	Specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství Kód projektu VG20122014074	
Příloha č. **8.4**	**VLASTNOSTI MATERIÁLŮ, REAKCE STAVEBNÍCH VÝROBKŮ NA OHEŇ**	
Datum vydání/aktualizace: **05. 01. 2014/25. 06. 2014**	Počet stran: **46**	Zpracovatel: **M. Netopilová**

Obsah

1 Teplotně závislé charakteristické vlastnosti materiálů při běžných teplotách 2

2 Teplotně závislé charakteristické vlastnosti stavebních materiálů při zvýšených teplotách (beton, ocel, dřevo) 5

3 Klasifikační systém stavebních výrobků podle reakce na oheň 33

4 Klasifikační kritéria pro stanovení tříd reakce na oheň 35

5 Některé parametry ovlivňující chování stavebních výrobků vzhledem k jejich reakci na oheň 42

Použitá literatura 46

1 Teplotně závislé charakteristické vlastnosti materiálů při běžných teplotách

1.1 Fyzikální a mechanické podmínky modelových úloh vedení tepla

Pro formulace úloh vedení tepla se uplatňují tzv. podmínky jednoznačnosti. Patří k nim např. podmínky fyzikální, geometrické, počáteční a povrchové, které je nutno vhodně zvolit tak, aby co nejlépe popisovaly daný modelovaný systém a současně splňovaly podmínky řešitelnosti. Např. **podmínky fyzikální** představují vstupní veličiny pro řadu výpočtů a numerických simulací, které jsou dány fyzikálními charakteristikami materiálů. Jsou to především ***hustota a objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita***, případně ***součinitel teplotní vodivosti.***

Při navrhování nebo posuzování stavebních konstrukcí se významně uplatní i **podmínky mechanické**, zejména ***pevnost a modul pružnosti***.

Pro správnost výpočtů a simulací je nutno tyto podmínky zadávat s co největší přesností. Kvalita vstupních dat je klíčová a zásadně ovlivňuje celý výpočet.

a) Základní fyzikální vlastnosti

Hustota - ρ (kg.m^{-3}) pevných látek (dříve měrná nebo specifická hmotnost) odpovídá hmotnosti látky, vztažené na jednotku objemu bez dutin a pórů. Na rozdíl od plynů a kapalin, jejichž hustota závisí pouze na teplotě a tlaku, hustota pevných látek závisí rovněž na jejich molekulovém uspořádání, a proto se mění i s krystalovou strukturou. Není-li uvedeno jinak, uvažují se hodnoty stanovené za běžného tlaku a při teplotě 20°C.

Objemová hmotnost - ρ_v (kg.m^{-3}) je definována jako poměr hmotnosti tělesa k jeho objemu, a to včetně póru a dutin. Mimo jiné je objemová hmotnost závislá na pórovitosti (otevřená, uzavřená), vlhkosti a teplotě. U materiálů s malou pórovitostí, kde se její hodnota blíží nule, jsou hodnoty hustoty a objemové hmotnosti téměř totožné. Materiály s vysokou pórovitostí vykazují objemovou hmotnost (v suchém stavu ρ_d) vždy menší než hustotu. Pro stavební materiály prezentuje objemová hmotnost jednu z prioritních vlastností.

Součinitel tepelné vodivosti - λ (W.m^{-1}.K^{-1}) je fyzikálně tepelný parametr, který tvoří základ tepelně technických stavebních výpočtů. Jeho číselná hodnota vyjadřuje hustotu tepelného toku při gradientu teploty 1 K m^{-1} v dané látce. Není materiálovou konstantou - závisí na teplotě, struktuře látky, pórovitosti, vlhkosti a tlaku [21]. Často se však za konstantní považuje.

Lze jej definovat jako množství tepla, které prochází vrstvou materiálu o tloušťce jeden metr v ploše jeden metr čtvereční za jednotku času, při jednotkovém rozdílu teplot na obou površích materiálu (1 K; 1 °C).

Součinitel tepelné vodivosti prioritně *závisí na pórovitosti, teplotě, vlhkosti*. Čím vyšší je jeho hodnota, tím horší izolační vlastnosti materiál vykazuje [20].

Určení součinitele tepelné vodivosti je stěžejní pro matematické výpočty ohřevů a ochlazování materiálu, prostupů tepla a rovněž je důležitý jako vstupní veličina pro numerické simulace fyzikálně technických, tudíž i tepelných dějů.

Měrná tepelná kapacita - c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) (dříve měrné nebo specifické teplo), udává, jaké množství tepla je třeba látce o jednotkové hmotnosti (1 kilogram) dodat, pro zahřátí o 1 °C (1 K). Není materiálovou konstantou, ale je teplotně proměnná. S klesající teplotou se měrná tepelná kapacita snižuje, avšak změny nejsou významné. Je proto zpravidla možné měrnou tepelnou kapacitu homogenních látek považovat v jistém teplotním intervalu za konstantní.

Součinitel teplotní vodivosti - a ($m^2.s^{-1}$) (dříve tepelná difuzivita) je termo fyzikálním parametrem látky a charakterizuje rychlost změny teplotního pole – schopnost materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla. Čím je hodnota *a* vyšší, tím rychleji se změna teploty povrchu projeví uvnitř tělesa.

Teplotní roztažnost - α (K^{-1}) (prezentována koeficientem délkové teplotní roztažnosti α), vyjadřuje změnu rozměrů tělesa vyvolanou změnou jeho teploty. Příčinou teplotní roztažnosti materiálů je zvětšování střední vzdálenosti mezi atomy látky vlivem zvyšující se teploty. Tento projev je důsledkem závislosti potenciální energie atomů na jejich vzdálenosti – vzájemné vzdálenosti atomů se s rostoucí teplotou zvětšují. Hodnota teplotní roztažnosti je podmíněná pevnosti vazeb v materiálu. Pokud jsou chemické vazby slabé (polymerní materiály), je tepelná roztažnost poměrné vysoká, v opačném případě (keramické materiály) je tepelná roztažnost méně výrazná.

b) Základní mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálu při mechanickém namáhání. Jsou výrazně ovlivněny mnoha interními a externími faktory. Mezi nejdůležitější patří např.:

- Interní faktory
- chemické složení a chemická heterogenita,
- struktura a strukturní heterogenita,
- velikost a tvar tělesa,
- stav povrchu.
- Externí faktory:
- teplota,
- druh a časový průběh zatěžování,
- okolní prostředí.

Pomocí zkoušek prováděných za stanovených podmínek a při stanoveném postupu (dle zkušební normy) zkoumá materiálové charakteristiky obor materiálové inženýrství. Zkouškami je simulováno namáhání, jakému je daný materiál vystaven v praxi. [19]

Pevnost - f (MPa) je základní materiálovou mechanickou vlastností. Pevností chápeme schopnost materiálu odolávat působení napětí bez porušení, kterým rozumíme plastickou deformaci nebo trvalé porušení soudržnosti částic, jež tvoří materiál. Maximální hodnotu normálového napětí, při které ještě není porušena celistvost materiálu, označujeme jako mez pevnosti. Stanoví se jako podíl deformační síly a plochy průřezu kolmého řezu, na který tato síla působí. Mez pevnosti je tak mezní zatížení, které, pokud je překročeno, způsobí destrukci materiálu.

Působící vnější napětí může být tlakové, tahové, smykové nebo v kroucení. Rozlišuje se proto pevnost v tlaku, tahu, v ohybu, ve smyku a v kroucení (případně kombinace). V oblasti staviv je obvykle prioritní pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu.

Při změnách teploty se mění krystalická struktura látky, a tím i pevnostní vlastnosti daného materiálu. Tato skutečnost se ve výpočtech často nezohledňuje.

Pevnost v tlaku - f_c (MPa) představuje hodnotu jednoosého tlakového napětí, při kterém dochází k porušení celistvosti testovaného materiálu. Stanovuje se obvykle destruktivní tlakovou zkouškou. Podle tvaru zkušebního tělesa, na kterém se zkouška provádí, se běžně jedná o tlakovou pevnost krychelnou, válcovou nebo trámcovou.

Tvrdé, ale křehké materiály vykazují v tlaku většinou vysokou pevnost, avšak při zkoušce se zpravidla poruší náhle, téměř bez předchozí deformace. Porušení nastane v rovinách, kde tangenciální napětí dosáhne maximální hodnoty. Pro houževnatý a tvárný materiál má zkouška pevnosti v tlaku velmi omezený význam.

Pevnost v tahu - f_t (MPa) představuje hodnotu jednoosého tahového napětí, při kterém dochází k porušení celistvosti testovaného materiálu. Stanovuje se obvykle destruktivní tahovou zkouškou v tahu prostém (např. ocel – ocelová tyč) nebo v tahu za ohybu (např. beton – na trámcích/hranolech).

Pevnost v tahu se zjišťuje na zkušebních tělesech namáháním prostým tahem v podélném směru. U křehkých materiálů se běžnou zkouškou zjistí pouze mez pevnosti při přetržení vzorku, u materiálů tvárných se zjistí ještě další kritická napětí pro mez kluzu, popř. mez úměrnosti a mez pružnosti.

Modul pružnosti v tahu nebo v tlaku E (MPa) (Youngův *modul pružnosti)* je měrná veličina tuhosti pevné látky v tahu (tlaku), vyjadřující závislost mezi namáháním/napětím a přetvořením. Je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí [27]. V mezích Hookova zákona je konstantou úměrnosti

normálového napětí a poměrného podélného přetvoření (protažení). Řadí se k základním vlastnostem používaným pro výpočet deformací.

Modul pružnosti ve smyku G (MPa) je měrná veličina tuhosti pevné látky ve smyku. Vyjadřuje poměr mezi smykovým napětím a jím způsobenou deformací. [11]

2 Teplotně závislé charakteristické vlastnosti stavebních materiálů při zvýšených teplotách (beton, ocel, dřevo)

U stavebních prvků, které jsou vystaveny zatěžovacím teplotním jevům, je možno uvažovat s redukcí namáhání/zatížení vzhledem k zatížení za běžné teploty [12, 15]. Pro tuto redukci lze uplatnit ***redukční součinitel úrovně zatížení***, který závisí na použitém kombinačním pravidlu stanovení návrhové hodnoty účinku zatížení pro běžnou teplotu, dílčích a kombinačních součinitelích [28].

Toto pojetí stanovení redukce zatížení je obsahem ČSN EN 1991-1-2 (Eurokódu 1) [41], kde se účinek zatížení pro požární situace $E_{d,fi}$ stanoví zjednodušeně analýzou konstrukce za běžné teploty, viz rov. 1.

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \, . \, E_d \qquad (1)$$

Kde E_d je návrhový účinek zatížení (návrhová hodnota příslušné vnitřní síly nebo momentu, určená pro navrhování za běžné teploty a pro základní kombinaci zatížení podle ČSN EN 1990),
η_{fi} redukční součinitel úrovně zatížení při požáru.

Zásady kombinace zatížení a redukční součinitel jsou pro dílčí stavební materiály upřesněny v částech 2 jednotlivých Eurokódů (EC), tj. norem ČSN EN 1992-1-2 až ČSN EN 1999-1-2 (EC 2 až EC 9).

V současném stavebnictví, při řešení požární bezpečnosti stavebních konstrukcí, náleží k nejfrekventovanějším konstrukce betonové či železobetonové, ocelové a konstrukce z materiálů na bázi dřeva [16].

2.1 Beton

Beton je kompozitní materiál, tvořený klasicky třemi základními složkami (pojivo, plnivo, voda) a případně složkami doplňkovými. Přestože ve srovnání s jinými stavebními materiály vykazuje některé nedostatky, přesto zaujímá čelní místo mezi stavebně konstrukčními hmotami [17]. Je uplatňován v různých druzích. Častým určováním druhu betonu je rozlišení podle jeho pojiva, vyztužení, objemové hmotnosti apod. Podle druhu pojiva se rozlišují různé druhy betonů, jako např. cementový, sádrový, asfaltový, s makromolekulárními pryskyřicemi (plastbeton) a jiné. Prostým označením „beton“ se však běžně rozumí beton cementový. Podle vyztužení se rozlišuje:

Prostý beton je beton bez výztuže. Dobře odolává tlaku, proto je používán na konstrukce namáhané převážně tlakem (sloupy, pilíře, základy). Současně je ale křehkým stavivem, neschopným větších deformací. Vyznačuje se nízkou únosností v tahu, ohybu, ve smyku atp.

Vyztužený beton je stavivem, ve kterém jsou mechanické vlastnosti betonu posíleny výztužnými prvky - nejčastěji ocelovými armaturami (*železobeton*). Výztužemi mohou být pruty, sítě, svařované kostry, prostorové výztužné prvky, tuhá výztuž, vláknitá rozptýlená výztuž apod. Výztuž se vkládá do tažené nebo jinak kriticky namáhané oblasti průřezu konstrukčního prvku tak, aby účelným způsobem přenášela vzniklá napětí. K vyztužení betonu lze použít i jiné vhodné materiály, jako např. skelná, plastová nebo uhlíková vlákna a další. Druh, množství, poloha a úprava výztuží je určena konstrukčními požadavky a statickými výpočty.

Základním kvalitativním znakem klasické výztuže, tj. betonářské oceli, je mez kluzu. U obyčejných betonářských ocelí se pohybuje kolem 200 až 230 MPa, u betonářských ocelí pro zvláštní účely je vyšší, a to i více než 400 MPa. Pro železobetonové konstrukce se stále častěji navrhuje i tzv. *ocelobeton,* kde železový beton spolupůsobí s ocelovými konstrukčními prvky (*spřažené ocelobetonové konstrukce)*.

Předpjatý beton je vyztužený beton, do jehož průřezu je napjatou výztuží záměrně vneseno vnitřní tlakové napětí za účelem redukce, případně vyrovnání účinků vnějšího zatížení, tzn. zejména tahových napětí. Aktivním působením výztuže je docíleno změny vnitřních sil v konstrukci. V reakci na vnější zatížení se podílí celý průřez konstrukčního prvku, který vykazuje vyšší tuhost a menší průhyb. Předpětím je do spolupůsobení s výztuží zahrnuta i ta část průřezu betonu, která je u běžných železobetonů vlivem tahových napětí prostoupena trhlinkami (krycí vrstva výztuže) a je ze statického spolupůsobení vyloučena. Krycí vrstvu je tak možno započítat do statické výšky průřezu předpjatého prvku.

Pevnost betonu v tlaku se stanoví normovými zkouškami na betonových válcích a krychlích (případně na hranolech). Podle druhu betonu se zpravidla pohybuje v rozmezí 8 až 100 MPa s tím, že betony s pevností v tlaku 55 MPa a vyšší se považují za vysokopevnostní. S přijetím evropských norem je značení tříd betonu v závislosti na jeho válcové a krychelné pevnosti v tlaku, která se udává jako podíl charakteristické pevnosti betonu *válcové* $f_{ck,cyl}$ a pevnosti betonu *krychelné* $f_{ck,\,cube}$. Přehled mezinárodního značení pevnostních tříd obyčejného a těžkého betonu, viz ČSN EN 206-1, je uveden v tab. 1.

Tab. 1 Přehled pevnostních tříd pro obyčejný a těžký beton

Pevnostní třída v tlaku	**Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ (MPa)**	**Minimální charakteristická krychelná pevnost** $f_{ck,cube}$ (MPa)
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55

C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tlaková pevnost zatvrdlého pojiva betonu je nižší než plniva (kameniva), proto negativní ovlivnění pevnosti betonu v tlaku je především vlivem pojiva.

Pevnost betonu v tahu - Betony vykazují poměrně nízkou pevnost v tahu, představuje přibližně jen 1/10 pevnosti v tlaku. Proto betonové prvky vykazují sklon ke vzniku trhlin ovlivňujících řadu vlastností stavebního prvku. Pevnost betonu v tahu je uvažována jako mezní napětí působící na jednotku plochy zkušebního tělesa, které může beton maximálně přenést při namáhání jednoosým tahem.

Hodnota pevnosti v tahu se určí v souladu s normativními dokumenty. Odvozuje-li se z pevnosti v příčném tahu $f_{ct,sp}$ nebo z pevnosti betonu v tahu za ohybu $f_{ct,f}$, lze přibližnou hodnotu pevnosti betonu v tahu při osovém namáhání $f_{ct,ax}$ získat z uvedených pevností převodními vztahy, viz rovnice 2 a 3.

$$f_{ct,ax} = 0{,}9^{8}\ f_{ct,sp} \tag{2}$$

nebo

$$f_{ct,ax} = 0{,}5^{8}\ f_{ct,f}. \tag{3}$$

Nejsou-li k dispozici přesnější údaje, lze střední a charakteristickou hodnotu pevnosti betonu v tahu určit z rovnic 4 až 6.

$$f_{ck,tm} = 0{,}30\, f_{ck}^{2/3}, \tag{4}$$

$$f_{ck,t\,0,05} = 0{,}7\ f_{ct,m}, \tag{5}$$

$$f_{ck,t\,0,95} = 1{,}3\ f_{ct,m}, \tag{6}$$

kde $f_{ck,tm}$ je střední hodnota pevnosti v tahu,
f_{ck} charakteristická hodnota pevnosti v tlaku, zjištěná na válcích,
$f_{ck,t\,0,05}$ dolní charakteristická hodnota pevnosti v tahu,
$f_{ck,t\,0,95}$ horní charakteristická hodnota pevnosti v tahu.

