiska za razdvojivo/nerazdvojivo pročišćanje septuma
Modovi kontrole nosećeg gasa	Modovi konstantnog pritiska i toka; Mogućnost programiranja
5975-N maseni spektrometar	
Mod	EI; PCI, NCI, EI sa CI izvorom opciono
Tip izvora jona	Nepremazni inertni EI izvor
Maseni filter	Monolitički hiperbolički četverostruki
Maksimalna masa	1050 u
Detektor	EM sa izmenljivim rogom
Brzina skeniranja	Do 10.000 amu/s

### **Olympus BX51 mikroskop sa Olympus XC50 kamerom**

Kreiranje mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova vršeno je pomoću Olympus BX51 mikroskopa (slika 5.2.12). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.13.



*Slika 5.2.12: Olympus BX51 mikroskop [Olympus, 2004]*

*Tabela 5.2.13: Karakteristike Olympus BX51 mikroskopa [Olympus, 2004]*

Optika	UIS2 sistem optike
Osvetljenje - telo mikroskopa	Ugrađena Koehler iluminacija za transmitovanu svetlost (FN22) Eksterni izvor svetlosti, halogena lampa 12V 100W
Transmitovana svetlost	LB (filter dnevne svetlosti), ND25 i ND6 (sivi filteri)
Reflektovana svetlost	BF (bright field), DF (dark field)
Uvećanje	10x okular; 5x, 10x, 20x, 50x i 100x sočiva objektivna
Fokus	Pomeraj po rotaciji točkića: fin 0.1 mm; grub 15mm
Maksimalna debljina uzorka	25 mm
Maksimalne dimenzije uzorka	150 x 150 mm

Olympus XC50 (slika 5.2.13) je kamera visoke rezolucije (5 megapiksela) za beleženje snimaka u boji. Njene karakteristike su prikazane u tabeli 5.2.14. Korišćena je za digitalizaciju mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja u cilju dalje softverske analize slike odgovarajućim pratećim softverom.



Slika 5.2.13: Olympus XC50 kamera [Olympus, 2020]

Tabela 5.2.14: Karakteristike Olympus XC50 kamere [Olympus, 2020]

Senzor	CCD u boji
Maksimalna rezolucija	2576 x 1932 px
Veličina piksela	3.4 x 3.4 $\mu\text{m}$
A/D konverter	14 bita
Dužina trajanja ekspozicije	0.1 ms - 10 s
Hlađenje	Peltier 10 °C pri ambijentalnoj temperaturi od 25 °C
Prenos podataka	FireWire™ IEEE 1394a

### Sauter AGDA-100 digitalni durometar

Za potrebe merenja tvrdoće Twinlock® sloja preuzetog sa Twinlock® Medium slivova korišćen je Sauter AGDA-100 digitalni durometar (slika 5.2.14). Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.15.



Slika 5.2.14: Sauter AGDA-100 digitalni durometar [Sauter GmbH, 2015]

Tabela 5.2.15: Karakteristike Sauter AGDA-100 digitalnog durometra [Sauter GmbH, 2015]

Merenje	Shore A - penetracijom
Materijali	Guma, elastomeri, neopren, silikon, meka plastika, koža i slični materijali
Maksimalna tvrdoća	100 Shore A



## x-rite eXact spektrofotometar

Denzitometrijska i kolorimetrijska merenja su vršena pomoću x-rite eXact uređaja (slika 5.2.15) koji pripada grupi spektrofotometara. Karakteristike ovog uređaja su prikazane u tabeli 5.2.16.



Slika 5.2.15: x-rite eXact spektrofotometar [x-rite, 2014]

Tabela 5.2.16: Karakteristike x-rite eXact spektrofotometra [x-rite, 2014]

Merna geometrija	45°/0° prstenasto, ISO 5-4:2009(E)
Izvor svetlosti	Gasom punjen volfram (iluminant A) i UV LED
Spektralni interval	10 nm
Spektralni opseg	400 - 700 nm
Spektralni izveštaj	400 - 700 nm sa korakom 10 nm
Podržani uslovi merenja	M0, M1, M2 i M3
Jednačine za razliku u boji	CIE $\Delta E^*$ (1976), CIE $\Delta E^*$ (2000), i CIE $\Delta E^*$ (1994)
Prostori boja	CIE $L^*a^*b^*$ , CIE $L^*C^*h^\circ$ , CIE XYZ i $Yxy$
Iluminanti	A, C, D50, D55, D65, D75, F2, F7, F11, D12
Standardni posmatrači	2° i 10°
Softverski modovi	Denzitometar, standard, napredan

## FAG Flex3Pro uređaj sa kamerom

Kvantifikacija ostalih parametara štampe koji uključuju mehanički porast tonskih vrednosti, efekat prstenaste rasterske tačke, uniformnost štampane površine, istežanje rasterske tačke, krzavost ivica rasterske tačke, kao i njen prečnik je izvršena putem softverske analize slika mernih polja dobijenih pomoću FAG Flex3Pro uređaja sa kamerom (slika 5.2.16). Ovaj uređaj može da se koristi za analizu transparentnih flekso štamparskih formi, LAMS sloja, filma, netransparentnih flekso štamparskih formi, ofset štamparskih formi i otisaka.



Slika 5.2.16: FAG Flex3Pro uređaj [FAG, 2019]



### 5.2.3 Softveri

Prilikom izrade test karti za prvu i treću fazu eksperimenta korišćen je softver karakterističan za pripremu fleksografske štampe, kao i prateći softveri uz pojedine uređaje, dok su za potrebe druge faze eksperimenta korišćeni samo prateći softveri.

#### Esko ArtPro softver za digitalnu pripremu za štampu

ArtPro softver kompanije Esko je rešenje za profesionalnu, zahtevniju pripremu za fleksografsku štampu. Korišćen je za generisanje test karti za prvu i treću fazu eksperimenta. Pomoću njega se vrše zahvati: ubacivanja i eksportovanja dizajna, kontrole kvaliteta, prikaza separacija u visokoj rezoluciji, detekcije moarea, upoređivanja dizajna i naprednog preklapanja.

#### TrapeziumX

TrapeziumX je prateći softver uz Shimadzu Compact Tabletop EZ-LX univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala. Služi za iscrtavanje grafika i beleženje izlaznih parametara testova. Pored standardnih testova, moguće je i kreiranje novih testova, kao i unos oblika i dimenzija uzoraka na osnovu kojih se preračunavaju izlazni parametri. TrapeziumX omogućava istovremeni prikaz i snimanje grafika za više uzoraka u okviru istog izveštaja [Shimadzu, 2020]. Ove mogućnosti su od posebnog značaja za drugu fazu eksperimenta gde se poredе svojstva slivova podvrgnutih različitim nivoima eksploatacije.

#### testXpert® III

testXpert® III je prateći softver uz Zwick Roell zwickiLine 5 kN univerzalni uređaj za testiranje mehaničkih svojstava materijala. Ovaj softver omogućava sprovođenje testova prema standardima sa bibliotekom od preko 600 standarda za merenja različitih parametara. Svi rezultati neophodni za ispunjavanje različitih standarda su integrisani u izveštaje i statistiku. testXpert® III omogućava i promenu parametara vezanih za dimenzije uzoraka za slučajeve kada zbog ograničenja materijala nije moguće u potpunosti ispratiti zahteve propisane standardima, što je od posebnog značaja za pojedine segmente druge faze eksperimenta.

#### Olympus Stream

Olympus Stream je napredan softver za analizu slike korišćen pri analizi mikroskopskih snimaka poprečnih preseka Twinlock® slojeva preuzetih sa Twinlock® Medium slivova. Njegova Z-stacks funkcija je od značaja za eksperiment jer omogućava generisanje slike sa idealnim fokusom pri velikom uvećanju putem softverskog preklapanja slika generisanih korišćenjem različitih žižnih daljina. Glavna svojstva ovog softvera su prikazana u tabeli 5.2.17.

Tabela 5.2.17: Glavna svojstva Olympus Stream softvera za analizu slike [Nanocenter, 2010]

Obrada slike i filteri	Promena kontrasta, svetline, tona, detekcija ivica i izoštravanje
Merenje	Rastojanja, uglova i površine
Operacije nad slikama	Aritmetičke i logičke
Izvoz podataka	U Microsoft Office

## x-rite DataCatcher

x-rite DataCatcher je prateći softver uz x-rite eXact spektrofotometar. Koristi se za simultani izvoz podataka dobijenih merenjima u Microsoft Excel.

## FAG Flex3Pro softver

FAG Flex3Pro je prateći softver za analizu slika generisanih pomoću FAG Flex3Pro uređaja sa kamerom. Njegove mogućnosti su prikazane u tabeli 5.2.18.

Tabela 5.2.18: *Mogućnosti FAG Flex3Pro pratećeg softvera za analizu slike [FAG, 2019]*

	Štamparske forme	Otisci
Analiza 3D prikaza	x	
Procenat pokrivenosti površine	x	x
Linijatura rastera	x	x
Prečnik tačke	x	x
Površina tačke	x	x
Faktor krzavih ivica	x	x
Širina linije	x	x
Statistika	x	x
Poređenje slika	x	x
Indeks strukture rasterske tačke	x	
3D karakteristike tačke	x	
Uniformnost štampane površine		x
Efekat prstenaste rasterske tačke		x
Faktor istežanja rasterske tačke		x
CMY separacije		x

## 5.2.4 Metode

U svrhe eksperimentalnog dela istraživanja primenjeno je više metoda od kojih su neke zajedničke za više faza eksperimenta, a neke su karakteristične za pojedinačne faze. Prva i treća faza eksperimenta podrazumevaju primenu metoda za digitalnu pripremu za štampu, izradu štamparskih formi i štampu uz opis podešavanja parametara mašina i uređaja. Kako je u okviru svih faza eksperimenta predviđen veći broj merenja različitih parametara pomoću različitih uređaja, u nastavku poglavlja će biti opisane i metode pripreme uzoraka, kao i metode merenja za odgovarajuće testove.

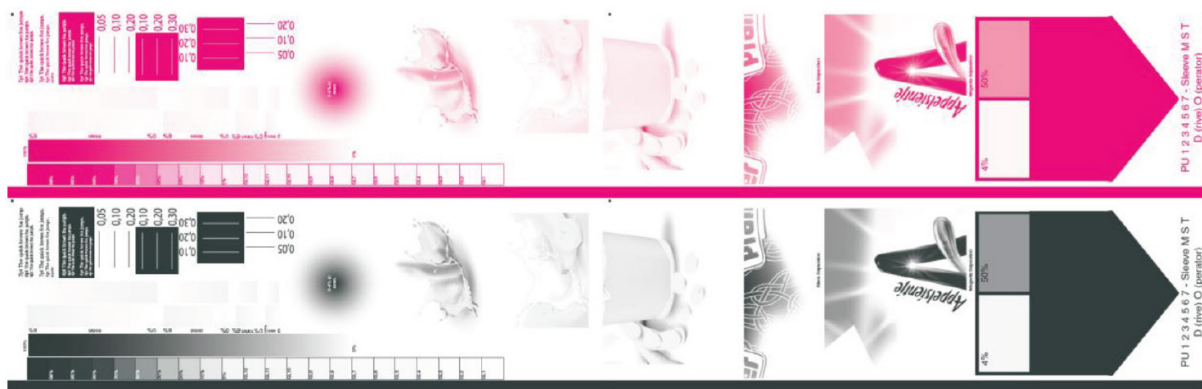
### 5.2.4.1 Digitalna priprema za štampu, izrada štamparskih formi i štampa

Merenja predviđena prvom i trećom fazom eksperimenta se vrše na štampanim otiscima. U te svrhe prvo je potrebno izraditi test kartu ili izvršiti integraciju kontrolnih polja u već postojeće dizajne ambalaže namenjene štampi proizvoda koji će biti plasirani na tržište. Nakon izrade test karte ili integracije kontrolnih polja u već postojeće dizajne, neophodno je izraditi štamparske forme. Nakon toga se može pristupiti podešavanju parametara štampe i na kraju samoj štampi uzoraka.

## Digitalna priprema test karti

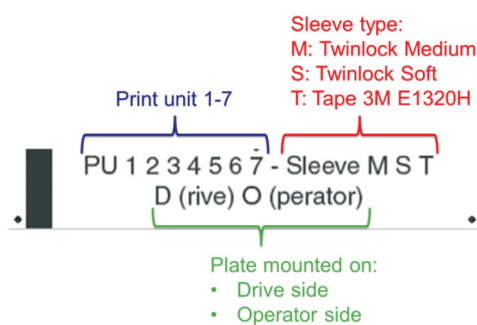
Za potrebe istraživanja razvijene su dve test karte. Za prvu fazu istraživanja generisana je test karta koja svojim oblikom i sadržajem ni na koji način nije povezana sa realnim ambalažnim proizvodom. Međutim, kako je jedan od ciljeva istraživanja i primenljivost rešenja na industrijskom nivou proizvodnje, tokom procesne kontrole za štampu korišćenjem standardnih mernih uređaja, za treću fazu eksperimenta je primenjen drugačiji pristup generisanju test karte. Naime, kontrolna polja su integrisana u već postojeći dizajn ambalaže namenjene štampi proizvoda koji će biti plasirani na tržište i to u delovima koji neće biti vidljivi na gotovom proizvodu. Generisanje obe test karte je vršeno u Esko ArtPro softveru.

Na slici 5.2.17. je dat prikaz test karte korišćene u prvoj fazi istraživanja. Njene dimenzije iznose 120 x 320 mm. Za potrebe merenja dodati su tonski klin i standardizovani elementi: linearne vinjete sa različitim dužinama prelaska u boju podloge, kružne vinjete, tekst i pojedini elementi dizajna sa zahtevnim oblastima svetlih tonova nastalih upotrebom Samba rastriranja. AM rastriranje je korišćeno za tonske vrednosti od 4.3 % u svetlim do 99 % u tamnim tonovima. Za tonske vrednosti niže od 4.3% korišćeno je FM (stohastičko) rastriranje.



Slika 5.2.17: Dizajn test karte za prvu fazu eksperimenta

Da bi se identifikovalo koji štampani uzorak je u vezi sa kojom promenljivom, na dnu test dizajna su dodate oznake (slika 5.2.18) na kojima uklonjena slova i brojevi definišu promenljive. Na primer, ako su uklonjeni 4, S i O, to znači da je štampa sprovedena na četvrtoj jedinici za štampu, upotrebom Twinlock® Soft sliva sa štamparskom formom montiranom sa strane operatera.



Slika 5.2.18: Sistem za identifikaciju promenljivih

Na slici 5.2.19 je dat prikaz već postojećeg dizajna ambalaže dimenzija 400 x 320 mm kom su dodata kontrolna polja na površine koje su nakon formiranja prostornog oblika ambalaže skrivene. Kontrolni elementi su kvadratnog oblika dužine stranice 6 mm popunjeni rasterskim tačkama dobijenim AM rastriranjem tako da formiraju tonske vrednosti od 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 % pokrivenosti površine (zeleni pravougaonik na slici 5.2.19). Pored njih postoje još dva tipa polja istih dimenzija. Jedan tip predstavljaju polja punog tona boje (plavi pravougaonik na slici 5.2.19), a drugi predstavljaju polja dobijena preštampavanjem boja takođe u punim tonovima (crveni kvadrat na slici 5.2.19).



Slika 5.2.19: Dizajn test karte za treću fazu eksperimenta

### Izrada štamparskih formi

Parametri izrade štamparskih formi su prikazani u tabeli 5.2.19 raspoređeni po stvarnom redosledu operacija. Korišćeni uređaji su prema svojoj ulozi opisani u poglavlju 5.2.2.1. Prilikom oslikavanja je korišćeno standardno AM rastriranje sa okruglim oblikom tačaka, a linijatura je iznosila 55 linija/cm.

Tabela 5.2.19: Parametri izrade FlintGroup nyloflex FTP Digital štamparskih formi

Predekspozicija	30 s
CTP graviranje	12 min na CDI
Glavna ekspozicija	660 s
Ispiranje	190 mm/min (oko 13 min)
Sušenje	120 min na 61 °C
Hlađenje	10 min
Finiširanje	2 min UVA i 5 min UVC istovremeno
Sečenje	Oko 8 min
Odležavanje	2 - 3 h

## Štampa

Štampa uzoraka za potrebe prve i treće faze eksperimenta je vršena na mašini za rotacionu fleksografsku štampu VT Flex 175 ES. Karakteristike korišćenih slivova za montažu štamparskih formi, raster slivova, boja i podloge za štampu su date u okviru poglavlja 5.2.1. Brzina kojom je štampano je iznosila 600 m/min sa ravnomernom udaljenošću cilindara kroz agregate, tolikom da se ostvaruje minimalan pritisak potreban za kvalitetnu štampu, tzv. Kiss Print pritisak.

U okviru prve faze eksperimenta štampa je vršena dva puta (u dve kontrolne tačke) uz promene dužine štampe pri kojoj se vrši uzorkovanje i promene tipova slivova i boje u jedinicama za štampu. U tabeli 5.2.20 dat je pregled kontrolnih tačaka (TP - eng. Trial Points) i njihovih parametara. Sa leve strane su parametri koji su zajednički za obe kontrolne tačke, a sa desne strane su parametri specifični za konkretne jedinice za štampu: tip boje i tip korišćenog sliva ili obostrano lepljive trake.

Tabela 5.2.20: Parametri štampe po kontrolnim tačkama

TP	Brzina (m/min)	Dužina štampe (km)	PU1	PU2	PU3	PU4	PU5	PU6	PU7
1	600	28.5	K	M	K	M	K	M	K
			TL Med	TL Med	TL Soft	TL Soft	E1320H	E1320H	TL Soft
2	600	28.5	M	K	M	K	M	K	M
			TL Soft	E1320H	E1320H	TL Med	TL Med	TL Soft	TL Soft

Kao što je to prikazano pregledom kontrolnih tačaka u tabeli 5.2.20, korišćena su tri različita tipa slivova za montažu štamparskih formi: Twinlock® Soft, Twinlock® Medium i standardan tvrdi sliv sa 3M E1320H obostrano lepljivom trakom. Različiti tipovi slivova su postavljani u različite jedinice za štampu, a svaki je na sebi nosio štamparske forme za dve različite boje (crna (K) i magenta (M)). Da bi podešavanja pritiska na svakoj jedinici za štampu bila izbalansirana, štamparske forme su montirane na rastojanju koje iznosi polovinu maksimalne širine štampe, kao što je to prikazano u tabeli 5.2.21.



Tabela 5.2.21: Pozicioniranje štamparskih formi i redosled montaže slivova

TP 1	PU 1	PU 2	PU 3	PU 4	PU 5	PU 6	PU 7	TP 2	PU 1	PU 2	PU 3	PU 4	PU 5	PU 6	PU 7
							7SD								7SD
						6TD								6SD	
					5TD								5MD		
				4SD								4MD			
			3SD								3TD				
		2MD								2TD					
	1MD								1SD						
							7SO								7SO
						6TO								6SO	
					5TO								5MO		
				4SO								4MO			
			3SO								3TO				
		2MO								2TO					
	1MO								1SO						

Za potrebe treće faze eksperimenta, štamparske forme za ambalažu sa dodatim kontrolnim elementima su montirane prvo na 1x, a zatim i na 320x Twinlock® Medium slivove. Na jedan sliv staju dve štamparske forme (za dve ambalaže) po obimu, a četiri po širini sliva. Pošto su štamparske forme postavljene po celoj širini sliva, pritisak prilikom štampe će biti izbalansiran tako da nema potrebe služiti se metodom predloženom za štampu uzoraka za prvu fazu eksperimenta. Dužina štampe u oba slučaja iznosi 31.500 m, odnosno 7 rolni dužina po 4.500 m.

Štamparske forme su montirane na smicanje (slika 5.2.20) sa ciljem izbegavanja pojave vibracija i odskakanja usled kanala između gornjih i donjih ivica obmotanih štamparskih formi. Pojava odskakanja bi negativno uticala na kvalitet štampanog otiska kroz pojavu greške dubliranja rasterskih tačaka.



Slika 5.2.20: Štamparske forme montirane na smicanje

#### 5.2.4.2 Priprema uzoraka

##### Štampani uzorci za denzitometrijska i kolorimetrijska merenja, merenja uniformnosti štampane površine i analizu parametara kvaliteta oblika rasterskih tačaka

Uzorkovanje za prvu fazu eksperimenta je vršeno tokom štampe prema planu prikazanom u tabeli 5.2.22.

Tabela 5.2.22: Plan uzorkovanja štampanog materijala za prvu fazu eksperimenta

	TP 1	TP 2
1.	5.700 m	2.400 m
2.	12.800 m	9.500 m
3.	18.300 m	16.700 m
4.	25.500 m	22.500 m
5.	28.300 m	28.200 m

Prilikom uzorkovanja u svakoj tački vršeno je isecanje test karti po ukupnoj širini rolne, dok su po dužini rolne u svakoj tački isecana po dva uzorka. Broj uzoraka na kojima su vršena merenja iznosi 40 po kontrolnoj tački za svaki tip slivova (po 20 za crnu i magenta boju).

Uzorkovanje za potrebe treće faze eksperimenta je vršeno isecanjem odštampanog materijala prema planu prikazanom u tabeli 5.2.23.

Tabela 5.2.23: Plan uzorkovanja štampanog materijala za treću fazu eksperimenta

Oznaka	1x slivovi	Oznaka	320x slivovi
1x-1.r	300 m - prva rolna	320x-1.r	300 m - prva rolna
1x-5.r	18.300 m - peta rolna	320x-5.r	18.300 m - peta rolna
1x-7.r	27.300 m - sedma rolna	320x-7.r	27.300 m - sedma rolna

Prilikom uzorkovanja, u svakoj tački je vršeno isecanje ambalaža sa kontrolnim elementima po ukupnoj širini rolne (po 4 uzorka), dok su po dužini rolne u svakoj tački isecana po 3 uzorka kako za nalog štampan upotrebom 1x slivova, tako i za nalog štampan upotrebom 320x slivova. Tačke uzorkovanja odgovaraju počecima rolni štampanih pri punoj brzini štampe. Broj uzoraka na kojima su vršena merenja iznosi 12 uzoraka po rolni, što čini 36 uzoraka za merenje kontrolnih polja cijan i magenta boje i polja dobijenih preštampavanjem po nalogu štampanom jednim tipom sliva, a 72 uzorka za ceo eksperiment.

#### Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava slivova pri kompresiji

Za potrebe istraživanja pripremljeno je ukupno 20 uzoraka, po 10 za 1x i 320x slivove, kružnog oblika, prečnika 8 mm i debljine 2 mm, uzorkovanih sa različitim pozicija po dužini sliva (na svakih 15 cm). Uzorci su sečeni pomoću CNC mašine Aristomat SL 1317. Zbog nepostojanja odgovarajućeg standarda za željeno testiranje sa željenim materijalima, uzorci su pripremljeni u skladu sa literaturnim izvorom [Qi i Boyce, 2005] (sa neophodnom srazmernom promenom prečnika usled predefinisane drugačije debljine) gde su vršena slična ispitivanja na sličnom materijalu. Pored toga, površina i debljina uzorka odgovaraju površini i debljini materijalnog dela prstenastih termoplastičnih uzoraka sačinjenih od sličnog materijala prema standardu ISO3384-2005 [International Organization for Standardization, 2005].

## **Uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava slivova pri testu probijanja iglom**

Uzorkovanje za test probijanja je izvršeno odlepljivanjem Twinlock® sloja sa 5 različitih mesta po dužinama 1x i 320x slivova. Uzorci su isecani na dimenzije 200 x 15 mm pomoću Aristomat SL 1317 CNC mašine.

## **Uzorci za merenje adhezivnih svojstava slivova**

Priprema uzoraka za test odlepljivanja ljuštenjem se izvodi u nekoliko faza. Pošto testiranje nije moguće raditi direktno na slivu, ova metoda zahteva odlepljivanje Twinlock® sloja sa baznog tela sliva, što je postupak koji ovu metodu svrstava u destruktivne metode. Uzorkovanje se vrši sa 5 mesta po dužini sliva, a materijal se nakon toga iseca pomoću Aristomat SL 1317 CNC mašine na dužinu od 190 mm i širinu od 15 mm. Nakon toga se pristupa aktivaciji površine Twinlock® Activator sredstvom na bazi 1-metoksi-2-propanola, preporučenim od strane proizvođača. Nakon čekanja od 30 min pristupa se sečenju dela štamparske forme u dužini od 280 mm. Uzorak štamparske forme se čisti sa donje strane i montira na uzorak sliva. Da bi se ostvarilo za proces reprezentativno adhezivno spajanje, nakon montaže štamparske forme se čeka 5 minuta pre početka testiranja adhezije.

## **Uzorci za analizu sastava samolepljivog sloja slivova**

Priprema uzoraka za gasnu hromatografiju sa masenom spektrometrijom (GC/MS) se vrši kroz nekoliko faza. Prvo se vrši isecanje 1.3 g (~11.3 cm<sup>2</sup>) adhezivnog akrilatnog fotopolimernog sloja sa 1x i 320x slivova. Isečeni uzorci se potapaju u 30 ml 95% etanola u trajanju od 24h pri temperaturi od 40 °C. Nakon toga ekstrakt se koncentruje u 1 mL i dodaju mu se interni standardi koji sadrže deuterisani BHT, pentadekan, deuterisani nonadekan, nonadekan i heptakozan (n-C27).

## **Uzorci za analizu mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova**

Priprema uzoraka za generisanje mikroskopskih snimaka i analizu slike se vrši pravljenjem poprečnog preseka i isecanjem uzorka debljine 10 µm pomoću automatskog rotacionog mikrotoma.

## **Uzorci za merenje tvrdoće Twinlock® sloja slivova**

Priprema uzoraka za merenje tvrdoće je vršena prema standardu ASTM D2240-05 [ASTM International, 2005] sa modifikovanom debljinom uzorka koja iznosi 2 mm.

### **5.2.4.3 Metode merenja**

Eksperimentom su obuhvaćena merenja niza parametara na različitim materijalima. Metode merenja su predstavljene u nastavku shodno podeli napravljenoj u poglavlju 5.2.4.2. - Priprema uzoraka.



## Denzitometrijska i kolorimetrijska merenja, merenja uniformnosti štampane površine i analiza parametara kvaliteta oblika rasterskih tačaka

U okviru prve i treće faze eksperimenta vršena su denzitometrijska merenja porasta tonskih vrednosti, a tokom treće faze, pored denzitometrijskih, vršena su i kolorimetrijska merenja, merenja uniformnosti štampane površine, kao i analiza parametara kvaliteta oblika rasterskih tačaka.

Podaci o porastu tonskih vrednosti za prvu fazu istraživanja dobijeni su merenjem po 40 uzoraka za svaki od tri tipa slivova (20 po boji). Podaci o vrednostima optičkih gustina, ukupnog porasta tonskih vrednosti, preklapanja i razlike u boji za treću fazu eksperimenta dobijeni su merenjem po 12 uzoraka sa svake od tri rolne štampane upotrebom 1x i 320x slivova za cijan i magenta boju. Merenja su vršena pomoću x-rite eXact spektrofotometra.

Merenja optičke gustine i preklapanja su vršena pri odabranim M3 uslovima merenja koja uključuju polarizacioni filter radi umanjenja razlika u refleksiji između mokre i suve boje, a isključuju UV deo spektra emitovane svetlosti. Anuliranje uređaja je vršeno na neodštampanom delu podloge.

Merenja razlike u boji ( $\Delta E^*_{00}$ ) su izvršena za standardni ugao posmatranja od 2° uz upotrebu M1 uslova merenja koja podrazumevaju izvor svetlosti usklađen sa D50 CIE standardnim iluminantom i ima kontrolisane vrednosti zračenja u UV delu spektra čime se kvantifikuje i pojava fluorescencije podloge ili boje. Anuliranje uređaja u ovom slučaju je vršeno na apsolutno beloj pločici ugrađenoj u uređaj.

Za računanje tonskih vrednosti i njihovog porasta na osnovu optičkih gustina je korišćena Murray-Davies formula (5.2.1), a preklapanje je računato upotrebom Preucil-ove jednačine (5.2.2). Nakon izvršenih 12 merenja određena je i njihova srednja vrednost korišćena u daljem prikazu, analizi i diskusiji rezultata.

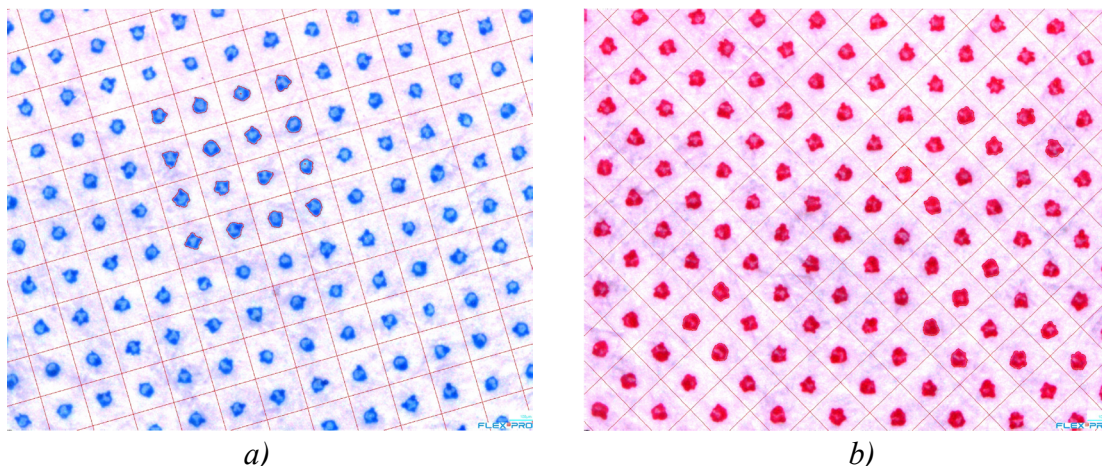
$$F_d[\%] = \left[ \frac{(1 - 10^{-D_R})}{(1 - 10^{-D_V})} \right] \times 100\% \quad (5.2.1)$$

Gde su  $D_R$  i  $D_V$  optička gustina tonske površine i površine punog tona respektivno.

$$T = \frac{D_{1+2} - D_1}{D_2} \quad (5.2.2)$$

Gde je  $D_{1+2}$  vrednost optičke gustine polja preštampanih boja mereno filterom komplementarnim drugoj odštampanoj boji,  $D_1$  vrednost optičke gustine polja punog tona prve, a  $D_2$  vrednost optičke gustine polja punog tona druge odštampane boje.

Kvantifikacija ostalih parametara štampe koji uključuju mehanički porast tonskih vrednosti, efekat prstenaste rasterske tačke, uniformnost štampane površine, istežanje rasterske tačke, krzavost ivica rasterske tačke, kao i njen prečnik je izvršena putem softverske analize slika mernih polja (slika 5.2.21) dobijenih pomoću FAG Flex3Pro uređaja sa kamerom. Analize su vršene u ručnom režimu odabirom po 16 rasterskih tačaka koje čine matricu 4x4.



Slika 5.2.21: Snimak rasterskih tačaka polja od 5% TV za a) cijan; b) magenta boju

Za potrebe ovih analiza su korišćena ista kontrolna polja sa istih uzoraka izmerenih spektrofotometrom, kako bi se dobio realan uvid u povezanost promena merenih parametara. Nakon pravljenja snimaka polja, pristupano je analizi snimaka. Od vrednosti parametara dobijenih analizom slike je računata srednja vrednost koja je korišćena tokom daljeg prikaza, obrade i diskusije rezultata. Izračunavanje vrednosti parametara softver izvršava upotrebom formula datih u nastavku (5.2.3 - 5.2.8).

$$\text{Krzavost ivice} = \left( \frac{\text{Prosečan obim realnih rasterskih tačaka}}{\text{Obim idealnog kruga}} \right) \times 100\% \quad (5.2.3)$$

$$\text{Izduženje rasterske tačke} = \left( \frac{\text{Dužina rasterske tačke}}{\text{Širina rasterske tačke}} \right) \times 100\% \quad (5.2.4)$$

$$\text{Faktor neodštampanih površina} = \left( \frac{\text{Sr.vr.neodštampanih površina tačaka}}{\text{Sr.vr.površina tačaka}} \right) \times 100\% \quad (5.2.5)$$

$$\text{Motling} = \sqrt{\frac{1}{v} \times \sum_{i=1}^n (w_i \times p_i)} \times 100\% \quad (5.2.6)$$

gde je:

$$v = \sum_{i=1}^n w_i$$

$w_i$  = težinski koeficijent

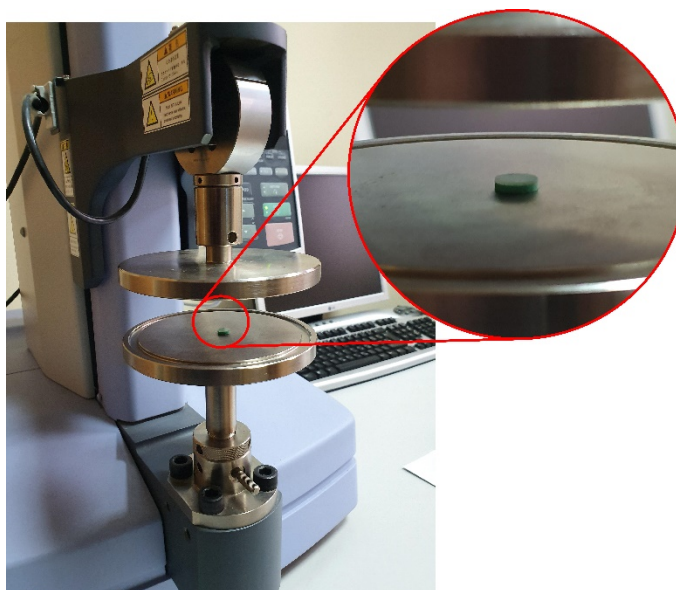
$p_i$  = pokrivenost površine izračunata sa pragom  $i$

$$\text{Pokrivenost} = \frac{\text{Zbir veličina svetlih površina}}{\text{Ukupan broj svetlih površina}} \quad (5.2.7)$$

$$\text{ISO 13660 zrnčavost} = \text{Standardna devijacija optičkih gustina} \quad (5.2.8)$$

### Ispitivanje mehaničkih svojstava slivova pri kompresiji

Test cikličnog kompresivnog opterećenja uzoraka (100 ciklusa) kombinovanog poliuretanskog kompresibilnog i samolepljivog sloja Twinlock® Medium slivova za potrebe druge faze eksperimenta vršen je pomoću univerzalnog uređaja Shimadzu Compact Tabletop EZ-LX. Merenja su vršena pri temperaturi vazduha od 23 °C i vlažnosti vazduha od 50 %. Korišćena je merna glava sa pragom od 2.5 kN, a brzina kretanja je bila podešena 15 mm/min. Test od 100 ciklusa je odabran na osnovu preliminarnog merenja gde je uočena stabilizacija većine relevantnih parametara između 30. i 40. ciklusa. Uzorci su između sabijajućih ploča postavljeni samolepljivim slojem na gore (slika 5.2.22). Orijentacija uzoraka je u skladu sa realnom upotrebom gde je od dva sloja koja sačinjavaju Twinlock® sloj, samolepljivi sloj prvi na frontu kontakta sa isporučiocima pritiska. Za potrebe testiranja podešavanje maksimalne deformacije je postavljeno na 25 %.



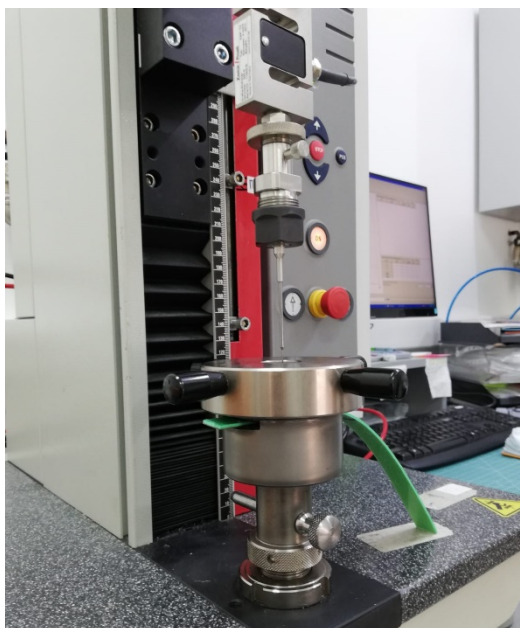
*Slika 5.2.22: Postavka uzorka u uređaju tokom testova pri cikličnim kompresivnim opterećenjima*

Test cikličnog kompresivnog opterećenja sa zadržavanjem minimalne i maksimalne deformacije u svakom ciklusu na 60s (5 ciklusa) je vršen pri istim uslovima i na istom broju uzoraka kao i test cikličnog kompresivnog opterećenja.

Rezultati testa su beleženi i naknadno obrađeni u softveru TrapeziumX gde su iscrtani i grafici napon-deformacija. Izlazni parametri testa su maksimalan napon pri cikličnim opterećenjima (do iste maksimalne deformacije), minimalna deformacija (do istog minimalnog napona), Jungov modul elastičnosti, histerezis gubici i grafički predstavljena relaksacija napona pri testovima sa zadržavanjem deformacije.

### Ispitivanje mehaničkih svojstava slivova pri testu probijanja iglom

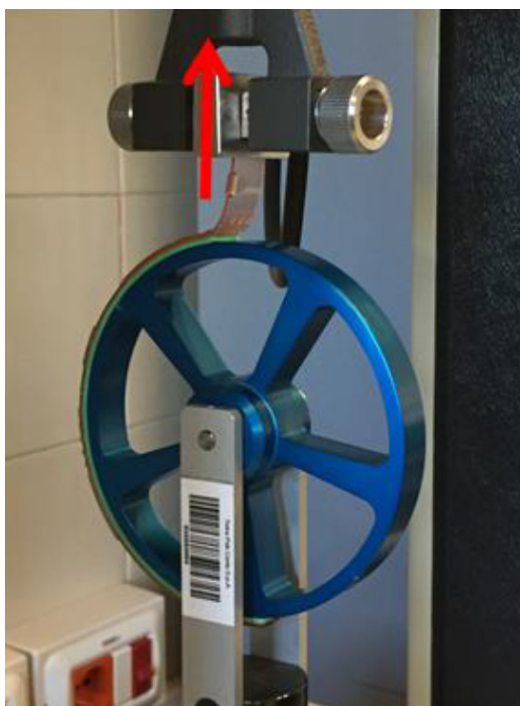
Test probijanja iglom je sproveden prema EN 14477 standardu [European Committee for Standardization, 2004] gde se meri otpornost materijala na probijanje iglom sa zašiljenim vrhom i osnovom prečnika 0.8 mm. Univerzalni uređaj na kom je vršeno testiranje je Zwick Roell zwickiLine 5 kN. Merenja su vršena probijanjem uzoraka sa strane adhezivnog sloja, a zatim i sa strane kompresibilnog sloja (slika 5.2.23).



*Slika 5.2.23: Postavka uzorka u uređaju tokom testa probijanja iglom*

### **Merenje adhezivnih svojstava slivova**

Za testiranje svojstava adhezije korišćen je univerzalni uređaj Zwick Roell zwickiLine 5 kN sa montiranim metalnim točkom (engl. German Wheel) na koji se lepi uzorak. Na točak se uprkos lepljivosti kompresibilne strane Twinlock® sloja prvo nanosi obostrano lepljiva traka pa se tek na nju lepi Twinlock® sloj kompresibilnim delom ka traci. Na prethodno pripremljenim uzorcima, nezalepljeni deo štamparske forme se zahvata čeljustima i vrši se pretestiranje do ostvarivanja ugla od 90° između dela štamparske forme zahvaćenog čeljustima i ostatka uzorka zalepljenog na metalni točak (slika 5.2.24). Brzina kretanja čeljusti iznosi 50 mm/min.



*Slika 5.2.24: Postavka uzorka u uređaju tokom testa odlepljivanja ljuštenjem*

### **Analiza sastava samolepljivog sloja slivova**

1  $\mu\text{L}$  prethodno pripremljenog rastvora, koji sadrži samolepljivi sloj slivova, se za GC/MS analizu ubrizgava u Agilent 6890 GC pećnicu spojenu sa 5975-N maseno selektivnim detektorom na nepolarnoj koloni (DB-5 MS, 30 m x 0.25 mm i 0.25  $\mu\text{m}$  debljine filma) u SCAN modu sa duplom determinacijom.

### **Analiza mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock<sup>®</sup> sloja slivova**

Isečeni uzorci debljine 10  $\mu\text{m}$  se postavljaju na staklenu pločicu na koju je prethodno naneta kap ulja, nakon čega su spremni za mikroskopsku analizu pomoću mikroskopa Olympus BX51 pod uvećanjem od 100x.

### **Merenje tvrdoće Twinlock<sup>®</sup> sloja slivova**

Merenje tvrdoće je vršeno prema standardu ASTM D2240-05 [ASTM International, 2005] sa modifikovanom debljinom uzorka koja iznosi 2 mm pomoću uređaja Sauter AGDA-100. Tvrdoća je merena kako sa strane kompresibilnog tako i sa strane samolepljivog sloja.



## 6 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

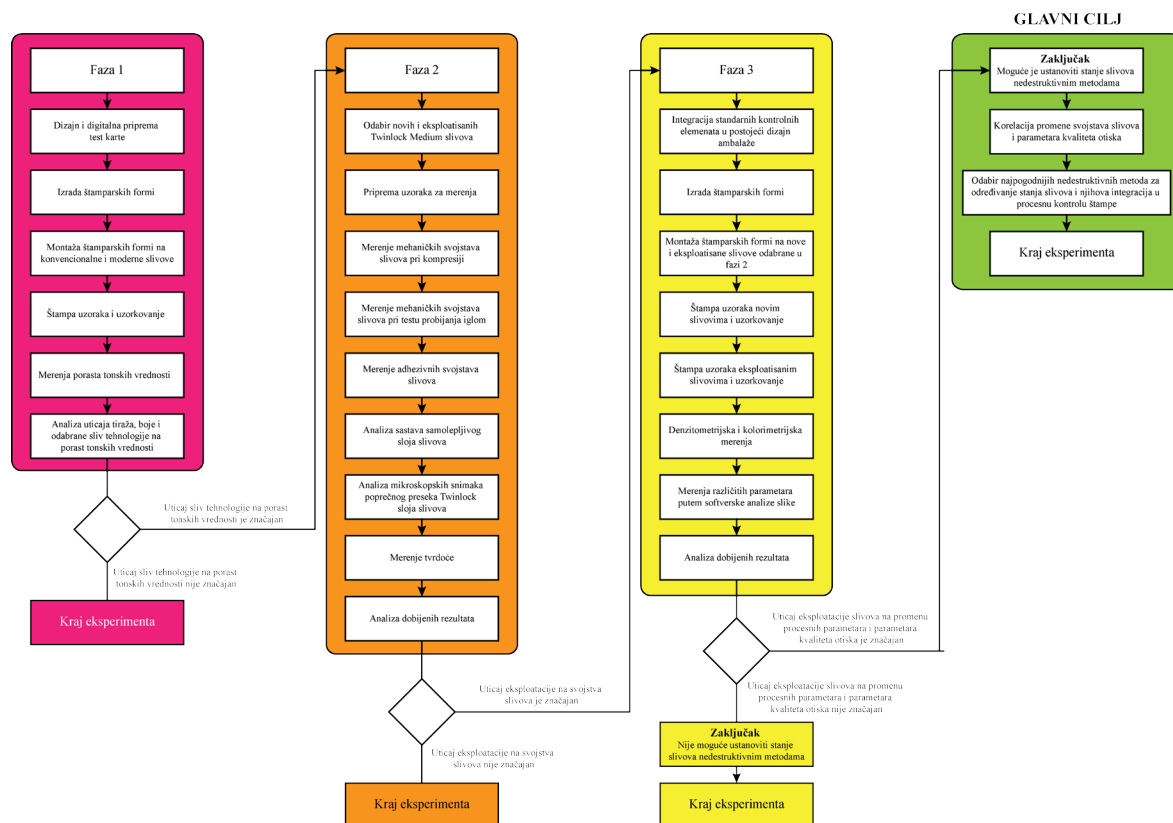
Pregledom aktuelne literature u oblasti istraživanja, kao i u srodnim oblastima, nameće se glavni cilj i nekoliko podciljeva. Glavni cilj istraživanja je pronalazak nedestruktivne metode provjere stanja slivova koju je moguće integrisati u procesnu kontrolu štampe, a njegovo ostvarivanje iziskuje podjelu eksperimenta u tri faze.

Prvom fazom eksperimenta realizuje se cilj determinisanja postojanja razlika između različitih sliv tehnologija, kao i intenziteta njihovog uticaja na kvalitet štampe putem porasta tonskih vrednosti u odnosu na druge uticajne parametre. Pronalaskom uticaja pristupa se narednim fazama eksperimenta, ispunjavanju narednih podciljeva i približavanju glavnom cilju.

Drugom fazom eksperimenta realizuje se cilj karakterizacije slivova, kao i uticaja eksploitanosti na njihova mehanička i adhezivna svojstva, sastav i strukturu. Ispunjavanjem cilja predviđenog drugom fazom eksperimenta otvara se putanja ka trećoj fazi eksperimenta.

Druga faza eksperimenta podrazumeva destruktivne metode karakterizacije slivova i određivanja njihovog stanja i nivoa eksploatacije. Da bi se prevazišao taj problem, razvijena je treća faza eksperimenta. Njenom realizacijom se dobijaju ključne informacije o uticaju nivoa eksploitanosti slivova na stabilnost procesnih parametara i promene parametara kvaliteta štampe.

Algoritam po kom je izvedeno istraživanje je prikazan na slici 6.1.



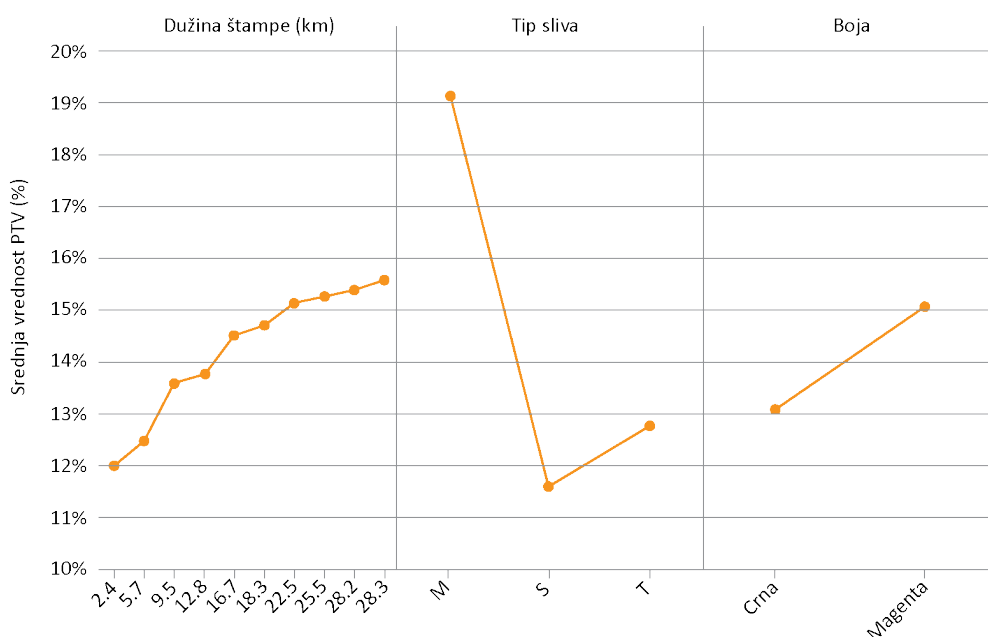
Slika 6.1: Algoritam izvođenja eksperimenta

## 6.1 Ispitivanje uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže

Pregledom aktuelnog stanja u oblasti istraživanja i pregledom postojećih tehnologija sliv nosioca flekso štamparskih formi ustanovljeno je da postoji potreba za upoređivanjem konvencionalnih sliv tehnologija sa novim, modernim sliv tehnologijama koje predstavljaju njihovu zamenu i rešenje za koje se odlučuje sve veći broj kompanija prisutnih na svetskom tržištu.

### 6.1.1 Porast tonских vrednosti na poljima od 4.3 % i 1.6 % tonских vrednosti

Na grafiku 6.1.1 dat je uporedni prikaz nivoa uticaja dužine štampe, tipa slivova i boje na kontrolno polje od 4.3 % TV.

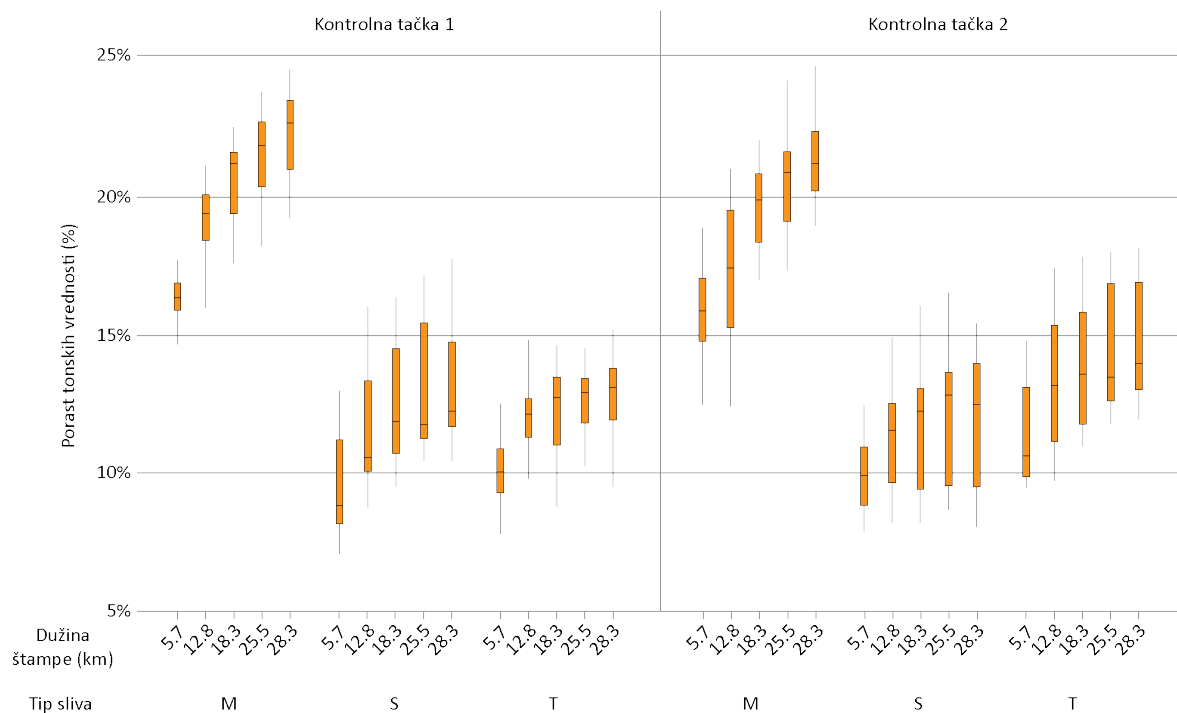


Grafik 6.1.1: Uporedni prikaz intenziteta uticaja parametara dužine štampe, tipa slivova i boje na porast tonских vrednosti na polju od 4.3 % TV

Očigledno je da dužina štampe ima uticaj na porast tonских vrednosti, međutim najznačajniji uticaj ipak ima sam tip sliva. Twinlock® Medium sliv pokazuje značajno veći porast tonских vrednosti u poređenju sa Twinlock® Soft slivom i tvrdim slivom sa 3M E1320H obostrano lepljivom trakom. Pored toga može se primetiti i da Twinlock® Soft sliv i tvrdi sliv sa obostrano lepljivom kompresibilnom trakom pokazuju veoma male razlike. Boja ima veoma mali uticaj na porast tonских vrednosti na kontrolnom polju.

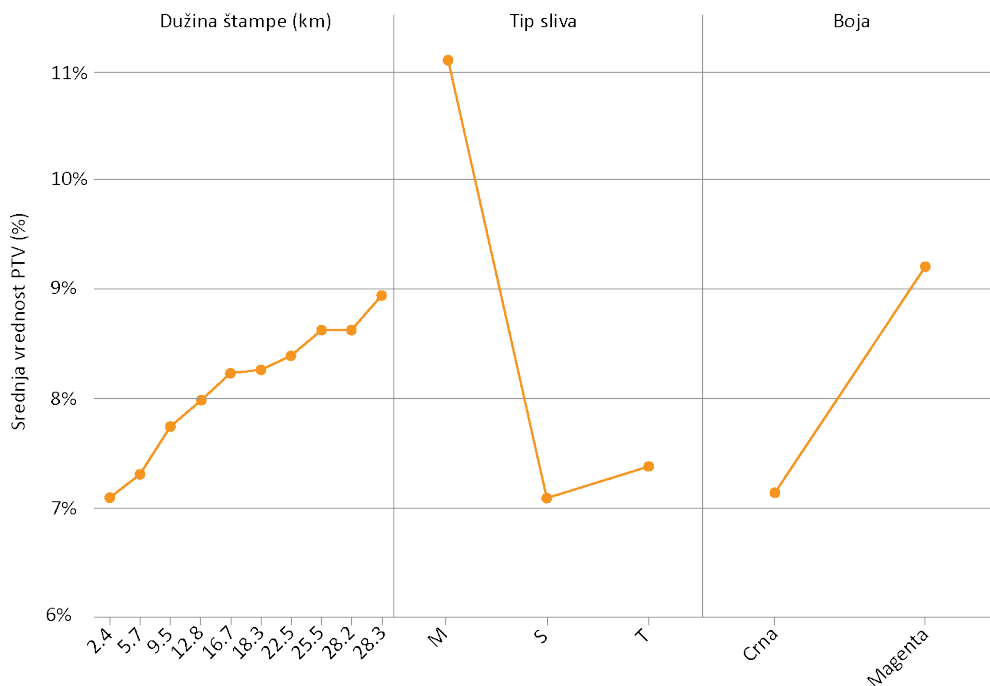
Na grafiku 6.1.2 dat je detaljniji prikaz merenja na polju od 4.3 % TV, za sve tipove slivova kroz celokupnu dužinu štampe. Za obe kontrolne tačke, Twinlock® Soft i tvrdi sliv sa kompresibilnom obostrano lepljivom trakom imaju sličan učinak. Kako upotrebom konvencionalnih tvrdih slivova, tako i upotrebom modernih Twinlock® slivova dolazi do porasta tonских vrednosti koji je pretežno u opsegu 12 % ± 3 %, što je prihvatljivo za uslove proizvodnje.





Grafik 6.1.2: Prikaz kombinovanog uticaj tipa sliva i dužine štampe na porast tonskih vrednosti na polju od 4.3 % TV

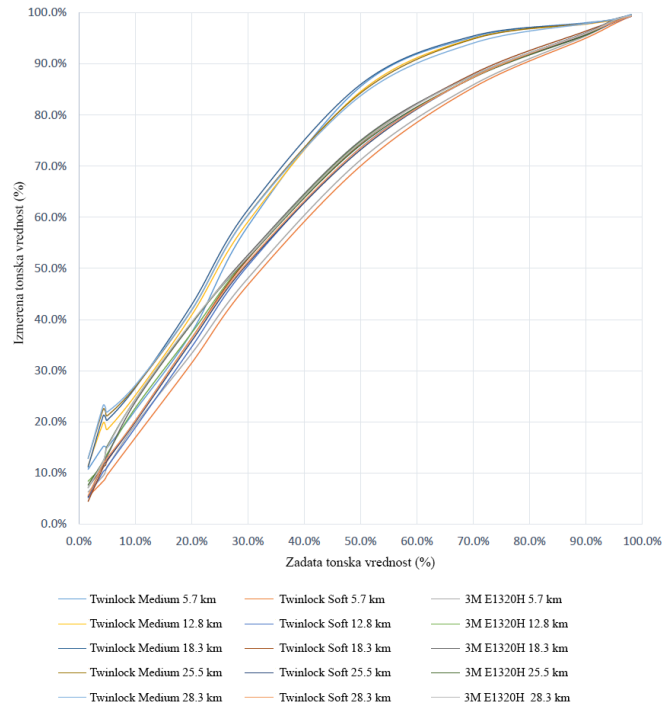
Na grafiku 6.1.3 dat je uporedni prikaz nivoa uticaja dužine štampe, tipa slivova i boje na kontrolno polje od 1.6 % TV štampano upotrebom FM rastriranja. Na ovom polju se dobijaju slični rezultati kao i na polju za 4.3 % TV dobijenom AM rastriranjem.



