

# MODELY PRO VÝPOČET PŘETVOŘENÍ BETONU ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Jakub Holan, \*

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

## ABSTRAKT

Článek je věnován tématu přetvoření betonu za vysokých teplot se zaměřením na modely pro výpočet tohoto přetvoření. V rámci článku je nejprve představena složitost problematiky numerického modelování železobetonových konstrukcí za vysokých teplot. Následně je v hlavní části článku popsáno přetvoření betonu při zahřívání na vysoké teploty. V článku jsou popsány všechny složky přetvoření betonu za vysokých teplot, a u jednotlivých složek je uvedeno, jak lze tato přetvoření vypočítat dle různých modelů od různých autorů. V závěru článku je představen souhrnný model, který sdružuje všechny složky přetvoření betonu a uvádí, jak tyto složky určit.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Přetvoření • Vysoké teploty • Výpočetní model

## ABSTRACT

The paper is devoted to the topic of concrete strain at high temperatures with a focus on models for calculating this strain. The complexity of numerical modelling of reinforced concrete structures at high temperatures is first introduced. Subsequently, the main part of the paper describes the strain induced in concrete when heated to high temperatures. All components of the heat-induced concrete strain are described, and for each component, numerical models given by various authors are presented. At the end of the paper, a comprehensive model for the calculation of the heat-induced concrete strain containing all of the components is presented.

## KEYWORDS

Concrete • Strain • High temperatures • Numerical model

## 1. ÚVOD

Problematika přetvoření a napětí v betonu při zvýšených teplotách je velmi složitá, jelikož v betonu dochází k velkému množství různých přetvoření, které závisí na mnoha faktorech. Typy a velikosti jednotlivých přetvoření betonu závisí zejména na tom, zda je beton zahříván poprvé nebo opakovaně, zda se teplota betonu mění nebo je konstantní, a zda je beton silově zatížen nebo nezatížen. Pro popis přetvoření a napětí v betonu existuje mnoho modelů, avšak

většina těchto modelů je nevhodná pro analýzu konstrukcí, jelikož neuvažují silové zatížení betonu při zahřívání betonu. Cílem tohoto článku je popsat tuto problematiku a představit existující modely použitelné pro nelineární analýzu konstrukce za zvýšené teploty.

## 2. VLIV VYSOKÝCH TEPLOT NA ŽELEZOBETONOVÉ KONSTRUKCE

Chování železobetonových konstrukcí za vysokých teplot je výrazně odlišné od chování za běžných teplot. Specifika železobetonových konstrukcí za vysokých teplot lze rozdělit do následujících kategorií (Guo a Shi 2011).

- 1) **Nerovnoměrné rozdělení teploty v průřezech a konstrukci.** Za zvýšených teplot se povrch betonu ohřívá velmi rychle. Vlivem nízké teplotní vodivosti betonu se však vnitřní část průřezu ohřívá mnohem pomaleji. Z toho důvodu vzniká nerovnoměrné rozdělení teploty v průřezu, kde největší gradient teploty je v blízkosti krajních vláken. Průběh teplot rovněž závisí na době trvání teplotního zatížení. Hlavní faktory ovlivňující rozložení teploty v konstrukci jsou tvar a velikost průřezu, teplotní chování betonu a velikost teplotního zatížení. Rozložení teploty v konstrukci výrazně ovlivňuje vnitřní síly v konstrukci, deformace konstrukce a únosnost konstrukce. Rozložení teploty však naopak není ovlivněno vnitřními silami a deformacemi konstrukce, a proto může být analýza teplotního rozdělení prováděna nezávisle a dříve než analýza vnitřních sil a deformace konstrukce.
- 2) **Degradace materiálových vlastností.** Pevnost a modul pružnosti betonu i výtuzě výrazně klesá s rostoucí teplotou, zatímco přetvoření obou materiálů s rostoucí teplotou roste. Velikost mechanického porušení betonu, tj. například vznik a šíření trhlin a odštěpování betonu, roste se zvyšující

---

\* Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

se teplotou. Tyto procesy způsobují výrazné snížení únosnosti konstrukcí za zvýšených teplot.