Pro jednotlivé třídy betonu jsou odpovídající střední a charakteristické hodnoty uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Pevnostní třídy betonu v tahu a tlaku podle ČSN EN 206 [45]

Třída betonu	C12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,tm}$ [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ck,t\ 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ck,t\ 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3

Výztuž eliminuje nízkou pevnost betonu v tahu. Vyztužené konstrukce (např. železobetonové) tak mohou mít výrazně širší možnosti použití než konstrukce z prostého betonu.

2.1.1 Vliv zvýšených teplot na vlastnosti betonu

V závislosti na teplotě je běžná změna materiálových vlastností. Změny fyzikálních a zejména mechanických vlastností konstrukčního materiálu v reakci na tepelné zatížení jsou výchozím parametrem pro stanovení chování stavebních prvků a konstrukcí na účinky požáru. Tato zásada je uplatňována i u konstrukcí betonových. U betonu se jedná o změnu vlastností fyzikálních (tepelná vodivost, teplotní roztažnost, měrná tepelná kapacita) i mechanických (změna pevnosti). Přesto, že je beton nehořlavým materiálem, působí na něj zvýšené teploty negativně. Mohou značně ovlivnit jeho fyzikální a mechanické vlastnosti a způsobit tak dočasné nebo trvalé změny betonové konstrukce. Zdrojem vnitřních napětí je např. tepelný prostup, postupné prohřívání a vznikající objemové změny jednotlivých vrstev materiálu, které jsou vlivem tepelného spádu různé v závislosti na jejich vzdálenosti od zahřívaného povrchu betonu. Prudký teplotní spád a velká napětí jsou vyvolána při náhlém ochlazení, např. při hasebním zásahu. Mimoto nastane trvalými tepelnými deformacemi i chemickými změnami změna objemu a pokles hutnosti, což se u betonu projeví negativním dopadem na jeho pevnost. Teplotní změny betonu souvisí rovněž se změnou vlastností jeho složek.

***Vliv pojiv*.** U nejběžněji používaných cementů, tzn. u cementů portlandských, dochází vlivem vypuzování vody ke smršťování trvalého charakteru, které značně roste při teplotách do 500°C. Smršťování se projevuje rozevíráním povrchových trhlin. Velikost objemového smrštění je až 0,5 %. Při vyšších teplotách probíhá dehydratace hydroxidu vápenatého, tzn. pojivé složky, na oxid vápenatý. Po ochlazení se může uplatnit nová hydratace oxidu vápenatého, která je provázena růstem objemu. Příznivěji se chovají betony s cementem obsahujícím i strusku (portlandský struskový, vysokopecní). Dobré vlastnosti vykazují v tomto směru i cementy s vyšším obsahem oxidu Al_2O_3, u kterých se při hydrataci netvoří vápenné hydráty. Krystalická voda se vypuzuje bez významného smršťování betonu.

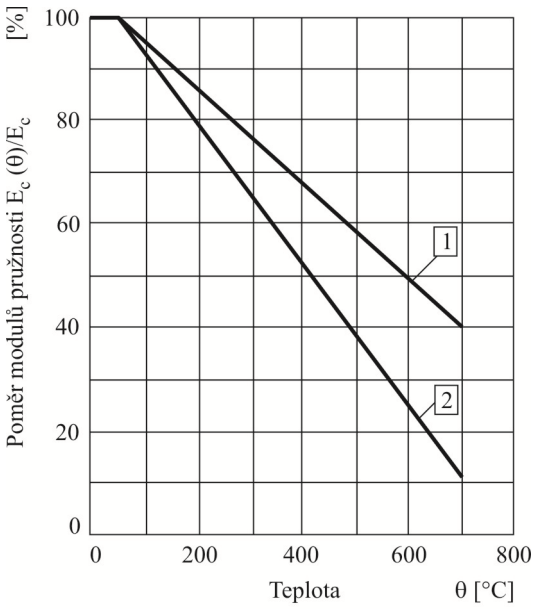
Vliv plniv. Tyto změny ovlivňuje rychlost růstu teplotní roztažnosti a míra trvalých objemových změn, které zůstávají po ochlazení. Je nutno zmínit modifikační a objemové změny křemene při teplotách kolem 575°C a následně při teplotách 870°C. Nepříznivě působí i trvalé protažení po ochlazení. Na rozdíl od betonů s křemičitými plnivy se příznivě projevují betony s plnivy vykazujícími malé objemové změny, tj. např. z vápencových štěrků, pemzy, čediče atp. Obecně lze konstatovat, že s rostoucí teplotou vzrůstá objem plniv (kameniva).

Vliv vody. Při teplotách do 100°C klesá volná vlhkost betonu. Tlak vznikající vodní páry nemá obvykle ještě destrukční charakter, jak je běžné při teplotách vyšších. Při teplotách 400 až 500°C se uvolňuje voda chemicky vázaná a růst objemu vlhkostního podílu při změně skupenství (vodní pára) působí destrukčním účinkem - vazba se uvolňuje, pevnost i modul pružnosti se snižují a s růstem teploty dále klesají.

Prostý beton

Značný rozdíl mezi tepelnými deformacemi pojiva (např. smršťováním cementu v přibližné oblasti teplot 100 až 500°C) a plniva (zvyšování objemu u většiny používaných plniv) zapříčiňují vznik místních napětí ve vzájemných dotykových plochách kameniva a cementové malty. Tato místní napětí poškozují soudržnost složek betonu a jeho pevnost při tepelné zátěži i po vychladnutí.

Teplota požáru působí jak na pevnost, tak i na ostatní charakteristiky betonu, jako např. modul pružnosti, viz obr. 1. Při zahřívání na ~ 100°C se pevnost betonu mírně zvyšuje, ale modul pružnosti klesá.



Legenda: θ - teplota
E_c - modul pružnosti při teplotě 20 °C
E_c (θ) - modul pružnosti při teplotě θ
[1] - beton s lehkým kamenivem
[2] - beton s kamenivem těžkým

Obr. 1 Modul pružnosti betonu v závislosti na teplotě, vliv druhu plniva [13]

Konstantní pevnost, případně i mírné zvýšení pevnosti obyčejných betonů při působení teploty do 100°C (max. 200°C) se vysvětluje jako příznivý vliv teploty na ta zrna cementu, která se dosud neúčastnila hydratačního procesu. Při teplotách > 200°C se pevnost betonu pozvolna snižuje. Jen u žárovzdorných betonů se při teplotách 800 až 1000°C může pevnost znovu nepatrně zvýšit. Beton se taví při teplotě kolem 1500°C, a to v závislosti na jeho složkách.

Z posouzení výsledků zkoušek pevnosti betonu v tlaku bylo konstatováno, že beton zahřátý pod teplotu 500°C získává časem znovu z ovzduší vlhkost a vlivem chemických změn nabývá zpět část své původní pevnosti. Po roční prodlevě může jeho pevnost za vhodných podmínek dosáhnout až 90 % pevnosti původní.

Požadavky na požární odolnost konstrukcí se vyjadřují mezními stavy, a to především pomocí kritéria *mechanické odolnosti **R**, celistvosti **E**, tepelně izolačních schopností **I*** a případně pomocí i dalších kritérií, viz např. ČSN 73 0810 [31]. Navrhování betonových konstrukcí na účinky požáru je předmětem Eurokódu 2, tzn. ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí. Část 1.2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Zde jsou stanoveny návrhové hodnoty tepelných a mechanických vlastností materiálu pro mimořádnou návrhovou situaci, jakou je požár. Pro navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí platí Eurokód 4, viz ČSN EN 1994-1-2 Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Část 1.2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Železobeton

Při zvyšování teplot železobetonové konstrukce závisí její funkčnost mimo jiné na spolupůsobení komponentů betonu, předně na soudržnosti výztuže s betonem. Tato je v oblasti normálních teplot zaručena především díky téměř shodnému součiniteli teplotní roztažnosti. Při zvyšování teplot nad 100°C se však hodnota délkové teplotní roztažnosti betonu a ocelové výztuže postupně různí. Odolnost železobetonu vůči teplotě je značně závislá na ochraně ocelových výztužných vložek proti prohřátí na kritickou teplotu, tj. takovou, u které se očekává porušení prvku při dané úrovni napětí v oceli (při požární situaci kritérium R). Kromě druhu ocelí a způsobu jejich uložení působí na požární odolnost železobetonových konstrukcí i odstup napětí oceli od meze průtažnosti, především v tahem namáhané oblasti železobetonového prvku. Kritická teplota běžné výztuže se pohybuje až kolem 500°C, pro předpínací výztuže předpjatých betonů kolem 350°C u přepínacích výztužných drátů a lan a přibližně 400°C u předpínacích výztužných prutů. Jestliže je dosaženo meze průtažnosti (kluzu), nastává u konstrukcí namáhaných na ohyb zlom. Kromě vlivu druhu výztuží, způsobu jejich uložení v železobetonu a zejména vlivu krycí vrstvy, ovlivní požární odolnost i odstup napětí oceli od její meze kluzu.

Předpjatý beton

Na nosnou funkci prvků z předpjatého betonu je vliv zvýšených teplot značně nepříznivý, a to v důsledku zmenšování pevnosti a modulu pružnosti betonu i výztuže, zvětšování dotvarování předpínací výztuže a zhoršování vzájemné soudržnosti. Nosná funkce přepjatého prvku vystaveného požáru se může narušit i při zatížení menším, než je zatížení normové, pro které je navržen, např. porušením betonu, přetržením předpínací výztuže, usmyknutím v šikmé trhlině nebo selháním kotevní soudržnosti. Vlivem nárůstu teplot se v důsledku zvětšeného dotvarování předpínací výztuže zmenšuje předpětí, což vede ke vzniku trhlin v tažené zóně betonu a poklesu tuhosti konstrukce. Nosnou funkci ohrožuje i odprýskávání betonu. Hlavní příčinou trvalého poškození již vychladlého předpjatého betonu po požáru je zmenšení předpětí.

Poznatky o vlivu tepelného zatížení na předpjatý beton lze citovat takto:

- prvky z předpjatého betonu jsou při teplotách požáru zvláště citlivé zejména vlivem specifických složek těchto betonů a vlivem štíhlosti a napjatosti konstrukce,
- při prohřátí průřezu na teplotu od 350 do 400°C (max. 450°C) je nutno počítat s jejich selháním,
- požární odolnost prvků je závislá na ochraně předpjatých prutů vůči ohřevu,
- vlivem odprýskávání povrchových vrstev betonu dochází k obnažování výztuže,
- nezatížené předpjaté prvky jsou pro své vysoké vnitřní napětí průřezu daleko citlivější na zvýšené teploty než prvky zatížené, u kterých je toto napětí vyrovnáváno.

Již zmíněné odprýskávání je pro beton charakteristické. Je způsobeno vícero faktory, ke kterým se řadí především přemáhání betonu při současném působení normálových napětí v tahu v příčném směru. Příčné napětí v tahu je vyvoláváno vnitřním pnutím a přetlakem vodní páry, vypuzované z ohřívaného betonu, případně vlivem tepelné roztažnosti plniv betonu. Podélná napětí v tlaku jsou vyvozována převážně předpětím a zatížením konstrukce vnitřním pnutím a vynuceným přetvořením. U betonů předpjatých může být příčinou destrukce i samotná předpínací síla, působící, např. po odprýsknutí, na průřez s již zmenšenou plochou a při větší výstřednosti. K výraznému snížení nosné schopnosti předpínací výztuže dochází vlivem odprýsknutí krycí vrstvy, kdy je výztuž vystavena přímému působení požáru.

Odprýskávání povrchových vrstev s razantním až explozivním charakterem lze předpokládat u veškerých betonových konstrukcí vystavených požáru, a to zejména v těch oblastech, které jsou namáhané tlakem. Vyskytují se drobná odprýsknutí velikosti zrna kameniva ve tvaru mělkého kráteru do 5 mm hloubky, avšak i masivní odpadávání o ploše několik m^2 případně až do hloubky kolem 40 mm. U vyztužených betonů je vlivem odpadávání povrchových vrstev zeslabována nebo zcela zrušena krycí vrstva s následným teplotním protažením výztuže, porušením soudržnosti oceli a betonu a s rychlým prohřevem hlavní výztuže na kritickou teplotu.

2.1.2 Stanovení změn fyzikálních a mechanických a vlastností betonu při zvýšených teplotách

Stanovení změny některých fyzikálních a mechanických vlastností betonu při zvýšených teplotách, jako např. pevnostních a deformačních, obsahuje Eurokód 2 [42]. V podstatě se rozlišuje několik způsobů navrhování, a to buď pomocí jednoduché výpočetní metody, nebo podle zpřesněné výpočetní metody, případně podle osvědčených návrhových řešení. *Obecná metoda výpočtu* poskytuje reálné hodnocení konstrukce, se zohledněním vlastností materiálu. Pro spolehlivou aproximaci předpokládaného chování konstrukcí a jejich částí během požáru využívá fyzikálních metod. Její součástí je modelování tepelné odezvy, která mimo jiné vychází z tepelně technických vlastností materiálů a z účinku případných požárně ochranných povrchových úprav. Jelikož tuto metodu charakterizují některé praktické obtíže, jako např. při výpočtu příslušných mezních stavů nebo výpočtu nestacionárních teplotních polí, preferují se někdy tzv. zjednodušené/jednoduché metody výpočtu. Ty vycházejí z jednoduchých tvarových parametrů a tabelárních hodnot v návaznosti na výsledky zkušebních testů požární odolnosti. Při *zjednodušených metodách výpočtu* a vývoji teploty blízké normové teplotní křivce požáru se provádí redukce charakteristické pevnosti betonu v tlaku pomocí součinitele k_c (θ), u betonářské výztuže pomocí součinitele k_s (θ), a pro redukci charakteristické pevnosti předpínací výztuže pomocí součinitele k_p (θ), viz [42].

Teplotní roztažnost je vyjádřena součinitelem délkové teplotní roztažnosti α_c, ze kterého lze usuzovat i na roztažnost objemovou. Hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti betonu se *za běžných teplot* pohybuje v rozmezí $\alpha_c = 10 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ až $12 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ a je při těchto teplotách srovnatelná s délkovou roztažností betonářské oceli. Proto je možno betony ocelí vyztužovat bez obav ze ztráty vzájemné soudržnosti.

Obecně platí pro poměrné protažení materiálů, tudíž i betonu, vztah viz rov. 7.

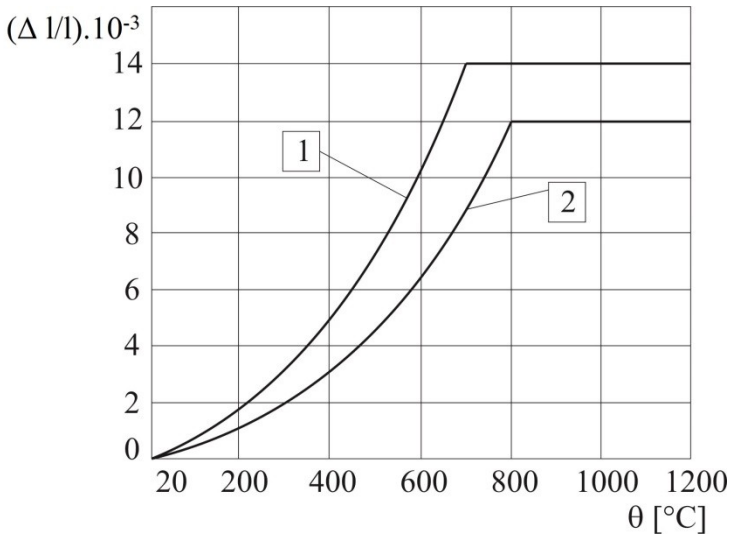
$$\Delta l / l = \varepsilon_c \qquad (7)$$

kde ε_c je poměrné protažení,

l délka betonového prvku při teplotě 20°C,

Δl změna délky betonového prvku při teplotě θ.