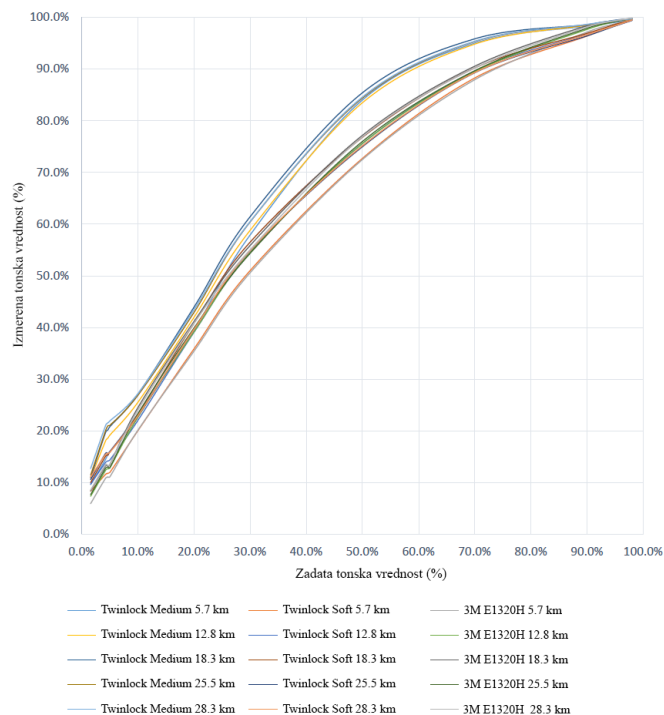
Grafik 6.1.3: Uporedni prikaz intenziteta uticaja parametara dužine štampe, tipa slivova i boje na porast tonskih vrednosti na polju od 1.6 % TV

U cilju poređenja razlika u porastima tonskih vrednosti izazvanim odabranim sliv tehnologijama, kao i određivanja nivoa uticaja dužine štampe na promenu porasta tonskih vrednosti za uzorke štampane različitim sliv tehnologijama izvršena su merenja tonskih vrednosti na tonskim klinovima i generisanje tonskih krivih.

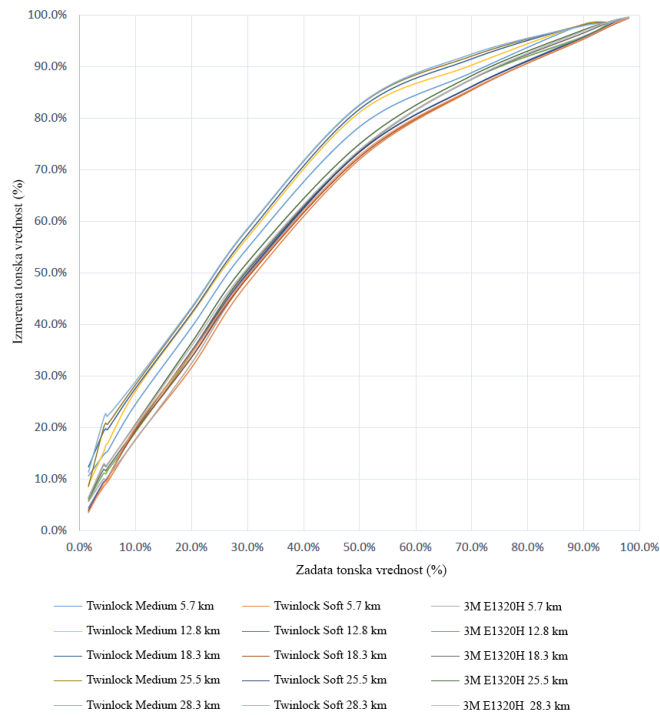
Na graficima 6.1.4 i 6.1.5 su prikazane tonske krive za ceo tonski opseg za crnu i magenta boju za kontrolnu tačku 1, a na slikama 6.1.6 i 6.1.7 su prikazane ekvivalentne krive za kontrolnu tačku 2.



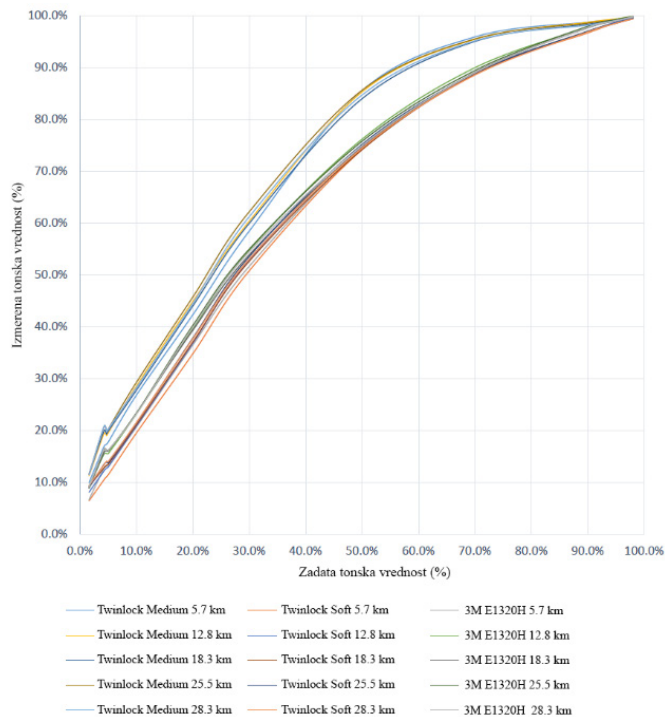
Grafik 6.1.4: Tonske krive za kontrolnu tačku 1 - Crna



Grafik 6.1.5: Tonske krive za kontrolnu tačku 1 - Magenta



Grafik 6.1.6: Tonske krive za kontrolnu tačku 2 - Crna

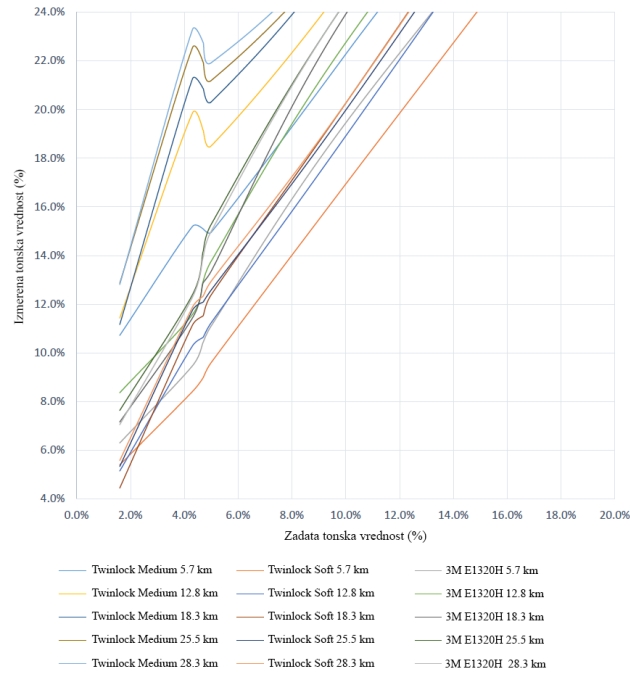


Grafik 6.1.7: Tonske krive za kontrolnu tačku 2 - Magenta

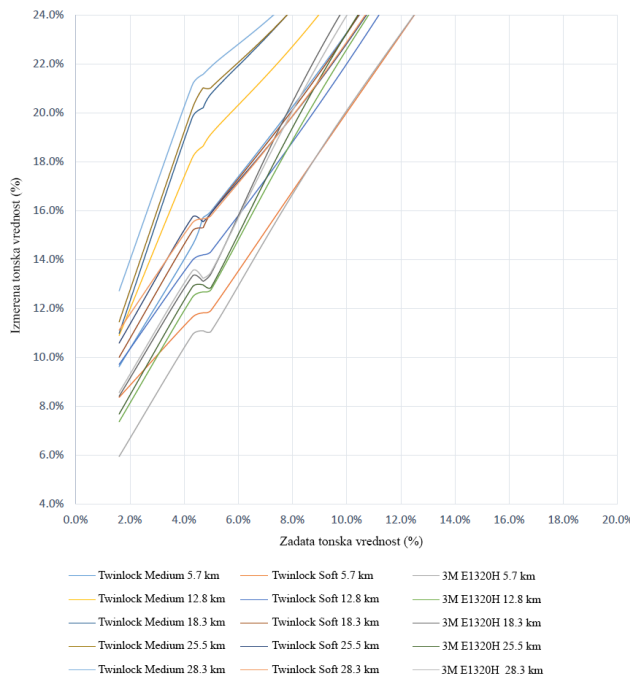
U svim slučajevima najznačajniji porast tonskih vrednosti i uticaj dužine štampe na porast tonskih vrednosti su prisutni na uzorcima štampanim upotrebom Twinlock® Medium slivova. Twinlock® Soft i standardni tvrdi sliv sa 3M E1320H obostrano lepljivom trakom pokazuju gotovo jednake poraste tonskih vrednosti kroz celokupnu dužinu štampe od 28.3 km.

Primećene razlike u intenzitetu porasta tonских vrednosti u oblasti srednjih tonova između kontrolnih tačaka za uzorke štampane Twinlock® Medium slivovima ukazuju na mogućnost postojanja promene procesnih parametara štampe ili svojstava štamparskih formi potencijalno izazvanih promenama svojstava slivova tokom prolongirane eksploatacije. Prethodna pretpostavka će biti razrađena merenjima u okviru druge i treće faze eksperimenta. Razlozi manjih promena u porastima tonских vrednosti za magenta boju između kontrolnih tačaka će takođe biti istraženi u okviru treće faze eksperimenta.

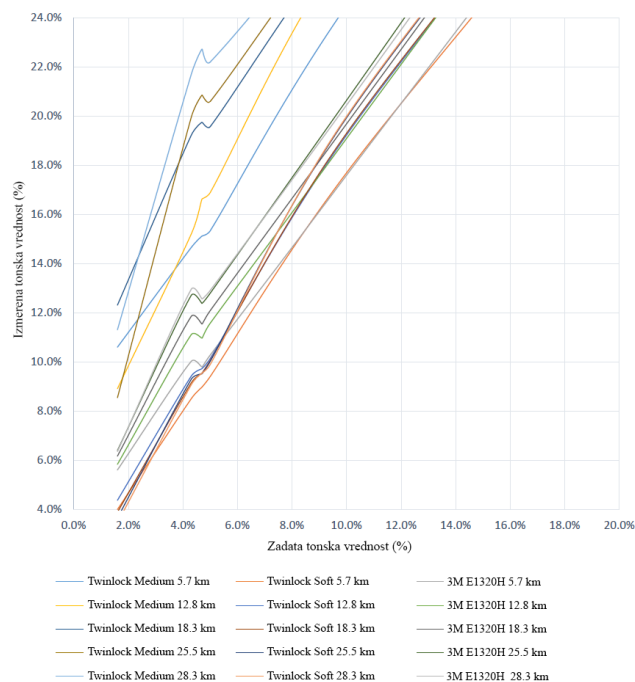
Na graficima 6.1.8 i 6.1.9 dat je detaljniji prikaz tonских krivih u oblasti najsvetlijih tonova za kontrolnu tačku 1, a na graficima 6.1.10 i 6.1.11 za kontrolnu tačku 2.



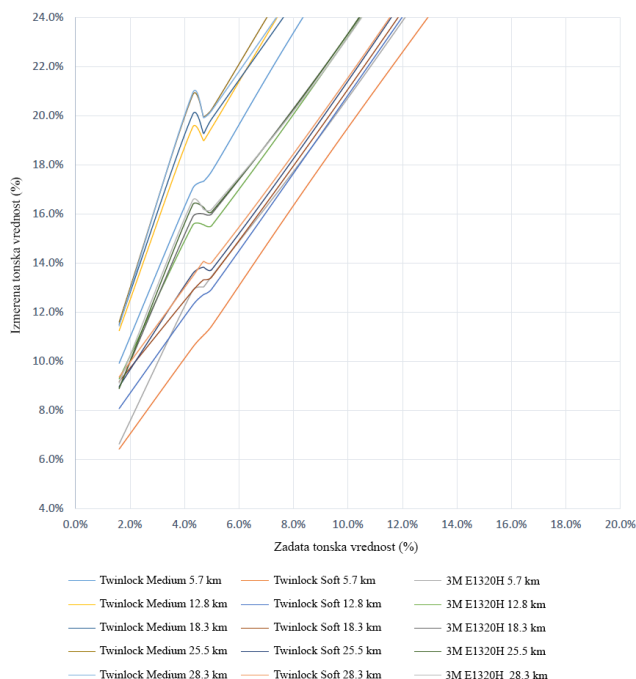
Grafik 6.1.8: Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 1 - Crna



Grafik 6.1.9: Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 1 - Magenta



Grafik 6.1.10: Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 2 - Crna



Grafik 6.1.11: Tonske krive u oblasti polja od 4.3 % TV za kontrolnu tačku 2 - Magenta

Porast tonskih vrednosti u srednjim tonovima je moguće lako kompenzovati tokom digitalne pripreme za štampu. Međutim, porast tonskih vrednosti u najsvetlijim tonovima dobijenim AM rastriranjem (4.3 % TV) je moguće kompenzovati samo upotrebom adekvatnih materijala za montažu štamparskih formi. Odnos između porasta tonskih vrednosti kontrolnim tačkama 1 i 2 za cijan i magenta boju i trendovi promena porasta tonskih vrednosti odgovaraju opservacijama načinjenim u oblastima srednjih tonova. Nagli pad porasta tonskih vrednosti na polju od 4.3 % TV odgovara trenutku prelaska sa FM na AM rastriranje. Uticaj eksploatacije na promene tonskih vrednosti tokom štampe će biti istražen tokom druge i treće faze eksperimenta.

## 6.2 Karakterizacija i uticaj nivoa eksploitanosti na svojstva slivova

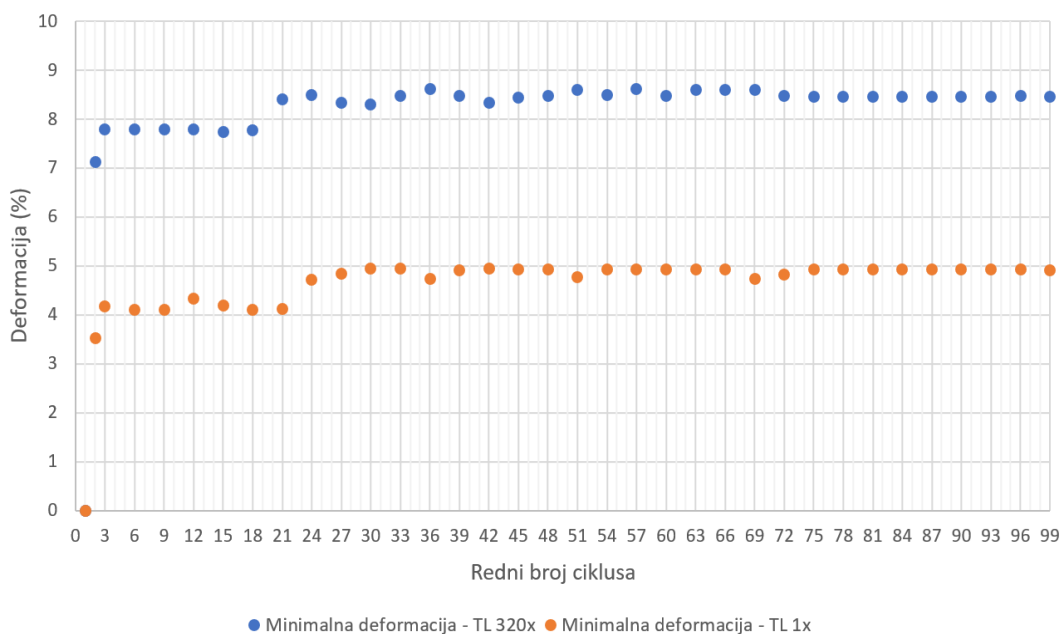
Usled nedostataka činjenica koje bi potkrepile zapažanja i objasnile pojave do kojih je došlo tokom prve faze eksperimenta, kao i pregledom relevantne literature, ustanovljeno je da postoji potreba za karakterizacijom slivova i definisanjem uticaja nivoa njihove eksploitanosti na svojstva.

Uprkos tome što na osnovu rezultata merenja parametara definisanih prvom fazom eksperimenta ne predstavlja najpogodniju zamenu za konvencionalne tvrde slivove sa kompresibilnom obostrano lepljivom trakom, Twinlock® Medium predstavlja odabranu sliv tehnologiju i tip sliva za potrebe narednih faza eksperimenta. Možda i najbitniji razlog zašto Medium grupa Twinlock® tehnologije slivova predstavlja izbor većine velikih kompanija prilikom prelaska sa konvencionalnih na moderne tehnologije je i pogodnost ovih slivova za štampu kombinacije motiva punih tonova i tonskih površina gde se svesno žrtvuje deo kvaliteta štampe u najsvetlijim tonovima. Rezultati narednih faza eksperimenta i primenjene metode bi trebalo da budu u potpunosti primenljivi za sve grupe Twinlock® tehnologije slivova, uz jedinu razliku u intenzitetu promena svojstava slivova nakon njihovog prethodnog izlaganja podjednakom nivou eksploatacije.

### 6.2.1 Mehanička svojstva slivova pri kompresiji

#### 6.2.1.1 Zaostatak deformacije

Zaostatak deformacije meren cikličnim testom kompresije od 100 ciklusa odgovara minimalnoj izmerenoj deformaciji, odnosno deformaciji koja odgovara minimalnom naponu krive rasterećenja koji se javlja u prelaznom momentu u novi ciklus. Na grafiku 6.2.1 su prikazana merenja zabeležena tokom prvih tri ciklusa, a nakon toga tokom svakog trećeg ciklusa. Prva tri ciklusa su zabeležena zato što se tokom njih dešavaju najveće promene, odnosno najveća razlika nastaje između prvog i drugog ciklusa, nakon čega započinje period stabilizacije. Do gotovo potpune stabilizacije većine relevantnih parametara dolazi već nakon 40. ciklusa.

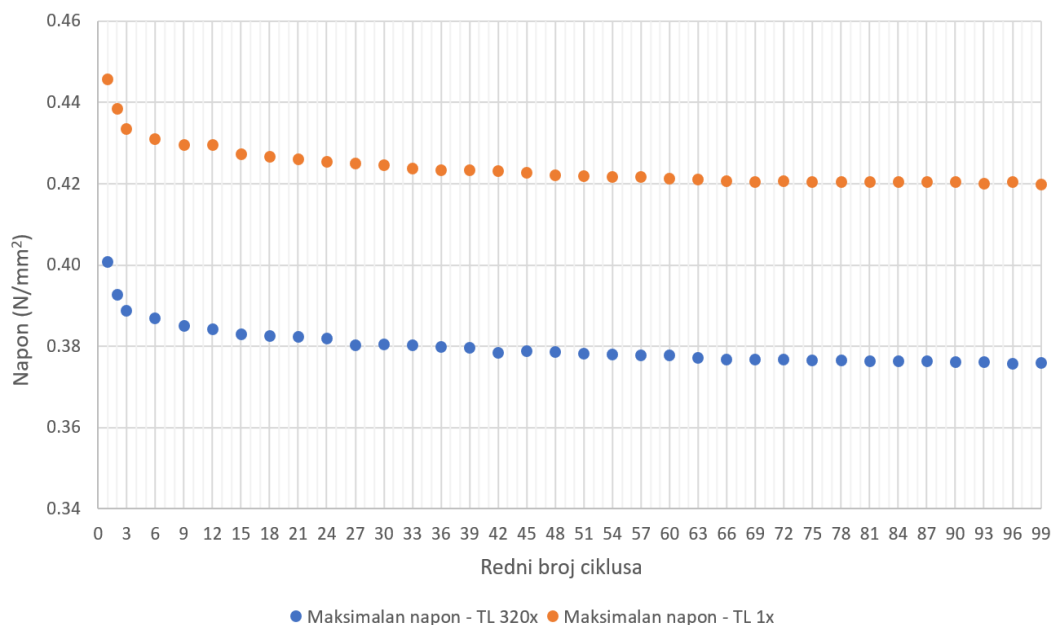


Grafik 6.2.1: Promene vrednosti zaostatka deformacije tokom cikličnih opterećenja slivova

Na grafiku 6.2.1 prikazane su vrednosti zaostatka deformacije pri promeni ciklusa. Trend promene je većinski isti za slivove oba nivoa eksploitisanosti. Međutim, pojedinačne vrednosti se razlikuju gotovo dvostruko, sa malim smanjenjem razlike nakon 24. ciklusa. Prvi veći porast deformacije nakon 3. ciklusa se dešava između 20. i 25. ciklusa. Kod 320x slivova porast nastaje nešto ranije (21. ciklus), ali je nešto manji od porasta 1x slivova koji se javlja tokom 24. ciklusa. Nakon trećeg većeg porasta zaostatka deformacije (20-25 ciklus), dolazi do stabilizacije sa manjim oscilacijama koje su nešto приметnije kod 320x slivova. Procenat zaostatka deformacije već nakon drugog ciklusa kod 320x slivova je gotovo 50 % veći od zaostatka deformacije 1x slivova u 99. ciklusu.

### 6.2.1.2 Maksimalan napon

Maksimalan napon meren cikličnim testom kompresije od 100 ciklusa odgovara maksimalnoj zadatoj deformaciji, odnosno deformaciji koja odgovara piku krive opterećenja. Na grafiku 6.2.2 su prikazana merenja zabeležena tokom prvih tri ciklusa, a nakon toga tokom svakog trećeg ciklusa. Razlog odabira prikazanih ciklusa je isti kao i u slučaju merenja zaostatka deformacije.



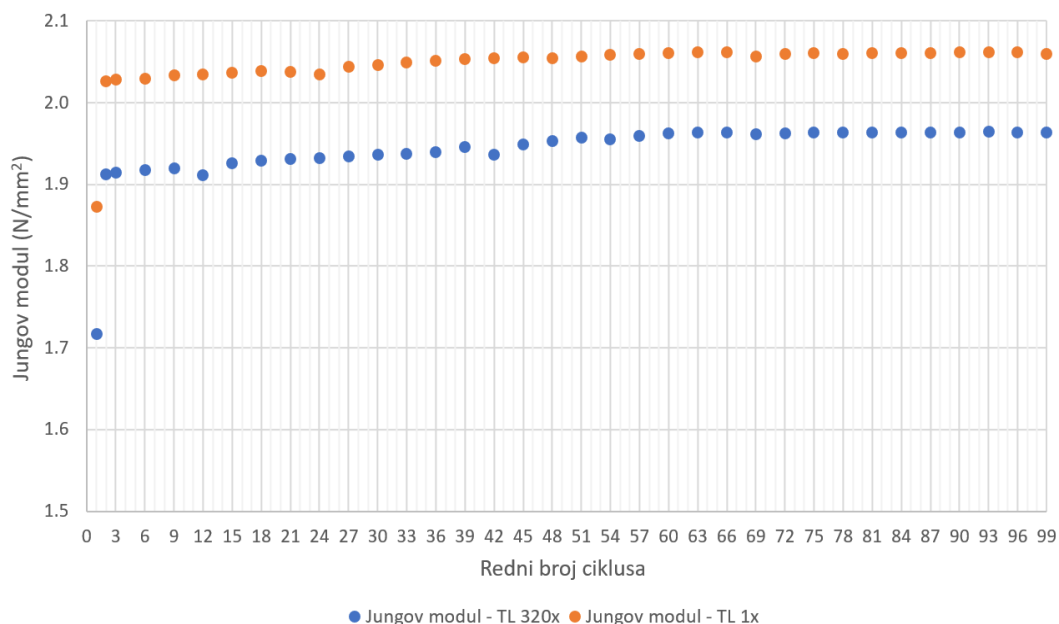
Grafik 6.2.2: Promene vrednosti maksimalnog napona tokom cikličnih opterećenja slivova

Na grafiku 6.2.2 se jasno vidi opadajući trend promene maksimalnog napona za obe grupe uzoraka. Iako prisutne na drugoj decimali, razlike u maksimalnom naponu su приметne i iznose oko 10 %. Maksimalan napon 1x slivova je nešto više od 10 % veći od maksimalnog napona za isti ciklus kod 320x slivova. Ta inicijalna razlika u maksimalnom naponu pri zadatoj maksimalnoj deformaciji je zadržana kroz sve cikluse. Najveći pad maksimalnog napona se beleži tokom prvih tri ciklusa, a za postizanje iste vrednosti pada napona nakon prvih tri ciklusa je potrebno još 67 ciklusa. Stabilizacija napona je za obe grupe uzoraka zabeležena tokom 70. ciklusa odakle do 99. ciklusa napon održava konstantnu srednju vrednost, uz manje oscilacije vrednosti za pojedinačne cikluse koje su za obe grupe uzoraka podjednako izražene.



### 6.2.1.3 Jungov modul elastičnosti

Jungov modul elastičnosti meren cikličnim testom kompresije od 100 ciklusa odgovara nagibu početnog dela krive opterećenja ciklusa. Na grafiku 6.2.3 su prikazana merenja zabeležena tokom prva tri ciklusa, a nakon toga tokom svakog trećeg ciklusa. Razlog odabira prikazanih ciklusa je isti kao i u slučaju merenja zaostatka deformacije i maksimalnog napona.



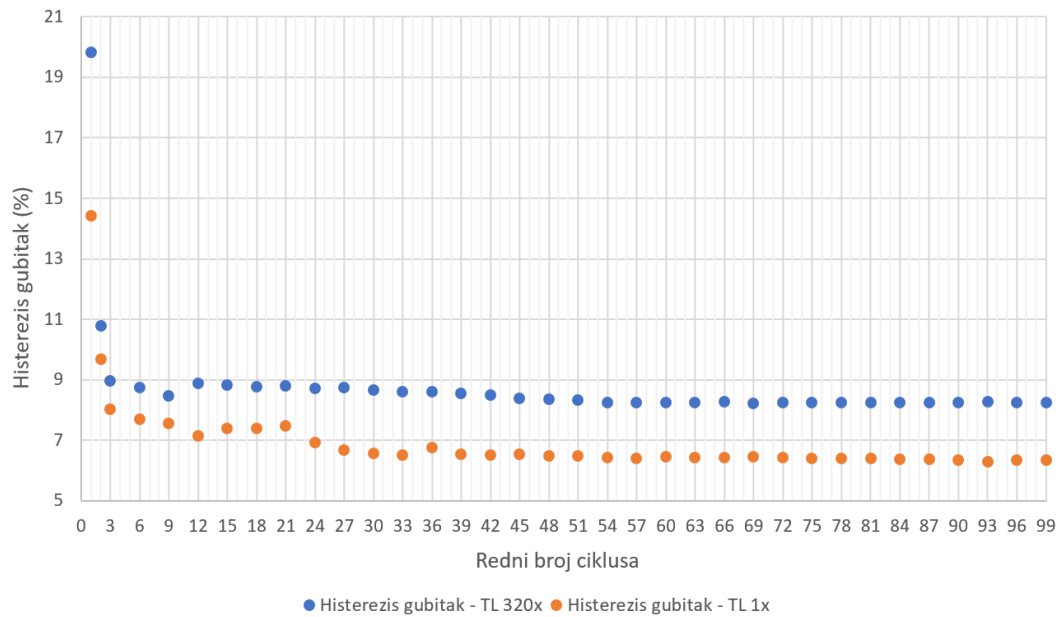
Grafik 6.2.3: Promene vrednosti Jungovog modula elastičnosti tokom cikličnih opterećenja slivova

Na grafiku 6.2.3 se može primetiti da je promena Jungovog modula elastičnosti kroz cikluse relativno mala sa primetnim rastućim trendom i stabilizacijom koji odgovaraju promenama zaostatka deformacije. Inicijalna razlika u modulu elastičnosti opada kroz cikluse. Najveća promena modula se dešava nakon prvog ciklusa odakle su promene manje primetne. Stabilizacija je izraženija u slučaju 1x slivova i nastaje u oblasti 40. ciklusa, dok za 320x korišćene slivove do stabilizacije dolazi oko 10 ciklusa kasnije uz neznatno veće oscilacije u odnosu na 1x slivove.

Kako Jungov modul raste, tako se materijal više opire deformaciji. Nagib krive napon-deformacija se menja usled zaostatka deformacije, odnosno nakon prvog ciklusa u proračun Jungovog modula nije uključeno prvih par procenata deformacije materijala gde su potrebne manje sile.

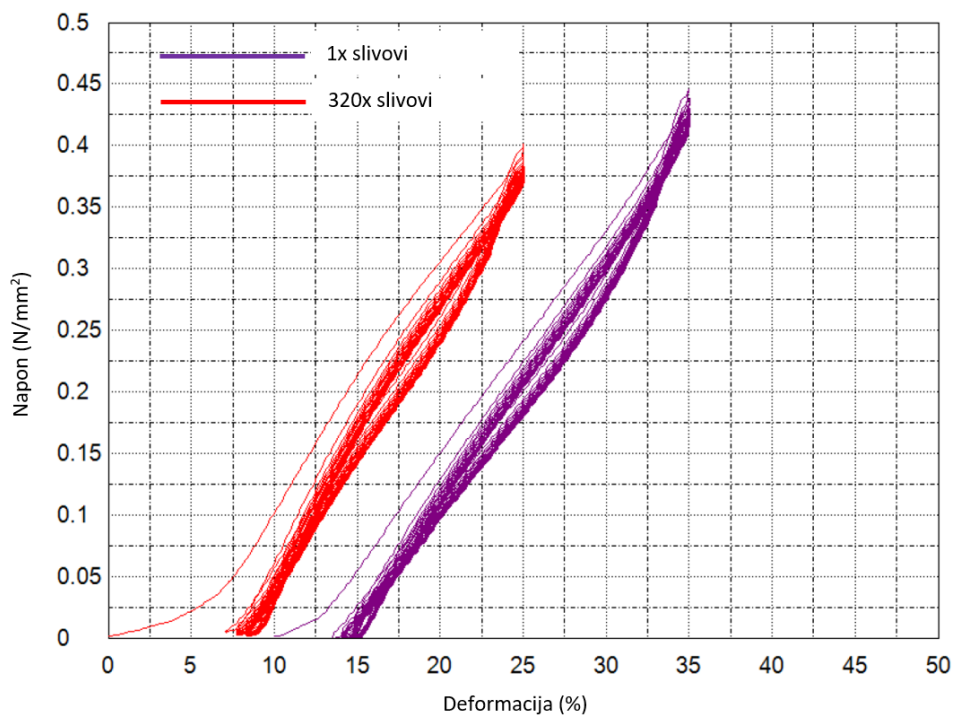
### 6.2.1.4 Histerezis gubitak

Histerezis gubitak meren cikličnim testom kompresije od 100 ciklusa odgovara površini zatvorenoj krivama opterećenja i rasterećenja posmatranog ciklusa. Na grafiku 6.2.4 su prikazana merenja zabeležena tokom prva tri ciklusa, a nakon toga tokom svakog trećeg ciklusa. Razlog odabira prikazanih ciklusa je isti kao i u slučaju prethodnih testova.



Grafik 6.2.4: Promene vrednosti histerezis gubitka tokom cikličnih opterećenja slivova

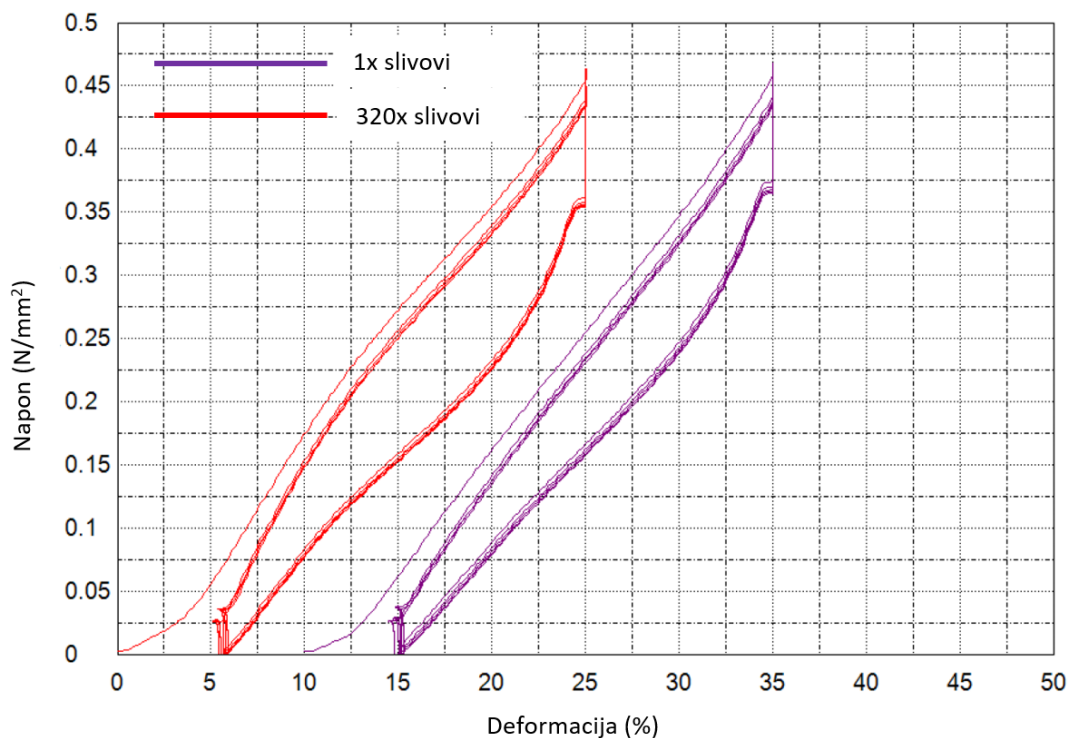
Na osnovu grafika 6.2.4, za histerezis gubitak izražen u procentima se beleži opadajući trend uz par oscilacija do kojih dolazi pre stabilizacije minimalne deformacije i maksimalnog napona krivih napon-deformacija prikazanih na grafiku 6.2.5. Najveći pad gubitka, a i razlike gubitaka je zabeležen između prvog i drugog ciklusa, što odgovara zatvaranju histerezis petlje koje nastaje u drugom ciklusu. Sledeći veći pad gubitka, sa neznatnom promenom razlike odgovara trećem ciklusu što je u skladu sa promenama zaostatka deformacije kroz cikluse, ali recipročno. Između 3. i 20. ciklusa su primetne oscilacije, pogotovu u slučaju 1x slivova, što je ponovo u skladu sa promenama zaostatka deformacije. Nakon 20. ciklusa nastavlja se uravnotežen pad histerezis gubitaka, koji se za obe grupe uzoraka stabilizuje oko 55. ciklusa.



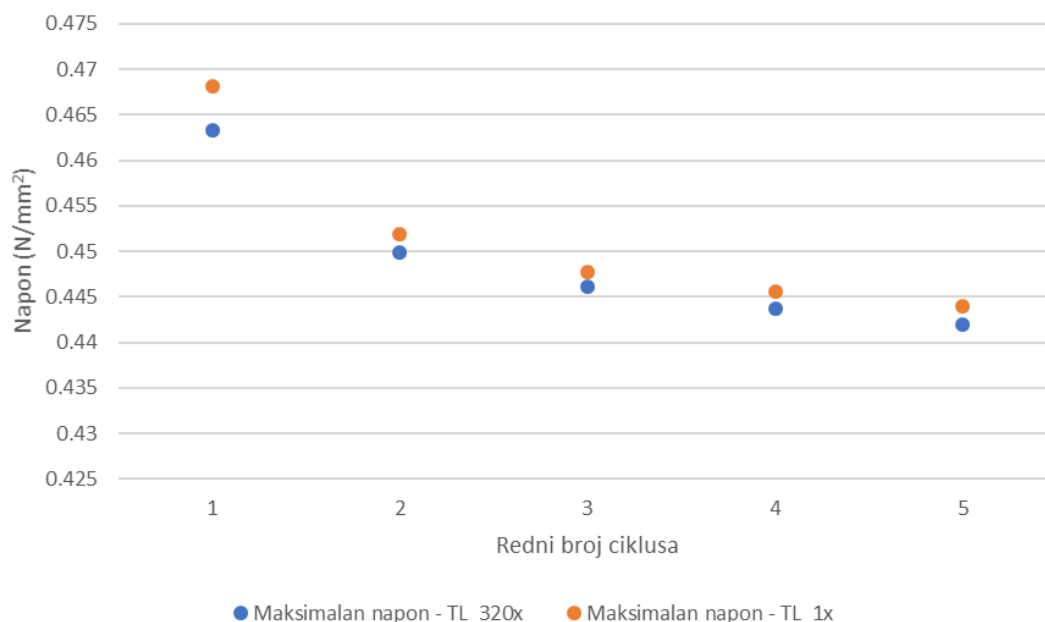
Grafik 6.2.5: Histerezis petlje slivova tokom cikličnih opterećenja

### 6.2.1.5 Relaksacija napona i histerezis gubitak pri kompresiji sa zadržavanjem deformacije

Tokom izvođenja cikličnog testa opterećenja uz zadržavanje deformacije iscertan je grafik 6.2.6 gde su prikazane krive opterećenja i rasterećenja svih 5 ciklusa. Pored toga na graphicima 6.2.7 i 6.2.8. su prikazani trendovi promena maksimalnog napona i histerezis gubitaka.



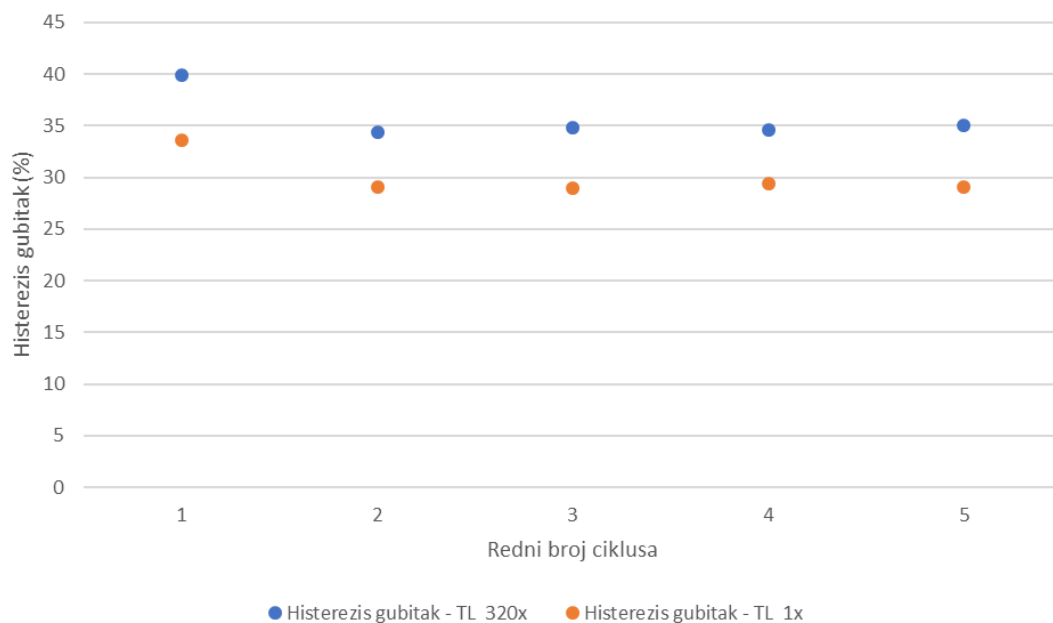
Grafik 6.2.6: Histerezis petlje slivova tokom cikličnih opterećenja uz zadržavanje deformacije



Grafik 6.2.7: Promene vrednosti maksimalnog napona tokom cikličnih opterećenja slivova uz zadržavanje deformacije

Na osnovu grafika 6.2.7, primetan je trend smanjenja maksimalnog napona, kao i konstantnost relativno male razlike između maksimalnih napona uzoraka iz različitih grupa. Međutim, za razliku od maksimalnog napona, vrednosti napona nakon zadržavanja deformacije u trajanju od 60 s pokazuju veću razliku (grafik 6.2.6). 1x slivovi doživljavaju manju relaksaciju napona od 320x slivova. Prilikom zadržavanja minimalne deformacije 1x slivovi pokazuju neznatno veći rast napona od 320x slivova. Kod 320x slivova je pri početku faze rasterećenja primetan veći pad napona sa manjom promenom deformacije. Kod 1x slivova pad napona pri rasterećenju je ujednačen na celoj krivoj i manji je od pada napona kod 320x slivova.

Na grafiku 6.2.8 su predstavljene promene vrednosti histerezis gubitaka pri testu kompresivnog opterećenja uz zadržavanje deformacije.

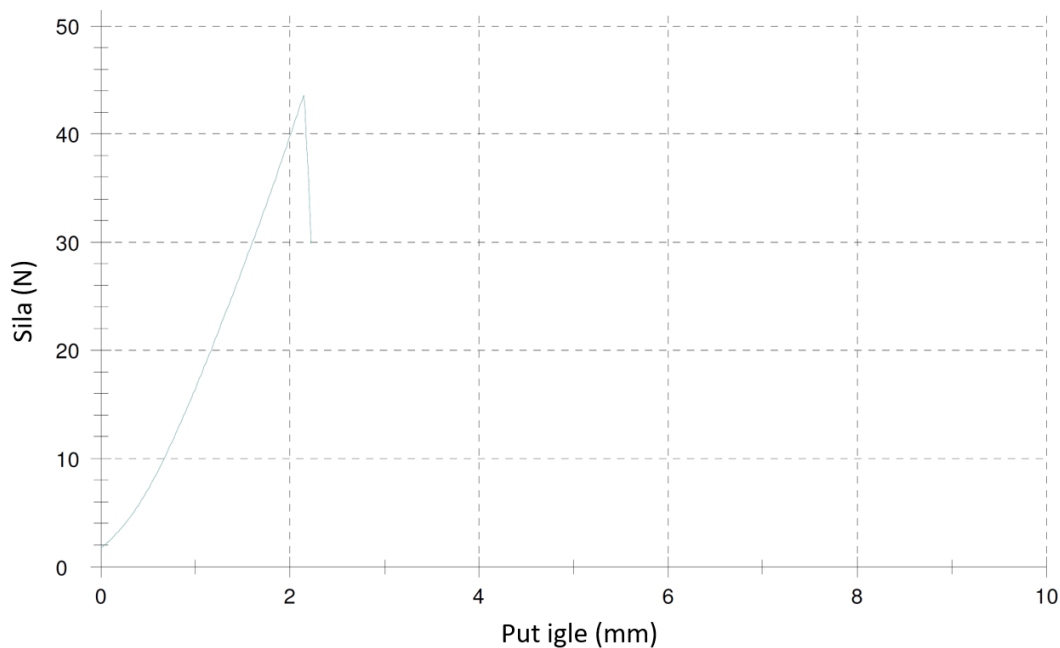


*Grafik 6.2.8: Promene vrednosti histerezis gubitka tokom cikličnih opterećenja slivova uz zadržavanje deformacije*

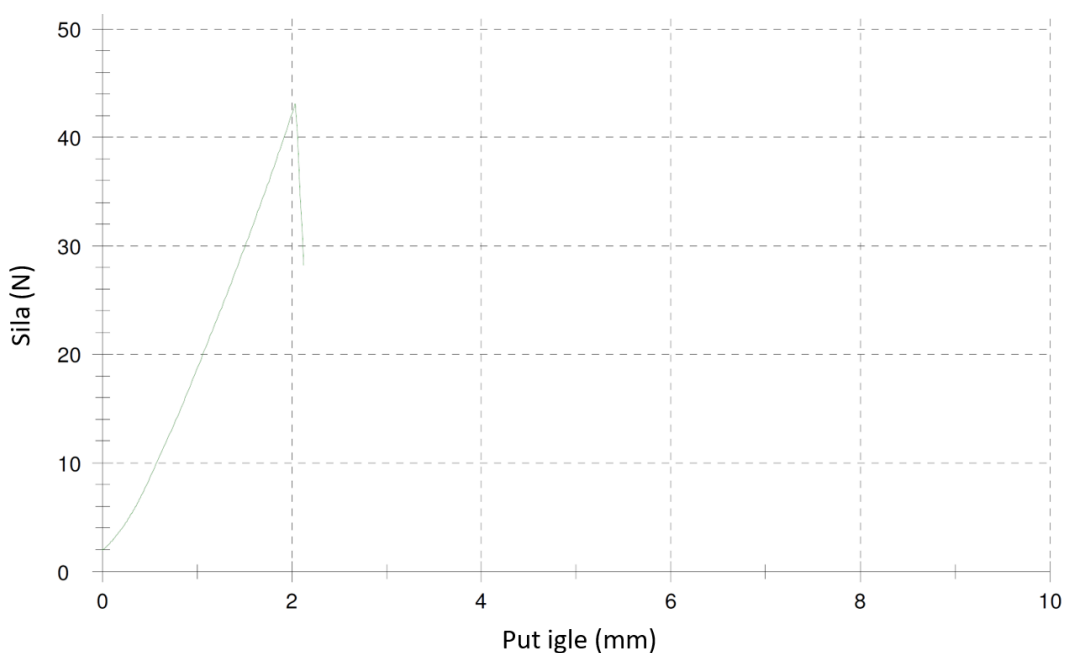
Trend promena vrednosti na grafiku 6.2.8 je sličan trendu primećenom na grafiku 6.2.4 koji odgovara cikličnom testu kompresije bez zadržavanja deformacije. Pad histerezisa nakon prvog ciklusa u slučaju 320x slivova je primetan, ali manje izražen od odgovarajućeg pada na grafiku 6.2.4. Istovremeno, razlika u histerezis gubicima je veća i stabilnija od one u cikličnom testu kompresivnog opterećenja bez zadržavanja deformacije.

## 6.2.2 Mehanička svojstava slivova pri testu probijanja iglom

Reprezentativne krive sila-put igle za uzorke merene sa strane samolepljivog sloja za 1x i 320x slivove su prikazane na graficima 6.2.9 i 6.2.10 respektivno, a srednje vrednosti za test relevantnih parametara u tabelama 6.2.1 i 6.2.2 takođe respektivno.



Grafik 6.2.9: Kriva sila-put ige 1x sliva merena sa strane samolepljivog sloja



Grafik 6.2.10: Kriva sila-put ige 320x sliva merena sa strane samolepljivog sloja

Tabela 6.2.1: Srednje vrednosti parametara testa probijanja 1x slivova sa strane samolepljivog sloja

Debljina uzorka	Fmax	Fmax	pFmax	WFmax
2 mm	43.58 N	21.79 N/mm	2.14 mm	41.56 mJ

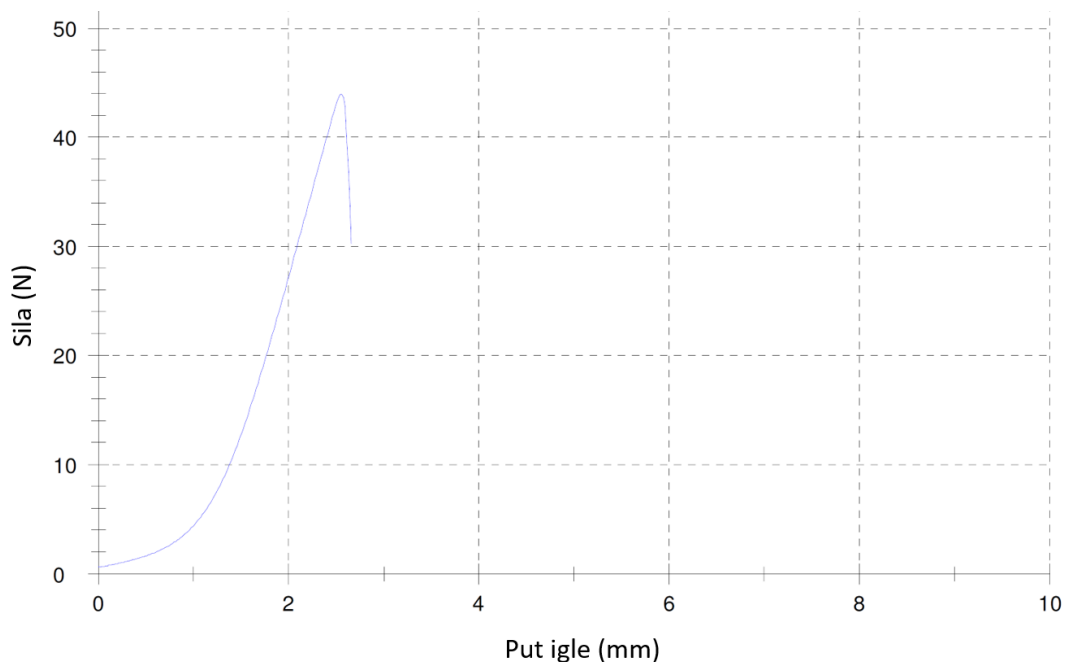
Tabela 6.2.2: Srednje vrednosti parametara testa probijanja 320x slivova sa strane samolepljivog sloja

Debljina uzorka	Fmax	Fmax	pFmax	WFmax
1.95 mm	43.13 N	22.12 N/mm	2.04 mm	40.85 mJ

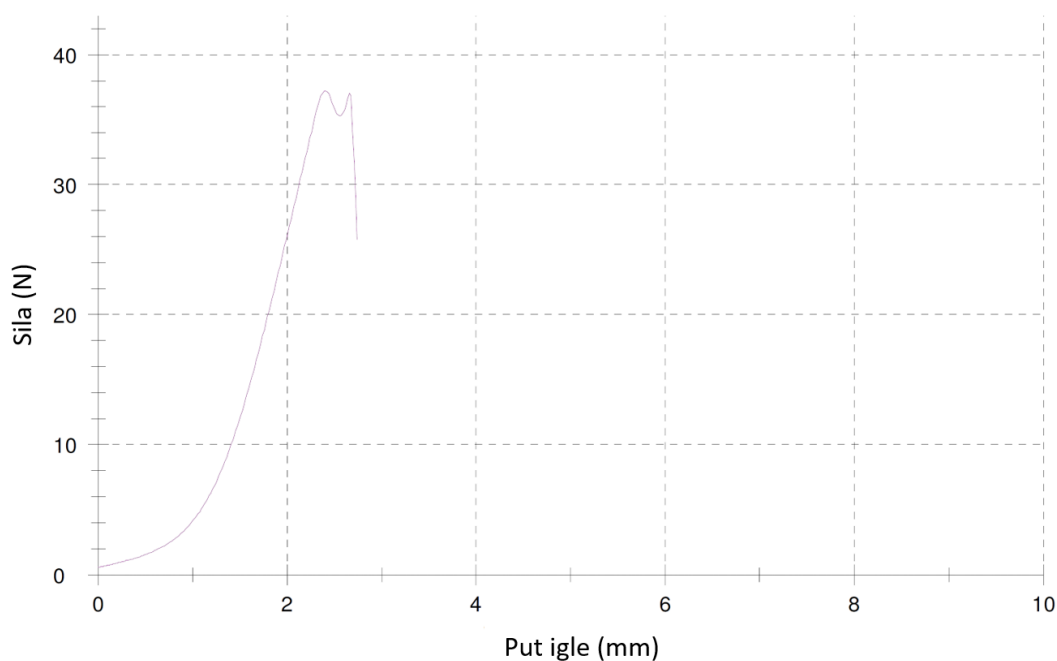
Poređenjem grafika se dolazi do zaključka da kriva sila-put igle prati istu putanju, izuzev što je u slučaju 1x slivova put igle do maksimalne sile nešto veći. To je i očekivano jer je i uzorak 50  $\mu\text{m}$  deblji.

Srednje vrednosti relevantnih parametara pokazuju da pri merenju sa strane samolepljivog sloja gotovo da nema razlike u otpornosti na probijanje i radu potrebnom da igla savlada otpor materijala.

Na graficima 6.2.11 i 6.2.12 su prikazane krive sila-put igle za 1x i 320x slivove respektivno, merene sa strane kompresibilnog poliuretanskog sloja. U tabelama 6.2.3 i 6.2.4 su prikazane srednje vrednosti za merenje relevantnih parametara.



*Grafik 6.2.11: Kriva sila-put igle 1x sliva merena sa strane kompresibilnog sloja*



*Grafik 6.2.12: Kriva sila-put igle 320x sliva merena sa strane kompresibilnog sloja*

Tabela 6.2.3: Srednje vrednosti parametara testa probijanja 1x slivova sa strane kompresibilnog sloja

Debljina uzorka	Fmax	Fmax	pFmax	WFmax
2 mm	43.93 N	21.97 N/mm	2.54 mm	35.18 mJ

Tabela 6.2.4: Srednje vrednosti parametara testa probijanja 320x slivova sa strane kompresibilnog sloja

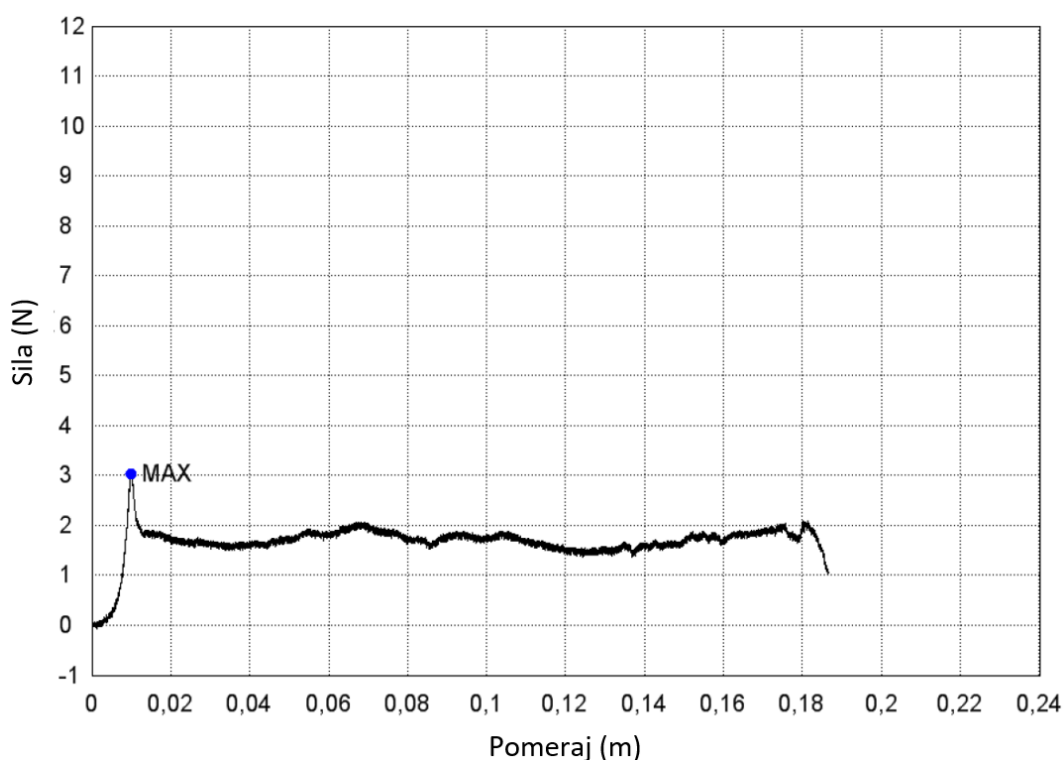
Debljina uzorka	Fmax	Fmax	pFmax	WFmax
1.95 mm	36.16 N	18.54 N/mm	2.28 mm	25.78 mJ

Kriva sila-put igle za 1x sliv prati istu putanju kao kriva istog sliva pri merenju sa strane samolepljivog sloja. Razlika je u putu igle koji je u slučaju merenja sa kompresibilne strane nešto veći. Međutim, kriva 320x sliva ima karakterističan deo gde sila opada, a potom ponovo raste (pri stupanju u kontakt sa samolepljivim slojem) ukazujući tako na promenu svojstava kompresibilnog sloja.

Poređenjem srednjih vrednosti relevantnih parametara, očigledno je da je maksimalna sila 320x sliva manja, kao i put igle, međutim i uzorak je tanji. Rad potreban da igla savlada otpor kojim se materijal suprotstavlja njenom kretanju je manji u slučaju 320x slivova.