- 3) **Efekt sdruženého působení přetvoření, napětí, teploty a času.** Za zvýšených teplot je nutné kromě vztahu mezi mechanickým přetvoření a napětím rovněž řešit vliv teploty, která ovlivňuje jak pevnost, tak přetvoření. Mimo to, různé historie teplotního zatížení různě ovlivňují pevnost a přetvoření materiálů. Při analýze konstrukcí je tedy nutné uvažovat čtyři faktory, kterými jsou přetvoření, napětí, teplota a čas. Po analýze za zvýšených teplot je tedy nutné sestavit odpovídající konstitutivní termomechanický vztah, což výrazně zvyšuje složitost analýzy.
- 4) **Redistribuce napětí a vnitřních sil.** Nerovnoměrné rozložení teploty po průřezu a konstrukci způsobuje nerovnoměrné teplotní přetvoření, které způsobuje redistribuci napětí a vnitřních sil. V případě staticky neurčitých konstrukcí, ve kterých je teplotním přetvořením bráněno, může být redistribuce vnitřních sil značná a závažná. Vzhledem k tomu, že rozložení teplot se mění s časem, je i redistribuce vnitřních sil procesem závislým na čase. Vzhledem k redistribuci vnitřních sil může být mechanismus porušení konstrukce za zvýšených teplot rozdílný od mechanismu porušení konstrukce za běžné teploty, čímž je ovlivněna únosnost konstrukce.
- 5) **Rychlost selhání konstrukce.** Za běžné teploty je obecně porušení konstrukce pomalým procesem s velkým množstvím varovných signálů. Za zvýšených teplot je však porušení konstrukce mnohem rychlejším procesem s menším množstvím varovných signálů.

Obecně lze říci, že při zatížení betonu zvýšenou teplotou v betonu probíhá mnoho procesů vyvolávajících mikroskopické a makroskopické změny, které způsobují dva hlavní problémy – dodatečná přetvoření a změnu mechanických vlastností.

### 3. PŘETVOŘENÍ BETONU PŘI ZAHŘÍVÁNÍ NA VYSOKÉ TEPLoty

Při zatížení betonu vysokou teplotou dochází ke vzniku dodatečných přetvoření. Největší část těchto přetvoření vzniká při samotném procesu zahřívání. K dalším přetvořením pak dochází i při udržování konstantní vysoké teploty (Khoury 2006c). Vzhledem k běžné době trvání teplotního zatížení a nízké tepelné vodivosti betonu je však většinou doba trvání konstantní vysoké teploty, a tedy i přetvoření tím vyvozená,

menší. Přetvoření za konstantní zvýšené teploty jsou rovněž menší, jelikož většina teplotních přetvoření probíhá již právě při samotném procesu zahřívání. U přetvoření, ke kterým dochází vlivem vysoké teploty, rovněž záleží na tom, zda je materiál zahříván prvně, či zda již byl vystaven vysoké teplotě v minulosti. Ke většímu množství různých druhů přetvoření dochází, je-li materiál zahříván prvně. Z těchto důvodů je tato kapitola zaměřena zejména na přetvoření vznikající při prvním procesu zahřívání. V cizojazyčné literatuře se tento proces nazývá *first thermal transient* (tj. *první teplotní přechod*) a pro přetvoření odpovídající tomuto procesu se používá pojem *transient strains* (tj. *přechodná přetvoření*). Pojem přechodná přetvoření souvisí s tím, že dochází k přechodu mezi různými teplotami. Pojem nemá implikovat to, že by se jednalo pouze o dočasná přetvoření. Ba naopak, většina přechodných přetvoření je trvalá a nevratná. Pojem přechodná přetvoření by neměl být zaměňován s pojmem *transitional thermal creep* (tj. *přechodové teplotní dotvarování*), který označuje jeden z druhů přechodných přetvoření.

Problematika přetvoření betonu při zahřívání na vysoké teploty je dobře popsána v (Anderberg a Thelandersson 1976, Li a Purkiss 2005, Khoury 2006c, Youssef a Moftah 2007, Law a Gillie 2008, Gernay a Franssen 2012, Lange a Jansson 2014, Štefan et al. 2019, fib 2007, fib 2008). Přístupy různých autorů k přetvořením v betonu při zahřívání na vysoké teploty jsou podrobně popsány v (Law 2010, Lange a Jansson 2014, Gernay a Franssen 2012). Pro vztah popisující celkové přetvoření betonu při zahřívání pomocí různých složek přetvoření se většinou používá pojem *model*. Modely pro popis celkového přetvoření betonu při zahřívání se dělí na *implicitní modely* a *explicitní modely* (Gernay 2011).

