



KARAKTERIZACIJA VISKOELASTIČNIH LASTNOSTI PAPIRJA

CHARACTERISATION OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF PAPER

Klemen MOŽINA¹, Stanislav PRAČEK¹, Vilibald BUKOŠEK¹ in Marjeta ČERNIČ²

IZVLEČEK

Viskoelastičnost je lastnost materiala, ki se na deformacijo odzove viskozno in elastično. Elastičnost je običajno posledica sposobnosti raztezanja medmolekulskih vezi vzdolž kristalinične strukture polimera, medtem ko je viskoznost posledica razpršenosti atomov ali molekul znotraj amorfne materiala. Oblike deformacij, zajete v viskoelastičnem odzivu polimerov na zunanjo obremenitev so opredeljene kot povratne oz. elastične deformacije, nepovratne oz. plastične deformacije, viskoelastično tečenje in metastabilno stanje. Obseg elastičnega odziva papirja na zunanjo deformacijo je v izrazito ozkem področju, nekje 0,4–0,6 %, kar nakazuje nezmožnost proučevanja zgolj v linearnem viskoelastičnem območju, tj. v območju deformacij manjšega reda in se je treba poslužiti nelinearne viskoelastičnosti oz. v področju deformacij večjega obsega napetosti. Obilica podatkov zahteva pri karakterizaciji viskoelastičnih lastnosti papirjev tako od proizvajalcev kot tudi od raziskovalcev uporabo novejših analitskih tehnik merjenja, med katerimi je na industrijskem nivoju najbolj razširjena metoda ultrazvočnega merjenja anizotropije papirja – TSO in na laboratorijskem, dinamična mehanska analiza – DMA.

Ključne besede: viskoelastičnost, papir, elastično, viskozno, plastično, TSO, DMA

ABSTRACT

Viscoelasticity is the property of a material, which responds to deformation as a viscous and as an elastic material. Elasticity is usually a consequence of the ability of intermolecular bonds to expand along the crystalline structure of a polymer, while viscosity is the result of scattered atoms or molecules within the amorphous stage of a polymer. Shapes of deformations captured in viscoelastic response of polymer to external load are defined as a reverse or elastic deformation, irreversible or plastic deformation, viscoelastic flow and metastable state. The area of the elastic response of paper to an external deformation is distinctly narrow, i.e. 0.4–0.6 per cent, which indicates its inability to be studied merely in the linear viscoelastic region, i.e. in the region of small-scale deformation, which is why it is necessary to implement nonlinear viscoelasticity, or in the area of extensive tension deformation. The abundance of information thus requires producers as well as researchers, when characterising viscoelastic properties of papers, to use modern analytical measuring methods. The most widely used among the aforementioned methods in industry is the method of ultrasonic anisotropy measurement in paper —TSO, and the dynamic mechanical analysis—DMA in laboratories.

Keywords: viscoelasticity, paper, elastic, viscous, plastic, TSO, DMA.

1 UVOD

Viskoelastičnost je lastnost materiala, ki se na deformacijo odzove viskozno in elastično. Gre za časovno odvisen odziv materiala na zunanjo napetost. Elastičnost je običajno posledica sposobnosti raztezanja medmolekulskih vezi vzdolž kristalinične strukture polimera, medtem ko je viskoznost posledica razpršenosti atomov ali molekul znotraj amorfne materiala. Papirju navkljub vsemu vloženemu trudu ostaja ena lastnost, ki je do sedaj proizvajalcem še ni uspelo premakniti v območje elastične vrnitve. Razvoj tehnologije proizvodnje tako celuloznih vlaknin kot tudi papirja se je vse od iznajdbe parnega stroja konstantno spreminjal. Danes se dosega proizvodne hitrosti več kot 2.200 m/min, širine papirnega traku do 10 m, z vključenim premaznim agregatom. Uporaba izključno celuloznih vlaken, ki se v strukturi papirja povezujejo z vodikovimi vezmi, mu onemogoča širok razpon elastičnega in tudi viskoelastičnega odziva na zunanje deformacije. Razvoj novodobnih naravnih polimernih materialov se bo v prihodnje, na račun izboljšanja viskoelastičnih lastnosti, moral razširiti bodisi na vključitev kemijsko obdelanih naravnih celuloznih vla-

ken bodisi na vključitev sintetičnih biorazgradljivih polimernih vlaknin [1].