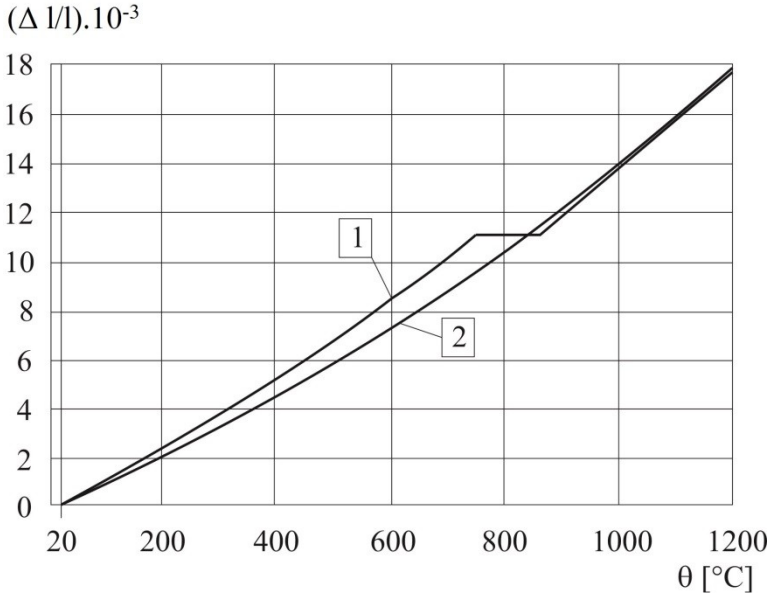
Teplotní roztažnost betonu je závislá na několika faktorech, ke kterým se řadí i druh plniva. Porovnání tepelné roztažnosti betonu s křemičitým a vápencovým plnivem znázorňuje obr. 2.



Legenda: 1 křemičité plnivo, 2 vápencové plnivo

Obr. 2 Celkové teplotní prodloužení betonu – vliv plniva [42]

Podle ČSN ENV 1992-1-2 lze stanovit teplotní deformaci běžného betonu se silikátovým kamenivem jako poměrné protažení betonu *Δl/l* (ε_c) z rovnice 8 a 9 a pro vápencové kamenivo z rovnic 10 a 11.



Legenda: 1 klasická betonářská ocelová výztuž, 2 předpínací ocel

Obr. 3 Poměrné prodloužení ocelových výztuží betonu v závislosti na teplotě [42]

$$\varepsilon_{c,(\vartheta)} = (-1{,}8 \,.\, 10^{-4}) + (9 \,.\, 10^{-6}\,\theta) + (2{,}3 \,.\, 10^{-11}\,\theta^3) \quad \text{pro } 20°C < \theta \leq 700°C \qquad (8)$$

$$\varepsilon_{c,(\vartheta)} = 14 \,.\, 10^{-3} \quad \text{pro } 700°C < \theta \leq 1200°C \qquad (9)$$

$$\varepsilon_{c,(\vartheta)} = (-1{,}2 \,.\, 10^{-4}) + (6 \,.\, 10^{-6}\,\theta) + (1.4 \,.\, 10^{-11}\,\theta^3) \quad \text{pro } 20°C < \theta \leq 805°C \qquad (10)$$

$$\varepsilon_{c,(\vartheta)} = 12 \,.\, 10^{-3} \quad \text{pro } 805°C < \theta \leq 1200°C \qquad (11)$$

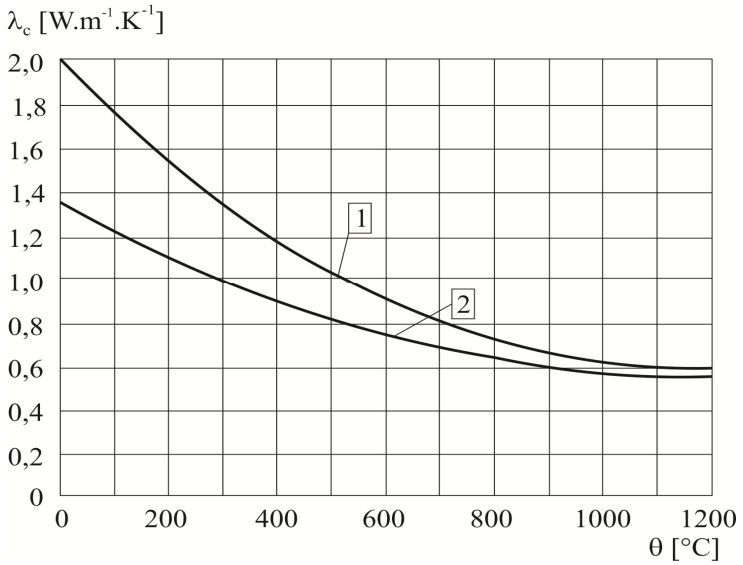
kde $\varepsilon_{c,(\vartheta)}$ je poměrná deformace/protažení,

θ_c teplota betonu (°C).

Vlastnosti betonářských výztuží zásadně ovlivňují odolnost/únosnost železobetonové konstrukce nebo její části. Významnou roli hraje při tepelném namáhání tepelná roztažnost oceli a ovlivní případnou deformaci a destrukci vyztuženého prvku. Grafické vyjádření závislosti poměrného prodloužení oceli na tepelném zatížení je znázorněno na obr. 3.

Charakteristiky, které jsou nutné pro výpočet okamžitých i dlouhodobých přetvoření, nezávisí jen na pevnostní třídě betonu, ale také na vlastnostech plniva a dalších parametrech složení směsi, na prostředí působícím na beton během jeho tuhnutí, tvrdnutí i během jeho životnosti.

Tepelná vodivost je vyjádřená součinitelem tepelné vodivosti λ (W/mK). Tepelná vodivost betonu se při zvýšených teplotách stanoví v rozmezí horní a dolní mezní hodnoty (viz [42]). V závislosti na teplotní změně znázorňuje grafické vyjádření horní i dolní mezní hodnoty tepelné vodivosti betonu obr. 4.



Obr. 4 Průběh horní meze [1] a dolní meze [2] součinitele tepelné vodivosti betonu v závislosti na teplotě [42]

Horní a dolní mez tepelné vodivosti se značí symbolem λ_c. Při početním stanovení horní meze hodnoty tepelné vodivosti betonu se uplatní rovnice 12 a pro stanovení dolní meze rovnice 13:

$$\lambda_c = 2 - 0{,}2451\,(\theta/100) + 0{,}0107\,(\theta/100)^2 \qquad \text{pro } 20°C \leq \theta \leq 1200°C \qquad (12)$$

$$\lambda_c = 1{,}36 - 0{,}136\,(\theta/100) + 0{,}0057\,(\theta/100)^2 \qquad \text{pro } 20°C \leq \theta \leq 1200°C \qquad (13)$$

kde λ_c je horní/dolní mez tepelné vodivosti (W/m.K),

θ teplota betonu (°C).

Měrná tepelná kapacita suchého betonu $c_{p,(\theta)}$ se pro různé teplotní intervaly stanoví z rovnic 14 až 17:

$c_{p,(\theta)} = 900$ pro $20°C \leq \theta \leq 100°C$ (14)

$c_{p,(\theta)} = 900 + (\theta - 100)$ pro $100°C < \theta \leq 200°C$ (15)

$c_{p,(\theta)} = 1\,000 + (\theta - 200)/2$ pro $200°C < \theta \leq 400°C$ (16)

$c_{p,(\theta)} = 1\,100$ pro $400°C < \theta \leq 1\,200°C$ (17)

kde θ je teplota betonu (°C),
$c_{p,(\theta)}$ měrná tepelná kapacita (J/kg.K).

Vyjádření závislosti měrné tepelné kapacity betonu různé vlhkosti na změně teploty obsahuje Eurokód 2.

Objemová hmotnost betonu je při zvyšování teplot ovlivněna postupnou ztrátou volné a vázané vlhkosti. Podle Eurokódu 2 je definována viz rov. 18 až 21.

$\rho_{(\theta)} = \rho(20\ °C)$ pro $20°C \leq \theta \leq 115°C$ (18)

$\rho_{(\theta)} = \rho(20°C).(1-0{,}02(\theta-115)/85)$ pro $115°C < \theta \leq 200°C$ (19)

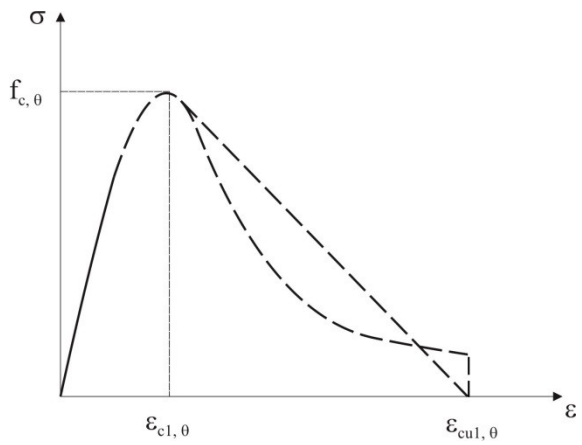
$\rho_{(\theta)} = \rho(20°C).(0{,}98-0{,}03(\theta - 200)/200)$ pro $200°C < \theta \leq 400°C$ (20)

$\rho_{(\theta)} = \rho(20\ °C).(0{,}95 - 0{,}07(\theta-400)/800)$ pro $400°C < \theta \leq 1\,200°C$ (21)

kde ρ je objemová hmotnost betonu (kg/m^3),
θ teplota betonu (°C).

Pevnost v tlaku pro jednoose namáhaný beton se stanoví v návaznosti na pracovní diagram betonu při zvýšených teplotách, viz obr. 5. Pracovní diagram je definován pevností v tlaku a poměrným přetvořením při tlakovém napětí. Změna pevnosti betonu v tlaku je u různých druhů betonu odlišná, viz porovnání betonu obyčejného a lehkého na obr. 6.

S rostoucí teplotou jednoznačně dokládají hodnoty hlavních parametrů pro beton s křemičitým a vápencovým kamenivem úbytek pevnosti a zvyšování poměrného přetvoření ε_c. V tabulce 3 je uveden poměr pevnosti při dané teplotě a pevnosti původní.



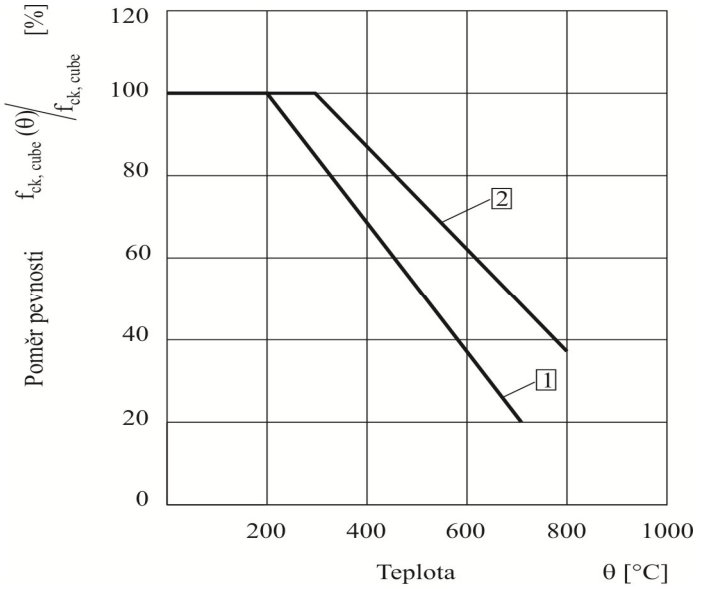
Legenda: $f_{c,\theta}$ střední hodnota pevnosti betonu v tlaku při teplotě θ (MPa),
$\varepsilon_{c1,\theta}$ teplotní poměrné přetvoření betonu,
$\varepsilon_{cu1,\theta}$ teplotní maximální poměrné přetvoření.

Obr. 5 Pracovní diagram betonu v tlaku při zvýšených teplotách [42]

Při uplatnění jednoduché výpočetní metody navrhování lze např. redukci charakteristické pevnosti betonu v tlaku vyjádřit podle druhu kameniva a v závislosti na teplotě podle tab. 3, graficky viz znázornění na obr. 7.

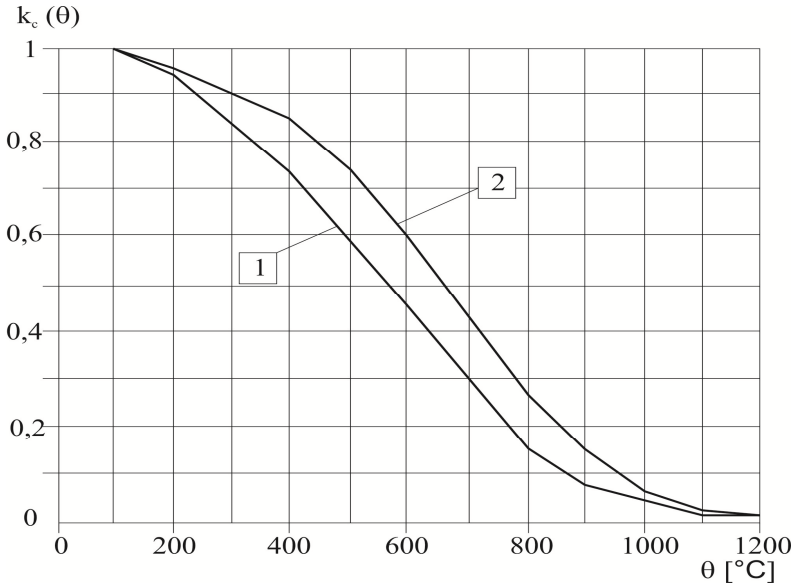
Tab. 3 Hodnoty hlavních parametrů pracovního diagramu betonu při zvyšování teplot [42]

Teplota θ (°C)	**Křemičité kamenivo**			**Vápencové kamenivo**		
	$f_{C,\vartheta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\vartheta}$	$\varepsilon_{cu1,\vartheta}$	$f_{C,\vartheta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\vartheta}$	$\varepsilon_{cu1,\vartheta}$
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-



Legenda: [1] obyčejné betony; [2] lehké betony

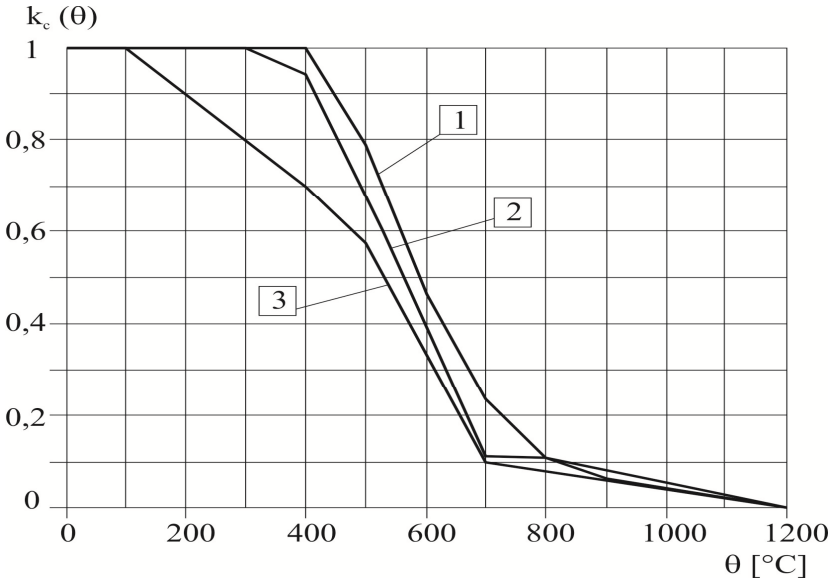
Obr. 6 Pevnost v tlaku obyčejných a lehkých betonů v závislosti na teplotě [13]



Legenda: [1] beton s křemičitým kamenivem; [2] beton s vápencovým kamenivem

Obr. 7 Součinitel $k_c(\theta)$ pro redukci charakteristické pevnosti betonu v tlaku [42]

Redukce charakteristické pevnosti tahové a tlakové výztuže viz obr. 8 a z tabulkových hodnot v EC 2.



Legenda: [1] tahová výztuž válcovaná za tepla ε ≥2%; [2] tahová výztuž tvářená za studena ε ≥2%; [3] tlaková a tahová výztuž ε<2%

Obr. 8 Redukční součinitel charakteristické pevnosti výztuže v závislosti na teplotě [42]

Při určitých zjednodušeních lze pevnost betonu vyjádřit podle [42] viz rov. 22.

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck,20} \qquad (22)$$

kde $f_{ck,\theta}$ je pevnost betonu při teplotě θ (MPa),
$f_{ck,20}$ charakteristická pevnost betonu v tlaku při teplotě 20°C (MPa),
$k_{c,\theta}$ součinitel vyjadřující teplotně-pevnostní závislost betonu.

