

Sunčevo zračenje kroz kupole od dvostrukog pleksi stakla

Miroslav Demirović

U poslednje vreme kupole od pleksi stakla upotrebljavaju se sve više u građevinarstvu. Pored poznatog bazena u Primoštenu javljaju se i drugi objekti, gde se kupole koriste za osvetljavanje prostorija dnevnom svetlošću. Međutim, radi se uglavnom o kupolama relativno malih dimanzija, koje ne podstiču jedan studiozniji prilaz problemima sunčevog zračenja i odvođenja toplote iz prostorije. Tek u projektu Biblioteke u Prištini, projektant, poznati zagrebački arhitekt Andrija Mutnjaković, smelo primenjuje kupolu od pleksi stakla u sasvim novom obimu, koji omogućuje potpuno novi kvalitet. Kupola na adekvatan način obezbeđuje dnevnu svetlost u prostorijama tokom dana, bez obzira na položaj prostorije u odnosu na fasadu, dok se u toku noći, fluorescentnim svetlom, upravljanim prema površini kupole, dobija vrlo lep spoljni efekat.

Na objektu Biblioteke primenjeno je pet osnovnih kupola, od kojih najveća ima prečnik 11 m. Jasno je da ovakva primena kupola postavlja mnoge probleme i od projektanta zahteva poznavanje tehnike osvetljavanja pomoću dnevne svetlosti, kao i fizike sunčevog zračenja. Među ostalim, javljaju se i problemi kondenzacije vodene pare na unutrašnjim površinama kupole.

Kao što je poznato, VDI 2078 od 1972. godine sadrži proračun sunčevog zračenja kroz vertikalne staklone površine, kroz staklone površine pod određenim uglom — najčešće kod šeda i za horizontalne površine. Ni u visoko razvijenim zemljama još nema većih iskustava u radu sa kupolama većih dimenzija, što se može potvrditi u kontaktu sa po-

jedinim renomiranim proizvođačima. Prema tome, projektanti se nalazi pred jednom novom problematikom, za čije rešavanje teško može naći podatke u literaturi, a ne može ih dobiti ni od proizvođača.

1. DEJSTVO SUNČEVOG SPEKTRA

Termotehničari po navici stečenju u praksi zaključuju, da kada se radi o proračunu sunčevog zračenja, treba računati sa infracrvenim delom spektra sunčeve svetlosti. Kao što je poznato, spektar sunčeve svetlosti deli se na tri osnovna područja, prema dužinama. Ultravioletno zračenje obuhvata najkraće talasne dužine — do 380 nm.* Talasne dužine od 380 do 780 nm predstavljaju vidljivi deo spektra, dok je područje infracrvenog dela spektra od 780 do 2 000 nm. CIE (Internacionalna komisija za osvetljenje) je ovakvu podelu usvojila 1967. godine. Na sl. 1. prikazana je relativna spektralna podela za ukupno sunčevo zračenje.

Kada treba izračunati toplotno opterećenje od zračenja, često se traže podaci o delovanju infracrvenog dela spektra, što je u slučaju kupola od pleksi stakla pogrešno. Dr U. Fišer (Fischer), iz firme *Rohrn* iz Darmštata smatra da na pitanje koji je deo spektra važan u pogledu sunčevog zračenja, nije moguće dati jednoglasan odgovor, odnosno da je takvo pitanje neumesno, jer je za izračunavanje toplotnog opterećenja merodavno celokupno sunčevo zračenje [1].

2. PROPUSTLJIVOST MATERIJALA NA SUNČEVO ZRAČENJE

U odnosu na propustljivost, usvojena su dva pojma — jedan

u odnosu na svetlosni deo spektra, a drugi u odnosu na ukupno zračenje. Nas u ovom slučaju interesuje ukupno zračenje, pa ćemo se pozabaviti koeficijentom transmisije ukupnog zračenja.