2 VISKOELASTIČNE LASTNOSTI POLIMERNIH MATERIALOV

2.1 OBLIKE DEFORMACIJE

Obstajajo različne oblike deformacij polimernih materialov in sicer povratna oz. elastična deformacija, nepovratna ali plastična deformacija, viskoelastično tečenje in metastabilno stanje.

Povratna oz. elastična deformacija izvira iz deformacije primarnih valenčnih vezi, spremembe njihovega kota in podaljška raznovrstnih sekundarnih kemičnih vezi. Pri obremenitvi se elastična deformacija pojavi nenadoma. Elastični modul je po definiciji razmerje med vneseno napetostjo in nenadnim elastičnim odzivom, kar pa je v praksi težko natančno izmeriti v tako kratkem času. Celotni elastični modul je opredeljen z doprinosom posameznih mehanizmov deformacij, in ker je sekundarne kemične vezi lažje deformirati od primarnih valenčnih

vezi, bo elastični modul najnižji pri materialu z največjim številom sekundarnih vezi na prostornino. Na splošno je sprememba makromolekulske konformacije stalni proces, ki je termodinamsko opredeljen izključno kot sprememba entropije [2].

Nepovratna deformacija je definirana kot tisti del celotne deformacije, ki se po odstranitvi napetosti nikoli ne povrne. Zazna se jo v obliki spremembe dolžine ali geometrijske oblike materiala [2].

Pojem *viskoelastičnega tečenja* se uporablja pri opisu odziva polimernega materiala na vneseno napetost, ki presega območje elastičnosti. Izraz se običajno uporablja za dejanske, trajne deformacije in izhaja iz premika molekul v amorfni območjih polimera. Viskoelastično tečenje je tako omejeno na polimere, pri katerih je celotna makromolekulska veriga izključno v amornem območju polimera [2].

Metastabilno stanje – polimeri, v katerih je visoka težnja k vzpostavljanju inter- in intramolekulskih povezav, kot je to primer pri celulozi in njenih kemijskih izpeljankah in se obravnavajo kot polimeri, ki niso nagnjeni k »zamrznjeni« konformaciji. Kombinacija

različnih sprememb v kristaliničnosti in konformaciji pripelje v nepovratno deformacijo, ki pa izvira iz metastabilnega stanja [2].

2.2 LINEARNA IN NELINEARNA VISKOELASTIČNOST

Krivulja napetosti-raztezka papirja je opredeljena z začetnim linearnim in nadaljnjim nelinearnim območjem. Prehod linearnega v nelinearno območje viskoelastičnega odziva na napetost poteka relativno zvezno, kar oteži določevanje točke tečenja. Nelinearni del krivulje se natančno modelira s hiperbolično funkcijo [3]. Za proučevanje viskoelastičnih lastnosti papirjev je bila v preteklosti predlagana uporaba večasnega modela odziva plastike na zunanje deformacije, pri čemer so bili uporabljeni tako linearni [4] kot nelinearni [5] modeli opisovanja viskoelastičnega odziva papirja na zunanje deformacije. Pri analizi utrga papirja so največkrat uporabljali klasične mehanske modele, v osnovi razvite za proučevanje sintetičnih polimerov. Uporabljali so jih tudi pri simulaciji viskoelastičnega odziva papirja, ki je prešel skozi kalandar [6] in tiskarski stroj [7].

Linearna viskoelastičnost je uporabna zgolj za deformacije manjšega reda. Matematična struktura teorije linearne viskoelastičnosti je bila vpeljana pred več kot 60 leti. Reološko obnašanje polimerov se v veliki meri kaže v linearni viskoelastičnosti, saj natančno odraža razpon časa relaksacije in je posledično močno odvisno od molekulske strukture polimera.

Nelinearna viskoelastičnost je uporabna za deformacije večjega obsega napetosti. Čeprav je teorija linearne viskoelastičnosti pri modeliranju časovno odvisnega vedenja mnogih polimernih materialov precej uveljavljena, jih večina izkazuje nelinearno viskoelastičnost. Zaradi zapletenosti n-ternih integralov se v teorijah mehanike polimerov pogosteje uporabi kar enojni integral. Scharpejev model opisovanja nelinearne viskoelastičnosti izkoristi enako strukturo, kot jo ima linearni integralni model. Številni nelinearni viskoelastični modeli, kot sta Leadermanov [8] ter model Knauss-Emri [9], so lahko pojasnjeni kot posebna oblika Scharpejevega modela, ki je za nelinearni viskoelastični model leženja $\varepsilon(t)$ in relaksacije napetosti $\sigma(t)$ zapisan z enačbama 1 in 2:

$$\varepsilon(t) = g_0 D_0 \sigma(t) + g_1 \int_0^t \Delta D(\Psi(t) - \Psi(\tau)) \frac{d}{d\tau} (g_2 \sigma(\tau)) d\tau \quad (1)$$

$$\sigma(t) = h_0 E_\infty \varepsilon(t) + h_1 \int_0^t \Delta E(P(t) - P(\tau)) \frac{d}{d\tau} (h_2 \varepsilon(\tau)) d\tau \quad (2)$$

pri čemer sta skrajšana časa leženja (enačba 3) in relaksacije napetosti (enačba 4) definirana kot:

$$\Psi(t) = \int_0^t \frac{dt'}{a_\sigma(\sigma(t'))} \quad (3)$$

$$P(t) = \int_0^t \frac{dt'}{a_\varepsilon(\varepsilon(t'))} \quad (4)$$

Scharpejev model, ki je osnovan na uporabi enojnega integrala za opis nelinearne viskoelastičnosti, uporablja funkcije, kot so $h_1(\sigma)$, $a_\sigma(\sigma)$ in $g_1(\sigma)$, za določitev nelinearnega odziva materiala na obremenitev. Moduli E so bili vzporedno razdeljeni v dva dela, tj. $E_\infty = E(\infty)$, ki predstavlja vrednost ravnovesja modula, in $\Delta E(t) = E(t) - E_\infty$, ki predstavlja začasno komponento modula. $D_0 = D(0)$ je začetna vrednost voljnosti materiala, medtem ko je $\Delta D(t) = D(t) - D_0$ prehodna komponenta voljnosti polimera. Ko se parametri nelinearne viskoelastičnosti približajo vrednosti 1, se nelinearni model pretvori v linearnega [1].

3 VISKOELASTIČNE LASTNOSTI PAPIRJA

Papir je material, na katerega običajno ne pomislimo, ko izbiramo material, ki bi vzdržal znatne zunanje mehanske sile, tj. utrg in raztezek. Ker je narava makromolekulske zasnove celuloze takšna, kot je, ni prav nič presenetljivo, da se je za opisovanje metodologije razvoja opredeljevanja karakteristik medmolekulskih sprememb razvilo nemajhno število metod. Dodson [10] je že leta 1970 z uporabo IR-metode dokazal, da je večina prisotnih hidroksilnih skupin v celuloznih vlaknih povezana z vodikovimi vezmi. Posledično ostane relativno malo prostih hidroksilnih skupin, ki bi sodelovale pri intermolekulskem povezovanju med postopkom tvorbe vlakninske mreže. V nasprotju z elastičnim odzivom na zunanjo obremenitev v odvisnosti od frekventnosti vnesene napetosti pa se v vlakninski mreži pojavi nepovratna plastična deformacija, ki jo v primeru uporabe metode dinamične mehanske analize (DMA), zabeležimo kot mikroskopske »razpoke« vlakninskega skupka in kot oddano energijo oz. kot modul mehanskih izgub E'' .

Natezna odpornost papirja je odvisna od številnih dejavnikov, kot so povprečna »nosilnost« vlaken, število vlaken, vključenih pri prenosu sil in enakomerno obremenjevanje preizkušanca po celotni površini. Če na papir gledamo s stališča mehanike polimerov, spada med viskoelastične materiale. Brez poznavanja in hkratnega upoštevanja vpliva vlage na mehanske obremenitve in strukturo papirja ni mogoče opisati odziva papirja na zunanje obremenitve. Stopnja strukturnih sprememb določa zaznano stopnjo deformacije. Pri pojavu deformacije se struktura vzorca spremeni v skladu s spremembo mehanskih lastnosti. Sočasno se lahko



pojavi več medsebojno povezanih mehanizmov odziva na zunanje obremenitve. Zgolj mehanski preizkus ne poda zadostnih informacij pri oblikovanju različnih mehanizmov odziva, saj je celotni odziv na deformacijo običajno razdeljen v tri skupine: takojšnja elastično, zapozneno elastično in nepovratno plastično deformacijo. Ker je papirni trak zelo tanek in ker so širine papirnih strojev med 4 in 8 m, pri čemer med transportom v precejšnjem delu papirni trak mehansko ni »podprt«, je viskoelastičnost papirja ena izmed ključnih lastnosti, ki opredeljuje in omejuje proizvodne parametre. Ob primerjavi različnih viskoelastičnih teoretičnih modelov se je v primeru papirja izkazalo, da se teorija linearne viskoelastičnosti zelo dobro približa časovno in hitrostno odvisnim spremenljivkam, tj. znotraj okvirjev dejanskih napetosti papirja [1, 11]. V preglednici 1 so predstavljeni elastični parametri [1].

