

Jasenka Bertol-Vrček

Sveučilište u Zagrebu
Arhitektonski fakultet
HR - 10000 Zagreb, Kačićeva 26

Pregledni znanstveni članak • Subject Review
UDK • UDC 624:72.025.3

Znanstvena klasifikacija • Scientific Clasification
Područje: Tehničke znanosti • Section: Technical Sciences
Polje: Arhitektura i urbanizam • Field: Architecture and Urban Planning
Grane • Branches: 2.01.03 fizika zgrade • Structural Physic

Rukopis primljen • Manuscript Received: 06.04.1999.
Članak prihvaćen • Article Accepted: 15.06.1999.

Unutarnja plošna temperatura toplinskih mostova**Thermal Bridge Internal Surface Temperature****Ključne riječi • Key words**

koef. prolaska topline	coefficient of heat flow
toplinski most	thermal bridge
toplinska zaštita	thermal protection
plošna kondenzacija	surface condensation
plošna temperatura	surface temperature

Sažetak • Abstract

Zahtjevi za visokom toplinskom zaštitom zgrada uvjetuju poseban pristup koncepciji konstruiranja detalja toplinske zaštite na toplinskim mostovima vanjskog plašta zgrade. Definirajući osnovne vrste toplinskih mostova koji se promatraju u analizama transmisijskih gubitaka topline, pojedine se vrste analiziraju sa stajališta fizikalnog djelovanja. Utvrđuju se čimbenici koji određuju unutarnje plošne temperature te razlozi koji uvjetuju izraziti pad plošne temperature u kritičnim točkama. Razmatrani su pojedini slučajevi spojeva konstrukcija i njihove plošne temperature. Navode se posljedice izrazito niskih plošnih temperatura te mjere za njihovo sprječavanje.

The demand for a high level of thermal protection in buildings requires a special approach to the construction of thermal protection details on thermal bridges on the building exterior. The author defines basic types of thermal bridges observed in analyses of heat loss transmission, and analyses individual types from the aspect of physical effect. She establishes factors that determine internal surface temperatures, and the reasons for pronounced surface temperature decrease at critical points. She analyses specific cases of structural bindings and their surface temperatures. She gives the consequences of extremely low surface temperatures, and what can be done to prevent them.

1. Uvod / Introduction

Razina toplinske zaštite neke građevine najčešće se iskazuje vrijednostima koeficijenta prolaska topline k njezinih obodnih vanjskih konstrukcija. Vrijednosti k koje se danas nastoje postići kreću se od 0,30 do 0,50 W/m²K, što je neusporedivo bolje od onih koje se prema važećim normativima u nas dopuštaju kao najveće. Međutim, treba napomenuti kako stvarni razlog nastojanja da se postignu te vrijednosti nije u široko prihvaćenom shvaćanju o uštedi energije i toplinskoj zaštiti, već u posljedično potrebnoj kompenzaciji toplinskih gubitaka zbog nepovoljnih konstrukcija (ostakljenja).

S razvojem tehnologije toplinskoizolacijskih materijala i usmjerenjem svjetskoga građenja u smjeru što veće uštede energije i zaštite okoliša od onečišćenja izgradnjom tzv. niskoenergetskih zgrada, osnovne konstrukcije obodnoga vanjskog plašta zgrade postižu se danas i bitno niže vrijednosti koeficijenta prolaska topline ugradnjom toplinskih izolacija iznimnih svojstava i povećanjem njihovih debljina. Debljine toplinskih izolacija u zgradama niske energije u zidovima kreću se već od 10 do 15 cm, a u krovovima od 15 do 25 cm.

TABL. I. Usporedba najvećih vrijednosti koeficijenta prolaska topline obodnih konstrukcija utvrđenih našim normativima i koeficijenta prihvatljivih za niskoenergetske zgrade

Izvor • Source
HRN U.J5.600 i Debartoli, 1997.

TABLE. I. Comparison between largest-value heat flow coefficients of surrounding structures established with our norms and coefficients acceptable for low-energy buildings

Obodna konstrukcija	Najveći dopušteni k prema hrvatskim važećim propisima* W/m ² K	Najveća vrijednost k za niskoenergetske zgrade W/m ² K
vanjski zid	0,80-1,20	0,20
pregradni zid	1,60-1,95	0,70
međukatna konstrukcija između stanova	1,35	0,50
pod na tlu	0,65-0,90	0,40
međukatna konstrukcija prema negrijanom potkrovlju	0,70-0,95	0,15
međukatna konstrukcija iznad podruma	0,50-0,75	0,30
međukatna konstrukcija iznad otvorenog prostora	0,40-0,50	0,20
krov	0,55-0,75	0,15

(*) Raspon vrijednosti od treće do prve građevinsko-klimatske zone¹.

Vrijednosti koeficijenta prolaska topline osnovnih obodnih konstrukcija utvrđene računskim putem na osnovi sastava konstrukcija odnose se na neprekinuti dio konstrukcije, tj. samo na karakteristične dijelove konstrukcije. Ovisno o konstrukcijskoj koncepciji zgrade i oblikovanju, na spojevima pojedinih konstrukcija stvaraju se *toplinski mostovi* zbog kojih treba računati s većim ili manjim utjecajem na ukupne toplinske gubitke vanjske obodne opne zgrade.

Novim propisima na području građevne toplinske zaštite u Europi zahtijeva se poseban odnos pri konstruiranju detalja kao i pri njihovoj izvedbi. Osim povišenja toplinskozaštitnog standarda, pridaje se dosad najveća pozornost smanjivanju djelovanja toplinskih mostova i brtvljenju reški.²

Proračunske metode iznalaženja toplinskih gubitaka na toplinskim mostovima vrlo su zahtjevne i komplicirane, njima se bave odgovarajući europski instituti i fakulteti, a rezultati njihovih istraživanja prikazani su u katalozima toplinskih mostova. Vrijednosti iz tih kataloga mogu služiti za proračun gubitaka topline u jednakim ili sličnim slučajevima.

Koliko se podiže razina toplinske zaštite, toliko više odstupa računski dobivena energija potrebna za grijanje od stvarno potrebne. Razlika, tj. pogreška u proračunu nastaje zbog upotrebnih okolnosti ili neprimjerenih računskih postupaka, ponajprije zbog transmisivskih

1 U Hrvatskoj su utvrđene tri građevinsko-klimatske zone:

I. zona - priobalni pojas s vanjske projektne temperature -12 °C

II. zona - središnji, nizinski dio Hrvatske vanjske projektne temperature -18 °C

III. zona - uglavnom brdoviti krajevi s vanjskom projektnom temperaturom -24 °C.

2 Draft International Standards ISO/DIS 10211-2, 1995; ISO 10211-1, International Standard, 1995.

toplinskih gubitaka nastalih djelovanjem toplinskih mostova ili/ zbog ventilacijskih gubitaka koji su posljedica propusnosti reški.

Povećani gubici topline u području toplinskih mostova razlog su potrebe za većom količinom energije za zagrijavanje, što se treba uzeti u obzir pri dimenzioniranju ogrjevnih tijela i postrojenja za zagrijavanje. Oni ne znače samo veće investicijske troškove gradnje, već i trajno povećane troškove korištenja zgrade (ponajprije za kupnju goriva).

2. Toplinski mostovi / Thermal Bridges

Toplinski su mostovi ograničena mjesta u vanjskom plaštu zgrade na kojima se, u usporedbi s neprekinutim dijelovima konstrukcije, pojavljuje veća gustoća toplinskog toka, a time i niža unutarnja plošna temperatura.