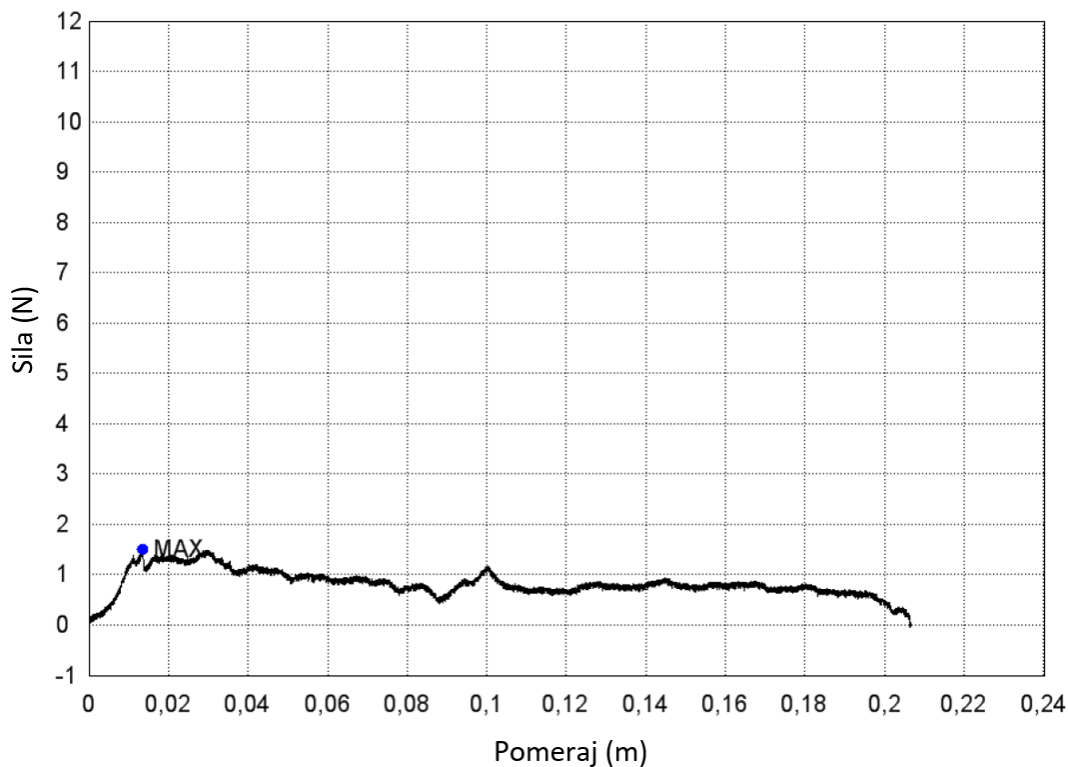
### 6.2.3 Adhezivna svojstva slivova

Na graficima 6.2.13 i 6.2.14 su date tipične krive sila-pomeraj za uzorak uzet sa 1x i 320x slivova, respektivno. U tabelama 6.2.5 i 6.2.6 su prikazane vrednosti maksimalne i srednje sile, izračunate kao srednje vrednosti istih veličina izmerenih na po 5 uzoraka. Srednja vrednost jačine adhezije je izračunata deljenjem srednje vrednosti sile sa širinom uzorka.



Grafik 6.2.13: Kriva sila-pomeraj dobijena testom odlepljivanja ljuštenjem za 1x slivove





Grafik 6.2.14: Kriva sila-pomeraj dobijena testom odlepljivanja ljuštenjem za 320x slivove

Tabela 6.2.5: Srednje vrednosti parametara testa odlepljivanja ljuštenjem za 1x slivove

Maksimalna sila	Srednja vrednost sile	Jačina adhezije
3.035 N	1.72341 N	114.894

Tabela 6.2.6: Srednje vrednosti parametara testa odlepljivanja ljuštenjem za 320x slivove

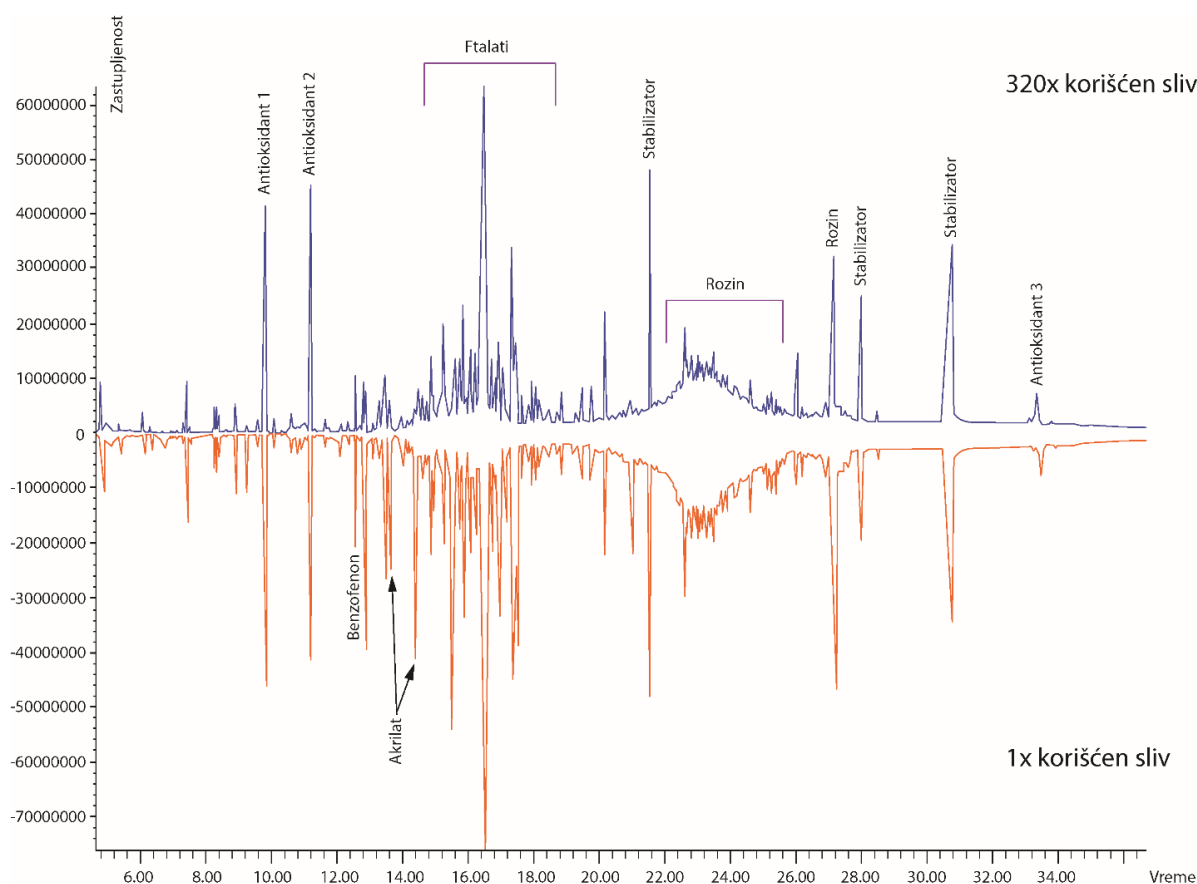
Maksimalna sila	Srednja vrednost sile	Jačina adhezije
1.59844 N	0.82917 N	55.2780

Poređenjem grafika 6.2.13 i 6.2.14 se vidi da je sila pri kojoj započinje odlepljivanje (maksimalna sila) skoro dvostruko veća u slučaju 1x slivova. Pomeraj pri kom počinje odlepljivanje je sličan, kao i oblik krive sila-pomeraj nakon pada sile inicijacije odlepljivanja koji je u slučaju 320x slivova daleko manje izražen. Krive su uslovno rečeno paralelne i kroz ceo test zadržavaju inicijalnu dvostruku razliku u sili odlepljivanja. Po pitanju pojava manjih pikova i dolja, odnosno oscilacija u sili pri određenim pomerajima, uočljivo je da je kriva sila-pomeraj 320x slivova manje uniformna.

Razlike u srednjim vrednostima sila potvrđuju uočene razlike u krivama sila-pomeraj 1x i 320x slivova, što se odražava i na razliku jačine adhezije.

#### 6.2.4 Sastav samolepljivog sloja slivova

Razlike u sastavu samolepljivog sloja slivova se mogu videti na grafiku 6.2.15 gde su prikazani GCMS hromatogrami 1x i 320x slivova.



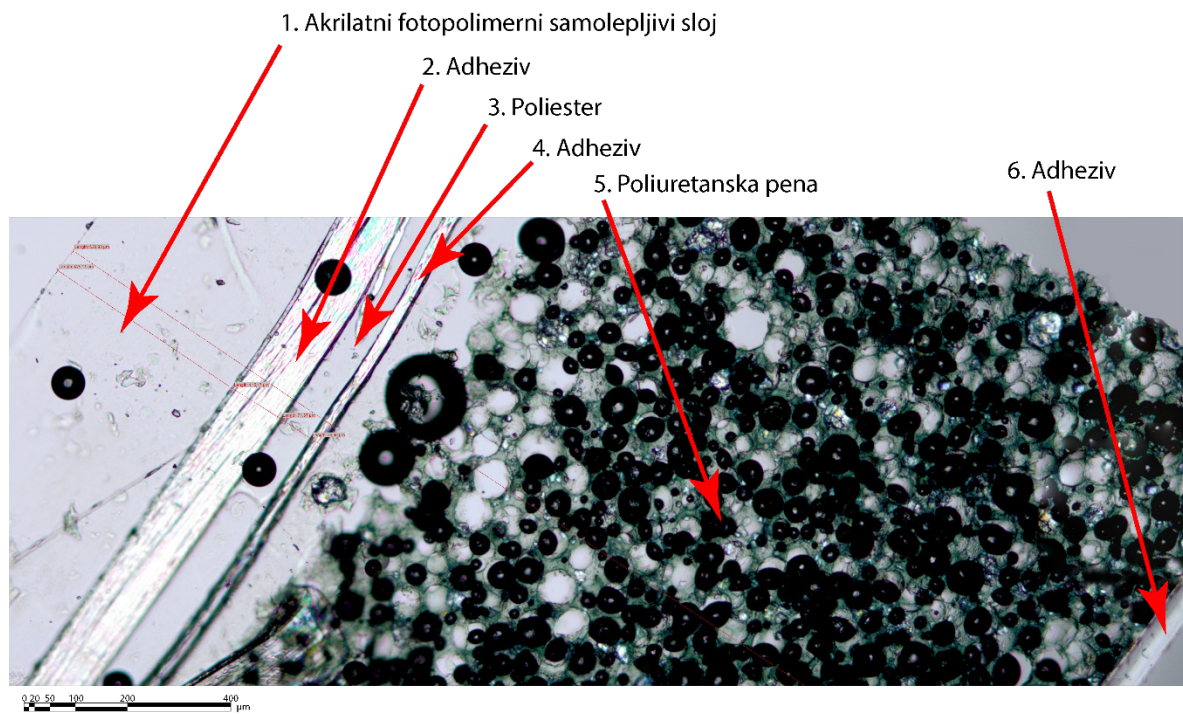
Grafik 6.2.15: Uporedni prikaz GCMS hromatograma samolepljivog sloja 1x i 320x slivova

Na GCMS hromatogramima preovladavaju signali antioksidanata, akrilata, ftalata, komponenta rozina, stabilizatora i fotoinicijatora (benzofenon). Većina signala nije u potpunosti identifikovana, ali činjenica je da pokazuju jaku strukturnu povezanost sa akrilatima i ftalatima i komponentama rozina. Kako je hromatogram prezasićen signalima, kvantifikacija nije moguća jer interni standardi nisu vidljivi upravo usled prevelikog šuma informacija. Međutim, moguće je poređenjem hromatograma, njihovih pikova i površina zahvaćenih pikovima ustanoviti kakve su promene nastupile, kod kojih komponentata i u kolikoj meri.

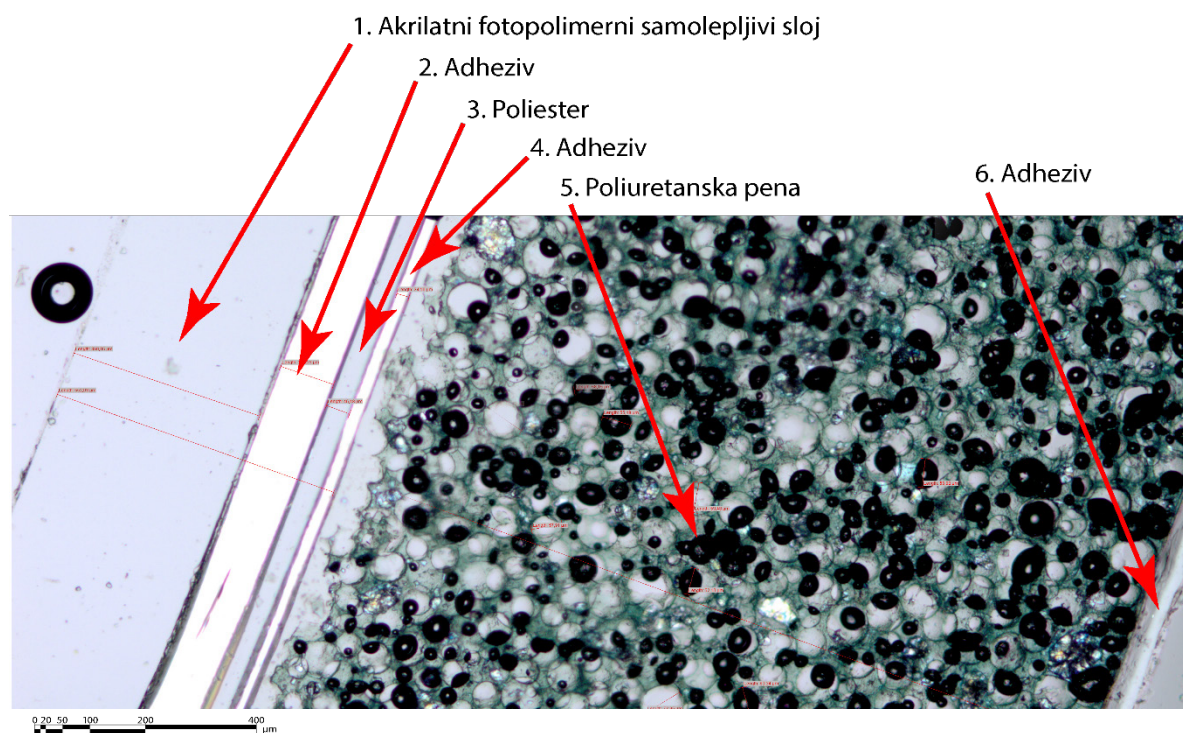
Poređenjem hromatograma se uočava da se udeo akrilata, ftalata, benzofenona i komponentata rozina u samolepljivom sloju smanjuje sa eksploatacijom slivova.

### 6.2.5 Analiza mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova

Snimci poprečnih preseka Twinlock® sloja sa označenim pojedinačnim slojevima su prikazani na slikama 6.2.1 i 6.2.2 za 1x i 320x slivove respektivno. Analizom slike izmerene dimenzije gradivnih slojeva Twinlock® sloja slivova, kao i procentualna razlika u njihovoj debljini su prikazani u tabeli 6.2.7.



Slika 6.2.1: Mikroskopski snimak poprečnog preseka Twinlock® sloja 1x slivova (100x uvećanje)



Slika 6.2.2: Mikroskopski snimak poprečnog preseka Twinlock® sloja 320x slivova (100x uvećanje)

Analizom slike je ustanovljeno da nema uočljivih promena u strukturi poprečnog preseka poliuretanske pene, kao i da se promeri ćelija u oba slučaja kreću između 55 i 60  $\mu\text{m}$  ili između 75 i 80  $\mu\text{m}$  bez vidljivih tragova deformacije. Takođe, analizom je ustanovljeno i postojanje 6 slojeva. Sloj 1 je akrilatni fotopolimerni samolepljivi sloj (Twinlock® adhezivni sloj), sloj 3 je prema literaturnim navodima poliester, a pretpostavka je da su slojevi 2 i 4 lepak

koji spaja Twinlock® adhezivni sloj sa poliesterom sa jedne strane i kompresibilnom poliuretanskom penom koja predstavlja sloj 5 sa druge strane. Sloj 6 je tanak sloj adheziva koji služi za spajanje celog Twinlock® sloja sa baznim telom sliva.

Tabela 6.2.7: Debljine pojedinačnih slojeva Twinlock® sloja 1x i 320x slivova

	1x sliv - debljina	320x sliv - debljina	Razlika u debljini
Sloj 1	425.11 μm	369.05 μm	13.19 %
Sloj 2	115.47 μm	105.39 μm	8.73 %
Sloj 3	71.67 μm	46.48 μm	35.15 %
Sloj 4	28.69 μm	24.10 μm	16 %
Sloj 5	1566.89 μm	1487.02 μm	5.1 %
Sloj 6	52.5 μm	45.72 μm	12.91 %
Ukupno	2260.33 μm	2077.76 μm	8.08 %

Na osnovu tabele se vidi da procentualna razlika u ukupnoj debljini uzoraka iznosi 8.08 % što odgovara debljini od 182.57 μm.

### 6.2.6 Tvrdoća Twinlock® sloja slivova

Srednja vrednost tvrdoće merene sa strane kompresibilnog sloja za 1x i 320x slivove iznosi 52 Shore A, a sa strane samolepljivog sloja tvrdoće iznose 78 i 79 Shore A za 1x i 320x slivove respektivno.

## 6.3 Ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže

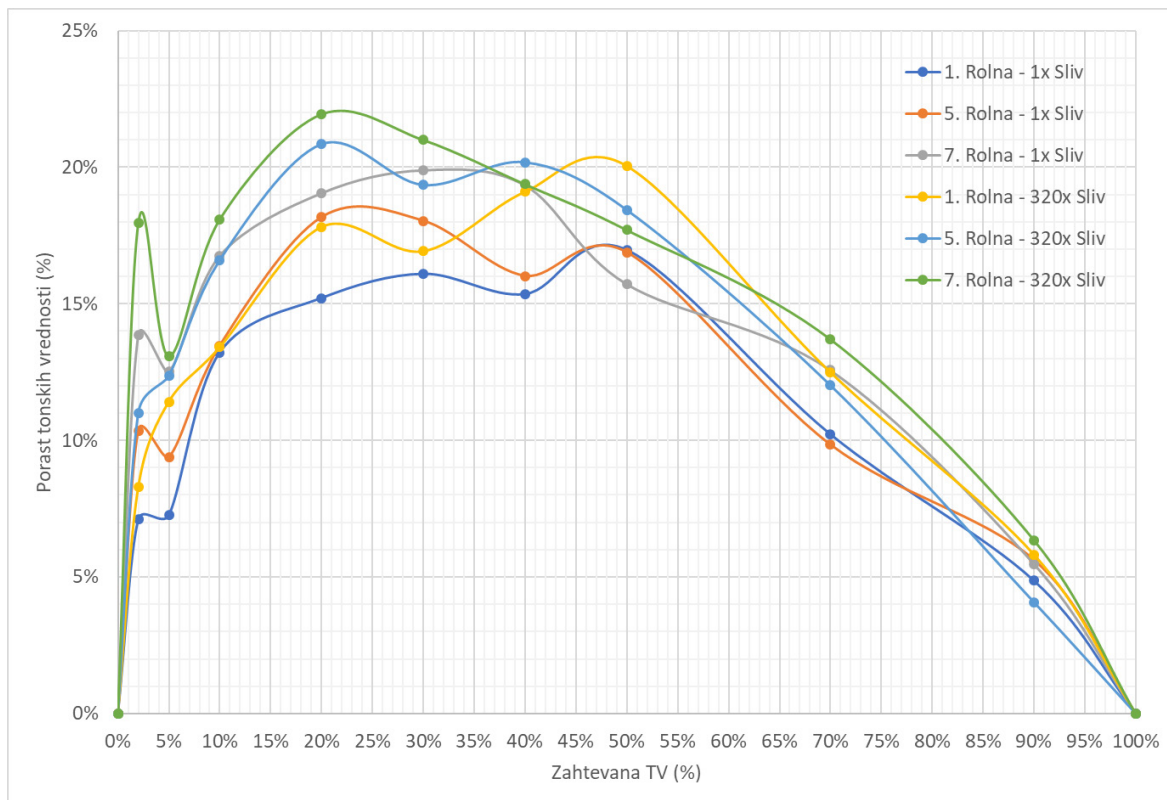
Merenjima sprovedenim tokom druge faze eksperimenta je ustanovljeno da eksploatacijom dolazi do značajnih promena svojstava slivova, čime je pronađen glavni uzročnik promena u porastu tonskih vrednosti zabeleženih tokom prve faze eksperimenta. Međutim, u cilju potpune karakterizacije uticaja slivova na stabilnost i promene procesnih parametara i parametara kvaliteta štampe kartonske ambalaže, neophodno je izvršiti i dodatna merenja na štampanim uzorcima predviđena trećom fazom eksperimenta. Potpunom karakterizacijom svojstava slivova i njihovog uticaja na parametre kvaliteta štampe moguće je definisati najpogodniju nedestruktivnu metodu provere stanja slivova tokom procesne kontrole štampe i definisati uslove pri kojima je poželjno ili nije poželjno koristiti slivove određenog nivoa eksploataisanosti. Rezultati narednih faza eksperimenta i primenjene metode bi trebalo da budu u potpunosti primenljivi i da pokazuju slične promene za sve grupe Twinlock® tehnologije slivova, uz jedinu razliku u intenzitetu i potrebnom vremenu za nastanak promena procesnih i parametara kvaliteta otiska.

### 6.3.1 Denzitometrijska merenja i mehanički porast tonskih vrednosti

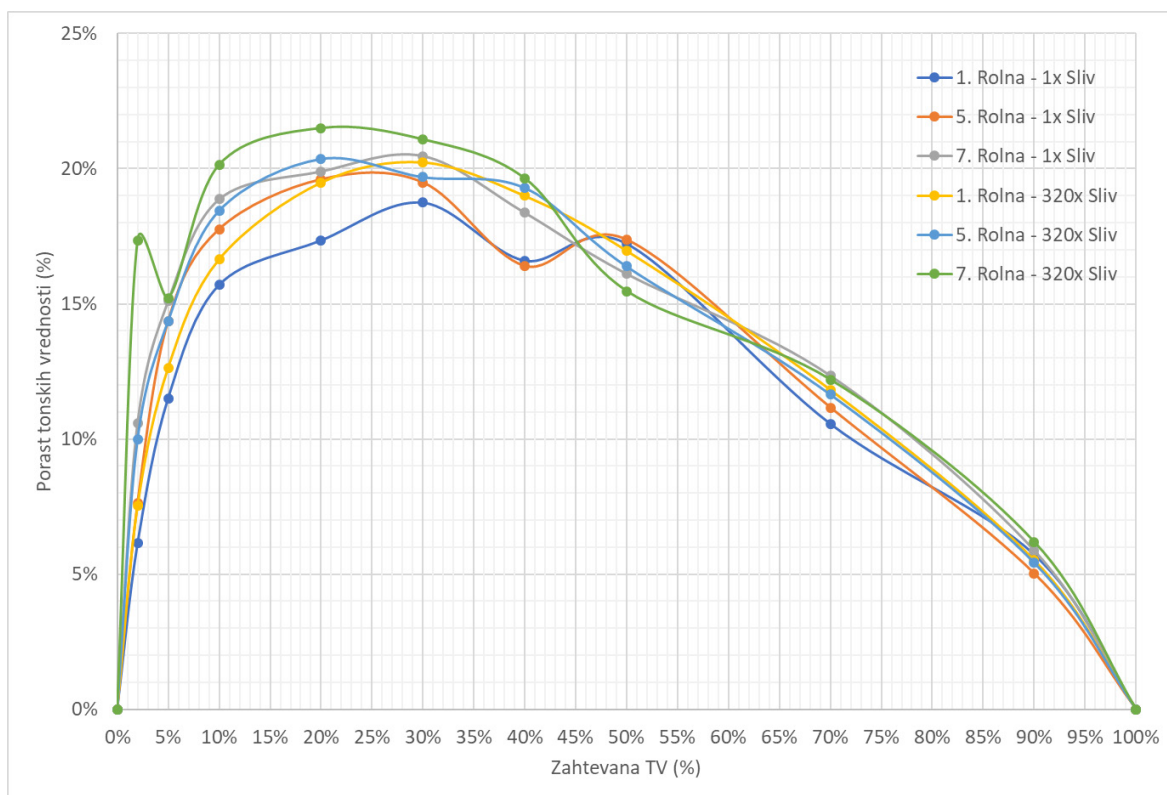
#### 6.3.1.1 Ukupan porast tonskih vrednosti

Krive porasta tonskih vrednosti (PTV) uzoraka štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova su prikazane na grafiku 6.3.1, a magenta bojom na grafiku 6.3.2.





*Grafik 6.3.1: Krive porasta tonskih vrednosti uzoraka štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova*



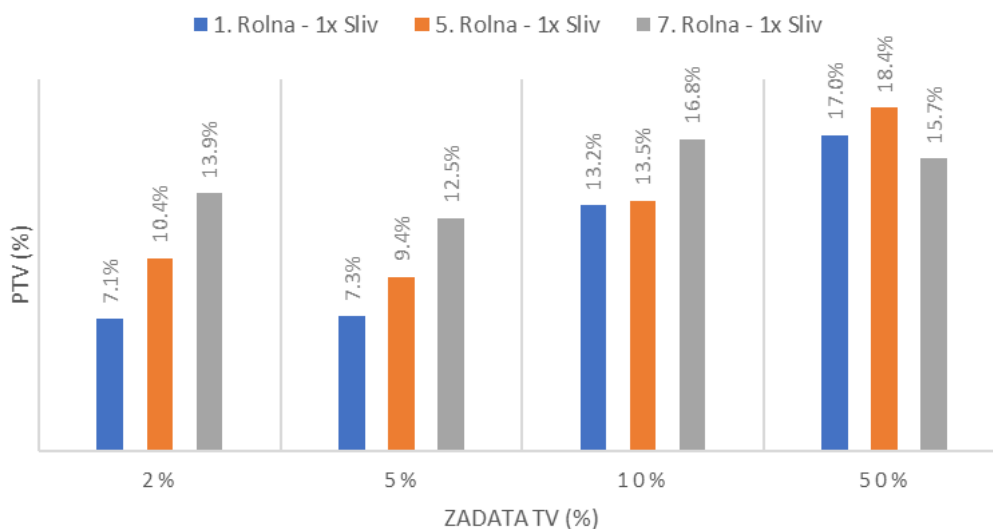
*Grafik 6.3.2: Krive porasta tonskih vrednosti uzoraka štampanih magenta bojom pomoću 1x i 320x slivova*

Posmatranjem grafika 6.3.1 može se napraviti nekoliko opservacija:

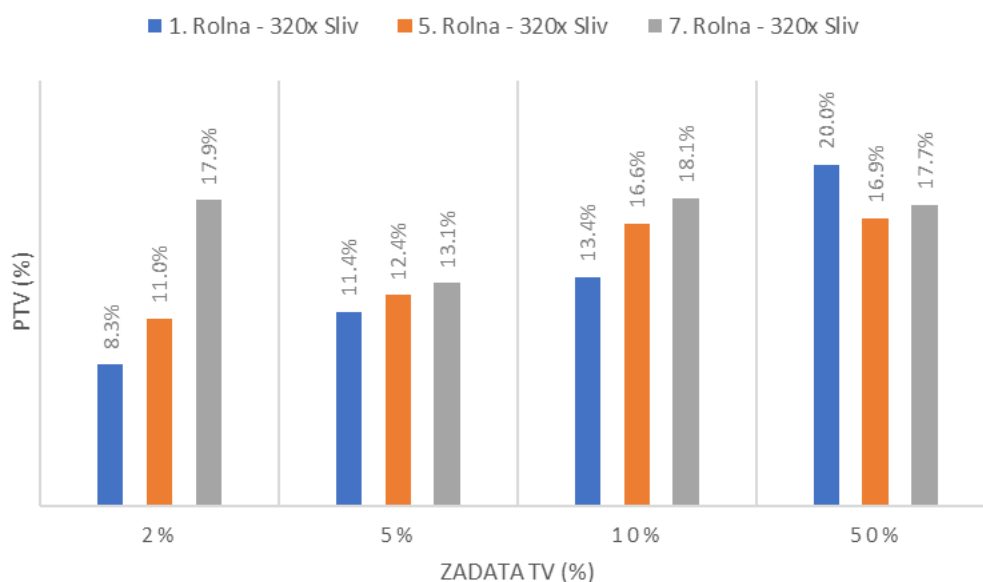
- PTV je najizraženiji za 7. rolnu štampanu pomoću 320x slivova, izuzev za polje od 50 % TV;
- PTV je najmanje izražen ili je među najmanje izraženima na uzorcima preuzetim sa 1. rolne štampane pomoću 1x slivova, izuzev za polja od 50 % i 90 % TV;
- U oblastima svetlih tonova, krive porasta tonskih vrednosti za uzorke štampane pomoću 320x slivova odgovaraju višim vrednostima;
- PTV uzoraka štampanih pomoću 1x slivova u oblastima svetlih i srednjih tonova raste sa porastom broja odštampanih rolni;
- PTV uzoraka štampanih pomoću 320x slivova u oblastima svetlih i srednjih tonova takođe raste sa porastom broja odštampanih rolni;
- Najveća razlika između vrednosti PTV je prisutna na polju od 2 % TV na uzorcima preuzetim sa 7. rolne;
- Vrednosti PTV uzoraka štampanih pomoću 320x slivova su isprva značajne, ali nakon toga pokazuju pad;
- PTV u svetlim i srednjim tonovima je takav da kriva koja odgovara uzorcima sa 5. rolne štampane pomoću 320x slivova prati ili pokazuje tek neznatno veće vrednosti od krive koja odgovara uzorcima preuzetim sa 7. rolne štampane pomoću 1x slivova;
- Uz izuzetak polja od 2% TV, pravilnost krivih PTV raste sa porastom broja odštampanih rolni i nivoa eksploataisanosti slivova. Naime, krive koje odgovaraju uzorcima štampanim pomoću 1x slivova postaju pravilnije nakon štampe 5. rolne, a u slučaju uzoraka štampanih pomoću 320x slivova, do ovoga dolazi pre štampe 5. rolne;
- U oblastima srednjih tonova (50 % TV) dolazi do značajnog smanjenja razućenosti rezultata;
- Na polju od 50 % TV dolazi do značajnog pada PTV počevši od 5. rolne kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova i od 7. rolne kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova;
- Ulaskom u zonu najtamnijih tonova, razućenost vrednosti PTV svih uzoraka značajno opada

Posmatranjem grafika 6.3.2 u odnosu na grafik 6.3.1, dolazi se do zaključka da su trendovi promena PTV kod uzoraka štampanih magenta bojom isti kao kod uzoraka štampanih cijan bojom. Iako su trendovi promena isti, krive PTV svih uzoraka pokazuju značajno veći nivo pravilnosti, odnosno manje oscilacije izazvane pre svega padovima vrednosti PTV, a i njihova razućenost kroz celokupni tonski opseg je značajno manja.

Na graficima 6.3.3 i 6.3.4 koji prikazuju PTV na najkritičnijim poljima cijan boje (2 %, 5 %, 10 % i 50 %) uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova respektivno se bolje uočava trend promene PTV.



Grafik 6.3.3: Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan

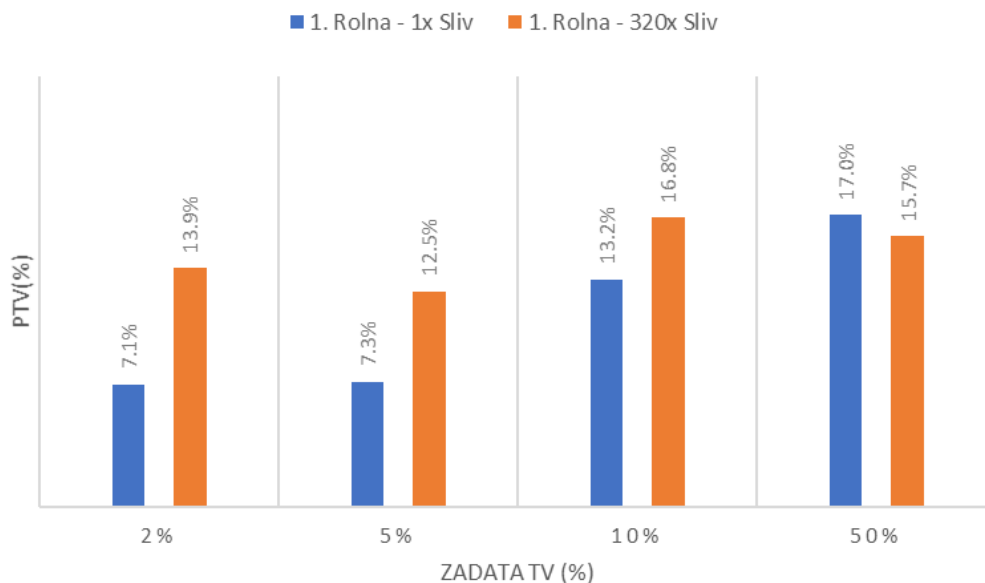


Grafik 6.3.4: Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

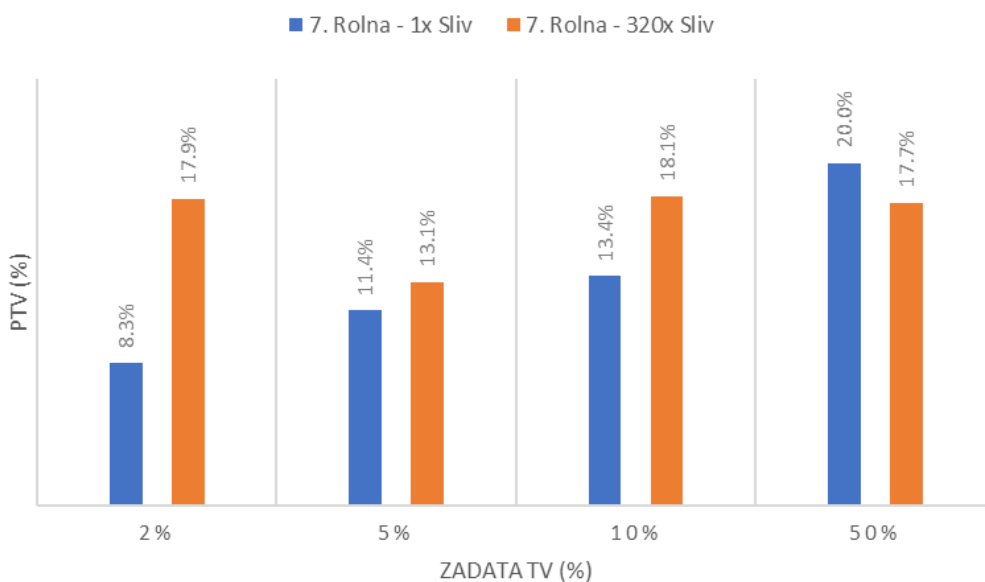
Za oba tipa slivova je na poljima koja odgovaraju svetlim tonovima primetan relativno ujednačen trend porasta vrednosti PTV sa povećanjem rednog broja štampane rolne. Najveći PTV je izmeren na 7. rolnoj štampanoj pomoću 320x slivova na polju od 2 % TV. Padovi PTV sa porastom rednog broja štampane rolne su primećeni samo na polju od 50 % TV kod uzoraka sa 7. rolne štampane pomoću 1x slivova, a kod 320x slivova u slučaju 5. rolne sa zadržavanjem relativno konstantne vrednosti i na 7. rolnoj.

Razlike u PTV između 1. i 7. rolnih štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova, merene na kritičnim poljima su prikazane na graficima 6.3.5 i 6.3.6 respektivno.





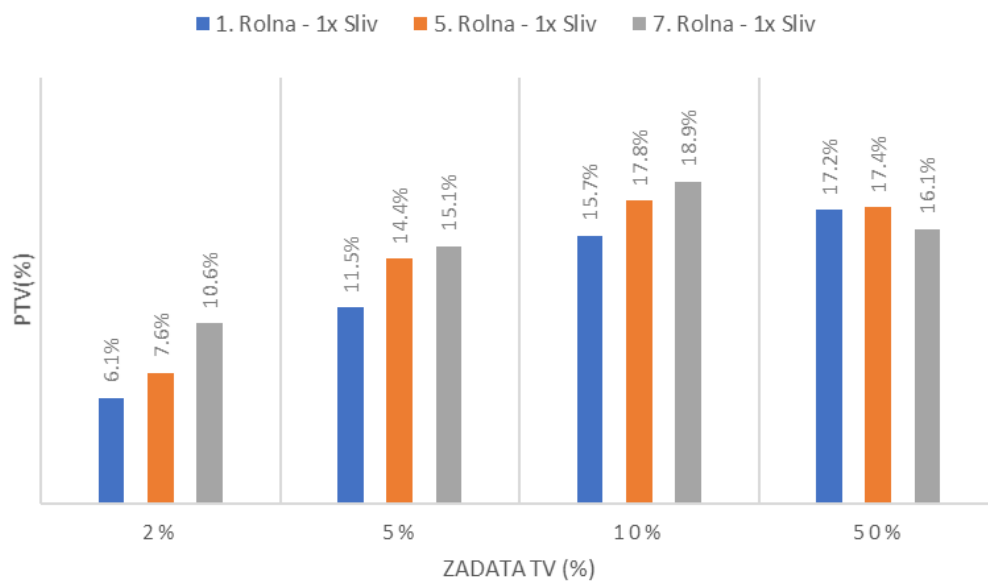
Grafik 6.3.5: Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan



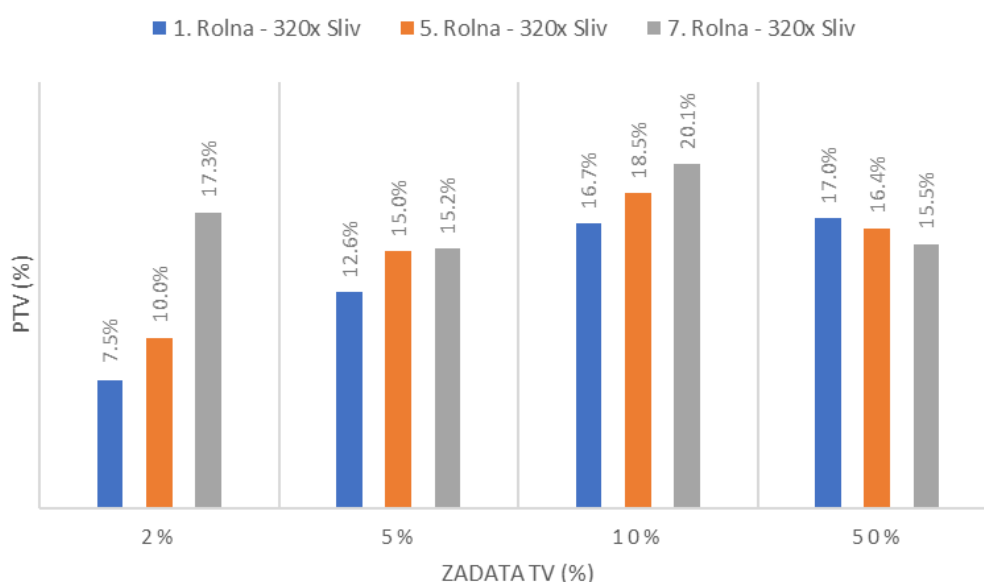
Grafik 6.3.6: Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan

PTV je uvek izraženiji u slučaju štampe pomoću 320x slivova, izuzev na polju od 50 % TV kako kod uzoraka preuzetih sa 1. rolni, tako i kod uzoraka preuzetih sa 7. rolni.

Trend promena PTV kroz povećanje broja rolni odštampanih pomoću 1x i 320x slivova na kritičnim poljima magenta boje prikazan je na graficima 6.3.7 i 6.3.8 respektivno.



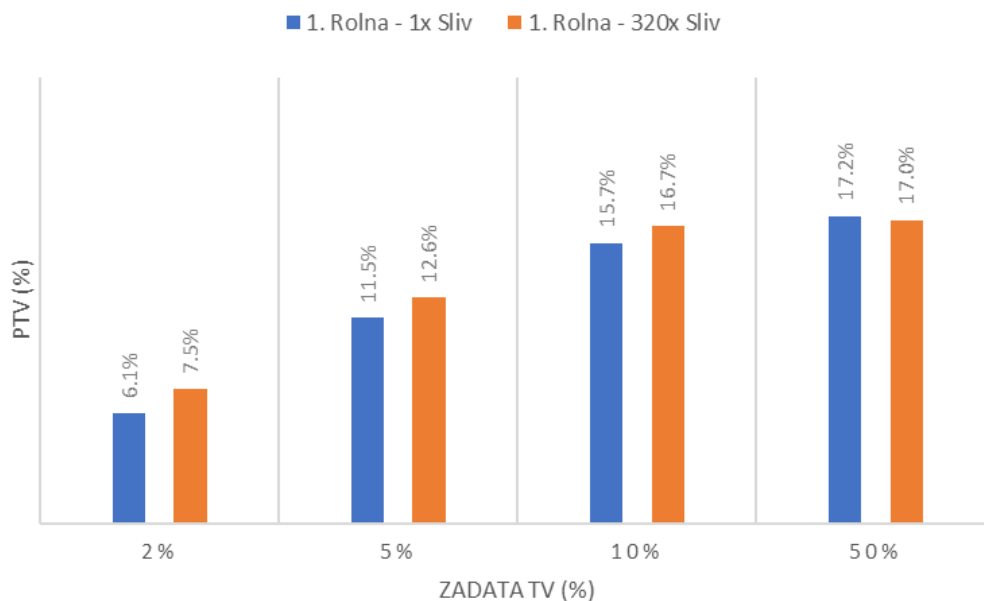
Grafik 6.3.7: Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta



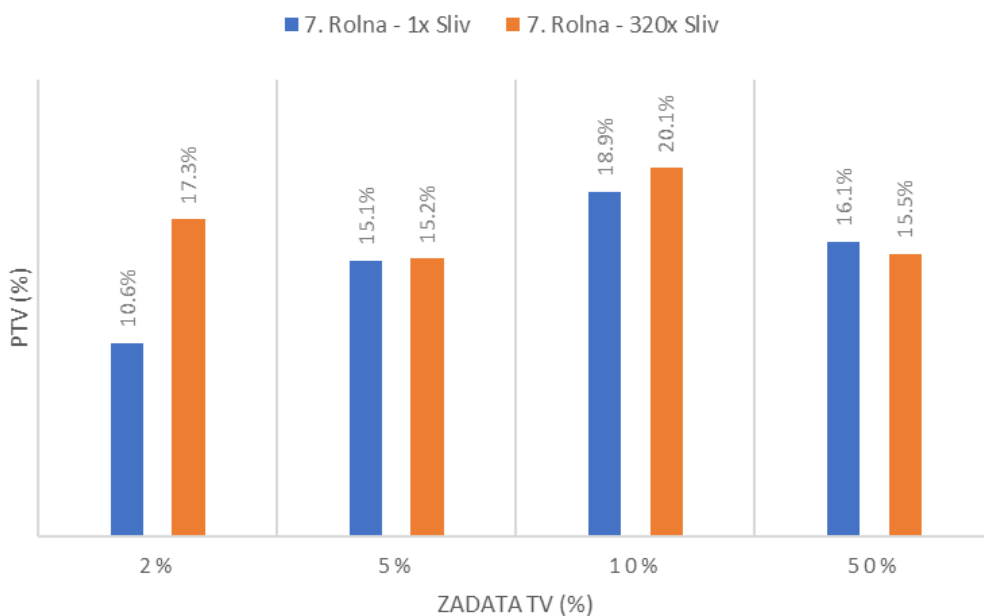
Grafik 6.3.8: Poređenje vrednosti PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta

Trend promena PTV na kritičnim poljima magenta boje je isti kao i kod uzoraka cijan boje, sa manje izraženim razlikama na poljima od 2 % i 50 % TV između uzoraka preuzetih sa različitih rolni.

Razlike u vrednostima PTV na kritičnim poljima magenta boje između 1. i 7. rolni štampanih korišćenjem 1x i 320x slivova su prikazane na graficima 6.3.9 i 6.3.10 respektivno.



Grafik 6.3.9: Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta

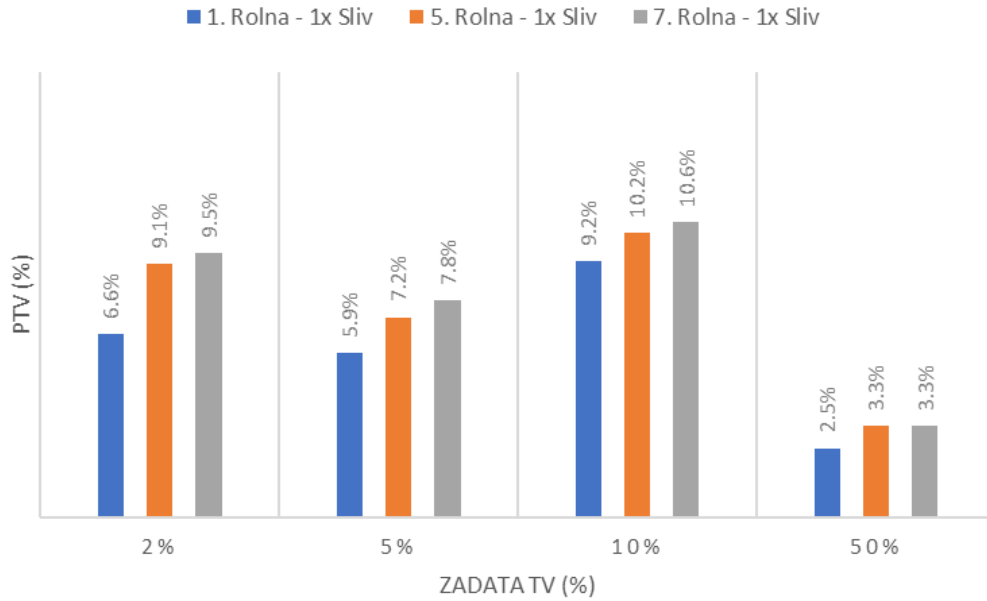


Grafik 6.3.10: Poređenje vrednosti PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta

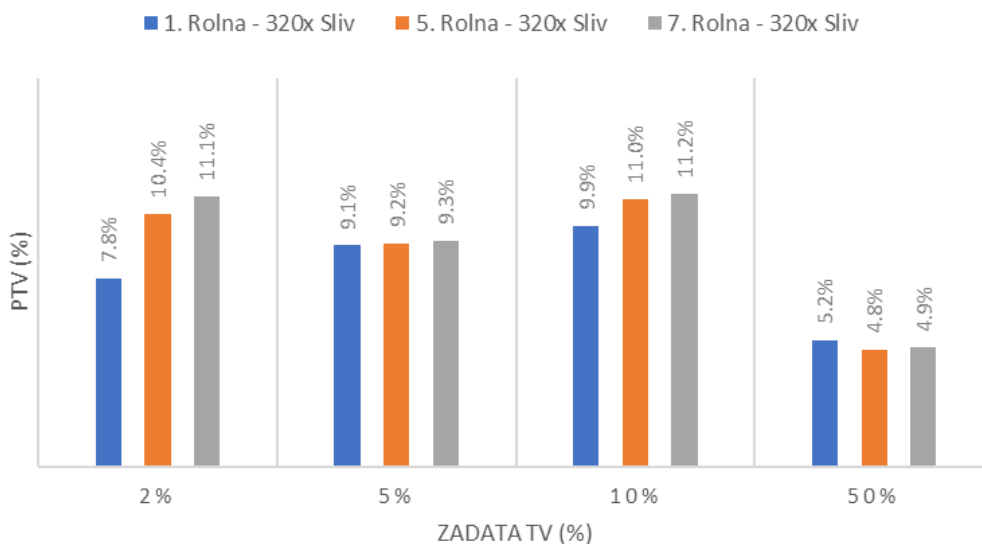
Trend promena PTV izazvanih eksploatacijom slivova na kritičnim poljima magenta boje uzoraka preuzetih sa 1. i 7. rolne prati trend uočen kod uzoraka štampanih cijan bojom, doduše sa manje izraženim razlikama između samih vrednosti.

### 6.3.1.2 Mehanički porast tonских vrednosti

Nakon ukupnog PTV izvršena su i merenja mehaničkog PTV iz razloga što na njega utiče značajno manji broj parametara i moguće je sa sigurnošću utvrditi uzroke njegovih promena. Prikaz merenja mehaničkog PTV po rolnama za kritična polja cijan boje štampana upotrebom 1x i 320x slivova je dat na graficima 6.3.11 i 6.3.12.



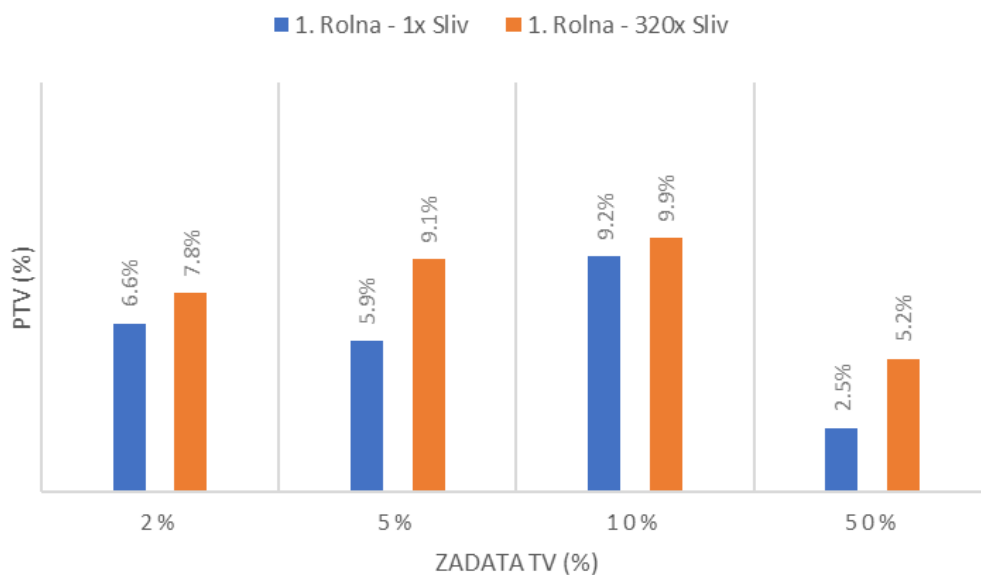
Grafik 6.3.11: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan



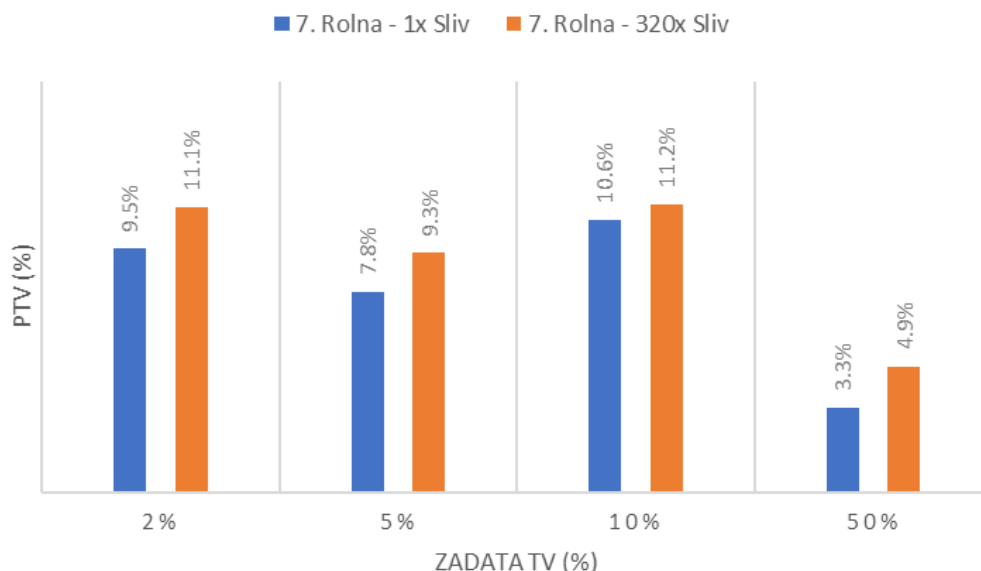
Grafik 6.3.12: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

Rastući trend vrednosti mehaničkog PTV je prisutan kako kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova, tako i kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova. Međutim, ovaj trend je kod 320x slivova manje izražen, izuzev na polju od 2 % TV kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne. Odstupanje od trenda je prisutno samo na polju od 50 % TV kod uzoraka sa 5. i 7. rolne štampane pomoću 320x slivova, odnosno samo kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 1x slivova.

Na graficima 6.3.13 i 6.3.14 su prikazane vrednosti mehaničkog PTV, izmerene na kritičnim poljima cijan boje štampanim pomoću 1x i 320x slivova za 1. i 7. štampanu rolnu respektivno.



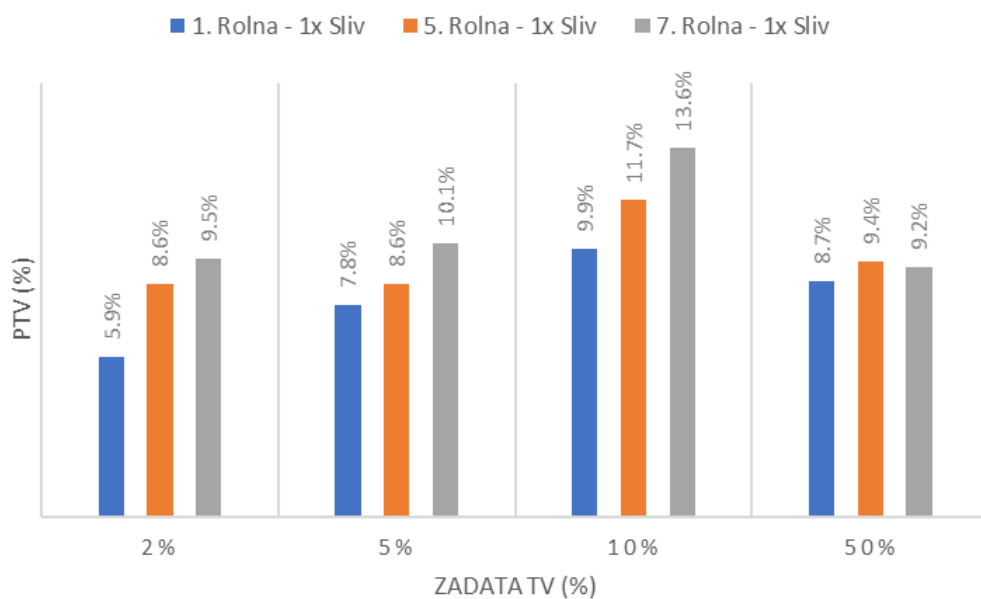
Grafik 6.3.13: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan



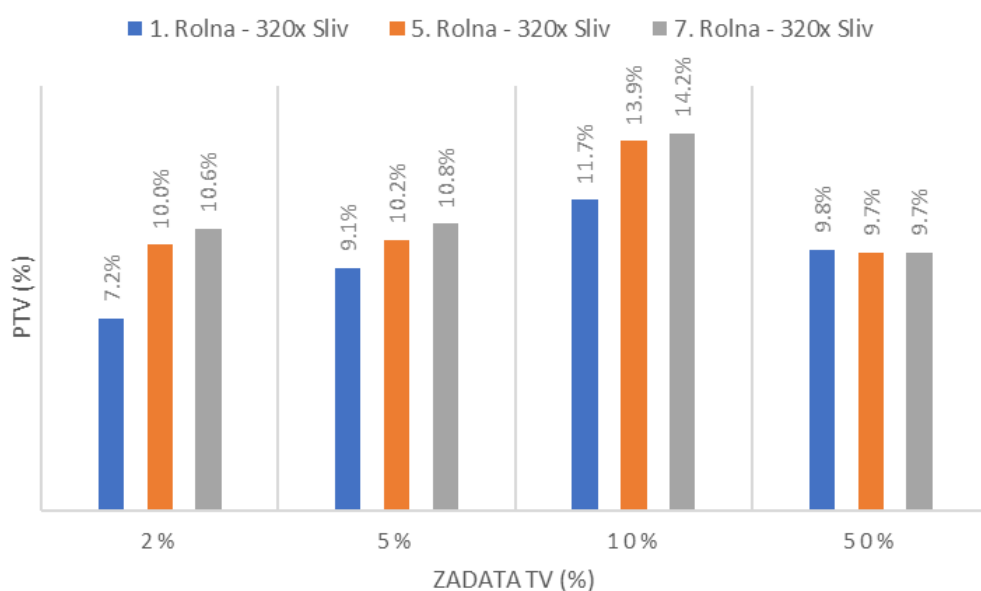
Grafik 6.3.14: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan

Sa grafika 6.3.13 i 6.3.14 se vidi da se sa porastom broja odštampanih rolni smanjuje razlika između 1x i 320x slivova, izuzev kod polja od 2 % TV sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova. Drugim rečima, iako su inicijalno značajno veće od svojih korespondirajućih vrednosti na uzorcima štampanim pomoću 1x slivova, vrednosti mehaničkog PTV uzoraka štampanih pomoću 320x slivova pokazuju veću stabilnost i manji rast.

Prikaz merenja mehaničkog PTV po rolnama za kritična polja magenta boje štampana pomoću 1x i 320x slivova je dat na graficima 6.3.15 i 6.3.16.