Pevnost v tahu se při účincích zvýšených teplot na betonové konstrukce obvykle neuvažuje. Pokud je ale nutné pevnost betonu v tahu do výpočtových metod zahrnout, počítá se s charakteristickou tahovou pevností, korigovanou redukčním součinitelem $k_{c,t}(\theta)$ podle rovnice 23.

$$f_{ck,t}(\theta)=k_{c,t}(\theta)f_{ck,t} \qquad (23)$$

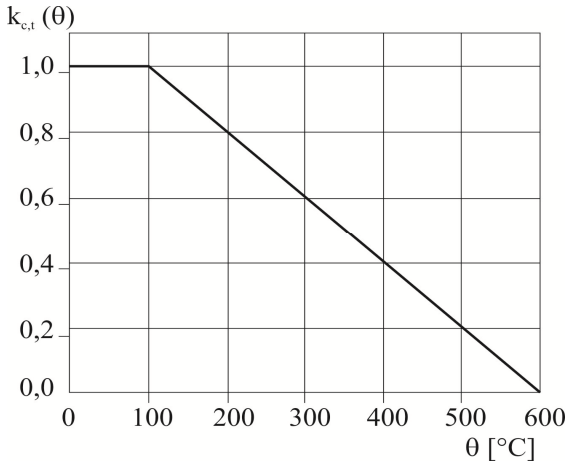
kde $f_{ck,t}(\theta)$ je charakteristická hodnota pevnosti betonu v tahu při teplotě pro stanovené poměrné přetvoření [MPa],

$f_{ck,t}$ charakteristická hodnota pevnosti betonu v tahu [MPa],
$k_{c,t}(\theta)$ redukční pevnostní součinitel při teplotě (θ).

Na obr. 9 je grafické znázornění poklesu redukčního součinitele pevnosti betonu v tahu při zvýšených teplotách. Běžné používání hodnot redukčního součinitele pro konkrétní teplotní intervaly viz rovnice 24 a 25.

$$k_{c,t}(\theta) = 1 \qquad \text{pro } 20\ °C \leq \theta \leq 100\ °C \qquad (24)$$

$k_{c,t}(\theta) = 1{,}0 - 1{,}0\ (\theta - 100)/500$ pro $100°C < \theta \leq 600°C$ (25)



Obr. 9 Změna hodnoty redukčního součinitele pevnosti betonu v tahu *kc,t*(θ) při zvýšených teplotách [42]

Pevnostní a deformační vlastnosti betonářské a předpínací oceli při zvýšených teplotách se stanoví z pracovního diagramu a odpovídajících tabelárních hodnot podle Eurokódu 2.

2.2 Ocel

Z hlediska fyzikálních vlastností vyniká ocel především dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, tvárností, houževnatostí, pružností atp. Ocelové konstrukce, zejména v podobě sofistikovaných konstrukčních systémů, jsou mnohem efektivnější než např. železobetonové. Vyžadují však konsekventní řešení řady požadavků, ke kterým se řadí i bezpečná ochrana proti tepelnému zatížení/namáhání, jakým může být např. požár [29].

Vliv zvýšených teplot na fyzikální a mechanické vlastnosti kovových materiálů

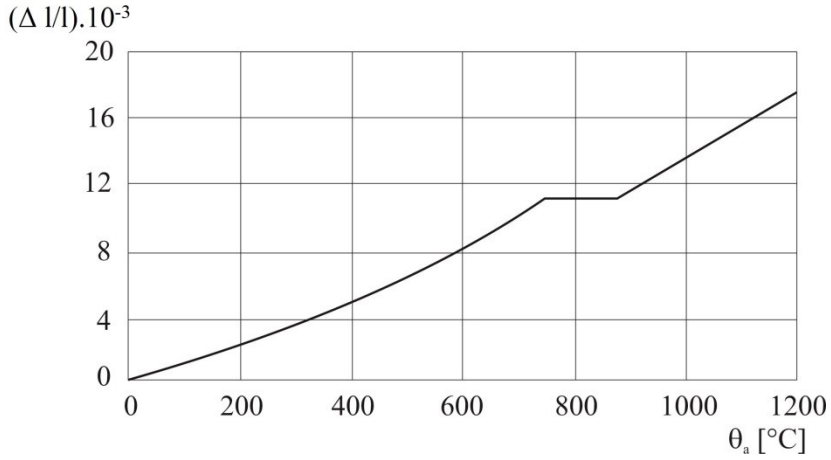
Skutečnost, že fyzikální a mechanické vlastnosti kovů jsou většinou značně ovlivňovány teplotou, je důsledkem změny vazebných sil ve struktuře kovů a tudíž většími rozkmity atomů v uzlových bodech strukturní mřížky. Obecně platí, že s rostoucí teplotou klesají pevnostní vlastnosti, tažnost a plastické vlastnosti rostou a naopak. ¨

2.2.1 Stanovení změn fyzikálních a mechanických a vlastností stavební oceli při zvýšených teplotách podle Eurokódu 3

Teplotní roztažnost - je vyjádřena součinitelem délkové teplotní roztažnosti α (K^{-1}). Při běžné teplotě je pro ocel uvažováno $\alpha \cong 12 \ . \ 10^{-6}$ ($°C^{-1}$). U oceli s vyšším obsahem uhlíku je roztažnost nižší. Součinitel délkové teplotní roztažnosti lze stanovit experimentálně z délkových změn v určitém rozsahu teplot. Pro čisté kovy se přibližně určí početně nebo se

odvozuje s využitím termodynamiky a stavové rovnice tuhých látek. Délková roztažnost je nepřímo úměrná modulu pružnosti a atomového objemu, je tedy funkcí atomového čísla.

Grafické znázornění poměrného protažení oceli v závislosti na teplotě, (viz Eurokód 3 [43]), dokumentuje obr. 10.



Obr. 10 Poměrná teplotní roztažnost uhlíkové oceli v závislosti na teplotě [43]

Tato charakteristická vlastnost může být zdrojem nebezpečí ztráty únosnosti a stability ocelových konstrukcí. Například u dokonale vetknutých konstrukcí, které nemají možnost volné deformace/prodloužení, lze při jejich prohřátí nad 100°C za jistých okolností předpokládat značné namáhání. Aby se zabránilo vybočení ocelové konstrukce samotné nebo poškození konstrukcí okolních, je nutno dbát na odpovídající konstrukční řešení případně na účinnou dilataci.

Podle [43] lze poměrné teplotní protažení oceli $\Delta l/l$ lze přesně stanovit početně z rovnic 26 až 28.

$$\Delta l/l = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\,\theta_a + 0{,}4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_a^2 - 2{,}416 \cdot 10^{-4} \qquad \text{pro } 20°C \le \theta_a < 750°C \qquad (26)$$

$$\Delta l/l = 1{,}1 \cdot 10^{-2}\,\theta_a \qquad \text{pro } 750°C \le \theta_a < 860°C \qquad (27)$$

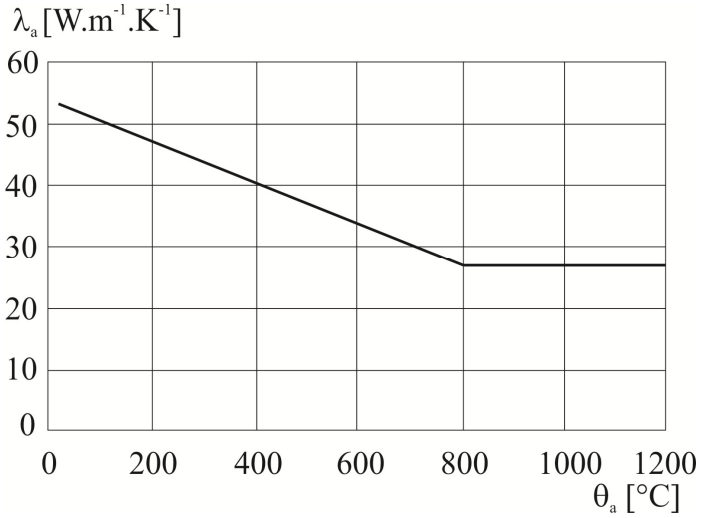
$$\Delta l/l = 2 \cdot 10^{-5}\,\theta_a - 6{,}2 \cdot 10^{-3} \qquad \text{pro } 860°C \le \theta_a \le 1200°C \qquad (28)$$

kde l je délka při teplotě 20° C (m),
Δl teplotní protažení (m),
θ_a teplota ocele (°C).

Vliv tepelné roztažnosti u ocelových konstrukcí by měl být posuzován s ohledem na měnící se hodnoty součinitele α, neboť při vyšších teplotách jsou až 20% rozdíly oproti běžné teplotě.

Rovněž u slitin kovů je teplotní roztažnost významnou vlastností i s minimální, maximální a definovaným limitem v určitém teplotním intervalu (např. při spojování kovů se sklem nebo keramikou). Cíleně je možno vyrobit slitiny s nulovou délkovou roztažností v teplotním intervalu 0 až 100°C. Naopak pro tepelné pojistky a bimetaly se požadují co největší hodnoty délkové roztažnosti.

Tepelná vodivost se vyjadřuje pomocí součinitele λ_a (W/mK). Se vzrůstající teplotou lze její pokles znázornit graficky viz obr. 11.



Obr. 11 Součinitel tepelné vodivosti oceli v závislosti na teplotě [43]

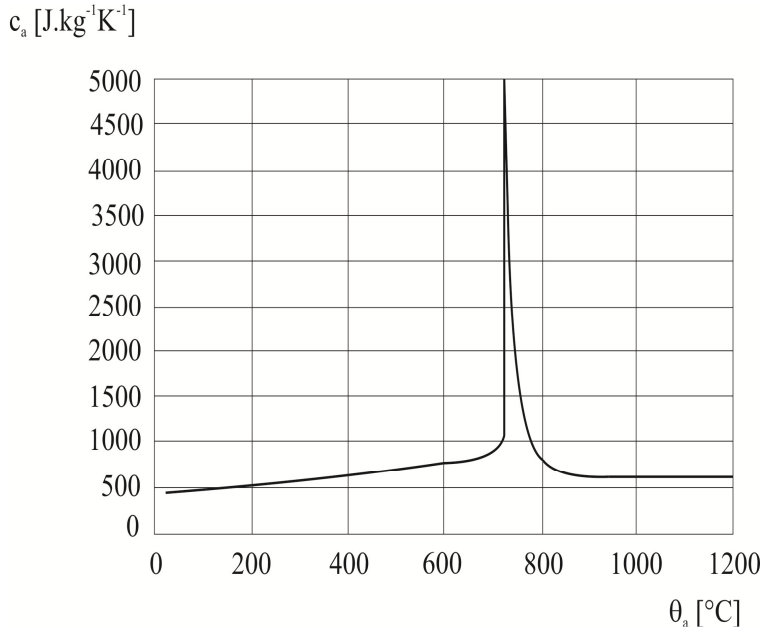
Rovnice 29 a 30 jsou sestaveny pro početní stanovení součinitele tepelné vodivosti.

$\lambda_a = 54 - 3{,}33 \cdot 10^{-2}\,\theta_a$ pro $20°C \leq \theta_a < 800°C$ (29)

$\lambda_a = 27{,}3$ pro $800°C \leq \theta_a \leq 1200°C$ (30)

kde λ_a je součinitel tepelné vodivosti (W/mK),
θ_a teplota oceli.

Měrná tepelná kapacita se značí symbolem *c* (J/kg K). V současně platném Eurokódu 3 se teplotní účinky na stanovení měrné tepelné kapacity zohledňují, viz obr. 12 a rovnice 31 až 34.



Obr. 12 Měrná tepelná kapacita oceli v závislosti na teplotě [43]

$c_a = 425 + 7{,}73.10^{-1}\,\theta_a - 1{,}69.10^{-3}\,\theta_a^2 + 2{,}22.10^{-6}\,\theta_a^3$ pro $20°C \leq \theta_a < 600°C$ (31)

$c_a = 666 + 13\,002/(738 - \theta_a)$ pro $600°C \leq \theta_a < 735°C$ (32)

$c_a = 545 + 17\,820/(\theta_a - 731)$ pro $735°C \leq \theta_a < 900°C$ (33)

$c_a = 650$ pro $900°C \leq \theta_a \leq 1200°C$ (34)

kde c je měrná tepelná kapacita (J/kg K),
θ_a teplota oceli (°C).

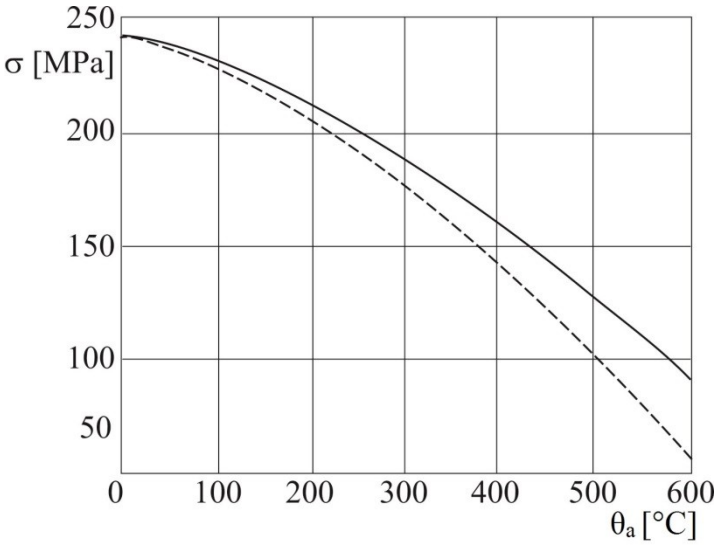
Původně bylo v ČSN ENV 1993-1-2 uvažováno pro jednoduché výpočetní metody s měrným teplem oceli nezávislým na změně teploty.

Měrná hmotnost oceli se uvažuje jako nezávislá na teplotním intervalu, a to ρ_a = 7850 (kg.m^{-3}).

Mechanické vlastnosti

Ocel se pro určité hladiny zatížení chová jako pružná a nad těmito hladinami jako plastická nebo pružně plastická. Na změnu mechanických vlastností má vliv i změna teploty. Se stoupající teplotou klesá mez kluzu, pevnost však nemusí klesat okamžitě. Od teploty 600 °C lze ocel pokládat za zcela plastickou. S klesající teplotou pod 0°C může mez kluzu stoupat, aniž se mění mez pevnosti. V kombinaci s dalšími vlivy, které snižují plastické vlastnosti oceli, může při určité, tzv. přechodové teplotě dojít k náhlému přerušení oceli, tzv. křehkému lomu.

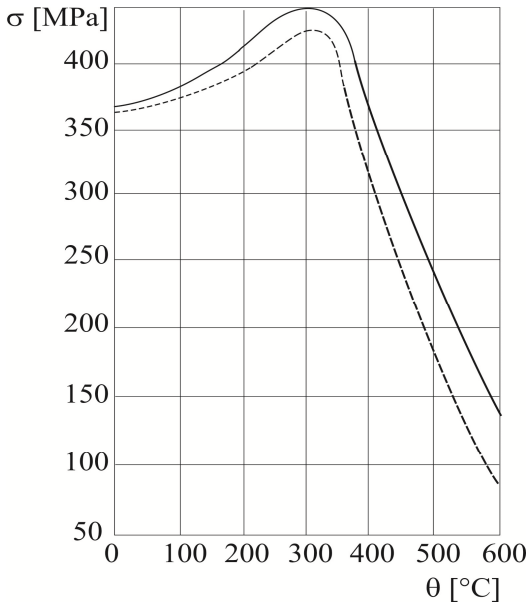
***Mez kluzu* oceli -** mez kluzu je napětí, při kterém během zkoušky tahem pokračuje prodlužování zkušební tyče, i když je růst zatížení přerušen. Je to nejmenší napětí, které způsobí rozvoj výrazných plastických deformací. Není-li tato mez zřetelná, stanoví se tzv. konvenční/smluvní mez kluzu $f_{0,2}$. Lze ji se určit z pracovního diagramu ze zatížení, při kterém prodloužení zkušební tyče dosahuje 0,2% její původní délky.



Obr. 13 Mez kluzu oceli v závislosti na teplotě [13]

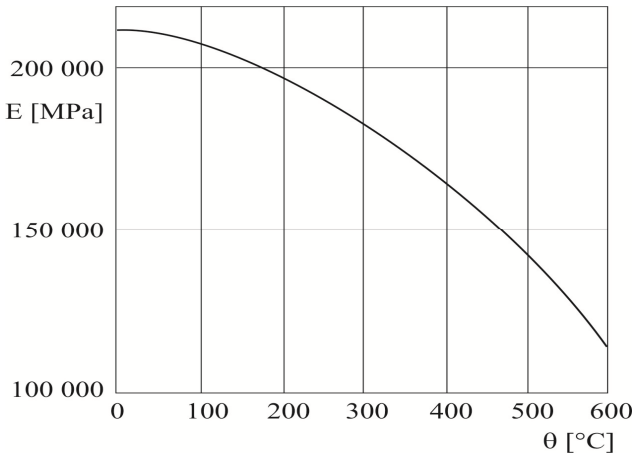
Vlivem vyšších teplot klesá, a tím se snižuje únosnost stavební konstrukce. Pokles meze kluzu viz obr. 13, kde plná čára znázorňuje průběh meze kluzu okamžitě při dosažení konkrétní teploty, přerušovaná křivka znázorňuje průběh meze kluzu měřené po pětihodinové prodlevě.

