

ZÁVISLOST SMYKOVÉ PEVNOSTI ROZHŘANÍ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ NA ČASOVÉM ODSUPU VÝROBY VRSTEV

Michaela Jelínková, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
michaela.jelinkova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek je zaměřen na smykovou pevnost rozhraní dvouvrstevných cementových kompozitů, jejichž vrstvy byly vytvořeny s krátkým časovým odstupem. Rešeršní část stručně shrnuje aktuální poznatky k této problematice. Experimentální část pak doplňuje některá data, která v předchozí fázi chyběla, jako pevnost v tlaku a v tahu za ohybu materiálu používaného pro výrobu zkušebních těles a výsledky zkoušek ve smyku nové sady vzorků s rozhraním vyrobeným s časovým odstupem 5 minut. Následně jsou tyto výsledky porovnávány s předšlými a je analyzován vliv vystavení zvýšené teplotě na smykovou pevnost rozhraní a vliv časového odstavu výroby vrstev vzorků. Výsledky zkoušky ve smyku potvrdily, že zvýšená teplota má na pevnost rozhraní těles negativní vliv. Pokles smykové pevnosti byl prokázán také se zvyšujícím se časovým odstupem výroby vrstev za téměř každé teploty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cementový kompozit • smyková pevnost • rozhraní • zvýšená teplota • 3D tisk betonu

ABSTRACT

This paper focuses on the interfacial shear strength of two-layer cementitious composites whose layers were formed at short time intervals. The review section briefly summarizes the current knowledge on this subject. The experimental part then adds some data that were missing in the previous phase, such as the compressive and flexural tensile strength of the material used for the specimens and the results of shear tests on a new set of specimens with interfaces made with a time interval of 5 minutes. These results are then compared with the previous ones and the effect of exposure to elevated temperature on the shear strength of the interface and the effect of the time interval for producing the layers of specimens are analyzed. The shear test results confirmed that the elevated temperature has a negative effect on the interfacial strength of the bodies. A decrease in shear strength was also demonstrated with increasing layer production time at almost any temperature.

KEYWORDS

Cementitious composite • shear strength • interface • elevated temperature • 3D concrete printing

1. ÚVOD

Vzhledem k tomu, že se kompozitní materiály na bázi cementu již dlouhodobě hojně využívají ve stavebnictví, je vhodné jim věnovat zvýšenou pozornost. Nedostatkem jejich výroby je především malá automatizace. Řešení tohoto problému představuje 3D tisk betonu, který je prozatím ještě relativně mladou technologií, do budoucna by ale do betonového stavebnictví mohl přinést úsporu materiálu, času i potřebné pracovní síly. Během procesu 3D tisku metodou vytlačování vzniká mezi jednotlivými tištěnými filamenti rozhraní, jež lze dle Ma et al. (2021) považovat za nejslabší místo tištěných dílců.

Tento článek představuje pokračování již započatého experimentu a doplňuje některá chybějící data. V první části se zaměřuje na faktory, které ovlivňují pevnost rozhraní mezi 3D tištěnými vrstvami a způsoby jejího testování. Dále pak popisuje experiment, při kterém byly vyrobeny vzorky pro určení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu použitého betonu a tělesa s rozhraním vytvořeným s odstupem 5 minut, analyzuje působení teploty a časového odstavu výroby navazujících vrstev na pevnost rozhraní vzorků v porovnání se vzorky s rozhraním vytvořeným s odstupem 0 a 10 minut.

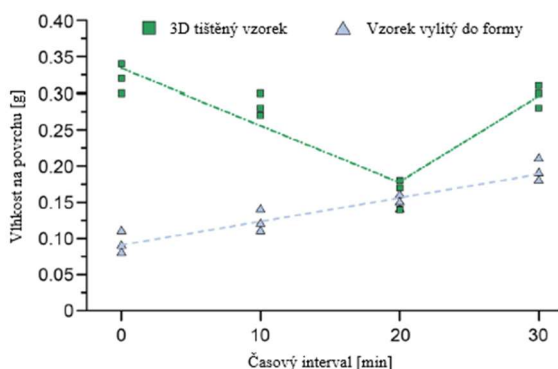
2. SOUHRN AKTUÁLNÍCH POZNATKŮ

2.1. Parametry ovlivňující pevnost rozhraní

Pevnost rozhraní vrstev betonu je ovlivněna několika klíčovými faktory, přičemž mezi nejdůležitější patří vlhkost a časový interval mezi ukládáním vrstev. Tyto dva parametry se zpravidla sledují současně, jelikož jsou na sobě závislé. Vlhkost povrchu spodní vrstvy před a během ukládání následujícího filamentu se mění v čase v závislosti na způsobu ukládání. V případě běžně prováděného lití betonu do bednění vlhkost povrchu v čase roste z důvodu tzv. krvácení betonu, při 3D tisku je ale průběh vlhkosti odlišný (obr. 1). Při 3D tisku

* Školitel: doc. Ing. Josef Novák, Ph.D.

betonu v prvních 20 minutách vlhkost klesá vzhledem ke specifickému uspořádání směsi v tiskové trysce, kdy je při povrchu filamentu tekutá část směsi usnadňující průchod tryskou. Tato část po vytištění postupně ztrácí vlhkost vlivem odpařování přebytečné vody z povrchu. Po uplynutí tohoto intervalu se směs začíná chovat podobně jako při běžné betonáži a dochází k postupnému zvyšování vlhkosti povrchu kvůli krvácení (Sanjayan et al. 2018). Dosavadní výzkumy naznačují, že vlhkost má rozhodující, ale ne vždy pozitivní vliv na pevnost rozhraní. Mírná vlhkost podporuje přilnavost, nadměrné množství vody však způsobuje pórovitost, která zmenšuje reálnou kontaktní plochu filamentů.



Obrázek 1: Průběh vlhkosti povrchu spodní vrstvy v čase

Významnou roli hraje složení betonové směsi, především vodní součinitel. Vyšší vodní součinitel zpravidla zvyšuje pevnost rozhraní (Keita et al. 2019). Při 3D tisku betonu se však musí brát ohled především na to, aby byl materiál dostatečně pevný tak, aby se jednotlivé vrstvy nehroutily a držely tvar i po vytištění vrstev navazujících, z čehož vyplývá omezení velikosti vodního součinitele. Velikost kameniva může rovněž ovlivnit pevnost díky takzvanému hmoždinkovému efektu působícímu na rozhraní (Xiao et al. 2014).

Dalším podstatným faktorem jsou okolní podmínky. Teplotní namáhání způsobující objemové změny cementových kompozitů a odpařování vody negativně ovlivňuje pevnost rozhraní.

V neposlední řadě jsou podstatné také parametry tisku. Výška tiskové trysky musí být optimální, aby nedocházelo k mačkání materiálu při malých výškách nebo naopak jeho padání při příliš velkém odstupu (Wolfs et al. 2019).

Existuje několik metod zlepšení pevnosti rozhraní. Prvním příkladem je nanášení pojiv jako jsou cementové zpevňovače, polymery a cementové pasty na povrch spodního filamentu (Weng et al. 2021). Další možností je vzájemné provázání vrstev inspirované systémem pero-drážka (Zareiyan et al. 2017), přičemž je nutné dbát na hloubku drážek, aby nedošlo k porušení materiálu. Vhodnou variantu představuje také výztuž procházející skrz rozhraní (Ma et al. 2021). U výztuže je třeba kontrolovat rozteč a tloušťku prutů.

Komplexní přístup zohledňující všechny uvedené faktory umožňuje optimalizovat pevnost rozhraní betonových vrstev.

2.2. Metodika testování

Pevnost rozhraní betonových vrstev lze testovat několika způsoby zaměřenými především na tah a smyk.

Nejčastější zkouškou je pull-off test neboli odtrhová zkouška (obr. 2A). Na vzorek se připevní kovové úchyty a následně se provede zářez v místě rozhraní. Těleso se poté umístí do lisu. Tento test však ne vždy poskytuje přesné výsledky kvůli možné excentricitě zatížení, případně kvůli porušení materiálu dříve, než dojde k porušení rozhraní.

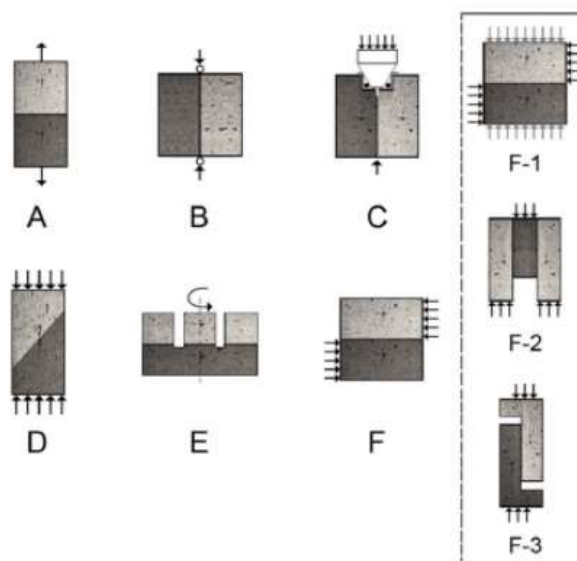
Další metodou je zkouška v příčném tahu (splitting test, obr. 2B), při kterém se tlakové zatížení aplikuje v místě rozhraní. Podobně funguje wedge splitting test (obr. 2C), který měří pevnost rozhraní pomocí parametrů lomové mechaniky.

Zkouška v šikmém smyku (obr. 2D) určuje pevnost rozhraní při zatížení kombinací smyku a tlaku na válcových vzorcích se šikmým rozhraním.

Zkouška v kroucení (obr. 2E, 2F) má množství modifikací a aplikuje síly paralelně s rozhraním, avšak vykazuje potíže s vyrovnáním zatížení a takto získané výsledky mohou být značně rozptýlené.

Vhodnou zkoušku může též představovat třibodová či čtyřbodová zkouška v tahu za ohybu, při kterých se zatížení vnáší na sledované rozhraní.

Výběr vhodné zkušební metody se odvíjí od skutečného zatížení betonového dílce. Kvůli prozatím nesjednoceným parametrům zkoušení nelze vždy výsledky spolehlivě porovnávat.



Obrázek 2: Zkušební metody [Zareiyan et al. 2017]

3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

3.1. Úvod

Experimentální část článku je zaměřena na smykovou pevnost vzorků, jejichž vrstvy byly vytvořeny s časovým odstupem 5 minut, a její porovnávání s daty získanými v první fázi experimentu pro tělesa s vrstvami vyrobenými s odstupem 0 a 10 minut.

Hotové prvky byly vystaveny čtyřem různým nejvyšším teplotám; 20°C, 100°C, 160°C a 220°C.

Kromě dvouvrstvých těles vytvořených za účelem získání smykové pevnosti rozhraní byly dále vyrobeny také referenční vzorky pro zjištění pevnosti materiálu v tlaku a v čtyřbodovém ohybu.

Materiál, způsob výroby a zkoušení byly určeny na základě provedené rešerše tak, aby tělesa s rozhraním co nejlépe napodobovala vzorky vytvořené metodou 3D tisku betonu.

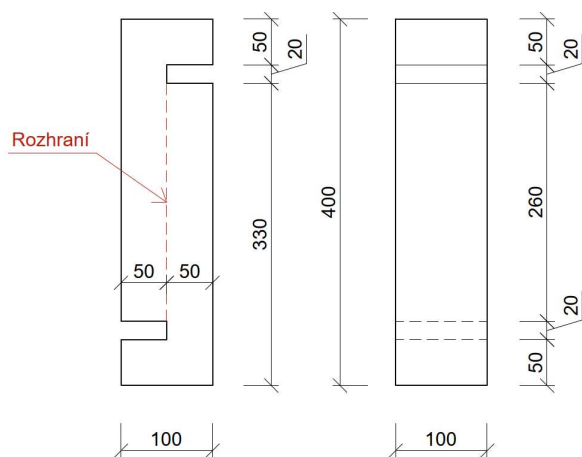
3.2. Složení materiálu

64% celkové hmotnosti tvořilo kamenivo frakcí 0-4 mm a 4-8 mm a jako pojivo byl zvolen portlandský cement Českomoravský cement 42,5 R. Dále byl přidán metakaolin Mefisto L05 kvůli zlepšení mechanických vlastností směsi. Voda byla dávkována tak, aby byl vodní součinitel roven 0,57. Do vody byl přimíchán urychlovač Betodur A5, který se užívá jako přísada urychlující tvrdnutí. Poslední složkou směsi byla polypropylenová vlákna do betonu a malt SikaFiber PPM-12. Ta se používají pro zvýšení trvanlivosti kompozit a snižují plastické smrštění a tvorbu trhlin při sedání materiálu. Snižují též jeho plastické sedání a propustnost.

3.3. Výroba vzorků

Prvním krokem byla příprava cementové směsi. Jednotlivé složky se navázily na digitální váze a poté byly postupně umísťovány do míchačky nejprve suché materiály, zhruba po minutě míchání se pak přidala voda s rozmíchaným urychlovačem.

Zatímco se směs míchala a poté 20 minut nechávala odstát, probíhala příprava forem. V této fázi experimentu byly použity 4 formy o rozměrech 150 mm x 150 mm x 150 mm a 16 forem s rozměry 400 mm x 100 mm x 100 mm. Pro výrobu vzorků tvaru Z (obr. 3) určených ke zkouškám rozhraní ve smyku bylo 12 forem speciálně upraveno tak, že se dovnitř pomocí PUR lepidla připevnily polystyrenové bloky 100 mm x 50 mm x 20 mm. Všechny formy se následně vymazaly kvůli usnadnění odbedňování a do upravených forem se umístil kovový plát velikosti 300 mm x 170 mm pro vytvoření rozhraní (jeho poloha je patrná z fotografie na obrázku 4). Při zacházení s plechem se dbalo především na to, aby nebyl znečištěn olejem či jinými látkami, které by mohly způsobit modifikaci přilnavosti vrstev.



Obrázek 3: Geometrie zkušebních těles

Po 20 minutách od přidání tekutých složek směsi se materiál v míchačce promíchal a začalo se s betonáží. Tento časový interval byl zvolen proto, že jde o optimální dobu pro začátek 3D tisku (Vespalec et al. 2020). Promíchání pak mělo simulovat proces, kdy během 3D tisku směs prochází extrudérem. Směsí z jedné míchačky se naplnily vždy 4 formy.

Tělesa pro zkoušky v tlaku a ohybu byla vyrobena standardním způsobem, kdy se směs postupně ukládala do forem a průběžně byla hutněna vpichy dřevěnou tyčí. Hotové vzorky byly zakryty fólií.

Betonáž vzorků s rozhraním pak probíhala v následujících krocích:

1. Ukládání směsi první vrstvy tvaru L, hutnění vpichy dřevěnou tyčí, vložení prvního výztužného prutu zhruba do třetiny výšky prvku.
2. Betonáž druhé třetiny vrstvy, vložení druhého výztužného prutu do 2/3 výšky formy
3. Dokončení ukládání směsi, vyčkání 5 minut mezi výrobou vrstev.
4. Promísení směsi určené k výrobě druhé vrstvy, betonáž druhé poloviny stejným způsobem jako první.
5. Dokončení vzorku, seškrábnutí přebytečného materiálu na povrchu pomocí zednické lžice.
6. Opatrné vyjmutí plechového plátu z formy.
7. Zajištění formy větším polystyrenovým blokem pomocí stahovacích pásek proti úniku materiálu a následně otočení formy, aby druhá vrstva dosedla na vrstvu první.

Jako výztuž byly použity ocelové pruty průměru 8 mm. Do každé poloviny tělesa byly vloženy 2 pruty. Jejich účelem bylo zabránění porušení vzorku nežádoucím způsobem (mimo rozhraní).

Po 24 hodinách došlo k odbednění všech těles, která byla následně ponechána v laboratorním prostředí, dokud se nezačalo s jejich zahříváním.

Prvky byly opatřeny označením ve formě iniciál zhotovitele a pořadového čísla vzorku. U prvků pro zkoušku v ohybu se před název přidalo O. V případě těles s rozhraním označení obsahovalo dále délku časového odstupu výroby vrstev a teplotu, které se posléze tělesa vystavovala.



Obrázek 4: Příprava vzorku

4. TESTOVÁNÍ

4.1. Zkouška pevnosti v tlaku

Pro tuto zkoušku byly vzorky tvaru krychle s hranou 150 mm umísťovány do lisu a postupně zatěžovány. Fotografie zkušební tělesa v lisu je na obrázku 5. Při této zkoušce je třeba dbát na to, aby nedošlo k nestandardnímu porušení vzorků a výsledky byly platné.



Obrázek 5: Zkouška pevnosti v tlaku

4.2. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zjišťována pomocí zkoušky ve čtyřbodovém ohybu na trámčích o rozměrech 400 mm x 100 mm x 100 mm. Byla upřednostněna oproti třibodovému uspořádání zkoušky, jelikož čtyřbodové má vyšší vypovídající hodnotu vzhledem k tomu, že při správném provedení je mezi zatěžujícími silami nosník namáhán čistým ohybem bez kombinace s posouvajícími silami. V tomto místě pak také dochází k porušení prvku. Jak bylo těleso situováno v lisu včetně trhliny vzniklé ve střední části porušeného vzorku je možné si prohlédnout na obrázku 6.



Obrázek 6: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

4.3. Vystavení zvýšené teplotě

Zhruba 3 měsíce od výroby byla tělesa tvaru Z vystavena 3 různým nejvyšším teplotám: 100°C, 160°C a 220°C (za teploty 20°C byly již zkušeny vzorky s rozhraním vyrobeným s odstupem 5 minut v 1. fázi experimentu). Pro tyto účely byla použita kruhová pec M60/12. Vždy 4 tělesa tvaru Z byla vložena do ohřáté pece na 120 min, 150 min či 180 min dle cílové teploty. Pec a vzorky v ní umístěné si lze prohlédnout na obrázku 7.



Obrázek 7: Ohřev zkušebních těles

4.4. Zkouška pevnosti ve smyku

Týden od vystavení zvýšené teplotě proběhlo testování vzorků ve smyku. Byl použit zkušební lis, do kterého byla tělesa umísťována tak, aby síla působila na celou spodní a horní plochu vzorku. V případě neceloplošného namáhání by se mohlo stát, že by došlo k jinému druhu porušení než na rozhraní, na které byla zkouška cílena. Vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí až do porušení.

Průběh všech provedených zkoušek byl zaznamenán do programu MS Excel.

5. VÝSLEDKY

Výsledky byly zpracovány a zapsány do tabulek. Během zkoušek se zaznamenávaly síly působící na vzorky do jejich porušení. Z maximální zaznamenané síly pak byla určena pevnost pomocí vzorců pro pevnost v tlaku (1), v tahu za ohybu (2) a smykovou pevnost rozhraní (3):

$$f_c = \frac{F_d}{A_c} \quad (1)$$

kde f_c je pevnost v tlaku v [MPa], F_d síla v [N] a A_c průřezová plocha zkušební tělesa v [mm²],

$$f_{cf} = \frac{F_d * l}{d_1 * d_2} \quad (2)$$

kde f_{cf} je pevnost v tahu za ohybu v [MPa], F_d síla v [N], l vzdálenost mezi opěrnými válečky v [mm] a d_1 a d_2 rozměry příčného řezu tělesa v [mm],

$$\tau_d = \frac{F_d}{A_d} \quad (3)$$

kde τ_d je pevnost ve smyku v [MPa], F_d síla v [N] a A_d plocha rozhraní vzorku v [mm].

Dále se vypočítala průměrná hodnota pevnosti v tlaku, tahu za ohybu a ve smyku pro každou čtveřici těles se stejnými parametry:

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

kde x je průměrná hodnota pevnosti, x_i hodnoty pevnosti jednotlivých prvků skupiny a N počet vzorků ve skupině.

Při výpočtu průměrných výsledků byl vždy z každé skupiny vyjmut prvek s nejodlišnější naměřenou hodnotou pevnosti. To bylo provedeno z důvodu zaznamenání nestandardního chování těles či průběhu zatěžování.

Výsledky zkoušek v tlaku a tahu za ohybu jsou zapsány v tabulce 1.

Tabulka 1: Pevnost v tlaku a tahu za ohybu

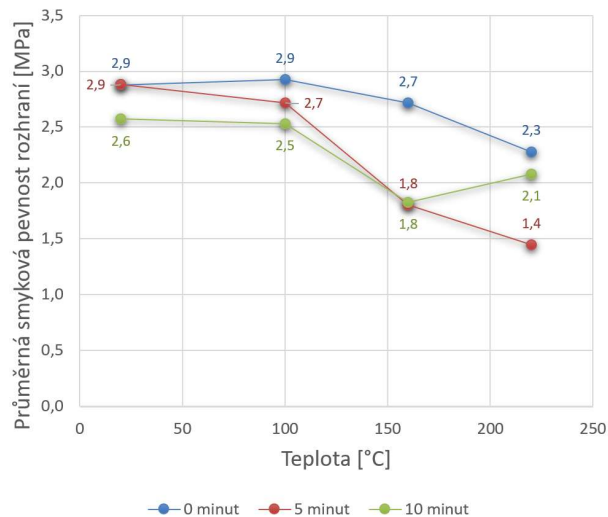
Druh pevnosti	Označení	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
v tlaku	JN1	46,125	35,667
	JN2	38,280	
	MJ1	33,768	
	MJ2	34,954	
v tahu za ohybu	OJN1	3,720	3,690
	OJN2	4,110	
	OMJ1	3,612	
	OMJ2	3,738	

Data ze zkoušky ve smyku se následně zaznamenala do tabulky 2 a do grafu na obrázku 8. Ten vznikl tak, že se do již existujícího grafu s výsledky zkoušek těles s rozhraními vytvořenými s časovým odstupem 0 a 10 minut doplnila čára znázorňující průběh změny smykové pevnosti v závislosti na teplotě u těles, jejichž vrstvy byly vyrobeny s odstupem 5 minut. Každá čára grafu tedy znázorňuje stejný druh vzorků podle časového odstavu výroby rozhraní.

Cílem experimentu bylo zjistit parametry užitého materiálu a to, jak vybrané proměnné faktory ovlivňují smykovou pevnost rozhraní cementových těles. Při vyhodnocování výsledků se vycházelo z vypočítaných průměrných hodnot.

Tabulka 2: Průměrné smykové pevnosti rozhraní

Časový odstup výroby rozhraní	Teplota [°C]	Průměrná smyková pevnost rozhraní [MPa]
5 minut	20	2,9
	100	2,7
	160	1,8
	220	1,4



Obrázek 8: Průměrná smyková pevnost rozhraní vzorků

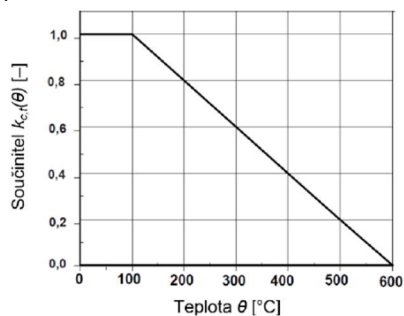
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

6.1. Vliv teploty

Z předchozího zkoumání bylo vypořováváno, že teplota má na smykovou pevnost rozhraní převážně negativní vliv. Nově doplněná čára pro vzorky s rozhraním vyrobeným s odstupem 5 minut (dále 2. skupina) tento předpoklad potvrzuje, a to dokonce bez výjimky. Prvky s rozhraním vyrobeným bez časového odstavu (dále 1. skupina) měly stálou pevnost do překročení teploty 100°C, poté se pevnost též snižovala. U vzorků s vrstvami vyrobenými s odstupem 10 minut (dále 3. skupina) pevnost s teplotou nejprve klesala do vystavení 160°C, tělesa ohřátá na 220°C pak ovšem vykazala pevnost zvýšenou.

Po překročení 100°C došlo v případě aktuálně zkoumané 2. skupiny ke strmějšímu poklesu pevnosti než mezi 20°C a 100°C. Tento jev je zřejmě způsoben dehydratací cementového tmele a odpařováním zvýšené vlhkosti na rozhraní (které je zde více než v případě 1. skupiny z důvodu krvácení betonu), k nimž dochází od teploty 100°C.

Dle normy ČSN EN 1992-1-2 je možné při použití zjednodušených výpočetních metod uvažovat pevnost betonu v tahu tak, že se její hodnota s teplotou snižuje vynásobením součinitelem $k_{c,t}(\theta)$ (obr. 9). Po překročení 100°C tak klesá pevnost vždy o 20% při zvýšení teploty o každých 100°C. Porovnání poklesu smykové pevnosti rozhraní zkušebních vzorků z experimentu a normového poklesu pevnosti nabízí tabulka 3.



Obrázek 9: Součinitel $k_{c,t}(\theta)$ [ČSN EN 1992-1-2]

Tabulka 3: Porovnání snížení pevnosti rozhraní s teplotou

Časový odstup výroby rozhraní	Teplota [°C]	Pevnost dle normy [MPa]	Naměřená pevnost [MPa]
0 minut	20	100%	2,9
	100	100%	2,9
	160	88%	2,6
	220	76%	2,2
5 minut	20	100%	2,9
	100	100%	2,9
	160	88%	2,6
	220	76%	2,2
10 minut	20	100%	2,6
	100	100%	2,6
	160	88%	2,3
	220	76%	2,0

8. PODĚKOVÁNÍ

Z tabulky vyplývá, že u druhé skupiny došlo k rychlejšímu poklesu smykové pevnosti, než uvádí norma. Zatímco snižování pevnosti 1. skupiny vzorků bylo pozvolné a zhruba normové, tělesa 2. skupiny začínala na stejné hodnotě průměrné smykové pevnosti rozhraní jako 1. skupina, pokles byl však strmější. Přestože 3. skupina vykazovala při zvýšení teploty na 160°C také postupný pokles pevnosti, ani ten nebyl tak rapidní. Vzhledem k tomu, že je k dispozici jen omezený soubor dat a vlhkost na rozhraní před betonáží druhé vrstvy nebyla měřena, je obtížné vyvodit ze získaných výsledků závěr. Strmý pokles pevnosti ve smyku 2. skupiny by se však dal připisat tomu, že se s časovým odstupem výroby na rozhraní hromadila vlivem krvácení betonu voda, což zavinilo, že rozhraní bylo náchylnější na degradaci vlivem teploty. To by ovšem nevysvětlovalo to, proč byl pokles rychlejší než v případě 3. skupiny. Případně mohla rozdílný průběh pevnosti v závislosti na teplotě zavinit chyba při výrobě, například nedostatečné hutnění během betonáže.

6.2. Vliv časového odstupu

Další sledovanou proměnnou byl časový odstup mezi výrobou jednotlivých vrstev těles. Z grafu na obrázku 8 lze vyčíst, že delší časový odstup zapříčinil pokles pevnosti rozhraní za téměř každé teploty. Výjimku tvoří vzorky vystavené teplotě 220°C.

Vysvětlení rozdílné pevnosti v závislosti na časovém odstupu výroby vrstev může poskytnout graf na obrázku 1. Vzhledem k tomu, že vzorky byly vyráběny tak, že při betonáži nebylo rozhraní na vrchní straně, ale ze strany, odpovídá průběh vlhkosti na rozhraní spíše grafu pro vzorek vylitý do formy. Znamená to, že po vylití docházelo ke krvácení betonu a na rozhraní se hromadila vlhkost. Čím více rozředěného materiálu se na rozhraní nachází, tím je jeho pevnost menší. To vysvětluje, proč se ve většině případů hodnota smykové pevnosti 2. skupiny zkušebních těles pohybovala mezi výsledky 1. a 3. skupiny.

7. ZÁVĚR

V rámci tohoto článku byla provedena rešerše, jež seznamuje s problematikou pevnosti rozhraní cementových kompozitů zhotovených s krátkým časovým odstupem. Představuje zde různé faktory, které mají na toto místo vliv. Dále se věnuje metodám testování pevnosti rozhraní.

Experimentální část pak porovnává vliv teploty a časového odstupu výroby vrstev na smykovou pevnost rozhraní a udává parametry použitého materiálu. Celkem bylo zhotoveno 20 zkušebních těles. 12 vzorků pro zjištění smykové pevnosti rozhraní bylo zhotoveno tak, aby jednotlivé vrstvy byly vyrobeny 5 minut po sobě. Tělesa byla vystavena po vytvrzení teplotám 100°C, 160°C a 220°C pomocí pece.

Experimentálně byla potvrzena hypotéza, že se zvyšující se teplotou smyková pevnost rozhraní klesá. Dalším poznatkem bylo, že čím delší je časový odstup výroby vrstev prvku, tím je menší smyková pevnost rozhraní, a to za pokojové i zvýšené teploty, s výjimkou při teplotě 220°C.

Tento článek byl vytvořen v rámci Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS25/038/OHK1/1T/11- Konstrukce z moderních cementových kompozitů a jejich optimalizace.

Reference

- Sanjayan, Jay G., Nematollahi, Behzad, Xia, Ming a Marchment, Taylor. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*. 2018, 172, 468-475.
- Keita, Emmanuel, Bessaies-Bey, Hela, Zuo, Wenqiang, Belin, Patrick a Roussel, Nicolas. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*. 2019, 123.
- Xiao, Jianzhuang, Li, Zhiwei a Li, Jiabin. Shear transfer across a crack in high-strength concrete after elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2014, 71, 472-483.
- Weng, Yiwei, Li, Mingyang, Wong, Teck Neng a Tan, Ming Jen. Synchronized concrete and bonding agent deposition system for interlayer bond strength enhancement in 3D concrete printing. *Automation in Construction*. 2021, 123.
- Zareiyan, Babak a Khoshnevis, Behrokh. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete. *Automation in Construction*. 2017, 83, 212-221.
- Ma, Guowei, Liu, Tianhao, Buswell, Richard a Li, Zhijian. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails. *Cement and Concrete Research*. 2021, 148.
- Jelínková, Michaela. *Smyková pevnost rozhraní cementových kompozitů za běžné a zvýšené teploty*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2024.
- ČSN EN 1992-1-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2006, 92 s. 76681.
- Vespalec, Arnošt, Novák, Josef, Kohoutková, Alena, Vosynek, Petr, Podroužek, Jan, Škaroupka, David, Zikmund, Tomáš, Kaiser, Josef a Paloušek, David. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. *Materials* 2020. 2020, 13, 5147.
- Wolfs, R.J.M., Bos, F.P. a Salet, T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019, 119, 132-140.