

Utjecaj intenziteta svjetla za polimerizaciju na polimerizacijsko skupljanje kompozitnih materijala (III dio)

Alena Knežević¹
Nazif Demoli²
Zrinka Tarle¹
Višnja Negovetić Mandić¹

¹Zavod za dentalnu patologiju
Stomatološkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
²Institut za Fiziku, Zagreb

Sažetak

Kompozitni materijali skupljaju se tijekom procesa polimerizacije što umanjuje njihovu kliničku vrijednost. Modifikacija u sastavu kompozitnoga materijala i tehnika aplikacije kompozita pokazale su se nedostatnima za kompenzaciju polimerizacijskoga skupljanja, pa se je zato pokušalo s modifikacijom polimerizacijskih programa. Polimerizacijski programi nižega intenziteta omogućit će dužu pregelacijsku fazu i time uvelike smanjiti ukupan iznos skupljanja. Svrha rada bila je odrediti polimerizacijsko skupljanje Tetric Ceram (Vivadent, Schaan, Liechtenstein) i Filtek Z 250 (3M Dental Products, St. Paul, MN) kompozitnoga materijala postupkom digitalne holografske interferometrije. Uzorci kompozitnih materijala polimerizirani su trima programima različita intenziteta (srednji, eksponencijski i standardni) Elipar Trilight halogene žarulje (ESPE, Seefeld, Germany). Najviše vrijednosti polimerizacijskoga skupljanja zabilježene su kod polimerizacijskoga programa s najjačim intenzitetom svjetla.

Ključne riječi: kompozitni materijali, polimerizacijsko skupljanje, digitalna holografska interferometrija, halogene žarulje.

Acta Stomat Croat
2005; 453-459

IZVORNI ZNANSTVENI
RAD
Prilježeno: 10. svibnja 2005.

Adresa za dopisivanje:

Alena Knežević
Zavod za dentalnu patologiju
Stomatološki fakultet
Gundulićeva 5, 10000 Zagreb
Tel: 01 48 02 113
Fax: 01 48 02 159

Uvod

Unatoč svakodnevnom usavršavanju kompozitnih materijala i izvora svjetla, polimerizacijsko skupljanje kompozitnih materijala još je uvijek znatan problem koji ograničava njihovu potpunu kliničku uporabu. Kompozitni materijali skupljaju se prosječno 1-5% vol (1). Ukupno skupljanje može se podijeliti na prijelazijsku i poslijeprijelazijsku fazu. Tijekom prijelazijske faze kompozitni materijal još nije potpuno stvrdnut pa monomeri imaju mogućnost preraspodjele unutar formirajuće polimerne mreže. U poslijeprijelazijskoj fazi monomeri

gube tu mogućnost pa nastaje stres na okolnim stijenkama zuba i na samoj svezi zuba s kompozitnim materijalom (2). Kao posljedica stresa može nastati defekt u svezi između zuba i kompozitnoga materijala, ona može puknuti i nastaju mikropukotine, a to dalje uzrokuje postopertivnu osjetljivost i rekurentni karijes.

Negativan učinak polimerizacijskoga skupljanja pokušava se kompenzirati na nekoliko načina, uključujući postavljanje linera/podloge, slojevitim postavljanjem kompozitnoga materijala, modifikacijom sastava kompozitnoga materijala, a danas sve češće izvorima svjetla nižega početnog intenziteta

koji će omogućiti da materijal “otječe” tijekom pregelacijske faze polimerizacijskoga procesa (3).

Do sada je u literaturi opisano više različitih postupaka kojima se mjeri polimerizacijsko skupljanje. Izravni postupci - kao što je dilatometrijski postupak (živin ili vodeni dilatometar), linometar, mjerenje razlika specifične težine i gustoće materijala te “strain-giage” metoda - obuhvaćaju mjerenje dimenzijskih promjena materijala nastalih tijekom stvrdnjavanja. Neizravni postupci mjerenja temelje se na određivanju dubine prodora bakterija, zračnom tlaku, elektromehaničkim ispitivanjima, radioizotopima, prodoru tekućine, elektronskoj mikroskopiji te termičkim i mehaničkim cikliranjem (4). Najnoviji postupak izravnoga mjerenja polimerizacijskog skupljanja, digitalna holografška interferometrija, rabljen u ovom eksperimentu, jedina je metoda koja omogućuje da se bilježe promjene i izračunava ukupno skupljanje kompozitnoga materijala u svakoj sekundi polimerizacije (5-7).