Implicitní modely, např. (ČSN EN 1992-1-2 2006), jsou takové modely, ve kterých je *zatížením vyvolané teplotní přetvoření* uvaženo implicitně v *celkovém mechanickém přetvoření*. Implicitní modely jsou často používané, jelikož jsou jednodušší a při jejich použití jsou výsledky analýzy dostatečně přesné.

Explicitní modely, např. (Anderberg a Thelandersson 1976, Terro 1998, Khoury 2006c), jsou takové modely, ve kterých je *zatížením vyvolané teplotní přetvoření* uvedeno explicitně jako samostatný člen přetvoření. Explicitní modely obsahují jednotlivé složky přetvoření betonu, a tudíž lépe popisují celkové přetvoření betonu. Jelikož jsou však složitější, a při jejich použití musí často být specifikováno více vstupních hodnot, nejsou tyto modely tak často používány při analýze konstrukcí.

Nejdetailejší explicitní model, který zavádí a popisuje nejvíce dílčích částí přetvoření od různých procesů, je navržen Khourym (2006c) a tento model je uveden i v (fib 2007). Tento model je detailnější než ostatní modely, se kterými však většinou není v rozporu. Je-li s některým modelem v rozporu, pak Khoury uvádí přesvědčivé argumenty pro podporu svého modelu. Z těchto důvodů je dále v této kapitole popsán podrobný tento model uvedený v (Khoury 2006c, fib 2007).

Přetvoření, ke kterým dochází v betonu při prvním procesu zahřívání, závisí zejména na tom, zda je beton při zahřívání silově zatížen či nezatížen a zda je bráněno nebo dovoleno vysychání (fib 2007, Khoury 2006c). Vzhledem ke zaměření této práce bude tato kapitola zaměřena na přetvoření,

ke kterým dochází v případě zahřátí zatíženého vysychajícího betonu, což nejlépe odpovídá skutečným konstrukcím vystaveným požáru.

Celkové přetvoření zatíženého vysychajícího betonu lze dle (Khoury 2006c, fib 2007) popsat vztahem

$$\varepsilon_{tot}^{T,\sigma} = \varepsilon_{elpl}^{20,\sigma} + \varepsilon_{th}^T + \varepsilon_{sh}^T + \varepsilon_{LITS}^{T,\sigma} + \varepsilon_{crack}^{T,\sigma},$$

kde horní indexy  $\sigma$  a  $T$  značí závislost daného přetvoření na napětí a teplotě a  $\varepsilon_{tot}^{T,\sigma}$  je celkové přetvoření,  $\varepsilon_{elpl}^{T,\sigma}$  je elastické a plastické přetvoření od zatížení způsobené před zahřátím,  $\varepsilon_{th}^T$  je teplotní přetvoření nevysychajícího nezatíženého betonu,  $\varepsilon_{sh}^T$  je přetvoření od smršťování vysycháním,  $\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma}$  je zatížením vyvolané teplotní přetvoření a  $\varepsilon_{crack}^{T,\sigma}$  je přetvoření způsobené trhlinami.

### 3.1. Elastoplastické přetvoření

*Elasto-plastické přetvoření*  $\varepsilon_{elpl}^{20,\sigma}$  (z angl. *Elasto-plastic Strain*) je přetvoření způsobené silovým zatížením před zahřátím betonu. Toto přetvoření je možné stanovit pomocí standardního pracovního diagramu materiálu pro běžnou teplotu (20 °C), například pomocí vztahů v ČSN EN 1992-1-1 (2011).

### 3.2. Přetvoření závislá pouze na teplotě

#### 3.2.1. Teplotní přetvoření

*Teplotní přetvoření*  $\varepsilon_{th}^T$  (z angl. *Thermal Strain*) je přetvoření nezatíženého nevysychajícího betonu způsobené změnou teploty. Z fyzikálního hlediska se jedná například o přetvoření způsobené teplotní roztažností materiálu. Hodnota tohoto přetvoření může být stanovena právě zkouškou zahřátí nezatíženého betonu při zajištění nevysychání betonu.

#### 3.2.2. Přetvoření od smršťování vysycháním

*Přetvoření od smršťování vysycháním*  $\varepsilon_{sh}^T$  (z angl. *Drying Shrinkage Strain*) je přetvoření způsobené

- ztrátou fyzikálně vázané vody (vypařování), která závisí na počáteční vlhkosti, rychlosti zahřívání a tvaru a velikosti průřezu,
- ztrátou chemicky vázané vody (dehydratace cementové matrice a dekarbonatace), která závisí na rychlosti zahřívání a teplotě.