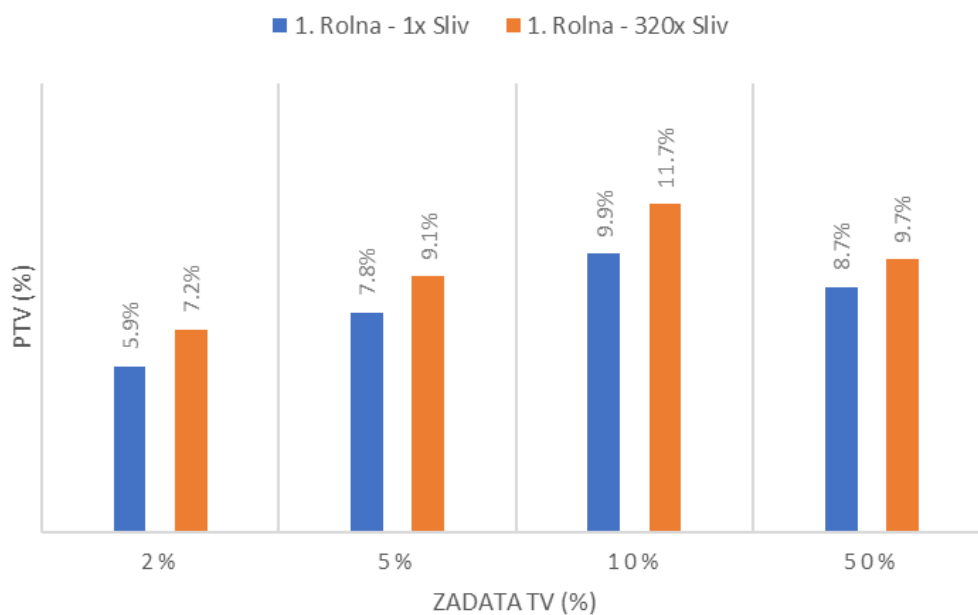
Grafik 6.3.15: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta



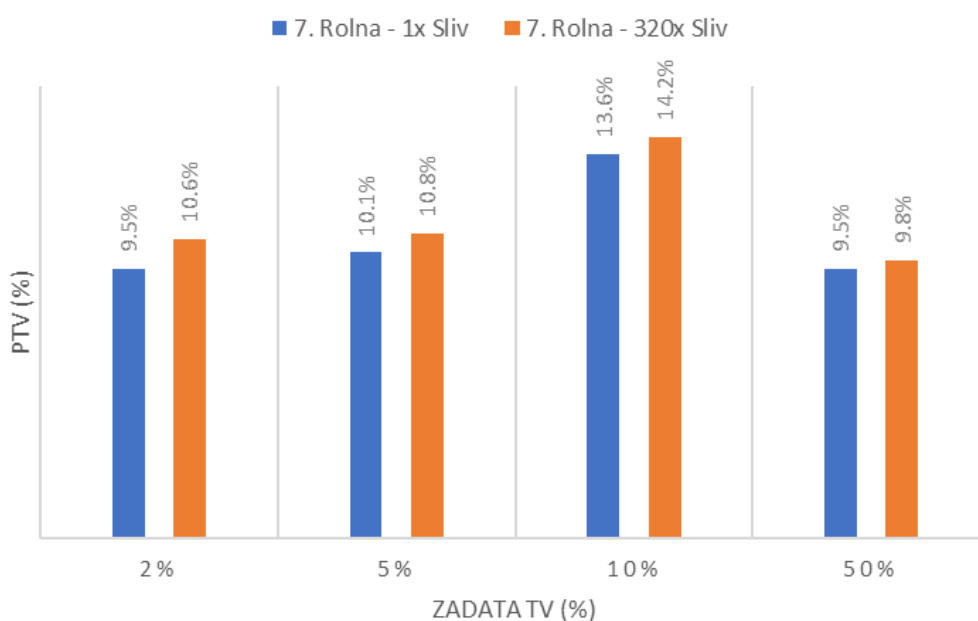
Grafik 6.3.16: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta

Trendovi promena odgovaraju onima primećenim kod uzoraka štampanih cijan bojom, sa nešto većim izmerenim vrednostima na poljima od 10 % i 50 % TV.

Na graficima 6.3.17 i 6.3.18 prikazane su izmerene vrednosti mehaničkog PTV na istim poljima magenta boje štampanim pomoću 1x i 320x slivova za 1. i 7. štampanu rolnu respektivno.



Grafik 6.3.17: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta



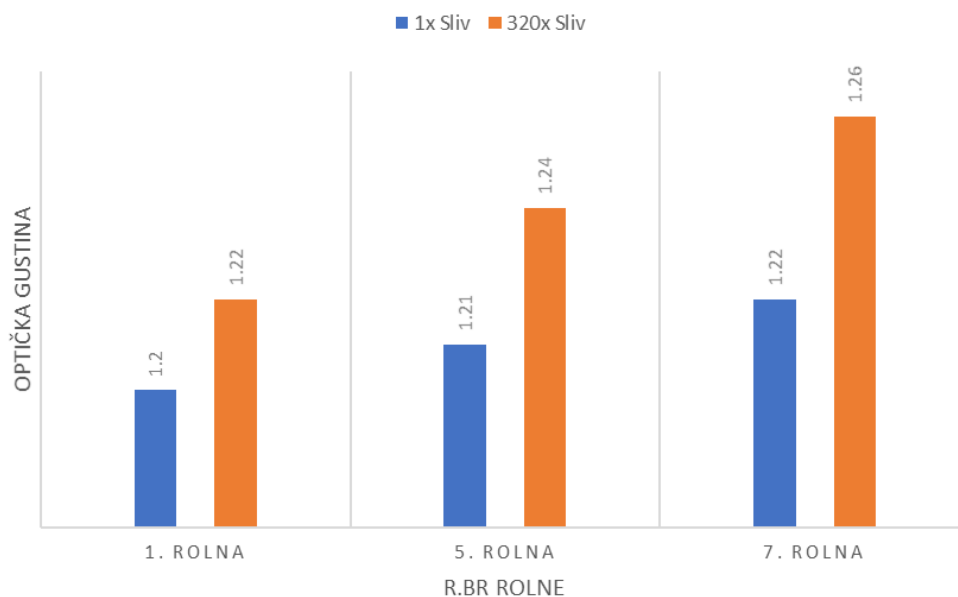
Grafik 6.3.18: Poređenje vrednosti mehaničkog PTV - 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta

Razlike između vrednosti mehaničkog PTV na uzorcima magenta boje štampanim pomoću 1x i 320x slivova su manje od odgovarajućih razlika izmerenih na uzorcima cijan boje.

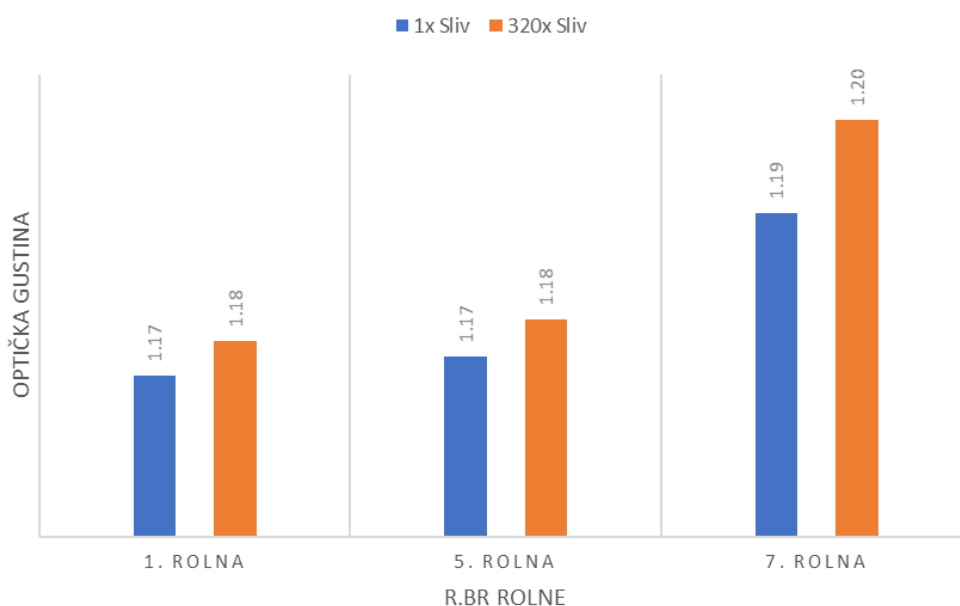
### 6.3.1.3 Optička gustina

Polje punog tona je najreprezentativniji pokazatelj promena u nanosu sloja boje. Rezultati merenja optičkih gustina polja punog tona cijan boje sa svih uzoraka su prikazani na grafiku 6.3.19, a magenta boje na grafiku 6.3.20.





*Grafik 6.3.19: Optičke gustine polja punog tona - Cijan*



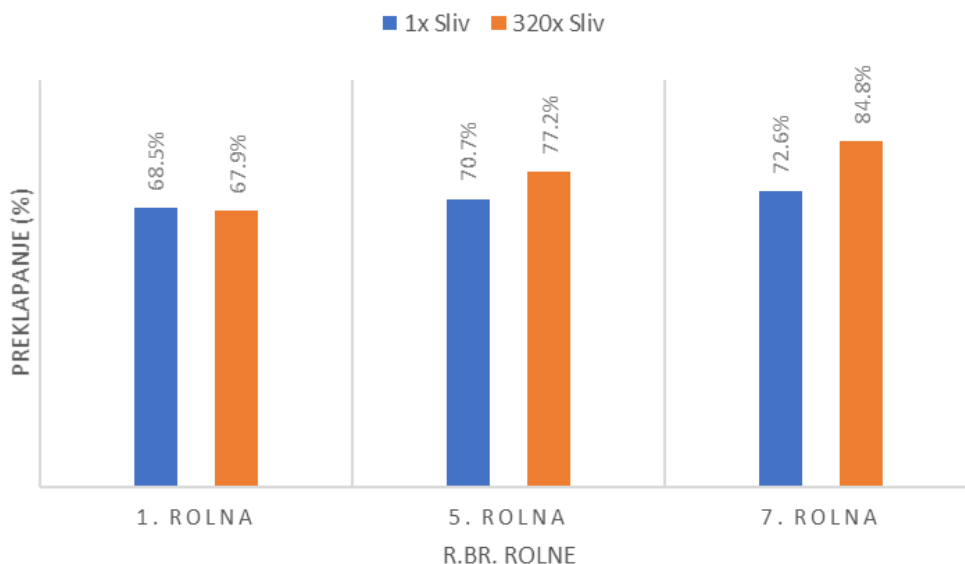
*Grafik 6.3.20: Optičke gustine polja punog tona - Magenta*

Na graficima 6.3.19 i 6.3.20 je primetan rastući trend promene vrednosti optičkih gustina sa porastom broja štampanih rolni. Na grafiku 6.3.20 koji odgovara uzorcima štampanim magenta bojom ovaj trend je isprva manje primetan, a u potpunosti se ispoljava tek nakon štampe 5. rolne.

Pored toga, na istim graficima je moguće lako uočiti i uticaj nivoa eksploataisanosti slivova na optičke gustine polja punog tona uzoraka preuzetih sa istih rolni. U oba slučaja više vrednosti optičke gustine polja punog tona odgovaraju uzorcima štampanim pomoću 320x slivova. Na uzorcima cijan boje razlike u optičkim gustinama između uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova postaju izraženije sa porastom broja štampanih rolni, dok je kod uzoraka štampanih magenta bojom ova pojava takođe prisutna, ali manje izražena.

### 6.3.1.4 Preklapanje

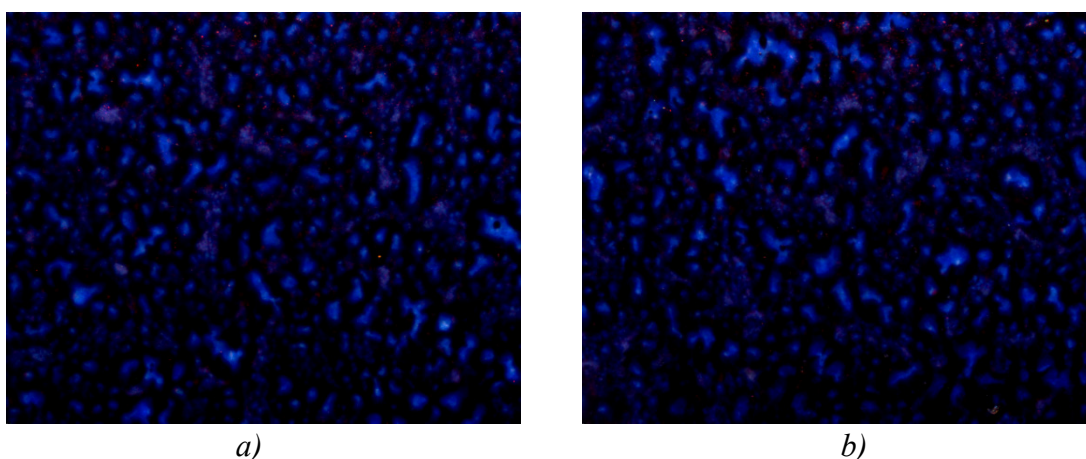
Vrednosti preklapanja merene na polju sekundarne plave boje (dobijeno preštampavanjem magenta boje preko cijan boje) sa uzoraka preuzetih sa 1. 5. i 7. rolne dobijenih štampom pomoću 1x i 320x slivova su prikazane na grafiku 6.3.21.



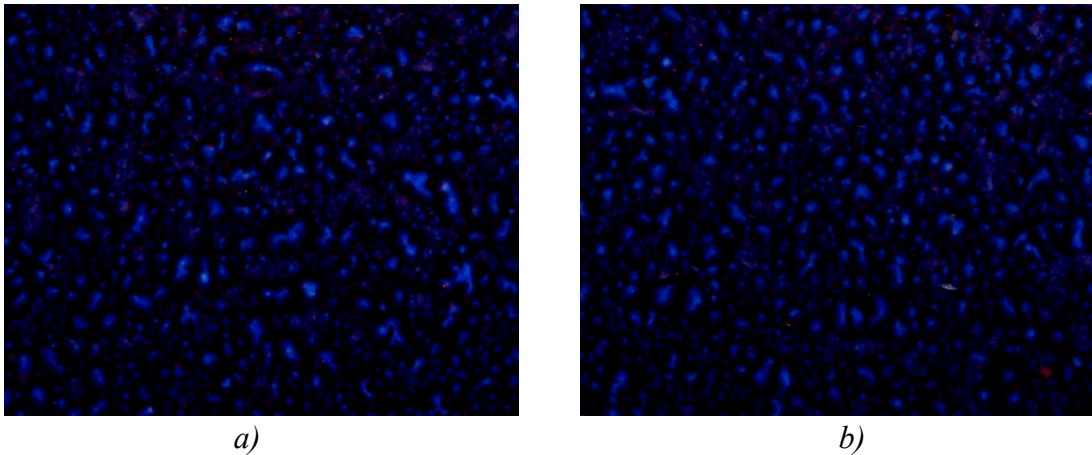
Grafik 6.3.21: Vrednosti preklapanja - Sekundarna plava boja

Vrednosti preklapanja rastu sa porastom broja odštampanih rolni, kao i razlika u korist 320x slivova. Izuzetak su uzorci preuzeti sa 1. rolne gde su vrednosti izmerene na uzorcima dobijenim korišćenjem 320x slivova, iako zanemarljivo, ipak malo manje od vrednosti preklapanja izmerenih na uzorcima dobijenim pomoću 1x slivova.

Na slici 6.3.1 je dat uvećan prikaz polja sekundarne plave boje preuzetih sa 1. rolne štampane pomoću 1x i 320x slivova respektivno, a na slici 6.3.2 prikaz istih polja preuzetih sa 7. rolni.



Slika 6.3.1: Snimak polja sekundarne plave boje na 1. rolnoj štampanoj pomoću a) 1x; b) 320x slivova



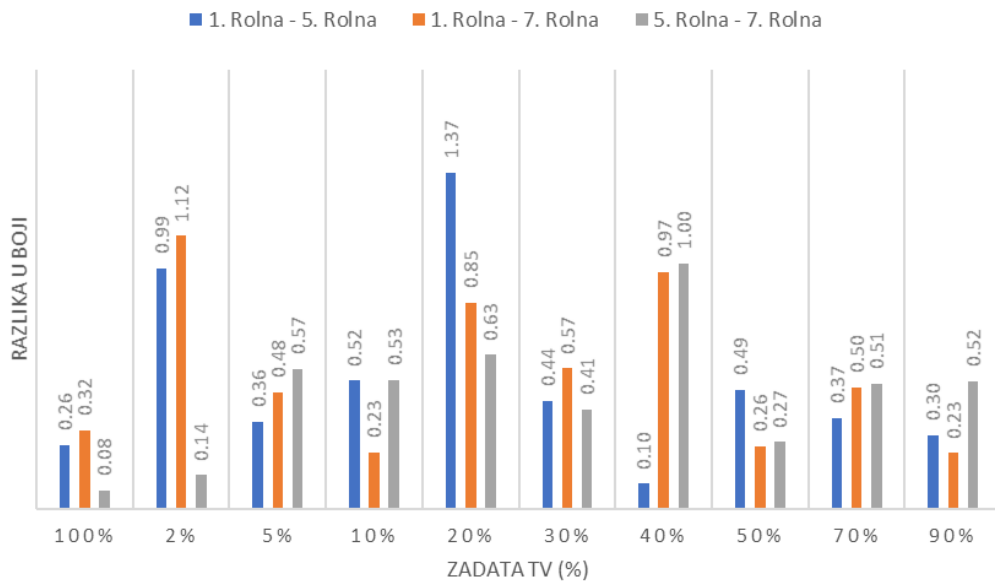
Slika 6.3.2: Snimak polja sekundarne plave boje na 7. rolni štampanoj pomoću a) 1x; b) 320x slivova

U slučaju štampe 1. rolne, neuniformnosti na površini snimljenog polja su relativno ujednačene bez obzira na korišćene slivove. Međutim, kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne, neuniformnosti su vizuelno manje izražene na uzorcima dobijenim korišćenjem 320x slivova.

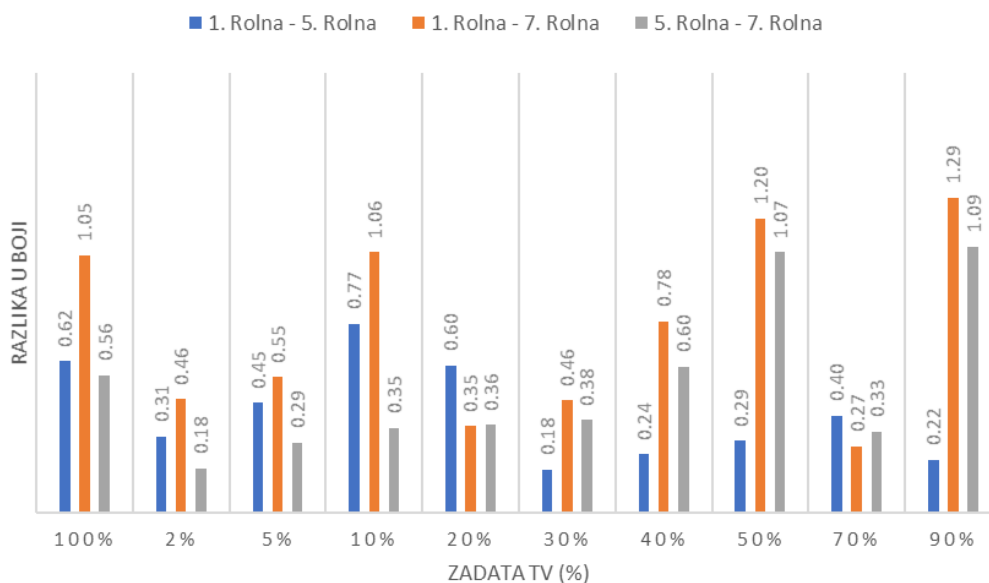
### 6.3.2 Kolorimetrijska merenja

#### 6.3.2.1 Razlika u boji

Merenja razlike u boji po formuli  $\Delta E^*_{00}$  za polja punog tona i polja tonskih vrednosti cijan boje između različitih rolni štampanih pomoću 1x, odnosno 320x slivova su prikazana na graficima 6.3.22 i 6.3.23 respektivno.



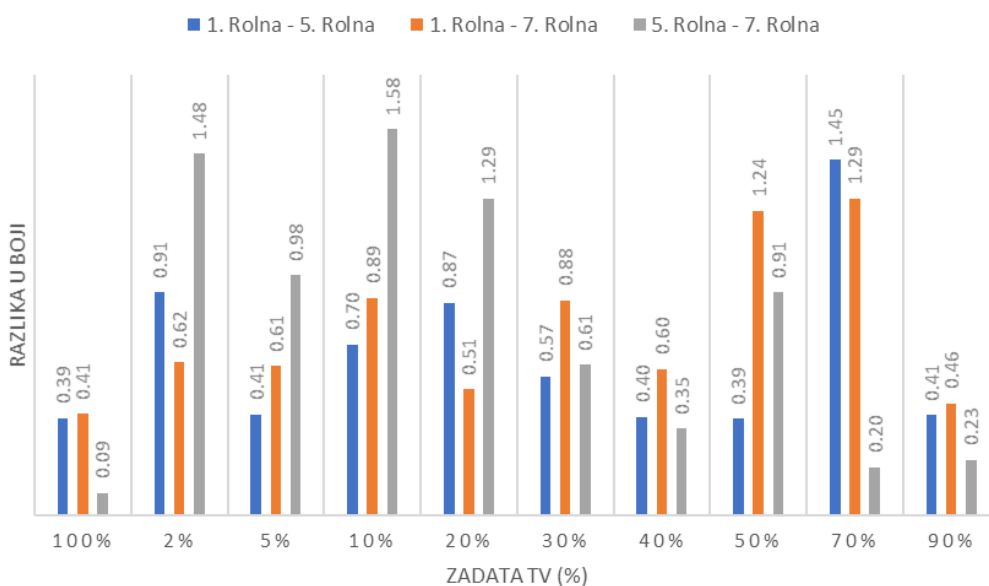
Grafik 6.3.22: Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 1x slivovi - Cijan



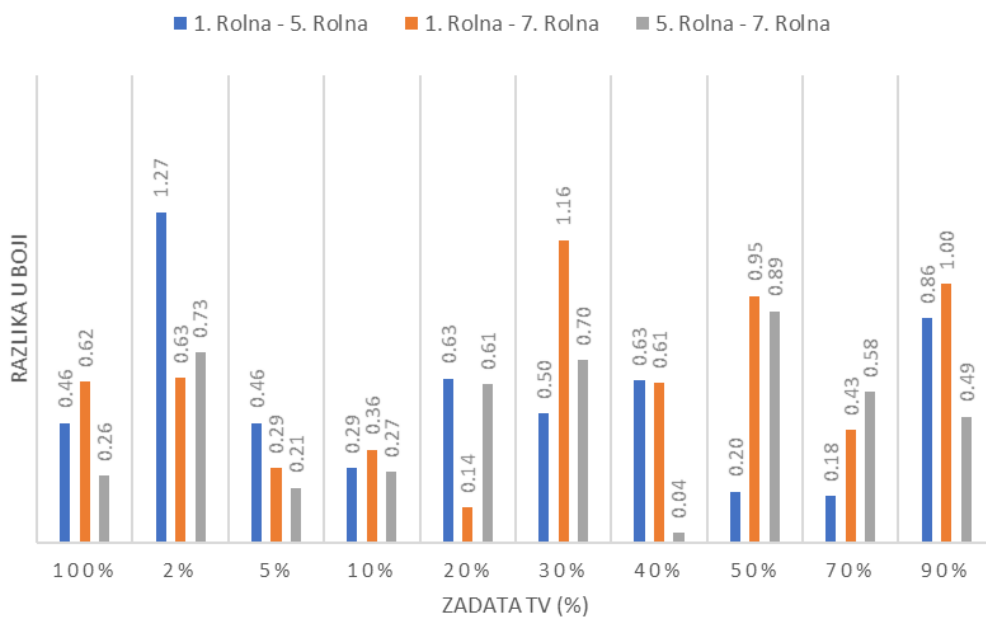
Grafik 6.3.23: Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Cijan

Rezultati merenja na poljima tonskih vrednosti ne pokazuju stabilan trend promene, ali to nije slučaj i sa merenjima na poljima punih tonova. Razlika u boji izmerena na poljima punih tonova između 1. i 7. rolne je veća od razlike izmerene između 1. i 5. rolne, a najmanja izmerena razlika je između 5. i 7. rolne, nezavisno od nivoa eksploatisanosti slivova. Razlike u boji polja punih tonova izmerene na uzorcima štampanim pomoću 320x slivova su veće od odgovarajućih razlika izmerenih na uzorcima štampanim pomoću 1x slivova.

Na graficima 6.3.24 i 6.3.25 su prikazana merenja razlike u boji po formuli  $\Delta E^*_{00}$  za polja punog tona i polja tonskih vrednosti magenta boje između različitih rolni štampanih pomoću 1x, odnosno 320x slivova.



Grafik 6.3.24: Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 1x slivovi - Magenta

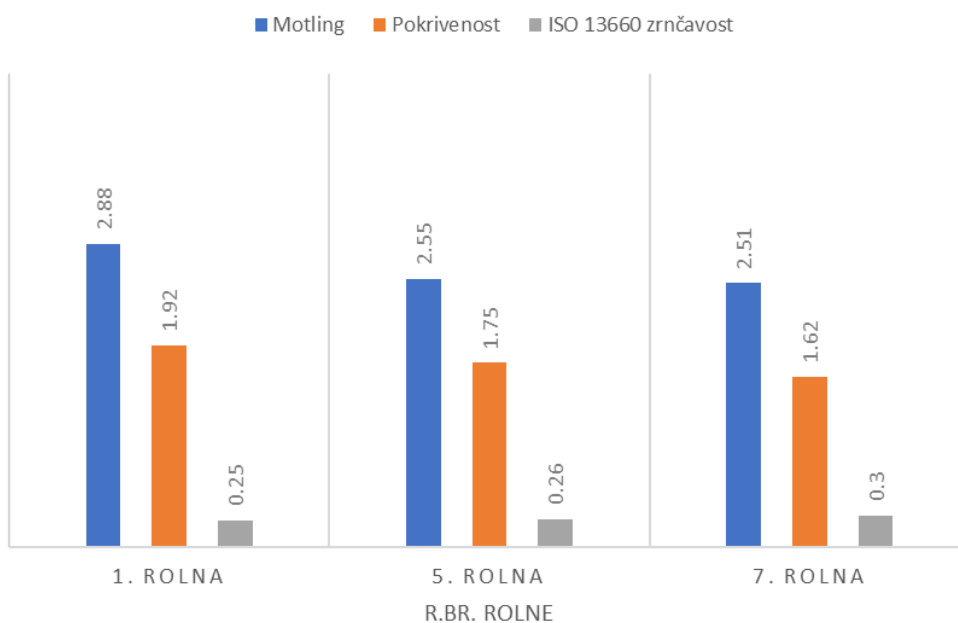


Grafik 6.3.25: Razlike u boji merene između 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Magenta

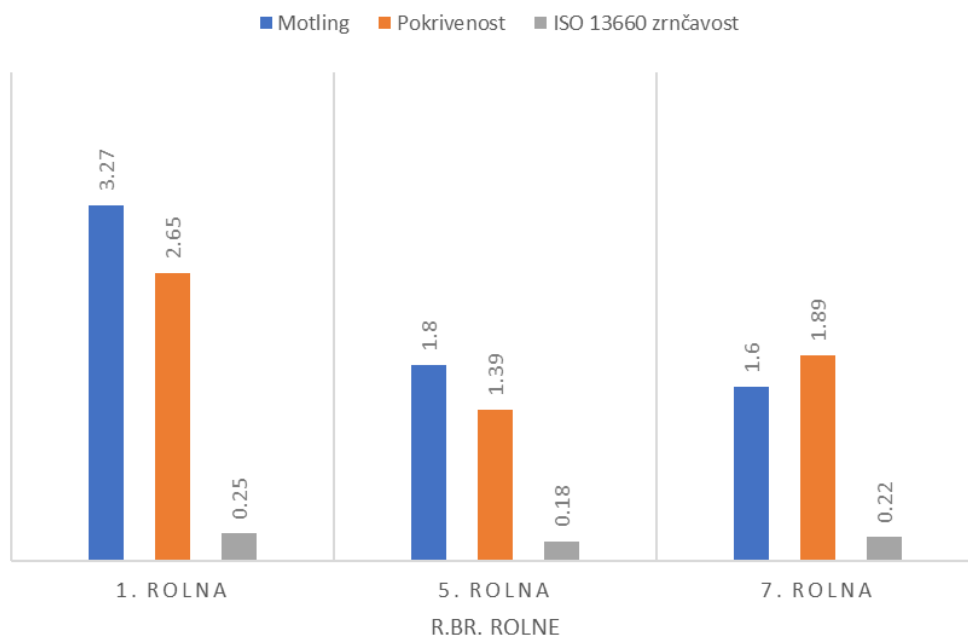
Rezultati merenja na poljima tonских vrednosti magenta boje takođe ne pokazuju stabilan trend promene. Odnos vrednosti razlika u boji polja punih tonova između uzoraka preuzetih sa različitih rolni je isti kao i u slučaju štampe cijan bojom. Isto zapažanje važi i za odnos razlika u boji polja punih tonova između uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova, uz dodatno zapažanje da je kod uzoraka štampanih magenta bojom promena vrednosti razlika u boji izazvana nivoom eksploatacije slivova značajno manje izražena.

### 6.3.3 Uniformnost štampane površine

Izmerene vrednosti motlinga, pokrivenosti i ISO 13660 zrnčavosti na poljima punih tonova cijan boje uzorkovanih sa 1. 5. i 7. rolne štampane pomoću 1x i 320x slivova prikazane su na graficima 6.3.26 i 6.3.27 respektivno.



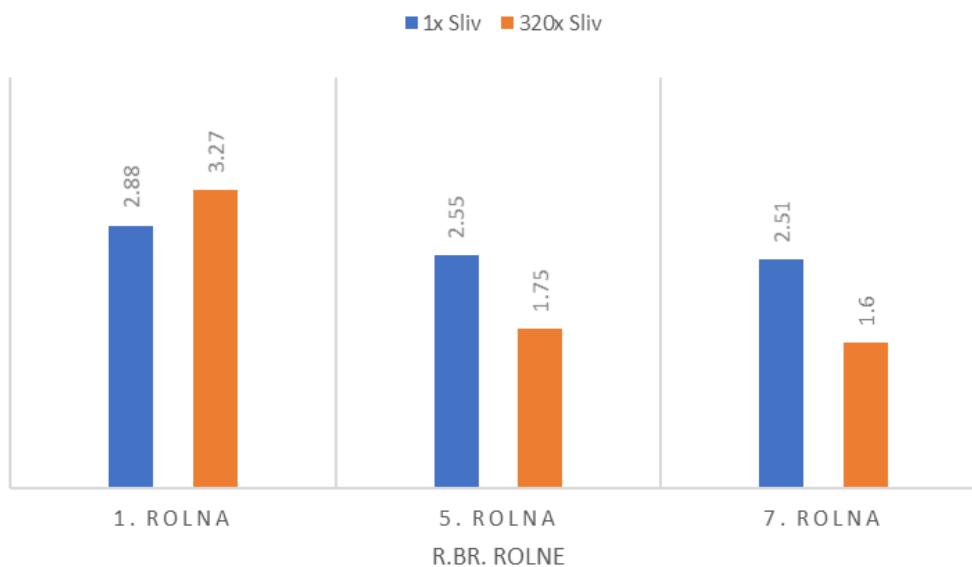
Grafik 6.3.26: Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan



*Grafik 6.3.27: Poređenje parametara površinske uniformnosti - 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Cijan*

Vrednosti motlinga na poljima punog tona cijan boje beleže pad sa porastom broja odštampanih rolni. Ovaj pad je izraženiji kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova. Vrednosti pokrivenosti su nešto stabilnije od vrednosti motlinga i takođe beleže pad, sa izuzetkom uzorka preuzetog sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova. ISO 13660 zrnčavost nema izražen bilo kakav trend promene, ali su joj i vrednosti na svim uzorcima male.

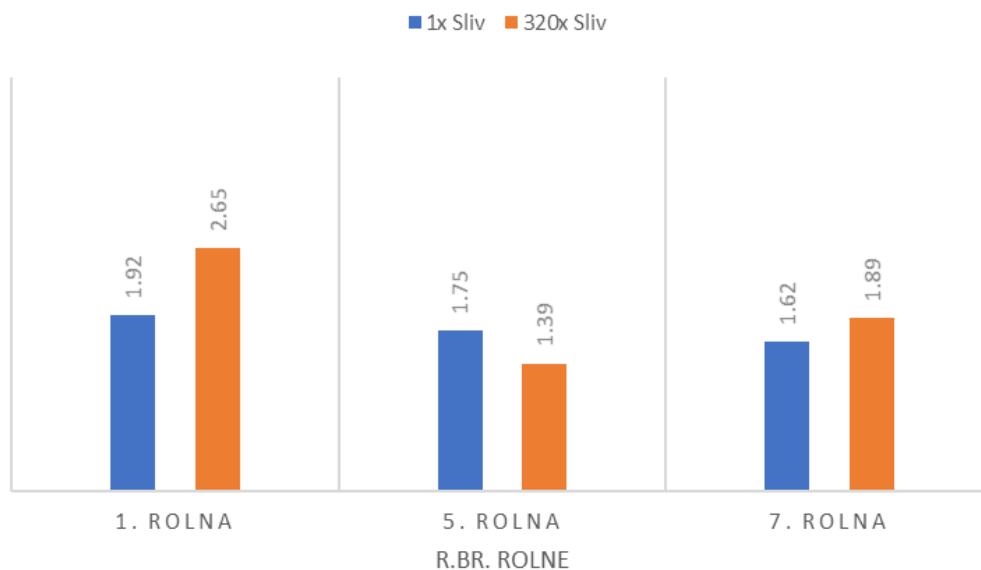
Razlike u motlingu uzoraka štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova su prikazane na grafiku 6.3.28.



*Grafik 6.3.28: Poređenje vrednosti motlinga - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolne - Cijan*

Primetan je globalan trend smanjenja vrednosti motlinga, a vrednosti motling uzoraka dobijenih štampom pomoću 320x slivova su manje, izuzev kod uzoraka preuzetih sa 1. rolne.

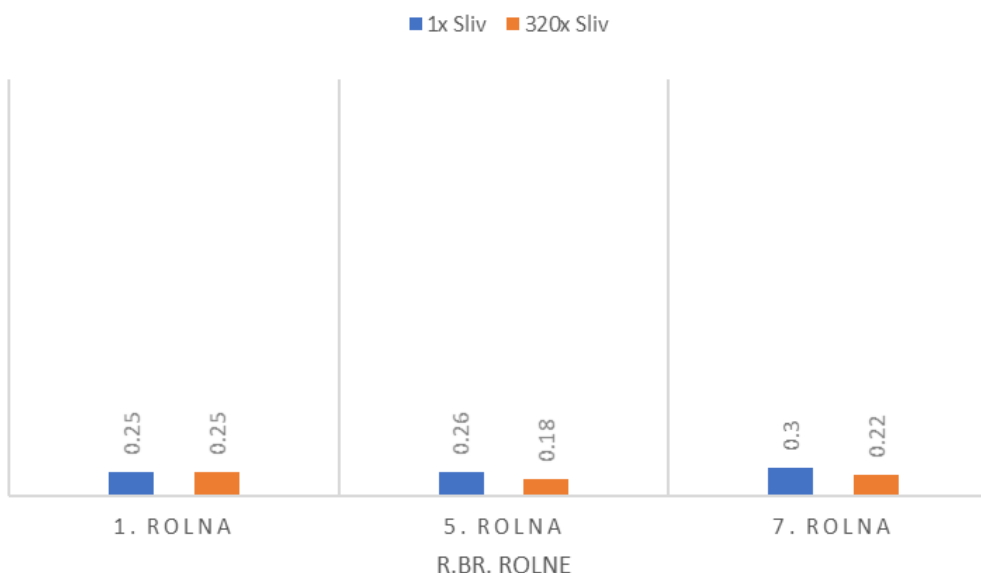
Pokrivenost je merena na istom setu uzoraka kao i ostali parametri uniformnosti štampane površine, a njene vrednosti su prikazane na grafiku 6.3.29.



Grafik 6.3.29: Poređenje vrednosti pokrivenosti - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna - Cijan

Vrednosti pokrivenosti pokazuju opadajući trend kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova, dok kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova pokazuje prvo opadajući, a zatim rastući trend promene. Po pitanju odnosa vrednosti pokrivenosti između uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova se ne uočava pravilnost.

Na grafiku 6.3.30 dat je prikaz promena i razlika u ISO 13660 zrnčavosti cijan uzoraka u zavisnosti od nivoa eksploatisanosti slivova pomoću kojih su štampani i broja štampane rolne sa koje su preuzeti.

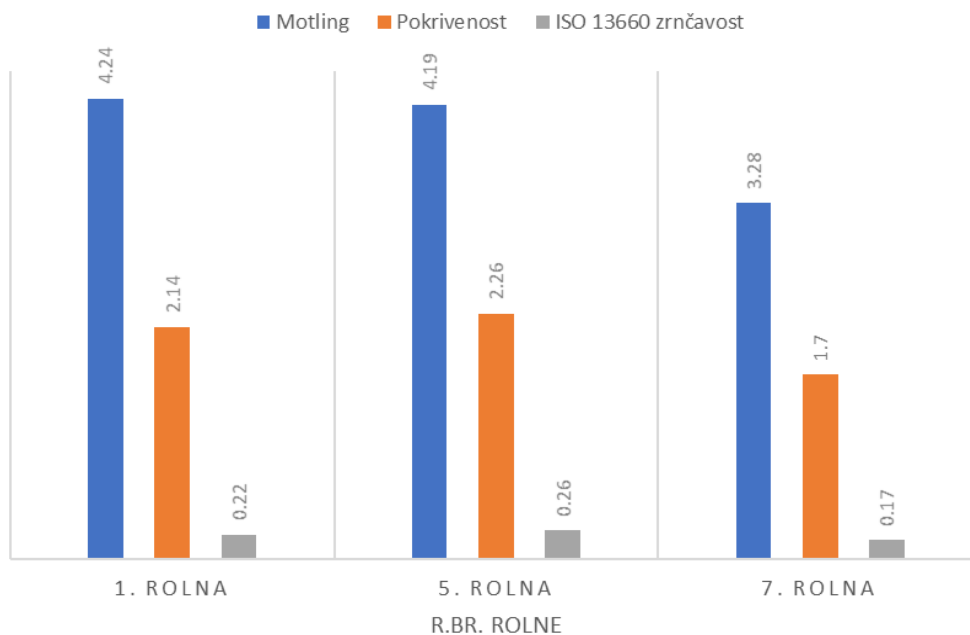


Grafik 6.3.30: Poređenje vrednosti ISO 13660 zrnčavosti - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna - Cijan

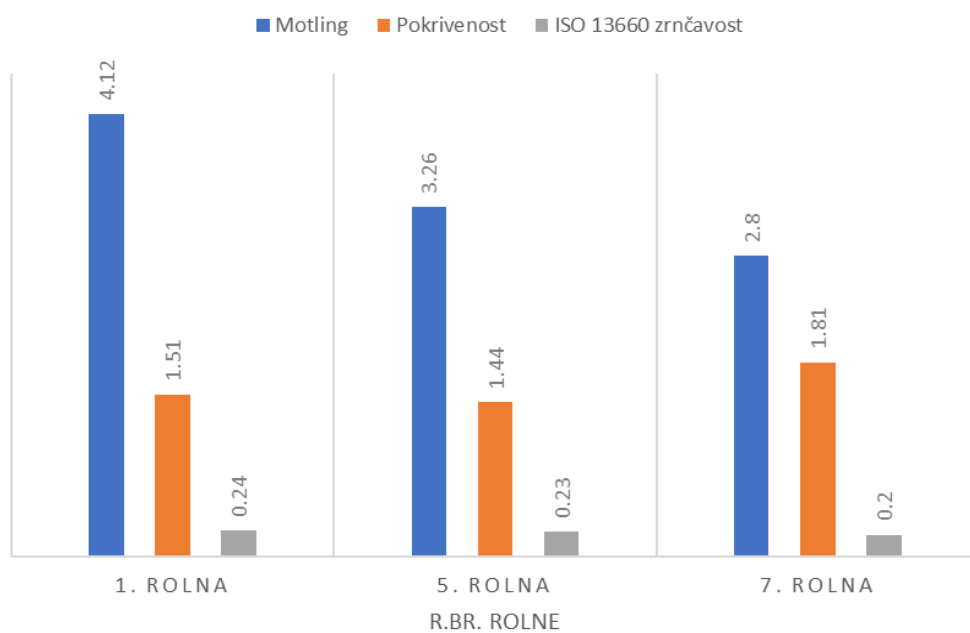
Promene i razlike u ISO 13660 zrnčavosti su veoma male i bez primetnog trenda promene i pravila u razlici između uzoraka dobijenih štampanom pomoću 1x i 320x slivova.



Merenja istovetnih parametara uniformnosti štampane površine su izvršena i za uzorke štampane magenta bojom i prikazana na graficima 6.3.31 i 6.3.32.



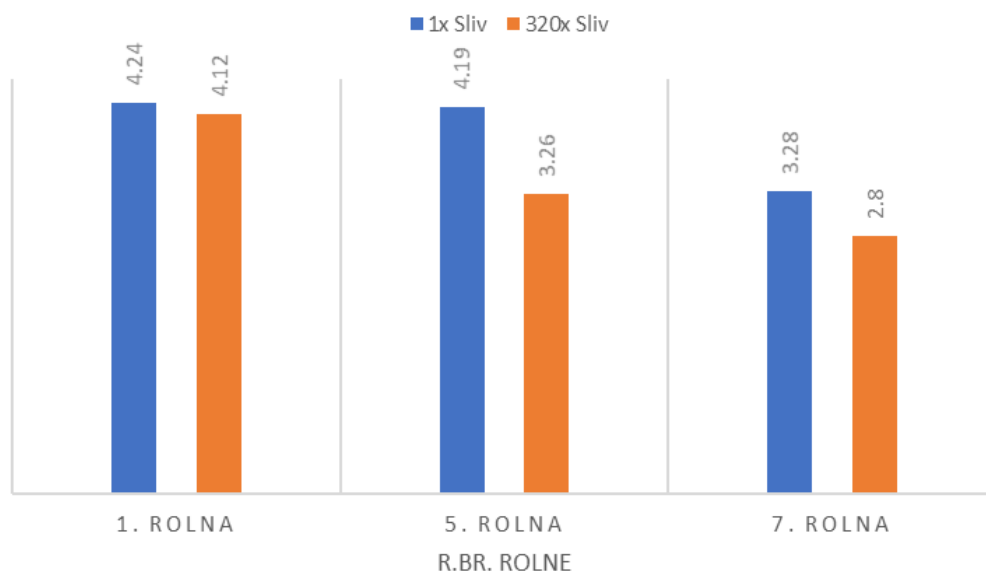
*Grafik 6.3.31: Poređenje parametara površinske uniformnosti 1. 5. i 7. rolne - 1x slivovi - Magenta*



*Grafik 6.3.32: Poređenje parametara površinske uniformnosti 1. 5. i 7. rolne - 320x slivovi - Magenta*

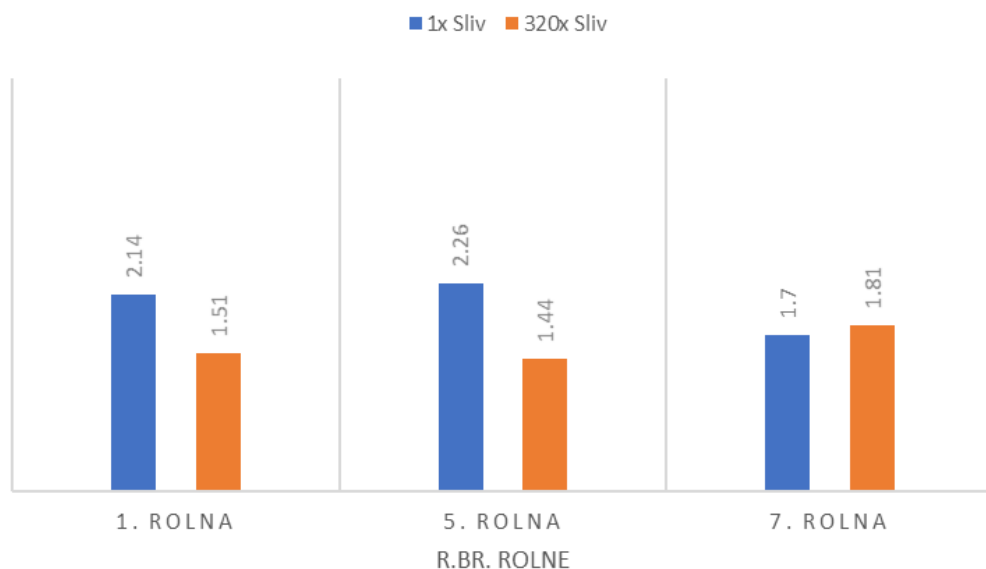
Promene u potpunosti prate trendove i generalno ponašanje ovih parametara na uzorcima štampanim cijan bojom, izuzev što su vrednosti kod uzoraka štampanih magenta bojom veće.

U nastavku su dati grafici sa promenama i razlikama u vrednostima motlinga (grafik 6.3.33), pokrivenosti (grafik 6.3.34) i ISO 13660 zrnčavosti (grafik 6.3.35) merenih na poljima punih tonova magenta uzoraka u zavisnosti od nivoa eksploatisanosti slivova pomoću kojih su štampani i broja štampane rolne sa koje su preuzeti.



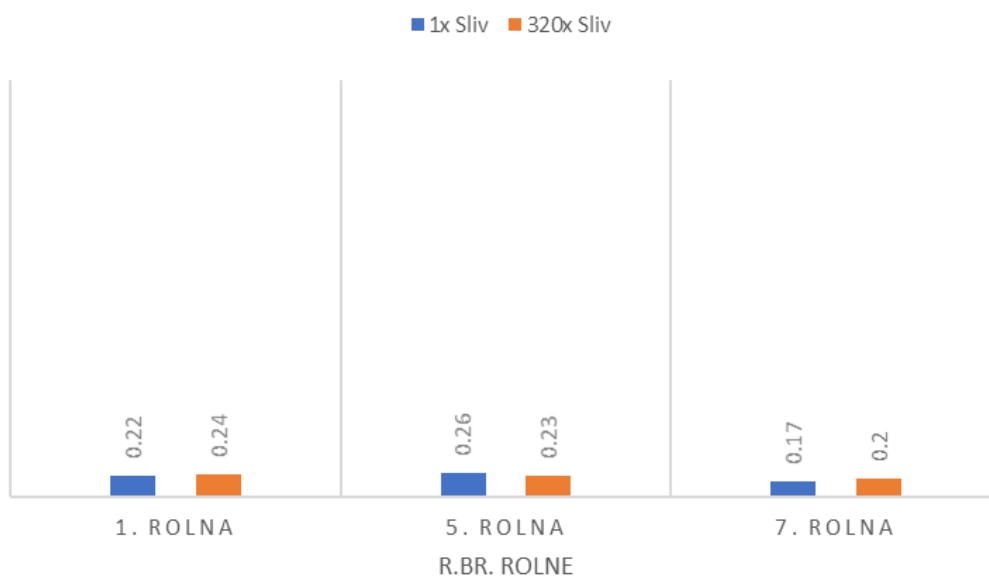
Grafik 6.3.33: Poređenje vrednosti motlinga - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna - Magenta

Najveća razlika u odnosu vrednosti parametara motlinga magenta uzoraka naspram odnosa ovih vrednosti cijan uzoraka je primetna na uzorcima preuzetim sa 1. rolne. Vrednosti motlinga kod magenta uzoraka štampanih pomoću 1x slivova preuzetih sa 1. rolne su neznatno više od vrednosti sa uzoraka štampanih pomoću 320x slivova.



Grafik 6.3.34: Poređenje vrednosti pokrivenosti - 1x i 320x slivovi - 1. 5. i 7. rolna - Magenta

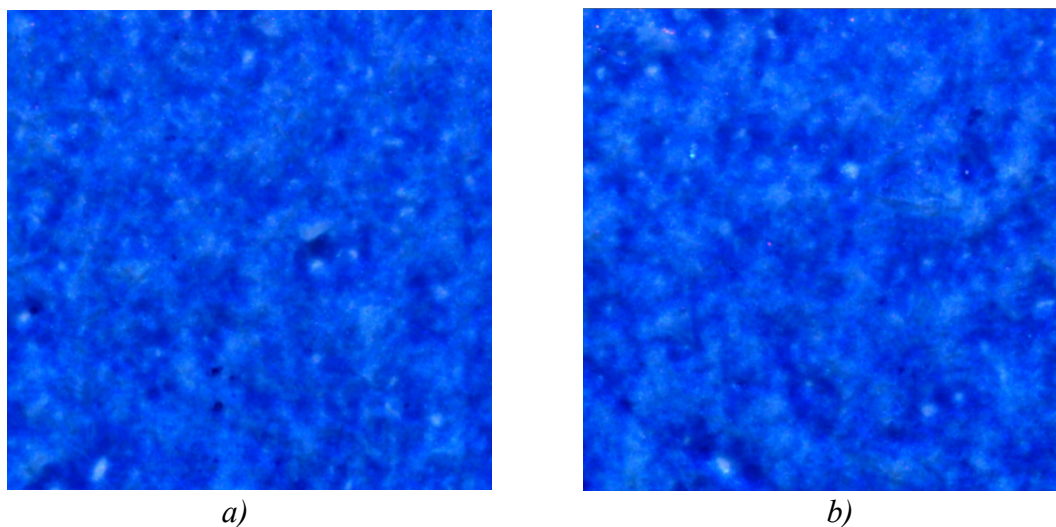
Po pitanju vrednosti parametara pokrivenosti, primetne su iste razlike između uzoraka štampanih različitim bojama kao za vrednosti motlinga.



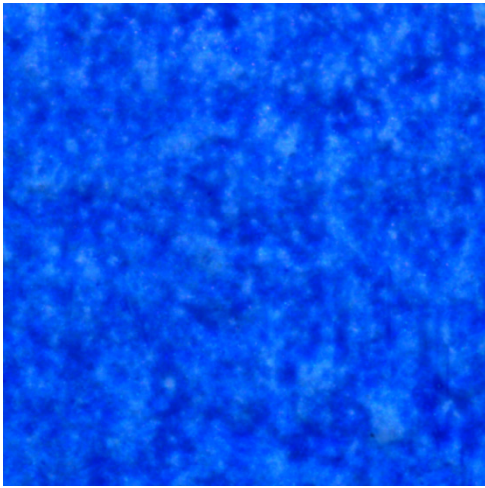
*Grafik 6.3.35. Poređenje vrednosti ISO 13660 zrnčavosti - 1x i 320x slivovi 1. 5. i 7. rolna - Magenta*

Promene i razlike u ISO 13660 zrnčavosti magenta uzoraka su kao i kod cijan uzoraka veoma male i bez primetnog trenda promene i pravila u razlici između uzoraka.

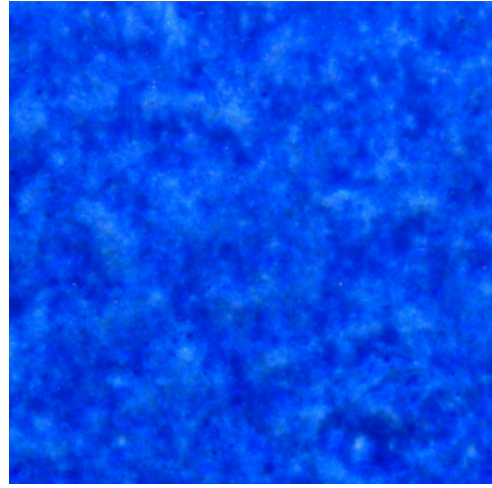
Snimci analiziranih površina cijan boje za 1. i 7. rolnu štampanu pomoću 1x slivova su prikazani na slici 6.3.3, a snimci istih polja sa rolni štampanih pomoću 320x slivova na slici 6.3.4. Snimci analiziranih površina punog tona magenta boje sa istih uzoraka prikazani su na slikama 6.3.5 i 6.3.6.



*Slika 6.3.3: Snimak polja punog tona cijan boje štampanog pomoću 1x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni*

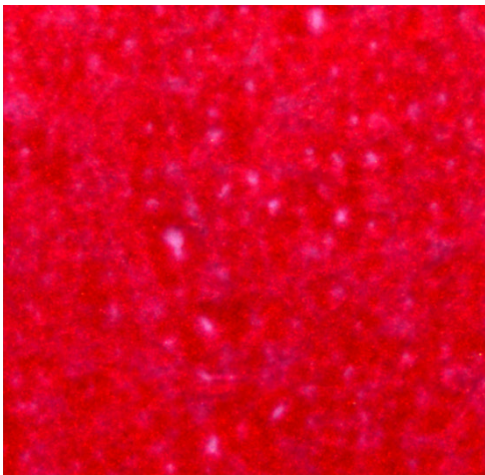


a)

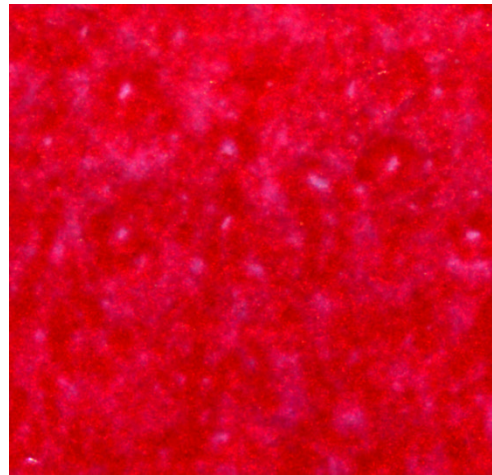


b)

*Slika 6.3.4: Snimak polja punog tona cijan boje štampanog pomoću 320x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni*



a)

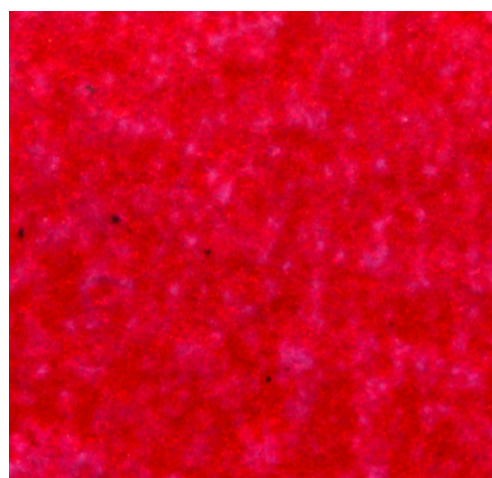


b)

*Slika 6.3.5: Snimak polja punog tona magenta boje štampanog pomoću 1x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni*



a)



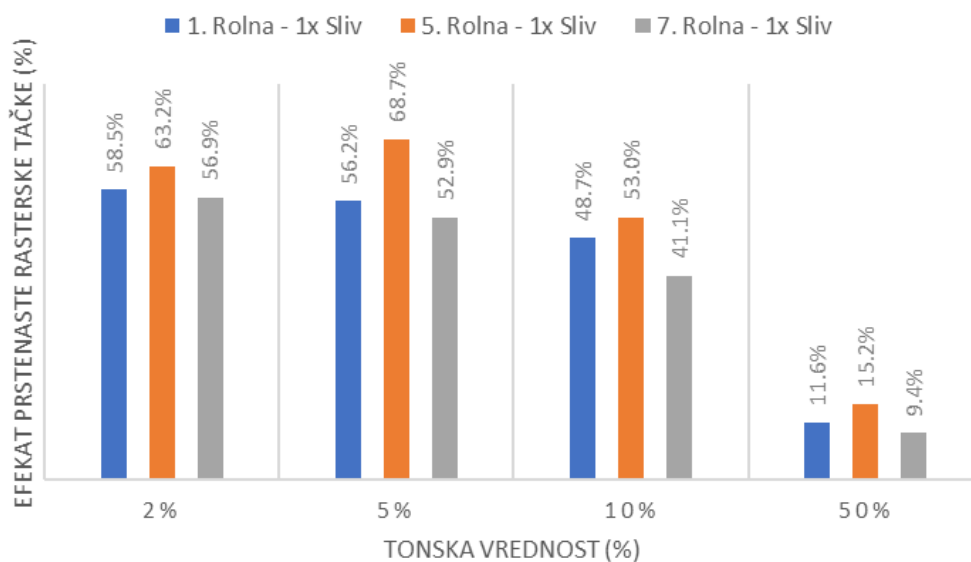
b)

*Slika 6.3.6: Snimak polja punog tona magenta boje štampanog pomoću 320x slivova na a) 1. rolni; b) 7. rolni*

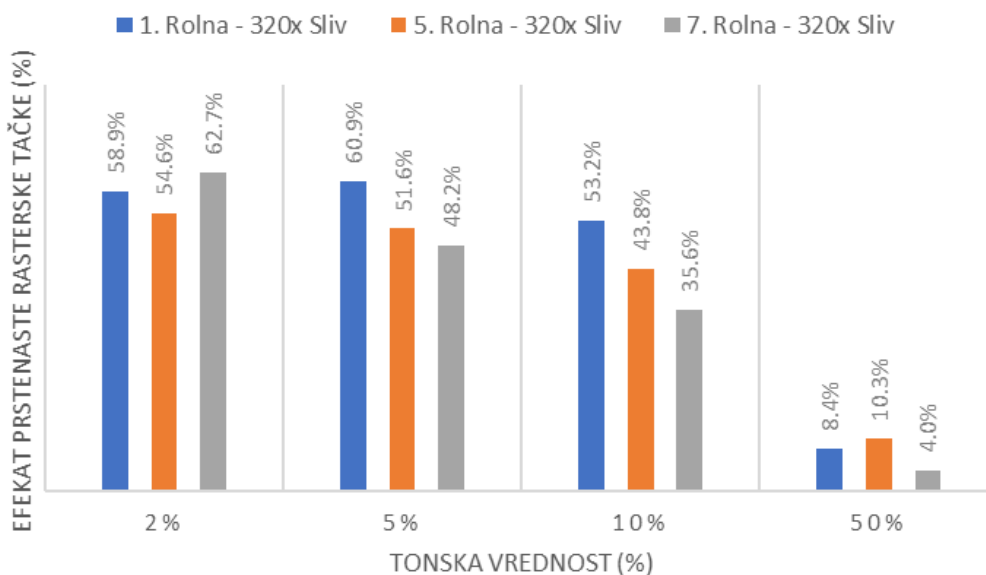
## 6.3.4 Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka

### 6.3.4.1 Efekat prstenaste rasterske tačke

Rezultati merenja izraženosti efekta prstenaste rasterske tačke i halo efekta po rolnama za uzorke štampane cijan bojom uz pomoć 1x i 320x slivova su prikazani na graficima 6.3.36 i 6.3.37 respektivno.