Svrha ovoga rada bila je ispitati utjecaj halogene žarulje s polimerizacijskim programima različitih intenziteta na polimerizacijsko skupljanje dvaju kompozitnih materijala.

Materijali i postupci

U eksperimentu su rabljeni Tetric Ceram (TC) (boja A1) (br. B49177) i Filtek Z 250 (F) (boja A1) (br.20000222) kompozitni materijali polimerizirani Elipar Trilight halogenom žaruljom trima polimerizacijskim programima različita intenziteta:

1. “medium mode” (program srednjeg intenziteta) (ETM)
2. “exponential mode” (eksponencijski program) (ETE)
3. “standard mode” (standardni program) (ETS).

ETM program i ETS program emitiraju svjetlo jednolika intenziteta od 450 mW/cm^2 (ETM) i 800 mW/cm^2 (ETS). Pri osvjetljavanju ETE programom osvjetljavanje počinje s jakošću od 100 mW/cm^2 i postupno raste tijekom 15 sekundi do vrijednosti od 800 mW/cm^2 koju zadržava do isteka 40. sekunde. Kontrolnu skupinu činili su uzorci polimerizirani ETE polimerizacijskim programom.

Za potrebe mjerenja polimerizacijskoga skupljanja napravljani su uzorci debljine 0,65 mm. Uzorak

je smješten između dviju celuloidnih folija od kojih je svaka debela 0,75 mm. Takav uzorak smješten je u prsten od inoxa debljine 1 mm i promjera 1 cm i stlačen između dvije okrugle inox ploče do debljine 1 mm, promjera 2 cm, tako da je ukupna debljina uzorka s folijom iznosila 1 mm.

Načinjeno je ukupno 60 uzoraka: 30 za TC i 30 za F kompozitni materijal. Za svaki materijal skupina od 30 uzoraka podijeljena je na tri dijela: 10 uzoraka za polimerizaciju ETM programom, 10 uzoraka za polimerizaciju ETE i 10 uzoraka za polimerizaciju ETS programom.

Uzorak je smješten na staklenu pločicu koja leži na pomičnom dijelu nosača uzorka iznad otvora za fotopolimerizaciju uzorka. Na uzorak (pokriven folijom) stavi se staklena pločica koja je s gornje strane naparena slojem aluminijske (zrcalo) te služi da se njome usmjerava snop laserske svjetlosti.

Laserski je snop podijeljen s pomoću djelitelja snopa na dva dijela. Jedan dio se reflektira na klinastome djelitelju te izravno pada na CCD kameru, a drugi dio pada na zrcalo nosača uzorka. Shema optičkoga uređaja prikazana je na slici 1. Nosač uzorka omogućuje da snop plave svjetlosti ($\lambda_p = 468 \text{ nm}$) s donje strane fotopolimerizira uzorak, i da se istodobno mjeri skupljanje ili rastezanje uzorka s pomoću laserske crvene svjetlosti ($\lambda_c = 633 \text{ nm}$).

Dakle, dva snopa laserske svjetlosti interferiraju, jedan koji dolazi sa zrcala na površini uzorka i drugi koji dolazi s fiksnoga zrcala. CCD kamera bilježi tako nastalu interferencijsku sliku koja se dalje računalno obrađuje. Računalni program omogućuje obradbu pruga interferencije i njihovu pretvorbu u numeričke vrijednosti polimerizacijskoga skupljanja.

TC kompozitni materijal polimeriziran je prema preporuci proizvođača 40 sekundi, a F 20 sekundi. Kod F kompozitnoga materijala, snimanje je nastavljeno sljedećih 20 sekundi da bi se vidjelo postoje li promjene u iznosu polimerizacijskoga skupljanja i nakon prestanka osvjetljavanja.

