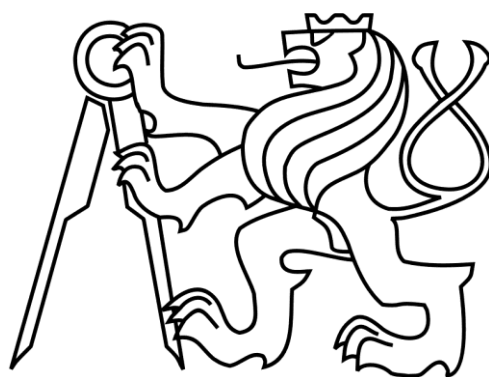


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Koroze drátkobetonu

Corrosion of steel reinforced concrete

Natálie Dejdarová

2019

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Iva Broukalová, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dejdarová Jméno: Natálie Osobní číslo: 456211

Zadávající katedra: katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Koroze drátkobetonu

Název bakalářské práce anglicky: Corrosion of steel fibre reinforced concrete

Pokyny pro vypracování:

Úvodní kapitoly s rešerší o drátkobetonu, korozi betonu, korozi oceli

Odborná studie o korozi drátkobetonu

Seznam doporučené literatury:

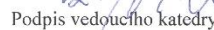
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 21. 2. 2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 26. 5. 2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce

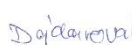

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

21.2.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně s využitím poskytnutých odborných konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

.....

Místo zpracování, celé datum

.....

Natálie Dejdarová

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych především poděkovat vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Ivě Broukalové, Ph.D. za odborné vedení a rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Matěji Míkovi za odbornou korekturu textu, Bc. Matěji Vykoukalovi za odborné rady a také všem, kteří se mnou strávili čas při mém zpracování této bakalářské práce.

ABSTRAKT

Koroze drátkobetonu v nepříznivém prostředí je méně škodlivá ve srovnání s korozi železobetonu. Je často považována za méně významnou, nicméně existuje. Drátkobeton má vyšší pevnost v tahu než beton s ocelovými pruty. Pokud se vyskytnou v drátkobetonu trhliny, může dojít ke korozi drátků přemostující trhliny a tím i ke snížení tahové pevnosti. Nejčastějšími typy, které způsobují korozi je karbonatace a chloridová koroze.

KLÍČOVÁ SLOVA

Drátkobeton, koroze, chloridy, karbonatace

ABSTRACT

Corrosion of steel fibre reinforced concrete in unpropitious environments is lower than the corrosion of reinforced concrete in the same conditions. It is often considered less significant, however it exist. The steel fibre reinforced concrete has a higher tensile strength than steel with steel bars. If cracks occur in the steel fibre reinforced concrete, it can have a serious effect on decreasing of the tensile strength. Carbonation and chloride corrosion are the most common types that cause corrosion.

KEY WORDS

Steel fibre reinforced concrete, corrosion, chlorides, carbonation

OBSAH

Úvod.....	7
1. Drátkobeton.....	8
1.1 Složení.....	9
1.2 Vlastnosti drátkobetonu.....	11
2. Koroze betonu.....	14
3. Klasifikace koroze betonu.....	15
3.1 Fyzikální koroze.....	15
3.2 Chemická koroze.....	16
3.2 Biologická koroze.....	20
4. Koroze způsobená chloridy.....	21
5. Karbonatace betonu.....	22
5.1 Průběh karbonatace betonu.....	22
6. Koroze výztuže.....	25
6.1 Elektrochemická koroze.....	25
6.2 Chemická koroze.....	26
7. Koroze drátkobetonu (SFRC).....	27
7.1 Problematika výzkumných prací.....	28
7.2. Stav problematiky.....	39
Shrnutí problematiky z rešerše.....	51
Závěr.....	54
Seznam literatury.....	57

Úvod

Téma mé bakalářské práce vychází primárně z podkladů z mezinárodní konference Vlákno-beton a výzkumu Victora Marcos-Mesona [19]. Úkolem bylo zpracovat rešerši z dostupných internetových a literárních zdrojů. Rešerše se zabývá charakteristickými vlastnostmi drátkobetonu, koroze betonu, koroze oceli a hlavním tématem koroze drátkobetonu.

Drátkobeton patří k moderním kompozitním stavebním materiálům, tzn. materiálům kombinujícím různé složky s odlišnými vlastnostmi. V případě drátkobetonu se jedná o betonovou matici, ve které jsou náhodně uspořádány ocelové drátky. Tento způsob zhotovení poskytuje drátkobetonu výhody především pro mezní únosnost v tahu a šíření smršťovacích trhlin.

Veškeré dostupné materiály zkoumají korozi drátkobetonu pouze z ojedinělých úhlů pohledu a vzájemně se nepřekrývají. Z tohoto důvodu jsem se rozhodla vypracovat svou bakalářskou práci a shrnout v ní dostupné poznatky o této problematice.

1. Drátkobeton

Beton je pravděpodobně nejvíce používaný stavební materiál na světě. Hlavní složkou betonu je portlandský cement. Výroba cementu spotřebovává značné množství přírodních zdrojů. Tím vzniká tlak ke snížení spotřeby cementu a jeho nahrazení z jiných zdrojů. Díky možnosti využití minerálních přísad jsou navrhovány směsi, které umožňují dosáhnout stále vyšší pevnosti výsledného materiálu.



Obrázek 1 Drátkobeton [10]

Drátkobeton, neboli SFRC z anglického názvu steel fibre reinforced concrete, je kompozitní materiál. Drátkobeton je jeden z druhů vláknobetonů s rozptýlenou kovovou výztuží. Díky ocelovým drátkům, které jsou přidávány do betonu, vzniká materiál s obdobnými vlastnostmi, jaké má železobeton vyztužený klasickým způsobem, tedy betonářskou výztuží. Drátkobeton vyniká tahovými vlastnostmi a odolností proti vzniku a šíření trhlin. V posledních letech jeho využívání roste a stále se objevují nové typy konstrukcí, kde je možné částečně nebo úplně nahradit klasickou ocelovou výztuž ocelovými drátky rozptýlenými rovnoměrně v betonu, a tím uspořit práci, čas a finanční prostředky. Použití je však stále omezené. Jedním z vysvětlení může být nedostatek předpisů a norem. Na vině však mohou být i jisté nedostatky samotného materiálu. Jako příklad můžeme uvést skutečnost, že drátky nejsou uspořádány ve směru hlavního napětí, problematickým jsou rovněž nepřesnosti v distribuci drátků v cementové matici. Drátkobeton se v současnosti používá převážně pro průmyslové podlahy

a základové desky. Rozrůstá se míra jeho použití jako materiálu na ostění tunelů, tenkostěnné konstrukce a vodohospodářské stavby.

Objevují se problémy s rozptýlením, usměrněním, rovnoměrným rozmístěním a konečnou úpravou ocelových drátků. Pro dosažení očekávaných vlastností drátkobetonu v čerstvém i ztvrdlém stavu je nutné rovnoměrně rozptýlit drátky v drátkobetonové směsi a rovnoměrně je obalit cementovou maltou. Při větší koncentraci mají některé ocelové drátky během míchání směsi tendenci tvořit shluky, tzv. ježky. Aby tomuto jevu bylo zabráněno, procházejí drátky před zamícháním dávkovacím a rozdružovacím zařízením.

Drátkobetonové konstrukce se realizují pomocí dvou odlišných technologií. První z nich je klasické ukládání drátkobetonové směsi do bednění a její následné zpracování. V tomto případě je třeba věnovat větší pozornost konzistenci používané směsi tak, aby byla dosažena požadovaná homogenita výsledného materiálu. Druhou technologií je tvorba konstrukcí nástřikem drátkobetonu. Používá se suchý i mokrý způsob nástřiku. V případě suchého nástřiku se beton dopravuje hadicí od stříkacího stroje k trysce stlačeným vzduchem, kde teprve se mísí s vodou a nanáší se na podkladní plochu. Velmi důležitou podmínkou je, aby stroj zajistil rovnoměrný materiálový proud k trysce a tím bylo zajištěno rovnoměrné nanášení na podkladní plochu. Vše je prováděno pod tlakem, a proto je velmi důležité dokonalé těsnění.

V případě mokrého způsobu nástřiku betonu je základem technologie mokrá betonová směs, která je pomocí čerpadla a vzduchu dopravována na podkladní plochu. Stříkací tryska je pro mokrý způsob upravena. Nástřik za mokra vede obvykle ke stejnoměrnějším fyzikálně mechanickým vlastnostem drátkobetonu. [14, 28]

1.1 Složení

Charakteristickou složkou drátkobetonu jsou ocelové drátky. Drátky by měly být dostatečně dlouhé, aby protínaly celý prostor mezi sousedními zrny hrubé frakce kameniva. Zároveň je důležité, aby drátky tato zrna, o které se mohou opřít, dostatečně přesahovaly. Z toho vyplývá, že délka drátků se odvozuje z použité velikosti a množství hrubé frakce kameniva. Při užití hrubší frakce kameniva (zrna nad 8 mm), může být tato soudržnost ještě zvýšena díky mechanickému kotvení drátků, kterého lze dosáhnout jejich zakřivením okolo zrn

hrubého kameniva v blízkosti vzniklé trhliny. Tohoto kotvení je možno docílit pouze při použití drátků větších délek, než je vzdálenost zrn hrubého kameniva. [14]



Obrázek 2 Ocelové drátky používané do betonu [31]

Další důležitou vlastností drátků je jejich ohybová tuhost, která musí být tak velká, aby drátky zachovaly při míchání, ukládání a hutnění směsi svůj původní tvar a zrna hrubé frakce kameniva je příliš nedeformovala.

Minimální hmotnostní koncentrace drátků v jednotce objemu drátkobetonu by se měla pohybovat v rozmezí od 20 do 50 kg.m⁻³ v závislosti na typu drátkobetonu. Rozptýlené drátky zajistí, že ani po vzniku trhliny v kritickém průřezu nedojde k náhlému porušení, ale že rozptýlená výztuž převezme roli taženého materiálu.

S rostoucím množstvím drátků v betonové směsi rychle klesá její zpracovatelnost, takže existuje jistá hranice koncentrace drátků, od které se již drátkobetonová směs nedá řádně zhutnit. Právě z tohoto důvodu je vhodné přidávat do drátkobetonové směsi plastifikátory nebo ztekucovače, čímž lze dosáhnout zlepšování zpracovatelnosti a v konečném důsledku i zvýšení horní hranice hmotnostní koncentrace drátků.

Jako výchozí látka k výrobě drátků se používá nejčastěji ocel (surová, pocínovaná nebo pozinkovaná), dále slitiny niklu a hliníku a na speciální drátky platina, wolfram, molybden, beryllium nebo např. slitiny niklu s titanem

Ocelové drátky se dělí dle použitého základního materiálu pro jejich výrobu do skupin:

- Skupina I – za studena tažený drátek,
- Skupina II – drátky stříhané z plechu,
- Skupina III – drátky oddělované z taveniny,

- Skupina IV – drátky protahované z drátu taženého za studena.
- Skupina V – drátky frézované z ocelových bloků. [31]

Materiál	Hustota g/cm ³	Bod tání °C	Pružnost GPa	Pevnost GPa
beryllium	1,8	1350	310	1,10
měď	8,9	2083	125	0,45
wolfram	19,3	3410	350	3,82
molybden	10,2	2625	330	2,20
ocel	7,9	1300	210	4,00

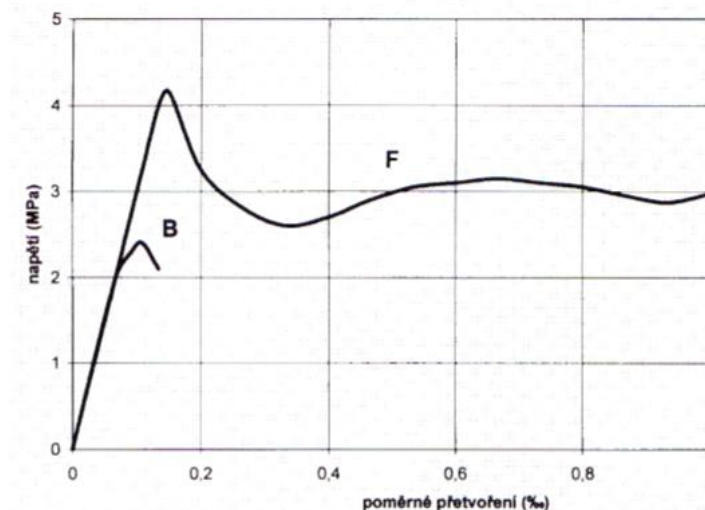
Obrázek 3 Fyzikální vlastnosti kovových drátků

Kamenivo použité v drátkobetonech by mělo odpovídat kamenivu používanému v osvědčených konstrukčních betonech a jeho jakost by tomu také měla odpovídat. Pro návrh drátkobetonové směsi platí obdobná pravidla jako v případě prostých betonů, jediný rozdíl se objevuje ve vodním součiniteli. Vodní součinitel je pro výrobu drátkobetonu důležitým faktorem. Nejlépe vyhovujícím je poměr 0,4-0,5, který zajišťuje, že se drátky nebudou při výrobě, dopravě a zpracování drátkobetonové směsi oddělovat, ani shlukovat. Výsledný beton s nižším vodním součinitelem je ve výsledku hutnější, má méně mikropórů a trhlin a agresivní látky z okolí do něj hůře pronikají. [2] [3]

1.2 Vlastnosti drátkobetonu

Rozptýlenou výztuží v podobě drátků je výrazně ovlivněn pracovní diagram materiálu v tlaku a zejména v tahu (s jinými hodnotami mezních poměrných přetvoření). Nízká pevnost betonu v tahu je omezujícím faktorem při konstrukci klasického železobetonu a předpjatého betonu. Zlepšení tahových vlastností betonu je přínosem pro jeho chování. Lze to vidět na pracovním diagramu v tahu (obr. 4), kde je u drátkobetonu patrný nejen vzrůst jeho pevnosti v tahu, způsobený oddálením rozvoje mikrotrhlin v jeho struktuře, ale především skutečnost, že i po vzniku viditelných trhlin aktivované drátky způsobují, že drátkobeton dosahuje vyšší houževnatosti a je schopen přenášet jistá reziduální tahová napětí. Jejich velikost závisí zejména na množství a tvaru drátků, přičemž mezní protažení drátkobetonu jsou až desetinásobně větší než u prostého betonu, který se při malém protažení poruší křehkým lomem. Díky těmto