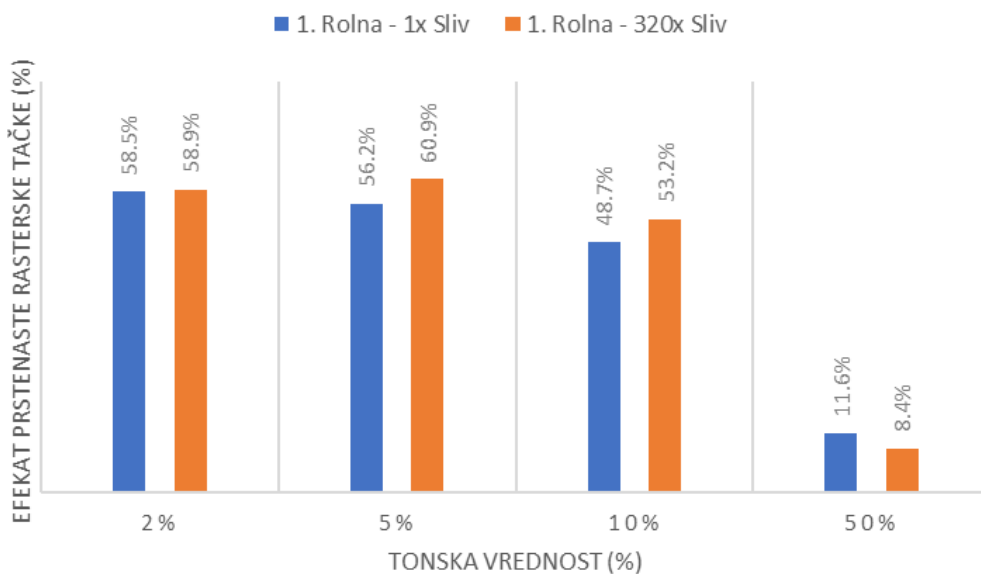
Grafik 6.3.36: Poređenje efekta prstenaste rasterske tačke - 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan



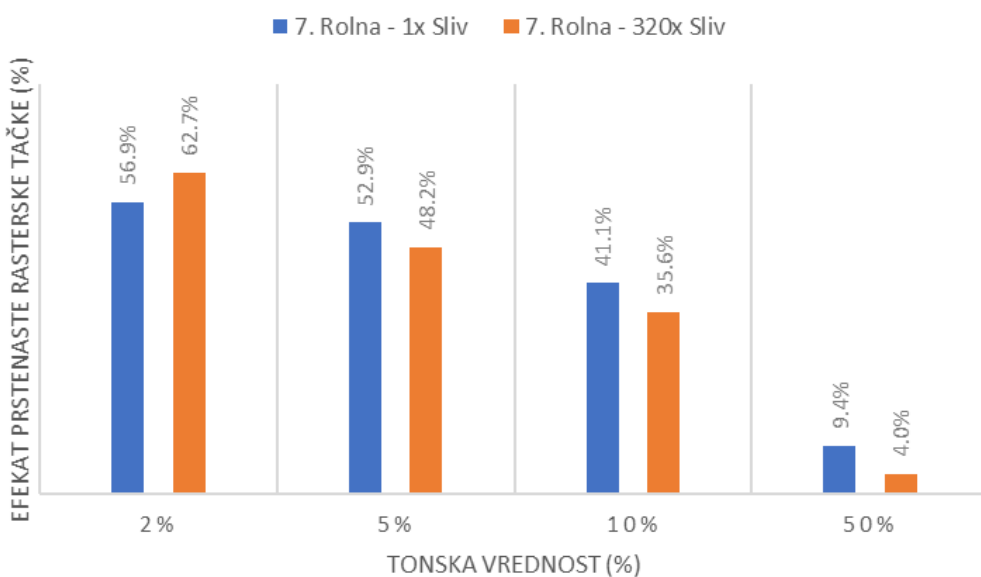
Grafik 6.3.37: Poređenje efekta prstenaste rasterske tačke - 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

Sa grafika se vidi da su efekti izraženiji kod 5. rolne štampane pomoću 1x slivova i da sa nastavkom štampe opadaju, tako da na merenjima uzoraka preuzetih sa 7. rolne pokazuju niže vrednosti od uzoraka sa 1. rolne. Kod štampe upotrebom 320x slivova je primetan stabilan opadajući trend izraženosti efekta prstenaste rasterske tačke sa porastom broja odštampanih rolni. Izuzetak su vrednosti izmerene na polju od 2 % TV na uzorku sa 7. rolne i polju od 50 % TV na uzorku preuzetom sa 5. rolne.

Razlike u izraženosti efekta prstenaste rasterske tačke i halo efekta između uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova, preuzetih sa 1. i 7. rolni su prikazane na graficima 6.3.38 i 6.3.39.



Grafik 6.3.38: Poređenje efekata prstenaste rasterske tačke - 1x i 320x slivovi 1. rolna - Cijan

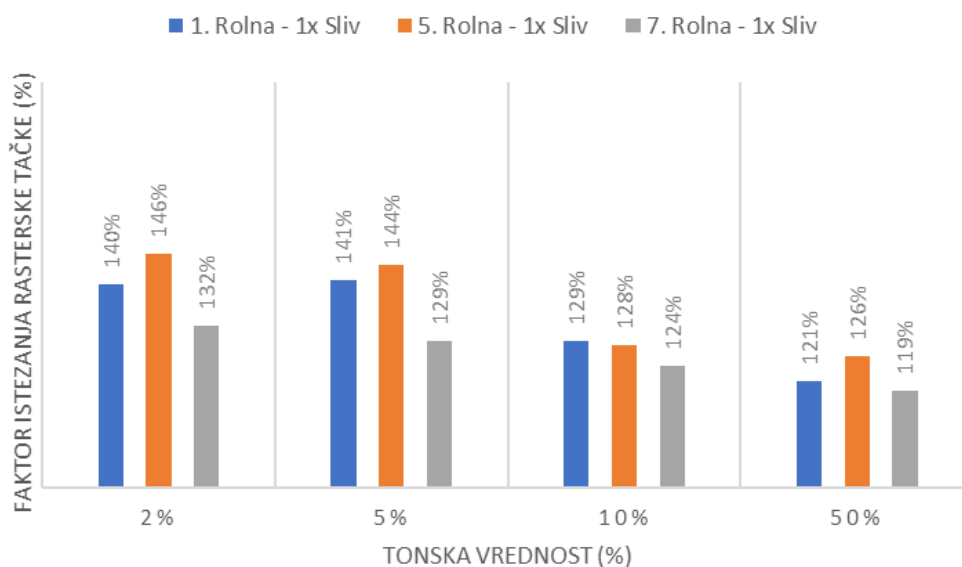


Grafik 6.3.39: Poređenje efekata prstenaste rasterske tačke - 1x i 320x slivovi 7. rolna - Cijan

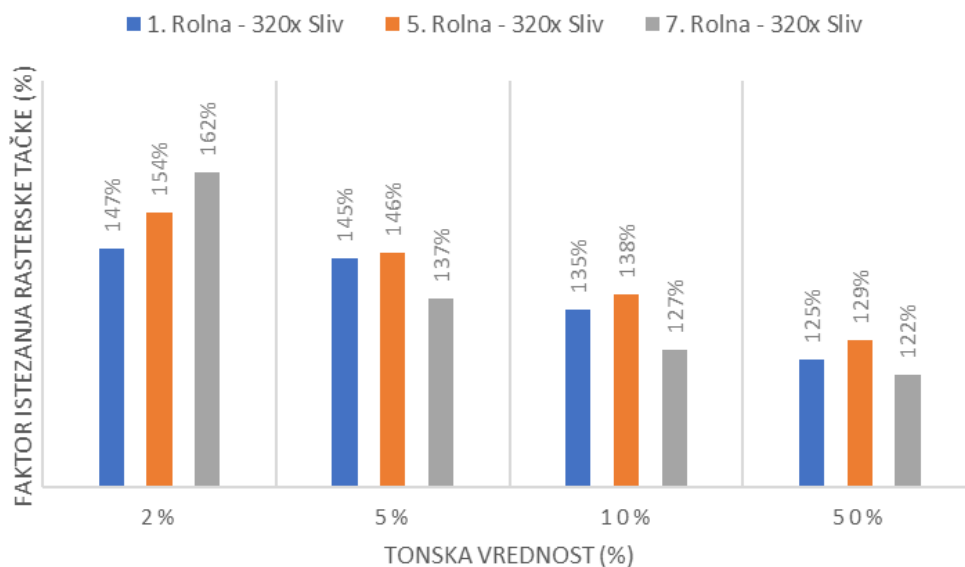
Sa porastom broja štampanih rolni, efekat prstenaste rasterske tačke značajnije opada na uzorcima štampanim pomoću 320x slivova. Izraženije smanjenje efekta dovodi do toga da je na 7. rolni on čak i manje izražen od efekta kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova, iako to nije bio slučaj pri štampi 1. rolne. Izuzetak u prethodnom zapažanju predstavlja polje od 2 % TV.

### 6.3.4.2 Istezanje rasterskih tačaka

Faktori istežanja rasterskih tačaka na poljima od 2, 5, 10 i 50 % TV na uzorcima sa 1. 5. i 7. rolne štampane pomoću 1x slivova su prikazani na grafiku 6.3.40, dok su rezultati merenja merenja ovog faktora za uzorke štampane pomoću 320x slivova prikazani na grafiku 6.3.41.



Grafik 6.3.40: Vrednosti faktora istežanja rasterske tačke  
1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan

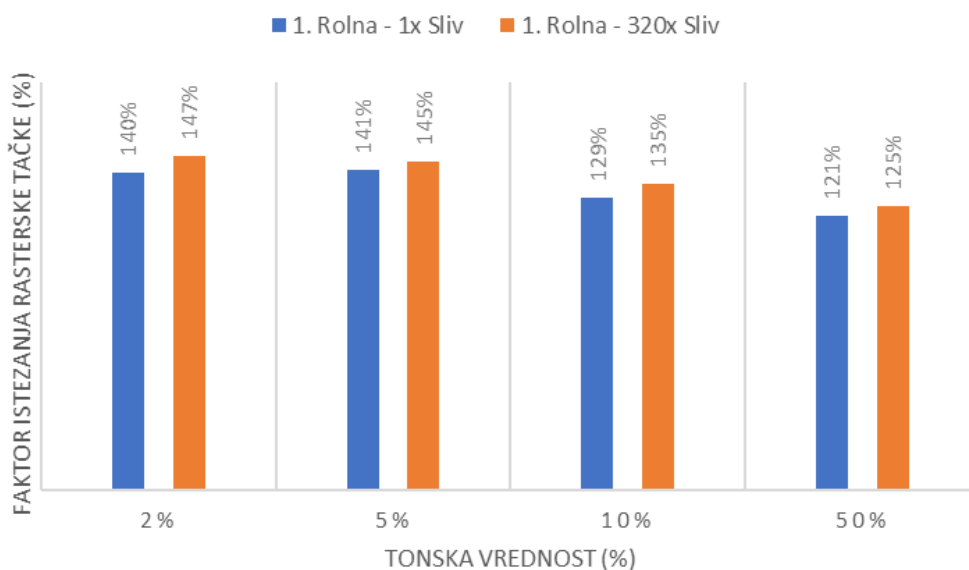


Grafik 6.3.41: Vrednosti faktora istežanja rasterske tačke  
1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

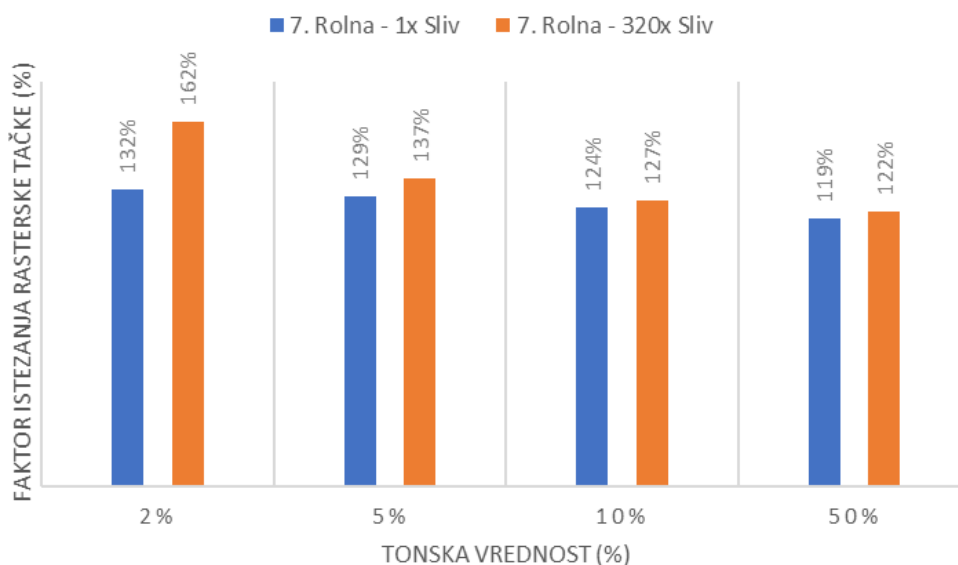
Rast faktora istežanja rasterske tačke između 1. i 5. rolne je u slučaju štampe cijan bojom praćen njegovim padom ka 7. rolni kako kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova, tako i kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova. Izuzetak je kontinualan rast faktora kod štampe polja od 2 % TV pomoću 320x slivova.



Razlike faktora istežanja rasterskih tačaka između uzoraka preuzetih sa 1. rolne štampane pomoću 1x i 320x slivova su prikazane na grafiku 6.3.42, a za uzorke preuzete sa 7. rolne na grafiku 6.3.43.



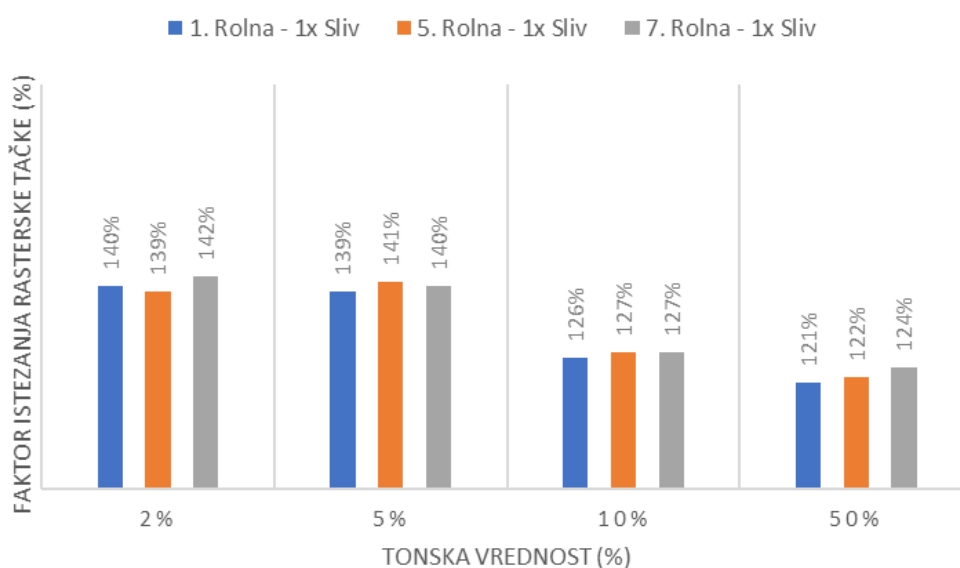
*Grafik 6.3.42: Poređenje faktora istežanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan*



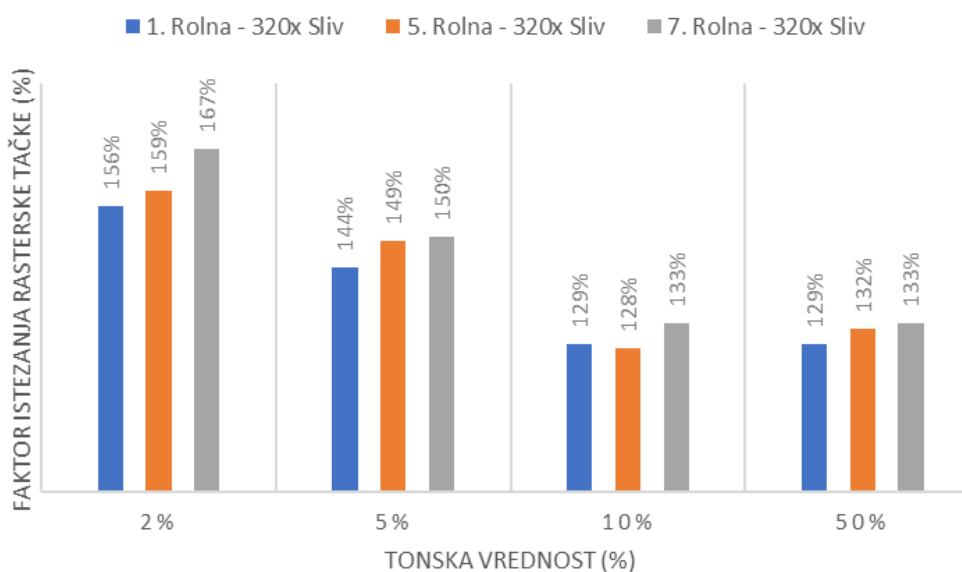
*Grafik 6.3.43: Poređenje faktora istežanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan*

Inicijalno veće vrednosti faktora kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova ostaju zadržane bez značajnije promene kroz štampu svih rolni uprkos globalnom padu faktora istežanja. Jedina značajnija promena je primetna na polju od 2 % TV preuzetom sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova, gde umesto pada dolazi do naglog rasta faktora istežanja rasterskih tačaka.

Rezultati merenja faktora istežanja rasterskih tačaka na uzorcima štampanim magenta bojom su prikazani na grafiku 6.3.44 za sve rolne štampane pomoću 1x slivova i grafiku 6.3.45 za sve rolne štampane pomoću 320x slivova.



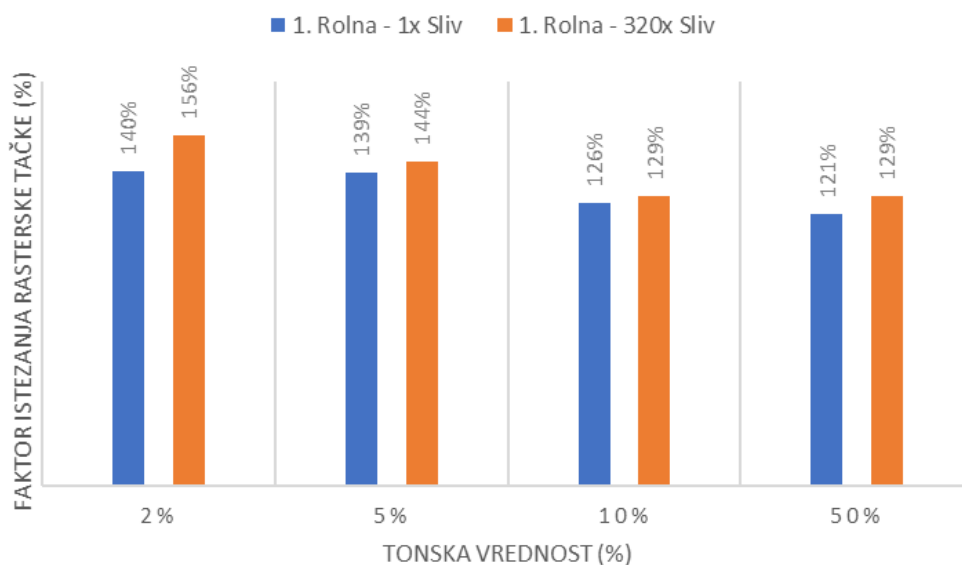
Grafik 6.3.44: Vrednosti faktora istežanja rasterske tačke  
1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta



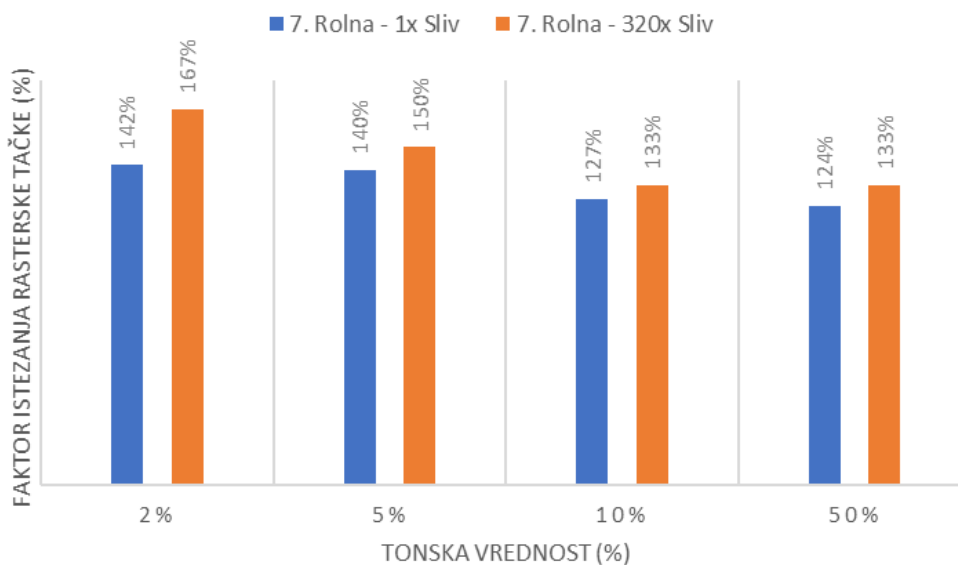
Grafik 6.3.45: Vrednosti faktora istežanja rasterske tačke  
1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta

Faktor istežanja rasterskih tačaka u slučaju štampe magenta bojom je kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova relativno konstantan uz manji rast ka 7. rolni. Kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova, ovaj faktor pokazuje primetan trend rasta sa značajnijim razlikama u vrednostima merenim između uzoraka preuzetih sa različitim rolni.

Razlike faktora istežanja rasterskih tačkica između uzoraka magenta boje preuzetih sa 1. rolne štampane pomoću 1x i 320x slivova su prikazane na grafiku 6.3.46., a za uzorke preuzete sa 7. rolne na grafiku 6.3.47.



*Grafik 6.3.46: Poređenje faktora istežanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta*

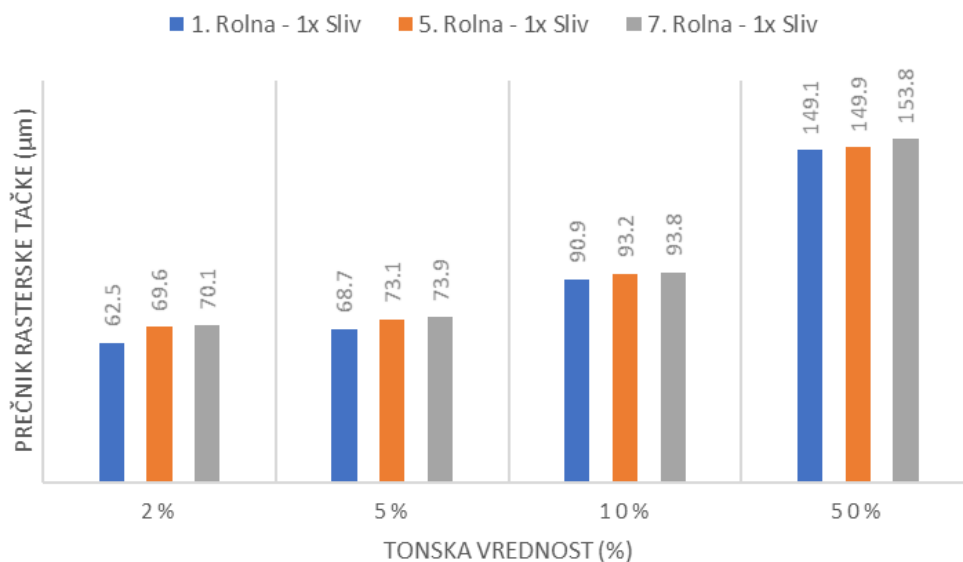


*Grafik 6.3.47: Poređenje faktora istežanja rasterske tačke 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta*

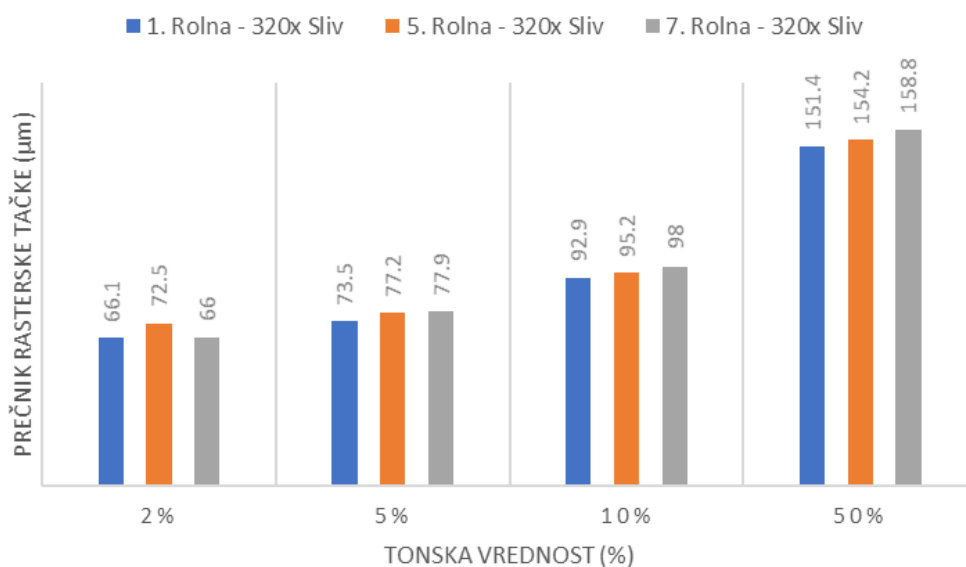
Inicijalna razlika između faktora istežanja rasterskih tačkica na uzorcima štampanim pomoću 1x i 320x slivova se povećava sa porastom broja odštampanih rolni, pre svega usled intenzivnijeg rasta ovog faktora na uzorcima sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova.

### 6.3.4.3 Prečnik rasterskih tačaka

Na graficima 6.3.48 i 6.3.49 su prikazane izmerene vrednosti prečnika rasterskih tačaka na poljima tonskih vrednosti cijan boje sa uzoraka preuzetih sa različitih rolni štampanih pomoću 1x i 320x slivova respektivno.



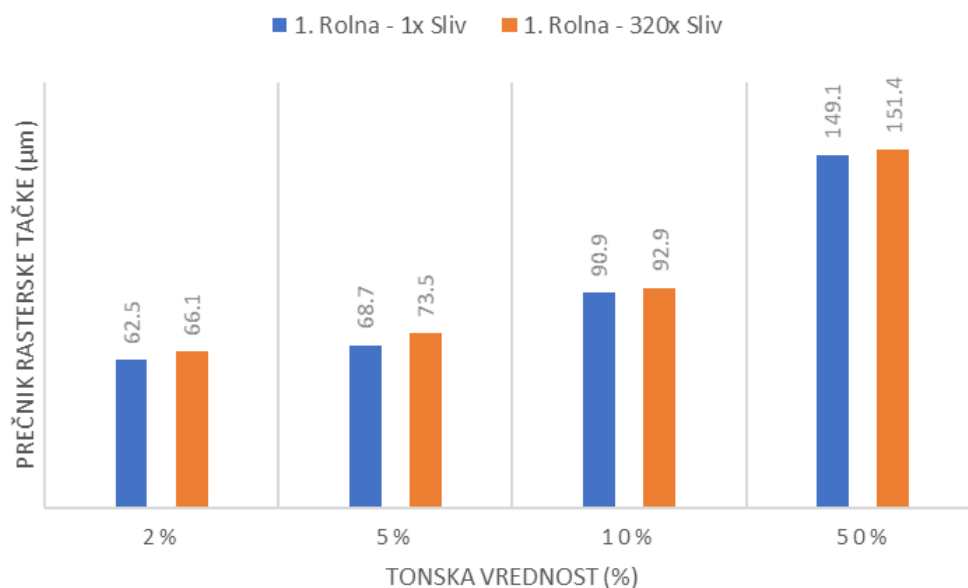
Grafik 6.3.48: Vrednosti prečnika rasterskih tačaka  
1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan



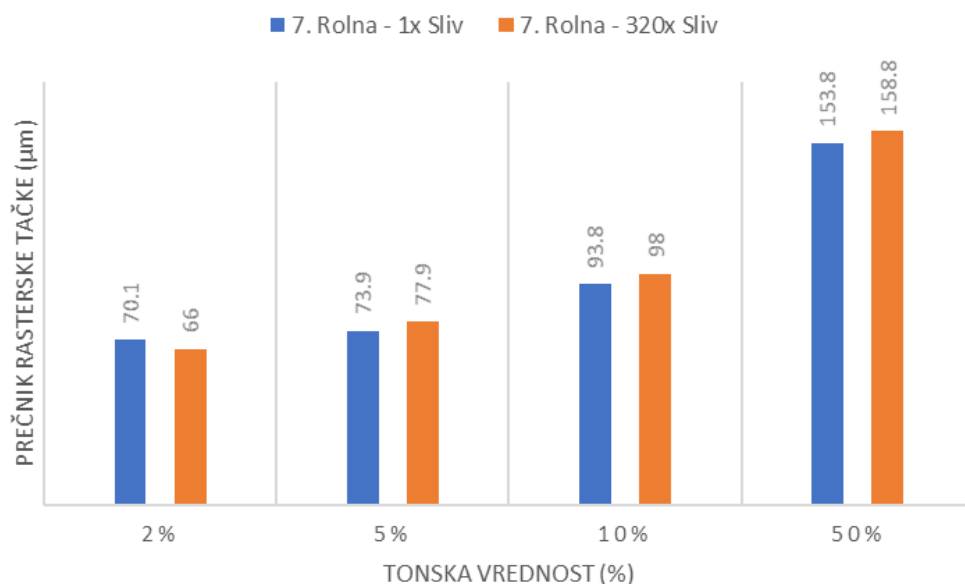
Grafik 6.3.49: Vrednosti prečnika rasterskih tačaka  
1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

Promene u prečnicima rasterskih tačaka na poljima kritičnih tonskih vrednosti štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova pokazuju stabilan rast sa porastom broja štampanih rolni. Izuzetak je prečnik tačke na polju od 2 % TV na uzorcima preuzetim sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova.

Grafici 6.3.50 i 6.3.51 prikazuju razliku između vrednosti prečnika rasterskih tačaka na uzorcima dobijenim štampanom pomoću 1x i 320x slivova, preuzetim sa 1. i 7. rolne respektivno.



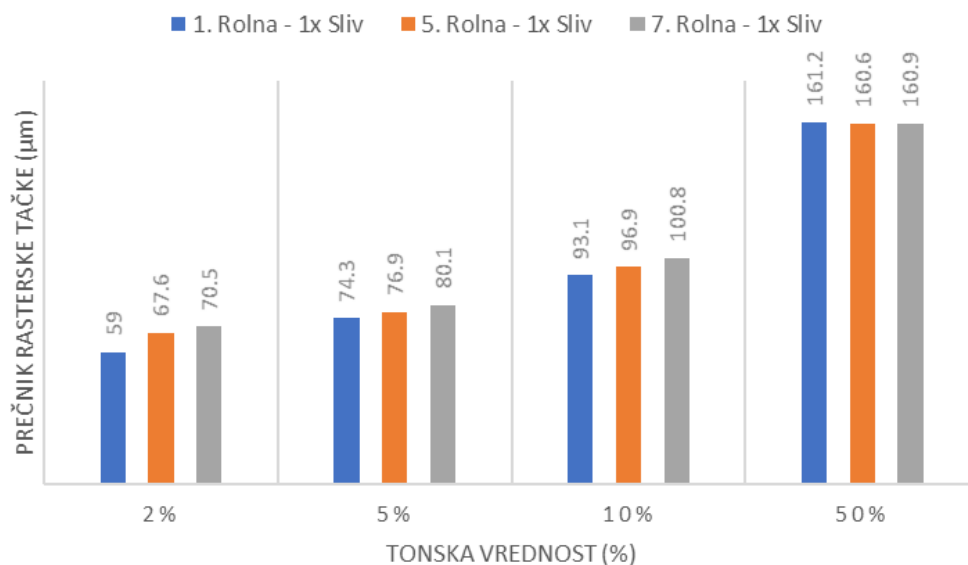
Grafik 6.3.50: Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan



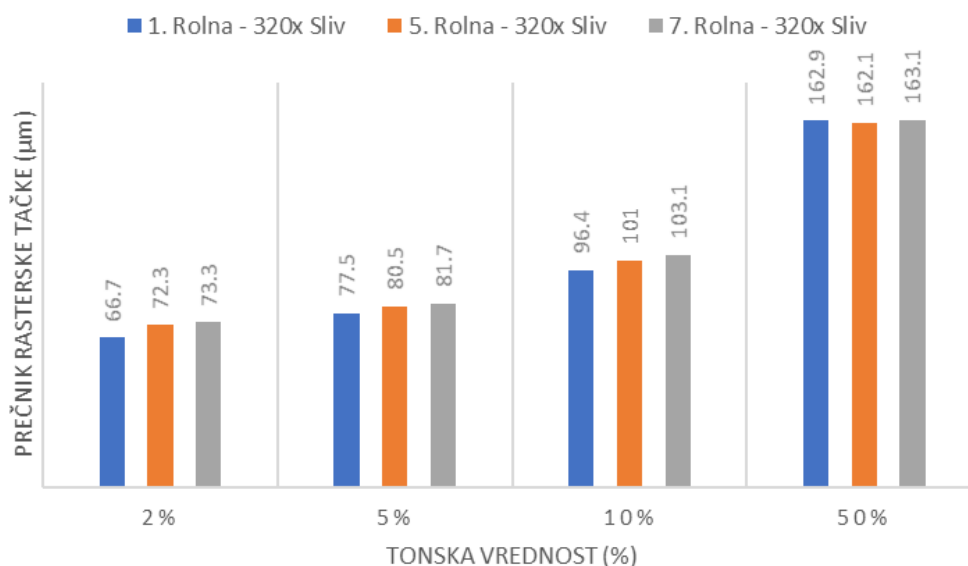
Grafik 6.3.51: Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan

Sa grafika 6.3.50 i 6.3.51 se može videti da su prečnici rasterskih tačaka veći prilikom štampe pomoću 320x slivova bez obzira na broj odštampanih rolni, sa izuzetkom polja od 2 % TV na uzorcima preuzetim sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova.

Rezultati merenja prečnika rasterskih tačaka magenta boje na uzorcima preuzetim sa rolni štampanih pomoću 1x slivova su prikazani na grafiku 6.3.52, a sa rolni štampanih pomoću 320x slivova na grafiku 6.3.53.



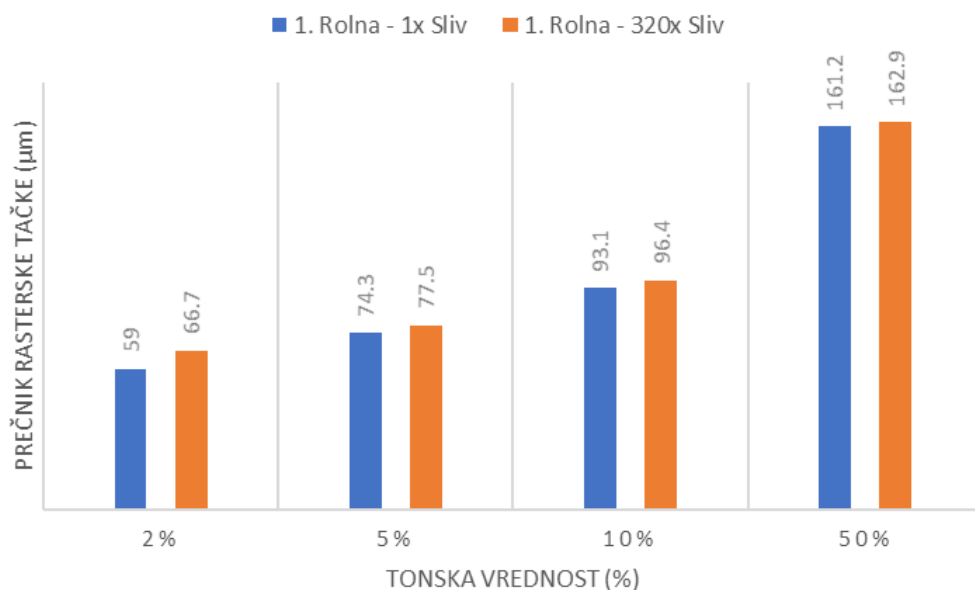
*Grafik 6.3.52: Vrednosti prečnika rasterskih tačaka  
1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta*



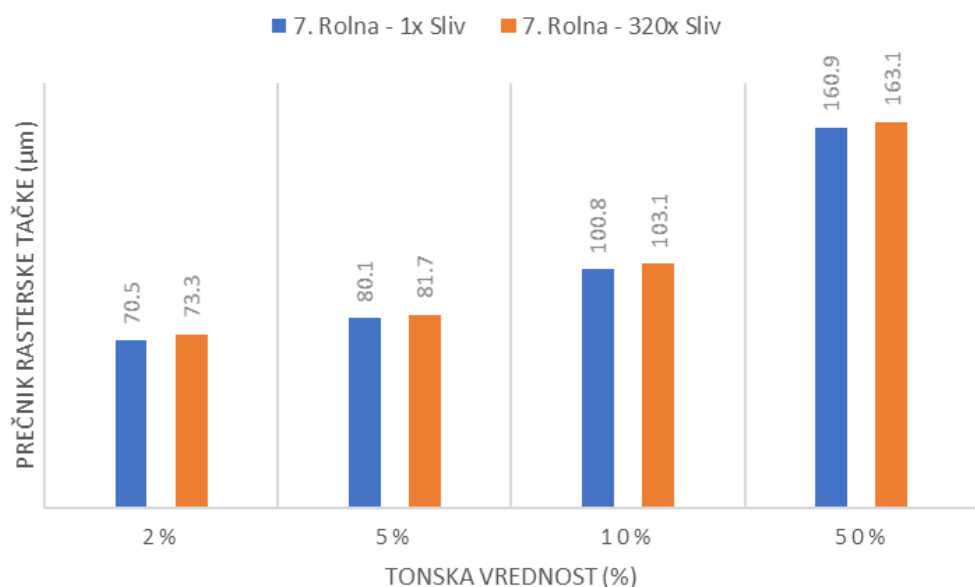
*Grafik 6.3.53: Vrednosti prečnika rasterskih tačaka  
1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta*

Trend promene prečnika rasterskih tačaka na uzorcima štampanim magenta bojom odgovara trendu promene kod uzoraka štampanih cijan bojom. Iako je trend promene isti, razlike u vrednostima prečnika rasterskih tačaka između uzoraka preuzetih sa različitih rolni štampanih magenta bojom su izraženije, bez obzira na nivo eksploatisanosti slivova. Izuzetak u ovom zapažanju predstavlja polje od 50 % TV. Pored toga, vrednosti prečnika rasterskih tačaka su veće na uzorcima štampanim magenta bojom.

Na graficima 6.3.54 i 6.3.55 prikazana je razlika između vrednosti prečnika rasterskih tačaka na uzorcima dobijenim štampom magenta bojom pomoću 1x i 320x slivova, preuzetim sa 1. i 7. rolne respektivno.



Grafik 6.3.54: Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta



Grafik 6.3.55: Poređenje prečnika rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta

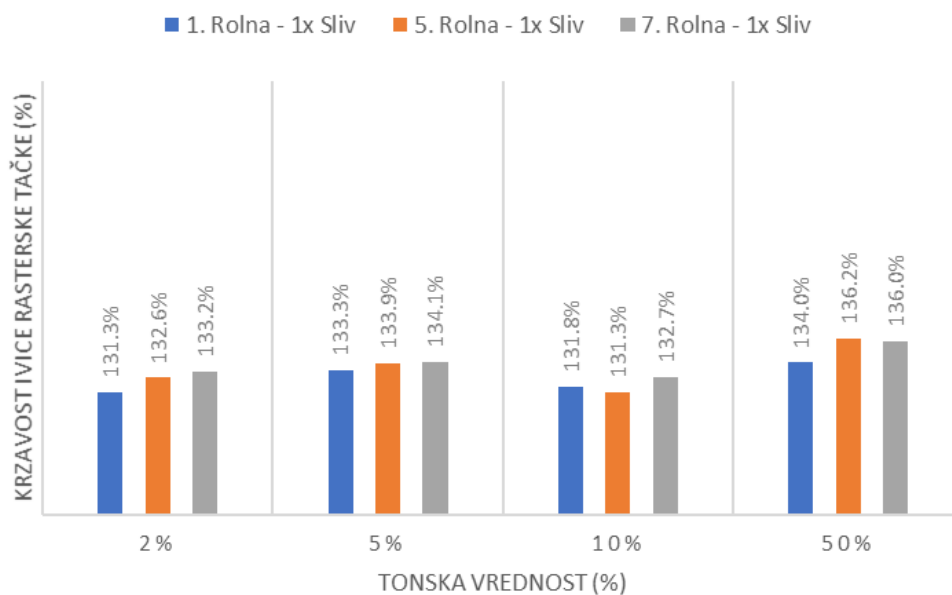
Vrednosti prečnika rasterskih tačaka na uzorcima štampanim magenta bojom pomoću 320x slivova su bez izuzetaka veće od prečnika rasterskih tačaka štampanih pomoću 1x slivova.

Još jedno globalno zapažanje je da su prečnici rasterskih tačaka veći na uzorcima štampanim pomoću 320x slivova, bez obzira na korišćenu boju i broj štampanih rolni. Jedini izuzetak u ovom zapažanju je prethodno spomenuto polje od 2 % TV cijan boje na uzorcima preuzetim sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova.

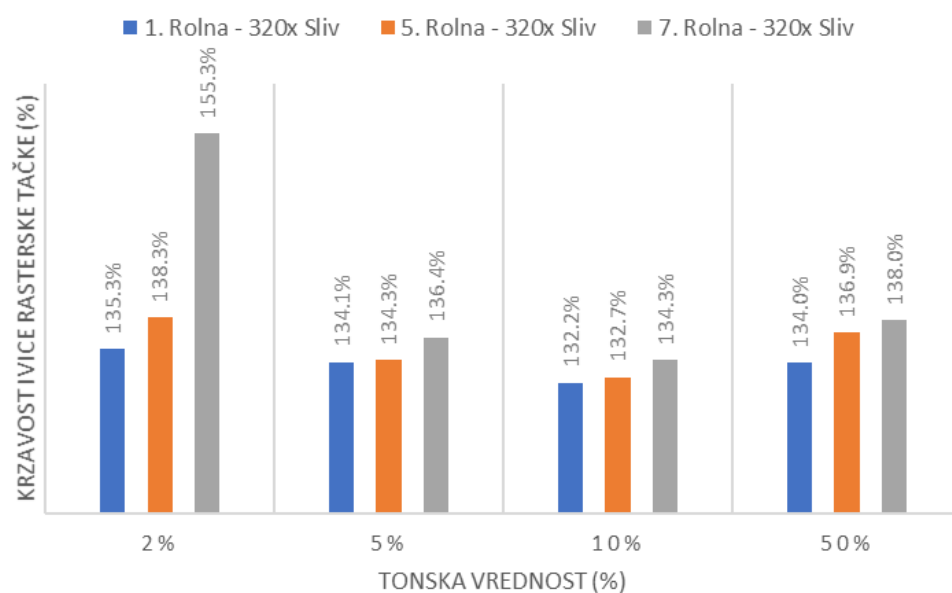
#### 6.3.4.4 Krzavost ivica rasterskih tačaka

Rezultati merenja faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka na poljima različitih tonskih vrednosti cijan boje uzoraka preuzetih sa 1. 5. i 7. rolne štampane pomoću 1x i 320x slivova su prikazani na graficima 6.3.56 i 6.3.57 respektivno.





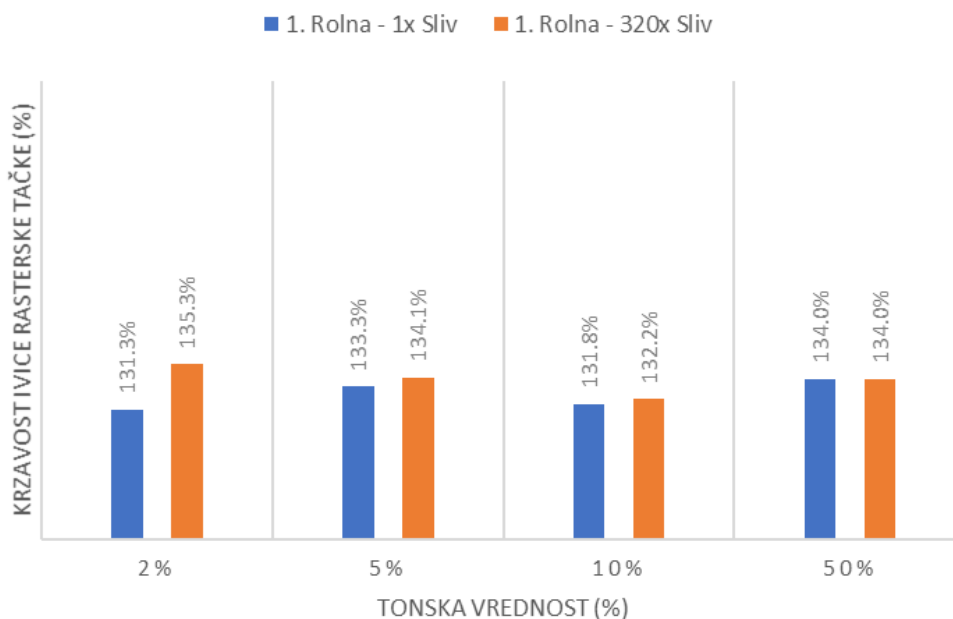
Grafik 6.3.56: Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Cijan



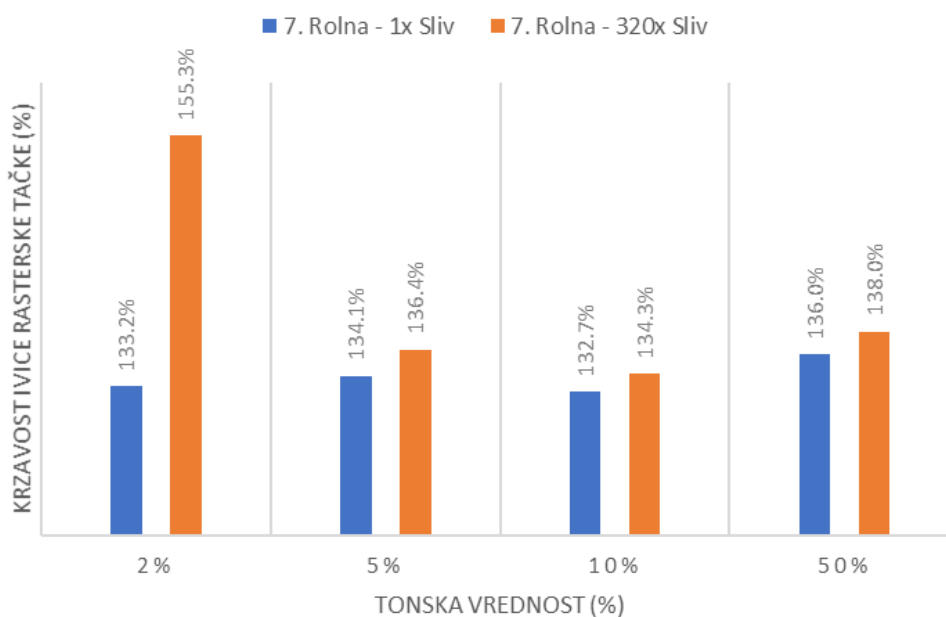
Grafik 6.3.57: Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Cijan

Krzavost ivica rasterskih tačaka cijan boje ima rastući trend sa porastom broja odštampanih rolni nezavisno od korišćenih slivova. Promena krzavosti ivica rasterskih tačaka uglavnom postaje značajnije izražena tek tokom štampe 7. rolni pomoću 320x slivova. Najveće odstupanje od pravilnosti promene vrednosti se ogleda u naglom porastu vrednosti ovog faktora kod rasterskih tačaka na polju od 2 % TV cijan boje uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova.

Na graficima 6.3.58 i 6.3.59 su prikazane razlike faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka na poljima različitih tonskih vrednosti cijan boje u zavisnosti od korišćenih slivova na uzorcima preuzetim sa 1. i 7. štampane rolne respektivno.



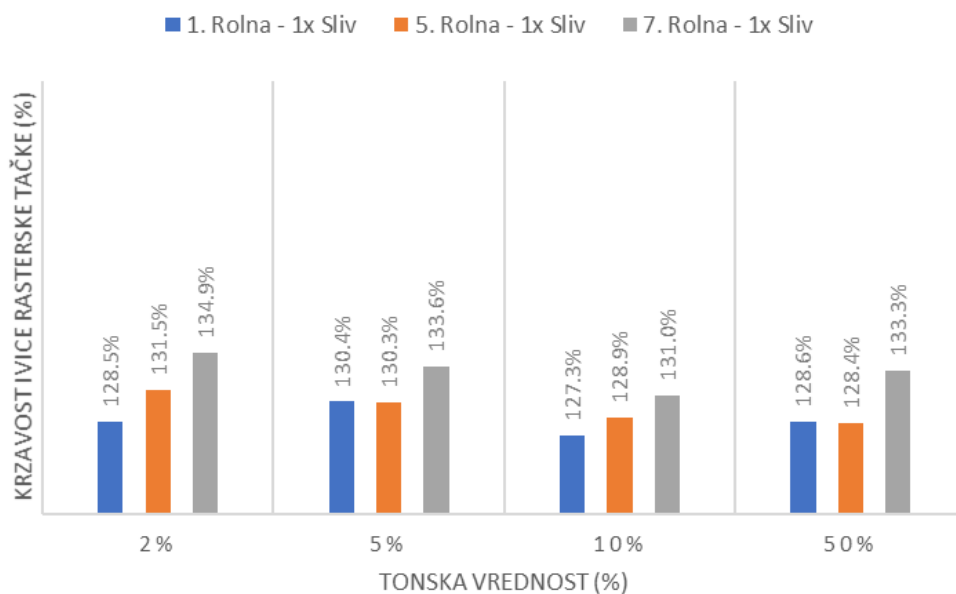
Grafik 6.3.58: Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Cijan



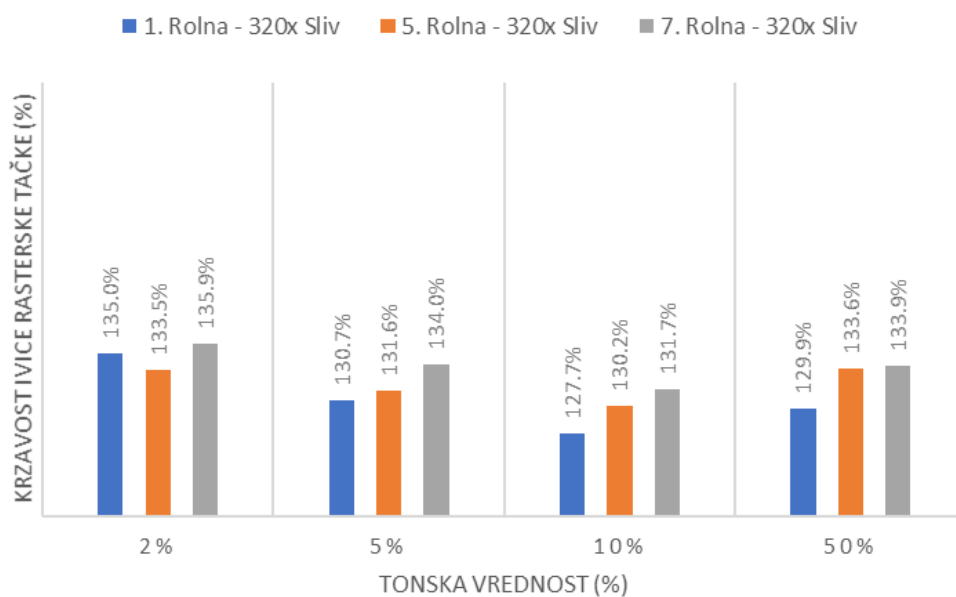
Grafik 6.3.59: Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Cijan

Vrednosti faktora krzavosti ivica su prilikom štampe 1. rolne relativno izjednačene bez obzira na korišćene slivove, izuzev na polju od 2 % TV gde su vrednosti faktora kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova nešto veće. Međutim, na uzorcima preuzetim sa 7. rolne dolazi do veće razlike između vrednosti ovog faktora između uzoraka štampanih slivovima različitog nivoa eksploataisanosti. Do toga dolazi usled značajnijeg rasta vrednosti faktora uzoraka štampanih pomoću 320x slivova u odnosu na uzorke preuzete sa 1. rolne, a pogotovu na polju od 2 % TV.

Rezultati merenja faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka uzoraka štampanih magenta bojom pomoću 1x slivova su prikazani na grafiku 6.3.60, a uzoraka štampanih pomoću 320x slivova na grafiku 6.3.61.