Hodnota tohoto přetvoření může být dle (Khoury 2006c) stanovena pomocí zkoušky zahřátí nezatíženého vysychajícího betonu jako rozdíl hodnoty přetvoření naměřené při zvýšené teplotě a hodnoty přetvoření naměřené po vychladnutí vzorku.

#### 3.2.3. Teplotní přetvoření vysychajícího betonu

Při zahřívání betonu běžně není zajištěno jeho nevysychání, což znamená, že beton běžně při zahřátí vysychá, a teplotní přetvoření a smršťování vysycháním se tedy běžně uvažují jako neoddelitelné procesy a jejich hodnota a vliv se stanovuje společně. Z toho důvodu je ve většině publikací teplotním přetvořením betonu nepřesně označováno celkové přetvoření nezatíženého vysychajícího betonu způsobené změnou teploty, obsahující jak skutečné teplotní přetvoření, tak přetvoření od smršťování vysycháním (fib 2007). Celková

hodnota teplotního přetvoření a přetvoření od vysychání může být stanovena zkouškou zahřátí nezatíženého vysychajícího betonu. Pro tuto celkovou hodnotu je zavedeno značení  $\varepsilon_{tot}^{T,0}$  a platí vztah  $\varepsilon_{tot}^{T,0} = \varepsilon_{th}^T + \varepsilon_{sh}^T$ .

Teplotní přetvoření vysychajícího betonu je nelineárně závislé na teplotě, kde největší vliv má obsah a druh kameniva. Vápencové kamenivo má větší roztažnost než kamenivo čedičové. Křemičité kamenivo má velkou teplotní roztažnost při teplotě 573 °C, kdy dochází k přeměně  $\alpha$  fáze na  $\beta$  fázi. Menší, avšak nezanedbatelný, vliv má také počáteční vlhkost, typ cementu a rychlost zahřívání (Khoury 2006a).

Pro výpočet teplotního přetvoření vysychajícího betonu  $\varepsilon_{tot}^{T,0}$  lze použít různé modely – například model navržený Terrem (1998), který tento druh přetvoření nazývá *volné teplotní přetvoření včetně smrštění* (z angl. *Free thermal strain, including shrinkage*), model uvedený v (ČSN EN 1992-1-2 2006), nebo model uvedený v (Guo a Shi 2011).

### 3.3. Zatížením vyvolané teplotní přetvoření

*Zatížením vyvolané teplotní přetvoření* LITS nebo  $\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma}$  (z angl. *Load-Induced Thermal Strain*) je dodatečné přetvoření způsobené teplotou v případě, že je materiál zatížen silovým zatížením. LITS je nelineárně závislé na teplotě, kde druh kameniva a druh cementu mají nevýrazný vliv na jeho hodnotu. Naopak je LITS závislé na velikosti zatížení, teplotě a objemu kameniva. Na velikosti zatížení je LITS lineárně závislé při velikosti zatížení do přibližně 30 % počáteční pevnosti materiálu (Khoury et al. 1985). Hodnota LITS může být dle (Khoury 2006c) po odečtení počátečního elasto-plastického přetvoření stanovena pomocí zkoušky zahřátí vysychajícího betonu jako rozdíl hodnoty přetvoření naměřené na zatíženém vzorku a hodnoty přetvoření naměřené na nezatíženém vzorku. Pro výpočet tedy platí vztah  $\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma} = \varepsilon_{tot}^{T,\sigma} - \varepsilon_{tot}^{T,0} - \varepsilon_{elpl}^{20,\sigma}$ .

Khoury (2006c), fib (2007), Terro (1998), Gernay a Franssen (2012) a další vyjadřují LITS jako součet čtyř druhů přetvoření, které Khoury (2006c) a fib (2007) popisují jako

$$\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma} = \varepsilon_{cr}^{T,0} + \varepsilon_{cr,t}^{T,0} + \varepsilon_{\Delta el}^{T,\sigma},$$

kde

$$\varepsilon_{cr}^{T,0} = \varepsilon_{ttc}^{T,0} + \varepsilon_{cr,d}^{T,0}.$$

Pro výpočet LITS lze použít model navržený Terrem (1998), kdy je nutno zmínit, že Terro uvažuje elasto-plastické přetvoření způsobené silovým zatížením před zahřátím betonu  $\varepsilon_{elpl}^{20,\sigma}$  jako součást LITS. Guo a Shi (2011), kteří LITS nazývají jako *transient thermal strain*, rovněž uvádějí model pro výpočet hodnoty LITS.