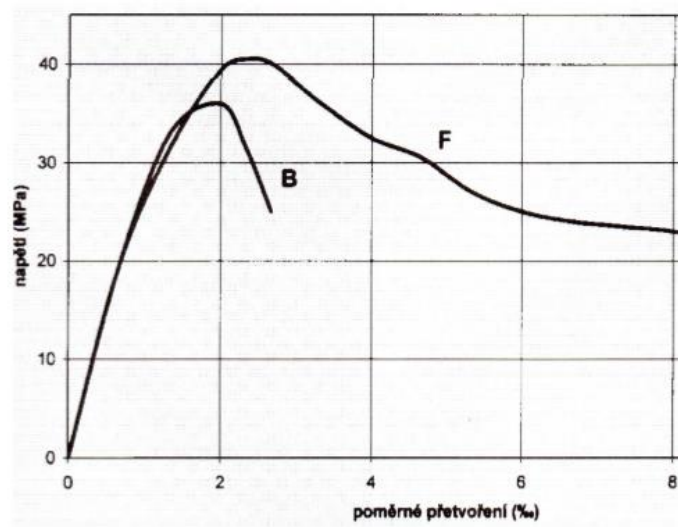
vlastnostem je drátkobeton velmi odolný vůči rázům, a proto se využívá také u namáhaných konstrukcí jako jsou piloty, podlahy hal apod. [14]



Obrázek 4 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tahu [14]

Rozdíl mezi drátkobetonem a prostým betonem se projeví také při porovnání pracovních diagramů obou betonů při namáhání tlakem (obr. 5). U drátkobetonu se výrazně projevuje jeho velká schopnost plastického přetvoření po dosažení maximálního napětí (pevnosti v tlaku). Po dosažení maximálního napětí dochází k jeho poklesu a při snížení na cca 50 % maximální hodnoty se napětí dále nemění a pracovní diagram drátkobetonu má vodorovný směr. Tato vlastnost drátkobetonu, zpomalující proces jeho porušování, je způsobena aktivací drátků po vzniku trhlin v betonu a podstatně se liší od charakteristického tlakového porušení prostého betonu. Mezní stlačení drátkobetonů dosahuje zhruba trojnásobných hodnot mezního stlačení prostých betonů. Pevnost drátkobetonu v tlaku se v porovnání s obdobným prostým betonem zvyšuje obvykle jen o 10-30 %, ale pouze v případě, že je drátkobetonová směs vhodně navržena a dobře zhutněna.

Rovnoměrné rozptýlení ocelové výztuže má důležitý vliv na smršťování betonu a zlepšuje vodotěsnost, a tudíž i jeho trvanlivost. Podle dosavadních pozorování se smršťování betonu s hmotnostní koncentrací drátků 80 kg.m^{-3} zmenší o 40 % oproti hodnotám smrštění prostého betonu.



Obrázek 5 Pracovní diagram drátkobetonu (F) a prostého betonu (B) v tlaku [14]

2. Koroze betonu

Koroze je definována jako nezáměrné rozrušování materiálů. Beton je kompozitní materiál, ve kterém může korozi podlehnout cementový tmel, ale také některé druhy kameniva.

Hlavním činitelem, který způsobuje korozi železobetonových konstrukcí, jsou plynné exhaláty obsažené v atmosféře – oxid uhličitý, oxidy síry a dusíku, amoniak, chlorovodík a další exhaláty, které působí v plynné formě nebo rozpuštěné v atmosférické vlhkosti. Nejvýznamnější je působení oxidu uhličitého a oxidů síry, a to z hlediska agresivity a vysokých koncentrací plynů v atmosféře.

Koroze (degradace) betonu je výsledkem působení celé řady vlivů a činitelů působících na beton v konstrukci buď přímo z vnějšího prostředí, nebo z vnitřního prostředí, tedy ze samotné betonové hmoty. Principem složitosti korozních projevů je skladba betonové směsi za přítomnosti celé řady příměsí a přísad a technologie zpracování směsi s podmínkou tuhnutí a tvrdnutí a následného zrání. Velmi důležitým faktorem v odolnosti betonu proti korozním vlivům je jeho pórová struktura. [16]

3. Klasifikace koroze betonu

Korozi cementového tmelu v betonu lze podle druhu působení rozdělit do tří skupin na:

- korozi fyzikální – mechanické vlivy, krystalizační tlak solí, teplota,
- korozi chemickou – plynné agresivní látky z ovzduší, roztoky kyselin, zásady a solí, organické látky,
- korozi biologickou – mechanické působení kořenů rostlin, chemické působení produktů životních pochodů živočichů, působení mikroorganismů.

Tyto procesy jsou na sobě časově závislé a ve většině případů jsou vzájemně propojeny. [26]

Nejvýznamnějšími typy koroze drátkobetonu jsou:

- koroze způsobená chloridy,
- karbonatace betonu.

Tyto druhy koroze, již byly předmětem několika výzkumů, jsou popsány v kapitolách 4. a 5.

3.1 Fyzikální koroze

Mezi fyzikální faktory porušující strukturu betonu patří mechanické namáhání související s nárazy, třením, proudící vodou a abrazí jemnými částicemi. Tyto děje mají za následek postupné porušování cementového tmelu a jeho odstraňování, což dále vede k obnažení kameniva a jeho uvolnění. Do této kategorie lze zařadit také biologickou korozi způsobenou růstem kořenů rostlin. Dalším významným fyzikálním faktorem jsou vysoké, nebo naopak nízké teploty. Od teploty 100 °C se rozkládají hydratované sloučeniny za uvolnění vody, po zahřátí betonu na 1 000 °C je zbytková pevnost cca 10 %, vztaženo k 28 denním pevnostem. Od 600 °C se rozkládá uhličitán vápenatý, ať už je přítomen ve formě kameniva nebo příměsi. Tento rozklad může vést až k úplnému rozpadu betonu.

Naopak nízké teploty pod 0 °C způsobují přechod kapalné vody v led, což je spojeno s nárůstem objemu o cca 9 %. Krystalizační tlak, který se vyvine při vzniku ledu a působí na stěny pórů, dosahuje hodnoty až 200 MPa. S působením

krystalizačního tlaku je spojeno také používání rozmrazovacích prostředků (NaCl), kdy roztok NaCl, vzniklý při aplikaci soli na ledovou vrstvu, penetruje do pórů cementového tmelu a následně při vhodných teplotně vlhkostních podmínkách NaCl vykristalizuje a na stěny pórů vyvine tlak až 55 MPa. Uvedené děje fyzikálního působení na beton vedou často až k jeho rozpadu. [26]

3.2 Chemická koroze

Chemická koroze betonu zahrnuje:

- atmosférickou korozi (karbonatace, sulfatace, další plyny),
- působení látek v kapalném prostředí (podzemní vody, náporové vody vodních staveb, vlhkost zeminy).

Agresivní látky z atmosféry nebo z kapalného prostředí jsou příčinou změn v cementovém tmelu. Jedná se zejména o látky kyselého charakteru a některé druhy anorganických solí. Rychlost korozních reakcí je ovlivněna porozitou cementového tmelu v betonu a koncentrací korozních látek u povrchu betonu. Vznikající nerozpustné a málo rozpustné látky v první fázi zaplňují ústí pórů, zpevňují tak povrchovou vrstvu betonu a částečně brání vnikání dalších podílů korozních látek do hmoty betonu. V druhé fázi je korozní rychlost určována difuzí agresivních látek touto vrstvou do betonu. Všechny druhy chemické koroze souvisejí se snížením obsahu hydroxidu vápenatého v betonu, a mají proto zásadní vliv i na průběh koroze ocelové výztuže v betonu. [26]

3.2.1 Atmosférická koroze

Atmosférická koroze je způsobena plynnými látkami obsaženými v okolní atmosféře. Jedná se o kyselé plyny, které při reakci s vodou tvoří kyseliny. Zatímco CO_2 je součástí atmosféry (průměrná koncentrace je 0,038 % obj.), koncentrace ostatních kyselých plynů (SO_2 , NO_x) je výrazně omezena zákonem o ochraně ovzduší. Kyselé plyny v přítomnosti vody nebo vlhkosti reagují přednostně s hydroxidem vápenatým vzniklým při hydrataci silikátových slínkových minerálů, dochází k snížení koncentrace OH^- iontů, a tedy k snížení zásaditosti prostředí v okolí ocelové výztuže. Největší pozornost je věnována reakci s CO_2 , tzv. karbonataci viz kapitola 5. [26]

3.2.2 Kapalné agresivní prostředí

Voda dobře smáčí hydrofilní povrch betonu i povrch kapilárních pórů, a tím může vnést na povrch a do pórové struktury agresivní látky reagující se složkami cementového tmelu. Tyto reakce vedou k ztrátě zásaditosti, poškození betonu a v některých případech až k jeho rozpadu, zejména povrchové vrstvy. V závislosti na podmínkách prostředí (množství vody, pohyb podzemní vody, změny teploty a vlhkosti) a kvalitě betonu (případně jeho pórové struktury a přítomnosti trhlin) může být poškození betonu kapalným prostředím významné. Kapalné prostředí lze rozdělit podle původu na dvě skupiny, a to na přírodní vody a vody odpadní. Přírodní vody mohou být atmosférické, podzemní či povrchové. Odpadní vody jsou splaškové či průmyslové. [7]

Atmosférické vody

Atmosférické vody vznikají poklesem teplot vzduchových vrstev pod rosný bod, kdy za přítomnosti kondenzačních jader přechází vodní pára v kapalnou vodu. Chemické složení srážkové vody je značně ovlivněno stupněm znečištění ovzduší, které obsahuje kapalnou a pevnou částice a plynné částice. [11]

Podzemní vody

Podzemní vody neboli veškerá voda pod povrchem Země tvořící podzemní hydrosféru, se dělí podle stupně mineralizace na vody prosté a minerální. Na chemické složení podzemních vod má především vliv horninové prostředí, ve kterém obíhají. K mineralizaci podzemních vod dochází přímým rozpouštěním, zejména chloridů a síranů alkalických kovů a síranů alkalických zemin, dále také chemickým působením. [11]

Povrchové vody

Povrchové vody vznikající z vody podzemní a atmosférické je možno dělit dále na vody kontinentální (tekoucí a stojaté) a na vodu mořskou. Jejich složení je proměnlivé, závisí na geologickém složení pramenné oblasti a na druhu hornin, kterými voda protéká či s nimiž přichází do styku. Pokud v jejím složení převažuje atmosférická voda, projeví se tato voda slabou mineralizací a nízkou přechodovou tvrdostí. Složení se u tekoucích vod mění s délkou toku, kdy mineralizace zpravidla postupně narůstá.

Z hlediska agresivity nepříznivě ovlivňuje složení povrchových vod zejména znečištění odpadními vodami, které může pronikat i do cirkulace podzemních vod. [11] [26]

Podle povahy produktů vzniklých při styku betonu s kapalným agresivním prostředím se podle Moskvinova povrchová a chemická koroze třídí do tří druhů. [21]. Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím je uvedeno na obr. 6.



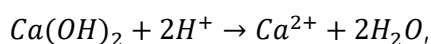
Obrázek 6 Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [26]

3.2.2.1 Koroze I. druhu

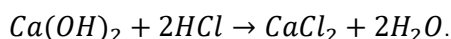
Tento typ koroze se týká zejména účinků vod s nízkou přechodnou tvrdostí (nízký obsah vápenatých a hořečnatých iontů, tzv. hladové vody). Jde o vody z řek, rybníků, z prahorních útvarů a vody srážkové. Dochází k průsaku vody betonem a tím k rozpouštění a vyluhování rozpustné složky především hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který je v cementovém tmelu obsažen jak ve formě nasyceného roztoku, tak ve formě krystalů hydroxidu vápenatého. Vyluhováním se snižuje koncentrace hydroxidových iontů, tedy hodnota pH pórového roztoku. Rychlost vyluhování hydroxidu vápenatého (rozpustnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je 160 mg/100 g vody při 20 °C) závisí na propustnosti betonu pro vodu, u náporové vody na jejím hydrostatickém tlaku. Viditelným projevem je tvorba karbonátu bílé barvy, která pevně lpí na povrchu betonu. Jsou to takzvané výkvěty uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Hlavní nepříznivý důsledek tohoto typu koroze, je snižování pevnosti betonu. [26] [11] [7]

3.2.2.2 Koroze II. druhu

Koroze II. druhu je způsobena výměnnými reakcemi mezi složkami cementového tmelu, zejména Ca(OH)_2 , a agresivními látkami působícími na beton. Zahrnuje reakce agresivního CO_2 , hydroxidů, kyselin, hořčnatých a amonných solí (mimo sírany). Výsledkem jsou buď rozpustné, nebo nerozpustné sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti a nejsou expanzivní. Kyseliny reagují s hydroxidem vápenatým a dalšími produkty hydratace slínekových minerálů za vzniku příslušných vápenatých solí. Obecně lze reakci Ca(OH)_2 s kyselinou zapsat rovnicí:



a např. reakci s kyselinou chlorovodíkovou rovnicí:



Při $\text{pH} < 4$ dochází již k reakci s hydratovanými slínekovými minerály za vzniku gelu $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a hlinité a železité soli dané kyseliny. Agresivita kyselin se posuzuje nejen podle jejich disociace a koncentrace, ale také podle druhu reakčních produktů. Rozpustné produkty jsou odplavovány a jsou napadány další podíly cementového tmelu, nerozpustné sloučeniny ulpívají na povrchu hydratačních produktů cementu a částečně brání styku s agresivním prostředím.