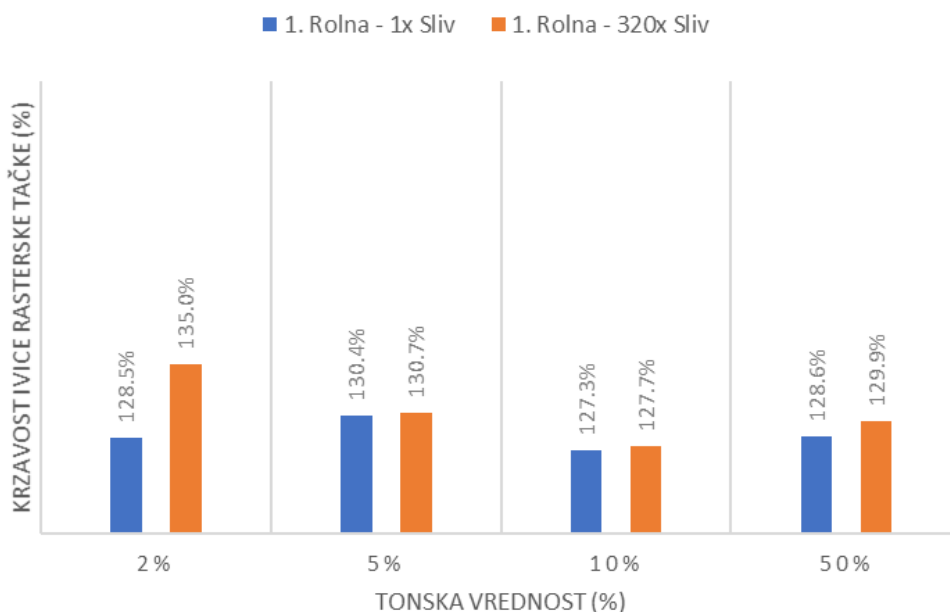
Grafik 6.3.60: Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačka 1. 5. i 7. rolna - 1x slivovi - Magenta



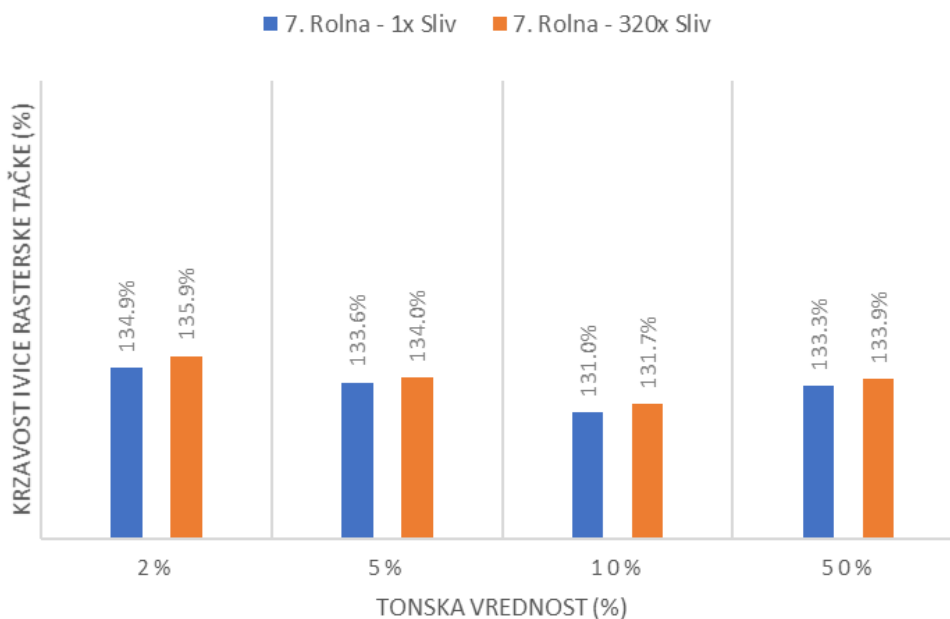
Grafik 6.3.61: Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačka 1. 5. i 7. rolna - 320x slivovi - Magenta

Promene faktora krzavosti ivica rasterskih tačka magenta boje izazvane brojem štampanih rolni prate isti trend, ali su izraženije nego u slučaju merenja na uzorcima cijan boje, iako su same vrednosti faktora manje. Do značajnijih promena u vrednostima faktora u slučaju uzoraka štampanih pomoću 1x slivova dolazi nakon štampe 5. rolne (izuzev na polju od 2 % TV), dok kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova do ove pojave dolazi ranije, pa se značajniji rast faktora beleži već na 5. štampanoj rolni. Dalje promene faktora krzavosti rasterskih tačka sa porastom broja rolni štampanih pomoću 320x slivova su slabije izražene. Prema tome, značajnije razlike u odnosu na uzorke štampane pomoću 1x slivova su prisutne pretežno na uzorcima preuzetim sa 5. rolni, kao i na uzorcima preuzetim sa polja od 2 % TV na 1. rolni.

Na graficima 6.3.62 i 6.3.63 su prikazane razlike faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka na poljima različitih tonskih vrednosti magenta boje uzoraka štampanih pomoću slivova različitog nivoa eksploatisanosti, a preuzetih sa 1. i 7. štampane rolne respektivno.



Grafik 6.3.62: Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 1. rolna - Magenta



Grafik 6.3.63: Poređenje faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka 1x i 320x slivovi - 7. rolna - Magenta

Vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka na uzorcima preuzetim sa 1. i 7. rolni su gotovo izjednačene, bez obzira na nivo eksploatisanosti slivova korišćenih tokom štampe. Pored toga, izjednačenost vrednosti ovog faktora je na višem nivou nego što je to slučaj sa uzorcima štampanim cijan bojom. Jedini izuzetak je polje od 2 % TV na uzorcima preuzetim sa 1. rolne, gde je razlika u vrednostima izražena čak i više nego kod odgovarajućih uzoraka štampanih cijan bojom.

## 7 DISKUSIJA REZULTATA

### 7.1 Zaostatak deformacije

Dvostruka razlika u vrednostima zaostatka deformacije 1x i 320x slivova potiče od elastičnog izvijanja strukturnih ligamenata i zidova ćelija. Elastično izvijanje je tesno povezano sa istorijom opterećenja, a polimerni materijal koji gradi strukturne ligamente i zidove ćelija takođe trpi zamor i degradaciju. Pri rasterećenju, rezilijentni i elastični materijali bi trebalo da pokažu brz oporavak strukturnih ligamenata ćelija od izvijanja. Međutim, zbog zamora, brzina povratka kod 320x slivova je smanjena, pa je i zaostatak deformacije pri cikličnom testu veći od zaostatka kod 1x slivova koji nemaju istoriju podvrgavanja opterećenjima.

Do stabilizacije zaostatka deformacije dolazi delimično i usled omekšavanja materijala prouzrokovanog hemijskim sastavom polimera. Upravo to omekšavanje dovodi i do stabilizacije histerezisa. Do potpune stabilizacije dolazi nakon 20. ciklusa. Međutim, veće oscilacije u vrednostima zabeležene kod 320x slivova ukazuju na neravnomernost pri eksploataciji i ponašanju elemenata mikrostrukture.

Procenat zaostatka deformacije koji je već nakon drugog ciklusa kod 320x slivova gotovo 50 % veći od zaostatka deformacije 1x slivova u 99. ciklusu značajno utiče na to da pri brzim cikličnim opterećenjima, kakva su ona u štampi, sliv ne stiže da se vrati na prvobitne dimenzije, pa ostaje prividno trajno deformisan. Na taj način dolazi do smanjenja prečnika i mogućnosti kompenzacije opterećenja nastalih usled Kiss Print pritiska. To dalje znači da se deformacije izazvane pritiskom moraju ispoljiti na drugom materijalu, a to je fotopolimerna štamparska forma.

Bitno je napomenuti da se brzina obrtanja osovine koja nosi sliv ne menja da bi kompenzovala smanjenje prečnika. To znači da štamparska forma usled veće brzine na površini počinje da proklizava u kontaktu sa podlogom za štampu. Prapatne pojave izazvane ovom promenom će biti detaljnije opisane u delu diskusije koji se tiče istežanja rasterskih tačaka.

### 7.2 Maksimalan napon

Razlika od oko 10 % u maksimalnom naponu pri testiranju znači da se novi sliv više opire deformaciji u elastičnoj zoni. Strukturni ligamenti ćelija kod 1x slivova nisu trpeli ranija opterećenja, pa imaju veću sposobnost elastičnog opiranja deformaciji. Ako je otpor pri deformisanju manji, sile koje potiču od Kiss Print pritiska mogu lakše da sabiju materijal. Materijal se tako približava zoni zgušnjavanja strukture u kojoj se deformacija sporije menja, a sile pritiska nisu dovoljno velike da bi sabile kompresibilni sloj sliva. Zbog nemogućnosti izazivanja daljih promena kompresibilnog sloja slivova, ove sile svoje dejstvo ispoljavaju na finim rasterskim elementima fotopolimernih štamparskih formi. Stabilizacija napona primećena nakon 70. ciklusa može da se pripíše akumuliranoj privremenoj deformaciji i olakšanom izvijanju zidova ćelija nakon omekšavanja roditeljskog polimera.

### 7.3 Jungov modul elastičnosti

Promena Jungovog modula elastičnosti prati promenu zaostatka deformacije. Zaostatak deformacije vrši uticaj koji se lako može uočiti na delu krive napon-deformacija koji odgovara fazi opterećenja. Naime, ovom delu krive biva oduzeta inicijalna faza čime njen nagib raste. Do rasta modula elastičnosti dolazi upravo zbog isključenja početne faze krive, gde je

potreban manji napon za veću deformaciju. Pored toga, modul elastičnosti 1x slivova je veći. To znači da se materijal više opire elastičnoj deformaciji, odnosno da nije zadobio svojstvo "memorije" usled ponovljenog elastičnog izvijanja. Jungov modul 1x slivova ranije dostiže stabilizaciju iz istih razloga.

## 7.4 Histerezis gubitak

Histerezis gubitak doživljava najveći pad nakon prvog ciklusa kada dolazi do zatvaranja histerezis petlje. Krive rasterećenja se ne menjaju značajno kroz cikluse, međutim krive opterećenja prolaze kroz promene sve do stabilizacije. Do promena dolazi usled omekšavanja materijala i reorganizacije segmenata polimerne strukture. Sledeći veliki pad histerezis gubitka nastaje nakon trećeg ciklusa, paralelno sa porastom zaostatka deformacije. Do toga dolazi zbog pomeranja početne tačke krive opterećenja i prve faze stabilizacije. To je faza gde se krajnja tačka krive rasterećenja sve više i više poklapa sa početnom tačkom njoj odgovarajuće krive opterećenja za posmatrani ciklus. Sa oscilacijama zaostale deformacije dolazi i do blagih oscilacija površine zahvaćene petljom, a samim tim i do promene veličina histerezis gubitaka. Do toga dolazi zbog promene količine apsorbovane, skladištene i rasute energije. Pri manjem zaostatku deformacije dolazi do povećanja apsorbovane energije. Međutim, tokom rasterećenja dolazi do rasta zaostatka deformacije, što znači da se povećava i razlika između apsorbovane i skladištene energije. Ta razlika je utrošena na generisanje toplote. Nakon stabilizacije zaostatka deformacije i maksimalnog napona (koji predstavljaju početnu i krajnju tačku histerezis petlje) dolazi i do stabilizacije histerezis gubitaka.

Generisana toplota se prenosi na štamparsku formu usled direktnog kontakta, a potom dovodi i do promene viskoziteta tankog filma boje na štampajućim elementima. Ovu promenu je moguće potvrditi promenama parametara kvaliteta otiska, među kojima je i prethodno spomenut faktor istežanja rasterskih tačaka o kom će biti reči u nastavku poglavlja.

## 7.5 Relaksacija napona i histerezis gubitak pri kompresiji sa zadržavanjem deformacije

Na početku faze rasterećenja, kod 320x slivova je primetan veći pad napona sa manjom promenom deformacije. To znači da se materijal sa manjim intenzitetom vraća u stanje u kom je bio pre opterećenja, odnosno da gubi na rezilijentnosti i elastičnosti. Uzrok toga može biti veće elastično izvijanje strukturnih ligamenata i zidova ćelija. Kod 1x slivova pad napona pri rasterećenju je ujednačen na celoj krivoj i manji je od pada napona kod 320x slivova. Ovo zapažanje ukazuje na to da su strukturni ligamenti i zidovi ćelija manje zahvaćeni posledicama elastičnog izvijanja, što materijalu daje veću rezilijentnost i elastičnost, odnosno ubrzan i olakšan povratak materijala u početno stanje nakon prestanka dejstva sila opterećenja.

Mala razlika u maksimalnom naponu izmerenom na uzorcima iz različitih grupa se može pripisati činjenici da je materijalu dopušteno da se "odmori" pri zadržavanju minimalne deformacije.

Strukturni ligamenti i zidovi ćelija 320x slivova se prilikom zadržavanja maksimalne deformacije više deformišu i izvijaju prilagođavajući na taj način penu deformaciji, a to kasnije dovodi do smanjenja otpora deformisanju. Kod 1x slivova, zamor polimernog materijala ligamenata izazvan prethodnim cikličnim opterećenjima nije toliko izražen, pa se ligamenti i zidovi ćelija više opiru elastičnom izvijanju i silama koje teže da ih deformišu. Sve to se manifestuje manjom relaksacijom napona u slučaju 1x slivova.

Tokom zadržavanja minimalne deformacije, strukturni ligamenti i zidovi ćelija se gotovo potpuno vraćaju u početno stanje. Kod 320x slivova, rast napona pri minimalnoj deformaciji je nešto manji od onog kod 1x slivova. To se može pripisati efektu zamora i istorije opterećivanja polimernog materijala strukturnih ligamenata i zidova ćelija.

Razlika u veličini histerezis gubitka potiče od zadržavanja deformacije koje dovodi do povećanja površine zahvaćene petljom. 320x sliv pokazuje veći histerezis gubitak koji odgovara i smanjenoj rezilijentnosti i mogućnosti materijala da vrati uloženu energiju. Energija se rasipa prilikom oporavka od elastičnog izvijanja, a vazduh unutar pene nailazi na veći otpor kretanju usled većeg elastičnog izvijanja, uz gubitak energije na generisanje toplote.

Razlika u histerezis gubitku između dve grupe uzoraka kroz cikluse ostaje gotovo nepromenjena. Tome doprinosi zadržavanje deformacije koje stabilizuje proces. Razlika je stabilna, ali i veća u odnosu na razliku pri cikličnom testu bez zadržavanja deformacije. Zadržavanjem u deformisanom stanju elementi mikrostrukture 320x slivova lakše gube na rezilijentnosti. Usled sporijeg i ograničenijeg vraćanja elemenata mikrostrukture u prvobitno stanje, vazduh unutar pene je primoran da savladava veće otpore pri toku, izazvane promenama oblika pene.

Još jedan od razloga zašto je pad histerezis gubitka kod 320x slivova nakon prvog ciklusa manje primetan nego kod cikličnog testa bez zadržavanja deformacije je i ubrzana stabilizacija histerezisa prouzrokovana zadržavanjem deformacije, pogotovu minimalne pri rasterećivanju.

## 7.6 Mehanička svojstva slivova pri testu probijanja iglom

Sprovođenjem testa probijanja iglom ustanovljeno je da dolazi do promena u mehaničkim svojstvima kompresibilnog sloja, ali ne i samolepljivog sloja Twinlock® slivova. Manja maksimalna sila, kao i rad potreban da igla savlada otpore materijala ukazuju na opadanje elastičnih svojstava materijala. Promena u molekularnoj strukturi roditeljskog polimera i istorija deformacija utiču na otpor kojima se ćelije pojedinačno i grupno suprotstavljaju kretanju igle. Zbog olakšanog elastičnog izvijanja, ćelije koje se nalaze ispod ćelija koje su u kontaktu sa iglom se sabijaju dovoljno da u zoni prelaska iz kompresibilnog u samolepljivi sloj igli inicijalno bude olakšan put. Međutim, pri nailasku na nagomilane izvijene ćelije kompresibilnog sloja, sila ponovo kontinualno raste tako da se prelazak igle u samolepljivi sloj ne primećuje na krivoj.

Elastična svojstva roditeljskog poliuretana su izraženija u slučaju 1x slivova. Takva svojstva materijala iziskuju veću silu i uloženi rad pri probijanju. Sa druge strane, usled umerenog izvijanja ćelija koje nisu u dodiru sa iglom, rezultujuća kriva sila-put igle je kontinualna.

Kod 320x slivova merenih sa strane samolepljivog sloja, vrednosti relevantnih parametara i oblik krive sila-put igle podsećaju na vrednosti 1x slivova merenih sa bilo koje strane. Do toga verovatno dolazi jer su ćelije koje su bliže samolepljivom sloju pretrpele više promena svojstava zato što su prve koje kompenzuju pritisak, pa se ponašaju slično bez obzira na nivo eksploatisanosti sliva. Pored toga, ćelije koje se u ovom slučaju nalaze sa suprotne strane od strane ulaska igle nemaju potporu koja je čvrsta kao samolepljivi sloj, koji predstavlja potporu pri merenju sa kompresibilne strane i na taj način dozvoljava olakšano nagomilavanje izvijenih ćelija.

## 7.7 Adhezivna svojstva i sastav samolepljivog sloja slivova

Dvostruko smanjenje jačine adhezije je dokazano sprovođenjem testova odlepljivanja ljuštenjem. Međutim, ovi testovi su čisto mehaničkog karaktera i ne daju objašnjenja uzroka nastale promene. Prema tvrdnji proizvođača, uz pravilno održavanje samolepljivi sloj ne bi trebalo da gubi adhezivna svojstva. Međutim, svaki materijal mora da pretrpi zamor.

Kako je hemijski sastav samolepljivog sloja Twinlock® slivova strogo čuvana tajna, objašnjenje uzroka promena treba potražiti baš u njemu.

Traženje uzroka u hemijskom sastavu je između ostalog opravdano i činjenicom da se tokom eksploatacije sa samolepljivog sloja veliki broj puta odlepljuju štamparske forme pri čemu je moguće odnošenje materijala. Pored toga, telo sliva tokom eksploatacije stupa u kontakt sa različitim supstancama poput boje, prašine i papirne prašine, pa je njegovu površinu potrebno očistiti rastvorom 1-metoksi-2-propanola. Čišćenje je operacija pri kojoj takođe može da dođe do promena koje se vremenom nagomilavaju i utiču na adhezivna svojstva slivova.

Pad udela akrilata kao osnovnog gradivnog materijala samolepljivog sloja i mnogih drugih adheziva osetljivih na pritisak sigurno dovodi do pada adhezije. Za poboljšavanje adhezivnih svojstava akrilatnog polimera koriste se i smole niske molekularne mase poput rozina (pojačivač lepljivosti) ili plasticizeri koji su najčešće građeni na bazi ftalata. Plasticizeri omogućavaju akrilatnim adhezivima povećanje sile razdvajanja i lakše ostvarivanje lepljivosti zbog povećane mekoće. Udeo ftalata i rozina je kod 320x slivova primetno manji, što uz pad udela akrilata predstavlja najverovatniji uzrok smanjenja jačine adhezije.

Pretpostavka da pri odlepljivanju štamparskih formi i čišćenju površine slivova dolazi do odnošenja materijala ili njegove promene je podržana i činjenicom da je kriva sila-pomeraj u slučaju 320x slivova manje konzistentna, odnosno ima učestale oscilacije u vidu pikova i dolja sile pri određenom pomeraju. To znači da udeo komponenata koje omogućavaju adheziju nije pretežno uniforman po celoj dužini uzorka, kao što je to slučaj kod 1x slivova.

Pad adhezije izmeren na 320x slivovima nije dovoljan da dovede do spontanog odizanja ivica štamparskih formi i odskakanja, grešaka u registru ili pak zaustavljanja mašine. Međutim, značajan pad vrednosti ukazuje na to da se po pitanju adhezivnih sposobnosti slivovi nalaze pri kraju životnog veka ukoliko se teži kontrolisanom i ponovljivom procesu štampe.

## **7.8 Analiza mikroskopskih snimaka poprečnog preseka Twinlock® sloja slivova**

Nepostojanje uočljive razlike u obliku i dimenzijama ćelija ukazuje na to da sile kojima je podvrgavan materijal nisu dovoljno velike da izazovu trajnu deformaciju mikrostrukture. Razlika u zaostaloj deformaciji vidljiva već nakon prvog ciklusa u testu cikličnog opterećenja ne zavisi od pretrpljene trajne deformacije ćelija jer nje prema mikroskopskim snimcima nema. Glavni uzrok promene bi mogao da bude u molekularnoj strukturi roditeljskog polimera od koga su sačinjeni strukturni ligamenti i zidovi ćelija. Oni se istovremeno sve lakše izvijaju, a sve sporije vraćaju u prvobitno stanje što doprinosi i otežanom kretanju fluida i trošenju apsorbirane energije na generisanje toplote.

Razlika u debljinama uzoraka iznosi 182.57  $\mu\text{m}$ , što je značajno velika vrednost jer su granice tolerancije spoljašnjeg prečnika postavljene od strane proizvođača takve da dozvoljavaju maksimalnu razliku od 40  $\mu\text{m}$  ( $\pm 20 \mu\text{m}$ ). Najmanji nivo stabilnosti su pokazali tanki slojevi koji služe za spajanje ostalih slojeva i poliesterski sloj. Međutim, ovi slojevi su najtanji pa ne nose značajan udeo u ukupnoj promeni debljine, odnosno zaostatku deformacije. Najveći nivo stabilnosti sa razlikom od samo 5.1 % je pokazao poliuretanski kompresibilni sloj.



## 7.9 Denzitometrijska merenja i mehanički porast tonskih vrednosti

### 7.9.1 Ukupan i mehanički porast tonskih vrednosti

Razlika u PTV između otisaka štampanih pomoću 1x i 320x slivova je najizraženija u oblastima svetlih tonova iz razloga što su štampani elementi u tim oblastima najpodložniji deformacijama koje dovode do PTV. Kako su štampani elementi koji odgovaraju tonskim vrednostima od 2 % izrađeni kao pojedinačni bez podrške zidova susednih elemenata, povećanje opterećenja koje trpi fleksibilna štamarska forma usled većeg zaostatka deformacije na 320x slivovima dovodi do veće deformacije štampanih elemenata. To se reprezentuje značajnim porastom tonskih vrednosti koji se sa prelaskom u oblasti od 5 % i 10 % TV smanjuje i stabilizuje usled povećanja stabilnosti štampanih elemenata.

Razlika u vrednostima mehaničkog PTV izazvana brojem štampanih rolni je uglavnom nešto veća kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova (izuzev za polje od 2 % TV na uzorcima preuzetim sa 7. rolne). Do toga dolazi usled promena mehaničkih svojstava slivova koje iziskuju više vremena za dostizanje stabilnih vrednosti nego što je to slučaj sa već delimično zamorenim materijalom 320x slivova. Mehanička svojstva materijala 320x slivova, nakon pretrpljenih promena mehaničkih svojstava na početku štampe, nadalje ostaju u velikoj meri nepromenjena nezavisno od broja štampanih rolni.

Razliku u brzini dostizanja maksimalne vrednosti zaostatka deformacije između 1x i 320x slivova je lako primetiti na polju od 50 % TV. Na njemu dolazi do smanjenja tonskih vrednosti usled naponom izazvanog očvršćavanja štampanih elemenata fleksibilnih štamarskih formi, čime se smanjuje njihova deformacija (bočno proširenje raste, a inače izraženija deformacija bočnih zidova opada) koja dovodi do mehaničkog PTV. Da bi do ovog očvršćavanja došlo, štamarske forme moraju da pretrpe niz cikličnih opterećenja. Kod štamarskih formi montiranih na 1x slivove, ova pojava nastaje tek pri štampi 7. rolne, što ukazuje na to da je stabilna vrednost zaostatka deformacije 1x slivova dostignuta tokom štampe 6. i 7. rolne. Kod štamarskih formi montiranih na 320x slivove, očvršćavanje štampanih elemenata se odvijalo već pre štampe 5. rolne, što znači da je maksimum zaostatka deformacije za 320x slivove dostignut već između 2. i 4. rolne. Uzrok kašnjenja očvršćavanja štampanih elemenata štamarske forme montirane na 1x slivove leži u nedovoljnom intenzitetu i broju ciklusa, a u slučaju formi montiranih na 320x slivove uzrok kašnjenja većim delom leži u nedovoljnom broju ciklusa, a manjim u nedovoljnom intenzitetu opterećenja.

Do manje izraženih razlika u promenama PTV u tamnim tonovima, izazvanih padom rezilijentnosti različitih slivova, osim zbog povećanja mehaničke stabilnosti štampanih elemenata dolazi i usled manjeg prostora koji je dostupan za promene.

Uzrok većeg nivoa pravilnosti i manje razućenosti krivih PTV kroz celokupan tonski opseg uzoraka štampanih magenta bojom se najpre nalazi u svojstvu higroskopnosti njenih pigmenata.

Trend promene PTV u svetlim tonovima je pravilan i rastući usled promene rezilijentnosti kompresibilnog sloja slivova, praćene povećanjem opterećenja koje trpe štampani elementi štamarskih formi, kao i usled habanja štampanih elemenata.

U svetlim tonovima nema odstupanja od pravilnog rastućeg trenda PTV. Naime, očvršćavanje polimera do kog dolazi zajedno sa povećanjem intenziteta cikličnih deformacija štampanih elemenata usled promene rezilijentnosti slivova nije u mogućnosti da značajno utiče na mehanizme deformacije relativno izolovanih štampanih elemenata, kao u slučaju elemenata na poljima od 50 % TV.

Razlike između mehaničkih PTV do kojih dolazi sa rastom broja štampanih rolni su manje kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova, uprkos tome što su same vrednosti mehaničkog PTV kod ovih uzoraka veće od onih kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova. Uzrok toga leži u činjenici da do konačne promene rezilijentnosti i zaostatka deformacije 320x slivova dolazi značajno brže u poređenju sa brzinama promena kod 1x slivova. Samim tim je i predvidivost procesa štampe i kvaliteta štampanog proizvoda pri štampi pomoću 320x slivova generalno veća.

Međutim, na polju od 2 % TV dolazi do velikog odstupanja u promenama mehaničkog i ukupnog PTV. Umesto da sa porastom broja štampanih rolni dolazi do smanjenja razlike u vrednostima mehaničkog PTV između uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova, dolazi do njenog povećanja. Taj trend je prisutan i kod ukupnog PTV, ali su razlike ukupnog u odnosu na vrednosti mehaničkog PTV na uzorcima štampanim pomoću 320x slivova značajno veće nego na ostalim poljima tonskih vrednosti, pogotovu kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne. Ova odstupanja su izazvana pojavom većih vibracija i odskakanja sliva sa štamparskim formama, koje dovodi do pojave greške dubliranja rasterskih tačaka čime značajno raste PTV. Veće vibracije i dubliranje su izazvane velikim padom rezilijentnosti i naponom izazvanog očvršćavanja polimera. Na taj način se smanjuje svojstvo amortizovanja vibracija izazvanih naglim prelazima sa štampajućih na neštampajuće elemente i kanalima nastalim pri montaži štamparskih formi na slivove (uprkos činjenici da su zbog načina montaže ovi kanali manji i ne čine jedan kontinualan kanal).

Manjoj razlici u vrednostima mehaničkog PTV na otiscima štampanim pomoću 320x slivova doprinosi i brže sušenje boje na podlozi, čime se smanjuje njeno razlivanje pod pritiskom štampajućih elemenata. Sušenje boje je brže jer se usled izraženijeg histerezisa kod 320x slivova oslobađa toplota koja dovodi do smanjenja viskoziteta boje. To dalje doprinosi boljoj penetraciji boje u podlogu i bržem procesu sušenja, smanjujući tako mogućnost boje da razlivanjem zauzme veću površinu.

Veći pad PTV na polju od 50 % TV uzoraka štampanih pomoću 320x slivova nastaje zbog brzih promena u njihovoj rezilijentnosti, čime štampajući elementi počinju da trpe veća opterećenja vrlo rano, odnosno već pri štampi 1. rolne. To u početku rezultuje većim PTV, jer je za očvršćavanje polimera uzrokovano naponom potrebno više vremena. Međutim, kada do očvršćavanja dođe, pad PTV je izraženiji nego kod uzoraka štampanih pomoću 1x slivova, čija se degradacija rezilijentnosti odvija postepeno. Svemu ovome doprinosi i prethodno objašnjen pad viskoziteta boje. Postepena degradacija rezilijentnosti 1x slivova znači da će do pada PTV doći tek nakon njihovog rasta. Do tog rasta dolazi usled postepenog povećavanja deformacije štampajućih elemenata pre nego što nastupi očvršćavanje polimera.

Uprkos istom trendu promena na poljima štampanim magenta bojom, razlike između vrednosti PTV na poljima od 2 % i 50 % TV uzoraka preuzetih sa različitih rolni su manje izražene. Pored toga, razlike u vrednostima PTV na uzorcima sa 1. i 7. rolni štampanih pomoću 1x i 320x slivova su takođe smanjene. Do ovoga verovatno dolazi zbog manjeg habanja štampajućih elemenata štamparskih formi koje može da bude izazvano i sastavom boje. Na polju od 2 % TV razlika PTV uzoraka sa 1. i 7. rolne štampane pomoću 320x slivova je izraženija, ali ne zbog dubliranja (do koga nije ni došlo), već zbog mehaničke deformacije štampajućih elemenata pod pritiskom.

## 7.9.2 Optička gustina

Porast optičke gustine sa povećanjem broja odštampanih rolni pripisuje se smanjenju rezilijentnosti, odnosno povećanju tvrdoće i opterećenja koje trpi štamparska forma. To je u skladu sa činjenicom da se tvrde obostrano lepljive trake koriste kada je potrebno štampati veće površine punih tonova, a mekše kada je potrebno štampati površine sa finim tonskim vrednostima.

Razlika u optičkoj gustini punog tona u korist 320x slivova je u skladu sa brzinom promene rezilijentnosti i zaostatka deformacije 1x i 320x slivova, kao i činjenicom da sa smanjenjem viskoziteta tankog filma boje na štamparskoj formi dolazi do povećanog prenosa boje i brže penetracije i isparavanja vezivnog sredstva, čime na površini podloge ostaje deblji nanos boje koji odgovara većoj optičkoj gustini. Smanjenje viskoziteta boje nastupa tek nakon što se generiše toplota usled histerezis gubitaka, pa su razlike optičkih gustina polja punih tonova uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova, preuzetih sa 1. rolni manje od razlika uzoraka preuzetih sa 7. rolni.

Uprkos potpuno istim trendovima, izraženost promena i razlika u optičkim gustinama uzoraka štampanih magenta bojom je nešto manja, najverovatnije zbog razlike u reološkim svojstvima boje, svojstava higroskopnosti njenih pigmenata i shodno tome ponašanja pod pritiskom u zoni štamparskog NIP-a.

## 7.9.3 Preklapanje

Razlika u vrednostima preklapanja između uzoraka preuzetih sa 1. rolne je toliko mala da je isto tako mogla biti i u korist 1x slivova. To znači da razlike između parametara koji utiču na preklapanje nisu imale dovoljno vremena da se ispolje. Sa porastom broja štampanih rolni zabeležen je i rast vrednosti preklapanja, pogotovu kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova. Najveći uticaj na izraženiji rast vrednosti preklapanja je imala promena viskoziteta tankog filma boje na štamparskoj formi, prouzrokovana oslobađanjem toplote usled histerezis gubitka. Uticaj razlike u viskozitetu boje na preklapanje se ispoljava putem prenosa veće količine boje i ubrzanog sušenja boje nanete na podlogu, čineći tako da preklapanje po svojim vrednostima bude bliže preklapanju pri štampi mokro na suvo, koje je bolje od preklapanja pri štampi mokro na mokro.

Još jedna pojava koja ukazuje na smanjenje viskoziteta tankog filma boje pri štampi 7. rolne pomoću 320x slivova je i manje izražena Saffman-Taylor nestabilnost. Ova nestabilnost je relativno izražena na svim uzorcima zbog velike brzine štampe. Hidrodinamički defekti (kanali i veće rupice u sloju preštampane boje) koji nastaju u zoni kontakta fluida su manje izraženi pri štampi 7. rolne pomoću 320x slivova. U tom slučaju je razlika viskoziteta fluida u zoni štamparskog NIP-a koliko toliko manja od razlike prilikom štampe pomoću 1x slivova ili štampe 1. rolne bez obzira na nivo eksploataisanosti korišćenih slivova.

## 7.10 Kolorimetrijska merenja

### 7.10.1 Razlika u boji

Kako na razliku u boji na poljima tonskih vrednosti utiče mnoštvo parametara, rezultati merenja na ovim poljima ne pokazuju pravilne i ponovljive trendove što ih čini inkonkluzivnim. Međutim, na razlike u boji polja punih tonova utiče značajno manji broj parametara pa se na njima zapaža pravilan, ponovljiv i očekivan trend promene. Naime, što je veća razlika između brojeva štampanih rolni, to su veće i vrednosti razlike u boji.

Promene u mehaničkim svojstvima 320x slivova su brže i izraženije. To znači da su i promene parametara zavisnih od ovih svojstava takođe izraženije, a ti parametri su očvršćavanje polimera, promena tvrdoće kombinacije sliv-štamarska forma i promena viskoziteta i prenosa boje. Prethodno navedene činjenice predstavljaju razloge zbog kojih dolazi do većih razlika u boji između uzoraka preuzetih sa različitih rolni štampanih pomoću 320x slivova, u odnosu na uzorke štampane pomoću 1x slivova, čije su mehaničke promene kompresibilnog sloja manje izražene i iziskuju više vremena da se dogode, što je slučaj i sa parametrima na koje one utiču.

## **7.11 Uniformnost štampane površine**

Promene rezilijentnosti 1x slivova su manjeg intenziteta i treba im više vremena da se ispolje. To znači da su prenos i viskozitet tankog filma boje na štamarskoj formi stabilniji usled malih vrednosti histerezis gubitka. Sve to vodi ka manje izraženim promenama u vrednostima motlinga.

Opadajući trend promene sa rastom broja štampanih rolni nastaje zbog promena tvrdoće (kroz rezilijentnost i naponom izazvano očvršćavanje polimera) kombinacije materijala štamarske forme i kompresibilnog sloja slivova. Pored toga, globalno povećanje optičke gustine do kog dolazi štamptom većeg broja rolni ili korišćenjem 320x slivova dodatno doprinosi rastu uniformnosti štampane površine.

Pad vrednosti motlinga sa porastom broja štampanih rolni je značajno izraženiji kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova. Njegovoj izraženosti pored većeg pada rezilijentnosti i povećanja tvrdoće prethodno spomenute kombinacije materijala doprinose i promene svojstava boje. Naime, prenos boje je poboljšán, a viskozitet umánjen, pa veće količine prenete boje olakšavaju prekrivanje neodštampanih površina i stvaranje ravnogernog sloja boje.

Međutim, ubrzano sušenje boje i rast penetracije smanjuju mogućnost prekrivanja većih neuniformnih površina. Histerezis gubici kompresibilnog sloja sliva i njima uzrokovan pad viskoziteta tankog filma boje na štamarskoj formi su najizraženiji pri štampi 7. rolne pomoću 320x slivova. Prema tome, vrednosti pokrivenosti kod ovih uzoraka pokazuju rast usled bržeg sušenja i penetracije boje u podlogu za štampu.

Promene vrednosti ISO 13660 zrnčavosti su zanemarljivo male i inkonkluzivne.

Promene parametara uniformnosti štampane površine uzoraka štampanih magenta bojom prate trendove promena uzoraka štampanih cijan bojom. Međutim, pojedinačne vrednosti parametara su kod ovih uzoraka nešto veće, a razlike manje, što je najverovatnije uzrokovano različitim reološkim svojstvima boja.

## **7.12 Parametri kvaliteta oblika rasterskih tačaka**

### **7.12.1 Efekat prstenaste rasterske tačke**

Efekat prstenaste rasterske tačke je izraženiji kod uzoraka preuzetih sa 5. rolne štampane pomoću 1x slivova usled nastupanja očvršćavanja delova štampanjućih elemenata koji trpe veća opterećenja zbog pada rezilijentnosti slivova. Oni tada iz zone kontakta sa podlogom istiskuju viskoznu boju koja ne stiže da prodre u podlogu. Boja se na taj način razliva ostavljajući u središtu rasterske tačke neodštampanu ili površinu niske optičke gustine. Nastavkom štampe ka 7. rolni dolazi do intenzivnijeg ispoljavanja uticaja promene svojstava rezilijentnosti, što potpomaže habanje štampanjućih elemenata podvrgavajući ih većim opterećenjima. Time i središte štampanjućeg elementa počinje da prenosi veću količinu boje na podlogu, čime se smanjuje efekat prstenaste rasterske tačke.

Promena mehaničkih svojstava 320x slivova je intenzivnija i nastaje brže. Samim tim i promene parametara štampe, do kojih prilikom štampe pomoću 1x slivova dolazi između 5. i 7. rolne, u slučaju štampe pomoću 320x slivova nastaju između 1. i 5. rolne. Upravo zbog toga je kod štampe pomoću 320x slivova primetan stabilan trend smanjenja efekta prstenaste rasterske tačke, sa izuzetkom tačaka merenih na polju od 2 % TV uzoraka preuzetih sa 7. rolne gde je došlo do odskakanja i dubliranja. Još jedan izuzetak je polje od 50 % TV gde zbog mehaničke stabilnosti elemenata brže nastupa očvršćavanje zidova nego habanje. Međutim, to je kod uzoraka štampanih pomoću 320x slivova manje izraženo zbog smanjenog viskoziteta boje koji dovodi do njene brže penetracije pri kontaktu sa podlogom, ne dajući joj tako dovoljno vremena da se pod pritiskom istisne i razlije ispod zone najjačeg pritiska između štampanog elementa i podloge za štampu.

Kod uzoraka preuzetih sa 1. rolne, efekat prstenaste rasterske tačke je izraženiji ukoliko su oni dobijeni štampom pomoću 320x slivova. To se dešava zbog brže i intenzivnije promene mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja. Tako se opterećenje prenosi na štampane elemente štamparske forme koji trpe veće deformacije, dok promene njihovih svojstava (očvršćavanje) i habanje nemaju dovoljno vremena da nastupe.

Kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne, efekat prstenaste rasterske tačke je manje izražen za slučaj štampe pomoću 320x slivova. Drugim rečima, istiskivanje boje, do kog dolazi usled većeg pritiska i očvršćavanja pojedinih delova štampanih elemenata, je manje izraženo nego prilikom štampe pomoću 1x slivova. Ova pojava je manje izražena upravo usled smanjenja viskoziteta tankog filma boje na štamparskoj formi prouzrokovanog generisanom toplotom koja potiče od histerezis gubitaka kompresibilnog sloja slivova. Izuzetak je polje od 2 % TV, gde je prilikom štampe pomoću 320x slivova došlo do pojave greške dubliranja.

Kod uzoraka štampanih magenta bojom, rast efekta prstenaste rasterske tačke sa rastom broja štampanih rolni je kontinualan pre svega zbog higroskopnosti boje koja ne dopušta da dođe do smanjenja viskoziteta tankog filma boje, kao i promena u prenosu i sušenju boje uzrokovanih tom promenom viskoziteta.

### 7.12.2 Istezanje rasterskih tačaka

Pored smanjenja prečnika slivova, pad rezilijentnosti i rast zaostataka deformacije vodi do rasta opterećenja isporučenog na štampane elemente. To opterećenje nakon određenog vremena neminovno dovodi do pojave naponom izazvanog očvršćavanja polimera. Brzina kojom se okreće osovina koja nosi sliv je nepromenjena, a zbog smanjenja prečnika brzina na površini štamparske forme raste, čime dolazi do proklizavanja u zoni štamparskog NIP-a i nakupljanja boje na bočnim zidovima štampanih elemenata. Sve to se manifestuje kroz povećanje faktora istezanja rasterskih tačaka, pogotovu između štampe 1. i 5. rolne.

Kako su promene mehaničkih svojstava i zaostatak deformacije u slučaju 320x slivova brže i izraženije, tako su i vrednosti faktora istezanja rasterskih tačaka izraženije i to već od štampe 1. rolne. Smanjenje faktora istezanja kod uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampanih cijan bojom nastaje usled habanja štamparske forme, čime se povećava prečnik rasterske tačke. Pošto se faktor izduženja računa kao odnos dužine i širine rasterske tačke, povećanje prečnika rasterskih tačaka će voditi do njegovog smanjenja.

Kod uzoraka cijan boje preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova, smanjenje faktora istezanja u odnosu na 5. rolnu je izraženije nego prilikom štampe pomoću 1x slivova. Razlog većeg smanjenja je značajniji pad viskoziteta tankog filma boje čime ona brže penetrira u podlogu i manje se razmazuje.

Pad rezilijentnosti i smanjenje prečnika slivova mogu dovesti do drugog, još većeg problema tokom štampe, poznatog kao odskakanje. Odskakanje je glavni uzročnik naglog i značajnog rasta faktora istežanja na polju od 2 % TV cijan boje uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova, pošto dovodi do pojave greške dubliranja rasterskih tačaka.

Reološka svojstva magenta boje utiču na njene promene viskoziteta, kao i na habanje štamparske forme koje je manje izraženo nego u slučaju štampe cijan bojom. Sve to utiče na stabilnost promene faktora istežanja, koji prilikom štampe pomoću 1x slivova pokazuje konstantnost. U slučaju štampe pomoću 320x slivova, brzina i intenzitet promene mehaničkih svojstava i zaostatka deformacije značajnije utiču na očvršćavanje i deformacije štampanih elemenata uzrokovane naponom. Sve to znači da faktor istežanja rasterskih tačaka pokazuje manju stabilnost, kao i konstantan rast sa povećanjem broja štampanih rolni. Pad faktora istežanja kod sedme rolne nije primetan ni u jednom slučaju, što je u skladu sa svojstvima habanja štamparske forme magenta boje i stabilnosti viskoziteta boje koja doprinosi manjoj penetraciji i lakšem razmazivanju boje pri štampi.

Razlike između faktora istežanja uzoraka štampanih pomoću 1x i 320x slivova rastu sa porastom broja štampanih rolni. Uzrok su najverovatnije reološka svojstva boje koja doprinose da ona pretrpi manje promene uzrokovane histerezis gubicima. Na taj način se umanjuje mogućnost delimične kompenzacije veće promene prečnika kombinacije sliv-štampana forma i čvrstoće štampanih elemenata boljom penetracijom i bržim sušenjem boje.

### **7.12.3 Prečnik rasterskih tačaka**

Promene u prečnicima rasterskih tačaka na poljima kritičnih tonskih vrednosti štampanih cijan bojom pomoću 1x i 320x slivova pokazuju stabilan rast, kao i prečnici odgovarajućih rasterskih tačaka štampanih magenta bojom. Izuzetak su prečnici tačaka na polju od 2 % TV cijan boje uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova, gde je došlo do pojave greške dubliranja.

Uzrok većih krajnjih prečnika rasterskih tačaka na uzorcima štampanim magenta bojom leži najpre u većoj izraženosti mehaničkih deformacija (deformacija bočnih zidova) manje pohabanih štampanih elemenata i većem istiskivanju boje stabilnijeg viskoziteta koja sporije penetrira u podlogu.

Prečnici rasterskih tačaka su veći prilikom štampe pomoću 320x slivova, bez obzira na boju i broj štampanih rolni. To znači da brža i intenzivnija promena rezilijentnosti i zaostatka deformacije kompresibilnog sloja slivova u svim slučajevima utiču na povećanje deformacije štampanih elemenata kroz njihovo podvrgavanje većim opterećenjima.

### **7.12.4 Krzavost ivica rasterskih tačaka**

Glavni uzročnici rastućeg trenda faktora krzavosti ivica sa porastom broja odštampanih rolni pored habanja štampanih elemenata su i više ili manje izraženo zasušivanje boje na ivicama štampanih elemenata i promena rezilijentnosti kompresibilnog sloja slivova koja dovodi do povećanja opterećenja na štampanim elementima štamparske forme.

Razlike u krzavosti ivica između uzoraka preuzetih sa 1. rolne štampanih pomoću 1x i 320x slivova gotovo da nisu primetne, bez obzira na štampanu boju. Međutim, razlike u krzavosti između uzoraka dobijenih štampom pomoću 1x i 320x slivova se povećavaju nakon štampe 5. rolne za magenta boju, a 7. rolne za cijan boju.

Povećanje krzavosti ivica rasterskih tačaka cijan boje, dobijenih štampom pomoću 320x slivova je dosta značajnije od povećanja krzavosti tačaka dobijenih štampom pomoću 1x slivova. Razlog ove pojave, pored veće promene rezilijentnosti čime štamparske forme trpe veće deformacije, leži i u činjenici da dolazi do pada viskoziteta tankog filma boje usled generisane toplote histerezis gubitaka unutar kompresibilnog sloja slivova. Padom viskoziteta boji se smanjuje mogućnost kompenzacije neravnomernosti ivica razlivanjem.

Do većih razlika faktora istežanja kod uzoraka štampanih magenta bojom preuzetih sa 5. rolni dolazi zbog povećanja opterećenja na štampajućim elementima do koga u zavisnosti od eksploatacije slivova dolazi ranije ili kasnije i u manjoj ili većoj meri. Nakon što promene rezilijentnosti dovedu do promena na štampajućim elementima i faktorima krzavosti uzoraka štampanih magenta bojom, daljih promena gotovo i da nema. Pa tako, razlike u krzavosti ivica uzoraka preuzetih sa 7. rolni štampanih pomoću 1x i 320x slivova su manje najverovatnije usled drugačijih reoloških svojstava magenta boje čiji se viskozitet, a samim tim i penetracija i sušenje ne menjaju značajno pod uticajem toplote od histerezis gubitaka.

Do naglog rasta vrednosti faktora krzavosti ivica rasterskih tačaka na polju od 2 % TV cijan boje uzoraka preuzetih sa 7. rolne štampane pomoću 320x slivova dolazi zbog pojave greške dubliranja.



## 8 ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA

Razvojem novih sliv tehnologija se olakšavaju pojedine faze fleksno štamparskog procesa proizvodnje, ali se isto tako u proces uvode i nove nepoznate čiji je uticaj, kao i uticaj već postojećih tehnologija na procesne parametre i parametre kvaliteta štampanog proizvoda u stručnoj literaturi i dalje veoma oskudno istražen. Upravo to su razlozi što je u okviru ove doktorske disertacije izvršena provera mogućnosti zamene postojećih sliv tehnologija novim tehnologijama, kao i karakterizacija slivova i njihovog uticaja na procesne parametre i parametre kvaliteta štampanog proizvoda, čime se eliminiše jedan od malobrojnih preostalih neistraženih faktora u procesu fleksografske štampe.

Na osnovu rezultata prve faze eksperimenta, dobijenih primenom predložene metode, izvodi se zaključak da je Hipoteza 1 potvrđena, odnosno da Twinlock® slivovi zaista predstavljaju validnu zamenu za postojeću tehnologiju tvrdih slivova sa kompresibilnim obostrano lepljivim trakama, posmatrano kroz aspekte jednostavnosti procesa i kvaliteta proizvoda, sa preduslovom da je njihov tip odabran shodno zahtevima procesa štampe koje diktira vrsta preovlađujućeg štampanog motiva.

Karakterizacijom slivova tokom druge faze eksperimenta ustanovljeno je da opterećenja kojima su slivovi izloženi tokom procesa fleksografske štampe najviše utiču na mehanička svojstva kompresibilnog sloja slivova, dok procesi montaže i demontaže štamparskih formi najviše utiču na adhezivna svojstva samolepljivog sloja slivova. Uticaj eksploatacije je takav da sa porastom tiraža odštampalog pomoću slivova dolazi do degradacije mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova, a sa porastom broja montaža i demontaža fleksno štamparskih formi dolazi do degradacije adhezije samolepljivog sloja slivova, čime je potvrđena Hipoteza 2.

Nakon uspešno izvršene karakterizacije slivova, u trećoj fazi eksperimenta izvršeno je ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova i degradacije njihovih svojstava na parametre kvaliteta otiska i stabilnost procesnih parametara. Iako su homogenost samolepljivog sloja i njegova svojstva adhezije vidno pogođeni eksploatacijom, njen nivo u okviru eksperimenta nije bio dovoljan da dovede do spontanog odvajanja ivica štamparskih formi od slivova, narušavajući tako stabilnost samog procesa fleksografske štampe. Međutim, sa sigurnošću se može reći da bi do pojave spontanog odvajanja ivica štamparskih formi od sliva došlo kroz promene izazvane dokazanim mehanizmima tokom dalje eksploatacije. Uticaj degradacije mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova na stabilnost procesa štampe i parametre kvaliteta otiska je dokazan kroz merenja denzitometrijskih i kolorimetrijskih parametara, kao i kroz softversku analizu slike štampanih otisaka. Merenjima je ustanovljeno da nivo eksploataisanosti slivova na procesne i parametre kvaliteta otiska utiče tako što neke poboljšava, neke pogoršava, a neke pak ostavlja nepromenjenim čime je Hipoteza 3 potvrđena.

Dovođenjem u korelaciju trendova i mehanizama promena parametara kvaliteta štampanog otiska i trendova i mehanizama promena svojstava slivova potvrđena je Hipoteza 4, odnosno dokazano je da je moguće definisati parametre kvaliteta štampanog otiska i trend njihove promene koji u kontrolisanom procesu štampe direktno ukazuju na promenu mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova. Parametri kvaliteta otiska koji u



kontrolisanim uslovima štampe (predviđenim korišćenom metodom) najjednostavnije i najpouzdanije ukazuju na promenu mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova su preklapanje, motling i faktor istežanja rasterskih tačaka. Na njih u datim uslovima praktično ne mogu da utiču drugi izvori osim slivova.

Analizom eksperimentalnih rezultata svih faza eksperimenta moguće je izvesti zaključke o mogućnosti zamene konvencionalnih sliv tehnologija najmodernijim tehnologijama dostupnim u trenutku istraživanja, kao i zaključke o uticaju eksploatacije na mehanička i adhezivna svojstva pojedinih slojeva slivova, uticaju nivoa eksploataisanosti korišćenih slivova na poboljšanje i pogoršanje parametara kvaliteta otiska, kao i poboljšanje i pogoršanje stabilnosti procesa fleksografske štampe.

Bitno je napomenuti da su rezultati i zaključci prve i treće faze istraživanja ograničeni na štampu pomoću štamparskih formi sa štampajućim elementima ravnog vrha, boje na bazi vodenih rastvarača i upojne premazne podloge propisane materijalima i metodama izvođenja eksperimenta. Promenom nekog od ovih parametara bi, praćenjem primenjenih metoda i proučavanjem relevante literature koja se bavi korelacijom uticaja promena procesnih parametara na parametre kvaliteta otiska, bilo moguće okarakterisati uticaj nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesnih parametara i kvalitet štampe bilo kog proizvoda, što ujedno predstavlja i dalje pravce istraživanja u okviru oblasti.

### **Ispitivanje uticaja tipa slivova na kvalitet štampe kartonske ambalaže**

Konvencionalne slivove sa kompresibilnom obostrano lepljivom trakom je moguće zameniti modernim Twinlock® slivovima, pri čemu je potrebno obratiti posebnu pažnju na odabir adekvatnog tipa Twinlock® sliva prema dominantnoj vrsti štampanog motiva.

### **Karakterizacija i uticaj nivoa eksploataisanosti na svojstva slivova**

Slivovi su eksploatacijom izloženi cikličnim, visokofrekventnim dinamičkim opterećenjima. Takva opterećenja kroz dovoljno dugačak vremenski period dovode do zamora materijala koji isprva ne mora da bude primetan. Međutim, čak i male promene svojstava materijala u uslovima flekso štampe, gde je osetljivost na pritiske veoma izražena, mogu da izazovu nestabilnost štampe, nepredvidivost kvaliteta, pa čak i nedovoljan kvalitet štampanog proizvoda.

Kako slivovi nisu u direktnom kontaktu sa bojom ili podlogom, već nose štamparsku formu koja ima tu ulogu, tako se i njihov uticaj na kvalitet najviše oslikava putem promena drugih parametara štampe i svojstava drugih materijala u procesu. Dakle, posrednost u njihovom uticaju na stabilnost procesa i kvalitet proizvoda iziskuju karakterizaciju i opis mehanizama promena kroz koje njihovi pojedini slojevi prolaze tokom redovne eksploatacije.

Naime, kompresibilnost, odnosno rezilijentnost (vraćanje na prvobitne dimenzije) ukoliko se desi dovoljno brzo daje štamparskoj formi prostora da deo energije isporučene na nju kroz pritisak sabijanjem prenese na roditeljski polimerni materijal strukturnih ligamenata i zidove ćelija kompresibilnog sloja sliva koji se izvijaju. Pri manjem i sporijem vraćanju, prenos energije nije moguć, pa se njeno dejstvo ispoljava deformacijom elemenata štamparske forme.

Promene mehaničkih svojstava Twinlock® Medium slivova kroz eksploataciju je moguće okarakterisati na više načina:

- Značajno, čak i dvostruko veće vrednosti zaostataka deformacije kompresibilnog sloja 320x slivova.

- Veće oscilacije vrednosti zaostatka deformacije 320x slivova uzrokovane promenom homogenosti svojstava polimernog materijala kompresibilnog sloja usled neravnomernog omekšavanja.
- Maksimalan napon pri testiranju i Jungov modul elastičnosti su niži kod slivova višeg nivoa eksploataisanosti, što ukazuje na manje opiranje materijala deformacijama, odnosno manju rezilijentnost.
- Veći histerezis gubici kod 320x slivova uzrokovani trajnim deformacijama koje menjaju odnos između količine apsorbovane i skladištene energije.
- Generisana toplota histerezis gubitaka menja viskozitet tankog filma boje na štamparskoj formi.
- Veće izvijanje strukturnih ligamenata i zidova ćelija, odnosno veći zaostatak deformacije 320x slivova pri cikličnim testovima kompresije sa zadržavanjem opterećenja.
- Veća relaksacija napona 320x slivova pri zadržavanju maksimalne deformacije.
- Manji rast napona 320x slivova pri zadržavanju minimalne deformacije.
- Promene u mehaničkim svojstvima su primetne samo na kompresibilnom sloju slivova.
- Kriva sila-put igle pri probijanju sa strane kompresibilnog sloja 320x slivova ima karakterističan oblik uspon-pad-uspon-pad.

Pored visokofrekventnih cikličnih opterećenja tokom štampe, Twinlock® slivovi, preciznije njihov samolepljivi sloj trpi i zatezne sile prilikom demontaže štamparskih formi, a izložen je i dejstvu sredstava za čišćenje/aktivaciju na bazi 1-metoksi-2-propanola. Promenom sastava ovog sloja menjaju se i svojstva adhezije koja će padom vrednosti neminovno dovesti do momenta spontanog odlepljivanja ivica štamparskih formi, čime se značajno narušava stabilnost procesa proizvodnje. Do promena sastava sloja najverovatnije dolazi tako što deo materijala ostaje zalepljen na štamparskim formama, a deo biva odnet prilikom čišćenja.

Pad vrednosti adhezije može da se prepozna na nekoliko načina:

- Manja vrednost sile pri kojoj započinje razdvajanje materijala.
- Manje uniformna kriva sila-pomeraj tokom testa odlepljivanja ljuštenjem, usled porasta neuniformnosti samolepljivog sloja ponovljenim odlepljivanjem štamparskih formi i čišćenjem.
- Pad udela akrilata u GCMS hromatogramu 320x slivova.
- Pad udela ftalata u GCMS hromatogramu 320x slivova.

Sile koje deluju na materijal nisu dovoljno velike da izazovu trajnu deformaciju mikrostrukture, tako da bi glavni uzrok promene najpre mogao da bude u molekularnoj strukturi roditeljskog polimera strukturnih ligamenata i zidova ćelija čija je rezilijentnost sve manja. Pored toga, debljina kombinacije slojeva slivova je takođe promenljiva i u slučaju 320x slivova manja. Najveći nivo stabilnosti na promene debljine pokazuje kompresibilni poliuretanski sloj (samo 5.1 % promene), međutim to ne znači da i njegoja mehanička svojstva nisu promenjena.

## Ispitivanje uticaja nivoa eksploataisanosti slivova na stabilnost procesa fleksografske štampe i kvalitet štampe kartonske ambalaže

Nivo eksploataisanosti slivova utiče na parametre štampe tako što pojedine poboljšava, pojedine pogoršava, pojedine ne menja, a na pojedine pak deluje na inkonkluzivne načine. Uticaj eksploataisanosti na stabilnost promena parametara kvaliteta otiska je takođe izražen. Do promena najčešće dolazi posredstvom uticaja na druge procesne parametre štampe ili promenu svojstava materijala. Kako su parametri kvaliteta otiska različiti i kvalitet svakog od njih se karakteriše na različit način, pa je tako za dobar kvalitet jednog od parametara poželjna kombinacija parametara štampe koji ne moraju nužno da pogoduju i ostalim parametrima.

Glavni uzročnik promena procesnih parametara usled eksploataisanosti slivova su izmenjena mehanička svojstva njihovog kompresibilnog sloja, koja putem različitih mehanizama dovode do promena procesnih parametara štampe. Procesni parametri pogođeni promenom svojstava kompresibilnog sloja slivova su pritisak i opterećenje koje trpi štamparska forma i promene njenih svojstava koje nastaju usled toga, temperatura tankog filma boje na štampajućim elementima čime se menja i viskozitet boje, njen prenos i sušenje ispred i u zoni štamparskog NIP-a, kao i promena prečnika kombinacije sliv-štamparska forma koja dovodi do promene brzine rotacije na površini štamparske forme.

Intenzivnom eksploatacijom slivova dolazi do sledećih poboljšanja i pogoršanja parametara kvaliteta otiska i stabilnosti procesa:

### **Pogoršanje parametara kvaliteta otiska:**

- Porast tonskih vrednosti, pogotovu u svetlim i svetlijim srednjim tonovima.
- Dubliranje na polju od 2 % TV štampanom cijan bojom.
- Manja mogućnost prekrivanja većih neuniformnih površina usled promena viskoziteta boje pri štampi 7. rolne, odnosno rast vrednosti pokrivenosti kao jednog od načina izražavanja neuniformnosti površine.
- Veća razlika u boji merena na poljima punog tona zbog većih promena mehaničkih svojstava kompresibilnog sloja slivova, koje se ispoljavaju kroz naponom izazvano očvršćavanje polimera, promenu tvrdoće kombinacije sliv-štamparska forma, promenu viskoziteta i prenosa boje.
- Izraženiji efekat prstenaste rasterske tačke pri štampi 1. rolne, usled bržeg naponom izazvanog očvršćavanja polimera štampajućih elemenata koji ne stižu da se pohabaju. Brže očvršćavanje nastaje zbog bržih i većih promena rezilijentnosti kompresibilnog sloja slivova.
- Izraženije i brže promene mehaničkih svojstava i zaostatak deformacije u slučaju 320x slivova dovode do većih i uočljivijih vrednosti faktora istezanja rasterskih tačaka već od 1. rolne, usled veće čvrstoće štampajućih elemenata i veće brzine na površini štamparske forme (uzrokovane većim smanjenjem prečnika kombinacije sliv-štamparska forma).
- Izražen uticaj promene mehaničkih svojstava na faktor izduženja rasterskih tačaka magenta boje zbog smanjenog habanja štampajućih elemenata i manje promene viskoziteta boje, uzrokovanih najverovatnije drugačijim reološkim svojstvima magenta boje.
- Veći prečnici rasterskih tačaka bez obzira na boju i broj štampanih rolni.