Ukupno zračenje zavisi od položaja Sunca i atmosferskih uslova. U ovakvim ispitivanjima uvek se radi o visini Sunca od 60° iznad horizonta, što je za srednjoevropske uslove ujedno i najviši mogući položaj. Za istraživanja, a i za projektovanje, ovo stanje je najinteresantnije, jer daje maksimalne vrednosti. CIE je 1967. godine za položaj Sunca od 60° iznad horizonta usvojila relativnu spektralnu podelu, prikazanu dijagramom na sl. 1. Skrećemo pažnju da se radi o srednjim vrednostima.

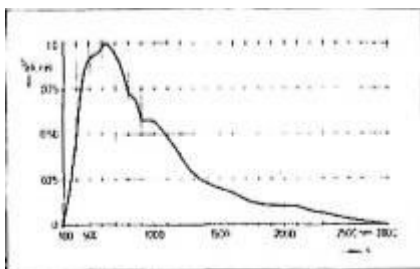
Da bi se moglo izraziti, koji deo zračenja određeni materijal propušta, usvojen je pojam koeficijenta transmisije, definisan izrazom:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda} \tau(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda} d\lambda}$$

Veličina Φ_{λ} se uzima sa sl. 1. i ona je proporcionalna relativnoj podeli zračenja. Razmere pri tome nisu važne, jer se međusobno skraćuju. U gornjem izrazu umesto veličine $V(\lambda)$, stoji vrednost 1 ispod integrala, što znači da predmetno zračenje uopšte ne zavisi od talasne dužine [1]. Do ovakvih dijagrama za providne uzorke materijala moguće je doći direktnim merenjima koeficijenta transmisije za sunčevo i globalno zračenje. Koeficijent transmisije se može izmeriti i indirektnim metodom: treba meriti termička naprezanja pre i posle probe zračenja i odnos tih dveju vrednosti predstavlja koeficijent transmisije.

* 1 nm = 10⁻⁹ m

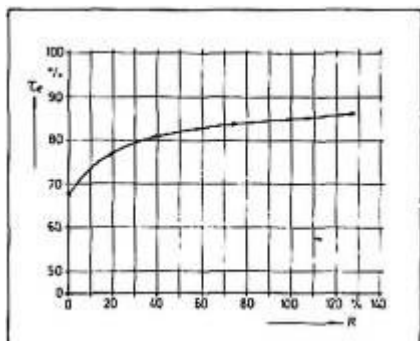
Sl. 1 — Relativna spektralna podela za globalno zračenje pri visini Sunca 60° iznad horizonta



3. UTICAJ DEFORMACIJE PRI OBRADI MATERIJALA

Prilikom obrade, u najvećem broju slučajeva na presama, materijal pretrpi relativno velike deformacije, što u velikoj meri menja njegov koeficijent transmisije. Da bi se ovaj uticaj mogao uzeti u obzir, usvojen je pojam koeficijenta deformacije. Materijal deformacijom menja svoje tehničko-svetlosne osobine, kao i osobine u pogledu fizike zračenja. Uticaj deformacija materijala prilikom obrade nije teško utvrditi. Treba samo vršiti merenja pre i posle deformacija. Na sl. 2. i 3. dat je uticaj deformacije na koeficijent transmisije na vrstama belog pleksi stakla 010 i 017. Ove vrste pleksi stakla

Sl. 2 — Koeficijent globalnog sunčevog zračenja u zavisnosti od koeficijenta deformacije za vrstu belog pleksi stakla 010



proizvela je firma Rohm u Darmštatu.

Potrebno je detaljnije objasniti pojam koeficijenta transmisije. Ploča od pleksi materijala nakon odgovarajućeg zagrevanja trpi »biaksijalnu deformaciju«, pri čemu se dimenzije u oba smera menjaju. Te deformacije mogu biti izvanredno velike. U najvećem broju slučajeva radi se o povećanju dimenzija od 25%, međutim, kako se iz dijagrama vidi, ono može iznositi i do 140%.