Podobně reagují organické kyseliny: v praxi je možno se setkat s kyselinou octovou, mléčnou, máselnou a dalšími zejména v zemědělství, v potravinářském a v chemickém průmyslu. Ve vodách může být obsažen také oxid uhličitý, který se vyskytuje ve třech formách:

- CO_2 a H_2CO_3 (asi 1%), při $\text{pH} < 4,5$;
- HCO_3^- , při $\text{pH} 4,5$ až $8,3$;
- CO_3^{2-} , při $\text{pH} > 8,3$. [26]

3.2.2.3 Koroze III. druhu

Koroze III. druhu představuje porušování betonu vlivem tvorby objemových sloučenin. Hlavním znakem tohoto druhu koroze je nahromadění a krystalizace solí či reakčních produktů působení agresivního prostředí v pórech a v kapilárách hmoty betonu spojené se zvětšením jejich objemu. Vyloučená pevná fáze a růst krystalů v pórové struktuře může vyvolávat značné tlaky

na stěny pórů, a tím i rozrušení betonové hmoty. Díky expanzi dochází k chemické a mikrostrukturní změně v cementovém tmelu. To může vést ke zhoršení vlastností fyzikálních a mechanických. Dojde ke vzniku trhlin, ztrátě soudržnosti a rozpadu betonu. Zvýší se propustnost, sníží se nepropustnost vody a pevnost, zejména v tahu za ohybu.

V tomto případě koroze dochází při pomalém průběhu korozního procesu k zaplňování pórů a dutin krystaly nově vznikajících sloučenin, a tím dochází v určitém stadiu k jakémusi falešnému zhutnění struktury, spojenému s jistým nárůstem pevnosti proti normálním podmínkám.

Tento typ koroze je způsobován zejména sírany, které mohou být vnitřní nebo vnější. Vnitřní sírany pocházejí z cementu, který obsahuje více síranů, než je obvyklé, nebo z kameniva. Vnější síranová koroze je důsledkem styku betonu s vodou nebo rostlou zeminou s vysokou koncentrací síranů. Obvyklé formy síranů v přírodním prostředí jsou síran vápenatý, hořečnatý a sodný. [7] [26]

3.2 Biologická koroze

Biologická koroze je spojena buď s fyzikálním působením vzniku napětí v důsledku růstu kořenů rostlin nebo jako důsledek působení produktů metabolických procesů rostlin a živočichů. Do procesů jmenovaných na druhém místě lze zahrnout činnost sulfurikačních bakterií a produkci karboxylových kyselin lišejníky, řasami, houbami a mechy. Významným příkladem poškození betonu v důsledku biologické činnosti bakterií je koroze betonu ve stokách, kde sulfurikační bakterie transformují síru vázanou v biologickém materiálu na sulfan a následně oxidují na kyselinu sírovou. Ta působí korozně na beton jednak H^+ ionty a také SO_4^{2-} anionty, jak je popsáno výše. [26]

4. Koroze způsobená chloridy

Pro beton se zabudovanými kovovými vložkami nebo s ocelovou výztuží vystavený působení vody obsahující chloridy, musí být vliv prostředí odstupňován podle vlhkostních podmínek v krycí vrstvě betonu. Nejnepříznivější podmínky v krycí vrstvě nebo na povrchu betonu představuje střídavé mokré a suché prostředí (XD3). Na povrchu betonu se ale nemusí projevit.

K intenzivnímu působení chloridů na betonové konstrukce dochází dále zejména u dopravních staveb v souvislosti s používáním chemických rozmrazovacích látek. Při jejich kontaktu s betonem dochází v mikrostruktuře betonu či malty ke vzniku objemných krystalických novotvarů, které expanzními tlaky rozrušují strukturu materiálu. Ten může být způsoben dvěma mechanismy. Při prvním z nich dojde k reakci mezi chloridy a cementovou matricí (C3A - trikalciumaluminát), přičemž produktem těchto reakcí může být především Friedlova sůl ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot Cl_2 \cdot 10H_2O$). Při navazující reakci dochází k reakci C4AF (celit) a tvorbě produktů velmi podobných Friedlově soli. Druhým mechanismem je fyzikální jev, v jehož důsledku může dojít ke vzniku tahových napětí ve struktuře materiálu. K němu dochází při kapilárním nasávání roztoků solí do pórů cementového kamene za následného vypařování vody. Jejich koncentrace vzrůstá až do vzniku nasycených roztoků a počátku krystalizace. Ta vede ke vzniku krystalů v omezeném prostoru pórů struktury betonu či malty, které navodí škodlivé tlaky vedoucí k rozrušení betonu. [7]

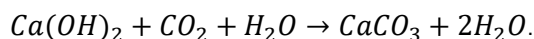
Tímto typem koroze se nadále zabývám v kapitole 7. Koroze drátkobetonu.

5. Karbonatace betonu

Karbonatace betonu je chemický proces, jehož důsledkem, přestože název napovídá něco jiného, je koroze ocelové výztuže. Je způsobená reakcí oxidu uhličitého se složkami cementového tmelu v betonu. [15]

Korozi ocelové výztuže způsobuje voda (relativní vlhkost) a kyslík. V prostředí, trvale suchém s relativní vlhkostí 50 % a nižší, ocelová výztuž ve zkarbonatovaném betonu nekoroduje. Jinak tomu je v případě prostředí vlhkého a střídavě suchého a vlhkého, kdy již ke korozi ocelové výztuže dochází. V mladém a nenarušeném betonu je mezi ocelovou výztuží a betonem slabá vrstva oxidů železa, která je velmi hutná a tudíž nepropustná. Bývá často označována jako pasivační vrstva. Krycí vrstva výztuže má vysoké pH a tím chrání zmíněnou vrstvu oxidů železa. Nejnebezpečnější je karbonatace tehdy, kdy oxid uhličitý pronikne, např. trhlinami, až k ocelové výztuži. [7]

V průběhu času se na beton, respektive na povrch betonu, dostává se vzduchem oxid uhličitý (CO_2), jehož obsah v relativně čisté atmosféře je průměrně 0,03 % objemového podílu, který reaguje se zásaditými složkami hydratace cementu za vzniku různých karbonátů. Tento plyn je těžší než vzduch, tudíž může být jeho koncentrace při zemi až desetkrát vyšší. Nepříznivý proces je velmi pozvolný, přičemž jeho rychlost značně závisí na pórovitosti a výskytu trhlin v betonu. Působením CO_2 nastává postupná přeměna vazných hydratačních produktů cementu v betonu (C-S-H fáze), zejména hydroxidu vápenatého – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, na kalcit, aragonit a vaterit. Jak postupuje oxid uhličitý do betonu, ubývá hydroxidu vápenatého a klesá alkalita v povrchových vrstvách betonu. Hydroxid vápenatý a oxid uhličitý se rozkládají na uhličitán vápenatý a vodu, jak je ukázáno v rovnici:



Pokud při karbonataci dojde k narušení pasivační vrstvy a dosáhne až k ocelové výztuži nastává rychlá koroze. Korozní zplodiny mají několikanásobně větší objem než původní ocel, což se projeví destrukcí povrchových částí betonu a obnažením výztuže, která následně snadno podléhá korozi. [12] [20] [16] [7]

5.1 Průběh karbonatace betonu

V první etapě karbonatace se přemění hydroxid vápenatý na uhličitán vápenatý, který přitom částečně zaplňuje póry. Hlavní vlastnosti betonu se

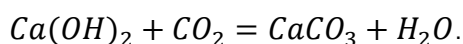
v tomto stádiu stávají lepšími. Vznikajícími karbonáty se zahušťuje pórová struktura, čímž pevnost vzrůstá.

V druhé etapě probíhají přeměny ostatních gelových hydratačních produktů cementu (kalciumsilikáthydrát a kalciumalumináthydrát), přičemž vznikají modifikace CaCO_3 s amorfním gelem kyseliny křemičité. Hrubozrnné krystalické novotvary CaCO_3 se vyskytují jen ojediněle. Vlastnosti betonu v druhé etapě karbonatace se příliš nemění a není evidována mechanická ani strukturální degradace betonu.

Třetí etapa karbonatace se vyznačuje překrytím prvotně vzniklých útvarů uhličitanu vápenatého CaCO_3 . Objevují se velmi početné a relativně rozměrné krystaly kalcitu a aragonitu. Mechanické vlastnosti betonu se během třetí etapy zhoršují vlivem krystalizačního tlaku na stěn pórů a alkalita betonu klesá pod hodnotu pH 9,5.

Čtvrtou etapu, kde nastává úplná karbonatace, charakterizuje stav, při kterém hrubé krystaly kalcitu a aragonitu přestupují celou strukturu cementového tmelu, což je v krajním případě spojené se ztrátou soudržnosti, tj. rozpadu cementového tmelu, a pevnosti betonu. Hodnota pH klesá až k pH okolo 8.

Karbonataci betonu je možné zjednodušeně znázornit rovnicí:



Popsaný proces karbonatace betonu má škodlivé důsledky nejen pro samotný beton, ale hlavně pro jeho ocelovou výztuž tím, že hodnota pH mezizrnného roztoku při karbonataci klesá z původní hodnoty 13 pod 9,5 a nižší. V silně alkalickém prostředí nekarbonatovaného betonu jsou oxidy a hydroxidy železa, které vznikají na povrchu oceli stabilní, ocelová výztuž je pasivována. Při poklesu pH už pod hodnotu 11,5 se stávají ochranné vrstvy na výztuži pórovitými a málo stálými až rozpustnými. Depasivace se objevuje už v druhém stádiu karbonatace. [7] [12]

5.1.1 Činitele ovlivňující rychlost karbonatace

Činitele, kteří ovlivňují rychlost karbonatace obvykle rozdělujeme do čtyř skupin:

- agresivitu prostředí,
- odolnost samotného betonu, resp. betonové krycí vrstvy výztuže,

- odolnost samotné ocelové výztuže,
- plánovaná životnost betonové konstrukce.

6. Koroze výztuže

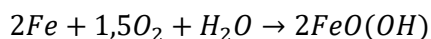
Beton má výbornou ochranu ocelové výztuže proti korozi, která je v něm uložená. Je to dáno vysokou hodnotou jeho pH. Díky degradaci betonu způsobené různými vlivy, které byly popsány výše, tak dochází ke korozi výztuže. Pod pojmem koroze rozumíme destrukci materiálů chemickými nebo elektrochemickými reakcemi s komponentami prostředí, u koroze kovů jsou to tedy analogicky nežádoucí poruchy především na povrchu kovů. Podle rozsahu poškození rozeznáváme tzv. korozi celkovou (plošnou) a korozi nerovnoměrnou – místní (lokalizovanou, bodovou, důlkovou).

Koroze výztuže:

- elektrochemická (v elektrolytu katoda, anoda),
- chemická (korozitvorné látky, kyseliny).

6.1 Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze výztuže je nejčastější proces koroze. Podmínkou koroze elektrochemické jsou rozdíly potenciálů na povrchu kovu dané heterogenitou. Pro její vznik je nutná přítomnost anody, katody a elektrolytu. Vlhkost v betonové hmotě vytváří vhodný elektrolyt a ocelová výztuž s patřičným elektrickým potenciálem vytváří anodu a katodu. Elektrický proud proudí mezi anodou a katodou a reakce má za následek zvětšení objemu kovu v konstrukci až na dvouapůlnásobnou hodnotu své původní tloušťky, což je způsobeno reakcí, při níž Fe (železo) oxiduje na Fe(OH)_2 (hydroxid železnatý) a Fe(OH)_3 (hydroxid železitý) a projevuje se jako rez FeO(OH) . [27]



Obecně tedy probíhá koroze na povrchu kovu za účasti kapalně nebo plynně fáze jako heterogenní reakce. Rozdíly potenciálů vznikají díky např. nerozpuštěným komponentám struktury, znečištění, lokálním rozdílům ve zpracování, rozdílnému pokrytí oblastí povrchu (např. produkty koroze), nebo příslušně rozdílné aeraci (např. ve štěrbinách nebo otvorech) a rozdílům koncentrace v elektrolytu. Rychlost koroze je ovlivněna velikostí povrchu kovu a koncentrací neboli hodnotou pH napadajícího média a další průběh koroze se určuje druhem, strukturou a rozpustností produktů. Rychlost koroze jednotlivých kovů závisí na podmínkách prostředí, u oceli uvádějí Mangat a Gurusamy [17] hodnoty od

6 - 60 $\mu\text{m}/\text{rok}$ u venkovského vzduchu (tj. vzduch v oblastech mimo velká sídla) a až po 64 - 230 $\mu\text{m}/\text{rok}$ pro mořský vzduch.

Výsledkem elektrochemických reakcí je vznik řady produktů koroze. Korozní produkty zvětšují objem výztuže a dochází ke vzniku trhlin, zmenšování, nebo úplnému porušení soudržnosti mezi cementovou matricí a výztuží, odtrhávání a odpadávání krycí vrstvy výztuže. [7]

6.2 Chemická koroze

Rychlá koroze nastane, když se pH betonu sníží, např. karbonatací, sulfatací apod., nebo když se do betonu zavedou agresivní chemikálie. Pasivační film se poruší, když jsou alkalické hydroxidy i značná část hydroxidu vápenatého zkarbonatované vzdušným oxidem uhličitým, nebo vyloužené působením měkké vody. Pokud jsou v působícím roztoku přítomny chloridy v Cl^-/OH^- poměru vyšším než 0,6, je doloženo, že ochranný film může být narušen i při pH vyšším než 9,6.

Kritická koncentrace chloridů v betonu je uváděna přibližně 0,4 hmotn. % na cement, s čímž korespondují i hodnoty ČSN EN 206 pro železobeton (0,2-0,4 %) a předpjatý beton (0,1-0,2 %). V běžném betonu se toto kritické množství pro začátek koroze výztuže pohybuje mezi 0,6 až 0,9 kg Cl^- na 1 m^3 . [7]

7. Koroze drátkobetonu (SFRC)

Drátkobeton patří mezi kompozitní materiály. Jeho specifické vlastnosti byly popsány v kapitole 1. Pro kvalitní drátkobeton musí být dobře navržena betonová směs (matrice) a vhodně zvolené drátky. Díky drátkům dochází k omezení vzniku trhlin a deformacím betonu. Některé drátky leží těsně na povrchu, a proto častěji podléhají korozi. Pro korozi drátkobetonu nebyl dosud proveden výzkum, který by se současně zabýval všemi působícími vlivy, na kterých koroze závisí. Ojedinělé výzkumy se na sebe vzájemně odkazují a množství poznatků je velmi malé. V mé bakalářské práci jsem provedla shrnutí těchto poznatků do uceleného závěru.