#### 3.3.1. Přechodové teplotní dotvarování $\varepsilon_{ttc}^{T,0}$

První složkou LITS je *přechodové teplotní dotvarování*  $\varepsilon_{ttc}^{T,0}$  (z angl. *Transitional thermal creep*), které je přetvořením, ke kterému dochází u nevysychajícího betonu, který je prvně zahřát při současném silovém zatížení. Toto přetvoření, které je největší složkou LITS, je nevratné a dochází k němu pouze při prvním zahřátí zatíženého betonu (Illston a Saunders 1973). Při teplotách do 100 °C dochází k nárůstu přechodového

teplotního dotvarování až do limitní hodnoty po dobu přibližně jednoho měsíce po zahřátí (fib 2007).

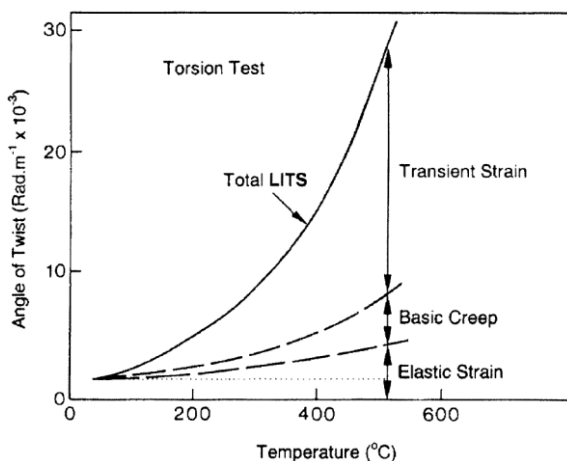
### 3.3.2. Dotvarování od vysychání $\epsilon_{cr,d}^{T,0}$

Druhou složkou LITS je *dotvarování od vysychání*  $\epsilon_{cr,d}^{T,0}$  (z angl. *Drying creep*), které je způsobeno vysycháním betonu. Tato složka přetvoření je rovněž nevratná a závisí na teplotě a času pouze v tom smyslu, že ztráta vlhkosti je závislá na teplotě a času.

### 3.3.3. Přechodné dotvarování/přetvoření $\epsilon_{cr}^{T,0}$

*Přechodové teplotní dotvarování*  $\epsilon_{ttc}^{T,0}$  a *dotvarování od vysychání*  $\epsilon_{cr,d}^{T,0}$  se běžně v literatuře společně označují jako *přechodné dotvarování/přetvoření*  $\epsilon_{cr}^{T,0}$  (z angl. *Transient creep/strain*), které někteří autoři chybně zaměňují za LITS (Khoury 2006c). Přechodné dotvarování/přetvoření je největší částí LITS, jak je možné vidět na Obr. 23, a je nevratné po ochlazení nebo odtížení. Toto přetvoření se výrazně rozvíjí nad 100 °C a většinou je uvažováno jako závislé na teplotě, a nikoliv na čase. Předpoklad nezávislosti na čase je platný pouze v případech, že teplotní zatížení trvá pouze v řádu hodin. Z důvodu nezávislosti na čase někteří autoři upřednostňují označení „přetvoření“ před označením „dotvarování“ (fib 2007).

Pro výpočet přechodného dotvarování/přetvoření  $\epsilon_{cr}^{T,0}$  lze použít například model navržený Anderbergem a Thelanderssonem (1976), kteří tento druh přetvoření nazývají *Transient strain*, model uvedený v (ČSN EN 1992-1-2 2006) nebo model navržený Schneiderem (1985).