- Veće povećanje prečnika rasterskih tačaka štampanih magenta bojom zbog veće izraženosti mehaničkih deformacija (deformacija bočnih zidova) manje pohabanih štampanih elemenata i većeg istiskivanja boje stabilnijeg viskoziteta, koja sporije penetrira u podlogu.
- Značajnije povećanje krzavosti ivica rasterskih tačaka sa povećanjem broja štampanih rolni, izazvano većim deformacijama zbog promena rezilijentnosti i promena viskoziteta boje usled histerezis gubitaka. Boja tako zasušuje na ivicama štampanih elemenata pri njihovoj površini utičući na pravilnost oblika rasterske tačke, a bržim sušenjem u kontaktu sa podlogom ove nepravilnosti ne uspevaju da se ublaže razlivanjem boje.

### **Poboljšanje parametara kvaliteta otiska:**

- Bolji prenos boje, penetracija, sušenje i smanjeno razlivanje sa promenom viskoziteta.
- Povećanje optičke gustine do kog dolazi usled smanjenja rezilijentnosti i povećanja tvrdoće kombinacije sliv-štamarska forma.
- Dodatno povećanje optičke gustine punih tonova usled smanjenja viskoziteta tankog filma boje.
- Izrazit rast vrednosti preklapanja sa povećanjem broja štampanih rolni, usled promena viskoziteta boje.
- Manje izražena Saffman-Taylor nestabilnost usled smanjenja razlike viskoziteta fluida (vazduh - boja).
- Smanjenje motlinga kom doprinosi jače i brže naponom izazvano očvršćavanje polimera štampanih elemenata, veća količina prenete boje i optička gustina, smanjenje viskoziteta boje.
- Smanjenje efekta prstenaste rasterske tačke, koje nastupa ranije usled bržeg habanja štamarskih formi zbog povećanja opterećenja izazvanog većim i bržim smanjenjem rezilijentnosti. Habanjem se smanjuje konkavnost pri površini štampanih elemenata.
- Smanjenje efekta prstenaste rasterske tačke usled smanjenja viskoziteta boje.
- Smanjenje faktora istežanja kod uzoraka cijan boje preuzetih sa 7. rolne, usled povećanja prečnika rasterske tačke izazvanog habanjem i smanjenja viskoziteta boje koja brže penetrira i manje se razmazuje.

### **Pogoršanje stabilnosti procesa:**

- Smanjena mogućnost amortizovanja vibracija i odskakanja.
- Promena viskoziteta tankog filma boje usled toplote oslobođene histerezis gubicima i posledice ove promene.
- Izraženije smanjenje motlinga sa povećanjem broja štampanih rolni.
- Razlike u vrednostima gotovo svih parametara prilikom štampe različitim bojama uprkos gotovo istim trendovima promena.
- Preklapanje parametara sa različitim uticajima na efekat prstenaste rasterske tačke u slučaju štampe polja od 50 % TV.

- Veće oscilacije u faktoru istezanja rasterskih tačaka, izazvane pre svega smanjenjem faktora istezanja kod cijan boje na uzorcima sa 7. rolne, usled povećanja prečnika rasterske tačke izazvanog habanjem i smanjenja viskoziteta boje koja brže penetrira i manje se razmazuje.

**Poboljšanje stabilnosti procesa:**

- Stabilniji porast tonskih vrednosti i manje razlike između uzoraka preuzetih sa različitih rolni, usled bržeg dostizanja maksimalnog zaostatka deformacije.
- Stabilan trend smanjenja efekta prstenaste rasterske tačke sa povećanjem broja štampanih rolni.
- Manje izražen efekat prstenaste rasterske tačke kod cijan boje, potpomognut smanjenim mogućnostima istiskivanja boje iz zone najjačeg pritiska zbog brže penetracije i sušenja izazvanih smanjenjem viskoziteta boje. Ovim efektom se delimično kompenzuje povećanje efekta prstenaste rasterske tačke pri štampi 50 % TV koji nastaje zbog bržeg naponom izazvanog očvršćavanja polimera štampanih elemenata (koje negativno utiče) od habanja (koje pozitivno utiče).

## 9 NAUČNI DOPRINOS ISTRAŽIVANJA I MOGUĆNOST PRIMENE U PRAKSI

Konstantan napredak tehnologije u okviru fleksografije, koji za cilj ima porast produktivnosti i kvaliteta proizvoda kao odgovore na sve veće zahteve tržišta u oblasti ambalaže, ostavio je svoj trag i u domenu pripreme za štampu u vidu novih tehnologija slivova za montažu flekso štamparskih formi, gde se kao trenutni vrhunac izdvajaju Twinlock® slivovi. Ovi slivovi omogućavaju povećanje kvaliteta i predvidivosti procesa štampe kroz upotrebu izdržljivog poliuretanskog kompresibilnog sloja, kao i povećanje produktivnosti i smanjenje troškova putem ključne inovacije u vidu samolepljivog sloja pogodnog za upotrebu iznova i iznova. Napretkom tehnologije u domenu slivova javlja se potreba za karakterizacijom njihovih osobina i uticaja na proces štampe i kvalitet proizvoda, kao i uticaja eksploatacije na te osobine i parametre, pogotovu iz razloga što ni preteče ove tehnologije nisu adekvatno istražene.

Karakterizacija slivova sprovedena u ovoj doktorskoj disertaciji uključuje veći broj parametara i metoda za njihovu kontrolu od većine istraživanja sprovedenih na srodnim materijalima. To je omogućilo dobijanje informacija o promenama na materijalima od kojih su građeni slivovi, kao i o interakcijama slivova sa ostalim materijalima i njihovom uticaju na druge parametre od značaja za proces fleksografske štampe i ocenu kvaliteta proizvoda.

Karakterizacijom svojstava slivova se eliminiše jedna od nepoznatih u procesu štampe koja iako prepoznata, nije dovoljno istražena. Pored toga, kroz opis promena i mehanizama promena svojstava tokom eksploatacije dobija se uvid u kritične parametre i mehanizme na koje treba obratiti posebnu pažnju prilikom razvoja novih slivova. Cilj razvoja bi bio smanjenje uticaja ove komponente na stabilnost procesa ili povećanje kvaliteta štampanog proizvoda kroz manipulaciju svojstava pojedinih slojeva slivova. Takođe, poznavanjem mehanizama promena pojedinih svojstava slivova, pre svega mehaničkih, moguće je predvideti njihov vek trajanja, uticaj na promene drugih parametara ili uticaj na kvalitet otiska.

Poznavanjem trenda i intenziteta promena izazvanih eksploatacijom slivova se olakšava njihov odabir i mogućnost kombinovanja u zavisnosti od zahteva štampe. Pored toga, kvantifikacijom promena se otvaraju mogućnosti njihove kompenzacije tokom digitalne pripreme za štampu ili tokom same štampe. Omogućeno je i blagovremeno karakterisanje stanja slivova nedestruktivnim metodama tokom procesne kontrole štampe, na kontrolnim poljima standardnim za proces štampe, kako bi se slivovi na vreme poslali na reparaciju. Karakterizacijom uticaja slivova na parametre kvaliteta otiska kartonske grafičke ambalaže se takođe pronalazi i uzročnik mnogih pojava i promena u procesu štampe, a povećava se i predvidivost kvaliteta proizvoda. Dobijanjem detaljnog uvida u mehanizme promena pojedinih slojeva slivova i njihov uticaj na procesne parametre čije se promene ispoljavaju promenama kvaliteta otiska, pronalaze se manjkavosti trenutno najmodernijih tehnologija i dobija se mogućnost kreiranja simulacija za predviđanje dugotrajnosti i uticaja na kvalitet štampe prilikom razvoja novih tehnologija slivova.

Naučni doprinos istraživanja se dakle ogleda u definisanju metode za karakterizaciju poliuretanskih kompresibilnih pena i adhezivnih polimernih materijala u domenu grafičkog inženjerstva, kao i definisanju mehanizama promena izazvanih eksploatacijom i međusobnog uticaja različitih parametara prisutnih u procesu fleksografske štampe. Pored toga, definisan je i uticaj slivova i nivoa njihove eksploatacisonosti na kvalitet štampe putem merenja velikog broja parametara kvaliteta otiska koji pripadaju različitim grupama. Na taj način je pouzdano okarakterisan uticaj slivova kao jednog od sastavnih elemenata štampe koji je u literaturi prepoznat, ali je do sada bio gotovo u potpunosti neistražen.

Primena rezultata u praksi se ogleda kroz doprinos preduzećima koja se bave fleksografskom štampom i upotrebljavaju slivove sa kompresibilnim slojem, kao i preduzećima koja se bave razvojem novih tehnologija u oblasti montažnih materijala za flekso štampu ili njihovom proizvodnjom. Preduzeća za štampu mogu da tokom procesne kontrole štampe koriste nedestruktivan metod predložen i primenjen u okviru disertacije, čime bi povećali stabilnost procesa štampe i predvidivost kvaliteta proizvoda ili sa lakoćom utvrdili u kom se stanju nalaze slivovi i za kakvu upotrebu su najpogodniji. Preduzeća u kojima se radi na razvoju novih tehnologija ili proizvodnji slivova bi metod karakterizacije i zaključke o tome koja su svojstva poželjna, a trenutno nedovoljno dobra, mogla da iskoriste za razvoj simulacija uticaja eksploatacije na ključna svojstva slivova, a zatim i na ključne parametre kvaliteta štampe. Na taj način bi se razvoj novih tehnologija slivova pojednostavio, ubrzao i pojeftinio. U oblasti proizvodnje slivova, predložen metod i zaključci bi mogli da se koriste tokom završne kontrole proizvoda.



## 10 LITERATURA

- [1] Abdel-Raouf, M. E.- S., Abdul-Raheim, A.- R. M. (2018) Rosin: Chemistry, Derivatives, and Applications: a review. *BAOJ Chemistry*, 4 (1). pp. 1-16.
- [2] Admet (2019) 90 Degree Adhesive Peel Strength Test on a Universal Testing Machine. Admet, Dostupno na: <https://www.admet.com/90-degree-adhesive-peel-strength-test-on-a-universal-testing-machine/> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [3] Agilent (2006) Agilent 5975 inert GC/MS System - Data Sheet. Agilent Technologies, Inc, Dostupno na: <https://www.agilent.com/cs/library/Support/Documents/F05032.pdf> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [4] Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., Yuvaraj, A. R. (2016) Polyurethane types, synthesis and applications - A review. *RCS Advances*, 115. doi: 10.1039/C6RA14525F
- [5] Alkhader, M., Vural, M. (2008) Mechanical response of cellular solids: Role of cellular topology and microstructural irregularity. *International Journal of Engineering Science*, 46 (10). pp. 1035-1051. doi: 10.1016/j.ijengsci.2008.03.012
- [6] Alzoubi, M. F., Al-Hallaj, S., Abu-Ayyad, M. (2014) Modeling of Compression Curves of Flexible Polyurethane Foam with Variable Density, Chemical Formulations and Strain Rates. *Journal of Solid Mechanics*, 6 (1). pp. 82-97.
- [7] Alzoubi, M. F., Tanbour, E. Y., Al-Waked, R. (2011) Compression and hysteresis curves of nonlinear polyurethane foams under different densities, strain rates and different environmental conditions. *ASME. Proceeding of ASME - International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 11-17 Novembar, Denver, Colorado, ASME, 9. pp. 101-109. doi: 10.1115/IMECE2011-62290
- [8] Anderson & Vreeland (2019a) Why Stickyback Matters, Anderson & Vreeland Inc., Dostupno na: <https://www.andersonvreeland.com/why-stickyback-matters/> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [9] Anderson & Vreeland (2019b) nyloflex® FTF Digital. FlintGroup, Dostupno na: [https://www.andersonvreeland.com/wp-content/uploads/2015/09/nyloflex\\_FTF\\_EN.pdf](https://www.andersonvreeland.com/wp-content/uploads/2015/09/nyloflex_FTF_EN.pdf) [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [10] Antić, V., Govedarica, M., Đonlagić, J. (2003) The effect of segment length on some properties of thermoplastic poly(ester-siloxane)s. *Polymer International*, 52 (7). pp. 1188-97. doi: 10.1002/pi.1241
- [11] Aran-Ais, F., Torro-Pala, A. M., Orgiles-Barcelo, A. C., Martin-Martinez, J. M. (2005) Addition of rosin acid during thermoplastic polyurethane synthesis to improve its immediate adhesion to PVC. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25 (1). pp. 31-38. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2004.03.002

- [12] ARISTO CNC Cutter (2013) ARISTOMAT SL. ARISTO CNC Cutter, Dostupno na: [http://www.europlotter.com/europlotter/ARISTOMAT\\_SL\\_files/ARISTOMAT%20SL%20.pdf](http://www.europlotter.com/europlotter/ARISTOMAT_SL_files/ARISTOMAT%20SL%20.pdf) [Pristupljeno 27.9.2019]
- [13] Armel, D., Cusdin, G. (2001) Plates & Printability. FQC FLEXO 04/2001
- [14] Arndt, W., McBride, E., Conner, M. M. (2014) Dibenzoate Plasticizers in Waterborne Acrylic PSAs. ASI, Dostupno na: <https://www.adhesivesmag.com/articles/92687-dibenzoate-plasticizers-in-waterborne-acrylic-psas> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [15] Artavia, L. D., Macosko, C. W. (1994) Polyurethane flexible foam formation. In: Hilyard, N. C., Cunningham, A., Low Density Cellular Plastics: Physical Basis of Behavior, London, Chapman & Hall. pp. 22-55.
- [16] Ashida, K. (2007) Polyurethane and Related Foams Chemistry and Technology. Boca Raton, Taylor & Francis Group.
- [17] Aspler, J., Byron, J., Zang, H., Nguyen, N., (1998) Print Quality of Linerboard in Commercial Water-based Flexography. TAGA 98 proceedings, pp. 749-774.
- [18] ASTM International (2005) ASTM D2240-05. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. West Conshohocken, ASTM International. doi: 10.1520/D2240-05
- [19] ASTM International. (2010) ASTM D1621. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. West Conshohocken, ASTM International.
- [20] Avalle, M., Belingardi, G., Ibba, A. (2007) Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests. International Journal of Impact Engineering, 34 (1). pp. 3-27. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.06.012
- [21] Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G., Fox, B., Pigram, P. J. (2009) Adhesion of polymers. Progress in Polymer Science, 34 (9). pp. 948-68. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007
- [22] Azizi, Y., Davies, P., Bajaj, A. K. (2012) Identification of Nonlinear Viscoelastic Models of Flexible Polyurethane Foam from Uniaxial Compression Data. Journal of Engineering Materials and Technology, 138 (2). pp. doi: 10.1115/1.4032169
- [23] Baldan, A. (2012) Adhesion phenomena in bonded joints. International Journal of Adhesion & Adhesives, 38. pp. 95-116. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007
- [24] Bao, J. B., Junior, A. N., Weng, G. S., Wang, J., Fang, Y. W., Hu, G. H. (2016) Tensile and impact properties of microcellular isotactic polypropylene (PP) foams obtained by supercritical carbon dioxide, The Journal of Supercritical Fluids, 111. pp. 63-73. doi: 10.1016/j.supflu.2016.01.016
- [25] Barros, G. G., Johansson, P.- A. (2007) Mottle and ink distribution in full-tone flexography prints on coated linerboard. Journal of Pulp and Paper Science, 33 (4). pp. 217-226.
- [26] Barrueso-Martinez, M. L., Ferrandiz-Gomez, T. D., Romero-Sanchez, M. D., Martin-Martinez, J. M. (2003) Characterization of EVA-based adhesives containing different amounts of rosin ester or polyterpene tackifier, The Journal of Adhesion, 79 (8-9). pp. 805-824. doi: 10.1080/00218460309547

- [27] Bayer, O. (1947) Das di-isocyanat-polyadditionsverfahren-(polyurethane). *Angewandte Chemie*, 59 (9). pp. 257-272. doi: 10.1002/ange.19470590901.
- [28] Beholz, B., Aronson, C. L., Zand, A. (2005) Adhesion modification of polyolefin surfaces with sodium hypochlorite in acidic media. *Polymer*, 46 (13). pp. 4604-13. doi: 10.1016/j.polymer.2005.03.086
- [29] Benedek, I. (1999) Chapter 2 - Buildup and Classification of Pressure-Sensitive Products. In: Benedek, I. *Development and Manufacture of Pressure-Sensitive Products*. New York, Marcel Dekker, Inc.
- [30] Benedek, I. (2000) Chapter 5 - The Limits of Formulation. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Formulation*, Utrecht, VSP.
- [31] Benedek, I. (2004a) Chapter 6 - Adhesive Performance Characteristics. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Adhesives and Applications*. New York, Marcel Dekker.
- [32] Benedek, I. (2004b) Chapter 10 - Test Methods. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Adhesives and Applications*. New York, Marcel Dekker.
- [33] Benedek, I. (2006a) Chapter 3 - The Role of Design and Formulation of Pressure-Sensitive Products. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Design, Theoretical Aspects*. Utrecht, VSP
- [34] Benedek, I. (2006b) Chapter 4 - Principles of Pressure-Sensitive Design and Formulation. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Design, Theoretical Aspects*. Utrecht, VSP.
- [35] Benedek, I. (2006c) Chapter 7 - Adhesive Properties of Pressure-Sensitive Products. In: Benedek, I. *Developments in Pressure-Sensitive Products*. Boca Raton, Taylor & Francis.
- [36] Benedek, I. (2008) Chapter 8 - Role and Methods of Formulation. In: Benedek, I., Feldstein, M. *Technology of Pressure-Sensitive Adhesives and Product*. Boca Raton, CRC Press.
- [37] Benedek, I., Feldstein, M. M. (2008) *Handbook of Pressure Sensitive Adhesives and Products*. 1st edition. Boca Raton, CRC Press.
- [38] Bergstrom, J. S., Boyce, M. C. (1998) Constitutive modelling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46 (5). pp. 931-954. doi: 10.1016/S0022-5096(97)00075-6
- [39] Beynon, D. G. (2007) *Plate to Substrate Ink Transfer in the Flexographic Printing Process*. Swansea University, Swansea.
- [40] Bharath Kumar, B. R., Zeltmann, S. E., Doddamani, M., Gupta, N., Gurupadu, S., Sailaja, R. R. N. (2016) Effect of cenosphere surface treatment and blending method on the tensile properties of thermoplastic matrix syntactic foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 133 (35). doi: 10.1002/app.43881
- [41] Bhowmick, A.K. (2009) *Materials science and engineering - Vol 1*. In: *Mechanical Properties of Polymers, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. pp. 157-220.
- [42] Billmeyer, S. (2000) *Principles of Color Technology*. 3rd edition. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd.

- [43] Bohan, M. F. J., Townsend, P., Hamblyn, S. M., Claypole, T. C., Gethin D. T (2003) Evaluation of Pressures in Flexographic Printing. TAGA. Proceedings of the TAGA 55th International Annual Technical Conference. pp. 311-320.
- [44] Bonart, R., Muller-Riederer, G. (1981) Modellvorstellungen zur Molekülorientierung in gedehnten segmentierten Polyurethan Elastomeren. *Colloid and Polymer Science*, 259 (9). pp. 926-36. doi: 10.1007/BF01524815
- [45] Boonprasit, W. (2006) A Study of Producing Smoother Gradients in the Flexographic Process on Oriented Polypropylene with UV Ink by Varying Screening Techniques, Gradient Lengths and the Surrounding. PhD thesis. College of Imaging Arts and Sciences of the Rochester, Institute of Technology, Rochester, New York
- [46] Borbély, Á., Szentgyörgyvölgyi, R. (2011) Colorimetric Properties of Flexographic Printed Foils: the Effect of Impression. *Óbuda University e-Bulletin*, 2 (1)
- [47] Bouix, R., Viot, P., Lataillade, J. (2009) Polypropylene foam behavior under dynamic loadings: strain rate, density and microstructure effects. *International Journal of Impact Engineering*, 36 (2). pp. 329-342. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2007.11.007
- [48] Bould, D. C., Claypole, T. C., Bohan, M. F. J. (2003) An experimental investigation into flexographic printing plates. *Journal of Graphic Technology*.
- [49] Bould, D. C., Claypole, T. C., Bohan, M. F. J. (2004) An investigation into plate deformation in flexographic printing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering and Manufacture*, 218. pp. 1499-1511. doi: 10.1243/0954405042418428
- [50] Bould, D. C., Claypole, T. C., Bohan, M. F. J., Gethin, D. T. (2004) Deformation of Flexographic Printing Plates. 56th TAGA Technical Conference, TAGA. pp. 146-162.
- [51] Bould, D. C., Hamblyn, S. M., Gethin, D. T., Claypole, T. C. (2011) Effect of impression pressure and anilox specification on solid and halftone density. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225. pp. 699-709.
- [52] Boyce, M. C., Parks, D. M., Argon, A. S. (1988) Large inelastic deformation of glassy polymers. Part I: rate dependent constitutive model. *Mechanics of Materials*, 7 (1). pp. 15-33. doi: 10.1016/0167-6636(88)90003-8
- [53] Brajnović, O. (2011) Adjustment of the photopolymer printing forms to match new qualitative requirements, Master thesis, Faculty of Graphic Arts, University of Zagreb
- [54] Brooks, H. D., Kelly, J. Y., Madison, P. H., Thacher, C. D., Long, T. E. (2001) Synthesis and Characterization of Acrylamide Containing Polymers for Adhesive Applications. In: *Proceedings of 24th Annual Meeting of Adhesion Society*. 25-28 Februar, Williamsburg, Virginia. p. 150.
- [55] Brydon, A. D., Bardenhagen, S. G., Miller, E. A., Seidler, G. T. (2005) Simulation of the densification of real open-celled foam microstructures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53 (12). pp. 2638-2660. doi: 10.1016/j.jmps.2005.07.007
- [56] Buchwalter, L. P., Greenblatt, J. (1985) An XPS Study of the Locus of Failure Between PMDA-ODA Polyimide and SiO<sub>2</sub> Surface an XPS Study of the Locus of Failure Between PMDA-ODA Polyimide and SiO<sub>2</sub> Surface. *The Journal of Adhesion*, 19 (3-4). pp. 257-265. doi: 10.1080/00218468608071227

- [57] Cao, K., Wang, Y., Wang, Y. (2014) Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 51 (13). pp. 2539-2548. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.03.026
- [58] Cavender, K. D. (1990) New dynamic flexibility test. 1. Polyurethanes 90. *Proceedings of the 33rd Annual Polyurethane Technical/Marketing Conference*, 30 September - 3 Oktober.
- [59] Chakravarty, U., Mahfuz, H., Saha, M., Jeelani, S. (2003) Strain rate effects on sandwich core materials: an experimental and analytical investigation. *Acta Materialia*, 51 (5). pp. 1469-1479. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00541-4
- [60] Chalmers, I. R. (1998) Flexographic printability of packaging grade papers. *Appita Journal*, 51 (3). pp. 193-198
- [61] Charlon, M., Heinrich, B., Matter, Y., Couzigné, E., Donnio, B., Avérous, L. (2014) Synthesis, structure and properties of fully biobased thermoplastic polyurethanes, obtained from a diisocyanate based on modified dimer fatty acids, and different renewable diols. *European Polymer Journal*, 61. pp. 197-205.
- [62] Chattopadhyay, D., Webster, D. C. (2009) Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. *Progress in Polymer Science*, 34 (10). pp. 1068-1133. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002
- [63] Chattopadhyay D.K., Kothapalli, R. V. (2007) Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications. *Progress in Polymer Science*, 32 (3). pp. 352-418. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2006.05.003
- [64] Chemceed (2017) Plasticizers use in Adhesives and Sealants. Chemceed, Dostupno na: <https://www.chemceed.com/industry-news/plasticizer-use-adhesives-sealants/> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [65] Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., Li, Z. X. (2015) Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials & Design*, 69. pp. 170-180. doi: 10.1016/j.matdes.2014.12.024
- [66] Chen, W., Lu, Z. X., Pan, B., Guo, J. H., Li, Y. J. (2012) Nonlinear behavior of bumper foams under uniaxial compressive cyclic loading. *Materials & Design*, 35. pp. 491-497. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.042
- [67] Chen, W. X., Tang, X. Y., Considine, J. M., Turner, K. T. (2011) Effect of Inorganic Fillers in Paper on the Adhesion of Pressure-Sensitive Adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25 (6-7). pp. 581-596. doi: 10.1163/016942410x525830
- [68] Cherry, J. A. (2007) Ink Release Characteristics of Anilox Rolls. University of Wales Swansea, Swansea.
- [69] Christenson, E. M., Anderson, J. M., Hiltner, A. (2007) Biodegradation mechanisms of polyurethane elastomers. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 42 (4). pp. 312-323. doi: 10.1179/174327807X238909
- [70] Chum, C. M., Ling, M. C., Vargas, R. R. (1987) High Performance Adhesives from Ethylene Copolymers via Grafting. Avery International Co.

- [71] Chung, R., Hsu, F. (2008) A study of ink trapping and ink trapping ratio, Dostupno na: [http://rycprr.cias.rit.edu/pdf/2008\\_TT8\\_ITR.pdf](http://rycprr.cias.rit.edu/pdf/2008_TT8_ITR.pdf) [Pristupljeno: 25.9.2019.]
- [72] CIE (1986) Colorimetry. 2nd edition. Vienna, CIE Publications, No. 15.2.
- [73] Cinelli, P., Anguillesi, I., Lazzeri, A. (2013) Green synthesis of flexible polyurethane foams from liquefied lignin, *European Polymer Journal*, 49 (6). pp. 1174-1184. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2013.04.005
- [74] Claes, J., Vanmaele, L. (2008) Sleeves and sleeve segments for flexography. US8621995B2 (Patent).
- [75] Clint, J. H. (2001) Adhesion and components of solid surface energies. *Current Opinion in Colloids and Interface Science*, 6 (1). pp. 28-33. doi: 10.1016/S1359-0294(00)00084-4
- [76] Courtney, M. H., Charlton, L. J., Seal, K. (1989) Influence of foam density on automobile seat performance. *Journal of Cellular Plastics*, 25 (5). pp. 472-485. doi: 10.1177/0021955X8902500505
- [77] Cozzens, S. L., Butto, A. M., Schaeffer, W. D., Zettlemoyer, A. C. (1965) Ink Penetration During High-Speed Printing of Uncoated Paper. *Paper in the Printing Process*, Aulanko, Finland, pp. 1-24.
- [78] Creton, C. (2003) Pressure sensitive adhesives: An introductory course. *MRS Bulletin*. doi: 10.1557/mrs2003.124
- [79] Croop, B., Lobo, H. (2009) Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA. *Proceedings of 7th European LS-DYNA conference*, Salzburg. Dostupno na: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2009/D-II-04.pdf> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [80] Crouch, J.P. (1998) *Flexography Primer*. 2nd edition. Pittsburgh, PIA/GATF Press
- [81] Czech, Z. (2006) Chapter 4 - Removable and Repositionable Pressure-Sensitive Materials. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Design and Formulation, Application*. Utrecht, VSP.
- [82] Czech, Z., Milker, R. (2005) Development trends in pressure-sensitive adhesive systems. *Materials Science-Poland*, 23 (4). pp. 1015-1022.
- [83] Damayanti, M., Widodo, J., Sritharan, T., Mhaisalkar, S. G., Lu, W., Gan, Z. H., Zeng, K. Y., Hsia, L. C. (2005) Adhesion study of low-k/Si system using 4-point bending and nanoscratch test. *Materials Science and Engineering: B*, 121 (3). pp. 193-198. doi: 10.1016/j.mseb.2005.03.030
- [84] Damroth, G., DiPiazza, J., Hausman, G., Hines, M., Rivas, M., Rose, B., Shaffer, L., Wald, J., Ziegler, T. (1996) The effect of UV flexo ink viscosity, anilox cell volume, and press speed on printed density and dot gain. *Taga, 1996 TAGA Proceedings*. pp. 86-101.
- [85] Dar, U. A., Zhang, W., Xu, Y., Wang, J. (2014) Thermal and strain rate sensitive compressive behavior of polycarbonate polymer - experimental and constitutive analysis. *Journal of Polymer Research*, 21 (8). pp. 1-10. doi: 10.1007/s10965-014-0519-z
- [86] Davies, G. R., Claypole, T. C. (2006) *Effect of Viscosity on Ink Transfer in Gravure Printing*. iarigai, Leipzig.
- [87] Defonseka, C. (2013) *Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*. Shawbury, Smithers Rapra.

- [88] De Grâce, J. H., Mangin, P. J. (1983) A Mechanistic Approach to Ink Transfer Part I: - Effect of Substrate Properties and Press Conditions. Banks, W.H. 17th International Conference of Printing Research Institutes, Saltsjöbaden, Sweden, Pentech Press - London. pp. 312-332.
- [89] Dejidas, L., Destree, T. (2005) Sheetfed Offset Press Operating. Pittsburgh, Pennsylvania: PIA/GATF Press.
- [90] Derham, C. J. (1973) Creep and stress relaxation of rubbers - the effects of stress history and temperature changes. *Journal of Materials Science*, 8 (7). pp. 1023.-1029. doi: 10.1007/BF00756634
- [91] Derham, C. J., Southern, E., Thomas, A. G. (1970) Some factors affecting the life of rubber articles in service. *NRPRA Rubber Technology*, Supplement 7 (1).
- [92] de Vries, D.V.W.M. (2009) Characterization of polymeric foams. Master Thesis. Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- [93] DFTA, Meyer, K. H. (2000) *Flexo Printing Technology*. 4th edition. St Gallen, Verlag Coating Thomas & Co, pp. 327-357.
- [94] Di Landro, L., Sala, G., Olivieri, D. (2002) Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets. *Polymer Testing*, 21 (2). pp. 217-228. doi: 10.1016/S0142-9418(01)00073-3
- [95] Dixon, D. G., Unger, W., Naylor, M., Dublineau, P., Figgures, C. C. (1998) *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18 (2). pp. 125-30. doi: 10.1016/S0143-7496(97)00058-4
- [96] Du, B. (2009) Dot Gain in the Digital Flexographic Process by Varying Screening Techniques and Pressures. Institute of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an.
- [97] Duan, Y., Saigal, A., Greif, R., Zimmerman, M.A. (2002) Analysis of multiaxial impact behavior of polymers. *Polymer Engineering and Science*, 42 (2). pp. 395-402. doi: 10.1002/pen.10957
- [98] Dube, M., Mairesse, F., Boisvert, J.-P., Voisin, Y. (2005) Wavelet Analysis of Print Mottle, *IEEE Transactions on Image Processing*.
- [99] Dunn, T. (2015b) Flexible Packaging. 12- Flexographic Presses. *Materials, Machinery and Techniques*, William Andrew. pp. 117-122. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26436-5.00012-6>
- [100] Dunn, T. (2015a) Manufacturing flexible packaging. *Materials, machinery, and techniques*. Waltham, Elsevier.
- [101] Dwyer, F. J. (1976) A review of factors affecting durability characteristics of flexible urethane foams. *Journal of Cellular Plastics*, 12 (2). pp. 104-113. doi: 10.1177/0021955X7601200205
- [102] Ebnesajjad, S. (2014) Chapter 1 - Introduction to Surface Preparation. In *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding* (2nd edition). Waltham, Elsevier. pp. 3-6.
- [103] ELIS (n.d.) Creep Testing. *Electronic Instruments & Systems S.r.l.*, Dostupno na: [http://www.elis.it/lloyd\\_creepTesting.html](http://www.elis.it/lloyd_creepTesting.html) [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [104] Engels, H.-W., Pirkl, H. G., Albers, R., Albach, R. W., Krause, J., Hoffmann, A., Casselmann, H., Dormish, J. (2013) Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52 (36). pp. 9422-9441. doi: 10.1002/anie.201302766
- [105] Esko (2013) CDI Spark 4260 Technical specifications. Esko, Dostupno na: [https://www.teamflexo.com/pdf/esko/ea\\_cdi\\_family\\_us.pdf](https://www.teamflexo.com/pdf/esko/ea_cdi_family_us.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [106] European Committee for Standardization (2004) EN 14477. Packaging - Flexible packaging material - Determination of puncture resistance - Test methods. Brussels, European Committee for Standardization.
- [107] FAG (2019) FLEX Software Manual GB ver 4.2. FAG Graphic Systems. Lausanne, Dostupno na: [http://www.fag.ch/products/pdf/FAG\\_Flex3Pro%204p.pdf](http://www.fag.ch/products/pdf/FAG_Flex3Pro%204p.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [108] Fahlcrantz, C.-M. (2005) On the Evaluation of Print Mottle. PhD Thesis. KTH Computer Science and Communication, School of Computer Science and Communication, Stockholm, Sweden.
- [109] Fang, Q. Z., Wang, T. J., Beom, H. G., Zhao, H. P. (2009) Rate-dependent large deformation behavior of PC/ABS. *Polymer*, 50 (1). pp. 296-304. doi: 10.1016/j.polymer.2008.10.042
- [110] Fattah, H. (1996) Adhesives and sealants-Rosin resin makers fight back. *Chemical Week*, 158 (45).
- [111] Felton, L. A., McGinity, J. W. (1997) Influence of plasticizers on the adhesive properties of an acrylic resin copolymer to hydrophilic and hydrophobic tablet compacts. *International Journal of Pharmaceutics*, 154 (2). pp. 167-178. doi:10.1016/s0378-5173(97)00133-6
- [112] Fernández, M., Muñoz, M. E., Santamaría, A. (1998) Rheological Analysis of Highly Pigmented Inks: Flocculation at High Temperatures. *Journal of Rheology*, 42 (2). pp. 239-253.
- [113] Ferry, J. D. (1980) *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd edition. New York, Wiley. pp. 154-163.
- [114] Fetsko, J. M., Walker, W. C. (1955) Measurement of Ink Transfer in Printing Coated Paper. *American Ink Maker*, 33 (11). pp. 38-44/67-69.
- [115] FFTA (2000) *Flexography: Principles and Practices*. 5th edition. New York, Foundation of Flexographic Technical Association.
- [116] FFTA (2014) *Flexography: Principles and practices 6.0*. 6th edition. Foundation of Flexographic Technical Association.
- [117] Field, G. G. (1999) *Colour and Its Reproduction*. Pittsburgh, Gaf Press. pp. 165-170.
- [118] Finna, D. (2019) Switch to Twinlock brings Christiansen Print clear process advantages. *Flexo+Tief-Druck*. 3, Dostupno na: <https://www.packconsult.org/app/download/10124599168/2019+05te.pdf?t=1563879915> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [119] Flexo Expert (2019) Slur: the sneaky enemy of print quality. flexo expert, Milan, Italy, Dostupno na: <https://www.flexo.expert/slur-the-sneaky-enemy-of-print-quality/> [Pristupljeno: 26.9.2019.]



- [120] Flexolutions (2019) Twinlock® permanent adhesive sleeves. Flexolutions Limited, Dostupno na: [http://www.flexolutions.com.hk/product\\_detail.php?pid=143](http://www.flexolutions.com.hk/product_detail.php?pid=143) [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [121] FlexoTech (2014) Stickability: plate mounting tapes under review. FlexoTech, Whitmar Publications, Dostupno na: <https://www.flexotechmag.com/key-articles/20533/stickability-plate-mounting-tapes-under-review/> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [122] FlexoTech (2019) New hardness level for Flint Group's rotec Compressible Sleeve. FlexoTech, Whitmar Publications, Dostupno na: <https://www.flexotechmag.com/news/18958/new-hardness-level-for-flint-group-s-rotec-compressible-sleeve/> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [123] FlintGroup (2014a) rotec® Compressible Sleeve. Flint Group Flexographic Products, Dostupno na: [https://www.flintgrp.com/media/1409/rotec\\_compressible\\_sleeve\\_en.pdf](https://www.flintgrp.com/media/1409/rotec_compressible_sleeve_en.pdf) [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [124] FlintGroup (2014b) rotec® Premium Sleeve. Flint Group Flexographic Products, Dostupno na: [https://www.flintgrp.com/media/1413/rotec\\_premium\\_sleeve\\_en.pdf](https://www.flintgrp.com/media/1413/rotec_premium_sleeve_en.pdf) [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [125] Forcinio, H. (2016) Case closed: reclosable packaging benefits preferred. In: *The National Provisioner*, 230 (5). pp. 60-62.
- [126] Fouche, L., Blayo, A. (2001) Transfer Characterization of UV Flexo Inks. TAGA, 2001 TAGA Proceedings. TAGA, pp. 426-443.
- [127] FTA (2003) Flexographic Image Reproduction Specifications and Tolerances (FIRST) Book. 3rd edition. Ronkonkoma, New York, Flexographic Technical Association.
- [128] FTA (2014) Flexographic Image Reproduction Specifications & Tolerances 5.0. New York, Flexographic Technical Association Inc.
- [129] Fujita, M., Kajiyama, M., Takemura, A., Mizumachi, H., Hayashi, S. (1998) Effects of miscibility on probe tack of natural rubber- based pressure-sensitive adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 70 (4). pp. 771-776. doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19981024)70:4<771::AID-APP17>3.0.CO;2-%23
- [130] Fukuzawa, K., Uekita, T. (1999) The Mechanism of Peel Adhesion. In: *Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the Adhesion Society*, 21. Februar, Panama City Beach, Florida. p. 69.
- [131] Gallagher (2019) Polyurethane Resilience. Gallagher, Dostupno na: <https://gallaghercorp.com/white-papers/polyurethane-resilience/> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [132] Galton, D. J. (2004) Investigation into the Causes for "Mottle". Taga. 2004 TAGA Proceedings. pp. 409-427.
- [133] Galton, D. J., Rosenberger, R. R. (2007) A novel solution for the characterisation of corrugated printing quality. TAGA. 2007 TAGA Proceedings. pp. 403-414.
- [134] Gama, N. V., Ferreira, A., Barros-Timmons, A. (2018) Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials (Basel)*, 11 (10). p. 1841. doi: 10.3390/ma11101841
- [135] Gama, N.V., Silva, R., Costa, M., Barros-Timmons, A., Ferreira, A. (2016) Statistical evaluation of the effect of formulation on the properties of crude glycerol polyurethane foams. *Polymer Testing*, 56. pp. 200-206.

- [136] Garduno, S. (2013) The Benefits of Printing Sleeves. FLEXO Magazine. pp. 100-104.
- [137] Gareth, J. L., Arnold, J., Griffiths, I. W. (2011) The dynamic behavior of squash balls. *American Journal of Physics*, 79 (2). pp. 291-296. doi: 10.1119/1.3531971
- [138] Gay, C., Leibler, L. (1999) Theory of tackiness. *Physical Review Letters*. American Physical Society, 82 (5). pp. 936-939. doi: 10.1103/PhysRevLett.82.936
- [139] Gent, A. N., Thomas, A. G. (1963) Mechanics of foamed elastic materials. *Rubber Chemistry and Technology*, 36 (3). pp. 597-602. doi: 10.5254/1.3539591
- [140] Gibson, I. J., Ashby, M. F. (1982) The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of Royal Society of London*, 382 (1782). doi: 10.1098/rspa.1982.0088
- [141] Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1988) *Cellular solids - Structure and properties*. Oxford, Pergamon Press.
- [142] Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1999) *Cellular solids - Structure and properties*. 2nd edition. Cambridge, Cambridge University Press.
- [143] Ginman, R., Tiainen P.R., (1988) Requirements of the flexographic printing process on wrapping paper and packaging board. *Advancements in Printing Science and Technology*, 19. pp. 210-227.
- [144] Gök, A., Yapıcı, F., Gulsoy, S.K., Kurt, S., Altun, S., Kilinc, I., Korkmaz, M. (2012) Determination of static fatigue performance of upholstery foams. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 12 (2). pp. 285-290.
- [145] Gong, L., Kyriakides, S., Jang, W.- Y. (2005) Compressive response of open-cell foams. Part I: Morphology and elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, 42 (5-6). pp. 1355-1379. doi:10.1016/j.ijsolstr.2004.07.023
- [146] Good, R. J., Gupta, R. K. (1988) Rheological, Interfacial and Thermal Control of Polymer Adhesion. I. Isothermal Theory. *The Journal of Adhesion*, 26 (1). pp. 13-36. doi: 10.1080/00218468808071272
- [147] Gotro, J. (2013) The Winding Road to Renewable Thermoset Polymers Part 3: Thermoset Polyurethanes. *Polymer Innovation Blog*, Dostupno na: <https://polymerinnovationblog.com/the-winding-road-to-renewable-thermoset-polymers-part-3-thermoset-polyurethanes/> [Pristupljeno: 27.9.2019]
- [148] Gotsick, T. (2014) Theoretical and Empirical Models of Print Gain, Analyzing Shoulder Angle and Compression. *FlexoGlobal*, Dostupno na: <https://www.flexoglobal.com/blog/2014/01/20/theoretical-empirical-models-of-print-gain/> [Pristupljeno: 25.9.2019.]
- [149] Grundmeier, G., Stratmann, M. (2005) Adhesion and De-Ahesion Mechanisms at Polymer/Metal Interfaces: Mechanistic Understanding Based on In Situ Studies of Buried Interfaces. *Annual Review of Materials Research*, 35 (1). pp. 571-615. doi: 10.1146/annurev.matsci.34.012703.105111
- [150] Gunatillake, P. A., Martin, D. J., Meijs, G. F., McCarthy, S. J., Adhikari, R. (2003) Designing biostable polyurethane elastomers for biomedical implants. *Australian Journal of Chemistry*, 56 (6). pp. 545-557. doi: 10.1071/CH02168

- [151] Guo, S., Dai, Q., Sun, X., Xiao, X., Si, R., Wang, J. (2018) Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 172. pp. 3621-3633. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.119
- [152] Guo, Y., Li, Y. (2007) Quasi-static/dynamic response of SiO<sub>2</sub>-epoxy nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 458 (1-2). pp. 330-335. doi: 10.1016/j.msea.2007.02.011
- [153] Gustavson, S. (1997) Dot gain in colour halftones, PhD thesis, Linköping University, Linköping, Sweden, pp. 25-36.
- [154] GVR (2015) Bio-Based Polyurethane (PU) Market Size, Share & Trend Analysis Report, By Product (Rigid Foams, Flexible Foams, CASE), By End-Use (Furniture & Interiors, Construction, Automotive, Footwear) And Segment Forecasts To 2020. Grand View Research, Dostupno na: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/bio-based-polyurethane-industry> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [155] Götsching, L., Ness, C. (1997) Two-Dimensional Characterisation on the Surface of Paper with reference to its Printability. Institute für Papierfabrikation. Darmstadt, Germany, EU Publication COST E11
- [156] Hallberg, E., Odeberg Glasenapp, A., Lestelius, M. (2005) Quantification of Banding on Printed Currogated Board Using Spatial Frequency Analysis. *Packaging Technology and Science*, 18. pp. 89-95.
- [157] Hallberg Hofstrand, E. (2006) Flexographic Post-Printing of Corrugated Board, Dissertation, Karlstad, Karlstad University
- [158] Hamblyn, A (2015) Effect of plate characteristics on ink transfer in flexographic printing. PhD Thesis, Swansea University, Swansea
- [159] Hamblyn, S. M. (2004) The Role of the Plate in the Ink Transfer Process in Flexographic Printing. University of Wales Swansea, Swansea.
- [160] Hannah, M. (1951) Contact stress and deformation in a thin elastic layer. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 4. pp. 94-105.
- [161] Harri, L. (2009) Microscopic studies of the influence of main exposure time on parameters of flexographic printing plate produced by digital thermal method. *Microscopy Research and Technique*, 72 (10). pp. 707-716. doi:10.1002/jemt.20719
- [162] Havlínová, B., Hornáková, L., Brezová, V., Liptáková, Z., Kindernay, J., Jancovicova, V. (2000) Ink receptivity on paper — characterization of paper materials. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 168 (3). pp. 251-259. doi: 10.1016/S0927-7757(00)00489-1
- [163] Hecker, K., Breitung, S. (2013) Organic and Printed Electronics. Applications, Technologies and Suppliers. 5th edition. Frankfurt a. M., VDMA Verlag.
- [164] Hershey, J.- M. (2008) Flexo Sleeves Gain Traction. *Packaging Impressions*. NAPCO Media, Dostupno na: <https://www.packagingimpressions.com/article/sleeves-flexographic-printing-eliminate-problems-associated-conventional-plate-mounting-109662/all/> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [165] Hilyard N. C. (1994) Hysteresis and energy loss in flexible polyurethane foams. In: Hilyard N.C., Cunningham A. *Low density cellular plastics*. Dordrecht, Springer. doi: 10.1007/978-94-011-1256-7\_8

- [166] Hoage, C. A., Borski, M. A. (1988) Printing sleeves and methods for mounting and dismounting. US4903597A (Patent).
- [167] Hoexter, R., Katz, S. (1975) Carrier sleeve for printing cylinder. US3978254A (Patent).
- [168] Holmvall, M., Uesaka, T. (2007) Nip Mechanics of Flexo Post-Printing on Corrugated Board. *Journal of Composite Materials*, 41 (17). pp. 2129-2145.
- [169] Holmvall, M., Uesaka, T. (2008) Print Uniformity of Corrugated Board in Flexo Printing: Effects of Corrugated Board and Halftone Dot Deformations. *Packaging Technology and Science*, 21 (7). pp. 385-394. doi: 10.1002/pts.816
- [170] Hornschuh, M., (2005) Diskussion über Probleme im drucktechnischen Alltag. Auszüge aus dem DFTA-Frühjahrs-Symposium 2005. Dostupno na: <http://www.manfred-hornschuh.de/downloads/gesdok05.pdf> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [171] Hsu, B. (1962) Some Observations on the Ink-Paper Relationship During Printing. *Advances in Printing Science and Technology vol 2- Problems in High Speed Printing*, New York, Pergamon Press. pp. 1-10.
- [172] Huebler, A., Hahn, U., Beier, W., Lasch, N., Fischer, T. (2002) High Volume Printing Technologies for the Production of Polymer Electronic Structures. POLYTRONIC 2002. Proceedings of the 2nd International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics. 23-26 Jun, Piscataway, New Jersey, IEEE, pp. 172-176.
- [173] Hull, T. R., Colligon, J. S., Hill, A. E. (1987) Measurement of thin film adhesion. *Vacuum*, 37 (3-4). pp. 327-330. doi: 10.1016/0042-207X(87)90018-2
- [174] Hunt, R.W.G., Pointer, M.R. (2011) *Measuring colour*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Ltd.
- [175] Hutchinson, A. R., Iglauer, S. (2006) Adhesion of construction sealants to polymer foam backer rod used in building construction. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26 (7). pp. 555-566. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.09.001
- [176] Ibrahim Marhoon, I., Kais Rasheed, A. (2015) Mechanical and physical properties of glass wool-rigid polyurethane foam composites. *Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ)*, 18 (1). pp. 41-49.
- [177] International Organization for Standardization (2001) ISO/IEC 13660:2001. Information technology - office equipment - measurement of image quality parameters - binary monochrome text and graphic images. Geneva, International Organization for Standardization.
- [178] International Organization for Standardization (2005) ISO 3384:2005. Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression at ambient and at elevated temperatures. Geneva, International Organization for Standardization.
- [179] Izdebska, J. (2016) Flexographic Printing. *Printing on Polymers*. pp. 179-197. doi:10.1016/b978-0-323-37468-2.00011-7.
- [180] Jang, W. Y., Kraynik, A. M., Kyriakides, S. (2008) On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, 45 (7-8). pp. 1845-1875. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2007.10.008

- [181] Javni, I., Zhang, W., Petrović, Z.S. (2003) Effect of different isocyanates on the properties of soy-based polyurethanes. *Journal of Applied Polymer Science*, 88 (13). pp. 2912-2916. doi: 10.1002/app.11966
- [182] Jensen, K.W. (1989) Flexo Printability of Coated White-Top Liner with Consideration of Convertibility. *Graphic Arts in Finland*, 18(1). pp. 14—20.
- [183] Johansson, K., Lundberg, P., Ryberg, R. (2011) *A Guide to Graphic Print Production*. 3rd Ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- [184] Johansson, P.-Å. (1999) *Optical Homogeneity of Prints*. PhD Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [185] Johansson, P.-Å., Norman, B. (1996) Methods for Evaluating Formation, Print Unevenness and Gloss Variations Developed at STFI. TAPPI. Tappi Process & Product Quality Conference Proceedings, Cincinnati, Ohio, TAPPI Press. pp. 139-145.
- [186] Johnson, J. (2003) *The Influence of Moisture, Temperature, Pressure Pulse and Substrate on Print Quality in Flexographic Printing*. Karlstad University Studies, ISBN 91-85019-29-1
- [187] Johnson, J., Johansson, C., Lestelius, M., Järnström, L., Rättö, P., Blohm, E. (2009) Some Properties of Flexographic Printing Plates and Aspects of Print Quality. *Appita Journal*, 62 (5). pp. 371-378.
- [188] Johnson, J., Peter, R. (2003) *Dinamic Nip Measurements in a Flexographic CI Printing Press*. Technical Association of Graphic Arts Conference, 6-9 April, Montreal, Quebec.
- [189] Johnson, J., Rättö, P., Lestelius, M., Järnström, L. (2003) *Dynamic Nip Pressure in a Flexographic CI-Printing Press*. TAGA. 2003 TAGA Proceedings: 55th annual conference. 14-17 April, Montreal, Quebec pp. 357-374.
- [190] Joyce, M., Avuthu, S. G. R., Emamian, S., Eshkeiti, A., Atashbar, M., Fleming, P. D., Donato, T. (2014) Contribution of Flexo Process Variables to Fine Line Ag Electrode Performance. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3 (8). ISSN: 2278-0181
- [191] Julian, A. P. (1976) *Printing sleeves*. US4144813A (Patent).
- [192] Kanyanta, V., Ivankovic, A. (2010) Mechanical characterization of polyurethane elastomer for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3 (1). pp. 51-62. doi: 10.1016/j.jmbbm.2009.03.005
- [193] Kawasaki, M., Ishisaki, M., Yoshimoto, Y. (2009) Investigation into the Cause of Print Mottle in Halftone Dots of Coated Paper: Effect of Optical Dot Gain Non-uniformity. *Japan TAPPI Journal*, 63 (11). pp. 1362-1373. doi: 10.2524/jtappij.63.1362
- [194] Kempa, H., Fuegmann, U., Hahn, U., Bartzch, M., Reuter, K., Hamsch, M., Schmidt, G., Weigelt, K., Fischer, T., Trnovec, B., Stanel, M., Sonntag, D., Wetzold, N., Meier, B., Schlegel, G., Huebler, C. (2008) *Progress in Mass-Printed Electronics*. TPE 08. 3rd International Symposium "Technologies for Polymer Electronics". Rudolstadt, Germany, TITK (Thuringisches Institut für Textilund Kunststoff-Forschung e.V.), p. 146.

- [195] Khanjani, J., Zohuri, G. H., Gholami, M. (2014) Effect of 2-EHA as a soft monomer on the adhesion properties of PSAs synthesized by Emulsion Semi-Batch Terpolymerization Process Using Hybrid Emulsifiers. ISPST11. 11th International Seminar on Polymer Science and Technology. 6-9 Oktobar, Tehran, Iran, Iran Polymer and Petrochemical Institute.
- [196] Khanjani, J., Zohuri, G. H., Gholami, M., Shojaei, B., Dalir, R. (2013) Emulsion semibatch terpolymerization process using hybrid emulsifiers for synthesizing new emulsion pressure sensitive adhesives (EPSAs). *The Journal of Adhesion*, 90 (2). pp. 174-194. doi: 10.1080/00218464.2013.772052
- [197] Kilhenny, B. (2007) Restrain the Gain Cushions are Key to Control. *Flexo*, 32 (8). p. 24.
- [198] Kilhenny, B. (2008) Open and Closed Case - The Difference Between Various Mounting Tapes. Rogers Corporation
- [199] Kim, D.- J., Kim, H.-J., Yoon, G.- H. (2004) Effects of blending and coating methods on the performance of SIS (styrene-isoprene-styrene)-based pressure-sensitive adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (15-16). pp. 1783- 1797. doi: 10.1163/1568561042708412
- [200] Kim, J., Kim, K. S., Kim, Y. H. (1989) Mechanical effects in peel adhesion test. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 3 (1). pp. 175-187. doi: 10.1163/156856189X00146
- [201] Kim, T.R., Shin, J.K., Goh, T.S., Kim, H.S., Lee, J.S., Lee, C.S. (2017) Modeling of elastoviscoplastic behavior for polyurethane foam under various strain rates and temperatures. *Composites Structure*, 180. pp. 686-695. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.032
- [202] Kinloch, A.J. (1980) The science of adhesion - Part 1 Surface and interfacial aspects. *Journal of Material Science*, 15 (9). pp. 2141-2166. doi: 10.1007/BF00552302
- [203] Kipphan, H. (2001) *Handbook of Print Media, Technologies and Production Methods*, Berlin, Springer
- [204] Kontou, E., Spathis, G., Kefalas, V. (2012) Statistical model for the compressive response of anisotropic polymeric and metallic foams. *Journal of Materials Science*, 47 (13). pp. 5326- 5332. doi: 10.1007/s10853-012-6419-x
- [205] Koohbor, B., Kidane, A., Lu, W. Y. (2016) Effect of specimen size, compressibility and inertia on the response of rigid polymer foams subjected to high velocity direct impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 98. pp. 62-74. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.08.006
- [206] Koohbor, B., Kidane, A., Lu, W. Y., Sutton, M. A. (2016) Investigation of the dynamic stress-strain response of compressible polymeric foam using a nonparametric analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 91. pp. 170-182. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.01.007
- [207] Koohbor, B., Ravindran, S., Kidane, A. (2017) Effects of cell-wall instability and local failure on the response of closed-cell polymeric foams subjected to dynamic loading. *Mechanics of Materials*, 116. pp. 67-76. doi: 10.1016/j.mechmat.2017.03.017

- [208] Koohbor, B., Ravindran, S., Kidane, A. (2018) Effects of cell-wall instability and local failure on the response of closed-cell polymeric foams subjected to dynamic loading. *Mechanics of Materials*, 116. pp. 67-76. doi:10.1016/j.mechmat.2017.03.017
- [209] Kreter, P. E. (1985) Polyurethane foam properties as a function of foam density. *Journal of Cellular Plastics*, 21 (5). pp. 306-310. doi: 10.1177/0021955X8502100502
- [210] Kroll, D. (n.d.) Printing Sleeve Information. Webconvert Ltd., Dostupno na: [http://www.webconvert-ltd.com/includes/pdfs/referencelibrary/printingsleeve\\_geninfo.pdf](http://www.webconvert-ltd.com/includes/pdfs/referencelibrary/printingsleeve_geninfo.pdf) [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [211] Król, P. (2008) *Linear Polyurethanes: Synthesis Methods, Chemical Structures, Properties and Applications*. Boca Raton, CRC Press.
- [212] Lacombe, R. (2006) *Adhesion measurement methods theory and practice*. Boca Raton, CRC Press.
- [213] Laden, P. (1997) *Chemistry and technology of water-based inks*. London, Chapman & Hall.
- [214] Lagerstedt, P., Kolseth, P. (1995) Influence of surface energetics on ink transfer in flexo printing. IARIGAI. *Advances in printing science and technology: proceedings of the 23rd research conference of IARIGAI, Paris, France*. pp. 269-299.
- [215] Laurent, G. L. (2002) *Measurement and Prediction Procedures for Printability in Flexography (MP3 Flexo)*. PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [216] Leach, R. H., Pierce, E. P. (1999) *The Printing Ink Manual*. In: Hickman, E. P., MacKenzie, M. J., Smith, H. G., 5th edition, London, Kluwer Academic Press. p. 573.
- [217] Lee, B. (1998) *Design characteristics unique to the flexographic printing process*. PhD Thesis. Rochester Institute of Technology, New York
- [218] Lee, S., Park, J., Yang, J., Lu, W. (2014) Molecular Dynamics Simulations of the Traction-Separation Response at the Interface between PVDF Binder and Graphite in the Electrode of Li-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 161 (9). pp. A1218-A1223. doi: 10.1149/2.0051409jes
- [219] Lee, W. M. (1985) A new approach to humid age compression set study in high resilient molded foams. *Journal of Cellular Plastics*, 21 (6). pp. 417-22. doi: 10.1177/0021955X8502100607
- [220] Lee S.-T., Ramesh N. S. (2004) *Polymeric Foams: Mechanisms and Materials*. New York, CRC Press.
- [221] LeFever, A., McEvoy, J. (2001) *Alternative Methods for Durability Specification*. In: *API Polyurethanes Expo 2001*. Boca Raton, CRC Press. p. 275.
- [222] Lehmann, G. W. H., Curts, H. A. J. (1974) *Pressure sensitive adhesive coated sheet material*. US4038454A (Patent).
- [223] Lei, Y., Zhou, S., Zou, H., Liang, M. (2014) Effect of crosslinking density on resilient of low-resilience flexible polyurethane foams. *Polymer Engineering & Science*, 55 (2). pp. 308-315. doi:10.1002/pen.23888

- [224] Leica (2019) Technical Data Sheet - Leica RM2255 - Fully Motorized Rotary Microtome. Leica Biosystems, Dostupno na: [https://drp8p5tqcb2p5.cloudfront.net/fileadmin/downloads\\_lbs/Leica%20RM2255/Acceptance%20and%20Specifications/Leica\\_RM2255\\_technical\\_data\\_EN.pdf](https://drp8p5tqcb2p5.cloudfront.net/fileadmin/downloads_lbs/Leica%20RM2255/Acceptance%20and%20Specifications/Leica_RM2255_technical_data_EN.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [225] Leloup, L.G. (2002) Measurement and Prediction Procedures for Printability in Flexography (MP3 Flexo), PhD Thesis, Royal Institute of Technology Department of Numerical Analysis and Computer Science, Stockholm
- [226] Lewis, P. M. (1980) Laboratory testing of rubber durability. *Polymer Testing*, 1 (3). pp. 167-189. doi:10.1016/0142-9418(80)90002-1
- [227] Li, K., Gao, X. L., Roy, A. K. (2003) Micromechanics model for three-dimensional open-cell foams using a tetrakaidecahedral unit cell and Castigliano's second theorem. *Composites Science and Technology*, 63 (12). pp. 1769-1781. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00117-9
- [228] Lim, D.- H., Kim, H.- J. (2006) Chapter 5 - General Performance of Pressure-Sensitive Adhesives. In: Benedek, I. *Pressure-Sensitive Design, Theoretical Aspects*, Utrecht, VSP.
- [229] Lin, S. B., Durfee, L. D., Ekeland, R. A., McVie, J., Schallau II, G. K. (2007) Recent Advances in Silicone Pressure-Sensitive Adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21 (7). pp. 605-623. doi: 10.1163/156856107781192274
- [230] Lindholm, G., Gustafsson, M., Girard Leloup, L., Vuillermoz, S. (1996) Ink transfer in flexo evaluated by X-ray fluorescence. *Taga, 1996 TAGA Proceedings*. pp. 102-117.
- [231] Lindström, C., Dölling, R., Poustis, J. (1994) Evaluating the printability of liner board for flexography. *Paper Technology*, 10, pp. 38-41.
- [232] Lingier, S., Meuris, W. (2012) Method of preparing a flexographic printing master. W02014095361A1 (Patent).
- [233] Lion, A. (1996) A constitutive model for carbon black filled rubber, experimental investigation and mathematical representation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 8 (3). pp. 153-169. doi: 10.1007/BF01181853
- [234] Lippert, T., Dickinson, J. T. (2003) Chemical and Spectroscopic Aspects of Polymer Ablation: Special Features and Novel Directions. *Chemical Reviews*, 103 (2). pp. 453-86. doi: 10.1021/cr010460q
- [235] Liu, B., Nie, J., He, Y. (2016) From rosin to high adhesive polyurethane acrylate: Synthesis and properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 66. pp. 99-103. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.01.002
- [236] Liu, K., Liang, W., Ren, F., Ren, J., Wang, F., Ding, H. (2019) The study on compressive mechanical properties of rigid polyurethane grout materials with different densities. *Construction and Building Materials*, 206, 270-278. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.012
- [237] Liu, X., Guthrie, J., Bryant, C. (2004) A Study of the Relevance of Plate Quality and Print Quality to UV Flexographic Folding Carton Printing. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 87 (3). pp. 167-174.