Tuto teoretickou část o korozi drátkobetonu jsem rozdělila do dvou částí. V první podkapitole jsou uvedeny jednotlivé výzkumy, studie a odborné práce, které se zabývají korozí drátkobetonu a vlivy, které ji vyvolávají a ovlivňují. Druhá část obsahuje shrnutí všech poznatků, které jsem se dočetla se v odborné literatuře a v rámci výzkumu je následně zpracovala.

7.1 Problematika výzkumných prací

Tato část bakalářské práce se zabývá výzkumnými pracemi, které se týkají koroze drátkobetonu. Popisují zde jejich obsah a hodnotím jejich výsledky co jednotlivé práce obsahují, jaké parametry byly pro ně klíčové a k jakým závěrům autoři došli.

7.1.1 Korozní odolnost cementových kompozitů v drátkobetonu

Corrosion resistance of SH-SFRC [23]

Tento článek se zabývá korozní odolností cementových kompozitů vyztužených ocelovými drátky v prostředí obsahujícím chloridy.

Iniciujícím podmětem pro tuto studii bylo prodloužení životnosti drátkobetonových konstrukcí. Opravy trhlin ve stávajících konstrukcích jsou velmi nákladné a hlavním tématem studie bylo, jak se dosáhne zvýšení tažnosti, která má pozitivní vliv na zvýšení odolnosti proti vzniku a rozvoji trhlin v drátkobetonu. Cílem bylo poskytnout užitečné informace o rezistenci SH-SFRC (cementových kompozitů z drátkobetonu) proti chloridové korozi vyskytující se v mořském prostředí. Specifickými cíli bylo zkoumání korozní odolnosti SH-SFRC v prostředí chloridů, vlivu šířky trhliny na korozní odolnost a vyhodnocení účinku přidáním dusičnanu vápenatého jako inhibitoru koroze.

Předpokladem pro tuto studii bylo zjištění specifické funkce mikrotrhlinek ve vzorcích SH-SFRC, která zabraňuje pronikání škodlivých látek (mezi které patří například chloridy) k drátkům a brání tak korozi. Tyto trhliny zároveň poskytují příznivé podmínky pro samovolné hojení trhlin.

Studie popisuje přípravu materiálů a vzorků. Byly použity dva typy ocelových drátků. Zkroucené ocelové drátky trojúhelníkového průřezu se třemi žebry po délce drátku a zaháknuté drátky na svých koncích. Tyto drátky byly přidány do jednotlivých matric společně s dalšími materiály. Vzorky byly roztříděny do dvou skupin. První skupinu tvořily vzorky s trhlínami a druhou vzorky bez defektu. Vzorky bez trhlin se rozdělily na další dvě podskupiny. U první skupiny byly zkoumány vlastnosti v tahu před a u druhé po vystavení cyklickému smáčení 3,5% roztoku chloridu. Po smáčení byly vzorky podrobeny sušení. Korozní odolnost byla vyhodnocena měřením. Aplikovaných cyklů bylo celkem 105 a po jejich účinkování se významně snížila tažnost.

Postup testu měření byl následující. Zkoušky tahem byly provedeny pro jednotlivé skupiny za použití univerzálního testovacího přístroje. Rychlost posunu stroje byla udržována na 1 mm/min.

Mezitím byla provedena měření elektrického odporu, které slouží jako podklad pro vyhodnocení stavu koroze ocelových drátků. Měření elektrického odporu může poskytnout užitečné informace týkající se migrace chloridových iontů a vlhkosti, což silně ovlivňuje korozi ocelových drátků. Nižší hodnoty elektrického odporu ukazují vyšší riziko koroze ocelových drátků. U drátkobetonu je měření sporné. Drátky jsou náhodně rozloženy v betonu a díky tomu je nemožné vyhodnotit stav koroze každého ocelového drátku pomocí měření elektrického odporu.

Dalším aspektem, který byl v této studii, bylo přidání dusičnanu vápenatého do cementové matrice.

Vzorky, které byly vystaveny 105 chloridovým cyklům, vykazovaly více mikrotrhlin a jejich odolnost v tahu byla značně snížena. Měření elektrického odporu vykazovalo významně nižší hodnoty závislé na zvyšujícím se počtu chloridových cyklů. Tím bylo prokázáno, že chloridové cykly urychlují migraci vlhkosti a chloridů do SH-SFRC. Rozdílné výsledky byly u vzorků se zkroucenými drátky a drátky s háčky. Bylo tedy zjištěno, že tvar drátku ovlivňuje elektrický odpor.

Průběh koroze na anodě má za následek snížení průřezové plochy drátku a vznik rzi. Produkty koroze zabírají mnohem větší objem než původní ocelový drátek. To vede k odlupování okolní matrice. Výsledky ukázaly, že malá průřezová plocha drátků nemá dostatečně velké produkty koroze, aby způsobila vznik trhlin a odlupování okolní matrice. Korozní odolnost byla závislá na šířce mikrotrhlin

Pomocí mikroskopu byla jasně pozorována koroze ocelových drátků po 105 chloridových cyklech. Úroveň koroze se lišila v závislosti na umístění ocelových drátků ve vzorku. Většina drátků do 4 mm od povrchu vzorku byla zkorodována. Tyto drátky vykazovaly silnou korozi, a některé dokonce i jejich zlomení, či jiné narušení samotného drátku. Ocelové drátky, které byly umístěné více než 4 mm od povrchu vykazovaly částečnou korozi a roztažení namísto jejich přetržení.

Tvar ocelového drátku způsobuje rozdíly v pevnosti v tahu po zatížení chloridy u vzorků s trhlinami při porovnání se vzorky bez trhlin. Toto se potvrdilo u vzorků

s drátky s koncovými háčky, kde se snížila odolnost v tahu. U vzorků se zakroucenými drátky nebyl zjištěn žádný prokazatelný rozdíl. Tudíž se prokázalo, typ drátku mění charakter vzorku a může změnit tahovou odolnost.

V této studii byl zkoumán vliv přidání dusičnanu vápenatého na tahovou odezvu SH-SFRC po zatížení chloridy. Přidáním dusičnanu zlepšilo pevnost v tahu vzorku a korozní odolnost ocelových drátků. Naopak přidáním dusičnanu vápenatého nevedlo k významnému zvýšení korozního potenciálu. Tento korozní potenciál mohl být ovlivněn více migrační vlhkostí v mikropórech, které se zvětšily díky přidání dusičnanu vápenatého.

V závěru této práce je uvedeno, že výsledky měření stavu koroze ocelových drátků jsou stále nejisté. Příčinou je mnoho ovlivňujících faktorů, jako je vlhkost, teplota, nasycení pórů, nebo kvalita betonu.

7.1.2 Povrchová koroze drátkobetonu

Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete [8]

Tato studijní práce je zaměřena na povrchovou korozi drátkobetonu. Zaměřuje se především na vliv vodního součinitele v matrici. Je zde zkoumán vliv vysokého a nízkého vodního součinitele na cementovou matrici s ohledem na korozi. Popisuje se zde rozdíl mezi železobetonem a drátkobetonem, a to především v uložení výztuže a drátků. Drátkobeton obsahuje rovnoměrně rozptýlené drátky v cementové matrici a jejich uspořádání je náhodné. Některé drátky leží těsně na povrchu a jejich krycí vrstva je nulová. Cílem této studie je měřit minimální krycí vrstvu betonu, která kryje drátky a které mají zabránit vzniku povrchové koroze a zvýraznit její vztah k poměru vodního součinitele a pórovitosti povrchu drátkobetonu.

Metodika, která byla použita pro toto měření bylo počítání množství drátků, které jsou v určité hloubce betonu. Pro každou plochu bylo spočítáno množství drátků, které se objevují na povrchu. Po prvním spočtení byla ubroušena tloušťka 0,02 nebo 0,1 mm a opět byl proveden výpočet drátků, které se vyskytovaly na daném povrchu. Tento postup se opakoval až do hloubky 1 mm. Pro toto měření byla použita bruska v laboratoři LMDC, která má možnost brousit až do 1/10 mm.

V této práci je popsáno, jak se postupovalo u broušení a měření počtu drátků na vzorku. Byly provedeny dvě série testů, z nichž jeden s vysokým poměrem

vodního součinitele w/c a dvěma různými typy ocelových drátků a druhý s nižším vodním součinitelem w/c.

Vysoký poměr w/c = 0,78 byl zvolen jako případ drátkobetonu s nízkou kvalitou. Jeden typ ocelových drátků byl se zahnutými konci o délce 30 mm a průměru 5 mm a druhý typ byly mikrodrátky o délce 13 mm a průměru 0,17 mm, které měly rovný konec. Po zhotovení drátkobetonových vzorků byly tyto vzorky umístěny do zrychlené korozní komory, kde byly vystaveny suchým a mokrým cyklům.

Skvrny koroze se začaly objevovat již po prvním měsíci a pokračovaly až do konce 7. měsíce, kdy bylo dosaženo stabilizace počtu míst koroze. Všechny skvrny byly zpracovány následujícím způsobem:

- korozní skvrny byly spočítány pouhým okem a lupou,
- postup povrchového broušení, jak již bylo uvedeno výše.

Závěrem bylo shrnutí, do jaké hloubky se mohou vyskytovat drátky, aby se zabránilo povrchové korozi. Betonová matrice s nižším vodním součinitelem má příznivý vliv na korozi drátkobetonu.

7.1.3 Trvanlivost stříkaného betonu

Durability of sprayed concrete. [24]

Cílem této práce bylo zkoumat mechanismy, které řídí iniciaci šíření koroze pro stříkaný beton s trhlinami a porovnat, zda je korozivzdornost ocelových drátků v trhlinách problémem trvanlivosti u stříkaných betonových konstrukcí nebo ne. Stříkaný beton se nejčastěji používá v relativně tenkých vrstvách (50 - 100 mm) a kvalita betonu je vysoká.

Práce je rozdělena do 6 kapitol. V první kapitole je popsán úvod do této problematiky. Kapitola 2 obsahuje výsledky a soupis stávajících stříkaných betonových konstrukcí, které byly zkoumány po různých délkách expozice v různých typech prostředí. Jsou zde zahrnuty struktury ocelových drátků a informace o jejich chování. V kapitole 3 jsou prezentovány předchozí výzkumy v literatuře o drátkobetonu s trhlinami. Jsou zde zahrnuty pouze hlavní studie kvůli rozsahu práce. Kapitola 4 se zabývá probíhajícími terénními expozicemi a drátkobetonem s trhlinami, který byl zahájen roku 1997. V kapitole 5 jsou popsány zrychlené laboratorní expozice se vzorky s trhlinami z drátkobetonu.

A kapitola 6 se stručně zabývá analytický modelem, který by hodnotil vliv koroze na únosnost a odolnost proti vnějším vlivům.

Byly testovány dva různé přístupy ke studiu koroze ocelových drátků v trhlinách. První přístup bylo pozorování venkovní expozice. Nosníky z drátkobetonu s trhlinami byly vystaveny venkovnímu prostředí v terénu na třech různých místech:

- tunelové prostředí,
- otevřená silnice,
- prostředí u řeky.

Šířka trhliny, délka drátku, složení matrice a urychlovače jsou parametry, které byly sledovány. Vzorky byly vystaveny po dobu 5 let prostředí podél dálnice a přímo vystaveny stříkající vodě s odmrzovacími solemi. Po skončení experimentu vzorky vykazovaly silnou korozi na drátcích, které přemostovaly trhlínu. Ztráta 15-20 % průměru drátku ve vnějších 25 mm je běžná. Vzorky s delšími drátky (+10 mm) vykazovaly téměř dvojnásobný úbytek. Vzorky na jiných místech vykazovaly korozi, ale v mnohem menší míře.

Laboratorní testy měly za účel vyvinout techniku pro získání parametrů lepším způsobem než v terénu a provést testy v kontrolovanějším prostředí. V laboratorních expozicích bylo pozorováno stejné chování jako ve vnější expozici. Kromě testovaných parametrů byly v laboratoři zkoušeny i různé kvality ocelových drátků. U drátků z nerezové oceli se předpokládá, že poskytnou plnou ochranu (při nejmenší životnosti 50 let), zatímco pozinkované drátky jen dočasnou ochranu. Jeden rok v laboratoři odpovídá 50 let v terénu.

Výsledky ukázaly, že lze očekávat počáteční zvýšení zbytkové pevnosti, zejména pro šířky trhlín 0,5 mm. Po pěti letech byla pozorována změna. Počáteční síla se snížila až na 30 % její původní hodnoty.

Informace z této výzkumné práce, které se zde vyskytují, tak jsou použity v kapitole 7.2 Stav problematiky této bakalářské práce.

7.1.4 Koroze ocelové výztuže v drátkobetonu při zatížení chloridy

Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack - State of.the-art [5]

Tento článek shrnuje vliv ocelových drátků na hlavní parametry koroze běžné ocelové výztuže. Schopnost drátků omezovat šířku trhliny prokázala, že se snižuje prostupnost chloridů v betonu s trhlinami, zatímco chloridová difúze v betonu bez trhlín zůstává nedotčena. Ocelové drátky v betonu jsou považovány za izolované díky pasivní vrstvě s vysokou impedancí. Drátky z nerezové oceli mohou být poškozeny silnou korozí i při vysokém obsahu chloridů. Publikovaná experimentální pozorování ukazují, že drátky měly malý vliv na rychlost koroze výztuže. Tento přehled literatury ukazuje, že mírně zlepšená korozní odolnost ocelové výztuže, dosažená přidáním ocelových drátků, je způsobena zejména nižším pronikáním chloridů v důsledku zastaveného růstu trhlín.

V této práci jsem vybrala část, která se zabývá korozí ocelových drátků způsobenou chloridy. Je zde převážně souhrn několika citovaných studií, které se zabývají touto problematikou. Jednotlivé studijní práce jsem do této kapitoly 7.1 Problematika výzkumných prací nezahrnovala, jelikož informace, které jsem z nich použila jsou v kapitole 7.2 Stav problematiky.