Pogosto pri interpretaciji viskoelastičnih odzivov papirja na zunanje deformacije ni jasne ločnice, ali so predstavljeni podatki rezultat eksperimentalno izmerjene vrednosti ali teoretično postavljenih hipotez raziskovalnega problema. Težava izvira iz teoretičnih razlag mehanskega obnašanja papirja in splošnih mehanizmov odziva na zunanjo napetost. Po navedbah Gibbona [12] je treba papir obravnavati kot bolj ali manj odprto mrežo celuloznih vlaken, pri čemer ne gre pričakovati, da bodo sledili uveljavljenim elastičnim zakonitostim. Van den Akker [13] je predpostavil, da je odziv papirja na napetost načeloma odziv posameznih celuloznih vlaken ob ustrezni razporeditvi napetosti po celotnem listu papirja.

3.1 VPLIV STRUKTURE NA MEHANSKI ODZIV

Mehansko obremenjevanje papirja učinkuje na kombinacijo elastičnih in viskoelastičnih odzivov. Za proučevanje navedenih odzivov je bilo razvitih kar nekaj mehanskih modelov (Maxwellov, Voigt-Kelvin, Hookov, Newtonov, SLS, Burgerjev), ki bi karseda natančno opisali obnašanje elastičnih, viskoelastičnih in plastičnih materialov pod obremenitvijo. Odziv polimernega materiala na vzbujeno nihanje je najlažje pojasniti z molekulskega vidika, pri čemer je osnovna spremenljivka pri opisovanju vzbujenega nihanja čas. Makromolekule se med deformacijo nenehno spreminjajo, tj. reorganizirajo in prilagajajo energijsko najugodnejšemu položaju. Vse skupaj se odvija na krajših

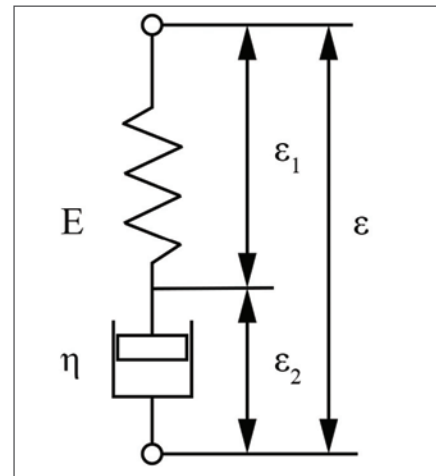
Preglednica 1: Eksperimentalno izmerjene vrednosti elastičnih parametrov različnih vrst papirjev, pri čemer sta E_1 in E_2 Youngova modula elastičnosti v smereh MD in CD, G_{12} je »notranji« strižni modul in G je gramatura papirja. *Table 1: Experimentally measured values of elastic parameters of variety paper types, whereby E_1 and E_2 are Young's modulus of elasticity in MD and CD, G_{12} is "inner" shear modulus and G is the grammage of paper.*

	Nizkogramski papirji	Kopirni papirji	Emblažni papirji
E_{MD} [MPa]	8.790	6.820	7.320
E_{CD} [MPa]	2.740	3.160	2.680
G_{12} [MPa]	1.600	1.950	1.890
G [g/m ²]	60,0	/	/

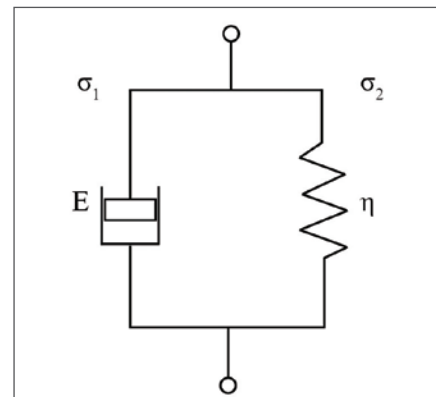


razdaljah, pri čemer celotni seštevek vseh premikov na krajših razdaljah predstavlja vpliv na celotno makromolekulo. Stranske skupine prosto nihajo ali se zvijajo znotraj prostega volumna, vse dokler ne pridejo pod vpliv prostorske oviranosti sosednjih funkcionalnih skupin. Raztezke, kot odziv na vneseno napetost, se tako postopoma zmanjšuje in dinamični elastični modul E' posledično naraste z 1 GPa (gumasto telo) na skoraj 10 GPa (steklasto telo). Modul mehanskih izgub E'' je vrednost izgube energije v viskoznem sistemu, kar privede do visokih izgub energije in modulov. Polimeri, ki nimajo prepletenih in medmolekulske povezanih makromolekul, izkazujejo stanje nizke viskoznosti. Višja ko je v polimeru stopnja kristaliničnosti, višji bodo izmerjeni moduli [1, 16]. Za lažje razumevanje dinamike odzivov na deformacije v viskoelastičnih materialih je treba vpeljati pojem faznih razlik oz. sposobnost dušenja $\tan\delta$, ki je zelo uporaben kazalnik prisotnosti, položaja in relativne razsežnosti makromolekulskih premikov v polimeru. Kot je pričakovati, sta razmerje med viskoznostjo in togostjo posameznega sestavnega dela polimera in sposobnost dušenja $\tan\delta$ vzajemno povezana [14].

3.2 KARAKTERIZACIJA VISKOELASTIČNOSTNIH LASTNOSTI PAPIRJA



Slika 1: Voigt-Kelvinov model.
Figure 1: Kelvin-Voigt model.



Slika 2: Maxwellov model.
Figure 2: Maxwell model.

Pojem viskoelastičnosti izvira iz kombinacije elastične in viskozne značilnosti polimernega materiala. Najpogostejši način predstavitev viskoelastičnega obnašanja je z modeli dveh elementov, nanizanih vzporedno razporejenih elastičnih in viskoznih elementov (Voigt-Kelvinov model, slika 1) ali zaporedna razporeditev elementov (Maxwellov model, slika 2) [1].

Papir je ploskovni porozni material, sestavljen pretežno iz prepleta rastlinskih vlaken. Mehanska odpornost papirja je primarno osnovana na vodikovih in Van der Waalsovih vezeh pri oblikovanju papirnege lista. Strojno izdelani papirji izkazujejo visoko stopnjo anizotropije, kjer se vlakna usmerijo pretežno v vzdolžno smer teka papirnega stroja in nimajo večje težnje po usmeritvi v smer Z [1]. Viskoelastičnost je lastnost, ki jo je pri vlaknotvornih polimerih mogoče pojasniti z relaksacijskimi pojavi, pri katerih molekule prehajajo v stanje termodinamičnega ravnotežja. Prehod v ravnotežno stanje je rezultat najrazličnejših načinov molekulskih premikov, ki jim ustreza širok spekter relaksacijskih časov. S spreminjanjem temperature se viskoelastične lastnosti spreminjajo v odvisnosti od intenzivnosti relaksacijskih pojavov in načinov molekulskih premeščanj. Slediti jim je mogoče s temperaturno odvisno količino, ki opredeljuje dinamično mehanske lastnosti, kot so dinamični elastični modul E' , modul mehanskih izgub E'' in modul faznih razlik $\tan\delta$ [15].

Makromolekulska narava celuloznih vlaken omogoča proučevanje papirja z metodami, ki opisujejo lastnosti vlaknotvornih polimerov, in sicer z ultrazvočnim merjenjem anizotropije papirja TSO in mehanskim dinamičnim analizatorjem $DMA\ Q800$.

Ultrazvočno merjenje anizotropije papirja – TSO

TSO ima ključno vlogo pri vrednotenju tiskarske prehodnosti. Indeks natezne odpornosti, TSI , ki je pogojen z modulom elastičnosti in hitrostjo širjenja zvočnega impulza, lahko zapišemo z enačbo 5.

$$TSI = c \times v^2; [kNm/g] \quad (5)$$

kjer so:

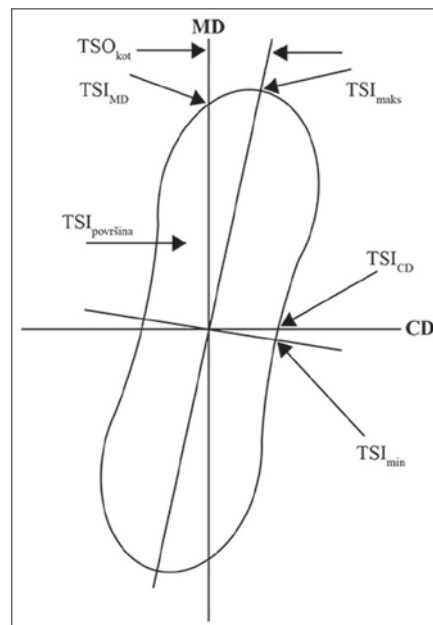
TSI – indeks natezne odpornosti [kNm/g],
 c – konstanta, ki običajno znaša 1 [J] in
 v – hitrost širjenja zvočnega impulza [km/s].

Razmerje med elastičnim modulom in indeksom natezne odpornosti je podan z enačbo 6.

$$TSI = \sigma \times TSI; [MPa] \quad (6)$$

kjer sta:

E – elastični modul [MPa] in
 σ – gostota papirja [kg/m^3].



Slika 3: TSO lastnosti anizotropije papirja
Figure 3: TSO properties of paper anisotropy

Dinamična mehanska analiza, DMA

Meritve DMA viskoelastičnih lastnosti uporablja dinamično oscilacijski test, kjer se material vzbuja s sinusoidno spreminjajočo se napetostjo in se meri deformacija. Ker so materiali viskoelastični, prihaja do faznih razlik vzbujevalnega in odzivnega nihanja. Za popolnoma elastične materiale je fazna razlika 0° in za popolnoma viskozne 90° . Dinamični elastični modul E' , ki je v fazi z vzbujevalno napetostjo, predstavlja realno elastično, medtem ko modul mehanskih izgub E'' predstavlja imaginarni del in opisuje razsipno toplotno energijo ali viskozno naravo materiala. Razmerje med dinamičnim elastičnim modulom E' in modulom mehanskih izgub E'' poda uporabno količino, t. i. faktor mehanskega dušenja $\tan\delta$, ki je merilo razsipne deformacijske energije. Višja ko je vrednost mehanskega dušenja $\tan\delta$, bolj izrazito ima polimerni material neelastično deformacijsko oz. viskozno komponento, in obratno [1, 15].



Slika 4: Dinamična mehanska analiza, DMA.
Figure 4: Dynamic mechanical analysis—DMA.

Metoda DMA nam poda informacije o viskoelastičnih lastnostih, ki neposredno vplivajo na obnašanje materiala pod vplivom zunanje deformacije. Poleg tega DMA poda tudi podatke o primarnih, sekundarnih in terciarnih viskoelastičnih prehodih. Viskoelastični odziv veziva ene ključnih sestavin premazne mešanice ima pomembno vlogo pri odzivu premazanih papirjev na njegovo deformacijo. Viskoelastične lastnosti papirjev, premazanih s premazom, ki ima v svoji sestavi kot vezivo vključen lateks, lahko izboljšajo togost in odzivnost papirja na mehansko intenzivno dodelavno stopnjo [1].

4 SKLEP

Ovrednotenje viskoelastičnih lastnosti papirjev je poglavje raziskav, ki je zaradi zapletenosti heterogene strukture preiskovanega materiala izrazito slabo pokrita. Odziv papirja na zunanje obremenitve in njegova deformacija sta primarno pogojena z uporabo osnovnega gradnika, njenega izvora (primarna ali/sekundarna), deleža vlaknin in polnil ter preostalih pomožnih sredstev, tehnologije izdelave in dodelave. Poznavanje meje elastičnosti je skupno vsem preiskavam polimernih materialov, saj pogojuje njegovo uporabnost. Zniževanje vlaknin in poviševanje deleža polnil je vrsto let predstavljalo izziv proizvajalcem papirjev. S tem so se resda zniževali stroški proizvodnje, ob sočasnem ohranjanju gramature papirja, vendar slednje se je kmalu izkazalo za nedobičkonosno, ker se je povečalo število reklamacij. Ker je celuloze v omejenem

obsegu, je vedno več poudarka na uporabi sekundarnih vlaken. Vprašanje, kje je razumna meja med uporabo primarne in sekundarne celulozne vlaknine, je v zadnjih letih znova sprožilo zanimanje raziskovalcev po proučevanju viskoelastičnih lastnosti papirjev.

