Modul 5 Stopy a účinky požárů

Obsah

Úvod		2
ČÁST A Účinky požárů		3
1	Zuhelnatění dřeva	3
2	Čistá oblast vypálení	6
3	Změna barevnosti	7
4	Usazeniny a kondenzát zplodin hoření na povrchu	8
5	Deformace kovových konstrukcí	10
6	Účinky požáru na sádrokartonových deskách	12
7	Odhoření materiálu – hmotnostní úbytek	13
8	Tavení materiálu	15
9	Oxidace	18
10	Drolení, odlupování vrchní vrstvy zděných či betonových konstrukcí.	19
11	Teplotní roztažnost a deformace materiálu	20
12	Poškození těl usmrcených osob	21
13	Účinky na skle	22
ČÁST B Stopy požárů		24
14	Vybrané druhy stop požáru podle způsobu jejich vzniku	24
14.1	Stopy požáru způsobené sloupcem horkých plynů	24
14.2	Stopy požáru způsobené ventilací.	27
14.3	Stopy požáru způsobené celkovým vzplanutím (flashover)	29
14.4	Stopy požáru způsobené hašením	30
15	Tvar stopy požáru vzniklé sloupcem horkých zplodin hoření	32
15.1	Stopa požáru ve tvaru písmene A	32
15.2	Stopa požáru ve tvaru obráceného komolého kužele, kónická stopa	33
16	Nepravidelné stopy požáru	37
17	Stopy požáru na podlaze	37
18	Stopy požáru po iniciaci plynu či výparů hořlavých kapalin	38
19	Seznam literatury	39

1. Úvod

Tento modul poskytuje přehled jednotlivých účinků požáru, jejich typické znaky a příklady změn u vybraných materiálů, což usnadňuje jejich dokumentaci a analýzu. Je součástí převážně kapitoly 1.3 Metodiky FING 2.

Účinky požáru představují pozorovatelné nebo měřitelné změny materiálů, které vznikají v důsledku jejich expozice požáru. Tyto změny mohou být fyzikální, chemické nebo kombinované a obecně je lze rozdělit do několika kategorií, jako jsou deformace, usazeniny, barevné změny či hmotnostní ztráty. Každý z těchto projevů závisí na vlastnostech materiálů, intenzitě a době působení požáru. Znalost těchto účinků umožňuje identifikovat místo vzniku požáru a posoudit vliv tepelné expozice na různé materiály a konstrukce. Klíčové faktory, jako je druh materiálu, teplota, doba trvání požáru a způsoby přenosu tepla (kondukce, radiace, konvekce), významně ovlivňují charakter a rozsah poškození.

Účinky požáru představují pozorovatelné nebo měřitelné fyzikální, chemické či kombinované změny materiálů, vznikající v důsledku jejich expozice vysokým teplotám. Tyto změny zahrnují deformace, usazeniny, barevné změny a hmotnostní ztráty. Rozsah poškození je ovlivněn řadou faktorů, zejména druhem materiálu, intenzitou a délkou působení požáru, a také způsobem přenosu tepla (kondukce, radiace, konvekce). Znalost těchto účinků je zásadní pro určení místa vzniku požáru i pro hodnocení vlivu tepelné expozice na různé konstrukční prvky.