Je zde uvedeno, že běžné uhlíkové drátky mají tendenci korodovat, když se na povrchu vytvoří trhliny. V řadě zkoušek byla zmíněna kritická šířka trhliny, pod kterou je zabráněno korozi drátkům, které přemostují trhlinu. Zdá se, že tato kritická šířka trhliny je silně závislá na použitém typu, jak zde bylo zjištěno.

Byl proveden experimentální výzkum, který vyhodnotil dlouhodobou odolnost mořskému prostředí na vzorcích z drátkobetonu s trhlinami a bez trhlín. Byly použity dva typy drátků, a to nízkouhlíkové a nerezové ocelové drátky. Podmínky byly simulovány s použitím postřiku mořské vody ve vytvrzovací komoře, kde byly vzorky podrobeny dvěma mokřými dvěma suchým cyklům, z nichž každý trval 24 hodin. Po 450 dnech bylo zjištěno u obou typů vzorků, že u drátků, které přemostují trhlinu o šířce větší než 0,24 mm pro uhlíkové drátky větší než 0,94 mm pro nerezové drátky, byla zahájena důlková koroze. Uvádí se zde porovnání z jiných studií, že po 18 měsících zatěžovacích cyklů byla maximální hloubka koroze drátků 16 μm lokálně a šířka trhliny do 0,5 mm neměla nepříznivý vliv na korozi. Další výsledky z výzkumů ukázaly, že přemostění trhlín drátky, které

jsou napadeny korozí, mohou vést k významné ztrátě mechanických vlastností drátkobetonu. V jiné studii se autor zabýval šířkou trhlin při řízené rychlosti koroze ocelových drátků v drátkobetonu. Bylo pozorováno, že po pouhých sedmi měsících vystavení mořskému prostředí došlo k podstatným ztrátám pevností a šířka trhlin byla nad 0,1 mm. Z výsledků laboratorních testů vyplynulo, že delší drátky vykazují vyšší rychlost koroze a že širší trhliny způsobují větší ztráty průměru drátku.

Kosa a spol. zkoumali rozsah koroze a její vliv na snížení pevnosti a houževnatosti drátkobetonu. Vzorke dvou různých rozměrů byly vystaveny cyklům sušení a smáčení po dobu dvou, šesti a devíti měsíců. Před i po zatěžování těmito cykly byly podrobeny ohybovým zkouškám. Výsledky ukázaly snížení pevnosti a houževnatosti s rostoucími expozičními časy, které přispívaly ke snížení průměru drátku.

Tento článek uvádí, že drátky uvnitř betonu zůstávají bez koroze, i když je beton zcela nasycen chloridy. To dokazuje, že kritický obsah chloridů je pro drátkobeton vyšší než pro železobeton

Podle Daubeschmidta je zvýšená korozní odolnost ocelových drátků způsobena kombinací několika faktorů a to:

- krátká délka ocelových drátků, která brání velkým potenciálním rozdílům podél drátků a tím omezuje tvorbu odlišných anodových a katodových oblastí,
- podmínky technologie, které umožňují vytvoření velmi tenké, dobře definované mezifázové vrstvy bohaté na $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bez přítomnosti pórů.

Someh a Saeki zkoumali beton s hlavní nosnou ocelovou výztuží s přidáním ocelových drátků. Na základě předchozích zkušeností tvrdili, že pozinkované drátky budou působit jako protektory protikorozní ochrany fungující na principu anodické polarizace. Tímto se dosáhne ochrany hlavní nosné výztuže. Vystavili vzorky, o rozměrech 100 × 100 × 400 mm, 12 hodinovému mokrého procesu a 12 hodinovému sušení. Jejich výsledky ukázaly, že výztužné ocelové pruty v betonu s 1,5 % objemu zinkem potažených drátků zůstávaly po dobu šesti měsíců bez koroze, zatímco pruty uložené v prostém betonu vykazovaly po třech měsících důlkovou korozi. K tomu došlo navzdory skutečnosti, že koncentrace chloridů byla v prvním případě jasně vyšší.

Studie provedená Matsumotem a kol. měla předpoklad, že ocelové drátky mohou efektivně snížit množství koroze ocelových výztužných prutů. Měli za cíl vytvořit metodu hodnocení trvanlivosti mechanismů pro snížení koroze. Použity byly tři typy vzorků a to:

- prostý beton,
- drátkobeton,
- vzorky prostého betonu, ve kterých byla krycí vrstva 15 mm nahrazena drátkobetonem.

Po absolvování 95 cyklů smáčení v 10 % roztoku NaCl a čtyřech dnech sušení se ukázalo, že vzorek z prostého betonu zamezuje podélnému smrštění, zatímco vzorky z drátkobetonu jako krycí vrstva vykazovaly příčné i podélné trhliny v rozsahu 0,1 až 0,5 mm. Vzorky z drátkobetonu nevykazovaly žádné trhliny na povrchu. Koroze byla rozsáhlejší u vzorků s trhlínami. Došli k závěru, že při použití drátkobetonu může dojít k malému potlačení koroze, ale jeho účinnost je podmíněna absencí povrchových trhlín. Když se objeví korozi vyvolané trhliny, rychlost koroze se může zvýšit na hodnoty podobné hodnotám prostého betonu.

7.1.5 Korozní odolnost drátkobetonu - rešerše

Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete – literature review [19]

Tento článek má formu rešerše. Shrnuje dosavadní literaturu zkoumající korozi drátkobetonu, která je ovlivněna přítomností chloridu a karbonatů. Článek shrnuje hlavní faktory ovlivňující trvanlivost drátkobetonu vystaveného koroznímu prostředí a systematicky analyzuje publikovaná experimentální data o zhoršení kvality drátkobetonu, který byl vystaven působení chloridů a karbonatů. Práce je rozdělena do dvou částí, z nichž je první věnována korozi drátkobetonu vyvolané chloridy a druhá korozi způsobené karbonatů. Tato práce byla mým hlavním zdrojem pro tvorbu kapitoly týkající se této problematiky. Výsledky této rešerše neuvádím v této kapitole, protože jsou použity v kapitole 7.2 Stav problematiky.

Obě dvě části rešerše mají stejnou strukturu. Zabývají se stejnými body a jsou zde popsány rozdíly mezi korozi vyvolanou chloridy a korozi způsobenou karbonatů. Jako první je řešena trvanlivost drátkobetonu. Zde je popsána

kvalita betonu, druh použitého materiálu a jeho jakost, doba a podmínky expozice, a také existence a velikost trhlin. Tento přehled shrnuje výsledky a závěry dostupných publikovatelných rešerší.

Podmínky expozice jsou děleny do dvou částí, a to na expozici laboratorním podmínkám a expozici vnějšímu prostředí.

Charakteristika ocelového drátku v použitých vzorcích je detailně popsána a v rešerši jsou uvedeny následující vlastnosti: typ, materiál a rozměry

Kvalita betonové matrice je navrhována jako kritický faktor, který je třeba vzít v úvahu při prevenci koroze drátkobetonu vyvolané chloridy. Poměr vodního součinitele je parametr, který se v této práci řeší velmi podrobně. Jsou zde popsány hodnoty w/c pro drátkobeton s trhlinami a bez trhlin.

Samotné trhliny byly zde klasifikovány do tří kategorií a stejné členění jsem uvedla v kapitole 7.2.8 Trhliny. Šířky trhlin větší než 0,5 mm nevykazují žádné samovolné hojení trhliny. Navzdory lokálnímu poškození v oblasti trhliny nedochází k odlupování sousední matrice způsobené korozi drátku. Pozinkované drátky v úzkých trhlinách prodlužují dobu iniciace koroze, ale při delších expozicích se šíření koroze nelze vyhnout. Další výsledky ale ukazují, že drátky z nerezové oceli nebo pozinkované drátky přemostující trhliny nekorodují a ztráta pevnosti v tahu je menší. Koroze ocelových drátků v drátkobetonu způsobená chloridy je jedna z nejvýznamnějších typů, která se u drátkobetonu vyskytuje.

V porovnání s množstvím údajů, které zkoumají korozi způsobenou chloridy, je podstatně méně údajů, které zkoumají korozní odolnost drátkobetonu vystaveného karbonatoci. Nedostatečná data a velké množství proměnných ovlivňujících výsledky brání definování prokazatelných závěrů a stanovení mezních stavů. Tato rešerše popisuje většinu poznatků, které byly získány, ale nebylo možné definovat žádné prokazatelné závěry.

Koroze způsobená karbonatoci je obecně považována za méně agresivní než chloridová koroze. Důvodem je fakt, že proces karbonatace je mnohem pomalejší než pronikání chloridů a riziko vyvolání vzniku trhlin u drátkobetonu je minimální. Proto se většina studií zabývá chloridovou korozi, která je závažnějším problémem.

Závěry z této studie hodnotí výše zmíněnou problematiku. Trvanlivost drátkobetonu s trhlinami, způsobenými vystavením chloridům a karbonatům, je diskutována na technické a vědecké úrovni. Mezi akademiky existuje podstatný pohled na existenci kritické šířky trhlin pod 0,2 mm, kde je koroze drátků omezena. Mechanismy, které řídí korozi ocelových drátků v drátkobetonu s trhlinami způsobenými chloridy a karbonáty, jsou stále nejasné. Tato rešerše navrhuje alternativní vylepšení teorie koroze ocelových drátků přemostující trhliny v drátkobetonu vystavených chloridy a karbonátům.

7.1.6 Vliv ocelových drátků na korozi železobetonu v chloridovém prostředí

Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: A review [3]

V posledních letech několik autorů zkoumalo vliv drátků na mechanickou odezvu zatěžovaných železobetonových prvků. Obecně je známo, že vzorky s ocelovými drátky vykazují schopnost přenášet napětí i při velkých deformacích. Příčné trhliny jsou užší a blíže u sebe než u betonových prvků.

Přidání ocelových drátků do betonu může ovlivnit šířku příčných trhlin, které hrají zásadní roli při korozi ocelové výztuže.

Arya a Ofori-Darko zkoumali vliv rozložení trhlin na korozi a došli k závěru, že výhodné rozložení trhlin by mělo mít za následek menší množství koroze. Drátky by tedy měly pozitivní vliv, protože trhliny se v prvcích drátkobetonu nacházejí těsněji.

Principy, které popisují korozi železobetonu, jsou aplikovány na drátkobeton. Výsledky několika výzkumů naznačují, že ocelové drátky vykazují ve srovnání s běžnou ocelovou výztuží lepší odolnost proti korozi. Je zde popisována hloubka krytí drátků. Drátky mají nulovou, téměř zanedbatelnou hloubku krytí. Tím jsou drátky obzvláště citlivé na vnější prostředí a v důsledku toho je pro tyto drátky očekávána vysoká degradace. Tento fakt byl experimentálně potvrzen, kdy drátky v hloubce do 3 mm utrpěly silnou korozi, zatímco zbytek drátků zůstal bez koroze.

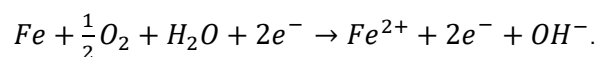
V této studii bylo zjištěno, že snížením poměru vody a cementu v betonové matici se může snížit poškození drátků. Snížením vodního součinitele lze také omezit oblast, ve které jsou drátky náchylné ke korozi až do hloubky 0,2 mm.

Kritická šířka trhliny byla v této práci odhadnuta na 0,1 až 0,25 mm. U větších trhlin dochází k větší korozi drátků. Kritický obsah chloridů pro železobetonové konstrukce a pro drátkobetonové konstrukce je prokazatelně jiný. Tato hodnota zde byla popisována. Bylo zjištěno, že je mnohem vyšší pro drátkobeton. Someh a Saeki se snažili využít mechanická vylepšení drátkobetonu v kombinaci s anodickou ochranou, kterou zinek poskytuje oceli, přidáním pozinkovaných ocelových drátků do betonu. Jejich výsledky ukázaly, že ocelové pruty vložené do tohoto typu betonu zůstaly bez koroze po dobu 6 měsíců, zatímco pruty vložené do prostého betonu vykazovaly korozi po 3 měsících.

Autoři dospěli k závěru, že ocelové drátky by neměly být používány v kombinaci s ocelovými výztužnými pruty v chloridovém prostředí.

7.2. Stav problematiky

Za většiny podmínek mají dobře navržené a provedené drátkobetonové konstrukce dobrou životnost. Vysoká alkalita roztoku pórů betonu poskytuje ideální prostředí, kde může být výztuž chráněna před korozi. Drátky v drátkobetonu se dají dobře chránit proti alkalickému prostředí, které poskytuje beton. Koroze však zůstává jedním z největších problémů, které se týkají drátkobetonových konstrukcí. Pro vznik koroze jsou nezbytné některé parametry. Přítomnost kyslíku a vlhkosti (elektrolytu) jsou dva nejdůležitější parametry. Koroze je elektrochemický proces, který je charakterizován výměnou elektronů, jak již bylo popsáno v kapitole 6. Abychom získali elektrickou rovnováhu, volné elektrony nemohou existovat ve větším rozsahu. Pro železo ve vodě je oxidačně - redukční reakce popsána v následující rovnici:



Hnací síla pro korozi je termodynamicky podmíněná. Elektrochemická reakce nastává v důsledku potencionálních rozdílů. Slabé části nebo vady mikrostruktury oceli, nebo místní změny v kontaktu mezi drátkem a betonem mohou být důvodem potenciálních rozdílů. [24]

Výzkumy, které se věnují této problematice sledují každý jen jeden parametr. Tudíž se nedá přesně říci, které složení drátkobetonu je ideální pro všeobecné podmínky. Výzkumy sledují tyto parametry:

- kvalitu betonové směsi,
- drátky,
- krycí vrstvu,
- působení chloridů na drátkobeton,
- působení karbonatace na drátkobeton,
- trhliny (vznik trhliny, šíře trhliny a působení na korozi),
- samovolné hojení trhlin.

7.2.1 Kvalita betonové matrice

Kvalita betonové matrice by měla být navrhována s větší pozorností, kvůli prevenci koroze drátků v betonu vyvolané chloridy. Předpokládá se, že hlavní proměnné pro návrh směsi, ovlivňující trvanlivost železobetonu, mají podobné účinky i na SFRC, tj. poměr vody k pojivu (w/b) a typ a kvalita pojiva.

Bylo testováno mnoho poměrů w/b pro drátkobeton v rozsahu 0,3 - 0,7. Pro horní hranici w/b drátkobetonu s trhlinami i bez trhlin je navržena hodnota 0,5. Předpokládá se, že pro tuto hodnotu vodního součinitele koroze neprostoupí hlouběji než do 1 mm v drátkobetonu s trhlinami. Další výzkumy předpokládají nižší hodnoty (např. $w/b < 0,4 - 0,45$), aby byla zajištěna trvanlivost drátků v drátkobetonu s trhlinami. Neexistuje žádný jednoznačný trend, pokud jde o škodlivý účinek na pevnost v tahu drátkobetonu s trhlinami. K dispozici jsou omezené údaje o dopadu vystavení chloridům na pevnost v tahu drátkobetonu. Dostupné údaje naznačují větší zhoršení pevnosti v tahu při nižších poměrech w/c (vodního součinitele). To nesouhlasí s pozorováním poměru pevnosti v tlaku a očekávaného korozního chování drátku, např. vyšší poměry w/c vedou k většímu poškození korozí. [8]

Všeobecně se očekává, že betonová matrice o vyšší hustotě bude přispívat k odolnosti proti vlivu karbonatace, tedy betonová matrice s nižším poměrem vody k cementu. Dochází tím k nižšímu pronikání oxidu uhličitého CO_2 a následně nižším rychlostem karbonatace. V různých výzkumech byly zkoumány poměry vody k pojivu (w/b) v rozmezí 0,29-0,78. Tyto hodnoty vykazující celkově dobré chování drátkobetonu proti karbonačním účinkům $w/c < 0,50$. [19]

7.2.3 Drátky

Hlavní proměnné, které definují trvanlivost drátku a jeho odolnost vůči chloridům a karbonataci jsou:

- typ drátku (např. způsob výroby),
- typ oceli a povlaků,
- rozměry drátku (délka a průměr),
- objemový podíl drátků. [19]

Drátky, tažené za studena, vykazují větší pravděpodobnost koroze a silnější redukci pevnosti v tahu drátkobetonu. Drátky vyrobené z nerezové oceli mají

velkou odolnost proti korozi a přinášejí zanedbatelné mechanické zhoršení. Vyšší pravděpodobnost zahájení koroze vyvolané chloridem mají deformované ocelové drátky tažené za studena (např. s koncovými háčky). Na ohýbaných částech neopracovaného ocelového drátku taženého za studena totiž dochází k mikroskopickému narušení struktury. To má za následek časnou iniciaci koroze. [19] [31]

Je prokázáno zvýšení odolnosti vůči důlkové korozi u drátků z nerezové oceli v porovnání s uhlíkovou ocelí. Omezuje to vznik rzi na povrchu a také zajišťuje zanedbatelné korozní poškození v drátkobetonu s trhlinami. Vrstvy z povlakované oceli (tj. mosazné nebo pozinkované) vykazují protichůdné výsledky:

- dosažení podobného dlouhodobého účinku ve srovnání s drátkem z uhlíkové oceli, což prodlužuje dobu iniciace koroze pro borovou korozi,
- nebo alternativně vykazující úplnou ochranu proti korozi pro dlouhodobé expozice. [19]

Zatímco běžná ocelová výztuž je efektivně umístěna podle směru tahových napětí, drátky jsou náhodně orientovány. Drátky nemohou nahradit zcela běžnou ocelovou výztuž, ale mohou být začleněny do cementové matrice pro zlepšení odezvy vyztuženého betonu s trhlinami. Zvyšují zejména houževnatost křehké matrice betonu a vedou k větší únosnosti. Díky zvýšené houževnatosti dokáže drátkobeton přenášet tahová napětí i přes trhlinu. [5] [19] [3]

Ve vytvrzeném drátkobetonu je propustnost přisuzována kapilární pórovitosti cementové pasty a snižuje se s klesajícím poměrem w/c (vodní součinitel) a také s tím, jak postupuje hydratační proces.

Mangat a Gurusamy [17] studovali vliv přidávání různých typů ocelových drátků na průnik chloridů a zjistili, že drátky mají nevýznamný vliv na neporušený drátkobeton. U drátkobetonu s trhlinami měl přídavek drátků malý účinek na trhliny s šířkou pod 0,2 mm. Tento účinek se stal významným až pro trhliny šířky nad 0,5 mm.

Vyztužení betonu drátky způsobuje lepší odolnost vůči pronikání vody. Rapoport [25] zjistil, že propustnost drátkobetonu není ovlivněna u trhlín $< 0,1$ mm. Díky korozním produktům se zvětšuje objem drátku a dochází tím dočasně ke snížení propustnosti až do šířky trhliny 0,5 mm.

Jak již bylo popsáno výše, krátké ocelové drátky jsou rozloženy náhodně a rovnoměrně do betonové matrice. Měřením elektrického odporu je nemožné vyhodnotit stav koroze každého jednotlivého drátku. Elektrický odpor může poskytnout užitečné informace týkající se migrace chloridových iontů a vlhkosti. To silně ovlivňuje korozi ocelových drátků. Je dobře známo, že zvýšení migračních chloridů a vlhkosti vede ke snížení elektrického odporu. [24] [2]

7.2.4 Krytí drátků

Navzdory skutečnosti, že principy koroze v železobetonu jsou stejně aplikovatelné na drátkobeton, tak výsledky několika zkoušek naznačují, že ocelové drátky mají lepší odolnost proti korozi ve srovnání s běžnou ocelovou výztuží. U drátkobetonu budou některé drátky ležet na povrchu betonu s malou, téměř zanedbatelnou hloubkou krytí. Intuitivně by tyto drátky měly být obzvláště citlivé na vnější látky. V důsledku toho by se při vystavení agresivnímu prostředí u nich očekávala vysoká degradace, což bylo také experimentálně potvrzeno. Drátky umístěné v hloubkách do 3 mm vykazovaly známky silné koroze, zatímco zbytek drátků, tj. těch, které byly hlouběji než 3 mm, zůstaly bez koroze. Koroze povrchových drátků je obvykle doprovázena extenzivními korozními skvrnami, které se objevují na povrchu betonu. Ve studii, kterou provedl Balouch [9] bylo zjištěno, že snížení poměru vody a cementu v betonové směsi může snížit poškození drátků, jakož i omezit oblast, ve které jsou drátky náchylné k silnému poškození. K tomuto poškození může dojít až do hloubky 0,2 mm. Faktory, jako je například agresivita prostředí nebo doba expozice, mohou mít vliv na hloubku, při které jsou drátky snadno zkorodovány. Dostupná data naznačují, že tato hloubka je obecně menší než 10 mm i při dlouhých expozicích. [5] [8] [4]

7.2.5 Chloridy působící na drátkobeton

Chloridová koroze je všeobecně popsána v kapitole 4.

Kritický obsah, respektive prahová hodnota chloridů, představuje základní parametr, na který se dnes navrhuje většina konstrukcí a tím se zajišťuje jejich životnost. Kritický obsah chloridu je obecně akceptován v rozmezí 0,4 - 1,0 % Cl⁻ (hmotnosti cementu) pro železobetonové konstrukce. Bylo zjištěno, že kritický obsah chloridů je mnohem vyšší u ocelových drátků. Mangat a Gurusamy [17] dokázali, že drátky uvnitř v drátkobetonu zůstávají bez koroze pro koncentrace chloridů až do 1,7 % Cl⁻. Tyto výsledky jsou v souladu s Janotkou a spol., [13] kteří

zjistili, že nezbytná koncentrace chloridů pro iniciování koroze u ocelových drátků byla nejméně třikrát vyšší než u železobetonu. Také uvedli, že drátky vložené do betonu, s hodnotami pH nad 12, vykazují výrazně vyšší kritický obsah chloridů a to až 5,2 % Cl⁻. [3]

7.2.5.1 Trvanlivost drátkobetonu vystaveného chloridům

Existuje výzkum zkoumající trvanlivost SFRC vystaveného různým prostředím kontaminovaným chloridy. Výsledky ovlivňuje velké množství proměnných, které brání přímému srovnání mezi studiemi, a to

- různá kvalita betonu,
- druh, materiál a jakost drátků,
- doba a podmínky expozice,
- existence a velikost trhlin. [19]

Obecně se předpokládá, že jakmile se na povrchu drátku dosáhne kritické koncentrace chloridů (tj. kritického prahu chloridů), drátky se lokálně depasivují. To obvykle vede k iniciaci důlkové koroze ve slabších oblastech nebo mikrotrhlin v oxidované vrstvě. Literatura udává pro běžnou ocelovou výztuž prahové hodnoty chloridů v rozmezí 0,4-1,0 % (hmotnosti cementu) pro železobetonové konstrukce, a to v závislosti na několika proměnných: např. koncentrace kyslíku, pH, poměr w/c pojiva, kvalita oceli, zkušební podmínky (např. teplota, měřicí technika).

Významně vyšší prahové hodnoty chloridů byly zjištěny pro drátkobeton, tj. 2,1 - 5,6 % Cl⁻ (z hmotnosti cementu). Vyšší odolnost ocelových uhlíkových drátků tažených za studena vůči zahájení důlkové koroze je vysvětlena kombinací několika faktorů:

- rovnoměrnějšího povrchu oceli v důsledku procesu tažení za studena, který omezuje zahájení důlkové koroze,
- menší rozměr drátků omezujících katodickou oblast a vedoucí k pomalejší rychlosti koroze,
- hustší a jednotnější rozhraní oceli a matrice drátkobetonu, které účinně chrání drátky proti chloridům a kyslíku. [19]

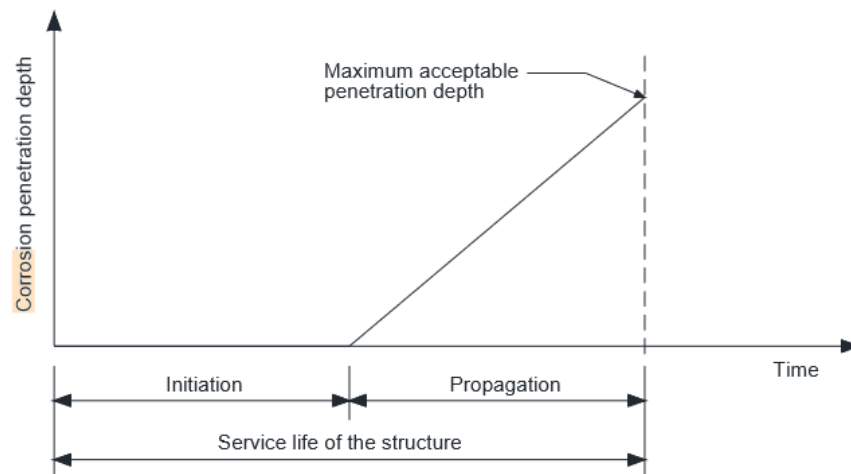
7.2.6 Karbonatace SFRC

Koroze vyvolaná karbonatací v drátkobetonu je obecně považována za méně agresivní než koroze vyvolaná chloridy. Proces karbonatace je mnohem pomalejší než pronikání chloridů a riziko koroze vyvolané v drátkobetonu s trhlinami je minimální. Tento typ koroze byl popsán již v kapitole 5. Ve srovnání s korozí způsobenou chloridy je k dispozici podstatně méně údajů, které zkoumají korozní odolnost SFRC vystaveného karbonataci.

7.2.7 Koroze ocelových drátků

7.2.7.1 Koroze ocelových drátků v prostředí chloridů.

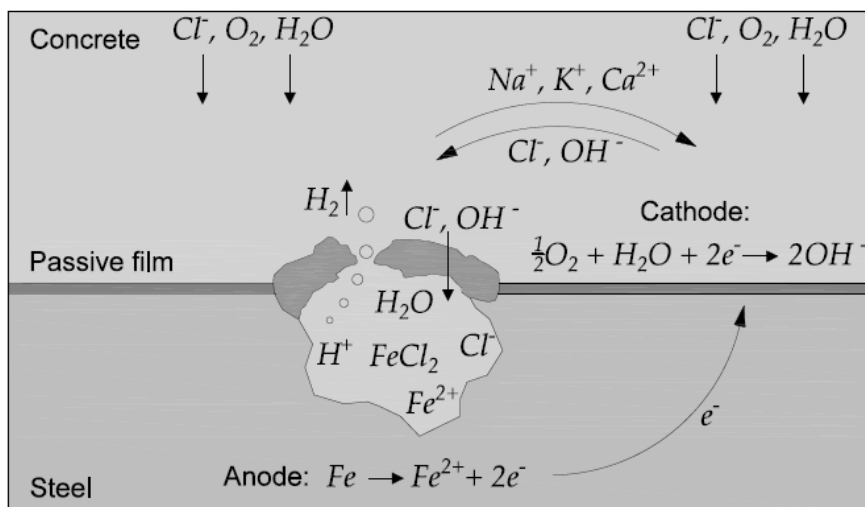
Z hlediska koroze lze obecně celkovou životnost drátkobetonových konstrukcí s ocelovými drátky rozdělit do dvou časových úseků: iniciace a šíření. Za iniciační dobu se považuje doba potřebná k tomu, aby vnější agresivní prostředky pronikly do drátkobetonu a způsobily depasivaci výztužných drátků. Během doby, kdy se koroze šíří, ocelové drátky korodují a snižuje se bezpečnost konstrukce. Na obrázku 7 je znázorněno schematické zhodnocení životnosti betonové konstrukce podle Tuuttiho modelu. Tento model lze uplatnit i pro drátkobetonové konstrukce. [30]



Obrázek 7 Model životnosti betonové konstrukce podle Tutti [30]

Obecně lze říci, existují dva důsledky koroze oceli. Za prvé má průběh koroze na anodě za následek snížení průřezové plochy oceli. Za druhé produkty koroze zabírají objem několikanásobně větší než objem původní oceli, což vede ke vzniku trhlin, odlupování a delaminaci okolní matrice. Průřezová plocha drátků

není dostatečně velká, aby kvůli produktům koroze docházelo k odlupování matrice. [30]



Obrázek 8 Schematické znázornění elektrochemického procesu koroze vyvolané chloridem [4]

Ve většině výzkumů se uvádí, že drátky z nerezové oceli poskytují plnou ochranu proti korozi chloridem v drátkobetonu s trhlinami a bez trhlin. Ale po čase koroduje i nerezová ocel.