Mez pevnosti v tahu je smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení, které předchází porušení zkušebního vzorku, tj. ocelové zkušební tyče. Pevnost oceli se přibližně do teploty 300 °C zvyšuje, při teplotách nad 350 °C poměrně výrazně klesá, viz obr. 14. Mezi jednotlivými druhy ocelí jsou však rozdíly ovlivněné obsahem uhlíku.



Obr. 14 Pevnost oceli v tahu v závislosti na teplotě [13]

Modul pružnosti, viz obr. 15, vykazuje konstantní hodnotu pouze do meze úměrnosti. Při požáru se vzrůstem teploty mez úměrnosti klesá, napětí roste nad tuto mez a dostává se do plastické oblasti. Zde je hodnota modulu pružnosti závislá na napětí a prudce klesá.



Obr.15 Průběh modulu pružnosti (*E*) stavební oceli v závislosti na teplotě [13]

2.2.2 Vliv požáru na ocelové konstrukce

Při teplotě nižší než 350°C neklesají mechanické vlastnosti oceli natolik, aby byla ohrožena bezpečnost staveb. Avšak při teplotách ≈ 500 až 700 °C pozbývá ocel téměř zcela svou únosnost. Nevýhodou oceli je její vysoká tepelná vodivost a redukce materiálových charakteristik. Pokud není deformována, lze ji po požáru obvykle opět použít. Při sledování ocelových, zejména tyčových, konstrukcí za vysokých teplot bylo prokázáno, že pro požární odolnost je rozhodující tzv. ***součinitel průřezu A_m/V*** (m^{-1}). Vyjadřuje poměr mezi ohřívaným povrchem konstrukčního prvku A_m (m^2) a jeho objemem V (m^3). Platí nepřímá úměra – čím větší hodnota poměru A_m/V, tím nižší požární odolnost [2]. Subtilnější ocelové prvky se prohřejí na kritickou teplotu rychleji, než prvky masivní. Součinitelem průřezu je tudíž vyjádřen vliv subtilnosti nebo naopak masivnosti průřezu na celkovou požární odolnost konstrukce. [1]

Základním principem zvýšení odolnosti ocelových konstrukcí vůči požáru je zamezení jejich prohřátí na kritickou teplotu [7], tj. ≈ 500 °C a vyšší. U ocelových nebo ocelobetonových spřažených konstrukčních prvků se kritická teplota různí v závislosti na druhu konstrukce a uvažuje se s hodnotami:

- 500 °C pro konstrukční prvky zajišťující stabilitu objektu nebo jeho části apod. (sloupy, nosníky, průvlaky, vazníky a další),
- 560 °C pro střešní nosníky a prvky střešních plášťů, zavětrování, roštové a jiné prvky s požadavkem na požární odolnost,
- 600 °C pro nosné prvky obvodových plášťů, nezajišťujících stabilitu objektu nebo jeho části.

Před prohřátím ocelových konstrukcí na kritickou teplotu existuje několik možností ochrany. Z materiálově konstrukčního hlediska lze k tomuto účelu uplatnit některé způsoby povrchových úprav, jako jsou např. obetonování, obezdívání, protipožární omítkoviny/ nástřiky (až R 180), nátěry (až R 30, výjimečně R 45) a obklady zejména deskovými výrobky (až R 180) [8]. Případně je možno uzavřený dutý konstrukční profil vyplnit betonem. Zvýšení požární odolnosti ocelové konstrukce lze omezeně zajistit vytvořením statické rezervy tak,

aby bylo dosaženo teploty až v čase požadované požární odolnosti. [8] Zásady navrhování ocelových konstrukcí, včetně návrhu na účinky požáru, zahrnuje [43].

2.3 Materiály na bázi dřeva

2.3.1 Vlastnosti dřeva

Dřevo se vyznačuje poměrně nízkou hmotností, avšak vysokou pevností. Poměr pevnosti dřeva k objemové hmotnosti lze porovnat např. s kovy, které svými vlastnostmi někdy i převyšuje [14]. Na rozdíl od kovů se vyznačuje malou plastickou deformací a značnou

odolností vůči rázovému namáhání a kmitání. Pro technickou praxi je často problematická hydroskopičnost dřevních materiálů, jejich bobtnání a sesýchání. Tyto vlastnosti následně ovlivňují celou řadu vlastností jiných, jako např. objemovou hmotnost, mechanické vlastnosti, rozměrovou stálost, tepelně technické vlastnosti, životnost a další.

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva jsou proměnné, ovlivnitelné řadou faktorů [6]. Vlivem anizotropie dřeva, četných odchylek anatomické stavby a dalších faktorů se jeho vlastnosti mění. Např. pro pevnostní vlastnosti platí, že dřevo ve směru vláknité struktury, tj. podél vláken má výrazně větší pevnost než ve směru příčném, tj. kolmém na vlákna [10]. Ve směru kolmém na vlákna je pevnost dřeva 10x až 50x nižší. Pevnost dřeva se snižuje i s nárůstem teploty - příčinou je plastifikace ligninu, jedné ze základních složek dřevní hmoty. Vlhké dřevo má mechanické vlastnosti horší než dřevo suché (voda snižuje mezimolekulární tření).

Pevnost v tlaku **p**ři vlhkosti 12 % napříč vláknité struktury dřeva je udávána hodnotou 4 až – 6 MPa, ve směru podél vláken 40 - 50 MPa.

Pevnost v tahu je vlhkostí ovlivněná minimálně, i když jeho pevnost v tahu napříč vláken se zmenšuje. Podél vláken se pro všechny tuzemské dřeviny udává přibližně 130 MPa, napříč vláken je průměrně asi 1/20 pevnosti dřeva v tahu podél vláken. Největší pevnost v tahu napříč vláken vykazují dřeviny listnaté.

Tab. 4 Některé mechanické vlastnosti tuzemských dřevin [16]

Dřevo	**Tlak**		**Smyk**	**Tah**	
	Podél vláken (MPa)	**Napříč vláken (MPa)**	**Podél vláken (MPa)**	**Podél vláken (MPa)**	**Napříč vláken (MPa)**
Borovice	49,2	5,4	9,6	88	3,2
Smrk	38,7	4	7,9	75,8	2,6
Dub	46,6	7	12	101,4	5,5
Topol	38,2	3,4	8,2	154,4	3,7

Pevnost ve smyku silně ovlivňuje směrová nestejnorodost dřeva. Proti předchozím pevnostem však největší smykovou pevnost vykazuje dřevo ve směru napříč vláken (viz tab. 4) a ve směru podélném se obvykle neuvažuje. Na smyk jsou především namáhány konstrukční spoje.

Pevnost v ohybu vykazuje dřevo ve směru vláken velmi vysokou, ve směru příčném nízkou. Na ohyb jsou namáhány vazníky, trámce a převážná část střešních konstrukcí. Na základě pevnosti v ohybu a v tlaku ve směru podél vláken můžeme dřeviny rozdělit do tří skupin:

- dřeviny s malou pevností (jedle, lípa, olše, osika, topol, kaštan),
- pevné dřeviny (smrk, borovice, modřín, tis, dub, buk, jilm, ořešák),

- velmi pevné dřeviny (akát, habr, hruška, javor, jasan).

Modul pružnosti v tahu a tlaku je u tuzemských dřevin (12% vlhkosti) ve směru podél vláken přibližně 10 000 – 15 000 MPa, napříč vláken je tato hodnota až 25x menší. Modul pružnosti ve smyku je přibližně 600 MPa.

Vlhkost dřeva způsobuje rozměrové změny dřeva a dřevo bobtná nebo sesychá. Podél vláken jsou rozměrové změny velmi malé, pro naše dřeviny se udává 0,1 až 0,4%. V příčném směru dřevo mění své rozměry mnohem více - 3 až 12%. Různé charakteristiky dřeva se obvykle udávají při jeho 12% vlhkosti. Změna vlhkosti dřeva ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti, jako např. pevnostní, tepelné atd.

Hustota dřeva se vztahuje k samotné dřevní hmotě a je závislá na jejich hlavních složkách, tzn. celulóze, ligninu a hemicelulózách. Její hodnota je přibližně 1540 kg/m^3. Často je zaměňována s pojmem objemová hmotnost.

Objemová hmotnost významně koreluje většinu fyzikálních a mechanických vlastností dřeva a únosnost spojů. Značně kolísá vlivem změn vlhkosti dřeva, viz tab. 5.

Tab. 5 Vliv vlhkosti na objemovou hmotnost některých tuzemských dřevin [14]

Dřevo	**Objemová hmotnost dřeva (kg.m^{-3})**		
	Čerstvě vytěžené	Při vlhkosti 15%	Při vlhkosti 0%
Dub	920 – 1300	690	650
Buk	900 – 1240	720	680
Modřín	800	590	550
Borovice	900	520	490
Jedle	850	450	410
Smrk	850	470	430

Měrná tepelná kapacita dřeva je $c \approx 1{,}357$ J.kg^{-1}.K^{-1}. Důležitým faktorem, na němž závisí, je především vlhkost. Se vzrůstem vlhkosti (voda $c = 4{,}187$ J.kg^{-1}.K^{-1}) se měrná tepelná kapacita dřeva zvyšuje.

Tepelná vodivost je rozdílná ve směru kolmém a podélném vzhledem k vláknité struktuře dřeva. Při vlhkosti 12% je $\lambda_{\perp} = 0{,}12$ až 0,18 (W/m.K) a $\lambda_{||} = 0{,}25$ až 0,45 (W/m.K). Se zvyšující se vlhkostí a objemovou hmotností tepelná vodivost roste. Při vlhkosti 50% je více než dvojnásobnou oproti hodnotě při 12% vlhkosti.

Teplotní roztažnost je nízká $\alpha_{\perp} \approx 34{,}1 \times 10^{-6}$K^{-1} a $\alpha_{||} \approx 5{,}4 \times 10^{-6}$ K^{-1}. Proto u návrhu dřevěných konstrukcí se zpravidla nemusí počítat s účinky roztažnosti od teplotních změn.

2.3.2 Navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru

Navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru je předmětem Eurokódu 5, tj. ČSN EN 1995-1-2 [44]. Návrhové hodnoty pevnosti a tuhosti se stanoví podle rov. 35 a 36, kde se uplatní 20% kvantil pevnosti a tuhosti za běžné teploty. Návrhová hodnota únosnosti opět vychází z kvantilu hodnot při běžné teplotě podle rov. 37. Dvacetiprocentní kvantil pevnosti nebo tuhosti a mechanické odolnosti spoje se stanoví podle rov. 38 až 40.

$$f_{\mathrm{d,fi}} = k_{\mathrm{mod,fi}} \frac{f_{20}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \tag{35}$$

$$S_{\mathrm{d,fi}} = k_{\mathrm{mod,fi}} \frac{S_{20}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \tag{36}$$

$$R_{\mathrm{d,t,fi}} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{\mathrm{M,fi}}} \tag{37}$$

$$f_{20} = k_{fi} \,.\, f_k \tag{38}$$

$$S_{20} = k_{fi} \,.\, S_{05} \tag{39}$$

$$R_{20} = k_{fi} \,.\, R_k \tag{40}$$

Kde $f_{d,fi}$ je návrhová pevnost při požáru,
$S_{d,fi}$ návrhová tuhost při požáru(modul pružnosti $E_{d,t,fi}$ nebo $G_{d,t,fi}$),
$R_{d,t,fi}$ návrhová hodnota mechanické odolnosti v čase t trvání požáru,
f_{20} 20% kvantil pevnostní vlastnosti při běžné teplotě,
S_{20} 20% kvantil tuhostní vlastnosti (*E;G*) při běžné teplotě,
S_{05} 5% kvantil tuhostní vlastnosti (*E;G*) při běžné teplotě,
R_{20} 20% kvantil mechanické odolnosti spoje při běžné teplotě bez účinku trvání zatížení a vlhkosti,
R_k charakteristická mechanická odolnost spoje při běžné teplotě bez účinku trvání zatížení a vlhkosti,
$k_{mod,fi}$ modifikační součinitel pro požár,
k_{fi} součinitel (viz tab. 6),
f_k charakteristická pevnost,
$\gamma_{\mathrm{M,fi}}$ dílčí součinitel spolehlivosti dřeva při požáru,
η převodní součinitel.

Tab. 6 Hodnoty součinitele k_{fi} [44]

Druh materiálu a spoje	k_{fi}
Rostlé dřevo	1,25
Lepené lamelové dřevo	1,15
Desky na bázi dřeva	1,15
LVL (laminované, vrstvené, kompozitní)	1,1
Spoje se spojovacími prostředky ve střihu s bočními prvky ze dřeva a desek na bázi dřeva	1,15
Spoje se spojovacími prostředky ve střihu s bočními prvky z oceli	1,05
Spoje s osově zatíženými spojovacími prostředky	1,05

Pro výpočty z oblasti požární bezpečnosti se uvažuje s vlastnostmi při běžné teplotě, viz ČSN EN 1995-1-1. Pro výpočtové určení požární odolnosti dřevěných konstrukcí (včetně posouzení spojů) slouží [44], která stanovuje metodu redukovaného průřezu a metodu redukovaných vlastností. Podle ČSN EN 1995-1-1 se pro výpočty uplatní ***charakteristické hodnoty X_k***, které odpovídají kvantilu předpokládaného statistického rozdělení dané vlastnosti materiálu stanovované prostřednictvím příslušných norem a zkoušek. Pomocí charakteristických hodnot se určí ***návrhové hodnoty X_d***, definované podle rov. 41.

$$\chi_{\mathrm{d}} = k_{\mathrm{mod}} \frac{\chi_{\mathrm{k}}}{\gamma_{\mathrm{M}}} \tag{41}$$

kde X_d je návrhová hodnota vlastnosti materiálu,
k_{mod} modifikační součinitel účinku délky trvání zatížení a vlhkosti na parametry pevnosti,
γ_{M} dílčí součinitel vlastnosti materiálu.

Při návrhu za požární situace se musí ověřit, zda není překročen žádný z možných mezních stavů požární odolnosti a platnost rovnice 42.

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \tag{42}$$

kde $E_{d,fi}$ je návrhový účinek zatížení při požární situaci, určený podle ČSN EN1991-1-2, zahrnující účinky teplotní roztažnosti a přetvoření,
$R_{d,t,fi}$ odpovídající návrhová odolnost při požární situaci.

Pro určení účinku zatížení v čase t = 0 se používají tzv. kombinační součinitele $\psi_{1,1}$ nebo $\psi_{2,1}$. Lze však uplatnit zjednodušení, kdy se účinek zatížení $E_{d,fi}$ stanoví z analýzy pro běžnou teplotu, viz rov. 43.

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \,.\, E_d \tag{43}$$

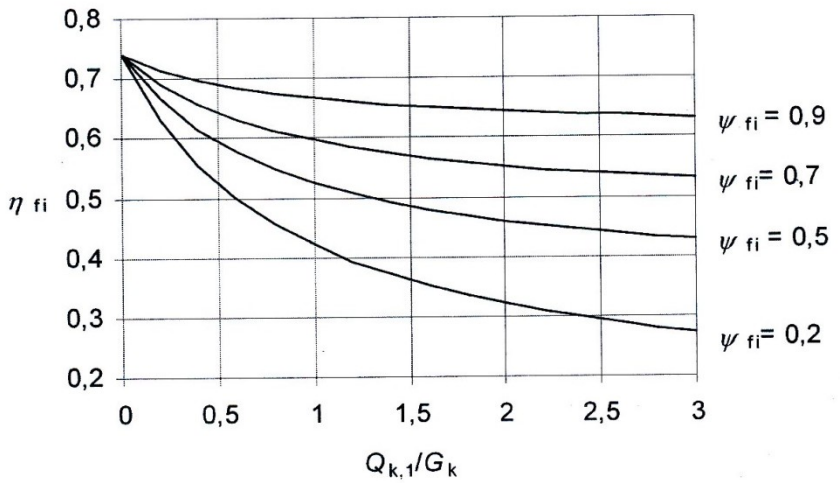
kde $E_{d,fi}$ je účinek zatížení,
E_d návrhový účinek zatížení pro základní kombinaci zatížení při navrhování na běžnou teplotu,
η_{fi} redukční součinitel pro návrhové zatížení při požární situaci.