Prilikom obrade deformacijom, svaka tačka u zavisnosti od visine strele na profilu, trpi različite deformacije. To nas navodi na merenje debljine materijala i na izražavanje koeficijenta deformacije (R) pomoću debljine.

Ako sa d_0 označimo debljinu materijala pre deformacije, a sa d_R nakon deformacije, onda je koeficijent deformacije:

$$R = (V d_0 / d_R - 1) \cdot 100\%$$

U praksi ovakva definicija vezana za debljinu omogućava relativno laka merenja i određivanje koeficijenta deformacije. S ovim koeficijentom mora se računati, jer koeficijent transmisije umnogome zavisi od deformacije materijala. Ta zavisnost je data na slikama 2. i 3. Svi podaci uzeti su od firme Rohm, a dobijeni su na uzorcima debljine 3 mm. Mi ćemo se pozabaviti samo vrstama belog pleksi stakla 010 i 017, jer su za primenu na kupolama najpovoljnije u pogledu korišćenja sunčeve svetlosti za osvetljavanje prostorija, pri dovoljno smanjenom dejstvu sunčevog zračenja.

Kod kupola od pleksi stakla radi se najčešće o takvim deformacijama i strelama profila, kod kojih koeficijent deformacije ne prelazi 20%. Međutim, kao što se iz dijagrama vidi, prirast krive najveći je u intervalu od 0 do

20%. Treba napomenuti da kod bezbojnih vrsta pleksi stakla nakon deformacije pri obradi ne dolazi do promena koeficijenta transmisije.

Međutim, kod vrsta belog stakla 010 i 017, taj uticaj je znan i u relativno velikoj meri pogoršava situaciju sa zračenjem, povećavajući koeficijent transmisije.

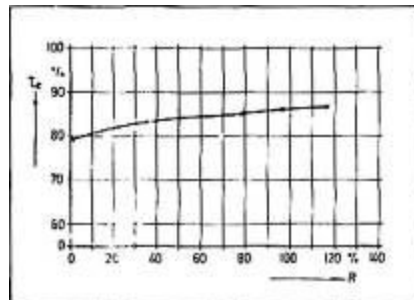
4. VIŠESLOJNE KUPOLE

Kao što je poznato, prema VDI 2078 od 1972. godine, pri izračunavanju spoljnog opterećenja usled zračenja, ukupni koeficijent transmisije b izračunava se multiplikacijom pojedinih koeficijenata. Ako imamo dvoslojnu kupolu, postavlja se pitanje sa kojim koeficijentom treba računati zračenje.

Pojedini proizvođači kupola od već dobijenog polufabrikata smatraju da se pri izračunavanju ukupnog koeficijenta transmisije ne smeju vršiti množenja koeficijenata za pojedine slojeve. Ovo bi umnogome pogoršalo uslove i mogućnosti korišćenja kupola u građevinarstvu, pogotovo kupola većih dimenzija.

Kod kupola sa dva sloja, koje su najčešće u praksi, visina strele pojedinih slojeva je različita. Strela spoljnog sloja je viša od

Sl. 3 — Koeficijent globalnog sunčevog zračenja u zavisnosti od koeficijenta deformacije za vrstu belog pleksi stakla 017



unutrašnjeg. Uzeti srednji koeficijent deformacije ne bi bilo ispravno, već se mora ići postepeno. Za svaki materijal treba uzeti odgovarajući koeficijent deformacije.