Větší stabilita proti korozi souvisí s menším rozdílem potenciálu podél povrchu oceli a s menšími poměry katoda/anoda ve srovnání s běžnou výztuží.

Pohled na ochranu, kterou poskytují povlaky zinkové slitiny, ukazuje, že se zvyšuje korozní potenciál a snižuje se rychlost koroze na drátku spotřebou zinkového povlaku v anodickém procesu. Některé průzkumy, které vystavily pozinkovaný ocelový drátek chloridům v drátkobetonu s trhlinami i bez trhlin, ukazují důlkovou korozi na povrchu drátku, která je podobná drátkům z uhlíkové oceli. [2]

7.2.7.2 Koroze ocelových drátků způsobená karbonatací

Iničiační fáze je řízena průběhem karbonatace, která definuje oblast betonu s $pH < 8-9$, kde se předpokládá, že začne korodovat drátek. Rychlost karbonatace oxidem uhličitým je velmi závislá na několika proměnných: např. koncentrace CO_2 na povrchu, obsah vlhkosti, složení betonu (např. poměr w/c a složení pojiva) a teplotě. [19]

Fáze propagace popsaná v Tuttiho modelu [30] odpovídá iniciaci koroze řízené rozpuštěním pasivní vrstvy oceli při klesajícím pH. Když pH elektrolytu obklopujícího ocelové rozhraní klesne pod prahovou hodnotu pro ocelové drátky (typicky předpokládanou v rozmezí pH = 8-9 pro uhlíkovou ocel), rozpuštění pasivní vrstvy železa v lokalizovaných anodických místech podporuje iniciaci koroze, která by se šířila rozpuštěním železa jako iontů Fe^+ .

Výzkumy byly zaměřeny na rychlost koroze ocelových drátků ve zkarbonatovaném betonu. Publikovaný výzkum představuje omezenou korozi ve vnějších 1 - 5 mm betonu bez ohledu na okraj karbonatace (10-20 mm). V případě drátkobetonu s trhlinami koroze byla pozorována u většiny drátků přemostujících trhlinu a část karbonátů se šíří podél celé oblasti trhliny. Silná koroze je pozorována zejména na vnějším okraji trhliny, zatímco drátky uložené hlouběji vykazují mírnější známky koroze.

Podle poznatků autorů zatím neexistuje žádný výzkum, který by popisoval význam těchto mechanismů, nebo navrhl teorii vysvětlující zlepšené chování drátkobetonu proti korozi vyvolané karbonatací ve srovnání s železobetonem.

Očekává se, že hustší a jednotnější vláknitá matrice v mezilehlé přechodové zóně bude mít zásadní význam pro ochranu proti korozi drátků z uhlíkové oceli ve zkarbonatovaném drátkobetonu bez trhlín, jak již bylo řečeno pro korozi vyvolanou chloridy. Přítomnost velké a rovnoměrnější vrstvy hydroxidu vápenatého kolem drátku, jak ji navrhuje zdroj, by měla příznivý účinek ve dvou aspektech:

- hustší mezilehlá přechodová zóna by zvýšila ochranu drátků v objemovém drátkobetonu proti pronikání kyslíku a zabránila iontovému transportu,
- tlustší vrstva hydroxidu vápenatého (tj. 10 μm), odhadovaná na dvojnásobek až trojnásobek obvyklé oceli, by poskytla velký vápenatý pufr pro absorpci H_2CO_3 a desinfekce způsobená tvorbou uhličitanu vápenatého by potenciálně zabránila další karbonaci na hlubších vrstvách (tj. duplexním filmu). [19]

7.2.8 Trhliny

Trhliny v betonových konstrukcích mohou vznikat z několika důvodů. Bez ohledu na důvod, mohou trhliny způsobit korozi na výztuži. Díky trhlinám se usnadňuje vnikání chloridů do betonu a může dojít k rychlé lokální korozi. [24]

Obecně nebyly pozorovány žádné nepříznivé účinky na konstrukční celistvost u prvků bez trhlin, které byly vystaveny mořskému prostředí. Běžné drátky z uhlíkové oceli mají tendenci korodovat, když se na povrchu vyvinou trhliny. Kritická šířka trhliny, pod níž je zabráněno korozi drátků přemostujících trhlinu, byla odhadnuta na hodnoty v rozmezí 0,1 až 0,25 mm. Zřejmě je kritická šířka trhliny silně závislá na typu použitého drátku. Mangat a Gurusamy [18] zjistili, že v taveninových drátcích nebyla zjištěna žádná koroze při trhlínách pod 0,94 mm, zatímco Nemegeer [22] zjistil, že trhliny do 0,5 mm neměly nepříznivý vliv na korozi drátků potaženým zinkem, i když se na některých místech spotřeboval povlak. Šířka trhliny větší než 0,1 mm vede k výraznému zhoršení kvality v důsledku koroze, protože šířka trhliny ovlivňuje dobu iniciace koroze. [5]

Šířka trhliny byla také identifikována jako jeden z primárních faktorů ovlivňující autogenní hojení trhlín v betonu. Když tedy trhliny překročí určitou prahovou hodnotu, hrají zásadní roli při přepravě agresivních látek, a proto je pro životnost betonových konstrukcí nezbytné, aby byly tyto trhliny účinně regulovány. Jedná se především o makro trhliny.

Existuje mnoho návrhů kritické šířky trhliny s ohledem na korozi. Důležité parametry jako podmínky expozice, nebo účinky betonové matrice nejsou vždy stejné, a proto nelze vyvozovat jasné závěry. Trhliny ovlivňují především zahájení koroze. Jakmile je aktivovaná koroze, jsou důležitější další parametry – mikroklíma, schopnost vazby na chlorid, anodová/katodová oblast. Korozní produkty brání přístupu kyslíku, a proto může být ovlivněna rychlost koroze. [19, 24]

Vlivem trhlín na zahájení koroze se zabývá mnoho prací, jako například práce Bebbey a Ruutu [1]. Avšak vliv trhlín na trvanlivost je stále nejasný. Jediný konsenzus mezi výzkumníky spočívá v tom, že pokud trhliny překročí určitou velikost, tj. jsou příliš velké, budou mít negativní vliv na trvanlivost. Univerzální šířka trhliny se nedá stanovit.

7.2.8.1 Trhliny způsobené chloridy

Omezené poškození se projevív v drátkobetonu s trhlinami, pokud se dodrží dostatečná kvalita betonu, tj. $w/c < 0,5$. Trvanlivost drátkobetonu s trhlinami je v literatuře kontroverzní a lze rozdělit šířku trhlin do tří skupin (w_k):

- široké trhliny: $w_k > 0,5$ mm,
- úzké trhliny: $0,5$ mm $> w_k > 0,2$ mm,
- vlasové trhliny: $w_k < 0,2$ mm. [19]

Tvorba důlkové koroze v oblastech, kde drátky přemostují trhlinu, vede k významnému snížení průřezu drátku a vyvolává výrazné snížení zbytkové tahové pevnosti při mírném působení chloridů. Pokud je šířka trhliny větší než 0,5 mm, tak nevykazuje žádné známky samovolného hojení trhlin. Navzdory lokálnímu poškození v oblasti trhliny nedochází k poškozením v důsledku trhlin nebo odlupování sousední matrice způsobené korozí drátku. [19]

Velké rozdíly v poměru korozního poškození a zbytkové pevnosti v tahu jsou u drátků, které se vyskytují v úzkých trhlinách. Většina výzkumů podporuje scénář, ve kterém drátky z uhlíkové oceli korodují až do kritického snížení průřezu drátku v dlouhodobém horizontu. To vede k podstatnému rozpadu zbytkové pevnosti v tahu drátkobetonu vystaveného chloridům. Použití pozinkovaných ocelových drátků prodlužuje dobu do iniciace koroze. Pokud ke korozi dojde při delší expozici, tak pozinkované drátky nezabraňují šíření koroze. Pokud jsou použity drátky z nerezové oceli nebo pozinkované drátky, které přemostují úzké trhliny, dochází k omezení koroze s menší ztrátou pevnosti v tahu. [19]

7.2.8.2 Trhliny způsobené karbonatací

Karbonatace drátkobetonu bez trhlin způsobuje poškození drátků korozí, která postupuje pomalou rychlostí ve vnější zkarbonované oblasti (tj. 1-10 mm) a odlupování matrice.

Trhliny způsobené oxidem uhličitým lze rozdělit do třech stejných skupin jako v přechodí kapitole:

- široké trhliny, $w_k > 0,5$ mm,
- úzké trhliny, $0,5$ mm $> w_k > 0,2$ mm,
- vlasové trhliny, $w_k < 0,2$ mm. [19]

Přítomnost širších trhlin ($w_k > 0,5$ mm) podporuje brzké zahájení koroze ocelových drátků přemostujících trhliny. Jedná se zejména o vnější oblasti trhliny, které pokrývají až 90 % průřezu drátků při delší expozici. Koroze trhlin širších než 0,5 mm vede k výrazné ztrátě pevnosti v tahu, kterou Beeby [1] odhadl na 30-40 % její původní hodnoty. [19]

Úzké trhliny (0,2-0,5 mm) vedou ke vzniku koroze 70-90 % drátků přemostujících trhlínu, se snížením zbytkové pevnosti. Naopak dochází k podstatnému snížení celkové absorpce energie (ztráta 30 až 40 %) drátkobetonu s trhlínami, při trhlínách širších než 0,2 mm. [19]

V současné době se diskutuje o trvanlivosti karbonatovaného drátkobetonu s malými trhlínami ($w_k < 0,1-0,2$ mm). Jestliže je iniciace koroze drátků ve vnějším průřezu trhliny v 10-40 % případů, zbytková pevnost v tahu při malých deformacích je neovlivněna. Dokonce i ve srovnání s drátkobetonem, který není vystaven karbonačním účinkům, je zbytková pevnost zlepšena.

7.2.9 Samovolné hojení trhlin

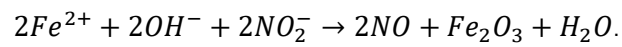
Při omezených šířkách trhliny je důležité vzít v úvahu schopnost samovolného hojení. Za vlhkých podmínek s omezeným průtokem vody trhlínou, může dojít k samoléčení trhlin s malou šířkou (vlasové trhliny). Samovolné hojení je reakcí, kdy oxid uhličitý ve vodě rozpouští vápenaté ionty (kationty) z obsahu hydroxidu vápenatého v betonu. Při nízkém průtoku vody se voda stává přesycenou hydrogenuhličitanem vápenatým. Krystaly kalcitu se usazují podél trhlin a stěna může být pomalu utěsněna. Kvalita betonu, pohyb trhlin (statické/dynamické), typ vody (pH) jsou další parametry, které jsou důležité pro samovolné hojení. [19, 24]

Vliv samovolného hojení byl testován Schiesslem a Brauerem [29]. Autoři uvádějí, že pokud voda, která protéká trhlínou má vysoký obsah chloridů, tak proces koroze pokračuje i přes samovolné hojení trhliny. V opačném případě se proces koroze zastaví. [24]

7.2.10 Dusitan vápenatý

Inhibitor koroze dusitan je dnes široce používán v betonu, protože jeho účinnost brání korozi ocelových drátků uložených v betonu v prostředí chloridů. Při přidání do betonu působí dusitan vápenatý jako anodický inhibitor. Ionty

dusitanu se absorbují na povrchu oceli a reagují s železnatými ionty za vzniku oxidu železitého, jak ukazuje následující rovnice:



Vytvoření stabilní oxidové vrstvy posiluje korozní odolnost povrchu oceli i v přítomnosti chloridů. Účinek dusitanu vápenatého na odolnost proti korozi krátkých náhodných ocelových drátků s velmi malými průměry v drátkobetonu není dobře znám. Není tedy jasné, zda přidání dusitanu může posílit korozní odolnost drátkobetonu v chloridovém prostředí. [23]

Shrnutí problematiky z řešerše

V této bakalářské práci jsem se zabývala převážně korozí drátkobetonu způsobenou působením chloridů a karbonatů. Jsou to dvě nejčastější příčiny koroze a jsou popsány v mnoha odborných vědeckých článcích. V dostupných zdrojích nejsou souhrnně sepsány v jedné studii všechny parametry, které ovlivňují korozi. Nejčastěji jsou zkoumány trhliny způsobené korozí, jejich rozměry a vznik a také kvalita betonové matrice. Většina odborných prací se odkazuje na další výzkum a množství informací se tím snižuje.

Kvalita betonové matrice je důležitým aspektem pro návrh drátkobetonu odolného proti působení chloridů. Poměr vody k pojivu byl testován v rozmezí 0,3-0,7. Jako ideální je hodnota navržena 0,5 pro drátkobeton, přičemž výskyt trhlin zde nehraje roli. Pro zajištění trvanlivosti drátků v drátkobetonu s trhlinami měl by být poměr vody k pojivu v rozmezí 0,4-0,45, tzn. nižší oproti předchozímu případu. Vliv různých poměrů w/b nebyly testovány na vlastnostech drátkobetonu, jako je pevnost v tahu. Neexistují dostatečné podklady pro formulaci jednoznačného závěru, který by popisoval tento vliv.

Samotné drátky mají velký vliv na korozi, závisí na několika parametrech. Drátky tažené za studena způsobují větší pravděpodobnost koroze a redukci pevnosti v tahu drátkobetonu. Pokud jsou drátky deformované, je vyšší pravděpodobnost iniciace koroze vyvolané chloridy. Nerezové drátky mají velkou odolnost proti korozi a zhoršení jejich mechanických vlastností je zanedbatelné. Výhodnými se zdají drátky, které jsou pokovené, či upravené jinou povrchovou metodou. Tyto drátky prodlužují časovou korozi iniciující důlkovou korozi, nebo vykazují úplnou ochranu proti korozi pro dlouhodobé expozice. Krátké ocelové drátky jsou rozloženy náhodně a rovnoměrně do betonové směsi. Pro tento stav nelze vyhodnotit korozi každého drátku pomocí měření elektrického odporu, z důvodu náhodného rozmístění a zhoršení podmínek měření.