Podle [44] se redukční součinitel určí např. z rovnice 44.

$$\eta_{\mathrm{fi}} = \frac{G_{\mathrm{k}} + \psi_{\mathrm{fi}} Q_{\mathrm{k,1}}}{\gamma_{\mathrm{G}} G_{\mathrm{k}} + \gamma_{\mathrm{Q,1}} Q_{\mathrm{k,1}}} \tag{44}$$

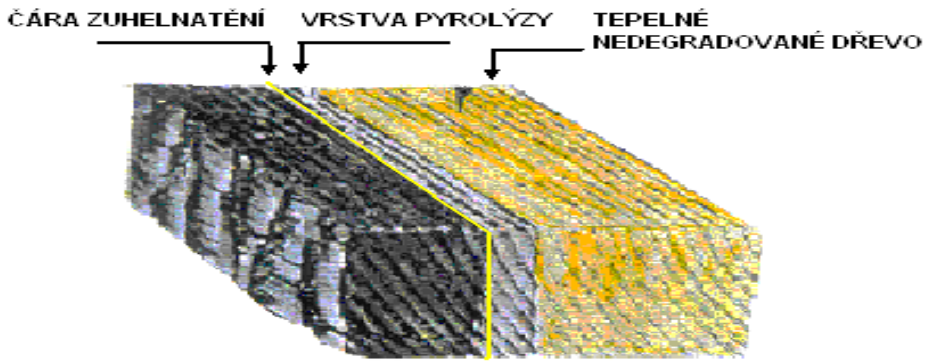
kde η_{fi} je redukční součinitel pro úroveň návrhového zatížení pro požární situaci,
G_k charakteristická hodnota stálého zatížení,
Ψ_{fi} kombinační součinitel pro časté nebo kvazi stálé hodnoty daný jako $\psi_{1,1}$ nebo $\psi_{2,1}$,
$Q_{k,1}$ hlavní proměnné zatížení,
γ_{G} dílčí součinitel pro stálé zatížení,
$\gamma_{\mathrm{Q,1}}$ dílčí součinitel pro proměnné zatížení 1.

Průběh redukčního součinitele η_{fi} v závislosti na poměru zatížení $Q_{k,1}/G_k$ pro různé hodnoty součinitele ψ_{fi} podle rovnice 44 (při daných součinitelích γ) viz obr. 15.



Obr. 15 Redukční součinitel η_{fi} v závislosti na poměru zatížení $Q_{k,1}/G_k$ pro různé hodnoty součinitele ψ_{fi} [44]

Při působení požáru dřevo na svém povrchu uhelnatí. Pod zuhelnatělou vrstvou, která je vyloučená ze statické funkce, se tvoří tzv. vrstva pyrolýzy. Dochází v ní k chemickým změnám dřevní hmoty vyvolaným vlivem působení tepelného zatížení. Jedná se však jen o změny dílčí a dřevní substance není zcela degradovaná. Značným pozitivem je skutečnost, že pod zuhelnatělou vrstvou, tzn. ve zbytkovém průřezu konstrukce, zůstávají fyzikální a mechanické vlastnosti dosud nezuhelnatělého dřeva po dlouhou dobu nezměněné.

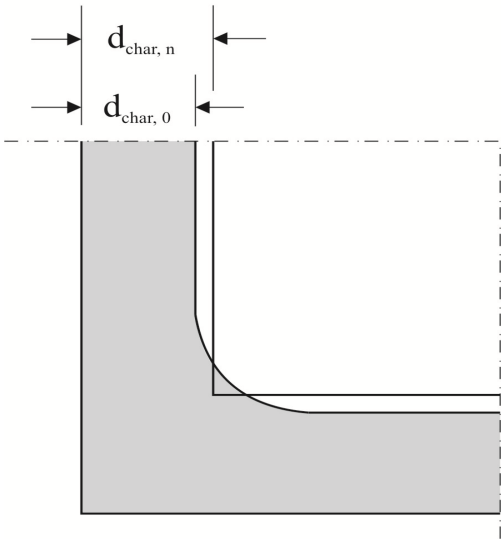


Obr. 16 Vrstvy vznikající tepelnou degradací dřeva [24]

Pomyslnou hranici mezi hloubkou zuhelnatění a vrstvou pyrolýzy tvoří tzv. čára zuhelnatění, viz obr. 16. Povrch zuhelnatělé vrstvy vykazuje teplotu blízkou teplotě požáru, teplota vnitřní části zuhelnatělé vrstvy se předpokládá přibližně 320° C, v místě čáry zuhelnatění 300 °C a ve vrstvě pyrolýzy 200°C.

Hloubka zuhelnatění je dána vzdáleností mezi původním vnějším povrchem dřevěného prvku a polohou čáry zuhelnatění. Úbytek únosnosti je vymezen redukcí rozměrů průřezu, která přináší i redukci únosnosti nechráněných spojů [26]. Především hloubka zuhelnatění

tak charakterizuje vliv na požární odolnost dřevěných konstrukcí a pro návrh dřevěné konstrukce na účinky požáru je rozhodujícím parametrem. Stanovuje se specificky pro protipožárně nechráněné povrchy a povrchy dřeva chráněné pláštěm požární ochrany. [3] Posouzení dřevěného prvku na účinky požáru má vycházet z aktuální hloubky zuhelnatění, a to včetně zaobleného zuhelnatění rohů průřezu (jednorozměrná hloubka zuhelnatění).



Obr. 17 Hloubka zuhelnatění - jednorozměrná $d_{char,0}$; nominální $d_{char,n}$ [44]

Alternativně může být stanoven průřez nominální, pro který se zaoblení rohů neuvažuje, viz obr 17. Pro jednorozměrné a nominální zuhelnatění lze stanovit hloubku zuhelnatění dle vztahů 45 a 46.

$$d_{char,0} = \beta_0 . t \qquad d_{char,0} = \beta_{0i} . E_d \qquad (45)$$

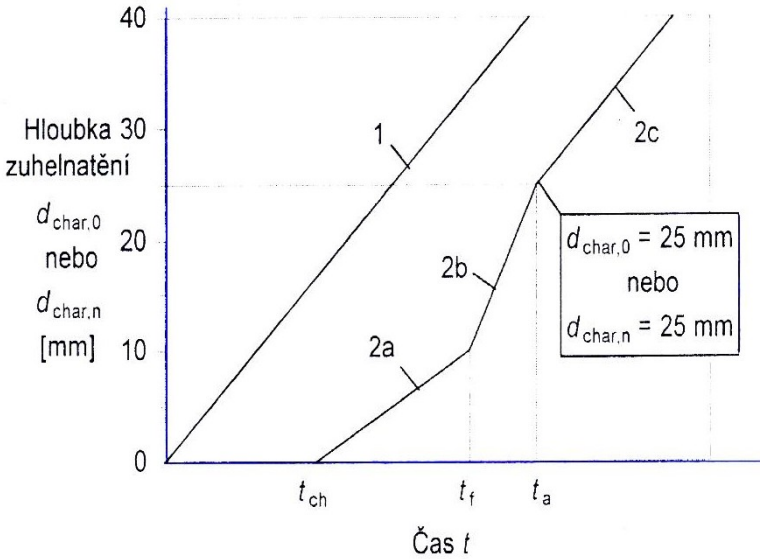
$$d_{char,n} = \beta_n . t \qquad (46)$$

kde $d_{char,0}$ je návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění,
$d_{char,n}$ nominální návrhová hloubka zuhelnatění (zahrnuto zaoblení rohů),
β_0 jednorozměrná rychlost zuhelnatění při účincích normového požáru,
β_n nominální návrhová rychlost zuhelnatění (zahrnuto zaoblení rohů),
t doba vystavení účinkům požáru.

Rychlost zuhelnatění, tzn. rychlost tvorby zuhelnatělé vrstvy dřevěného prvku (β), lze považovat za konstantní (viz tab. 7) bez uvažování redukce, odpovídající proměnné faktické rychlosti zuhelnatění při delším tepelném namáhání konstrukce. Tento předpoklad je uvažován pro většinu jehličnatých a listnatých dřevin používaných pro stavebně konstrukční účely [4].

Tab. 7 Návrhové rychlosti zuhelnatění [44]

Materiál	**β_0 (mm . min^{-1})**	**β_n (mm . min^{-1})**
Dřevo jehličnatých dřevin a buk Rostlé s charakteristickou hustotou ≥ 290 kg/m^3 Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou ≥ 290 kg/m^3	0,65 0,65	0,7 0,8
Dřevo listnatých dřevin Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou ≥ 290 kg/m^3 Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou ≥ 450 kg/m^3	0,65 0,50	0,7 0,55
Vrstvené dřevo (LVL) S charakteristickou hustotou ≥ 480 kg/m^3	0,65	0,7
Desky s charakteristickou hustotou 450 kg/m^3 a tloušťky 20 mm Dřevěné obložení Překližka Desky na bázi dřeva (ne překližky)	0,9 1,0 0,9	-



1 β_0 nebo β_n bez uplatnění protipožární ochrany

2 počáteční vliv protipožární ochrany:
2a redukované zuhelnatění, začátek v čase t_{ch},
2b progresivní zuhelnatění po odpadnutí protipožární ochrany,
2c průběh po překročení hloubky zuhelnatění 25 mm

Obr. 18 Vliv pláště požární ochrany - hloubka a rychlost zuhelnatění v čase, když $t_{ch} < t_f$ [44]

Z obr. 18 je zřejmé, že plášť požární ochrany může po jistý časový úsek výrazně ovlivnit tvoru zuhelnatělé vrstvy. Pro protipožárně chráněné povrchy je nutno zohlednit např. zda:

- počátek zuhelnatění prvku je posunut o časový úsek tch , viz obr. 18,
- zuhelnatění může probíhat i před porušením pláště požární ochrany; v tomto případě se uvažuje nižší rychlost zuhelnatění až do času tf porušení tohoto pláště,
- po čase porušení pláště požární ochrany tf se rychlost zuhelnatění zvýší na hodnotu rychlosti pro nechráněné prvky,
- v čase ta, kdy se hloubka zuhelnatění rovná hloubce zuhelnatění stejného prvku bez pláště požární ochrany nebo dchar $\leq$ 25 mm; v těchto případech se při výpočtu uvažuje rychlost zuhelnatění pro prvky nechráněné pláštěm požární ochrany,
- jsou nevyplněné mezery ve spojích obvodového pláště požární ochrany větší než 2 mm (je zvažován jejich účinek na počátek zuhelnatění, případně na rychlost zuhelnatění před porušením pláště požární ochrany).

Masivní prvky dřevěných konstrukcí často bez problému splní požadavky únosnosti při požadované požární odolnosti a po požáru si udržují určitou míru únosnosti [9]. Opačná situace je především u prvků subtilních, neboť ty vykazují nedostatečný až nulový zbytkový průřez při požadované požární odolnosti. Proto je potřeba tyto prvky před účinky požáru chránit pláštěm požární ochrany. Počátek zuhelnatění a čas do porušení pláště požární ochrany se určují pro jednotlivé pláště PO [25]. Pro výpočet d_{char} dřevěných nosníků a sloupů, nebo stěn či stropů platí specifická pravidla.

Na posouzení spolehlivosti dřevěné konstrukce a návrh konstrukce vystavené účinkům požáru nebo její části je podle Eurokódů možno použít zjednodušené metody [4], a to alternativně ***metodu redukovaného průřezu*** či ***metodu redukovaných vlastností***. Principem metod je výpočet hloubky zuhelnatění průřezu a posudek únosnosti zbytkového průřezu v požadovaném čase trvání požáru. Metoda redukovaného průřezu vychází z předpokladu, že parametry pevnosti a tuhosti nejsou požárem ovlivněny. Pokles těchto parametrů je kompenzován předpokladem zvětšené hloubky zuhelnatění. Při užití metody redukovaných vlastností se stanoví únosnost pro zbytkový průřez s uvážením poklesu parametrů pevnosti a tuhosti. Vedle standardních normativních výpočtových metod dochází k rozvoji strojně početních metod alternativních. Patří k nim i plně pravděpodobnostní metody (např. metoda SBRA).

3 Klasifikační systém stavebních výrobků podle reakce na oheň

Současný klasifikační systém odstraňuje zásadní klasifikační rozdíly v národních systémech zemí EU, jako závažnou překážku ve vzájemném obchodu [5]. Právního rámce nabyl zveřejněním v Ústředním věstníku EU a byl ustanoven v EN13 501-1:2002. Nyní je primárním platným dokumentem klasifikačního systému jako EN 13501–1:2007+A1:2009 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků

zkoušek reakce na oheň. Do soustavy českých norem byl implementován jako ČSN EN 13501–1+A1 (se změnou A1 je v ČR účinnost od r. 2010) [32].

Systém klasifikuje stavební výrobky v třídách reakce na oheň A1, A2, B, C, D, E, F, podlahové krytiny do tříd $A1_{fl}$, $A2_{fl}$, B_{fl}, C_{fl}, D_{fl}, E_{fl}, F_{fl}. V klasifikaci jsou odlišeny další skupiny stavebních výrobků, a to lineární trubní tepelně izolační systémy - $A1_L$, $A2_L$, B_L, C_L, D_L, E_L, F_L a el. kabely - A_{ca}, $B1_{ca}$, $B2_{ca}$,C_{ca}, D_{ca}, E_{ca}, F_{ca}.

Tento systém klasifikace je založen na kombinaci výsledků zkoušek podle norem:

- ČSN EN ISO 1182 Zkoušení reakce stavebních výrobku na oheň - Zkouška nehořlavosti [34] (postup pro třídy A1, A2),
- ČSN EN ISO 1716 Zkoušení reakce stavebních výrobku na oheň -Stanovení spalného tepla [37] (postup pro třídy A1, A2),
- ČSN EN 13823 Zkoušení reakce stavebních výrobku na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu jednotlivým hořícím předmětem" [36] (postup pro třídy A2, B, C, D mimo podlahových krytin),
- ČSN EN ISO 11925-2 Zkoušení reakce na oheň - Zápalnost stavebních výrobků
- vystavených přímému působení plamene - Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene [35] (postup pro třídy B, C, D, E),
- ČSN EN ISO 9239-1 Zkoušení reakce podlahových krytin na oheň
- Část 1: Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla [38] (postup pro podlahové krytiny třídy A2, B, C, D).
- Pro doplňkovou klasifikaci jsou stanovena kritéria:
- tvorba kouře - s1, s1a, s1b, s2, s3
- planoucí kapky/částice - d0, d1, d2
- kyselost a1, a2, a3.

Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň odkazuje na příslušné evropské zkušební normy, z nichž EN ISO 12925-2, EN ISO 1716 a EN ISO 1182 jsou společné pro základní skupiny stavebních výrobků, EN 13823 pro stavební výrobky mimo podlahových krytin a EN ISO 9239-1 pro podlahové krytiny.

Materiály nepřispívající k intenzitě požáru jsou zahrnuty do třídy A *(A1,A2)*, materiály s velmi omezenou mírou přispění ke zvýšení intenzity požáru zahrnuje třída B. Hořlavé stavební materiály s omezeným přispěním k intenzitě požáru představuje třída C. Třída D zahrnuje materiály s akceptovatelným přínosem k rozvoji požáru a třída E s podstatným ovlivněním intenzity požáru. Na třídu F nejsou kladeny žádné požadavky. [22]

Pro snížení počtu pro klasifikaci potřebných zkoušek jsou normalizovány reprezentativní podklady a typické způsoby uchycení testovaných vzorků v normě EN 13 238:2001 [33]. Volba normového nebo jiného podkladu záleží na zadavateli zkoušek.

V případě zkoušky na nenormovém podkladu platí klasifikace pouze pro použití tohoto podkladu.

4 Klasifikační kritéria pro stanovení tříd reakce na oheň

Charakteristiky, kterými se u stavebních výrobků reakce na oheň určuje, definovala příloha k rozhodnutí Komise 2000/14/ES, viz tab. 8. Klasifikační kritéria pro jednotlivé třídy stavebních výrobků a podlahových krytin a tepelně izolačních výrobků potrubí jsou součástí [32], viz tab. 9 až 11. Kritéria pro stanovení tříd reakce na oheň kabelů byla stanovena Úředním věstníkem 2006/751/ES. Přehled tříd reakce na oheň a klasifikačních kritérií pro kabely viz tab. 12 a 13.

Tab. 8 Charakteristiky stavebních výrobků k určení reakce stavebních výrobků na oheň

Značka	Charakteristika
Δ T	Teplotní rozdíl/vzrůst teploty
Δ m	Úbytek hmotnosti
t_f	Plamenné období
PCS	Spalné teplo
FIGRA	Index rychlosti rozvoje požáru využívaný pro účely klasifikace
THR600s	Celkové uvolňování tepla
LFS	Postranní šíření plamene
SMOGRA	Rychlost vývinu kouře
TSP600	Celková tvorba kouře
FS	Šíření plamene

4.1 Stavební výrobky mimo podlahových krytin a tepelněizolačních výrobků potrubí – zkušební metody a klasifikační kritéria pro stanovení třídy reakce na oheň

Klasifikace může být získána pouze na základě výsledků provedených zkoušek nebo postupů rozšířené aplikace požadovaných pro tento výrobek. Výrobky klasifikované do dané třídy se považují za splňující požadavky pro jakoukoliv třídu nižší. Přehled příslušných zkušebních metod a klasifikačních kritérií viz tab. 9.