Djelovanje toplinskog mosta očituje se u uvjetima razlike između unutarnje i vanjske temperature, tj. zimi, a njegovo se mjesto u građevini često prepoznaje po štetama nastalim zbog orošavanja unutarnje plohe toplinskog mosta. Na tim se mjestima pojavljuje plošna kondenzacija vodene pare, taloži se prašina, te stvaraju plijesni i gljivice, što s higijenskog stajališta znači opasnost za zdravlje. U blažem obliku to su mjesta povećanih gubitaka topline koji mogu biti vrlo važni za smanjenje toplinskoizolacijskih vrijednosti obodne pregrade, te za ugodnost boravka u prostoriji.

Fizikalno obilježje toplinskog mosta jest da linije širenja temperature na tome mjestu nisu više paralelne nego su iskrivljene. Kroz pojedinačne dijelove homogene konstrukcije toplinski je tok okomit na gornju konstrukcijsku plohu. Na heterogenim se konstrukcijama na spoju različitih materijala nastajanjem temperaturnih razlika u ravninama paralelnim s gornjom konstrukcijskom plohom zbog poprečnih komponenti mijenja smjer linije toplinskog toka i nastaju odstupanja od paralelnog toka.

Osim povećanoga gubitka topline zbog veće gustoće toplinskog toka smanjuje se i unutarnja plošna temperatura (niža temperatura u odnosu prema susjednome, neprekinutom dijelu konstrukcije). Ta se problematika može izraziti razlikom plošnih temperatura na jednoj konstrukciji, zidu s toplinskim mostom.³ Plošna temperatura neprekinutog dijela zida na njegovu unutarnjem dijelu izračunava se prema izrazu:

$$v_i = t_i - [k_{zida} \cdot (t_i - t_e)] / \alpha_i \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

v_i - unutarnja plošna temperatura zida na neprekinutom dijelu zida ($^\circ\text{C}$)

t_i, t_e - unutarnja, odnosno vanjska temperatura zraka ($^\circ\text{C}$)

k_{zida} - koeficijent prolaska topline neprekinutog dijela zida ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

α_i - unutarnji prijelazni koeficijent ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

a u području toplinskog mosta:

$$v_i' = t_i - [k_{TM} \cdot (t_i - t_e)] / \alpha_i \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

v_i' - unutarnja plošna temperatura u području toplinskog mosta ($^\circ\text{C}$)

k_{TM} - koeficijent prolaska topline kroz toplinski most ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

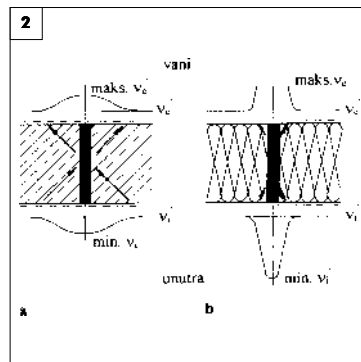
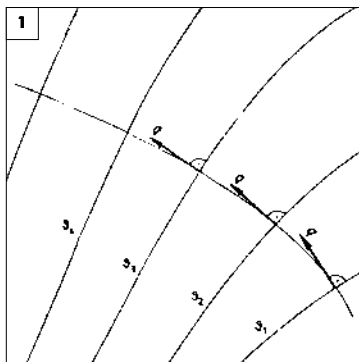
Na osnovi tako izračunanih unutarnjih plošnih temperatura, uz nepromijenjene klimatske uvjete unutra i vani, na toplinskim će mostovima unutarnja plošna temperatura najčešće biti niža.

Na slici 1. prikazan je smjer kretanja toplinskog toka u odnosu prema izvodnicama jednake temperature. Toplinski je tok okomit na njih, čime se određuje da smjer raspršivanja topline ovisi o

SL. 1. Izvodnice jednakih temperatura v_1, \dots, v_n u nekom materijalu u smjeru padanja temperature pri gustoći toplinskog toka q

Izvor • Source
Lutz, ... 1997: 126.

FG. 1. Isothermal lines v_1, \dots, v_n in a material in the direction of decreasing temperature at heat flow density q .



SL. 2. Konstrukcijski toplinski most:
a) prodor metalnog elementa u beton,
b) prodor metalnog elementa u toplinsko-izolacijski materijal

Izvor • Source
Mainka, Paschen 1986: 35/1.

FG. 2. Structural thermal bridge:
a) penetration of metal element in concrete,
b) penetration of metal element in thermal insulation material.

kretanju linija jednakih temperatura unutar presjeka konstrukcije.⁴ Raspodjela linija jednakih temperatura unutar presjeka konstrukcije izravno ovisi o tehničkom rješenju spojeva konstrukcija i o materijalima od kojih su načinjene.

Toplinskim mostom ne nazivamo samo spojeve različitih konstrukcija ili prodore materijala veće vodljivosti topline u nekom materijalu iznimno visoke toplinskoizolacijske kvalitete, zbog čega vrijednost koeficijenta prolaska kroz toplinski most k_{TM} postaje viša (nepovoljnija). Toplinskim se mostovima trebaju nazivati i oni konstrukcijski spojevi koji, mijenjajući oblik ali ne i sastav, rezultiraju povišenom toplinskom propusnošću unutar konstrukcije promijenjenoga geometrijskog oblika. Također je potrebno poznavati izvedbeno-ugradbene odnose pojedinih elemenata zgrade koji zbog tehničke izvedbe ili nemara pri izvedbi mogu stvoriti toplinski most.

Ovisno o uzroku povišene toplinske propusnosti, toplinski se mostovi mogu podijeliti na sljedeće vrste⁵:

- *konstrukcijski toplinski mostovi*, s promjenom toplinske propusnosti unutar konstrukcije
- *geometrijski toplinski mostovi*, s povećanjem plohe za preuzimanje ili odavanje topline
- *konvektivni toplinski mostovi*, kroz koje se topline prenosi strujanjem zbog propusnosti reški
- *toplinski mostovi uvjetovani okolinom*, s različitom plošnom temperaturom elemenata u prostoriji.

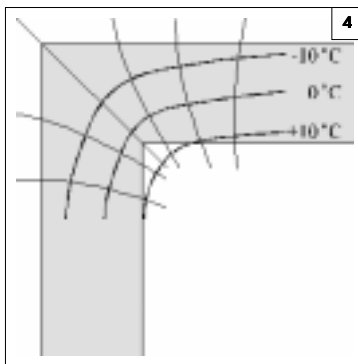
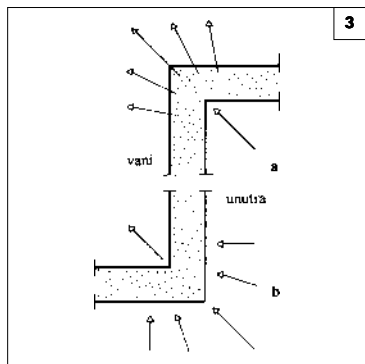
2.1. Konstrukcijski toplinski mostovi / Constructive Thermal Bridges

Ti su toplinski mostovi uvjetovani različitošću materijala pojedinih konstrukcijih dijelova. U praksi su to toplinski mostovi nastali kao posljedica izvedbe stupa ili serklaža u zidanoj konstrukciji, spojevi zidanih zidova pročelja s međukatnim konstrukcijama, prekidi toplinskoizolacijskih materijala radi konstrukcijskog povezivanja i sl. U tim je slučajevima gustoća toplinskog toka u pojedinim dijelovima konstrukcije različita, izvodnice jednakih temperatura nisu više paralelne s graničnim ploham konstrukcije, te se uspostavlja poprečno vođenje topline i raspršuje se toplinski tok. Širina raspršivanja toplinskog toka, a time i širina područja unutarnje plohe s nižim temperaturama te jačina temperaturnog opadanja, ovisi o vrsti materijala koji se međusobno dodiruju⁶. Kao primjer navodi se ponašanje toplinskog mosta pri prodoru metalnog elementa u beton kao dobar vodič topline i u toplinsku izolaciju kao loš vodič topline (sl. 2).

4 Eichler, 1976.

5 Liersch, 1993.

6 Mainka, Paschen, 1986.



SL. 3. Geometrijski toplinski mostovi:

- a) oštri kut,
b) tupi kut

Izvor • Source

Eichler, 1976: 435.

FG. 3. Geometrical

thermal bridges:

- a) "acute" angle,
b) "obtuse" angle

SL. 4. Izvodnice jednakih temperatura ugla zidova

Izvor • Source

Bertol-Vrček, 1994: 129-134.

FG. 4. Isothermal lines of wall corners

Betonski materijal pomaže raspršivanju topline, a posljedica toga je šire područje niže plošne temperature, a time i umjerenija kritična unutarnja plošna temperatura. Za razliku od betonskoga, toplinskoizolacijski materijal sprječava šire djelovanje toplinskog mosta, a kritična plošna temperatura u području toplinskog mosta zbog toga je mnogo izrazitija.

2.2. Geometrijski toplinski mostovi / Geometrical Thermal Bridges

Geometrijski toplinski mostovi nastaju zbog promjene oblika istovrsne konstrukcije. Kao najčešći geometrijski toplinski most može se navesti ugao zidanog zida, bez vertikalnog serklaža. U uvjetima normizacije u našim potresnim podnebljima takav je oblik geometrijskog mosta danas u našim novogradnjama vrlo rijedak, a nalazimo ga u nižim potresnim zonama i na nenosivim vanjskim zidanim ispunama u zgradama s armiranobetonskom nosivom konstrukcijom te na svim starijim zgradama.

Djelovanje geometrijskoga toplinskog mosta temelji se na divergenciji toplinskog toka, čemu je uzrok povećanje vanjske konstrukcijske plohe kroz koju se gubi toplina.

Na oštrim uglovima⁷ zgrade rasipa se struja topline, jer je vanjska površina veća od unutarnje, te će unutarnja plošna temperatura ugla uvijek biti nekoliko stupnjeva niža od unutarnje plošne temperature neprekinute konstrukcije. To u uvjetima veće vlažnosti zraka prostorije, kao i veće razlike između temperature prostorije i vanjskog zraka, može prouzročiti orošavanje unutarnje plohe uglova, a time i pojavu plijesni. Plošna će temperatura početi padati na određenoj udaljenosti od kuta⁸, koja ovisi o toplinskoizolacijskim vrijednostima materijala konstrukcija, koncepciji rješenja spoja, debljini konstrukcija, kretanju zraka uz unutarnje plohe te o razlici između unutrašnje i vanjske temperature.

Nasuprot oštrom uglu, tupi ugao zbog međusobnog strujanja topline ima višu unutarnju plošnu temperaturu od unutarnje plošne temperature neprekinutog dijela konstrukcije, što nije problem.

Rješavanje problema niže plošne temperature na uglovima može se postići različitim tehničkim zahvatima koji se baziraju na uklanjanju uzroka niže plošne temperature⁹.

Prva je mogućnost služenje izvodnicama jednakih temperatura na uglu za oblikovanje unutarnjeg dijela oštrog ugla jačim zaobljenjem. Time se postiže veća ploha unutarnjeg dijela toplinskog mosta, zbog čega se unutarnja plošna temperatura zadržava na određenoj

7 Oštri kut se u literaturi spominje i pod nazivom *pozitivni kut*, a tupi kut kao *negativni kut*.

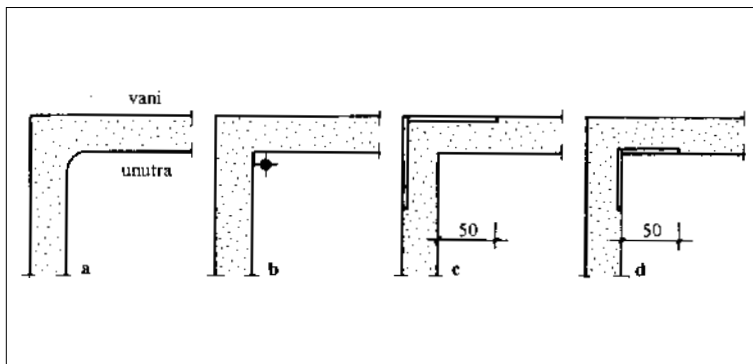
8 Plošna temperatura neprekinutog dijela konstrukcije počinje padati prema uglu konstrukcija, na udaljenosti 25 do 40 (50) cm od unutarnjeg kuta (udaljenost ovisi o vrsti i tehničkoj koncepciji spoja). U samom kutu vrijednost temperature najčešće je najniža, a ako se spusti ispod točke rosišta, nastaje plošna kondenzacija.

9 Eichler, 1976.

SL. 5. Rješenja za postizanje više unutarnje plošne temperature ugla:
 a) zaobljenje unutar kuta
 b) smještaj izvora topline u kutu (cijev centralnoga grijanja)
 c) toplinska izolacija s vanjske strane
 d) toplinska izolacija s unutarnje strane

Crtež • Drawing by Bertol-Vrček, prema: Eichler 1976: 435.

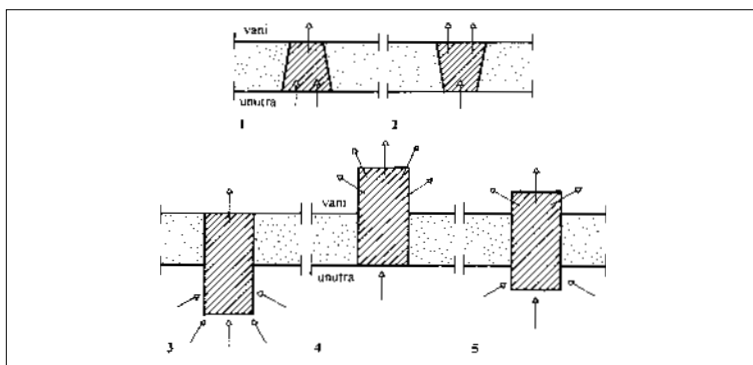
FIG. 5. Solutions for achieving higher internal surface temperature in corners
 a) curving the internal corner
 b) placing a heat source in the corner (central heating pipe)
 c) external thermal insulation
 d) internal thermal insulation



SL. 6. Konstrukcijsko-geometrijski toplinski mostovi

Crtež • Drawing by Bertol-Vrček, prema: Eichler, 1976: 427-428.

FIG. 6. Structural-geometrical thermal bridges



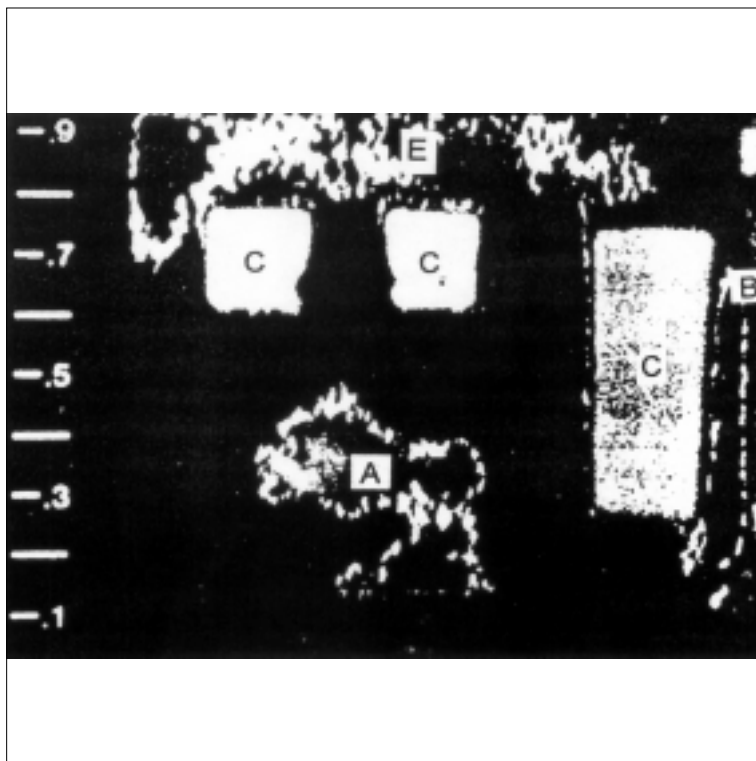
razini na cijelom području toplinskog mosta. Druga je mogućnost postavljanje izvora topline (npr. cijevi centralnog grijanja) u sam kut. Posljedak takve izvedbe unutarnjeg dijela ugla jest postizanje više unutarnje plošne temperature zbog zagrijavanja te smanjenje vlažnosti zraka u tom području zbog sušenja zraka. Ti su načini izvedbe nepraktični glede upotrebe prostora. Treća je mogućnost dodatna toplinska izolacija u duljini od približno 50 cm s unutarnje ili s vanjske strane ugla. Pri tom načinu izvedbena je zapreka ugradnja ploča za toplinsku izolaciju u zidanu konstrukciju, a estetska je zapreka vidljivost ojačanja ugla.

2.3. Konstrukcijsko-geometrijski oblici toplinskih mostova / Constructive-Geometrical Forms of Thermal Bridges

U praksi se češće nailazi na kombinaciju konstrukcijsko-geometrijskih toplinskih mostova na mjestima gdje se pojavljuju konstrukcijski spojevi od različitog materijala, uz promjenu geometrije. To su spojevi istaknutih armiranobetonskih stupova sa zidanim zidovima, te uglovi, sudari i križanja konstrukcija od različitog materijala. Kod njih se osim promjene materijala povećava ili smanjuje vanjska ploha toplinskog mosta u odnosu prema unutarnjoj plohi. Povoljnija je manja vanjska ploha, pri čemu će gubici topline biti manji, a unutarnja plošna temperatura viša.

2.4. Konvektivni toplinski mostovi / Convective Thermal Bridges

Posljedica konvektivnih toplinskih mostova je povećan gubitak topline zbog ventilacije unutarnjeg prostora ili propusnosti kroz nezabrtvljene dijelove zgrade. Oni se obrađuju u sklopu iznalaženja



SL. 7. Termografska snimka dijela pročelja jedne zgrade s područjima povećanih gubitaka topline (A - niša za grijaće tijelo, B - cijev grijanja, C - prozori-vrata, E - betonski nadvoj)

Izvor • Source
Memmen...1980: 162.

FG. 7. Thermographic survey of part of the façade of a building with areas of increased heat loss (A - niche for heat source, B - heating pipe, C - windows -doors, E - concrete lintel)

ventilacijskih gubitaka topline. Praktično se mogu ustanoviti i građevinskom termografijom¹⁰.

Građevinska termografija idealna je za kontrolu kvalitete i otkrivanje građevnih pogrešaka. Snimanje se može obavljati izvana ili iznutra, a najbolji se rezultati dobivaju snimanjem iznutra, koje nije ovisno o vremenu. Osobito je važno napomenuti da se termografijom ne otkriva uzrok toplinskoga gubitka, tj. ne može se ustanoviti je li on nastao zbog izlaska topline kroz pukotinu u gradnji ili zbog izvora topline.

2.5. Toplinski mostovi uvjetovani okolinom / Environmentally Induced Thermal Bridges

Toplinski mostovi uvjetovani okolinom jesu oni koji imaju povećan gubitak topline zbog povišene temperature okoline, npr. u nišama za grijaća tijela.

Niše za grijaća tijela kao toplinski mostovi najbolje se uočavaju na termografskim snimkama pročelja. Za sprječavanje povećanog gubitka topline kroz vanjsku konstrukciju potrebno ju je dovesti do određene minimalne toplinskozaštitne razine da bi se što više topline zadržalo u unutarnjem prostoru. Prema njemačkom pravilniku o toplinskoj zaštiti zgrada¹¹, zid niše za grijaće tijelo (vrlo je često tanji od ostalih vanjskih zidova) ne smije imati lošije toplinskoizolacijske vrijednosti od ostalog dijela vanjske konstrukcije. Ako se grijaće tijelo nalazi ispred ostakljene stijene, ona mora imati niski koeficijent prolaska topline ($k_{pr} \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$), a od izvora topline treba biti zaštićena oblogom određene vrijednosti toplinskoizolacijske zaštite ($k_{obloge} \leq 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$).

¹⁰ Građevinska termografija ima ograničenu primjenu jer ovisi o klimatskim uvjetima. Može se primijeniti samo zimi, u uvjetima u kojima praktički nema kolebanja unutarne i vanjske temperature zbog vremenskog trajanja snimanja (temperaturne razlike unutarnjeg i vanjskog zraka iznose barem $10 \text{ }^\circ\text{C}$), najbolje noću (bez ikakva Sunčeva zračenja, a eventualno danju, u ranim jutarnjim satima ili pri gustoj magli), bez vjetrova (do 2 m/s), te zbog velikih troškova samo za veće zgrade.

¹¹ *Wärmeschutz bei Gebäuden*, 1994.

Konvektivni toplinski mostovi i oni uvjetovani okolinom ne nastaju zbog povećanih toplinskih gubitaka prouzročenih materijalom i oblikom građevne konstrukcije, te se ne razmatraju u analizama transmisivskih gubitaka topline.

3. Unutarnja plošna temperatura / Internal Surface Temperature

3.1. Čimbenici određivanja unutarnje plošne temperature / Factors for Determining Internal Surface Temperature

Prema izrazima (1) i (2), ovisno o području konstrukcije koje se promatra, unutarnja plošna temperatura ovisi o:

- koeficijentu prolaska topline k promatranog dijela konstrukcije
- temperaturama prostora unutra i vani
- koeficijentu prijelaza topline α_i u unutarnjem prostoru.

Budući da je vrijednost koeficijenta prolaska topline toplinskog mosta k_{TM} najčešće veća od vrijednosti k neprekinute konstrukcije (bez toplinskog mosta), na unutarnjoj je plohi toplinskog mosta temperatura niža negoli na ostalom dijelu konstrukcije. U nekim slučajevima taj je odnos obratan, a unutarnja je plošna temperatura ipak niža. Tada je to posljedak jakih poprečnih komponenata toplinskog toka, zbog čega su gubici topline povećani. Unutarnja plošna temperatura bit će to niža što je razlika temperature između unutarnjega i vanjskog prostora veća, te što je niži koeficijent prijelaza topline α_i .