Obr. 1 – Vývoj LITS se zvyšující se teplotou při kroucení; převzato z (fib 2007)

### 3.3.4. Časově závislé přechodné dotvarování

Třetí složkou LITS je *časově závislé přechodné dotvarování*  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$  (z angl. *Time-dependent strain under transient loaded conditions*). Tento druh přetvoření závisí na době zahřívání, a za předpokladu dané cílové teploty tedy závisí i na rychlosti zahřívání. Tento druh přetvoření je znatelný pouze v případě porovnání dvou vzorků zahříváných různými rychlostmi, kdy ostatní okrajové podmínky jako

silové zatížení a cílová teplota jsou u obou vzorků stejné (Gernay a Franssen 2012). S rostoucí dobou zahřívání a klesající rychlostí zahřívání roste velikost časově závislého přechodného dotvarování (Khoury 2006c). Velikost tohoto přetvoření je dle (Khoury et al. 1985) relativně malá, kdy pětinašobné prodloužení doby zahřívání způsobuje pouze 5-20% nárůst celkové hodnoty LITS. Časově závislé přechodné dotvarování  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$  je převážně nevratné po odtížení, ačkoliv může obsahovat „zpožděnou elastickou“ část (fib 2007). Vzhledem k tomu, že časově závislé přechodné dotvarování  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$ , které je složkou LITS, závisí na rychlosti zahřívání, měla by hodnota samotného LITS být vždy vztažena k určité rychlosti zahřívání (Khoury 2006c).

Někteří autoři pro tento druh přetvoření používají pojem *základní dotvarování* (z angl. *Basic creep*), jelikož na rozdíl od přechodného dotvarování/přetvoření je tento druh přetvoření skutečně závislý na čase. Označení základní dotvarování pro časově závislé přechodné dotvarování  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$  však není příliš vhodné, jelikož základní dotvarování je v zásadě přetvoření teplotně stabilizovaného betonu zatíženého při konstantní teplotě (Khoury 2006c). Časově závislé přechodné dotvarování  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$  je dotvarování, ke kterému dochází při procesu zahřívání, kdy dochází ke změně teploty, a proto je již z definice samotného pojmu nevhodné používat pojem základní dotvarování.

Pro výpočet časově závislého přechodného dotvarování  $\epsilon_{cr,t}^{T,0}$  lze použít například model navržený Anderbergem a Thelanderssonem (1976), kteří tento druh přetvoření nazývají *Creep-strain*, nebo model použitý Bratinou et al. (2005), kteří tento druh přetvoření nazývají *Concrete creep strain*. Model použitý Bratinou et al. (2005) je založen na modelu dle Harmathyho (1993).

### 3.3.5. Elastické přetvoření způsobené změnou teploty

Čtvrtou složkou LITS je elastické přetvoření způsobené změnou teploty  $\epsilon_{\Delta el}^{T,\sigma}$ . S rostoucí teplotou betonu dochází ke snižování jeho modulu pružnosti, což má za následek zvětšení elastického přetvoření betonu (Law a Gillie 2008, Law 2010). V případě zatíženého betonu je velikost tohoto přetvoření malá (fib 2007). Khoury (2006b) uvádí výsledky zkoušek zatíženého betonu, kde změny elastického přetvoření jsou v řádu 10-100 mikrostrainů<sup>1</sup> a celkové přetvoření po vychladnutí je 1,500-9,500 mikrostrainů. Elastické přetvoření způsobené změnou teploty je tedy většinou zanedbáváno, nebo lépe řečeno, je toto přetvoření uvažováno jako součást jiného druhu přetvoření – např. jako součást je časově závislého přechodného přetvoření. Za zmínku stojí, že v případě nezatíženého betonu není velikost změny elastického přetvoření  $\epsilon_{\Delta el}^{T,\sigma}$  zanedbatelná, jelikož v případě nezatíženého betonu dochází ke vzniku trhlin (fib 2007).

## 3.4. Trhlinami způsobené přetvoření

*Trhlinami způsobené přetvoření*  $\epsilon_{crack}^{T,\sigma}$  (z angl. *Crack-Induced Strain*) může být dle (Khoury 2006c, fib 2007) způsobeno

<sup>1</sup> Jeden mikrostrain (z angl. microstrain) je jedna miliontina přetvoření.

- a) velkým tahovým přetvořením od teploty,
- b) trhlinami na rozhraní kameniva a cementové matrice způsobené různou teplotní roztažností,
- c) odštěpováním betonu,
- d) velkým mechanickým zatížením.

Trhlinami způsobené přetvoření není významné při teplotách pod kritickou teplotou, která je dle (Khoury 2006a) okolo 600 °C. Při teplotách nad kritickou teplotou může dojít ke vzniku trhlin, avšak v případě zatíženého betonu je díky působícímu tlakovému napětí vznik a vývoj těchto trhlin výrazně omezen (Khoury 2006a).

Tento druh přetvoření se často zanedbává, nebo se v případě vyhodnocování experimentálních výsledků uvažuje jako součást jiného druhu přetvoření, případně je implicitně zahrnut v modelu pro celkové určení LITS.

### 3.5. Shrnutí

Dle různých autorů (Anderberg a Thelandersson 1976, Terro 1998, Bratina et al. 2005, Khoury 2006c, fib 2007, Gernay a Franssen 2012) se celkové přetvoření betonu při zvyšování teploty skládá z různých dílčích přetvoření. V některých dílčích přetvoření se autoři zcela shodují, zatímco u některých přetvoření různými názvy popisují stejná přetvoření, a naopak u některých přetvoření pod stejnými názvy definují odlišná přetvoření. Z toho důvodu může být celá problematika přetvoření betonu při zvyšování teploty poněkud matoucí. Autoři často uvádějí vztahy pro výpočet různých dílčích přetvoření. Při stanovování celkového přetvoření betonu je možné kombinovat vztahy pro výpočet různých dílčích přetvoření od různých autorů. Při používání vztahů od různých autorů je však nutné kontrolovat, zda dané vztahy nejsou v konfliktu – tj. zda některé přetvoření není započítáno ve více vztazích.

V tomto článku je popsáno přetvoření z pohledu Khouryho (2006c) a fibu (2007), který je dle názoru autora ze všech pohledů nejpodrobnější. Níže je shrnut tento přístup k celkovému přetvoření a u některých členů přetvoření jsou rovněž uvedeny odkazy na vztahy, které lze použít pro stanovení daného přetvoření.

Celkové přetvoření zatíženého vysychajícího betonu lze dle (Khoury 2006c, fib 2007) popsat vztahem

$$\varepsilon_{tot}^{T,\sigma} = \varepsilon_{etpl}^{20,\sigma} + \varepsilon_{tot}^{T,0} + \varepsilon_{LITS}^{T,\sigma} + \varepsilon_{crack}^{T,\sigma},$$

kde jednotlivé složky jsou popsány níže.

Přetvoření  $\varepsilon_{etpl}^{20,\sigma}$  je elasto-plastické přetvoření způsobené silovým zatížením před zahřátím betonu, které je možné stanovit pomocí vztahů uvedených v (ČSN EN 1992-1-1 2011).

Přetvoření  $\varepsilon_{tot}^{T,0}$  je teplotní přetvoření nezatíženého vysychajícího betonu, které je možné stanovit pomocí vztahů v (Terro 1998) a (ČSN EN 1992-1-2 2006) a skládá se ze složek  $\varepsilon_{tot}^{T,\sigma} = \varepsilon_{th}^T + \varepsilon_{sh}^T$ , kde  $\varepsilon_{th}^T$  je teplotní přetvoření nezatíženého nevysychajícího betonu a  $\varepsilon_{sh}^T$  je přetvoření od smršťování vysycháním.

Přetvoření  $\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma}$  je zatížením vyvolané teplotní přetvoření, které je možné stanovit pomocí vztahu v (Terro 1998) a skládá se ze složek  $\varepsilon_{LITS}^{T,\sigma} = \varepsilon_{cr,t}^{T,0} + \varepsilon_{\Delta el}^{T,\sigma} + \varepsilon_{cr}^{T,0}$ , kde  $\varepsilon_{cr,t}^{T,0}$  je časově závislé přechodné dotvarování, které

je možné stanovit pomocí vztahů v (Anderberg a Thelandersson 1976, Bratina et al. 2005),  $\varepsilon_{\Delta el}^{T,\sigma}$  je elastické přetvoření způsobené změnou teploty, které se většinou zanedbává nebo je zahrnuto ve vztahu pro výpočet jiného dílčího přetvoření a  $\varepsilon_{cr}^{T,0}$  je přechodné dotvarování/přetvoření, které je možné stanovit pomocí vztahů v (Anderberg a Thelandersson 1976, ČSN EN 1992-1-2 2006, Schneider 1985) a skládá se ze složek  $\varepsilon_{cr}^{T,0} = \varepsilon_{ttc}^{T,0} + \varepsilon_{cr,d}^{T,0}$ , kde  $\varepsilon_{ttc}^{T,0}$  je přechodové teplotní dotvarování a  $\varepsilon_{cr,d}^{T,0}$  je dotvarování od vysychání a  $\varepsilon_{crack}^{T,\sigma}$  je trhlinami způsobené přetvoření, které se většinou zanedbává nebo je zahrnuto ve vztahu pro výpočet jiného dílčího přetvoření.