Tab. 9 Třídy reakce na oheň stavebních výrobků
(mimo podlahových krytin a tepelněizolačních výrobků potrubí) – klasifikační kritéria [32]

Třída	Zkušební metoda	Klasifikační kritéria	Dodatková klasifikace
A1	EN ISO 1182 [a] a	Δ T ≤ 30°C Δ m ≤ 50 % $t_f = 0$ (tj. bez trvalého plamenného hoření)	
	EN ISO 1716	PCS ≤ 2,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [bc] PCS ≤ 1,4 MJ/m^2 [d] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [e]	
A2	EN ISO 1182 [a] nebo	Δ T ≤ 50 °C Δ m ≤ 50 % t_f ≤ 20 s	
	EN ISO 1716 a	PCS ≤ 3,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [b] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [d] PCS ≤ 3,0 MJ/kg [e]	
	EN 13823	FIGRA ≤ 120 W/s LSF < hrana vzorku THR_{600s} ≤ 7,5 MJ	vývin kouře [f] a plamenně hořící kapky/částice [g]
B	EN 13823 a	FIGRA ≤ 120 W/s LSF < hrana vzorku THR_{600s} ≤ 7,5 MJ	vývin kouře [f] a plamenně hořící kapky/částice [g]
	EN ISO 11925-2 [i] doba exposice = 30 s	F_s ≤ 150 mm do 60 s	
C	EN 13823 a	FIGRA ≤ 250 W/s LSF < hrana vzorku THR_{600s} ≤ 15 MJ	vývin kouře [f] a plamenně hořící kapky/částice [g]
	EN ISO 11925-2 [i] doba exposice = 30 s	Fs ≤ 150 mm do 60 s	
D	EN 13823 a	FIGRA ≤ 750 W/s	vývin kouře [f] a plamenně hořící kapky/částice [g]
	EN ISO 11925-2 [i] doba exposice = 30 s	F_s ≤ 150 mm do 60 s	
E	EN ISO 11925-2 [i] doba exposice = 15 s	F_s ≤ 150 mm do 20 s	plamenně hořící kapky/částice [h]
F		Bez požadavků na chování	

Pozn.:

a pro stejnorodé a podstatné složky nestejnorodých výrobků,

b pro každou vnější nepodstatnou složku nestejnorodých výrobků,

c alternativně jakákoliv nepodstatná složka, mající PCS $\leq$ 2,0 MJ/m^2, výrobku splňujícího následující kritéria EN 13 823: FIGRA $\leq$ 20 W/s, LFS < hrana zkušebního tělesa a $THR_{600\,s} \leq$ 4 MJ a s1 a d0,

d pro jakékoliv vnitřní nepodstatné složky nestejnorodých výrobků,

e pro výrobek jako celek,

f byly vytvořeny modifikace systému měření kouře, jejichž dopady vyžadují další šetření. To však může vyvolat změnu limitních hodnot a/nebo parametrů pro hodnocení vývinu kouře.

- s1 = SMOGRA $\leq$ 30 m^2/s^2 a $TSP_{600\,s} \leq$ 50 m^2;
- s2 = SMOGRA $\leq$ 180 m^2/s^2 a $TSP_{600\,s} \leq$ 200 m^2;
- s3 = když není s1 nebo s2;

g hořící kapky neb částice

- d0 = žádné plamenně hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13823 do 600 s;
- d1 = žádné déle než 10 s plamenně hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13 823 do 600 s;
- d2= když není d0 nebo d1;

Zapálení papíru při zkoušce podle EN ISO 11925-2 vede ke klasifikaci d2,

h vyhoví = žádné zapálení papíru (žádná klasifikace)
nevyhoví = zapálení papíru (klasifikace d2),

i při působení plamene na plochu a kde to odpovídá konečnému použití výrobku i při působení plamene na hranu.

THR_{600s} (MJ) = celkové teplo, uvolněné ze zkušebního tělesa za 600 s od počátku expozice plameny hlavního hořáku,

TSP_{600s} (m^2) = celková produkce kouře ze zkušebního tělesa za 600 s od počátku expozice plameny hlavního hořáku,

LFS (m) = příčné šíření plamene na delším křídle zkušebního tělesa,

$FIGRA_{0,2\,MJ\,(0,4\,MJ)}$ (W/s) = maximální poměr rychlosti vývinu tepla ze zkušebního tělesa a příslušné doby při aplikaci mezní hodnoty THR = 0,2 (MJ) (0,4 (MJ)),

SMOGRA (m^2/s^2) = rychlost tvorby kouře. Maximální poměr rychlosti tvorby kouře ze zkušebního tělesa a příslušné doby.

4.2 Podlahové krytiny – zkušební metody a klasifikační kritéria pro stanovení třídy reakce na oheň

Klasifikace podlahových krytin může být získána pouze na základě výsledků provedených zkoušek nebo postupů rozšířené aplikace požadovaných pro tento výrobek. Výrobky klasifikované do dané třídy se považují za splňující požadavky pro jakoukoliv třídu nižší. Přehled příslušných zkušebních metod a klasifikačních kritérií viz tab. 10.

Tab. 10 Třídy reakce na oheň pro podlahové krytiny – klasifikační kritéria [32],

Třída	Zkušební metoda	Klasifikační kritéria	Dodatková klasifikace
A1$_{fl}$	EN ISO 1182 [a] a	Δ T ≤ 30°C Δ m ≤ 50 % t_f = 0 (tj. bez trvalého plamen. hoření)	
	EN ISO 1716	PCS ≤ 2,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [b] PCS ≤ 1,4 MJ/m^2 [c] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [d]	
A2$_{fl}$	EN ISO 1182 [a] nebo	Δ T ≤ 50 °C Δ m ≤ 50 % t_f ≤ 20 s	
	EN ISO 1716 a	PCS ≤ 3,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [b] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [c] PCS ≤ 3,0 MJ/kg [d]	
	EN ISO 9239-1 [e]	kritický tok [f] ≥ 8 kW/m^2	vývin kouře [g]
B$_{fl}$	EN ISO 9239-1[e] a	kritický tok [f] ≥ 8 kW/m^2	vývin kouře [g]
	EN ISO 11925-2 [h] doba exposice = 15 s	F_s ≤150 mm do 20 s	
C$_{fl}$	EN ISO 9239-1 [e] a	kritický tok [f] ≥ 4,5 kW/m^2	vývin kouře [g]
	EN ISO 11925-2 [h] doba exposice = 15 s	F_s ≤ 150 mm do 20 s	
D$_{fl}$	EN ISO 9239-1 [e] a	kritický tok [f] ≥ 3 kW/m^2	vývin kouře [g]
	EN ISO 11925-2 [h] doba exposice = 15 s	F_s ≤ 150 mm do 20 s	
E$_{fl}$	EN ISO 11925-2 [h] doba exposice = 15 s	F_s ≤ 150 mm do 20 s	
F$_{fl}$	Bez požadavků na chování		

Pozn.:

a pro stejnorodé výrobky a podstatné složky nestejnorodých výrobků,
b pro jakoukoliv vnější nepodstatnou složku nestejnorodých výrobků,
c pro jakoukoliv vnitřní nepodstatnou složku nestejnorodých výrobků,
d pro výrobek jako celek,
e doba trvání zkoušky = 30 minut,

f kritický tok je definován jako tok sálavého tepla, při kterém zháší plamen nebo tok sálavého tepla po 30 minutách trvání zkoušky - nižší z nich, (tj. tok odpovídající nejdelšímu rozšíření plamene),

g s1 = kouř je ≤ 750 % x minut; s2 = když není s1,

h za podmínek působení plamene na plochu, a kde to odpovídá konečnému použití výrobku i při působení plamene na hranu.

PCS (MJ/kg)nebo (MJ/m^2) = spalné teplo

THR_{600s} (MJ) = celkové teplo, uvolněné ze zkušebního tělesa za 600 s od počátku expozice plameny hlavního hořáku,

TSP_{600s} (m^2) = celková produkce kouře ze zkušebního tělesa za 600 s od počátku expozice plameny hlavního hořáku,

LFS (m) = příčné šíření plamene na delším křídle zkušebního tělesa,

$FIGRA_{0,2\ MJ\ (0,4\ MJ)}$ (W/s) = maximální poměr rychlosti vývinu tepla ze zkušebního tělesa a příslušné doby při aplikaci mezní hodnoty THR = 0,2 (MJ) (0,4 (MJ)),

SMOGRA (m^2/s^2) = rychlost tvorby kouře. Maximální poměr rychlosti tvorby kouře ze zkušebního tělesa a příslušné doby.

4.3 Lineárně trubní izolační výrobky – zkušební metody a klasifikační kritéria pro stanovení třídy reakce na oheň

Klasifikace tepelně izolačních výrobků potrubí může být získána pouze na základě výsledků provedených zkoušek nebo postupů rozšířené aplikace požadovaných pro tento výrobek. Výrobky klasifikované do dané třídy se považují za splňující požadavky pro jakoukoliv třídu nižší. Přehled příslušných zkušebních metod a klasifikačních kritérií viz tab. 11.

Tab. 11 Třídy reakce na oheň tepelně izolačních výrobků potrubí [32]

Tříd	Zkušební	Klasifikační kritéria	Doplňková
$A1_L$	EN ISO 1182 [a] a	ΔT ≤ 30 °C Δm ≤ 50 % t_f = 0 (tj. žádné trvalé plamenné hoření)	-
	EN ISO 1716	PCS ≤ 2,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [b] PCS ≤ 1,4 MJ/m^2 [c] PCS ≤ 2,0 MJ/kg [d]	-
$A2_L$	EN ISO 1182 [a] nebo	ΔT ≤ 50 °C Δm ≤ 50 % t_f ≤ 20 s	-
	EN ISO 1716 a	PCS ≤ 3,0 MJ/kg [a] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [b] PCS ≤ 4,0 MJ/m^2 [c] PCS ≤ 3,0 MJ/kg [d]	-

	EN 13823	FIGRA ≤ 270 W/s LFS < hrana zkušebního tělesa THR_{600s} ≤ 7,5 MJ	vývin kouře [e] a plamenně hořící kapky/částice [f]
B_L	EN 13823 a	FIGRA ≤ 270 W/s LFS < hrana zkušebního tělesa THR_{600s} ≤ 7,5 MJ	vývin kouře [e] a plamenně hořící kapky/částice [f]
	EN ISO 11925-2 [h] doba expozice = 30 s	F_s ≤ 150 mm do 60 s	
C_L	EN 13823 a	FIGRA ≤ 460 W/s LFS < hrana zkušebního tělesa THR_{600s} ≤ 15 MJ	vývin kouře [e] a plamenně hořící kapky/částice [f]
	EN ISO 11925-2 [h] doba expozice = 30 s	F_s ≤ 150 mm do 60 s	
D_L	EN 13823 a	FIGRA ≤ 2 100 W/s THR_{600s} ≤ 100 MJ	vývin kouře [e] a plamenně hořící kapky/částice [f]
	EN ISO 11925-2 [h] doba expozice = 30 s	F_s ≤ 150 mm do 60 s	
E_L	EN ISO 11925-2 [h] doba expozice = 15 s	F_s ≤ 150 mm do 20 s	plamenně hořící kapky/částice [f]
F_L		Žádné požadavky na chování	

Pozn.:

a Pro stejnorodé výrobky a podstatné složky nestejnorodých výrobků.

b Pro každou vnější nepodstatnou složku nestejnorodých výrobků.

c Pro jakoukoli vnitřní nepodstatnou složku nestejnorodých výrobků.

d Pro výrobek jako celek.

e s1 = *SMOGRA* ≤ 105 m^2/s2 a *TSP600s* ≤ 250 m^2;
s2 = *SMOGRA* ≤ 580 m^2/s2 a *TSP600s* ≤ 1 600 m^2;
s3 = když není s1 nebo s2.

f d0 = žádné plamenně hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13823 do 600 s;
d1 = žádné déle než 10 s plamenně hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13823 do 600 s;
d2 = když není d0 nebo d1;
Zapálení papíru při zkoušce podle EN ISO 11925-2 vede ke klasifikaci d2.

g Vyhoví = žádné zapálení papíru (žádná klasifikace);

Nevyhoví = zapálení papíru (klasifikace d2)

h Při působení plamene na plochu, a kde to odpovídá konečnému použití výrobku i při působení plamene na hranu.

4.4 Kabely – zkušební metody a klasifikační kritéria pro stanovení třídy reakce na oheň

Dlouhodobá příprava evropských podkladů pro klasifikaci kabelů podle reakce na oheň vyústila v konečné znění, oznámené Úředním věstníkem EU dne 4. 11. 2006 pod číslem 2006/751/ES. Mimo jiné obsahuje přehled tříd reakcí na oheň (viz tab. 12), a klasifikační kritéria (viz tab. 13).

Tab. 12 Kabely – třídy reakce na oheň

Třída reakce na oheň	**Doplňková klasifikace**
A_{ca}	
$B1_{ca}$	tvorba kouře: s1, s1a, s1b, s2, s3 planoucí kapky/částice: d0, d1, d2 kyselost (acidita): a1, a2, a3
$B2_{ca}$	
C_{ca}	
D_{ca}	
E_{ca}	
F_{ca}	

Tab. 13 Kabely - klasifikační kritéria pro třídy reakce na oheň

Třída	**Zkušební metoda**	**Kritéria klasifikace**	**Doplňková klasifikace**
A_{ca}	EN ISO 1716	PCS ≤ 2,0 MJ/kg (1)	
$B1_{ca}$	$FIPEC_{20}$ Scen 2 (5)	FS ≤ 1,75 m THR_{1200s} ≤ 10 MJ HRR_{max} ≤20 kW FIGRA ≤ 120 Ws^{-1}	Tvorba kouře (2,6) a planoucí částice (3) a kyselost (4, 8)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
$B2_{ca}$	$FIPEC_{20}$ Scen 1 (5)	FS ≤ 1,5 m THR_{1200s} ≤ 15 MJ HRR ≤ 30 kW FIGRA ≤ 150 Ws^{-1}	Tvorba kouře (2,7) a planoucí částice (3) a kyselost (4, 8)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
C_{ca}	$FIPEC_{20}$ Scen 1 (5)	FS ≤ 2,0 m THR_{1200s} ≤ 30 MJ HRR ≤ 60 kW	Tvorba kouře (2,7) a planoucí částice (3) a kyselost (4, 8)

		FIGRA ≤ 300 Ws^{-1}	
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
D_{ca}	$FIPEC_{20}$ Scen 1 (5)	THR_{1200s} ≤ 70 MJ HRR ≤ 400 kW FIGRA ≤ 1 300 Ws^{-1}	Tvorba kouře (2,7) a planoucí částice (3) a kyselost (4, 8)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
E_{ca}	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
F_{ca}		Žádný ukazatel vlastností není stanoven	

Pozn.:

(1) Pro výrobek jako celek, vyjma kovových materiálů, a pro každou vnější složku (tj. plášť) výrobku

(2) s1 = TSP1200 ≤ 50 m2 a SPR ≤ 0,25 m2/s
s1a = s1 a součinitel propustnosti EN 61034-2 > 80 %
s1b = s1 a součinitel propustnosti EN 61034-2 > 60 % < 80 %
s2 = TSP1200 ≤ 400 m2 a SPR ≤ 1,5 m2/s
s3 = ne s1 nebo s2

(3) Pro FIPEC20 scénář 1 a 2: d0 = žádné planoucí kapky/částice během 1 200 s; d1 = žádné planoucí kapky/částice trvající déle než 10 s během 1 200 s; d2 = ne d0 nebo d1

(4) EN 50267-2-3: a1 = vodivost < 2,5 |µS/mm a pH > 4,3; a2 = vodivost < 10 |µS/mm a pH > 4,3; a3 = ne a1 nebo a2. Bez prohlášení = Žádný ukazatel není stanoven

(5) Proud vzduchu do komory musí být nastaven na 8 000 ± 800 l/min
Podle FIPEC20 scénář 1 = EN 50399-2-1
Podle FIPEC20 scénář 2 = EN 50399-2-2

(6) Třída hustoty kouře deklarovaná pro třídu B1ca, kabely musí projít zkouškou FIPEC20 scénář 2

(7) Třída hustoty kouře deklarovaná pro třídu B2ca, Cca, Dca, kabely musí projít zkouškou FIPEC20 scénář 1 Měření nebezpečných vlastností plynů vznikajících při požáru, které snižují schopnost osob jim vystavených

EN ISO 1716 - Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň - Stanovení spalného tepla,
EN 60332-1-2 - Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru - Část 1-2: Zkouška svislého šíření plamene pro vodiče nebo kabely s jednou izolací - Postup pro 1kW směsný plamen,
$FIPEC_{20}$ scen. 1, $FIPEC_{20}$ scen. 2 - zkušební metody uvedené v EN 50399 Zkušební metody kabelů v podmínkách požáru - Měření uvolněného tepla a kouře na kabelech v průběhu zkoušky šíření plamene - Zkušební zařízení, postupy a výsledky.