Dobiveni rezultati mjerenja polimerizacijskoga skupljanja statistički su obrađeni student deskriptivnom statistikom, raščlambom varijance za razlike u skupljanju s obzirom na izvor svjetlosti, i t-testom za nezavisne uzorke da bi se vidjelo postoji li razlika u polimerizacijskom skupljanju s obzirom na kom-

Tablica 1. ANOVA za razlike u polimerizacijskome skupljanju s obzirom na polimerizacijski program (Filtek Z250 kompozitni materijal)

Table 1. ANOVA for difference in polymerization shrinkage in relation to the polymerization mode (Filtek Z250 composite material)

Deskriptivna statistika / Descriptive statistics							ANOVA za razlike u polimerizacijskome skupljanju s obzirom na polimerizacijski program / ANOVA for difference in polymerization shrinkage in relation to the polymerization mode		
Kompozitni materijal / Composite material	Vrijeme / Time	Polimerizacijski program / Polymerization mode	N	Sr. vrijednost / Mean value (%)	St. dev	Min.	Max.	F	p
F	10s	ETM	10	0,21	0,0143	0,19	0,23	0,608	0,552
		ETE	10	0,26	0,31195	0,1	0,9		
		ETS	10	0,303	0,01337	0,28	0,32		
	20s	ETM	10	0,347	0,01418	0,32	0,36	962,624	<0,05
		ETE	10	0,63	0,01563	0,6	0,65		
		ETS	10	0,636	0,02011	0,6	0,66		

Legenda / Legend:

F - F vrijednost / F value

p - Razina znatnosti / Significant level

N - Br. uzoraka / Number of samples

Tablica 2. ANOVA za razlike u polimerizacijskome skupljanju s obzirom na polimerizacijski program (Tetric Ceram kompozitni materijal)

Table 2. ANOVA for difference in polymerization shrinkage in relation to the polymerization mode (Tetric Ceram composite material)

Kompozitni materijal / Composite material	Deskriptivna statistika / Descriptive statistics							ANOVA za razlike u polimerizacijskome skupljanju s obzirom na polimerizacijski program / ANOVA for difference in polymerization shrinkage in relation to the polymerization mode	
	Vrijeme / Time	Polimerizacijski program / Polymerization mode	N	Sr. vrijednost / Mean value (%)	St. dev	Min.	Max.	F	p
TC	10s	ETM	10	0,214	0,02309	0,17	0,24	1428,173	<0,05
		ETE	10	-0,101	0,01197	-0,12	-0,08		
		ETS	10	0,256	0,01075	0,24	0,27		
	20s	ETM	10	0,357	0,0116	0,34	0,37	657,428	<0,05
		ETE	10	0,432	0,01229	0,41	0,45		
		ETS	10	0,686	0,03273	0,6	0,71		
	40s	ETM	10	0,312	0,01317	0,29	0,33	6940,723	<0,05
		ETE	10	0,977	0,01337	0,95	0,99		
		ETS	10	0,933	0,01567	0,9	0,95		

Legenda / Legend:

F - F vrijednost / F value

p - Razina znatnosti / Significant level

N - Br. uzoraka / Number of samples

pozitni materijal. Rezultati su prikazani u tablicama 1-3. Grafički je prikazan primjer polimerizacijskoga skupljanja kao izravan prikaz mjerenja za jedan uzorak kompozitnoga materijala tijekom svake sekunde osvjetljavanja.

Rezultati

Kod obradbe rezultata promatralo se je skupljanje s obzirom na polimerizacijski program pojedinačno za materijale F i TC deskriptivnom statistikom i raščlambom varijance (tablice 1, 2).

Kada je upotrijebljen materijal F, pokazalo se je da su pronađene razlike u skupljanju ($p < 0,05$) s obzirom na polimerizacijski program nakon 20 sekundi (kraj polimerizacije). Nakon 20 sekundi razlike nisu pronađene između ETE i ETS ($p > 0,05$), a između ostalih programa su pronađene ($p < 0,05$). Najveće je skupljanje utvrđeno kada se je primijenio ETS program, a najmanje kada je primijenjen ETM program polimerizacije i to u oba vremena osvjetljavanja.

Kad je upotrijebljen materijal TC, razlike u skupljanju s obzirom na polimerizacijski program pro-

nađene su nakon 10, 20 i 40 sekundi i to između svih triju polimerizacijskih programa ($p < 0,05$). Nakon 10 sekundi kod ETE programa opažena je ekspanzija, a kod ETM programa skupljanje je bilo manje nego kod ETS polimerizacijskoga programa.