## 4. ZÁVĚR

Jak je zřejmé z předchozí kapitoly, problematika přetvoření betonu za zvýšené teploty je velmi složitá a pro popis přetvoření betonu existuje mnoho modelů. V rámci další práce budou podrobněji rozebrány jednotlivé modely a bude stanoven nejhodnější model pro účely související disertační práce, tj. pro popis přetvoření silově zatíženého zahřívajícího betonu.

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS22/033/OHK1/1T/11.

## Reference

- Anderberg Y. a Thelandersson S. (1976). Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures: 2 experimental investigation and material behaviour model. Bulletin 54, Lund Institute of Technology, Sweden.
- Bastami, M., Aslani, F. a Omran, M.E. (2010). High-Temperature Mechanical Properties of Concrete. International Journal of Civil Engineering 8(4), pp. 337-351.
- Bažant, Z.P. a Chern, J.C. (1987). Stress-induced thermal and shrinkage strains in concrete. Journal of Engineering Mechanics ASCE 113(10), pp. 1493-1511.
- Bažant, Z.P. a Jirásek, M. (2018). Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures. Solid Mechanics and Its Applications 225. London: Springer.
- Bažant, Z.P., Huggaard, A.P., Baweja, S. a Ulm, F.J. (1997). Microprestress solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects. Journal of Engineering Mechanics ASCE 123(11), pp. 1188-1194.
- ČSN EN 1992-1-1 (2011). Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ÚNMZ.
- ČSN EN 1992-1-2 (2006). Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. ČNI.
- Diederichs, U. (1987). Modelle zur Beschreibung der Betonverformung bei instantionaren Temperaturen. Abschlusskolloquium Bauwerke unter Brandeinwirkung, Technische Universität, Braunschweig, p. 25-34.

fib (2007). Bulletin 38. Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling.

fib (2008). Bulletin 46. Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment.

Gernay, T. (2011). Effect of Transient Creep Strain Model on the Behaviour of Concrete Columns Subjected to Heating and Cooling. *Fire Technology* 48(2), pp. 313-329.

Gernay, T. a Franssen J.M. (2012). A formulation of the Eurocode 2 concrete model at elevated temperature that includes an explicit term for transient creep. *Fire Safety Journal* 51, pp. 1-9.

Illston, J.M. a Saunders, P.D. (1973). The effect of temperature change upon the creep of mortar under torsional loading. *Magazine of Concrete Research* 25(84), pp. 136-144.

Khoury, G.A. (1999). Mechanical behaviour at high temperature in compression. HITECO Report, Imperial Collage.

Khoury, G.A. (2006a). Strain of heated concrete during two thermal cycles. Part 1: strain over two cycles, during first heating and at subsequent constant temperature. *Magazine of Concrete Research* 58(6), pp. 367-385.

Khoury, G.A. (2006b). Strain of heated concrete during two thermal cycles. Part 2: strain during first cooling and subsequent thermal cycle. *Magazine of Concrete Research* 58(6), pp. 387-400.

Khoury, G.A. (2006c). Strain of heated concrete during two thermal cycles. Part 3: isolation of strain components and strain model development. *Magazine of Concrete Research* 58(7), pp. 421-435.

Khoury, G.A., Grainger, B.N. a Sullivan P.J.E. (1985). Strain of concrete during first heating to 600°C under load. *Magazine of Concrete Research* 37(133), pp. 195-215.

Law, A. (2010). The assessment and response of concrete structures subject to fire. Ph.D. Thesis. The University of Edinburgh.

Law, A. a Gillie, M. (2008). Load induced thermal strain: implications for structural behaviour. *Proceedings of the Fifth International Conference — Structures in Fire, Singapore*, pp. 488-496.

Li, L. a Purkiss, J. (2005). Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. *Fire Safety Journal* 40, pp. 669-686.

Schneider, U. (1985). Properties of materials at high temperatures, concrete. RILEM.

Schneider, U. (1988). Concrete at High Temperatures – A General Review. *Fire Safety Journal* 13, pp. 55-68.

Terro, M. J. (1998). Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire. *ACI Structural Journal* 95(2), pp. 183-193.

Youssef, M.A. a Mofteh, M. (2007). General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures. *Engineering Structures* 29, pp. 2618-2634.