5 LITERATURA IN VIRI

- [1] MOŽINA, K. Viskoelastične lastnosti grafičnih papirjev: doktorska disertacija. Ljubljana, 2017, str. 28–48.
- [2] BREZINSKI, J. P. A study of the viscoelastic properties of paper by means of tensile creep tests : doktorska disertacija. Appleton, Wisconsin, ZDA, 1955, 247 str.
- [3] CASTRO, J. in OSTOJA-STARZEWSKI, M. Elasto-plasticity of paper. International Journal of Plasticity, 2003, vol. 19, no. 12, str. 2083–2098.
- [4] MÄKELÄ P. in ÖSTLUND, S. Orthotropic elastic-plastic material model from paper materials. International Journal of Solids and Structures, 2003, vol. 40, no. 21, str. 5599–5620.
- [5] HARRYSSON, A. in RISTINMAA, M. Large strain elasto-plastic model of paper and corrugated board. International Journal of Solids and Structures, 2008, vol. 45, no. 11, str. 3334–3352.
- [6] RODAL, J. J. A. Paper deformation in a calendering nip. TAPPI Journal, 1993, vol. 76, no. 12, str. 63–74.
- [7] WIBERG, A. Rolling contact of a paper web between layered cylinders with implications to offset printing : diplomsko delo. Stockholm, Švedska, 1999, 90 str.
- [8] LEADERMAN, H. Large longitudinal retarded elastic deformation of rubberlike

network polymers. Transactions of the Society of Rheology, 1962, vol. 6, no. 1, str. 361–382.

[9] KNAUSS, W. G. in EMRI, I. Non-linear viscoelasticity based on free volume consideration. Computers and Structures, 1981, vol. 13, no. 1–3, str. 123–128.

[10] DODSON, C. T. J. The nature of bonds in paper and the behaviour of paper under mechanical strain. Report on Progress in Physics, 1970, vol. 33, no. 1, str. 1–43.

[11] SORVARI, J., KOUKO, K., MALINEN, M. in HÄMÄLÄINEN, J. Paper as a viscoelastic material: comparison between different theories. V Proceedings of 61st Appita Annual Conference and Exhibition. Appita Inc., Gold Coast, Avstralija, 2007, str. 389–396.

[12] GIBBON, S. K. Stress/Strain Curves of Paper. V Proceedings of Technology Sector. Paper Makers' Association of Great Britain and Ireland, 1944, vol. 25, str. 199–210.

[13] VAN den AKKER, J. A. The elastic and rheological properties of papermaking fibers-some of the problems to be met in developing an analytical approach to the subject. TAPPI Journal, 1950, vol. 33, no. 8, str. 398–402.

[14] TERZOPOULOS, D. in FLEISCHER, K. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. Computer Graphics, 1988, vol. 22, no. 4, str. 269–278.

[15] BUKOŠEK, V. Q800 Dynamic Mechanical Analyzer, TA Instruments, USA, Delaware – interno gradivo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, grafiko in oblikovanje, Ljubljana, 2017, 1 str.

¹ dr. Klemen Možina,

¹ izr. prof. dr. Stanislav Praček,

¹ prof. dr. Vilibald Bukošek, UL, NTF ²,
dr. Marjeta Čerňič, DITP Ljubljana



Hydrogen Peroxide (BELOX®) and Peracetic Acid (PERSAN-S®) in ecology:

- Oxidation and disinfection of wastewater in the primary, secondary and tertiary level
- Disinfection of solid waste
- Reduction of unpleasant smell of waste water and gas
- Reduction of cyanides, sulfides, NOx, chlorinated hydrocarbons, formaldehyde, etc.
- Reduction of COD and BOD

The advantage of Belox and Persan-S is that they decompose to oxygen and water and acetic acid, which is biodegradable. It is important that the mentioned products do not accumulate in the environment and do not increase the AOX.

Other areas of application of BELOX® and PERSAN-S® are:

- For aseptic packaging of food and beverages
- Disinfection - disinfection in medicine, pharmacy and veterinary medicine
- Detergents with a disinfecting effect
- Bleaching and disinfection of fiber (cotton, waste paper, pulp and wood fibers)
- Laundry



Belinka Perkemija, d.o.o.,
Zasavska cesta 95, Ljubljana
perkemija@belinka.si, www.belinka.si/perkemija
A member of the European Helios Group.