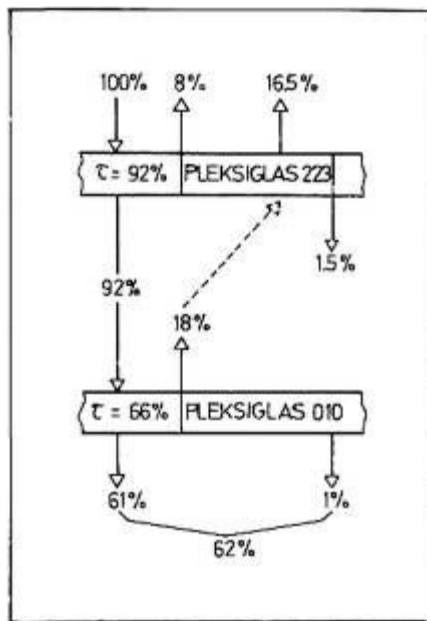
Prema [1] pojedini koeficijenti se mogu množiti, da bi se dobio koeficijent kroz kupolu. Na sl. 4, dat je jedan takav slučaj dvoslojne kupole, gde je spoljni sloj od pleksi stakla 233, a unutrašnji od belog stakla 010. Koeficijent transmisije za kupolu dobijamo, ako iz dijagrama na sl. 2. i 3, za određeni koeficijent deformacije, uzmemo odgovarajuće koeficijente transmisije, pa nakon toga izvršimo multiplikaciju. Vrednost koju dobijemo predstavlja najmanju moguću vrednost. Iz bilansa koji je dat na sl. 4, vidi se da povećanje od 1 % praktično može da se zanemari. Do ove razlike dolazi zbog refleksije na graničnim slojevima materijala i vazduha.

5. PROPUSTLJIVOST ULTRAVIOLETNOG DELA SPEKTRA

Propustljivost atmosfere za zračenje u ultravioletnom području, zavisi od mnogih faktora: nadmorske visine, visine Sunca nad horizontom, dima u atmosferi stepena oblačnosti itd.

Merenja propustljivosti za UV područje vršena su pri srednjoj visini Sunca, na nadmorskoj visini 0 m. Srednja visina Sunca od 30° je uzeta pri merenjima jer je potrebno dosta vremena da se registruje dejstvo tih zraka. Kod bezbojnih vrsta pleksi stakla koeficijent propustljivosti za prirodno zračenje manji je od 1%, osim vrste 218 (88%) i 233 (10%). Takođe je ispod 1% za obe nama poznate vrste belog stakla 010 i 017. Na dijagramu na sl. 5, data je zavisnost koeficijenta transmisije od koeficijenta

Sl. 4 — Koeficijent transmisije za dvoslojnu kupolu



ta deformacije za UV zračenje. Iz dijagrama se vidi povećanje koeficijenta koje je kod ove dve vrste sasvim različito, mada su one inače vrlo slične.

6. KOEFICIJENT TRANSMISIJE GLOBALNOG ZRAČENJA ZA MATERIJAL U STANJU U KOME SE ISPORUCUJE SA SKLADIŠTA

Materijal pri obradi trpi razne deformacije, pa treba računati sa mnogim uticajima. Međutim, uvek treba uzeti tačnu početnu vrednost za određeni materijal. Prema podacima proizvođača za osnovne vrste pleksi stakla firme Rohm, treba uzimati sledeće vrednosti:

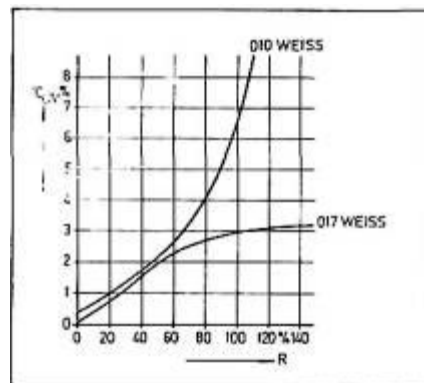
- pleksi staklo bez boje $\tau_e = 85\%$
- pleksi staklo 010 belo $\tau_e = 67,4\%$
- pleksi staklo 017 belo $\tau_e = 79,4\%$

7. TEMPERATURE U PROSTORIJI

Na osnovu izloženog može se zaključiti da jedan deo sunčevog zračenja dospeva u kupolu. Koji će to deo biti, zavisi najviše od koeficijenta transmisije. Ovaj deo zračenja, koji je dospeo u prostor ispod kupole, zagreva pod, zidove i sve predmete u prostoriji. Jedan manji deo zraka nakon višestruke refleksije odlazi i van kupole. Međutim, pod dejstvom zračenja, predmeti u prostoriji se zagrevaju i postaju i sami izvor zračenja. To zračenje pri temperaturi od 27°C nalazi se u infracrvenom području i njegov maksimum pada na 10 000 nm. Za sada nema materijala koji bi mogao da propusti zračenje tako velike talasne dužine. Prema tome, najveći deo energije ima štetno dejstvo i povećava direktno opterećenje hlađenja.

Usled zagrevanja prostora pod kupolom, dolazi do konvektivnog prenosa toplote, čiji gradijent ima smer prema spolja. Međutim, često se koriste razni oblici klapni da bi se omogućilo vertikalno strujanje vazduha za odvod toplote iz prostorije.

Sl. 5 — UV koeficijent transmisije za belo pleksi staklo 010 i 017 za visinu Sunca 30° 10 m nadmorske



8. KOEFICIJENT SELEKTIVNOSTI

Proizvođači specijalnog stakla sa folijama metala koje reflektuju infracrveni deo zračenja, definisali su koeficijent selektivnosti kao odnos svetlosnog koeficijenta transmisije i koeficijenta transmisije za globalno zračenje.

Ukoliko je vrednost koeficijenta selektivnosti, pri istom intenzitetu osvetljenja dnevnim svetlošću veća, zagrevanje prostora pod kupolom, usled radijacije, je manje.

U tabeli su date vrednosti koeficijenata transmisije svetlosnog dela spektra, koeficijenata transmisije za globalno zračenje i, na bazi ovih vrednosti, izračunate vrednosti koeficijenata selektivnosti za razne vrste pleksi stakla. Ova tabela je dovoljna projektantu da tačno odredi potrebnu kombinaciju dve vrste za određani slučaj u praksi.

9. NAČIN OBRAČUNAVANJA SUNČEVOG ZRAČENJA

O izračunavanju zračenja kroz kupolu, nije ništa rečeno u VDI 2078 od 1972. godine. Međutim, date su vrednosti za vertikalno zastakljenje, za staklene površine pod uglom i za horizontalnu površinu. Prema onome što smo već izneli, jasno je da je za izračunavanje zračenja merodavna projektovana površina kupole, odnosno površina osnovnog kruga. S obzirom da su za jul i avgust za zračenje kroz horizontalnu površinu u VDI 2078 date relativno velike vrednosti, jasno je da kod velikih formi treba očekivati relativno velike količine toplote, čija je posledica adekvatno povećanje kanala za distribuciju vazduha.

Vrsta pleksi stakla	Koeficijent	
	% τ_s	% τ_r
233. 209	92	85
010	66	67
017	85	79
400	16	38
800	70	81
801	59	76
802	57	64
837	10	70
838	20	44
853	11	36
855	4	59
882	47	79
1 710	14	30

LITERATURA

- [1] Fischer, U. dr ing.: »Lichttechnische Kennzeichnung von Lichtkuppeln aus Plexiglas«
- [2] DIN 5036, Blatt 3 Bewertung und Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Werkstoffen; lichttechnische Stoffkennzahlen; Messverfahren; Ausgabe März 1970
- [3] Fischer, U., Hosch, L., Kindinger, K.: Ulbrichtsche Kugel aus matweissem plexiglas zur messung lichttechnischer Stoffkennzahlen, Lichttechnik 22 (1970) Heft 2 s. 66—68
- [4] DIN5033 Blatt 8: Farbmessung, Messbedingungen für Lichtquellen; Ausgabe September 1966
- [5] DIN 5034 Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht; Leitsätze; Ausgabe November 1959
- [6] Robinson, E.: Solarradiation. Elsevier Publishing Company, Amsterdam/ London/ New York, 1966, s. 19
- [7] DIN 5036, Blatt 2: Bewertung und Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Werkstoffen; lichttechnischen Stoffkennzahlen; Begriffe; Ausgabe März 1970