Nakon 20 sekundi najmanje je skupljanje bilo kod ETM, a najveće kod ETS. Nakon 40 sekundi najmanje skupljanje bilo je kod ETM, a najveće kod ETE polimerizacijskoga programa.

Promatralo se se također i razlike u skupljanju s obzirom na materijal (F : TC) t-testom za nezavisne uzorke u 10. sekundi i na kraju polimerizacije (u 40. sekundi za TC, 20. sekundi za F).

Kod ETM polimerizacijskoga programa pronađene su razlike u skupljanju između dvaju upotrijebljenih materijala samo na kraju polimerizacije ($p < 0,05$), a razlika u skupljanju nije bilo u 10. sekundi ($p > 0,05$). Na kraju polimerizacije veće skupljanje pokazivao je F kompozitni materijal.

Kod ETE programa pronađene su razlike u skupljanju između dvaju upotrijebljenih materijala i u 10. sekundi i na kraju polimerizacije ($p < 0,05$). U 10. sekundi TC je pokazivao početnu ekspanziju, a na kraju polimerizacije imao je veće skupljanje.

Tablica 3. Razlike u polimerizacijskome skupljanju s obzirom na kompozitni materijal (t-test za nezavisne uzorke)

Table 3. Difference in polymerization shrinkage in relation to the composite material (t-test for independent variables)

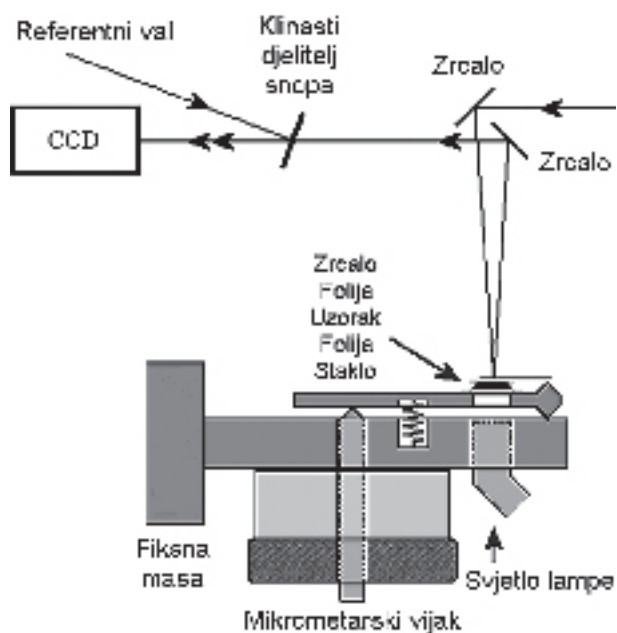
Polimerizacijski program / Polymerization mode	Vrijeme / Time	Kompozitni materijal / Composite material	N	Sr. vrijednost / Mean value (%)	St. dev.	df	p
ETM	10s	F	10	0,214	0,0143	18	0,647
		TC	10	0,21	0,02309		
	Kraj polimerizacije / End of polymerization	F	10	0,347	0,01418	18	<0,05
		TC	10	0,312	0,01317		
ETE	10s	F	10	0,26	0,31195	18	<0,05
		TC	10	-0,101	0,01197		
	Kraj polimerizacije / End of polymerization	F	10	0,63	0,01563	18	<0,05
		TC	10	0,977	0,01337		
ETS	10s	F	10	0,303	0,01337	18	<0,05
		TC	10	0,256	0,01075		
	Kraj polimerizacije / End of polymerization	F	10	0,636	0,02011	18	<0,05
		TC	10	0,933	0,01567		

Legenda / Legend:

df - Stupnjevi slobode / Degree of freedom

p - Razina znatnosti / Significant level

N - Broj uzoraka / Number of samples



Slika 1. Shema optičkoga uređaja
Figure 1. Optical device scheme

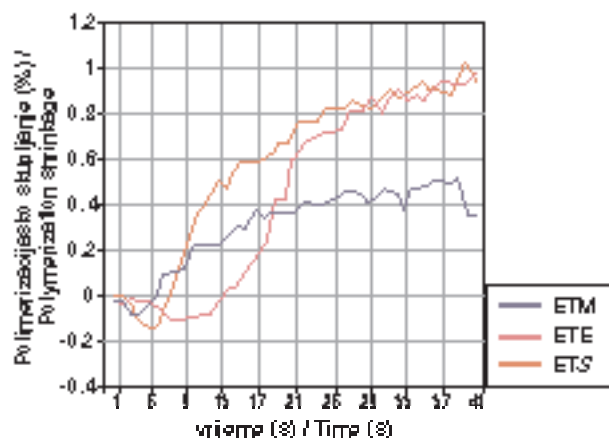
Kod ETS polimerizacijskoga programa pronađene su razlike u skupljanju između dvaju upotrebljenih materijala u 10. sekundi i na kraju polimerizacije ($p < 0,05$). Veće skupljanje u 10. sekundi imao je F, a na kraju polimerizacije TC.

Na slikama 2 i 3 vidi se tijekom polimerizacijskoga skupljanja u svakoj sekundi osvjetljavanja. Može se vidjeti početna ekspanzija uzoraka prigodom polimerizacije s ETE programom (otklon krivulje u negativnom smjeru). Iz slika je vidljivo da vrijednosti polimerizacijskoga skupljanja najviše vrijednosti dosegnu oko 20. sekunde.

Rasprava

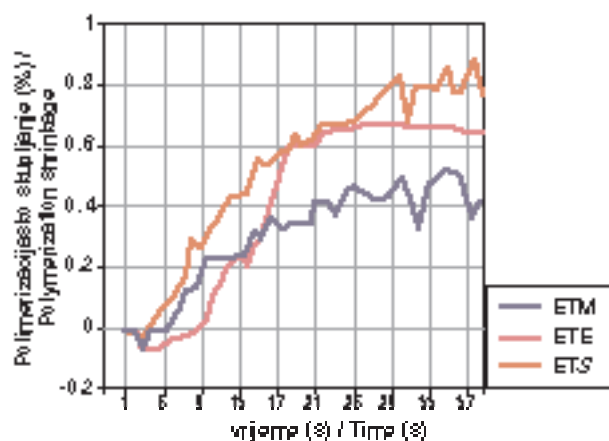
Polimerizacija kompozitnih materijala neminovno je povezana sa skupljanjem zbog nastanka kratkih kovalentnih veza između monomera. Do danas se problem skupljanja pokušao kompenzirati na više načina, a u tome važno mjesto ima početna polimerizacija nižim intenzitetom svjetla za polimerizaciju.

Pri ekspoziciji kompozitnoga materijala nižem intenzitetu izvora svjetla može nastati otežana aktivacija fotoinicijatora, osobito u dubljim dijelovima ispuna. S druge strane, brža polimerizacija pri



Slika 2. Polimerizacijsko skupljanje za jedan uzorak Tetric Ceram kompozitnoga materijala tijekom polimerizacije

Figure 2. Polymerization shrinkage for single sample of Tetric Ceram composite material during polymerization



Slika 3. Polimerizacijsko skupljanje za jedan uzorak Filtek Z250 kompozitnoga materijala tijekom polimerizacije

Figure 3. Polymerization shrinkage for single sample of Filtek Z250 composite material during polymerization

visokom intenzitetu osvjetljavanja, unatoč većem stupnju konverzije, proizvodi kraće i više unakrsno povezane polimere zbog prebrze reakcije inicijacije polimerizacije na više mjesta što uzrokuje bržu terminaciju polimerizacije (8, 9). Uno i Asmussen (10) te Sakaguchi i Berge (11) preporučuju uporabu niskog intenziteta svjetla za polimerizaciju kako bi se omogućilo da se materijal postupno stvrdnjava i time umanjio nastanak stresa pri skupljanju i mikropukotine kao posljedice toga.

Iz slika 2 i 3 vidi se da početna ekspanzija postoji i kod ETM i ETS polimerizacijskoga programa, samo se ona odvija, tj. traje znatno kraće od 10 sekundi te u tablicama nije vidljiva. Iz slika se nadalje jasno vidi da je polimerizacijsko skupljanje uvjetovano intenzitetom žarulje te da ETE program pokazuje najniže polimerizacijsko skupljanje prvih 15-tak sekundi kada emitira svjetlost najnižeg intenziteta (100 mW/cm^2). Iznad toga vremenskog intervala s porastom jakosti svjetla (800 mW/cm^2) raste i polimerizacijsko skupljanje i prerasta vrijednosti polimerizacijskoga skupljanja pri polimerizaciji s ETM programom (450 mW/cm^2).

Zanimljivo je da krivulja polimerizacijskoga skupljanja F kompozitnoga materijala poprma sličan oblik krivulji skupljanja kao i kod TC materijala polimeriziranog 40 sekundi bez obzira na to što je osvijetljavanje prekinuto nakon 20 sekundi. Uzrok tomu vjerojatno je u sastavu KM: količini TEGDMA, UDMA, BisGMA, EGDMA. F u svojem sastavu sadržava BisGMA, BisEMA i UDMA. Veći udio UDMA smanjuje modul elastičnosti, a manji modul elastičnosti omogućuje veće tečenje materijala i plastičnu deformaciju (12). Osim toga, količina TEGDMA-e utječe na polimerizaciju u poslijeiradijacijskome razdoblju i to tako što veći udio TEGDMA dovodi do slabije polimerizacije u poslijeiradijacijskome razdoblju (12). F u svojem sastavu, prema navodu proizvođača, ne sadržava TEGDMA, pa i to može biti jedan od uzroka nastavka polimerizacijskoga skupljanja u poslijeiradijacijskome razdoblju sličnom polimerizacijskomu skupljanju kod TC kompozitnoga materijala.

Rezultati polimerizacijskoga skupljanja dobiveni u ovom ispitivanju podudaraju se s rezultatima polimerizacijskoga skupljanja drugih autora: Meiers i suradnici izmjerili su vrijednosti linearnoga polimerizacijskog skupljanja u granicama od 0,8 do 1% (13), Feilzer i suradnici (14), te deGee i suradnici (15) dobili su vrijednosti od 0,52 do 0,99% linearnoga skupljanja. Vrijednosti mjerenja polimerizacijskoga skupljanja u ovom eksperimentu mjereni holografskom interferometrijom kreću se u granicama navedenih vrijednosti: 0,12 - 0,98% linearnoga skupljanja.

Kompozitni materijali s visokim udjelom punila imaju manje polimerizacijsko skupljanje. Ta se činjenica može objasniti time da što je manji udio punila, to je veći volumen organske matrice. Budući da česti-

ce stakla ne podliježu skupljanju, organska matrica je odgovorna za skupljanje zbog formiranja sveza i deformacije pri prijelazu iz gel stanja u sol stanje.

Drugi čimbenik u svezi s skupljanjem jest veličina čestica punila. Što su veće čestice punila, veće je skupljanje materijala. Sukladno tomu, kompozitni materijali s manjim česticama punila manje će se skupljati. Što su čestice anorganskoga punila veće, to je i veći udio organske matrice među česticama. Sitnije čestice imaju manji međusobni razmak, a time i manju količinu organske matrice među česticama. Nasuprot tome, sitnije čestice će uzrokovati veću raspršenost svjetla, a time i slabiju polimerizaciju. Veće će čestice omogućiti bolju transmisiju svjetla, a time veći stupanj konverzije, ali i veće polimerizacijsko skupljanje (3).

Neizbježna posljedica polimerizacije kompozitnih materijala jest nastanak stresa u samome materijalu, u okolnim strukturama ili na spoju zuba s kompozitnim materijalom. Najzanimljivija mogućnost kompenzacije stresa od polimerizacijskoga skupljanja uz postavljanje tzv. linerne, tekućih kompozita i slojevite tehnike postavljanja kompozitnoga materijala, bila bi uporaba tzv. "soft-start" polimerizacije, to jest polimerizacije nižega početnog intenziteta kao što je ETE polimerizacijski program. Takvim izvorima svjetla nastoji se izbjeći brza početna polimerizacija koju prati visok porast temperature koje je posljedica daljnje ubrzanje procesa polimerizacije, što dovodi do gel učinka ili Trommsdorfova učinka, odnosno do brzoga povećanja viskoznosti materijala (16, 17). Zato bi svrha postupne polimerizacije bila produljiti pregelacijsku fazu u kojoj se skupljanje još može kompenzirati, i skratiti poslijegelacijsku fazu u kojoj se stvara napetost između okolnih struktura i materijala. Također se smatra da je za bolju polimerizaciju i manje polimerizacijsko skupljanje dubljih slojeva kompozitnoga materijala bolje produžiti vrijeme stvrdnjavanja uz niži intenzitet nego se služiti kraćim vremenom polimerizacije s jačim intenzitetom polimerizacijskoga uređaja (17, 18).