5 Některé parametry ovlivňující chování stavebních výrobků vzhledem k jejich reakci na oheň

Na základě fyzikálních a mechanických zákonitostí a rovněž z empirických poznatků, je možné konstatovat, že k parametrům ovlivňujícím chování stavebních výrobků vzhledem k jejich reakci na oheň se řadí například vliv tloušťky stavebního výrobku, jeho objemové hmotnosti, složení výrobku, geometrie a struktura výrobku, přítomnost vzduchových mezer nebo dutin, vliv podkladu a podkladní konstrukce, způsob upevnění, typ a poloha styků,

orientace výrobku, barva a vliv povrchového nátěru nebo jiné povrchové úpravy. Jak pro rámec přímé aplikace výsledků zkoušek reakce stavebních výrobků na oheň, tak při možnosti uplatnění rozšířené aplikace výsledků zkušebních testů je nutno zahrnout koncepci možnosti nejhoršího chování výrobku (pravidla pro přímou a rozšířenou aplikaci udává ČSN P CEN/TS 15117:2006). Znamená to, že jakákoli změna jeho parametrů nebo koncové aplikace výrobku může směřovat ke změně jeho požárního chování a z toho vyplývající i změně klasifikace.

Jak mohou uvedené parametry ovlivnit výsledky zkoušek každé z pěti zkušebních metod reakce na oheň, za předpokladu že všechny ostatní parametry zůstanou nezměněny, přiblíží následující analýza, převzata z [30].

Vliv tloušťky stavebního výrobku

ČSN EN ISO 1716 - metodou se zkouší jednotlivé materiály stavebního výrobku, proto tloušťka výrobku (d) neovlivní při této zkoušce požární chování.

ČSN EN ISO 1182 - při tloušťce výrobku d $\geqslant$ 50mm nemá vliv, je-li d $<$ 50 mm a vzorek musel být zhotoven spojením dvou nebo více vrstev, může tloušťka reakci na oheň stavebního výrobku ovlivnit.

ČSN EN 13823 - tloušťka výrobku má vliv na jeho požární vlastnosti. Protože vliv tloušťky je u jednotlivých výrobků velmi rozdílný, není možno stanovit žádná obecná pravidla. Je však možno vytvořit skupinu výrobků podobné povahy, např. dřevěných panelů, s cílem odvození pravidla pro přímou aplikaci.

Zkušební zařízení podle této normy omezuje tloušťku zkušebního vzorku na 200mm. Proto zkouška se zkušebním vzorkem o d = 200mm, zhotoveným z výrobku podle schválených pravidel pro montáž a upevnění, platí rovněž pro výrobek všech větších tlouštěk.

ČSN EN ISO 11925-2 - při zkoušce podle ČSN EN ISO 11925-2 má tloušťka výrobku vliv na jeho požární vlastnosti.

ČSN EN ISO 11925-2 - tloušťka zkušebního tělesa je zde omezena na 60mm. Proto zkouška se zkušebním tělesem této tloušťky, zhotoveným a instalovaným podle stanovených pravidel, platí rovněž pro výrobek všech větších tlouštěk.

ČSN EN ISO 9239-1 - tloušťka výrobku ovlivní jeho požární vlastnosti. Vliv tloušťky je u jednotlivých výrobků velmi rozdílný, proto není možno stanovit žádná obecná pravidla. Je však možno vytvořit skupinu výrobků podobné povahy, s cílem odvození pravidla pro přímou aplikaci.

Vliv objemové hmotnosti stavebního výrobku

ČSN EN ISO 1716 - objemovou hmotností výrobku nejsou parametry požárních vlastností ovlivněny.

ČSN EN ISO 1182 – objemová hmotnost ovlivní parametry požárních vlastností. Jelikož vliv objemové hmotnosti je u jednotlivých výrobků rozdílný, nelze stanovit žádná obecná pravidla. Je však možno pro daný výrobek interpolovat mezi údaji ze zkušebních těles s různou objemovou hmotností.

ČSN EN 13823 - objemová hmotnost výrobku ovlivní jeho požární vlastnosti. Jelikož vliv objemové hmotnosti je u různých výrobků rozdílný, nelze stanovit žádná obecná pravidla. Je však možno pro daný výrobek interpolovat mezi údaji ze zkušebních těles s různou objemovou hmotností.

ČSN EN ISO 11925-2 - objemová hmotnost výrobku má vliv na jeho požární vlastnosti. Protože vliv objemové hmotnosti je u jednotlivých výrobků velmi rozdílný, není možno stanovit žádná obecná pravidla.

ČSN EN ISO 9239-1 - objemová hmotnost výrobku má vliv na jeho požární vlastnosti. Protože vliv objemové hmotnosti je u jednotlivých výrobků velmi rozdílný, není možno stanovit žádná obecná pravidla.

Vliv složení výrobku

ČSN EN ISO 1716, ČSN EN ISO 1182, ČSN EN 13823, ČSN EN ISO 11925-2 a ČSN EN ISO 9239-1 - složení výrobku může při těchto zkouškách ovlivnit parametry požárního chování testovaného stavebního výrobku. Nelze ale stanovit žádná obecná pravidla a vliv složení je nutno obvykle posoudit spolu s ostatními parametry.

Vliv geometrie a struktury výrobku

ČSN EN ISO 1716, ČSN EN ISO 1182 – dané zkušební metody testují jednotlivé materiály výrobku; při těchto zkouškách geometrie a struktura výrobku neovlivní jeho požární chování.

ČSN EN 13823, ČSN EN ISO 11925-2, ČSN EN ISO 9239-1 – geometrie i struktura výrobku může při těchto zkouškách ovlivnit jeho požární chování. Obecná pravidla nelze stanovit.

ČSN EN ISO 1182, ČSN EN ISO 1716 se týkají materiálových charakteristik a hodnocení podle výsledků těchto zkoušek nezávisí na konečném použití výrobku. Analýza podle parametrů konečného použití platí proto pouze pro ČSN EN 13823, ČSN EN ISO 11925-2, ČSN EN ISO 9239-1.

Vliv barvy

ČSN EN ISO 1716 - barva sama o sobě nemá vliv na výsledky zkoušky podle, avšak ovlivněné může vyvolat druh a množství barevné látky. I když neexistují žádná obecná pravidla, je možno vytvořit vztah na podkladě organického obsahu.

ČSN EN ISO 1182 - barva sama o sobě nemá vliv na výsledky zkoušky podle ČSN EN ISO 1182. Je-li změna složení barevné látky zanedbatelná, je i její vliv zanedbatelný. Žádná další obecná pravidla nejsou možná.

ČSN EN 13823, ČSN EN ISO 11925-2, ČSN EN ISO 9239-1 - barva sama i barevná látka může při zkouškách ovlivnit požární vlastnosti výrobku, neboť změna barvy může změnit tepelnou pohltivost výrobku. Výrobek s tmavým povrchem se bude obecně ohřívat rychleji než výrobek se světlým nebo lesklým povrchem. Je-li změna složení zanedbatelná, je zanedbatelný i její vliv. Druh barevné látky může rovněž mít vliv na požární vlastnosti. Žádná další obecná pravidla nejsou reálná.

Vliv povrchového nátěru nebo úpravy

ČSN EN ISO 1182 - nátěr nebo povrchová úprava nemá vliv, pokud vnější vrstva, jejíž součástí je nátěr nebo úprava, není podstatnou složkou definovanou v ČSN EN 13501-1.

ČSN EN ISO 1716, ČSN EN 13823, ČSN EN ISO 11925-2, ČSN EN ISO 9239-1 - Druh nátěru nebo povrchové úpravy ovlivňuje parametry požárního chování. Protože různé druhy nátěrů nebo povrchových úprav mají při požáru velmi rozdílné chování, není možno stanovit žádné obecné pravidlo pro přímou aplikaci výsledků zkoušky pro různé druhy nátěrů nebo povrchových úprav.

Vliv podkladu nebo podkladní konstrukce - v konečném použití. Výsledek zkoušky může být podkladem ovlivněn. Podstatnými kritérii podkladu jsou tloušťka, objemová hmotnost, tepelná kapacita, tepelná vodivost, deformace a příspěvek podkladu k rozvoji požáru.

ČSN EN 13238 uvádí seznam normových podkladů. Použití těchto podkladů je pro výrobce výhodné, protože tato norma již přímo definuje některá pravidla pro přímou aplikaci.

Vliv přítomnosti vzduchových mezer či dutin - v konečném použití. Vzduchové prostory (mezery, dutiny) mohou výsledek zkoušky ovlivnit. Plameny zde mohou působit na obě strany výrobku a rovněž na podklad nebo podkladní výrobek. Toto působení může zapříčinit otevírání styků, prohoření, roztavení, nebo odpadávání částí zkoušeného výrobku. Ohřívání vzduchové mezery může vyvolat komínový efekt, čímž se podstatně zvýší intenzita tepelného působení.

Pro vliv přítomnosti vzduchových mezer není možno stanovit žádná obecná pravidla pro přímou aplikaci.

Vliv způsobu upevnění - v konečném použití. Upevnění, připojení a podepření může ovlivnit výsledek zkoušky. Protože tento vliv je u jednotlivých výrobků značně rozdílný, nelze stanovit žádná obecná pravidla. Je však možno vytvořit skupinu výrobků podobné povahy, s cílem odvození pravidla pro přímou aplikaci.

Vlivy typu a polohy styků - *v konečném použití.* Styky mohou ovlivnit výsledek zkoušky. Prostřednictvím styků mohou plameny proniknout na neohřívanou stranu výrobku a na vnitřní vrstvy. Výrobek se může ve stycích deformovat, což vede ke vzniku malých vzduchových mezer. Výsledek zkoušky může rovněž ovlivnit přítomnost výplně styků. Pro styky nebo jejich výplně není možno stanovit žádná obecná pravidla pro přímou aplikaci.

Vlivy orientace výrobku - *v konečném použití.* U nesymetrických výrobků může být chování obou stran velmi rozdílné, například vlivem velmi rozdílných vrchních vrstev. Na jedné straně může mít výrobek rozdílnou reakci na oheň vlivem směrového účinku (například povrch s lineárními trapézovými profily). Šíření plamene může být směrovým účinkem blokováno nebo řízeno (směr profilu). Nelze stanovit žádná obecná pravidla pro přímou aplikaci. [30]

Použitá literatura

[1] Baierie, T. a kol.: *K výpočtu požární odolnosti nosných konstrukcí*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2008, ISBN 978-80-01-0343-4.

[2] Bradáčová, I.: *Požární bezpečnost staveb*: Nevýrobní objekty. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2007. 236 s. SPBI SPEKTRUM, sv. 50. ISBN 978-80-7385-023-4.

[3] Česelská, T. - Netopilová, M.: Výpočet požární odolnosti dřevěných konstrukcí. In Střechy, *fasády*, *izolace*. *Ročník 14*, *č. 7-8/2007*, *ISSN* 1213-7057.

[4] Česelská, T. - Netopilová, M. - Kačíková, D.: *Eurokód 5 – změny ve stanovení požární odolnosti konstrukcí*. Spektrum, r*oč. 7*, *č. 1/2007*, s. 9 – 14. *ISSN* 1211-6920.

[5] Hošek, Z.: *Požární bezpečnost staveb*. ABF-ARCH, Praha, 2006. ISBN 80-86905-22-5.

[6] Kačíková, D. - Netopilová, M. - Osvald, A.: *Drevo a jeho termická degradácia*. SPBI, Ostrava 2006, ISBN 80-86634-78-7.

[7] Kučera, P. – Kaiser, R.: *Úvod do požárního inženýrství*. Edice SPBI 52. Ostrava: SPBI, 2007. 173 s.

[8] Kuklík, P. - Kuklíková, A. - Mikeš, K.: *Dřevěné konstrukce 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-02847.

[9] Kupilík, V.: *Stavební konstrukce z požárního hlediska.* 2006. vyd. Praha: Grada Publishing, spol. s r.o., 2006. 272 s. ISBN 80-247-1329-2.

[10] Lokaj, A. - Vavrušová, K. - Hurta, J.: *Materiálové charakteristiky jehličnatého dřeva,* In SBORNÍK vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1661-6.

[11] Macháčková, A. - Kocich R.: *Sdílení tepla a proudění*. Učební texty. VŠB-TUO, Ostrava 2012.

[12] Anchor, R. D. - Malthora, H. L. - Purkiss, J. A.: *Design of structures against fire*, 1st edition. Aston University: Elsevier applied science Publisher Ltd, 1986. 251 p. ISBN 1-85166-012-7.

[13] Netopilová, M. - Kačíková, D. - Osvald, A.: *Reakce stavebních výrobků na oheň.* 1. vyd. Ostrava. SPBI, 2010. 126 s. ISBN 978-80-7385-093-7.

[14] Netopilová, M.: *Materiály - Stavební materiály*. 1. vyd. Ostrava: SPBI, 2004. 125 s., ISBN 80-86634-27-2.

[15] Otáhal, R.: *Pasivní protipožární ochrana*, Konstrukce 9. ročník, *5*/2010, ISSN 1803-8433.

[16] *Podpora bydlení* [online]. 2009 [cit. 2010-03-24]. Stavebniny. Dostupné z WWW: <http://www.podporabydleni.cz/>.

[17] Procházka, J. – Štefan. R. – Vašková, J.: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru**.** 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze. 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.

[18] Purmenský, J. - Matocha, K.: Determination of Long-Term Material Properties Degradation Using Small Specimen Testing. Proc. Int. Conf. Presure Vessels and Piping, Chennai, 2006, B2-4(I).

[19] Svoboda, L. a kol.: *Stavební hmoty*. Jaga group, s.s.o., Bratislava, 2004. ISBN80-8076-007-1.

[20] Šenovský, M. a kol.: *Základy požárního inženýrství*. SPBI, Ostrava 2004, ISBN 80-86634-50-7.

[21] *Tepelné izolace* [online]. 6,3,2008 [cit. 2010-04-21]. Tepelná vodivost. Dostupné z WWW: <http://www.tepelna-izolace.cz/>.

[22] Vaniš, P.: *Změny ve zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň*. Požární ochrana 2009, VŠB-TUO, SPBI, Ostrava 2009, ISBN 978-80-7385-067-8.

[23] Vaniš, P.: *Reakce stavebních výrobků na oheň a druh konstrukčních částí z pohledu revize ČSN 73 0810*. Informace č. 33 - Technický zpravodaj PO, 2008.

[24] Vaniš, P.*: Reakce na oheň stavebních výrobků na bázi dřeva***.** Seminář Dřevěná okna, dveře, schody. Hranice n. M., 2009.

[25] Vašátko, E.: *Problematika desek a deskových konstrukcí v protipožární ochraně staveb*. J. Seidl a spol., s.r.o., 2009. Dostupný z WWW: <http:// www.seidl.cz/cz/publikace/.

[26] Vavrušová, K.. - Lokaj, A.: *Spolehlivost prvků dřevěných konstrukcí*, In Spolehlivost konstrukcí, Praha 2008, s. 33 – 36, ISBN 978-80-02-02007-3.

[27] *Vydavatelství VŠCHT:* Modul pružnosti. *Vysoká škola chemicko- technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/>.

[28] Wald, F. a kol.: *Navrhování konstrukcí na účinky požáru podle evropských norem*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2007, ISBN 978-80-01-03580-1.

[29] Wald, F.: *Navrhování na účinky požáru*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03420-8.

[30] Zoufal, R.: *Analýza podmínek pro rozšířenou aplikaci výsledků zkoušek požární odolnosti a reakce na oheň*. Stav k 1.1.2010. Dostupný na WWW:

<http://www.hzscr.cz/.../analyza-podminek-pro-rozsirenou-aplikaci-vysledku- zkousek-pozarni-odolnosti-a-reakce-na-ohen-pdf.aspx.cz/>.

[31] ČSN 73 0810:2009 Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení.

[32] ČSN EN 13501-1+A1:2010 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň.

[33] ČSN EN 13238:2010 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň - Postupy kondicionování a obecná pravidla pro výběr podkladů.

[34] ČSN EN ISO 1182:2010 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti.

[35] ČSN EN ISO 11925-2:2011 Zkoušení reakce na oheň - Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene - Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene.

[36] ČSN EN 13823:2011 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň - Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu.

[37] ČSN EN ISO 1716:2011 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň - Stanovení spalného tepla.

[38] ČSN EN ISO 9239-1:2010 Zkoušení reakce podlahových krytin na oheň - Část 1: Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla.

[39] ČSN EN 60332-1-2:2005 Zkoušky elektrických a optických kabelů v podmínkách požáru - Část 1-2: Zkouška svislého šíření plamene pro vodiče nebo kabely s jednou izolací - Postup pro 1kW směsný plamen

[40] ČSN EN 1990:2004 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.

[41] ČSN EN 1991-1-2:2004 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru.

[42] ČSN EN 1992-1-2:2006 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

[43] ČSN EN 1993-1-2:2007 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

[44] ČSN EN 1995-1-2:2007 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

[45] ČSN EN 206:2014 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda