

SMYKOVÁ PEVNOST ROZHRAŇÍ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ ZA BĚŽNÉ A ZVÝŠENÉ TEPLoty

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 se zabývá smykovou pevností rozhraní cementových kompozit, jejichž vrstvy byly vytvořeny s krátkým časovým odstupem. V první části shrnuje různé faktory, které pevnost tohoto druhu rozhraní ovlivňují. Následuje experimentální část, ve které je analyzován vliv vystavení zvýšené teplotě na smykovou pevnost rozhraní vytvořených těles na cementové bázi. Kromě faktoru zvýšené teploty byl sledován též vliv časového odstupu výroby vrstev vzorků. Výsledky zkoušky ve smyku ukázaly, že zvýšená teplota má na pevnost rozhraní těles převážně negativní vliv. K poklesu smykové pevnosti pak došlo také v případě delšího časového odstupu betonáže jednotlivých vrstev, a to za každé teploty.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

ABSTRACT

This article deals with the shear strength of the interface of cement composites, the layers of which were formed with a short time interval. The first part summarizes the various factors that influence the strength of this type of interface. The experimental part follows, in which the effect of exposure to elevated temperature on the shear strength of the interface of cement-based bodies is analyzed. In addition to the factor of increased temperature, the influence of the time interval of the production of sample layers was also monitored. The results of the shear test showed that increased temperature has a predominantly negative effect on the strength of the body interface. The decrease of the shear strength also occurred in the case of an increasing time interval between application of the individual concrete layers and that was so at all applied temperatures.

KEYWORDS

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

1. ÚVOD

Kompozitní materiály na bázi cementu jsou již dlouhodobě jedny z nejužívanějších materiálů ve stavebnictví, proto je vhodné se jim podrobněji věnovat. V současnosti jsou mimo jiné využívány pro výrobu betonových konstrukcí pomocí technologie 3D tisku metodou vrstvení materiálu. 3D tisk betonu je relativně mladá technologie užívaná ve stavebnictví, která by mohla přispět k jeho automatizaci. Během procesu 3D tisku vzniká mezi jednotlivými tištěnými filamenti rozhraní, jež lze dle Ma et al. (2021) považovat za nejslabší místo tištěných dílců.

Tento článek je zaměřen na faktory, které pevnost tohoto rozhraní ovlivňují, možnostmi jejího zvyšování a způsoby testování. Dále pak popisuje experiment, jež analyzuje působení teploty na pevnost rozhraní vzorků, jejichž vrstvy byly vytvořeny se dvěma různými krátkými časovými odstupy.

2. SOUHRN AKTUÁLNÍCH POZNATKŮ

2.1. Parametry ovlivňující pevnost rozhraní

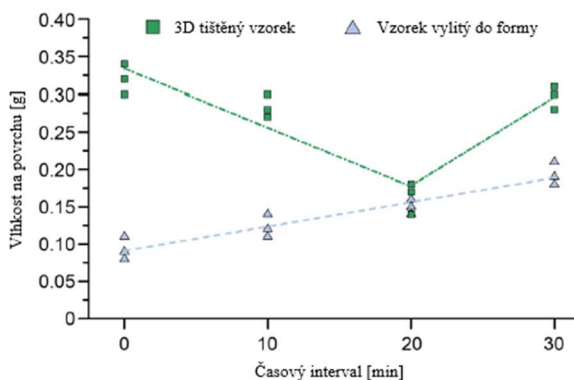
Hlavními faktory ovlivňujícími pevnost rozhraní vrstev zhotovených s krátkým časovým odstupem jsou vlhkost a časový interval. Tyto dva parametry jsou na sobě závislé, proto je vhodné je sledovat současně. Průběh vlhkosti na povrchu spodní vrstvy pak závisí též na způsobu ukládání materiálu. Pokud je uvažováno běžné ukládání do formy, roste vlhkost povrchu s časem z důvodu tzv. krvácení betonu, při kterém se voda z betonové směsi dostává na povrch. Pokud se však jedná o ukládání vrstev během 3D tisku betonu, je závislost vlhkosti na čase odlišná (obr. 1). Sanjayan et al. (2018) experimentálně zjistili, že u tištěných filamentů dochází v prvních 20 minutách k poklesu vlhkosti povrchu. Tento jev je pravděpodobně způsoben procesem tisku, kdy se během průchodu tiskovou tryskou směs uspořádá tak, aby bylo kamenivo ve střední části, kde vzniká menší smykové napětí, zatímco na povrchu se nachází tekutá část směsi, která usnadňuje průchod tryskou. Vlhkost na povrchu je tak ihned po vytvoření vrstvy vysoká a v prvních 20 minutách dochází k jejímu snižování odpařováním a usedáním materiálu. Po uplynutí tohoto časového intervalu pak vlhkost opět stoupá, jako při monolitickém zpracování. Dosavadní provedené experimenty povětšinou prokazují negativní vliv zvýšené vlhkosti na pevnost rozhraní vrstev. Menší množství vody může přispívat

* Školitel: Ing. Josef Novák, Ph.D.

k přilnavosti, větší vlhkost však způsobuje zvýšení pórovitosti, což zmenšuje stykovou plochu vrstev.

Zásadním parametrem je dále složení směsi. Za nejdůležitější lze považovat vodní součinitel. S vyšším vodním součinitelem zřejmě pevnost rozhraní stoupá (Keita et al. 2019). Při 3D tisku betonu je jeho velikost omezena tak, aby materiál byl dostatečně tekutý pro průchod tiskovou tryskou a zároveň dostatečně pevný, aby se jednotlivé vrstvy nehroutily a držely tvar i po vytištění vrstev navazujících. Vliv má též velikost použitého kameniva, které může zvýšit pevnost rozhraní vzhledem k působení hmoždinkového efektu mezi zmy (Xiao et al. 2014).

Okolní podmínky, v nichž dochází k tisku, též mají na pevnost rozhraní vliv. Obecně lze říci, že tělesa vyráběná v laboratorním prostředí vykazují lepší vlastnosti než prvky vytvářené v exteriérových podmínkách. V těch dochází například k nežádoucímu odpařování vody a změnám teploty způsobujícím objemové změny cementových prvků, což negativně ovlivňuje pevnost rozhraní.



Obrázek 1: Průběh vlhkosti povrchu spodní vrstvy v čase

2.2. Možnosti zvýšení pevnosti rozhraní

Kromě optimalizace procesu a použitého materiálu existuje několik dalších metod využívaných ke zvýšení pevnosti rozhraní 3D tištěných těles.

Prvním z nich je ošetření povrchu spodní vrstvy (Weng et al. 2021). V praxi se k tomuto účelu užívají různé druhy pojiv, jako jsou například cementové zpevňovače, roztoky polymerů či cementové pasty.

Další možností je vzájemné provázání vrstev (Zareian et al. 2017). Jedná se o metodu inspirovanou truhlářským systémem pero-drážka, kdy se v jedné vrstvě vytvoří prohlubeň, která se následně vyplní materiálem druhé vrstvy. Tím se zvětšuje plocha povrchů ve styku, což zvyšuje pevnost rozhraní. Tento způsob vyžaduje kontrolu rozměrů drážky, v případě, kdy je příliš dlouhá a úzká, dochází k porušení v materiálu vyplňujícím drážku, čímž se ztrácí výhody tohoto způsobu výroby.

Variantou je také použití výztuže procházející přes rozhraní (Ma et al. 2021). Je nutné kontrolovat rozteč a tloušťku výztužných prutů. Se zvětšující se roztečí se pevnost rozhraní snižuje, v případě dimenze je pak třeba použít pruty dostatečného průměru, aby se příliš snadno nedeformovaly, zároveň však nesmí být průměr příliš velký, aby nedocházelo k selhání cementové matrice dříve než k deformaci výztuže.

2.3. Metodika testování

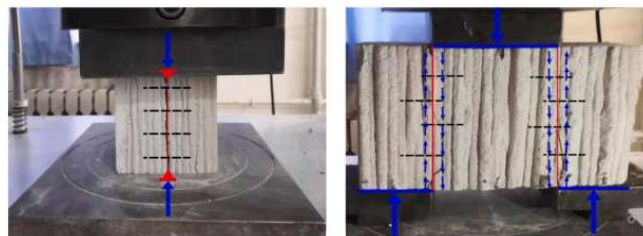
Pevnost rozhraní betonových vrstev je možno testovat v tahu či ve smyku. Způsob testování pro 3D tištěné prvky není prozatím sjednocen, proto je obtížné naměřené výsledky z jednotlivých experimentů porovnávat. Různé druhy testování vykazují rozdílné výsledky, pro zjištění pevnosti je proto vhodné vybrat takovou zkoušku, při níž je zatížení nejvíce podobné skutečnému zatížení dílce v konstrukci.

Nejběžnější metodou zkoušení je tzv. pull-off test neboli odtrhová zkouška. Provádí se tak, že se na vrchní a spodní stranu vzorku připevní kovové úchyty pomocí epoxidu a v místě zkoušeného rozhraní se provede z obou stran 5 mm zářez. Vzorek se poté umístí do lisu.

Dalším běžně používaným testem je zkouška v příčném tahu (obr. 2 vlevo). Zatížení se při ní aplikuje rovnoběžně s rozhraním mezi vrstvami. Tím v těchto místech vzniká napětí, které rozdělí vzorek na dvě části.

Pro určení pevnosti rozhraní zatíženého kombinací smyku a tlaku se užívá zkouška v šikmém smyku. Ta se provádí na válcových tělesech, jejichž vrstvy jsou při výrobě ukládány tak, aby vzniklo šikmé rozhraní (Zareian et al. 2017).

Tělesa se zkouší často též různými druhy zkoušek v kroucení. Při nich jsou síly na vzorek aplikovány paralelně s rozhraním. Většina modifikací zkoušek ve smyku má potíže s vyrovnáváním zatížení a výsledky jsou značně rozptýlené. Na obrázku 2 vpravo je fotografie zkoušky ve smyku, která se používá, jestliže je v tělese více rozhraní stejných vlastností (Zareian et al. 2017).



Obrázek 2: Zkouška v tahu a smyku [Zareian et al. 2017]

3. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

3.1. Úvod

Předmětem experimentální části tohoto článku bylo zkoumání smykové pevnosti rozhraní cementových kompozit vyrobených s krátkým časovým odstupem.

Experiment se zabýval sledováním účinku dvou měnících se faktorů:

- vliv nejvyšší teploty, které byla tělesa vystavena (20°C, 100°C, 160°C, 220°C)
- vliv časového odstupu výroby jednotlivých vrstev vzorků (0 min, 10 min)

Použitý materiál, způsob výroby i zkoušení byly zvoleny na základě předchozí rešerše. Při návrhu byla snaha o napodobení procesu 3D tisku metodou vytlačování směsi za využití běžně dostupných prostředků.

3.2. Složení materiálu

Pro přípravu cementové směsi bylo užito kamenivo dvou frakcí; 0-4 mm a 4-8 mm, které tvořilo 64% celkové hmotnosti.

Jako pojivo byl použit portlandský cement Českomoravský cement 42,5 R.

Kvůli zlepšení mechanických vlastností směsi byl dále přidán metakaolin Mefisto L05. Jedná se o tepelně upravený mletý plavený kaolin, jež může nahradit až 15% cementu a má schopnost reagovat s vodou a hydroxidem vápenatým během jeho hydratace.

Použitá voda pocházela z vodovodního řádu. Pro vodní součinitel se zvolila hodnota 0,57.

Dále byl přimíchán urychlovač Betodur A5. V cementových směsích se běžně užívá jako přísada urychlující tvrdnutí.

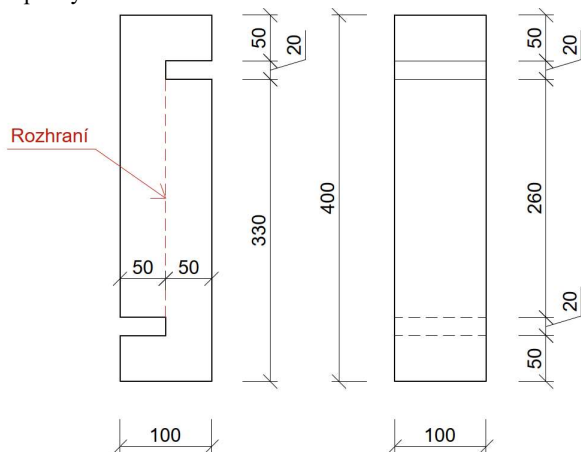
Poslední složkou směsi byla polypropylenová vlákna do betonu a malt SikaFiber PPM-12. Ta se používají pro zvýšení trvanlivosti kompozit a snižují plastické smrštění a tvorbu trhlin při sedání materiálu. Snižují též jeho plastické sedání a propustnost.

3.3. Výroba vzorků

Nejprve bylo třeba připravit formy pro výrobu cementových vzorků. Navržená geometrie těles včetně polohy rozhraní je nakreslena na obrázku 3.

Na řezačce se nařezaly polystyrenové bloky o rozměrech 100 mm x 50 mm x 20 mm a větší bloky o minimální ploše 100 mm x 400 mm. Do kovové formy velikosti 400 mm x 100 mm x 100 mm pak byly pomocí PUR lepidla připevněny menší bloky pro dosažení požadovaného tvaru Z. Hotová forma se poté vymazala kvůli snazšímu odbedňování a byl do ní umístěn kovový plát o rozměrech 300 mm x 170 mm, který byl zajištěn dočasnými polystyrenovými bloky, pro vytvoření rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Při zacházení s plechem se dbalo především na to, aby nebyl znečištěn olejem či jinými látkami, které by mohly způsobit narušení přilnavosti vrstev. Připravenou formu je možné si prohlédnout na obrázku 4.

Dalším krokem byla výroba cementové směsi. Všechny složky se navážily na digitální váze a umístily k míchačce. Do té byly pak postupně ukládány; nejprve suché složky, po minutě se přilily tekuté.



Obrázek 3: Geometrie zkušebních těles



Obrázek 4: Forma pro výrobu vzorků tvaru Z s rozhraním

Od okamžiku přidání tekutých složek směsi se na stopkách začalo odměřovat 20 minut, což je optimální doba pro začátek 3D tisku (Vespalec et al. 2020). Před samotnou betonáží se pak směs znovu promíchala, aby se směs aktivovala. To mělo simulovat proces, kdy během 3D tisku směs prochází extrudérem.

Pro omezení případného nežádoucího porušení těles mimo rozhraní byly do každé poloviny vzorků umístěny 2 výztužné pruty tvaru L o průměru 6 mm.

Betonáž vzorků pak probíhala v následujících krocích:

1. Postupné ukládání směsi první poloviny cementového tělesa, hutnění vpichy dřevěnou tyčí, vložení prvního výztužného prutu zhruba do třetiny výšky vrstvy, pokračování betonáže.
2. Vložení druhého výztužného prutu do 2/3 výšky formy, dokončení ukládání směsi, vyčkání pro dosažení požadovaného časového odstupu mezi výrobou vrstev; 0 nebo 10 minut.
3. Promísení směsi určené k výrobě druhé vrstvy, betonáž, hutnění vpichy dřevěnou tyčí, umístění dvou výztužných prutů.
4. Dokončení vzorku, seškrábnutí přebytečného materiálu na povrchu pomocí zednické lžice.
5. Opatrné vyjmutí plechového plátu z formy.
6. Připevnění většího polystyrenového bloku k formě pomocí stahovacích pásek, aby se zabránilo vytečení materiálu, a přetočení formy na bok tak, aby druhá vrstva vzorku dosedla na první.

Tělesa byla po 24 hodinách vyjmuta z forem a byla ponechána v laboratorním prostředí, dokud se nezačalo s jejich zahříváním. Foto připraveného tělesa je na obrázku 5.



Obrázek 5: Hotový vzorek s patrným rozhraním

Celkem se vyrobilo 16 vzorků, jejichž vrstvy byly vytvořeny bez časového odstupu, a 16 těles s rozhraním připraveným s odstupem 10 minut.

4. TESTOVÁNÍ

4.1. Vystavení zvýšené teplotě

Zhruba 2 měsíce od výroby byla tělesa vystavena 4 různým teplotám: 20°C (referenční), 100°C, 160°C a 220°C. Vždy 4 tělesa z každé skupiny dle druhu rozhraní byla vložena do ohřáté pece na 120 min, 150 min či 180 min dle cílové teploty. Následně byla tělesa zvážena a změřily se rozměry jejich rozhraní.

V tabulce 1 lze pozorovat pokles objemové hmotnosti prvků se zvyšující se teplotou, které byly vystaveny, po překročení 100°C. Tento jev je způsoben odpařováním volné vody, jejíž výparné teplo je právě při teplotě 100°C.

Zvýšená teplota způsobila vznik trhlin na rozhraní vzorků, které jsou zachyceny na obrázku 6. Při teplotě 100°C vznikaly vlasové trhliny dlouhé několik centimetrů na okrajích rozhraní, při 160°C a 220°C se trhliny rozvinuly po celé délce rozhraní, přičemž s vyšší teplotou byly výraznější (širší).

Tabulka 1: Průměrné objemové hmotnosti

Teplota [°C]	Objemová hmotnost [kg/m³]
20	2110,5
100	2140,4
160	2098,7
220	2039,5



Obrázek 6: Rozvoj trhlin na rozhraní vzorků

4.2. Zkouška pevnosti ve smyku

Týden od vystavení zvýšené teplotě se tělesa zkoušela ve smyku. Pro zkoušku byl použit zkušební lis, do kterého se vzorky postupně umísťovaly tak, aby síla působila na celou spodní a horní plochu vzorku. V případě působení jen na část plochy by mohlo namáhání způsobit jiný způsob porušení než požadované porušení na rozhraní.

Vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí až do porušení, průběh zkoušky byl zaznamenán do programu MS Excel.

5. VÝSLEDKY

Výsledky byly zpracovány a zapsány do tabulky 2. Během zkoušky se zaznamenávala síla, ze které se následně vypočítala pevnost ve smyku rozhraní vzorků pomocí vzorce (1).

$$\tau_d = \frac{F_d}{A_d} \quad (1)$$

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 ve smyku pro každou čtveřici těles se stejným druhem rozhraní a stejnou nejvyšší teplotou, které byly vystaveny:

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

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

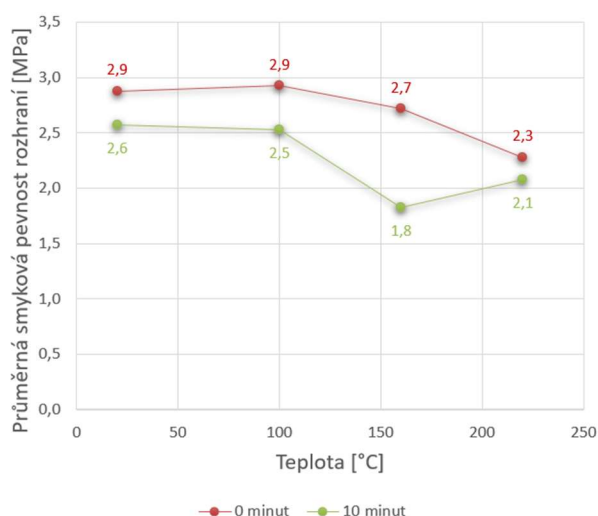
Vypočtená data se následně zaznamenala do grafu na obrázku 7. Každá čára znázorňuje stejný druh vzorků podle časového odstupu výroby rozhraní.

Při výpočtu průměrných výsledků byl vždy z každé skupiny vyjmut prvek s nejodlišnější naměřenou hodnotou smykové pevnosti rozhraní.

Cílem experimentu bylo zjistit, 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]
0 minut	20	2,9
	100	2,9
	160	2,7
	220	2,3
10 minut	20	2,6
	100	2,5
	160	1,8
	220	2,1



Obrázek 7: Průměrná smyková pevnost rozhraní vzorků

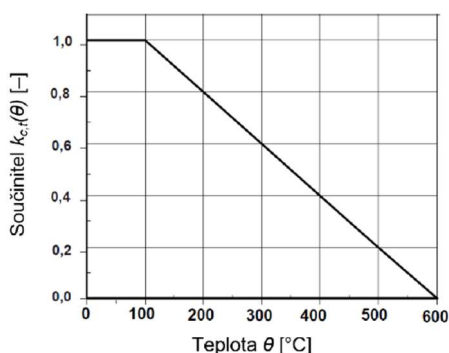
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

6.1. Vliv teploty

Vliv teploty, které byly vzorky vystaveny, lze vyčíst z grafu na obrázku 7. Teplota měla na smykovou pevnost rozhraní převážně negativní vliv. Prvky s rozhraním vyrobeným bez časového odstupu (dále 1. skupina) měly stálou pevnost do překročení teploty 100°C, po překročení této hodnoty se pak pevnost snižovala. U vzorků s vrstvami vyrobenými s odstupem 10 minut (dále 2. skupina) se pevnost s teplotou nejprve snižovala do vystavení 160°C, tělesa ohřátá na 220°C pak vykázala pevnost zvýšenou o 16,7%.

Pokles smykové pevnosti s teplotou je zřejmě způsoben dehydratací cementového tmele, k níž dochází od teploty 100°C. To je také důvodem, proč se v případě první skupiny začala pevnost snižovat až po překročení této teploty.

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 $k_{c,t}(\theta)$, jehož hodnotu lze získat z grafu na obrázku 8. 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 8: 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
10 minut	20	100%	2,6
	100	100%	2,6
	160	88%	2,3
	220	76%	2,0

U první skupiny těles došlo k zhruba normovému poklesu pevnosti rozhraní, u druhé skupiny tomu tak však nebylo. Problémem zde byla tělesa ohřátá na 160°C, jejichž pevnost byla nižší než očekávaná. Tato odchylka mohla být způsobena delším časovým odstupem výroby jednotlivých vrstev těles, během kterého se v místech rozhraní nahromadila voda, což zavinilo, že rozhraní bylo náchylnější na degradaci vlivem teploty. Případně to mohla zavinit chyba při výrobě, například nedostatečné hutnění během betonáže, či to, že soubor naměřených dat byl omezený.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, ohřátí těles způsobilo vznik vlasových trhlin na rozhraní. Ty se pak se zvyšující se teplotou prodlužovaly a rozšiřovaly. Tento jev byl způsoben tahovým napětím vznikajícím v místech rozhraní od vysychání. Kromě toho působilo na prvky také ochlazení. Po vyjmutí ze sušičky se povrch vzorků začal ochlazovat, což způsobilo jeho stahování, zatímco uvnitř těles zůstávala po určitou dobu stále zvýšená teplota. Na povrchu prvku se pak začaly vytvářet trhliny ve středních částech či nejslabších místech, v tomto případě na rozhraní. Čím vyšší je cílová teplota, tím větší teplotní gradient v prvku vzniká, což způsobuje vznik větších trhlin.

6.2. Vliv časového odstupu

Další sledovanou proměnnou byl časový odstup mezi výrobou jednotlivých vrstev těles. Z grafu na obrázku 7 je patrné, že delší časový odstup zapříčinil pokles pevnosti rozhraní za každé teploty.

Rozdílnou pevnost rozhraní lze vysvětlit průběhem vlhkosti na povrchu první betonované vrstvy. Experiment měl co nejlépe napodobit proces 3D tisku betonu. Vytvářené vzorky však neměly rozhraní z vrchní, ale z boční strany vrstev, proto průběh vlhkosti na povrchu odpovídal spíše monolitickému zpracování. Dá se tedy předpokládat, že vlhkost na rozhraní s časem od betonáže první vrstvy rostla, což způsobilo tzv. krvácení směsi, které se vzhledem k vodnímu součiniteli materiálu dalo očekávat. Po 10 minutách od betonáže 1. vrstvy se tak již na rozhraní pravděpodobně vyskytovalo příliš velké množství vody, což způsobilo pokles pevnosti. Vyšší pevnost vzorků 1. skupiny se dá tedy připsat tomu, že 2. skupina měla širší rozředěnou vrstvu na rozhraní, která je náchylnější na degradaci působením zvýšené teploty.



Obrázek 9: Typické porušení vzorku

6.3. Způsob porušení

Všechny zkoušené prvky byly porušeny v místě rozhraní. Typické porušení vzorku včetně povrchu jeho rozhraní po zkoušce si lze prohlédnout na obrázku 9.

7. ZÁVĚR

V rámci tohoto článku byla provedena rešerše, jež seznamuje s problematikou pevnosti rozhraní cementových kompozit 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. Celkem bylo zhotoveno 32 zkušebních těles. Jejich vrstvy byly tvořeny s odstupem 0 a 10 minut a vždy 4 vzorky z každé skupiny byly vystaveny jedné ze 4 různých teplot: 20°C, 100°C, 160°C a 220°C. Poté se tělesa zkoušela ve smyku.

Experimentálně bylo zjištěno, že se zvyšující se teplotou smyková pevnost rozhraní převážně klesá. Dalším poznatkem bylo, že 10minutový odstup výroby vrstev způsobuje snížení pevnosti, a to za pokojové i zvýšené teploty. Navíc tato skupina těles vykázala nenormový pokles smykové pevnosti se zvyšující se teplotou.

8. PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS24/041/OHK1/1T/11 - Exploring the Relationship Between Parametric Model Complexity and Optimization Efficiency in Civil Engineering.

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.

Zareian, 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.