- [238] Liu, X., Guthrie, J. T., Bryant, C. (2002) A study of the processing of flexographic solid-sheet photopolymer printing plates. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 85 (4). pp. 313-319.
- [239] Liu, X., Xin, W., Zhang, J. (2010) Rosin-derived imide-diacids as epoxy curing agents for enhanced performance. *Bioresource Technology*, 101 (7). pp. 2520-2524. doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.028
- [240] Louche, H., Piette-Coudol, F., Arrieux, R., Issartel, J. (2009) An experimental and modeling study of the thermomechanical behavior of an ABS polymer structural component during an impact test. *International Journal of Impact Engineering*, 36 (6). pp. 847-861. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.09.007
- [241] Lu, W.- Y., Neidigk, M., Wyatt, N. (2016) Cyclic Loading Experiment for Characterizing Foam Viscoelastic Behavior. *Experimental and Applied Mechanics*, 4. pp. 135-144. doi:10.1007/978-3-319-42028-8\_16
- [242] Lu, Z.X., Huang, J.X., Yuan, Z.S. (2015) Effects of microstructure on uniaxial strength asymmetry of open-cell foams. *Applied Mathematics and Mechanics*, 36 (1). pp. 37-46. doi: 10.1007/s10483-015-1893-9
- [243] Luckenbach, T. A. (n.d.) DMTA: Dynamic Mechanical Thermal Analysis. PhD Thesis. Rheometrics Inc., Piscataway, New Jersey.
- [244] Luminite (2018) Feathering: A Pressure-Packed Flexo Printing Defect (with Other Causes). Luminite, Bradford, Pennsylvania, Dostupno na: <https://blog.luminite.com/blog/feathering-flexo-printing-defect> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [245] MacPhee, J. (1997) A Unified View of the Film Splitting Process, Part 1. *American Ink Maker*, 75 (1). pp. 42-49.
- [246] MacPhee, J. (1998) *Fundamentals of Lithographic Printing*. Pittsburgh, GATFPress. pp. 86-106.
- [247] MacPhee, J., Lester L. E. (1986) Some New Ideas on Pinpointing the Cause of Horizontal Streaks, *TAGA Proceedings*. p. 84.
- [248] Magniez, K., De Lavigne, C., Fox, B. L. (2010) The effects of molecular weight and polymorphism on the fracture and thermo-mechanical properties of a carbon-fibre composite modified by electrospun poly(vinylidene fluoride) membranes. *Polymer*, 51 (12). pp. 2585-96. doi: 10.1016/j.polymer.2010.04.021
- [249] Mahović Poljaček, S., Cigula, T., Tomašegović, T. (2013) Meeting the quality requirements in flexographic plate making process. *International Circular of Graphic Education and Research*, 6, pp. 62-69.
- [250] Mark, J. E. (2007) *Physical Properties of Polymers Handbook*. New York, Springer. doi: 10.1007/978-0-387-69002-5
- [251] Mark Andy (2018) Secure Your Workflow: Best Tapes for the Job. Mark Andy, Dostupno na: <http://blog.markandy.com/secure-your-performance-best-tapes> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [252] Markets and Markets (2018) Market Research Report. Markets and Markets, Dostupno na: [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyurethane-foams-market-1251.html?gclid=Cj0KCQjwpfHzBRCiARIsAHHzyZqvSdW\\_pIDxDiu5vMypdy0OkMHDxp6gcec0JWOaAlLy\\_l5h1Fz34x0aAgCIEALw\\_wcB](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyurethane-foams-market-1251.html?gclid=Cj0KCQjwpfHzBRCiARIsAHHzyZqvSdW_pIDxDiu5vMypdy0OkMHDxp6gcec0JWOaAlLy_l5h1Fz34x0aAgCIEALw_wcB) [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [253] Mathes, H. (2011) Flexo troubleshooting. Most common flexo printing issues, Part 1/2/3. Flexo and Gravure International, Volume 2/3/4, pp. 12-13/20-22/22-23.
- [254] Mathes, H. (2012) Flexo troubleshooting. Most common flexo printing issues, Part 4. Flexo and Gravure Global, 1. pp. 10-11.
- [255] Matzke, E.B. (1946) The three-dimensional shape of bubbles in foam - An analysis of the role of surface forces in three-dimensional cell shape determination. *American Journal of Botany*, 33 (1). pp. 58-80. doi: 10.1002/j.1537-2197.1946.tb10347.x
- [256] Mesic, B. (2006) Printability of polyethylene coated paper and paperboard, PhD thesis, Karlstad University, Karlstad, Sweden, pp. 11-19.
- [257] Meyer, K.H. (1996) Toleranzen in der Druckabwicklung und deren Auswirkung. DFTA-TZ, Stuttgart
- [258] Meyer, K.H., Durholz, R., Butterich, K. (1996) The printing plate as a quality characteristic in the reproduction of the printed image in flexographic printing. DFTA Technology Centre, Technical College of Printing, Stuttgart.
- [259] Miller, B.W. (1997) Determining printability of liner-board manufactured for postprint converters using water-based flexographic ink. 1997 Process & Product Quality Conference Proceedings, TAPPI, pp. 135-138.
- [260] Mills, N. (2007) *Polymer Foams Handbook - Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*. Oxford, Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/B978-0-7506-8069-1.X5000-4
- [261] Mills, N. J., Stampfli, R., Marone, F., Bruhwiler, P. A. (2009) Finite element micromechanics model of impact compression of closed-cell polymer foams. *International Journal of Solids and Structures*, 46 (3-4). pp. 677-697. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.09.012
- [262] Mirle, S. K. (1989) *Studies on Flexography: Characterization of Surface, Compositional and Mechanical Properties of Photopolymer Plates. Printability Experiments and Mathematical Modelling of Flexographic Printing*. Bethlehem, Lehigh University.
- [263] Miyasaka, H., Kitazaki, Y., Matsuda, T., Kobayashi, J. (1985) Wiederablosbares klebemittel. DE3544868A1 (Patent).
- [264] Mokrzycki, W., Tatol, M. (2011) Color difference Delta E - A survey. *Machine Graphics and Vision*, 20 (4). pp. 383-411.
- [265] Molded Dimension, LLC. (2019) Creep and Stress Relaxation. Molded Dimension, LLC, Dostupno na: <https://moldeddimensions.com/creep-and-stress-relaxation.php> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [266] Mondal, D. P., Goel, M. D., Das, S. (2009) Compressive deformation and energy absorption characteristics of closed-cell aluminum-fly ash particle composite foam. *Materials Science and Engineering: A*, 507 (1-2). pp. 102-109. doi: 10.1016/j.msea.2009.01.019
- [267] Moreland, J. C., Wilkes, G. L., Turner, R. B. (1991) Segmental orientation behaviour of flexible water-blown polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 43 (4). pp. 801-814. doi: 10.1002/app.1991.070430419
- [268] Morssinkhof, G. H. (1982) Process of electroforming a metal product and an electroformed metal product. US4496434A (Patent).

- [269] Mulliken, A. D., Boyce, M. C. (2006) Mechanics of the rate-dependent elastic-plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 43 (5). pp. 1331-1356. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.04.016
- [270] Mullins, L., Tobin, N. (1965) Stress softening in rubber vulcanizates. part I. Use of a strain amplification factor to describe the elastic behavior of filler-reinforced vulcanized rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 9 (9). pp. 2993-3009. doi: 10.1002/app.1965.070090906
- [271] Murray, A. (1936) Monochrome reproduction in photoengraving. *Journal of Franklin Institute*, Oxford, Pergamon Press. pp. 721-744.
- [272] Nagy, A., Ko, W. L., Linholm, U. S. (1974) Mechanical behavior of foamed material under dynamic compression. *Journal of Cellular Plastics*, 10 (3). pp. 127-134. doi: 10.1177/0021955X7401000306
- [273] Nakai, K., Yokoyama, T. (2008) Strain rate dependence of compressive stress-strain loops of several polymers. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2 (4). pp. 557-566. doi: 10.1299/jmmp.2.557
- [274] Nanocenter (2010) Optical Microscope Olympus BX51. Nanocenter, Dostupno na: <http://www.nanocenter.si/en/index.php?page=optical-microscope-olympus-bx51> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [275] Nelsen, L. E., Landel, R. F. (1994) *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. 2nd edition, New York, Marcel Dekker, pp. 33-36.
- [276] Nelson, J. (2018) *The Future of Flexographic Printing to 2023*. Surrey, Smithers Pira.
- [277] Nordström, J.-E. P. (2000) Thermal Changes in a Waterless Sheet-Fed Offset Inking Station. *International Printing & Graphic Arts Conference*, Savannah, TAPPI Press. pp. 153-165.
- [278] Nordström, J.-E. P., Johnson, J. (2002) CSWO (Cold Set Waterless Web Offset) Using Standard Tmp/Dip Newsprint. *International Printing & Graphic Arts Conference*, Bordeaux. p. 11.
- [279] Novaković, D., Dedijer, S., Mahović Poljaček, S. (2010) A model for improving the flexographic printing plate making process. *Technical Gazette*, 17(4). pp. 403-410.
- [280] Obi, B. E. (2017) *Polymeric Foams Structure-Property-Performance*. Norwich, William Andrew. doi: 10.1016/C2012-0-06136-4
- [281] Olsson, R., Yang, L., van Stam, J., Lestelius, M. (2006) Effects of ink setting in flexographic printing: Coating polarity and dot gain. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 21 (5). pp. 569-574.
- [282] Olsson, R., Yang, L., van Stam, J., Lestelius, M. (2007) Effects of elevated temperature on flexographic printing. In: Enlund, N., Lovreček, M. *Advances in Printing and Media Technology*. Proceedings of the 34th International Research Conference of iarigai, Septembar, Grenoble, France, pp. 85-93.
- [283] Olympus (2004) *Research System Microscope - BX51/BX61 - BX2 Series*. Olympus, Dostupno na: <http://olympus.magnet.fsu.edu/brochures/pdfs/bx51motorized.pdf> [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [284] Olympus (2020) CX50 Color Camera. Olympus, Dostupno na: [https://www.olympus-lifescience.com/en/camera/color/xc50/#!/cms\[focus\]=cmsContent457](https://www.olympus-lifescience.com/en/camera/color/xc50/#!/cms[focus]=cmsContent457) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [285] Omar, M. F., Akil, H. M., Ahmad, Z. A. (2011a) Measurement and prediction of compressive properties of polymers at high strain rate loading. *Materials & Design*, 32 (8-9). 4207-4215. doi:10.1016/j.matdes.2011.04.037
- [286] Omar, M. F., Akil, H. M., Ahmad, Z. A. (2011b) Static and dynamic compressive properties of mica/polypropylene composites. *Materials Science and Engineering: A*, 528: (3). pp. 1567-1576. doi: 10.1016/j.msea.2010.10.071
- [287] Otter, J. W., Watts, G. R. (1990) Positionable-repositionable pressure-sensitive adhesive. WO1991006424A1 (Patent).
- [288] Otto, G. P., Moisés, M. P., Carvalho, G., Rinaldi, A. W., Garcia, J. C., Radovanovic, E., Fávoro, S. L. (2017) Mechanical properties of a polyurethane hybrid composite with natural lignocellulosic fibers. *Composites Part B: Engineering*, 110. pp. 459-465. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.035
- [289] Ouellet, S., Cronin, D., Worswick, M. (2006) Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. *Polymer Testing*, 25 (6). pp. 731-43. doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.05.005
- [290] Ouyang, J., Jacobson, S., Shen, L., Reedell, S. (2001) Characterization of Acrylic PUR based Waterborne PSAs. In: *Proceedings of 24th Annual Meeting of Adhesion Society*. 25-28 Februar, Williamsburg, Virginia. p. 236.
- [291] O'Sickey, M. J., Lawrey, B. D., Wilkes, G. L. (2002) Structure-property relationships of poly(urethane urea)s with ultra-low monol content poly(propylene glycol) soft segments. I. Influence of soft segment molecular weight and hard segment content. *Journal of Applied Polymer Science*, 84 (2). pp. 229-43. doi: 10.1002/app.10168
- [292] Packaging & Converting Intelligence (2017) Polymount's sustainable Twinlock Sleeves. *Global Trade Media*, Dostupno na: <http://www.pci-mag.com/features/featurepolymounts-sustainable-twinlock-sleeves-5928257/> [Pristupljeno 26.9.2019]
- [293] Pal, S., Maiti, S., Subhash, G. (2010) Effect of microscopic deformation mechanisms on the dynamic response of soft cellular materials. *Mechanics of Materials*, 42 (2). pp. 118-133. doi: 10.1016/j.mechmat.2009.11.014
- [294] Patrick, R. L. (1969) *Treatise on Adhesion and Adhesives - Vol 2*. New York, Dekker.
- [295] Payne, A. (1962) The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6 (19). pp. 57-63. doi: 10.1002/app.1962.070061906
- [296] Peijnenburg, W. J. G. M. (2008) Phthalates. In: Jørgensen, S. E., Fath, B. D. *Encyclopedia of Ecology*. pp. 2733-2738. doi: 10.1016/B978-008045405-4.00419-5
- [297] Peng, Z., Chen, S. (2015) Effect of bending stiffness on the peeling behavior of an elastic thin film on a rigid substrate. *Physical Review E*, 91 (4). doi: 10.1103/PhysRevE.91.042401
- [298] Peng, Z., Wang, C., Chen, L., Chen, S. (2014) Peeling behavior of a viscoelastic thin-film on a rigid substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 51 (25-26). pp. 4596-4603. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.10.011

- [299] Perrot, C., Panneton, R., Olny, X. (2007) Periodic unit cell reconstruction of porous media: application to open-cell aluminum foams. *Journal of Applied Physics*, 101 (11). pp. 113538 - 113538-11. doi: 10.1063/1.2745095
- [300] Petrie, E. M. (2000) *Handbook of Adhesives and Sealants*. New York, McGraw-Hill Companies, Inc.
- [301] Petrović, S., Kašiković, N. (2018) Sleeve type influence on flexographic print quality. *International Circular of Graphic Education and Research* ISSN: 2166-465X, (11). pp. 35-51.
- [302] Petrović, S., Novaković, D., Đurđević, S. (2018) Unapređenje kvaliteta procesa izrade kartonske ambalaže za tečnu hranu. *Zbornik radova fakulteta tehničkih nauka*, 33 (3). pp. 339-342
- [303] Petru, M., Novák, O. (2017) Measurement and Numerical Modeling of Mechanical Properties of Polyurethane Foams. In: Faris Yilmaz. *Aspects of Polyurethanes*. doi: 10.5772/intechopen.69700
- [304] Plagge, J., Klüppel, M. (2017) A physically based model of stress softening and hysteresis of filled rubber including rate- and temperature dependency. *International Journal of Plasticity*, 89. pp. 173-196. doi:10.1016/j.ijplas.2016.11.010
- [305] PMA (2019) Polyurethane advantages & properties. Precision Urethane & Machine, Inc., Dostupno na: <https://www.precisionurethane.com/urethane-advantage.html> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [306] Podhajny, R. M. (1990) Critical Ink/Press Performance Parameters in Flexo and Gravure, *Polymers, Lamination & Coatings*. TAPPI Conference Proceedings, Boston, Massachusetts. pp. 581-583.
- [307] Poisson, C., Hervais, V., Lacrampe, M. F., Krawczak, P. (2006) Optimization of PE/binder/PA extrusion blow-molded films. II. Adhesion properties improvement using binder/EVA blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 101 (1). pp. 118-127. doi: 10.1002/app.22407
- [308] Polymount (2018) Twinlock self-adhesive sleeves by tesa. Polymount creators of reusable solutions, Dostupno na: <http://www.polymount-int.nl/nl/product/polymounttwinlock> [Pristupljeno: 26.9.2019]
- [309] Polymount International BV (2009) Twinlock self-adhesive sleeves. Polymount International BV
- [310] Pommice, J.C., Poustis, J., Lalanne, F. (1989) Testing the printability of board for flexography. *Paper Technology*, 11, pp. 22-24
- [311] Priester, R. D., Turner, R. B. (1994) The morphology of flexible polyurethane matrix polymers. In: Hilyard, N.C., Cunningham, A., *Low Density Cellular Plastics: Physical Basis of Behavior*. London, Chapman & Hall. pp. 78-103.
- [312] Prisacariu, C. (2011) *Polyurethane elastomers: from morphology to mechanical aspects*. Vienna, Springer. doi: 10.1007/978-3-7091-0514-6
- [313] PSI Urethanes Inc. (2019) Thermoset Urethane vs. Thermoplastic Urethane. PSI Urethanes Inc., Dostupno na: <https://psiurethanes.com/urethane-resources/thermoset-vs-thermoplastic/> [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [314] PSTC (1974) Glossary of Terms used in Pressure Sensitive Tapes Industry. Pressure Sensitive Tape Council. Glenview.
- [315] Pukánszky, B., Fekete, E. (1999) Adhesion and surface modification. Mineral fillers in thermoplastics I, 139. pp. 109-153. doi: 10.1007/3-540-69220-7\_3
- [316] QFP (2019) Polyurethane Glossary. Quality Foam Packaging, Dostupno na: <http://www.qualityfoam.com/polyurethane-glossary.asp> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [317] Qi, H. J., Boyce, M. C. (2005) Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes. *Mechanics of Materials*, 37 (8). pp. 817-839. doi: 10.1016/j.mechmat.2004.08.001
- [318] Quinn, J. A., Valenzuela, D. P., Micale, F. J., Lavelle, J. S. (1997) Does the Surface Energy of the Plate Affect Ink Transfer?. *CONVERTER e Cartotecnica*, 10. pp. 135-143.
- [319] Rabaud, M., Couder, Y., Michalland, S. (1991) Wavelength selection and transients in the onedimensional array of cells of the printer's instability. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 10 (2). pp. 253-260.
- [320] Rafiee, Z. (2015) Synthesis and characterization of polyurethane/microcrystalline cellulose bionanocomposites. *Progress in Organic Coatings*, 86. pp. 190-193. doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.05.013
- [321] Randall, D., Lee, S. (2003) *The Polyurethanes Book*. New York, Wiley Ltd.
- [322] Rendek, M., Lion, A. (2010) Amplitude dependence of filler-reinforced rubber: Experiments, constitutive modelling and fem-implementation. *International Journal of Solids and Structures*, 47 (21). pp. 2918-2936. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2010.06.021
- [323] Rentzhog, M., Fogden, A. (2005) Rheology and Surface Tension of Water-Based Flexographic Inks and Implications for Wetting of PE-Coated Board. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 20 (4). pp. 399-409.
- [324] Rie, K. T. (1987) *Low cycle fatigue and elasto-plastic behaviour of materials*. Netherlands, Springer.
- [325] Rosenberger, R. R. (2010) Method of and apparatus for measuring the quality of a surface of a substrate. US Patent 2010/0231708.
- [326] Rusch, K.C. (1970) Load-compression behavior of brittle foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 14 (5). pp. 1263-1276. doi: 10.1002/app.1970.070140514
- [327] Russo, R., Thomas, E. (1983) Phase separation in linear and cross-linked polyurethanes. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 22 (4). pp. 553-75. doi: 10.1080/00222348308224776
- [328] Río, G. D., Rodríguez, J. (2010) Compression yielding of polypropylenes above glass transition temperature. *European Polymer Journal*, 46 (6). pp. 1244-1250. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2010.02.016
- [329] Río, G. D., Rodríguez, J. (2012) Compression yielding of epoxy: Strain rate and temperature effect. *Materials & Design*, 35. pp. 369-373. doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.034

- [330] Sadovnikov, A., Salmela, P., Lensu, L., Kamarainen, J.-K., Kälviäinen, H. (2005) Mottling Assessment of Solid Printed Areas and Its Correlation to Perceived Uniformity. In: Kalviainen, H., Parkkinen, J., Kaarna, A. SCIA 2005. Image Analysis - Proceedings of the 15th Scandinavian Conference SCIA 2005. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. pp. 409-418.
- [331] Safari, K. H., Zamani, J., Ferreira, F. J., Guedes, R. M. (2012) Constitutive modeling of polycarbonate during high strain rate deformation. *Polymer Engineering and Science*, 53 (4). pp. 752-761. doi: 10.1002/pen.23315
- [332] Saffman, P. G., Taylor, G. I. (1958) The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Science*, 245 (1242). pp. 312-329.
- [333] Sahu, N. H., Mandaogade, P. M., Deshmukh, A. M., Meghre, V. S., Dorle, A. K. (1999) Biodegradation studies of rosin-glycerol ester derivative. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 14 (4). pp. 344-360. doi: 10.1177/088391159901400405
- [334] Saint-Michel, F., Chazeau, L., Cavallé, J.-Y., Chabert, E. (2006) Mechanical properties of high-density polyurethane foams: I. Effect of the density. *Composites Science and Technology*, 66 (15). pp. 2700-2708. doi:10.1016/j.compscitech.2006.03.009
- [335] Sargent, J. P. (2005) Durability studies for aerospace applications using peel and wedge tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25 (3). pp. 247-56. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2004.07.005
- [336] Sarva, S., Deschanel, S., Boyce, M., Chen, W. (2007) Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates. *Polymer*, 48 (8). pp. 2208-2213. doi: 10.1016/j.polymer.2007.02.058
- [337] Satas, D. (1982) *Handbook of Pressure-Sensitive Adhesive Technology*. New York, Van Nostrand Reinhold Co.
- [338] Satas, D. (1989) *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*. 2nd edition. New York, Springer.
- [339] Satturwar, P. M., Mandaogade, P. M., Darwhekar, G. N., Fulzele, S. V., Joshi, S. B., Dorle, A. K. (2003) Biodegradation studies of rosin-based polymers. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 29 (6). pp. 669-677. doi: 10.1081/DDC-120021316
- [340] Sauer, H. M., Bornemann, N., Dorsam, E. (2011) Viscous fingering in functional flexo printing: an inevitable bug?. *Clusterkonferenz Forum Organic Electronics. LOPE-C (Large-area, Organic and Printed Electronics Convention) Proceedings*. Munchen, Germany, 28-30 Jun. LOPE-C.
- [341] Sauer, R. A. (2011) The Peeling Behavior of Thin Films with Finite Bending Stiffness and the Implications on Gecko Adhesion. *The Journal of Adhesion*, 87 (7-8). pp. 624-643. doi: 10.1080/00218464.2011.596084
- [342] Saunders, H., Frisch, K. C. (1964) *Polyurethanes*. New York, Wiley.
- [343] Sauter GmbH (2015) *Instruction Manual Digital Shore Hardness Tester*. Sauter GmbH, Dostupno na: <http://compactinstruments.co.uk/wp-content/uploads/2017/05/Sauter-HD-Professional-Shore-Hardness-Tester-Instruction-Manual.pdf> [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [344] Schaeffer, W. D., Fisch, A. B., Zettlemyer, A. C. (1963) Transfer and Penetration Aspects of Ink Receptivity. *Tappi*, 46 (6). pp. 359-375.
- [345] Schijve, J. (2009) *Fatigue of structures and materials*. Netherlands, Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-6808-9
- [346] Schultz, A. K., Kofira, N. (2001) The Use of Non-Migrating Surfactants in Pressure-Sensitive Adhesive Application. In: *Proceedings of 24th Annual Meeting of Adhesion Society*. 25-28 Februar, Williamsburg, Virginia. p. 163.
- [347] Sehgal K.C. (1985) *Fundamental and Practical Aspects of Adhesive Testing*. SME Society of Manufacturing Engineers. In: *Adhesives 1985 Conference Papers*. 10. September, Atlanta, Georgia.
- [348] Sekulić, A. (2008) *Experimental identification of adhesive properties between epoxy and glass*. Thesis. EPFL, Lausanne, Lausanne EPFL. doi: 10.5075/epfl-thesis-4001
- [349] Senatov, F. S., Niaza, K. V., Stepashkin, A. A., Kaloshkin, S. D. (2016) Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed PLA-based porous scaffolds. *Composites Part B: Engineering*, 97. pp. 193-200. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.067
- [350] Serban, D.- A., Weissenborn, O., Geller, S., Marshavina, L., Gude, M. (2016) Evaluation of the mechanical and morphological properties of long fibre reinforced polyurethane rigid foams. *Polymer Testing*, 49. pp. 121-127. doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.11.007
- [351] Sharma, G., Wu, W., Dalal, E.N. (2005) The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations. *Color Research & Application*, 30 (1). pp. 21-30.
- [352] Sharpe L. H. (1993) Interfaces, Interphases and „Adhesion“: A Perspective. In: Akovali, G. *The Interfacial Interactions in Polymeric Composites*, 230. pp. 1-20. doi: 10.1007/978-94-011-1642-8
- [353] Shimadzu Corporation (2018) *Table-Top Universal Testing Instruments - EZ Test*. Shimadzu Corporation, Dostupno na: [https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com/an/files/ckeditor/an/pdf/348\\_c224e055e.pdf](https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com/an/files/ckeditor/an/pdf/348_c224e055e.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [354] Shimadzu (2019) *90° Peeling Test for Adhesive Tapes [Standard No. ISO 29862:2007 (JIS Z 0237:2009)]*. Shimadzu, Dostupno na: <https://www.shimadzu.com/an/industry/petrochemicalchemical/n9j25k00000dzhm7.html> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [355] Shimadzu (2020) *Trapezium X*. Shimadzu, Dostupno na: <https://www.shimadzu.com/an/test/universal/trapeziumx.html> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [356] Shufen L., Zhi J., Kaijun Y., Shuqin Y., Chow W. K. (2006) Studies on the thermal behavior of polyurethanes. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45 (1). pp. 95-108. doi: 10.1080/03602550500373634.
- [357] Shuman, R. J., Burns, B. (1988) *Readhering and removable adhesive*. WO1988001636A1 (Patent).
- [358] Silva, M. C., Takahashi, J. A., Chaussy, D., Belgacem, M. N., Silva, G. G. (2010) Composites of rigid polyurethane foam and cellulose residue. *Journal of Applied Polymer Science*, 117 (6). pp. 3665-3672. doi: 10.1002/app.32281



- [359] Singh, B., Sharma, N. (2008) Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93 (3). pp. 561-84. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008
- [360] Singh, S.N. (2002) *Blowing Agents for Polyurethane Foams - Vol 12*. Shawbury, Rapra Technology.
- [361] Smyth, S. (2009) *The Print and Production Manual*. 11th Ed. United Kingdom, Pira International Ltd.
- [362] Smyth, S., Mikhael, G. (2015) *The Future of Global Printing to 2020*. Surrey, Smithers Pira
- [363] Song, B., Chen, W. W., Dou, S., Winfree, N. A., Kang, J. H. (2005) Strain-rate effects on elastic and early cell-collapse responses of a polystyrene foam. *International Journal of Impact Engineering*, 31 (5). pp. 509-521. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.02.003
- [364] Sonnenschein M. F. (2014) *Introduction to Polyurethane Chemistry*. In: Sonnenschein MF. *Polyurethanes: Science, Technology, Markets, and Trends*, John Wiley & Sons Inc. pp. 105-126.
- [365] SpecialChem (2019) *Plasticizers for Adhesives and Sealants*. SpecialChem, Dostupno na: <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/plasticizers-for-adhesives-and-sealants/how-plasticizers-work> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [366] Spies, G. J. (1953) The Peeling Test on Redux-bonded Joints. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 25 (3). pp. 64-70. doi: 10.1108/eb032268
- [367] Srivastava, V., Srivastava, R. (2014) On the polymeric foams: modeling and properties. *Journal of Materials Science*, 49 (5). pp. 2681-2692. doi: 10.1007/s10853-013-7974-5
- [368] Stable Micro Systems (n.d.) *How to Measure Peel/Seal Strength*. Stable Micro Systems, Dostupno na: <https://www.stablemicrosystems.com/MeasurePeelStrength.html> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [369] Stanton, A., Radencic, G. (2001) Ink trapping and colourimetric variation. TAGA. *Proceedings of 53rd TAGA International Technical Conference*. Mart, San Diego, California, TAGA, pp. 258-281.
- [370] Statista (2016) *Polyurethane Global Market Size Forecast 2021*. Statista, Dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/720449/global-polyurethane-market-size-forecast/> [Pristupljeno 26.9.2019.]
- [371] Steadman, R., Woodall M. and Lesniak M. (1993) The flexographic printability of linerboard. *Appita Annual General Conference*. Parkville, APPITA, pp. 629-638
- [372] Sun, Y., Li, Q. M. (2015) Effect of entrapped gas on the dynamic compressive behavior of cellular solids. *International Journal of Solids and Structures*, 63. pp. 50-67. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.02.034
- [373] Swadener, J. G., Liechti, K. M., Lozanne, A. (1999) The intrinsic toughness and adhesion mechanisms of a glass/epoxy interface. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47 (2). pp. 223-58. doi: 10.1016/S0022-5096(98)00084-2
- [374] Szycher, M. (1999) *Handbook of polyurethanes*. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- [375] Szycher M. (2006) *Szycher's Handbook of Polyurethanes*. 2<sup>nd</sup> edition, New York, CRC Press.

- [376] Sánchez, J. M., El-Mansy, S., Sun, B., Scherban, T., Fang, N., Pantuso, D., Ford, W., Elizalde, M. R., Martínez-Esnaola, J. M., Martín-Meizoso, A., Gil-Sevillano, J., Fuentes, M., Maiz, J. (1999) Cross-sectional nanoindentation: a new technique for thin film interfacial adhesion characterization. *Acta Materialia*, 47 (17). pp. 4405-4413. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00254-2
- [377] Takemoto, M., Karasawa, T., Mizumachi, H., Kajiyama, M. (2000) Miscibility between ethylene vinyl acetate copolymers and tackifier resins. *The Journal of Adhesion*, 72 (1). pp. 85-96. doi: 10.1080/00218460008029269
- [378] Tang, L., Tam, K., Yue, C., Hu, X., Lam, Y., Li, L. (2001) Influence of the molecular weight of ethylene vinyl acetate copolymers on the flow and mechanical properties of uncompatibilized polystyrene/ethylene-vinyl acetate copolymer blends. *Polymer International*, 50 (1). pp. 95-106. doi: 10.1002/1097-0126(200101)50:1<95::AID-PI591>3.0.CO;2-7
- [379] Taylor, J. H., Zettlemyer, A. C. (1958) Hypothesis on the Mechanism of Ink Splitting During Printing. *Tappi Journal*, 41 (12). pp. 749-757.
- [380] Techkon (2018) A simple review of CIE  $\Delta E^*$  (Color difference) equations. Techkon USA, Dostupno na: <https://www.techkonusa.com/a-simple-review-of-cie-%CE%B4e-color-difference-equations/> [Pristupljeno: 25.9.2019.]
- [381] TechMedia (2010) Market Survey: Plate Mounting Tapes. TechMedia, Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/39266679/MarketPlateMountingTapes-FGA-1-2010> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [382] Tedesco, J., Ross, C., Kuennen, S. (1993) Strain rate effects on the compressive strength of shock-mitigating foams. *Journal of Sound Vibration*, 165 (2). pp. 376-84. doi: 10.1006/jsvi.1993.1265
- [383] Teleman, A., Christiansson, H., Johansson, P.- A., Fahlcrantz, C.-M., & Lindberg, S. (2005) Correct measurements of half-tone print mottle on flexo printed lineboard. Stockholm, STFI-Packforsk.
- [384] Tersac, G. (2007) Chemistry and technology of polyols for polyurethanes. Mihail Ionescu. Rapra Technology, Shrewsbury, UK. - Book Review. *Polymer International*, 56 (6). pp. 820. doi: 10.1002/pi.2159
- [385] Tesa (2015) tesa Softprint® 52015 Steel Master - product information. Tesa, Beiersdorf, Dostupno na: <https://www.tesa.com/en/industry/tesa-softprint-52015-steel-master.html> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [386] Tesa (2018) Tesa Twinlock® Self-Adhesive Plate Mounting Sleeves. Tesa, Beiersdorf, Dostupno na: <https://www.tesa.com/en-gb/industry/paper-print/tape-applications/plate-mounting-tapes-flexo/adhesive-plate-mounting-sleeves> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [387] Thompson, W., Borski, M. (1996) Process for producing polymer-covered flexographic printing sleeves. US5544584A (Patent).
- [388] Thwing-Albert (n.d.) German Wheel Peel Fixture. Thwing-Albert Dostupno na: <https://www.thwingalbert.com/german-wheel-peel-fixture.html> [Pristupljeno: 27.9.2019.]

- [389] Tobushi, H., Hayashi, S., Endo, M., Shimada, D. (2002) Creep and Stress Relaxation of Polyurethane-Shape Memory Polymer Foam. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A*, 68 (676). pp. 1788-1793. doi: 10.1299/kikaia.68.1788
- [390] Todd, R.E. (1994a) *Printing Inks: Formulation Principles, Manufacture and Quality Control Testing Procedures*. Surrey, Pira International
- [391] Todd, R. E. (1994b) *Printing Inks: Formulation Principles, Manufacture and Quality Control Testing Procedures*. Leatherhead, Surrey, Pira International. p. 427.
- [392] Tollenaar, D., Ernst, P. A. H. (1962) Optical density and ink layer thickness. In: Banks, W. H., *Advances in Printing Science and Technology*. 2, Oxford, Pergamon Press. pp. 214-234.
- [393] Trelleborg (2017) Reducing bounce via sleeves. Trelleborg, Dostupno na: <https://www.trelleborg.com/printing/~media/printing--solutions/resources/whitepapers/trelleborg-axcyl-reducing-bounce-2017.pdf> [Pristupljeno: 26.9.2019.]
- [394] Trelleborg (n.d.) Trouble Shooting Guide. Trelleborg, Dostupno na: [http://kgs.in/Uploads/News/3\\_27\\_2015\\_7\\_06\\_12\\_AMTROUBLE\\_SHOOTING\\_GUI\\_DE.pdf](http://kgs.in/Uploads/News/3_27_2015_7_06_12_AMTROUBLE_SHOOTING_GUI_DE.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [395] Valdec, D., Miljković, P., Čerepinko, D. (2018) The Impact of Top Dot Shapes of the Printing Plate on Dot Formation in Flexography. *Technical Gazette*, 25 (2). pp. 596-602.
- [396] Valdec, D., Zjakić, I., Milković, M. (2013) The influence of variable parameters of flexographic printing on dot geometry of pre-printed printing substrate. *Tehnički vjesnik*, 20 (4). pp. 659-667.
- [397] Vianord (2015a) EVO4E. Vianord, Dostupno na: <http://www.vianord.com/downloads/single-function-equipments/item/evo4-e> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [398] Vianord (2015b) EVO4IP. Vianord, Dostupno na: <http://www.vianord.com/downloads/single-function-equipments/item/evo4-ip> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [399] Vianord (2015c) EVO4DLF. Vianord, Dostupno na: <http://www.vianord.com/downloads/multi-function-equipments/item/evo4-dlf> [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [400] Vilgis, T. A., Heinrich, G., Kluppel, M. (2009) *Reinforcement of polymer nanocomposites: theory, experiments and applications*. Cambridge, Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511605314
- [401] Walker, W. C., Fetsko, J. M. (1955) A Concept of Ink Transfer in Printing. *American Ink Maker*, 33 (12). pp. 38-44/69-71.
- [402] Wang, H., Zhou, H., Huang, Z., Zhang, Y., Qiao, H., Yu, Z. (2016) Experimental investigation and modeling of the mechanical behavior of PC/ABS during monotonic and cyclic loading. *Polymer Testing*, 50. pp. 216-223. doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.12.010
- [403] Wang, J., Wang, H., Chen, B., Huang, H., Liu, S. (2017) A failure mechanism-based model for numerical modeling the compression-after-impact of foam-core sandwich panels. *Composites Science and Technology*, 151. pp. 258-267. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.08.027
- [404] Warren, W. E., Kraynik, A. M. (1988) The linear elastic properties of open-cell foams. *Journal of Applied Mechanics*, 55 (2). pp. 341-346. doi: 10.1115/1.3173680

- [405] Wei, Y. (2004) Modeling nonlinear peeling of ductile thin films--critical assessment of analytical bending models using FE simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 41 (18-19). pp. 5087-5104. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.04.026
- [406] Wei, Y. G., Zhao, H. F. (2008) Peeling experiments of ductile thin films along ceramic substrates - Critical assessment of analytical models. *International Journal of Solids and Structures*, 45 (13). pp. 3779-3792. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2007.10.023
- [407] Wiest, H. (1966) Prüfung von Folienklebstoffen. *Adhäsion*, 10. pp. 145-150.
- [408] Wirpsza, Z., Kemp, T. J. (1993) *Polyurethanes: chemistry, technology, and applications*. New York, E. Horwood
- [409] x-rite (2014) eXact. X-Rite, Dostupno na: [https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/literature/17/17-600\\_17-699/17-684\\_exact\\_advanced\\_sell\\_sheet/17-684\\_exact\\_advanced\\_en.pdf](https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/literature/17/17-600_17-699/17-684_exact_advanced_sell_sheet/17-684_exact_advanced_en.pdf) [Pristupljeno: 27.9.2019.]
- [410] Xiang, H., Komvopoulos, K. (2013) Effect of fluorocarbon self-assembled monolayer films on sidewall adhesion and friction of surface micromachines with impacting and sliding contact interfaces. *Journal of Applied Physics*, 113 (22). doi: 10.1063/1.4808099
- [411] Xu, G., Wang, H., Zhu, H. (2017) Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials*, 151 (1). pp. 801-808. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151
- [412] Yakushin, V., Bel'kova, L., Sevastyanova, I. (2012) Properties of rigid polyurethane foams filled with glass microspheres. *Mechanics of Composite Materials*, 48 (5). pp. 579-586. doi: 10.1007/s11029-012-9302-6
- [413] Yang, C., Xing, Z., Zhang, M., Zhao, Q., Wang, M., Wu, G. (2017) Supercritical CO<sub>2</sub> foaming of radiation crosslinked polypropylene/high-density polyethylene blend: Cell structure and tensile property. *Radiation Physics and Chemistry*, 141. pp. 276-283. doi: 10.1016/j.radphyschem.2017.07.028
- [414] Yang, H., Sa, U., Kang, M., Ryu, H. S., Ryu, C. Y., Cho, K. (2006) Near-surface morphology effect on tack behavior of poly(styrene- b-butadiene- b-styrene) triblock copolymer/rosin films. *Polymer*, 47 (11). pp. 3889-3895. doi: 10.1016/j.polymer.2006.02.08
- [415] Yang, L., Lenz, R., Kruse, B. (2001) Light Scattering and Ink Penetration Effect on Tone Reproduction. *Journal of Optical Society of America, image science and vision*, 18 (2). pp. 360-366.
- [416] Yi, J., Boyce, M. C., Lee, G. F., Balizer, E. (2006) Large deformation rate-dependent stress-strain behavior of polyurea and polyurethanes. *Polymer*, 47 (1). pp. 319-329. doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.107
- [417] Yonezu, A., Hirayama, K., Kishida, H., Chen, X. (2016) Characterization of the compressive deformation behavior with strain rate effect of low-density polymeric foams. *Polymer Testing*, 50. pp. 1-8. doi: 10.1016/j.polymertesting.2015.11.021
- [418] Yosomiya, R., Morimoto, K., Nakajima, A., Ikada, Y., Suzuki, T. (1989) *Adhesion and bonding in composites*. 1st edition. New York, Marcel Dekker Inc.
- [419] Youssef K.T. (2015) The Impact of FM-AM Hybrid Screening and Am Screening on Flexographic Printing Quality. *International Design Journal*, 5 (4). pp. 1471-1476.

- [420] Yule, J. A. C., Nielsen, W. J. (1951) The Penetration of Light into Paper and Its Effect on Halftone Reproduction. TAGA Proceedings. pp. 65-67.
- [421] Zadhoush, A., Alsharif, M. A., Esmailzadeh, P. (2004) The Influence of K-Value and Plasticizer Type on the Rheological Behaviour of Plastisol Used in Coated Fabrics. Iranian Polymer Journal, 15 (5). pp. 371-379.
- [422] Zang, Y. H. (1992) Asymmetric splitting and ink transfer: a new ink transfer model. TAPPI. Proceedings of the 6th International Printing and Graphic Arts conference, Peachtree Corners, TAPPI. pp. 103-112.
- [423] Zang, Y.H., Aspler, J.S. (1995) Factors that affect the flexographic printability of linerboards. Tappi Journal, 78(10). pp. 23-33.
- [424] Zhao, B., Pelton, R. (2005) The initiation of tape peeling- induced paper delamination. Journal of Pulp and Paper Science, 31 (1). pp. 33-38.
- [425] Zhao, H. (1997) Testing of polymeric foams at high and medium strain rates. Polymer Testing, 16 (5). pp. 507-516. doi: 10.1016/S0142-9418(97)00012-3
- [426] Zia, K. M., Anjum, S., Zuber, M., Mujahid, M., Jamil, T. (2014) Synthesis and molecular characterization of chitosan based polyurethane elastomers using aromatic diisocyanate. International Journal of Biological Macromolecules, 66. pp. 26-32.
- [427] Zia, K. M., Bhatti, H. N., Bhatti, I. A. (2007) Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. Reactive and Functional Polymers, 67 (8). pp. 675-692. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004
- [428] Zisman, W. A. (1963) Influence of Constitution on Adhesion. Industrial & Engineering Chemistry, 55 (10). pp. 18-38. doi: 10.1021/ie50646a003
- [429] Zjakić I. (2007) Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska. Hrvatska Sveučilišna naklada, Zagreb
- [430] Zorll, U. (1976) Fortschritte in der Adhäsionsmestechnik. Adhäsion, 20. pp. 69-75.
- [431] Zosel, A. (1991) Effect of Cross-Linking on Tack and Peel Strength of Polymers. The Journal of Adhesion, 34 (1-4). pp. 201-209. doi: 10.1080/00218469108026514
- [432] Zwick Roell (2019) Product Information - testXpert® III Update and Upgrade. Zwick Roell, Dostupno na: [https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku\\_pi/04\\_918\\_testxpert\\_iii\\_update\\_and\\_upgrade\\_pi\\_en.pdf](https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/04_918_testxpert_iii_update_and_upgrade_pi_en.pdf) [Pristupljeno: 26.9.2019.]

## 11 BIOGRAFIJA SA BIBLIOGRAFIJOM

**Ime i prezime:** Saša Petrović

**Datum i mesto rođenja:** 03.11.1993. Gornji Milanovac

### **Obrazovanje:**

*2012. - 2017.* Osnovne akademske - bečelor studije i diplomske akademske - master studije, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

### **Kretanje u poslu:**

*2016. - 2018.* Saradnik u nastavi, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

*2018. -* Asistent - master, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za grafičko inženjerstvo i dizajn

### **Mesto i trajanje studijskih boravaka u inostranstvu:**

*25.01.2014. - 15.02.2014.* Stručna praksa, firma Tetra Pak (Limburg, Nemačka)

*16.04.2018. - 16.05.2018.* CIII-RS-0704-06-1718-M-112958 - Research and Education in the Field of Graphic Engineering and Design, University of Chemical Technology and Metallurgy, Department of Printing Arts, Pulp and Paper, Sofia, Bulgaria

*23.04.2019. - 13.05.2019.* CIII-RS-0704-07-1819-M-128159 - Research and Education in the Field of Graphic Engineering and Design, Óbuda University, Budapest, Rejto Sándor Faculty of Light Industriy Engineering, Budapest, Hungary

*17.06.2019. - 18.07.2019.* Specialist teacher training course in Germany for specialist teacher in the field of printing and paper converting, Chemnitz, Germany

*02.03.2020. - 23.03.2020.* CIII-RS-0704-08-1920-M-137031 - Research and Education in the Field of Graphic Engineering and Design, Óbuda University, Budapest, Rejto Sándor Faculty of Light Industriy Engineering, Budapest, Hungary

### Spisak rezultata M22 - Rad u istaknutom međunarodnom časopisu:

1. **Petrović S.**, Kašiković N., Novaković D., Pavlović Ž., Bošnjaković G., Spiridonov I.: Exploitation influence on compressible polyurethane flexographic sleeve properties, Nordic Pulp and Paper Research Journal, 2020, Vol. 35, No 3, ISSN 0283-2631. doi: 10.1515/npprj-2020-0026
2. Ozcan A., Kašiković N., Arman Kandirmaz E., Đurđević S., **Petrović S.**: Highly flame retardant photocured paper coatings and printability behavior, Polymers for Advanced Technologies, 2020, ISSN 1042-7147. doi: 10.1002/pat.4991

### Spisak rezultata M23 - Rad u međunarodnom časopisu:

1. **Petrović S.**, Kašiković N., Novaković D., Bošnjaković G., Arman Kandirmaz E., Ozcan A.: Influence of the Compressible Flexographic Sleeve Exploitation on Print Quality – Prihvaćeno za objavu u časopisu Technical Gazette, Vol. 28, No 2, ISSN 1848-6339. doi: 10.17559/TV-20191114164921,
1. Bošnjaković G., Kašiković N., Vladić G., Banjanin B., **Petrović S.**, Novaković D.: Tactile and Mechanical Investigation of Screen Printed Specimens With Puff Effect – Prihvaćeno za objavu u časopisu Textila Journal.

### Spisak rezultata M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (4)

1. Kašiković N., Vladić G., Pál (Apro) M., Jurič (Rilovski) I., Milić N., Milošević R., **Petrović S.**: Rubbing fastness of textile printed with screen printing transfer technique, 11. Innovations in Publishing, Printing and Multimedia Technologies, Kaunas: Kaunas university of applied sciences, 19-20 April, 2018, pp. 67-73
2. **Petrović S.**, Dedijer S., Kašiković N., Delić G., Milošević R.: ANALYSIS OF TOPOGRAPHIC AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF TEXTILE PRINTS OVERPRINTED WITH PEDOT:PSS INK, 7. IJCELIT 2019 - International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Óbuda University - Sándor Rejtő Faculty of Light Industry and Environmental Engineering, 21-22 Novembar, 2019, pp. 336-347, ISBN 978-963-449-64-4
3. Bošnjaković G., Vladić G., Dedijer S., **Petrović S.**, Milošević R.: The influence of colour on shape recognition, 7. IJCELIT 2019 - International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Óbuda University - Sándor Rejtő Faculty of Light Industry and Environmental Engineering, 21-22 Novembar, 2019, pp. 192-201, ISBN 978-963-449-64-4
4. **Petrović S.**, Kašiković N., Pavlović Ž., Dedijer S., Bošnjaković G., Lilić A.: Compressible flexographic sleeve exploitation influence on print uniformity and colour difference, WPP PA - Wood, Pulp & Paper Polygrafia Academica 2020, Bratislava: Slovenská chemická knižnica FCHPT STU v Bratislave, 11-12 Mart, 2020, pp. 42-47, ISBN 978-80-8208-036-3

### Spisak rezultata M34 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (1)

1. Bošnjaković G., Vladić G., Pál (Apro) M., Banjanin B., **Petrović S.**: Ergonomics of handles for packaging products , 1. IJCELIT 2017 - International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budimpešta: Óbuda University - Sándor Rejtő Faculty of Light Industry and Environmental Engineering, 23-24 Novembar, 2017, pp. 22-22, ISBN 978-963-449-061-6

### Spisak rezultata M52 - Rad u časopisu nacionalnog značaja (1)

1. Bošnjaković G., Tatović I., **Petrović S.**, Banjanin B., Vasić J.: Resistance of screen-printed PVC foils to external influence, Machine Design, 2018, Vol. 10, No 3, pp. 129-134, ISSN 1821-1259

### Spisak rezultata M53 - Rad u naučnom časopisu (2)

1. **Petrović S.**, Novaković D., Đurđević S.: Unapređenje kvaliteta procesa izrade kartonske ambalaže za tečnu hranu, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, 2018, Vol. 33, No 3, pp. 339-342, ISSN 0350-428X, UDK: 655.3.066.25
2. **Petrović S.**, Kašiković N.: Sleeve type influence on flexographic print quality, International Circular of Graphic Education and Research, 2018, No 11, pp. 35-51, ISSN 2166-465X

### Spisak rezultata M63 - Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (7)

1. Adamović (Majkić) S., Prica M., Gvoić (Kecić) V., Novaković D., **Petrović S.**, Bošnjaković G., Đurđević S.: Uklanjanje hroma iz otpadnog ofset razvijaača primenom zeolita, 14. Zaštita na radu – Put uspešnog poslovanja, Divčibare: Savez zaštite na radu Srbije, 4-7 Oktobar, 2017, pp. 157-166, ISBN 978-86-919221-2-2
2. Vasić J., **Petrović S.**, Kašiković N., Milošević R., Szilágyi A.: UTICAJ GRAMATURE PAPIRA NA KVALITET DIGITALNE ŠTAMPE, 11. ETIKUM, Novi Sad, 6-8 Decembar, 2017, pp. 65-68, ISBN 978-86-6022-00-68
3. Gvoić (Kecić) V., Kerkez Đ., Prica M., Rapajić S., Bečelić-Tomin M., Leovac Maćerak A., **Petrović S.**: Purification of Magenta dye aqueous solution with Fenton-like oxidation process, 23. International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged: University of Szeged, Department of Inorganic and Analytical Chemistry, 9-10 Oktobar, 2017, pp. 356-360, ISBN 978-963-306-563-1
4. Kašiković N., Vladić G., Stančić M., Milošević R., Jurić (Rilovski) I., **Petrović S.**, Novaković D.: Digitalna štampa na tekstilu - prošlost, sadašnjost, budućnost, 1. Naučna konferencija sa međunarodnim učešćem: Savremeni trendovi I inovacije u tekstilnoj industriji, Beograd: Union of engineers and technicians of Serbia, 18 Maj, 2018, pp. 154-160
5. Kašiković N., Lilić A., Vladić G., **Petrović S.**: POSTOJANOST NA TRLJANJE OTISAKA DOBIJENIH SITO TRANSFER ŠTAMPOM NA TEKSTILNE MATERIJALE, 6. Šesti naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem – DTM 2018 - Tendencije razvoja u tekstilnoj industiji Dizajn, tehnologija i menadžment, Beograd: Union of engineers and technicians of Serbia, 27 Jun, 2016, pp. 60-64, ISBN 978-86-87017-42-9



6. Kašiković N., Stančić M., Novaković D., Vladić G., **Petrović S.**: ANALIZA DIGITALNE ŠTAMPE I TRENDOVI U NJENOM RAZVOJU, 12. Conference of Chemists, Technologists and Environmentalists of Republic of Srpska, Banja Vrućica: University in Banjaluka, Faculty of Technology, 2-3 Novembar, 2018, pp. 594-601
7. Kašiković N., Vladić G., Novaković D., **Petrović S.**, Lilić A.: ISPITIVANJE POSTOJANOSTI NA TRLJANJE TEKSTILNIH OTISAKA DOBIJENIH SUBLIMACIONOM ŠTAMPOM, 2. Naučna konferencija sa međunarodnim učešćem: Savremeni trendovi I inovacije u tekstilnoj industriji, Beograd: Union of Engineers and Textile Technicians of Serbia, 16-17 Maj, 2019, pp. 397-400

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

## План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
<b>Карактеризација композитних носноца флексо штампарских форми и њихов утицај на квалитет штампе картонске амбалаже</b>
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за графичко инжењерство и дизајн б) в)
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
<b>1. Опис података</b>
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <b>Докторска дисертација</b>
<b>1.2 Врсте података</b> а) <b>квантитативни</b> б) <b>квалитативни</b>
<b>1.3. Начин прикупљања података</b> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту **Микроскопски снимци**

е) текст, навести врсту **Литературни извори**

ж) мапа, навести врсту \_\_\_\_\_

з) остало: описати **Експериментална испитивања**

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Ехсел фајл, датотека **.xlsx**

б) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_

с) PDF фајл, датотека **.pdf**

д) Текст фајл, датотека **.docx**

е) JPG фајл, датотека **.jpg, .tiff, .png**

ф) Остало, датотека \_\_\_\_\_

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли **Велики број**

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **Велики број**

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) **не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак измедју поновљених мера је \_\_\_\_\_

б) варијабле које се више пута мере односе се на \_\_\_\_\_

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип **Дензитометријска и колориметријска мерења, мерења униформности штампане површине, мерења параметара квалитета облика растерских тачака, мерења механичких својстава сливова при компресији, мерења механичких својстава сливова при тесту пробијања иглом, мерења адхезивних својстава сливова**

б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_

ц) анализа текста, навести тип **Прикупљање података анализом доступне литературе**

д) остало, навести шта **Анализа састава самолепљивог слоја сливова, анализа микроскопских снимака попречног пресека Twinlock® слоја сливова**

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

**Спектрофотометар: x-rite eXact**

**Уређај са камером: FAG Flex3Pro**

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

\_\_\_\_\_

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан при експерименталном испитивању понављањем мерења у истим условима и поређењем добијених резултата.

---

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу је изведена поређењем добијених података са литературним подацима.

---

### 3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) **Да**
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

---

---

3.2. Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? \_\_\_\_\_

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

---

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

**Да** **Не**

Образложити

---

---

#### 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

---

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
  - б) Подаци су анонимизирани
  - ц) Остало, навести шта
- 
- 

## 5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) **јавно доступни**

б) *доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области*

ц) *затворени*

*Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:*

---

---

*Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:*

---

---

5.4. *Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.*

**Ауторство - некомерцијално**

---

## 6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Саша Петровић [petrovic.sasa@uns.ac.rs](mailto:petrovic.sasa@uns.ac.rs)

---

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Саша Петровић [petrovic.sasa@uns.ac.rs](mailto:petrovic.sasa@uns.ac.rs)

---

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Саша Петровић [petrovic.sasa@uns.ac.rs](mailto:petrovic.sasa@uns.ac.rs)

---