Krytí drátků je pro část drátků, které leží v blízkosti povrchu nulové, a proto vyžadovat krycí vrstvu při výrobě drátkobetonu je zbytečné. Drátky umístěné na povrchu a v hloubce do 3 mm vykazují známky silné koroze. Ostatní drátky umístěné v betonu jsou bez známek koroze. Bylo zjištěno, že pokud bude v betonové matrici nižší poměr vody a cementu, za určitých podmínek bude mít vliv na snižování poškození drátků.

Návrh betonové matrice ovlivní životnost betonových konstrukcí vystavených působení chloridů. Pro drátkobeton je kritický obsah, při kterém dochází k iniciaci koroze chloridy, vyšší než pro železobeton. Drátky v betonu zůstávají bez koroze pro koncentrace chloridů až do 1,7 % Cl⁻. Jiné výzkumy uvedly, že drátky bez koroze zůstávají pro koncentrace chloridů až třikrát vyšší než pro železobeton. Značných prahových hodnotám chloridů dosahují ocelové uhlíkové drátky tažené za studena, převážně díky rovnoměrnějšímu povrchu a menšímu rozměru pro elektrochemickou reakci. Tím dochází k vyšší odolnosti proti zahájení důlkové koroze. Trvanlivost drátkobetonu závisí nejen na kvalitě betonu, ale také na druhu materiálu a jakosti drátků, existenci a velikosti trhlin a také na době a podmínkách působení chloridů.

Chování ocelových drátků, na které působí chloridy se da rozdělít v průběhu koroze na dva časové úseky. Prvním úsekem je iniciační doba, kdy se agresivní látky dostávají do betonu a způsobují depasivaci výztuže. Druhým časovým úsekem je ten, kdy drátky korodují a zhoršují se jejich vlastnosti a bezpečnost konstrukce.

V literatuře je možné dohledat, že nerezová ocel poskytuje úplnou ochranu proti korozi pouze dočasně a po uplynutí určité doby také koroduje. Pozinkované drátky snižují rychlost koroze, ale některé výzkumy ukázaly důlkovou korozi na povrchu drátku. Pozinkované drátky přinášejí ale i negativní vlivy a jiné problémy. Způsobují jinou reakci v betonu, která zhoršuje soudržnost mezi drátkem a betonem. Rozsah této bakalářské práce není dostačující, a proto jsem se tímto problémem nezabývala.

Koroze vyvolaná karbonatací je považovaná za méně agresivní než koroze vyvolaná chloridy. Pronikání chloridů je mnohem rychlejší než proces karbonatace. Za iniciační fázi koroze drátků vyvolanou karbonatací lze považovat stav, při kterém pH betonu klesne pod hodnotu 9. Rychlost koroze je velmi malá a záleží na několika kritériích, a to na koncentraci oxidu uhličitého na povrchu, obsahu vlhkosti, složení betonu a teplotě.

Díky drátkům obsaženým v betonové matrici dochází k menším trhlinám, které jsou od sebe vzdálenější. Trhliny usnadňují vnikání chloridů a způsobují rychlou korozi na drátku. Obecně lze říci, že šířka trhliny větší než hodnota 0,1 mm vede ke zhoršení kvality drátkobetonu v důsledku koroze. Trhlina ovlivňuje především zahájení koroze. Maximální povolené šířky trhlin jsou definovány předpisy, které

tuto šířku stanovují na základě expozičních podmínek. Pokud je šířka trhliny do 0,2 mm, tak dochází k samovolnému hojení trhliny v betonu. Jediný závěr, na kterém se shodují výzkumy, je že pokud trhliny překročí určitou velikost, budou mít negativní vliv na trvanlivost drátkobetonu.

Pokud se v drátkobetonu trhliny vyskytují a koroze je již aktivována, je rychlost koroze ovlivňována dalšími parametry, kterými jsou především mikroklima a schopnost vazby na chlorid. Rychlost koroze může být zpomalena díky korozním produktům, které brání přístupu kyslíku.

Kritická šířka trhliny, kdy nedochází ke korozi, byla odhadnuta v rozmezí 0,1 - 0,25 mm. Některé výzkumy udávají jiné hodnoty, přičemž ale vycházejí z různých vstupních podmínek, kterými je například typ drátku.

Trhliny lze rozdělit do tří skupin dle šíře trhliny. V trhlinách větších než 0,5 mm nedochází k samovolnému hojení trhliny. Tato šíře podporuje brzké zahájení koroze drátků, které přemostují trhlinu. Drátky, které přemostují úzké trhliny z pozinkovaných drátků a z nerezové oceli nevykazují žádnou korozi. Běžná uhlíková ocel vykazuje jen omezenou korozi spolu s menší ztrátou pevnosti. Uvnitř této trhliny dochází ke ztrátě pevnosti v tahu na 30-40 % její výchozí hodnoty. Drátky z uhlíkové oceli korodují až do kritického snížení průřezu drátku, což vede k rozpadu zbytkové pevnosti v tahu drátkobetonu vystaveného chloridům.

V současné době se hovoří o trvanlivosti zkarbonatovaného drátkobetonu s vlasovými trhlinami. Iniciace koroze je pouze na vnější části průřezu trhliny. Zbytková pevnost v tahu je neovlivněna.

K samovolnému hojení trhliny dochází v případě úzkých a vlasových trhlin. Pokud přes trhlinu protéká voda s vysokým obsahem chloridů, tak proces koroze pokračuje i přes samovolné hojení trhliny. V opačném případě se proces koroze zastaví.

Na základě z dostupných zdrojů z bakalářské práce je možné konstatovat, že nebezpečí koroze drátku v drátkobetonu je možné snížit: použitím vysokohodnotného, nepropustného betonu s nízkým vodním součinitelem, zamezením vzniku trhlinek (zejména > 0,1 mm) vhodným navržením betonové matrice, použitím pozinkovaných nebo nerezových drátků.

Závěr

Účelem práce bylo shrnutí dosavadních poznatků problematiky koroze drátkobetonu. Zdrojů v této oblasti není velké množství a v mé bakalářské práci jsem se snažila překonat tento nedostatek. Většina autorů, kteří se zabývají korozi drátkobetonu zkoumají pouze jeden vliv, který korozi ovlivňuje a nikdo se nezaměřuje na celkovou analýzu této problematiky. Mezi důvody jednoznačně patří obtížná metodika měření několika rozdílných vlivů najednou, které ovlivňují korozi. Díky této práci jsem níže uvedla několik bodů, na které jsem v žádné práci nenarazila. Jsou to parametry nebo vlivy, které ovlivňují korozi, nebo zlepšují vlastnosti drátkobetonu.

Témata pro budoucí výzkum, která by pomohla lépe chápat korozi drátkobetonu:

- Drátky s pozinkem – Vzniká jiná reakce mezi drátkem a betonem a tím i jiné vlastnosti. Jeho cena je příliš vysoká. Otázkou je, jaká je soudržnost betonu s těmito pozinkovanými drátky?
- Krycí vrstva – Došlo by díky zhotovení krycí vrstvy k omezení koroze drátků? Jaký by byl způsob technologie provádění krycí vrstvy?
- Poměr pojiva a vody na vlastnosti drátkobetonu – Dojde ke snížení koroze drátkobetonu při vyšším poměru pojiva a vody?
- Kritická šířka trhliny – V mnoha studiích se došlo k závěru, že drátky mohou ovlivňovat šířku trhliny. Nikde tento fakt není 100 % potvrzen. Je tedy kritická šířka trhliny ovlivněna typem použitého drátku?
- Rychlost koroze – Jak moc může být ovlivněna rychlost koroze, pokud se v trhlíně vyskytují produkty koroze, které brání přístupu kyslíku?
- Návrh betonové matrice s nízkým vodním součinitelem - Zajistí nízký vodní součinitel úzké/vlasové trhliny? Trhliny, které jsou do 0,2 mm, vykazují velmi malé známky koroze. Závisí to na typu drátku?
- Obsah chloridů ve vodě, která protéká přes úzkou/vlasovou trhlínu, kde dochází k samoléčení - O jakou hodnotu chloridů se jedná?
- Dusitan vápenatý – Dochází k posílení odolnosti drátkobetonu díky dusitanu v chloridovém prostředí?
- Vliv koroze na únosnost - Jak se změní únosnost drátkobetonu při korozi?

Pro budoucí výzkum a vývoj v oblasti drátkobetonu je nutné zabývat se výše zmíněnými tématy. S hlubším pochopením problematiky zřejmě vyvstanou další otázky ohledně koroze a degradace tohoto stavebního materiálu, ale v současnosti je nutné řešit tyto otázky.

Seznam literatury

- [1] A. Beeby a Ruutu, „Cracking: what are crack width limits for?“, *Concrete*, č. 7, 1978.
- [2] H. Behbabani a B. Nematollahi, „Steel fibre reinforced concrete: A review,“ v *ICSECM*, Kandy, 2011.
- [3] C. G. Berrocal, K. Lundgren a I. Lofgren, „Influence of steel fibres on corrosion reinforcement in concrete in chloride environments: review,“ v *Fibre concrete*, Prague, 2013.
- [4] C. G. Berrocal, „Corrosion of steel bars in fibre reinforced concrete: Corrosion mechanisms and structural performance,“ v *Chalmers university of technology*, Goteborg, 2017.
- [5] C. G. Berrocala, K. Lundgrena a I. Lofgrena, „Corrosion of Steel Bars Embedded in Fibre Reinforced Concrete Under Chloride Attack: State-of-the-Art,“ v *Cement and concrete research*, Goteborg, 2017.
- [6] P. H. Bischoff, „Tension Stiffening and Cracking of Steel Fibre-Reinforced Concrete,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, sv. 15, č. 2, pp. 174-182, 2003.
- [7] Š. Bohouš, „Vývoj nových druhů plynostěných a vodostěných povrchových úprav,“ Brno, Brno.
- [8] J. Granju, J. P. Forth a S. U. Balouch, „Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete,“ v *Cement and Concrete Research*, Toulouse, 2010.
- [9] J.-L. Granju a S. U. Balouch, „Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks,“ v *Cement and concrete research*, Toulouse, 2004.
- [10] B. Han a X. Yu, „Compositions of Self-Sensing Concrete,“ v *ScienceDirect*, 2014.
- [11] C. I. L. P. Ing. Oldřich Dobrý, *Koroze betonu ve stavební praxi*, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.

- [12] L. K. A. Š. Ivan Janotka, „Karbonatácie betónu železobetonových konštrukcií - časť I: základné poznatky,“ *Beton*, č. 3, pp. 72-79, 2011.
- [13] I. Janotka, L. Krajčí, K. Komlos a D. Frtalová, „Chloride corrosion of steel fibre reinforcement in cement mortar,“ *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, č. 4, pp. 221-228, 1989.
- [14] K. T. J. V. Jiří Krátký, *Drátkobetonové konstrukce*, Praha: ČKAIT, Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999.
- [15] „Karbonatace betonu,“ EBETON, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/karbonatace-betonu>. [Přístup získán 6 Březen 2019].
- [16] I. T. Macháček, „Koroze železobetonových konstrukcí a způsob jejich ochrany,“ *Silnice a železnice*, 27 Listopad 2008. [Online]. Available: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/koroze-zelezobetonovych-konstrukci-a-zpusob-jejich-ochrany/>. [Přístup získán 6 Březen 2019].
- [17] P. S. Mangat a K. Gurusamy, „Chloride diffusion on steel fibre reinforced marine concrete,“ v *Concrete*, 2017.
- [18] P. S. Mangat a K. Gurusamy, „Permissible crack widths in steel fibre reinforced marine concrete,“ v *Material Structure*, Aberden, 1987.
- [19] V. Marcos-Menson, A. Michel, A. Solgaard, G. Firscher, C. Edvardsen a T. L. Skovhus, „Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review,“ v *Cement and concrete research*, Copenhagen, 2018.
- [20] B. T. Matyk, „Studium vlastností betonů s „green cementy“,“ *Vysoké učení technické*, Brno, 2014.
- [21] A. Moskvín, „Korozija betona i železobetona, metody ich zaščity,“ v *Strojizdat*, Moskva, 1980.
- [22] D. V. J. S. H. Nemegeer, „Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete,“ Copenhagen, 2000.

- [23] T. T. Ngoc, P. Sukhoon a J. K. Dong, „Corrosion of resistance of strain-hardening steel-fibre-reinforced-cementitious composites,” v *Cement and concrete composites*, 2014.
- [24] E. Nordstrom, „Durability of sprayed concrete - steel fibre corrosion in cracks,” 2005.
- [25] J. Rapoport, C.-M. Aldea, S. P. Shah a B. Ankenman, „Permeability of cracked steel fibre-reinforced concrete,” v *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002.
- [26] P. Rovnaníková, „Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí,” *Beton*, č. 2, pp. 3-8, 2017.
- [27] D. W. Saint-Gobain Construction Products CZ a.s., „Koroze výztuže a ovlivňující faktory,” *tzbinfo*, 28 Červenec 2017. [Online]. Available: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/16069-koroze-vyztuze-a-ovlivnujici-faktory>. [Přístup získán 11 Duben 2019].
- [28] T. Sajdlová, „Drátkobeton - určování parametrů materiálových modelů z výsledků experimentů,” 14 Duben 2011. [Online]. Available: https://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/c/ce/Bazant__2011__sajdlova.pdf. [Přístup získán 26 Únor 2019].
- [29] P. Schiessl a N. Brauer, „Influence of autogenous healing of cracks on corrosion of reinforcement,” v *Durability of building materials and components 7*, Stockholm, 1996.
- [30] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*, 4 editor, Stockholm: Swedish cement and concrete research Institute, 1982.
- [31] J. Vodička, V. Veselý a J. Krátký, „Specifika z technologie vláknobetonu,” *Beton. Technologie, konstrukce a sanace*, pp. 38-42, Únor 2010.