Zaključak

Polimerizacijsko skupljanje kompozitnih materijala uzrokovano je s više različitih čimbenika te kao posljedicu ima mikropukotine i mikrofrakture na spoju zub-kompozitni materijal ili u samome mate-

rijalu odnosno samome zubu. Rezultati ovoga ispitivanja pokazali su da niži početni intenzitet svjetla za polimerizaciju stvara manje polimerizacijsko skupljanje, a time i u najvećoj mjeri umanjuje spomenute negativne posljedice skupljanja kompozitnih materijala tijekom njihova stvrdnjavanja.

Literatura

1. YAP AUJ, SOH MS. Post-gel polymerization contraction of "low-shrinkage" composite restoratives. *Oper Dent* 2004; 29: 182-7.
2. SOH M, YAP AUJ, SIOW KS. Post-gel shrinkage with different modes of LED and halogen light curing units. *Oper Dent* 2004; 29: 317-24.
3. DANESH G, DAVIDS H, REINHARDT KJ, OTT K, SCHAFFER E. Polymerisation characteristics of resin composites polymerised with different curing units. *J Dent* 2004; 32: 479-88.
4. YAP AUJ, WANG HB, SIOW KS, GAN LM. Polymerization shrinkage of visible light-cured composites. *Oper Dent* 2000; 25: 98-103.
5. KNEZEVIC A, DEMOLI N, TARLE Z, MENIGA A, ŠUTALO J, PICHLER G. Measuring composite polymerization contraction using digital laser interferometry. *J Dent Res* 2004; abstr. 0593.
6. DEMOLI N, PICHLER G, KNEŽEVIĆ A, TARLE Z, MENIGA A, ŠUTALO J. Measurement of the composite resin thickness variations using digital interferometry. *Proceedings of SPE* 2003; 5144: 343-9.
7. DEMOLI N, KNEŽEVIĆ A, TARLE Z, MENIGA A, ŠUTALO J, PICHLER G. Digital laser interferometry for measuring of the resin composite thickness variation during blue light polymerization. *Optics Commun* 2004; 231: 45-51.
8. MIYAZAKI M, FUKUIISHI K, ONOSE H. Influence of light irradiation on the volumetric change of polyacid modified resin composites. *J Dent* 1999; 27: 149-53.
9. SANTOS MJMC, SANTOS GC, FILHO HN, MONDELLI RFL, MOWAFY OE. Effect of light curing method on volumetric polymerization shrinkage of resin composites. *Oper Dent* 2004; 29: 157-61.
10. UNO S, ASMUSSEN E. Marginal adaptation of a restorative resin polymerized at reduced rate. *Scand J Dent Res* 1991, 99: 440-4.
11. SAKAGUCHI RL, BERGE HX. Effect of light intensity on polymerization contraction of posterior composite. *J Dent Res* 1997; 76: 481-3.
12. MANHART J, KUNZELMANN KH, CHEN HY, HICKEL R. Mechanical properties and wear behavior of light-cured packable composite resins. *Dent Mater* 2000; 16: 33-40.
13. MEIERS JC, KAZEMI R, MEIER CD. Microleakage of packable composite resins. *Oper Dent* 2001; 26: 121-6.
14. FEILZER AJ, DE GEE AJ, DAVIDSON CL. Curing contraction of composites and glass-ionomer cements. *J Prosthet Dent* 1998; 59: 297-300.
15. DE GEE AJ, FEILZER AJ, DAVIDSON CL. True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 1993; 9: 11-4.
16. CEHRELI MC, CANAY S. Comparison of post-gel shrinkage strains in light-polymerized composite resins. *J Prosthet Dent* 2002; 88: 461-6.
17. YAP AU, NG SC, SIOW KS. Soft-start polymerization: Influence on effectiveness of cure and post-gel shrinkage. *Oper Dent* 2001, 26: 260-6.
18. KNEŽEVIC A, DEMOLI N, TARLE Z, MENIGA A, ŠUTALO J, PICHLER G. Measurement of linear polymerization contraction using digital laser interferometry. *Oper Dent* 2005; 30(3): 346-52.