Koeficijent prijelaza topline α_i ovisi o pokretljivosti zraka uz unutrašnju konstrukcijsku plohu, a različit je ovisno o smjeru kretanja topline. Njegova je vrijednost prema našim normativima:

- za vodoravni i uzlazni smjer
 $\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (otpor prijelazu topline $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$)
- za silazni smjer
 $\alpha_i = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (otpor prijelazu topline $R_i = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$).

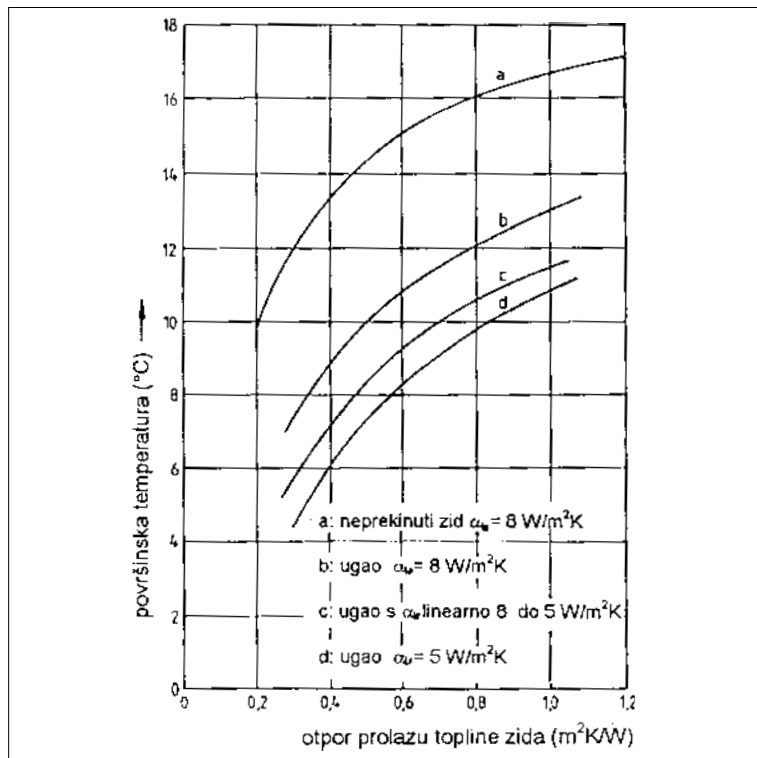
Međutim, za geometrijske i konstrukcijske toplinske mostove vrijednost α_i je manja zbog slabije pokretljivosti zraka u uglovima. Veličina te vrijednosti ovisi o obliku i položaju toplinskog mosta, a u europskoj proračunskoj praksi iskristalizirale su se neke srednje vrijednosti koje se preporučuju za zidove u unutarnjem prostoru¹²:

- za neprekinute ravne plohe $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- dvodimenzionalni ugao
(npr. ugao zidova) $R_i = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($\alpha_i = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- trodimenzionalni ugao
(npr. ugao dvaju zidova i krova) $R_i = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($\alpha_i = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- iza namještaja i nepropusnih
zastora, sa 5-10 cm
međurazmaka $R_i = 0,40 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($\alpha_i = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

3.2. Niže unutarnje plošne temperature pojedinih toplinskih mostova / Lower Internal Surface Temperature of Some Thermal Bridges

Ovisno o obliku toplinskog mosta, rješenju toplinske zaštite tog mosta te obilježjima vrste materijala, debljine konstrukcija i širini toplinskog mosta, na unutarnjoj plohi toplinskog mosta bit će na nekome mjestu najniža temperatura.

¹² Balkowski, 1998.



SL. 8. Plošne temperature unutarnje plohe vanjskog zida, uz različite koeficijente prijelaza topline α_i u ovisnosti o otporu zida prolasku topline (temperatura unutarnjeg prostora je $+20\text{ }^\circ\text{C}$, a vanjska temperatura $-10\text{ }^\circ\text{C}$).

Izvor • Source
Lutz,... 1997: 234.

FG. 8. Surface temperatures of inner surface of external wall under different coefficients of heat transmission α_i depending on wall resistance to heat flow (internal temperature $+20\text{ }^\circ\text{C}$, external temperature $-10\text{ }^\circ\text{C}$).

Istraživanje unutarnjih plošnih temperatura u kritičnim točkama provedeno je na temelju vrijednosti prikazanih u katalogu¹³, a izabrani su primjeri koji slijedom oblika toplinskog mosta i koncepcije toplinske zaštite mogu činiti model. Izabrani su uzorci u zidanoj konstrukciji od špilje blok-cigle i cigle normalnog formata. Crteži pojedinih toplinskih mostova u tehničko-izvedbenom prikazu u potpunosti odgovaraju onima koji su ispitivani i proračunavani te prikazani u katalogu.

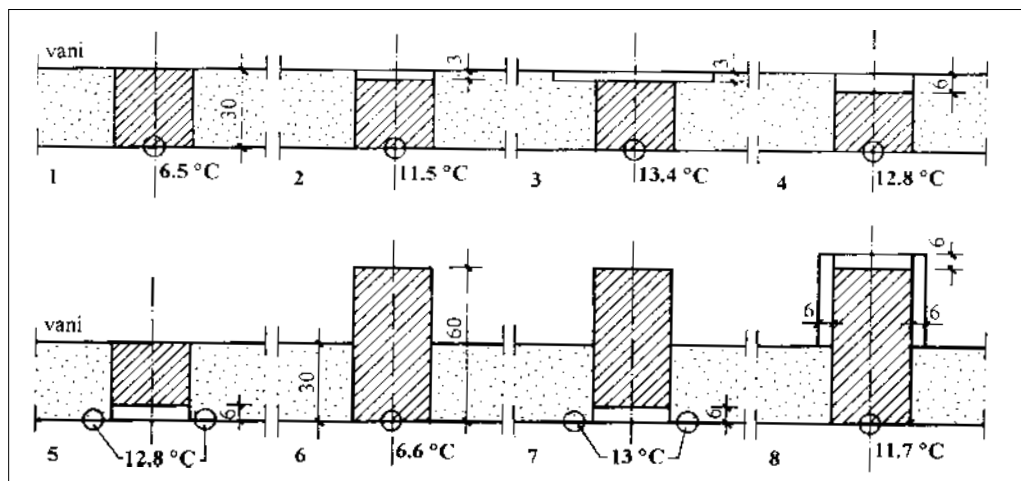
Mjesto kritične plošne temperature ovisi o položaju toplinske izolacije. U primjerima kao na slici 9. kritična se plošna temperatura nalazi u osovini toplinskog mosta ako je toplinska izolacija s vanjske strane, kao i kad je nema, a ako je toplinska izolacija s unutarnje strane, kritična je plošna temperatura dislocirana od toplinskog mosta i nalazi se s obje strane toplinskog mosta u dijelu zidane konstrukcije (sl. 9: 5,7).

Unutarnje su plošne temperature najniže na toplinski neizoliranim spojevima i znatno su ispod točke orošavanja¹⁴. Tanja vanjska toplinska izolacija (3 cm) u širini toplinskog mosta ne daje još zadovoljavajuću plošnu temperaturu, a ako se izvede u većoj širini od širine toplinskog mosta može se postići vrijednost iznad točke orošavanja. Položaj toplinske izolacije (iznutra ili izvana) nije bitan za konstrukcijske toplinske mostove (sl. 9: 4,5), dok pri konstrukcijsko-geometrijskima vanjska povećana ploha djeluje na sniženje unutarnje plošne temperature (sl. 9: 7,8).

Najnepovoljniji toplinski most spoj je vanjskog zida s krovom i pri njemu se, prema primjerima iz slike 10: 1-5, u kritičnoj točki ne postiže unutarnja plošna temperatura iznad točke orošavanja te u

¹³ Mainka, Paschen, 1986.

¹⁴ Točka rosišta ovisi o unutarnjoj temperaturi i vlažnosti zraka. U uvjetima unutarnje temperature od $+20\text{ }^\circ\text{C}$ i 60%-tne relativne vlažnosti zraka prostorije točka orošavanja je $+12\text{ }^\circ\text{C}$.



Sl. 9. Najniže plošne temperature toplinskih mostova (armiranobetonski stup u zidanom zidu)

Crtež • Drawing by Bertol-Vrček, prema: Mainka, ...1986: 216-224.

FG. 9. Lowest surface temperatures of thermal bridges (reinforced concrete pillar in masonry wall)

tim primjerima treba računati s orošavanjem. Te spojeve treba projektirati s većim debljinama toplinske izolacije koju treba kontinuirano prevući preko spoja. Povoljniji su spojevi vanjskog zida i međukatne konstrukcije, dok za balkonske istake međukatne konstrukcije treba težiti prekidu toplinskog mosta.

U odnosu prema vrsti materijala povoljniji su toplinski spojevi u zidanim konstrukcijama izvedenim od šuplje blok-cigle. Uz jednake debljine zidova, u uglu zida od šuplje blok-cigle mnogo je viša unutarnja plošna temperatura negoli u uglu zidova od cigle normalnog formata, ali je još uvijek ispod točke rosišta (sl. 10: 13,14). Uglovi zidanih zidova zadovoljavaju samo uz kontinuirano oblaganje zida toplinskom izolacijom dovoljnoga toplinskog otpora.

Zadovoljavajuća unutarnja plošna temperatura mora se postići dovoljnim toplinskim otporom vanjske konstrukcije. Taj toplinski otpor treba biti odgovarajuće veličine, ovisno o:

- obliku konstrukcije (neprekinuta konstrukcija, toplinski most, oblik toplinskog mosta),
- različiti temperature unutarnjega i vanjskog zraka
- relativnoj vlažnosti prostorije.

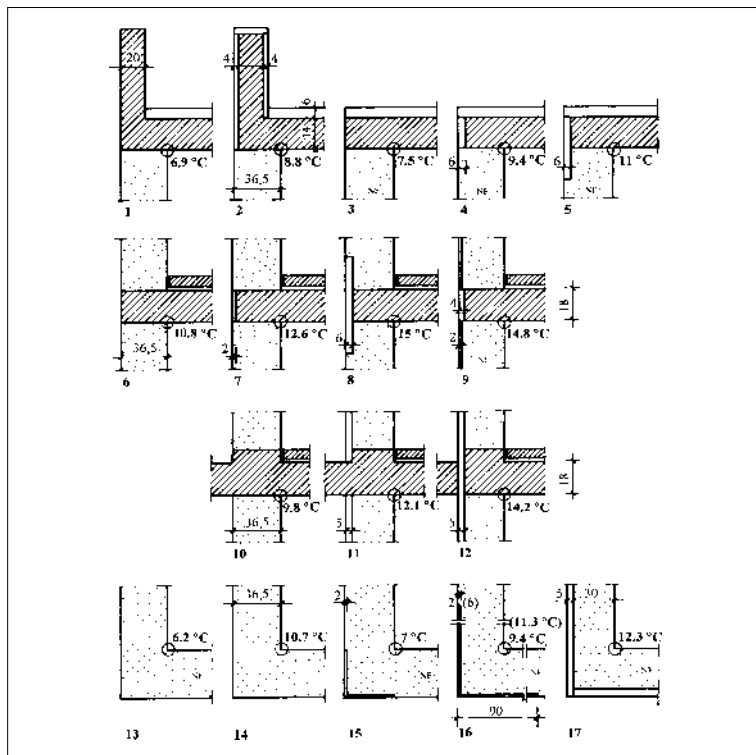
4. Posljedice niže unutarnje plošne temperature / Consequences of Lower Internal Surface Temperature

Temperatura na unutarnjoj plohi vanjske konstrukcije bit će niža od temperature zraka prostorije. U području toplinskih mostova unutarnja će plošna temperatura biti još niža te je potrebno utvrditi je li kritična, tj. je li niža od točke orošavanja. Moguće su ove posljedice:

- ako je plošna temperatura niža od točke rosišta, zbiva se plošna kondenzacija sa svim svojim negativnim posljedicama (pojava mikroorganizama)
- ako plošna temperatura nije niža od točke orošavanja, pojačano se taloži prašina.

Pojava mikroorganizama na unutarnjim plohama vanjskih konstrukcija znači stvaranje plijesni¹⁵, za što je potrebna povećana vlažnost unutarnje plohe vanjske konstrukcije tijekom duljeg vremena ili kratkotrajna plošna kondenzacija, uz zadržavanje vlage. Posljedica

¹⁵ Plijesni, koje se pojavljuju na unutarnjoj plohi vanjskih konstrukcija, pripadaju ponajprije vrsti *Penicillium* i *Aspergillus*, a nastaju i preživljavaju u okolnostima vlažne plohe ili materijala, temperature od +15 do +50 °C, na podlogama s proteinima kojih ima u građevnom materijalu, naslagama prašine ili u zraku. Spora (rasplodnih stanica) gljivica u zraku ima u velikim količinama (oko 10³ do 10⁶ spora/m³ zraka), te se talože na plohe zidova gdje čekaju povoljne uvjete (hranu i vlagu). Vrijeme inkubacije za nastanak temeljne strukture gljivica iznosi oko jedan tjedan.



SL. 10. Najniže plošne temperature toplinskih mostova u zidanim konstrukcijama:
 - 1-5 spoj vanjskog zida i krova
 - 6-9 spoj vanjskog zida i međukatne konstrukcije
 - 10-12 spoj vanjskog zida i međukatne konstrukcije s balkonom
 - 13-17 ugao vanjskoga zidanog zida

Crtež • Drawing by Bertol-Vrček, prema: Mainka, ... 1986: 85-95, 107-109, 168, 175, 183-205.

FG. 10. Lowest surface temperatures of thermal bridges in masonry structures
 - 1-5 bond of external wall and roof
 - 6-9 bond between external wall and inter-story structure
 - 10-12 bond between external wall and inter-story structure with balcony
 - 13-17 corner of external masonry wall

te pojave su sive, smeđe ili crne mrlje, a najčešće se pojavljuju u kutovima zidova, u kutovima na spoju zidova s međukatnom i, posebice, s krovnom konstrukcijom, uz prozore, te u podnožjima zidova. Najčešće vrijeme nastanka plijesni je zima i proljeće, kada su unutarnje temperature i vlažnost zraka visoki.

Tu pojavu treba spriječiti ne samo zbog estetskih razloga, već i zbog higijenskih, jer spore plijesni (rasplodne stanice) mogu prouzročiti alergijske bolesti stanara. Valja napomenuti da ta pojava nije uvijek samo posljedica toplinskih mostova, već je uvjetovana i ponašanjem korisnika (načinom grijanja, stupnjem temperature i vlažnosti zraka prostorije, ritmom provjetravanja i sl.). Uvjetovana je i nepovoljnim projektom prostorije (mali prozori uz velike dubine prostorije i bez mogućnosti prozračivanja kutova prostorije).

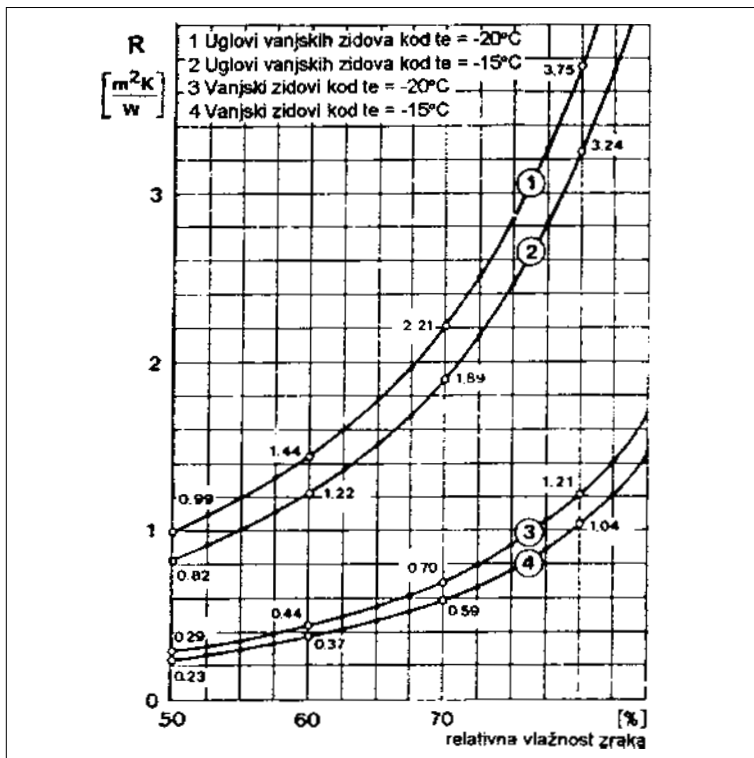
Pojava plijesni u posljednjem se desetljeću znatno pojačala. Pritom se smatra da su uzrok tomu suviše zabrtvljeni prozori, "nedišuća" toplinska izolacija ili nepropusni slojevi vanjskih konstrukcija. Pojava plijesni zapravo je posljedica fizikalnog zbivanja, pogreške pri gradnji ili zbog neodgovarajuće upotrebe prostorija.

Pri manje izrazitim toplinskim mostovima na kojima nije prekoračena točka orošavanja, nema ni štete zbog orošavanja unutarnje plohe vanjske konstrukcije. Međutim, kako je na toplinskome mostu plošna temperatura niža, a relativna vlažnost okolnog zraka u tom području zbog toga viša, površinski slojevi konstrukcije preuzimaju vodenu paru iz zraka. Zbog električnog izmjeničnog djelovanja između čestica vode i prašine koje se uzajamno privlače na području toplinskog mosta jače se taloži prašina, a posljedica toga je ploha tamnija od ostalog dijela zida.

SL. 11. Minimalne vrijednosti otpora vanjskih konstrukcija prolasku topline radi postizanja zadovoljavajuće plošne temperature u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka

Izvor • Source
Schield ..., 1982: 38.

FG. 11. Minimum values of external structures heat flow resistance for achieving satisfactory surface temperatures depending on relative air humidity



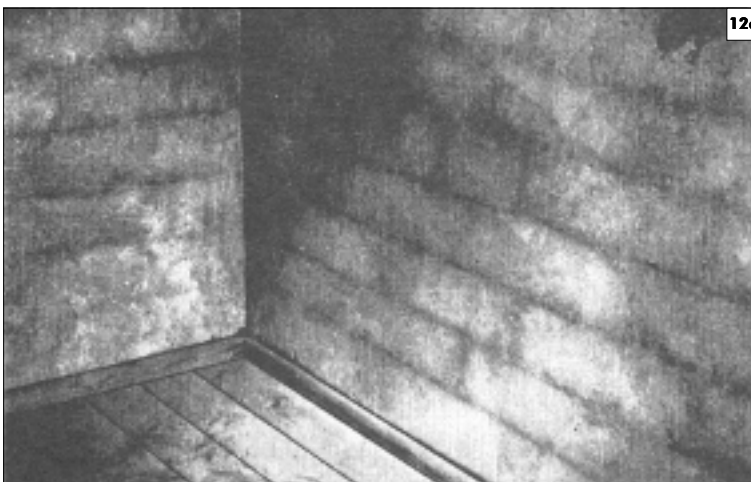
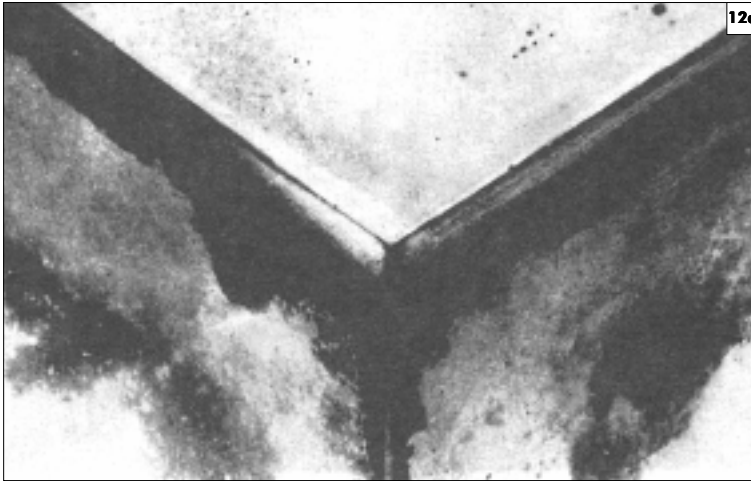
Taloženje prašine na plohama toplinskih mostova ne smatra se pogreškom u građenju, jer se ne može spriječiti niža plošna temperatura toplinskih mostova. Redovitim održavanjem prostora (ličenjem) ti se nedostaci ublažuju.

5. Zaključak / Conclusion

Toplinski su mostovi mjesta u konstrukciji vanjskog plašta zgrade kojima se treba pridati iznimna pozornost. Posljedice djelovanja toplinskih mostova nisu uočene tek danas, poznate su i otprije, kada, zbog slabijeg zagrijavanja prostorija i veće propusnosti ugrađenih elemenata građevine nisu bile toliko očite. Poboľšanjem životnog standarda i razvojem tehnologije građenja mijenjaju se unutarnji klimatski uvjeti (viša temperatura i vlažnost zraka), što zahtijeva i nov pristup rješavanju toplinskih mostova i promjenu uobičajene upotrebe prostora. To se očituje u potrebi za boljom toplinskom izolacijom konstrukcijskih spojeva i kontrolom vlažnosti prostorije.

U vanjskim konstrukcijama izgrađenim od novih visokokvalitetnih toplinskoizolirajućih materijala prodor kroz materijal slabijih toplinskoizolacijskih svojstava rezultira jaćim padom unutarnje plošne temperature na kritiĉnim mjestima, što često uzrokuje orošavanje unutarnje plohe i stvaranje plijesni.

Taj je problem posebice velik pri graĉevinskim sanacijama starih zgrada. Ako uz promijenjene unutarnje klimatske uvjete (uvoĉenje centralnoga grijanja, bolje brtvljenje prozora i sl.) nije postignuta i dovoljna toplinskozaštitna razina vanjskih konstrukcija i spojeva, može se oĉekivati unutarnja plošna temperatura na nekim toplinskim mostovima ispod toĉke rosišta.



SL. 12. Posljedice rošenja unutarnjih ploha toplinskih mostova

- a) trodimenzionalni ugao - spoj zidova s međukatnom konstrukcijom (gornja zona)
- b) trodimenzionalni ugao - spoj zidova s međukatnom konstrukcijom (donja zona)
- c) vidljiv raspored reški zida (toplinski mostovi zbog morta) nakon razdoblja plošne kondenzacije

Izvor • Source
Gösele, Schüle, 1979:
275, 278.

FG. 12. Consequences of moisture on the inner surfaces of thermal bridges

- a) three-dimensional corner - bond of walls with inter-story structure (upper zone)
- b) three-dimensional corner - bond of walls with inter-story structure (bottom zone)
- c) visible distribution of gaps in the wall (thermal bridges due to plaster) after period of surface condensation

Literatura • Bibliography

I. Knjige / Books

1. **Eichler, F.** (1976), *Bauphysikalische Entwurfslehre 1, 2*, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
2. **Gösele, K., Schüle W.**, (1979), *Schall - Wärme - Feuchte*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin
3. **Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold** (1997), *Lehrbuch der Bauphysik, Schall, Wärme, Feuchte, Brand, Klima*, B.G.Teubner, Stuttgart
4. **Mainka, G-W., Paschen, H.** (1986), *Wärmebrückenatlas, Tafeln mit Temperaturverläufen, Isothermen und Angaben über zusätzliche Wärmeverluste*, B.G. Teubner, Stuttgart

II. Članci / Articles

1. **Balkowski, F. D.** (1998), *Die Ursachenermittlung von Kondensation in Raumecken*, DBZ 2/98: 101-104, Gütersloh
2. **Bertol-Vrček, J.** (1994), *Čimbenici veličine povećanja srednjeg koeficijenta prolaza topline građevine*, Zbornik međunarodnog stručno-znanstvenog simpozija "Uvjeti kvalitetne izgradnje hrvatskih regija - energija, građenje, istraživanje, propisi": 129-134, Zagreb
3. **Debartoli, Z.** (1997), *Niskoenergetske kuće*, predavanje na ZV-u, Zagreb (u sklopu seminara TEL-MINERALWOLLE iz Austrije)
4. **Liersch, K. W.** (1993), *Wohnausbau - Raumecken und Schimmelpilz-bildung, Auswirkung geometrischer Wärmebrücken im Mauerwerksbau unter Berücksichtigung der Schimmelpilz-problematik*, DBZ 4/93: 627-632, Gütersloh
5. **Memmen, A., Specht, H.** (1980), *Bericht über die thermografische Durchmusterung von Gebäuden - 1978/1979/1980*, Bauphysik, 5/80: 162-166, Berlin
6. **Schild, Casselmann, Dalmen, Pohlenz**, (1982), *Bauphysik, Planung und Anwendung*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig

III. Normativi / Standards

1. (1987), **HRN UJ5.600**, *Toplinska tehnika u građevinarstvu - Tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada*, Državni zavod za normizaciju, Zagreb
2. (1995), **ISO/DIS 10211-2**, **Draft International Standards**, *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Part 2: Calculation of linear thermal bridges*, CEN/TC 89 N 395 E rev., International Organization for Standardization, Geneva (1997. PrEN ISO)
3. (1995), **ISO 10211-1**, **International Standard**, *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Part 1: General calculation methods*, International Organization for Standardization, Geneva
4. (1994), **Wärmeschutz bei Gebäuden**, Bundesministerium für Wirtschaft, Bonn

Summary • Sažetak**Thermal Bridge Internal Surface Temperature**

The level of thermal protection on building exteriors is expressed in values of heat flow coefficient k of particular parts of the building exterior. In today's construction a very high level of thermal protection is achieved, much higher than that demanded by regulations. Worldwide builders are aspiring to achieve low-energy construction with a high level of thermal insulation, so as to decrease fuel consumption and increase environmental protection.

High thermal protection demands a special attitude to construction details and a special approach to thermal protection at thermal bridges. Thermal bridges observed in analyses of transmission heat losses can be structural, geometrical and their combination.

The inner surface of the external structure has a somewhat lower temperature than the air temperature in the room, but in the area of the thermal bridge it is much lower. Calculations of surface temperature show that it depends on the heat flow coefficient of the observed part of the structure, on the difference between internal and external air temperature, and on the transmission coefficient α_i . Under conditions of identical construction and identical boundary temperature difference, lower surface temperature will depend directly on the transmission coefficient α_i , *i.e.* on air flow along the internal surface. The lowest surface temperature can be expected under conditions of least air flow, as in the case of two-dimensional and three-dimensional corners. Besides this, the technical features of the thermal bridge are also essential (shape, composition, the materials it is in contact with, etc.) and determine possible heat flow dispersion which leads to increased heat loss.

Critical points on the external building surface where lower surface temperatures are more pronounced are the thermal bridges that for certain reasons are not thermally insulated or do not have a sufficiently thick thermal insulation. If the internal surface temperature is below condensation point in such places, surface condensation of moisture takes place which results in mould. Mould appears in gray, brown or black patches that must be prevented not only for aesthetic reasons, but also for hygienic reasons because they can cause allergies in residents.

Thermal bridges should be shaped in such a way that their geometry does not to enable increased heat dispersion, and continuously thermally insulated without any breaks in thermal insulation. As for microclimatic conditions, internal temperature and relative air humidity can always be controlled so as not to exceed the value that enables surface condensation.

Jasenska Bertol-Vrček

Biografija • Biography

Dr. sc. **Jasenska Bertol-Vrček**, dipl. ing. arh., rođena je u Zagrebu 1947. Godine 1966. maturirala je na Građevinskoj tehničkoj školi, a 1971. diplomirala na Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu. Magistrirala je na FGZ-u 1987, a doktorirala je na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1999. Na radnome mjestu održava nastavnu, te obavlja stručnu i znanstvenoistraživačku djelatnost. Bavi se područjem fizike zgrade, a od 1993. ovlaštena je revidentica s područja uštede energije i toplinske zaštite. S referatima aktivno sudjeluje na stručnim i stručno-znanstvenim skupovima. U 1997/98. kao članica ekspertne skupine sudjeluje u izradi *Nacionalnoga energetskeg programa KUEN zgrada*.

Arch. Eng. **Jasenska Bertol-Vrček**, Ph.D. Born in Zagreb in 1947. Graduated from the Secondary School of Civil Engineering in 1966 and from the Faculty of Architecture in Zagreb in 1971. Won her MSc at the Faculty of Civil Engineering in 1987; Ph.D. at the Faculty of Architecture 1999. She teaches and engages in research work. She is engaged in the physical properties of buildings, and has since 1993 been authorised reviewer in the field of energy and thermal protection. She takes active part in and submits research papers at professional and research gatherings. In 1997/98 she was member of the expert team that drew up the *National Energy Programme of KUEN Buildings*.

PROSTOR

ISSN 1330-0652
CODEN PORREV
UDK • UDC 71/72
GOD. • VOL. 7(1999)
BR. • NO. 1(17)
STR. • PAG. 1-142
ZAGREB, 1999.
siječanj-lipanj • January-June