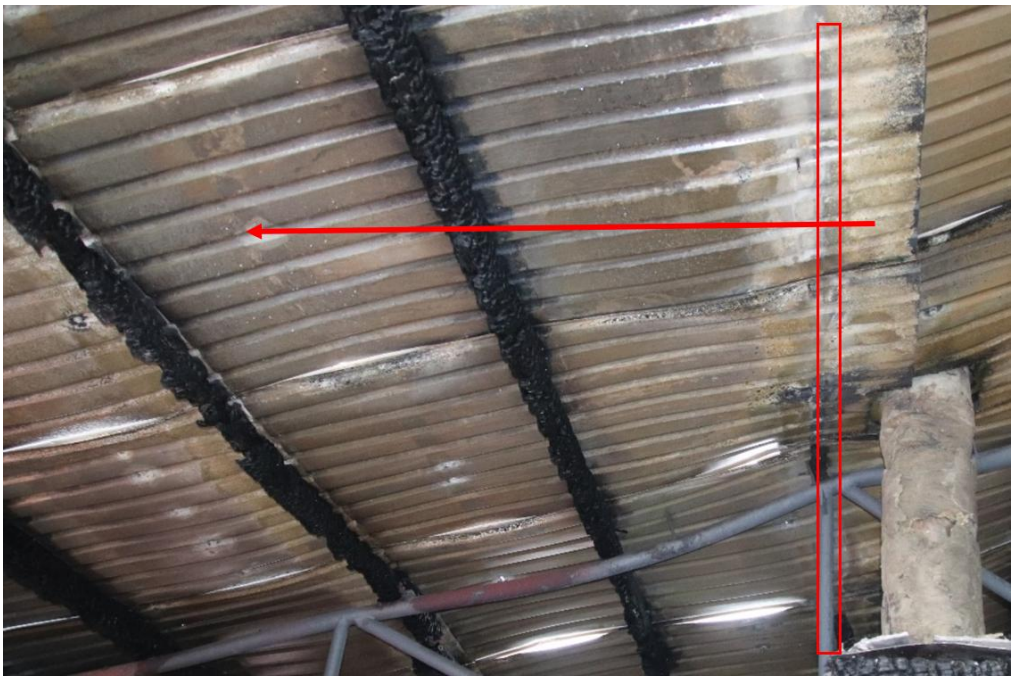
Zatímco účinky požáru popisují samotné změny materiálů, **stopy požáru** představují jejich konkrétní vizuální a strukturální projevy na površích stavebních konstrukcí a vybavení. Tyto stopy poskytují důležité informace o průběhu požáru a spolu s tzv. vzory požáru, které vznikají interakcí účinků požáru s prostředím, pomáhají rekonstruovat jeho vývoj. Úspěšná analýza stop požáru vyžaduje detailní znalost požární dynamiky, vlastností použitých materiálů a mechanismů šíření tepla, a hraje klíčovou roli při určování místa vzniku, směru šíření i intenzity požáru.

2. ČÁST A Účinky požárů

1 Zuhelnatění dřeva

Zuhelnatělý materiál se pravděpodobně vyskytuje téměř při všech požárech v budovách. Pokud je dřevo vystaveno zvýšeným teplotám, podléhá pyrolýze a chemickému rozkladu, který odvádí plyny, vodní páry a různé produkty pyrolýzy jako například kouř. Pevný zbytek tvoří zejména uhlík. Při zuhelnatění dochází ke tvorbě trhlin a puchýřů. [1]

Rychlost zuhelnatění dřeva při jednostrannému působení tepla se v laboratorních podmínkách může být od jednotek cm za hodinu až po desítky cm za hodinu. Z uvedeného je zřejmé, že určovat dobu působení požáru pouze na základě hloubky zuhelnatění může být velmi nepřesné. Analýza hloubky zuhelnatění je proto vhodnější pro určení směru šíření požáru než pro stanovení konkrétních časů doby působení. Na základě porovnání relativních hloubek zuhelnatění jednotlivých míst lze určit místo, kde je tento účinek požáru nejsilnější. Vyšetřovatel požárů pak může odvodit směr šíření požáru, přičemž místa s klesající hloubkou zuhelnatění jsou vzdálenější od zdroje tepla. Příklady směru šíření požáru jsou uvedeny na následujících dvou obrázcích. [1]



Obrázek 1 Určení směru šíření požáru na základě hloubky zuhelnatění střešních krovů (Zdroj: HZS ČR)

[1] National Fire Protection Association. Technical Committee on Fire Investigations, 2021. NFPA 921, Guide for fire and explosion investigations. National Fire Protection Association (kapitola 6)

Obrázek 2 Určení směru šíření na základě hloubky zuhelnatění střešních latí (Zdroj: HZS ČR)

Je potřeba mít na paměti, že porovnání hloubek zuhelnatění lze provádět pouze pro identické materiály. Není možné např. srovnávat hloubku zuhelnatění dřevěného trámu s hloubkou zuhelnatění sousední OSB desky. Rychlost zuhelnatění dřeva při požáru závisí na více proměnných např. [1] :

- rychlost a doba působení tepla:

Rychlost a doba působení tepla ovlivňují hloubku zuhelnatění dřeva tak, že s prodlužujícím se časem a růstem izolační zuhelnatělé vrstvy se rychlost zuhelnatění snižuje.[2]

- ventilační účinky při požáru:

Ventilace může zásadně ovlivnit množství kyslíku dostupného pro spalování, což přímo souvisí s intenzitou požáru a tím i s rychlostí zuhelnatění. V dobře větraném prostoru se může spalovat rychleji, zatímco v uzavřeném prostoru může rychlost zuhelnatění klesnout.[3]

- poměr plochy k hmotnosti (stupeň dělitelnosti):

Materiály s vyšším poměrem plochy k hmotnosti budou mít tendenci rychleji zuhelnatět, neboť vyšší expozice povrchu vůči plameni podpoří rychlejší tepelné ztráty.[4]

- směr, orientace a velikost kresby dřeva:

Různé dřeviny mají odlišné orientace letokruhů a struktury, což může ovlivnit, jak se dřevo chová při expozici teplu. Například dřevo s výraznějším letokruhem (např. smrk) může vykazovat jinou hloubku zuhelnatění než dřevo s jemnější strukturou (např. buk).[4]

- druh dřeva:

Různé druhy dřeva mají různou hustotu, chemické složení a trajektorii spalování, což se přímo promítá do rychlosti zuhelnatění. Například borovice, která obsahuje více pryskyřice, může hořet rychleji než dub. [4]

- hustota dřeva:

[2] Žajdlík, T. and Šuhajda, K. (2022). Experimentální test požární odolnosti dřevěné konstrukce. Juniorstav, 55-59. https://doi.org/10.13164/juniorstav.2022.55

[3] Peatross, M. J. and Beyler, C. L. (1997). Ventilation effects on compartment fire characterization. Fire Safety Science, 5, 403-414. https://doi.org/10.3801/iafss.fss.5-403

[4] White, R. H. and Dietenberger, M. A. (2001). Wood products: thermal degradation and fire. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 9712-9716. https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01763-0

Různé druhy dřeva mají různou hustotu, chemické složení a trajektorii spalování, což se přímo promítá do rychlosti zuhelnatění. Například borovice, která obsahuje více pryskyřice, může hořet rychleji než dub. [5]

- obsah vlhkosti:

Vlhkost ovlivňuje teplotu, při které dochází k chemickým změnám v dřevě, a tím i jeho pevnost a stabilitu při vystavení vysokým teplotám. Přítomnost vody může urychlit hydrolytickou degradaci hemicelulóz, což vede ke snížení mechanických vlastností dřeva. [4]

- případné povrchové úpravy:

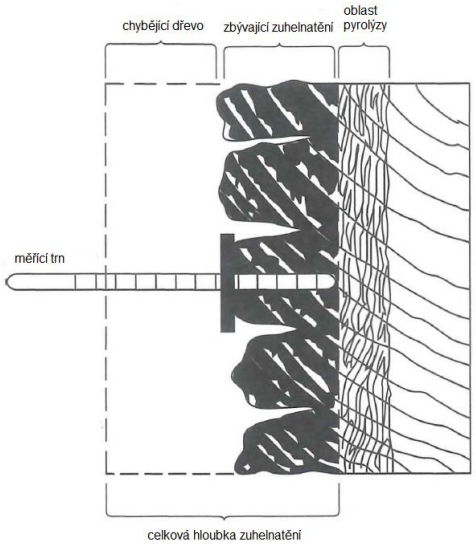
Povrchové úpravy mohou významně ovlivnit požární odolnost dřeva. Některé nátěry a impregnace zpomalují šíření plamene a snižují rychlost hoření.

- mezery, trhliny, štěrbiny v daném materiálu:

Trhliny ve dřevě mohou zvýšit rychlost šíření tepla a plamene. Tvorba trhlin na povrchu může totiž přispět k vytvoření kanálů, kterými plamen lépe pronikne. Tím se zvyšuje efektivní kontaktní plocha mezi vzduchem a dřevem. [6]

Hloubka zuhelnatění představuje informaci o celkové tepelné expozici daného místa, které může být při požáru v uzavřeném prostoru ovlivněna dalšími (k místu vzniku požáru nerelevantními) faktory jako je ventilace a rozmístění požárního zatížení v daném prostoru.

Vyhodnocení hloubky zuhelnatění lze provádět vizuálně případně lze použít měřící nástroje s tenkými tupými sondy, jako jsou určité typy hloubkoměrů desénu pneumatik nebo speciálně upravená kovová měřítka. Je možné také použití digitálních posuvných měřítek. Pro přesné výsledky je potřeba používat pro dané měření stejný měřící nástroj přikládaný pod stejným tlakem. Při měření je také potřeba vzít v potaz již shořelé části dřeva a chybějící hloubku připočíst k celkovému výsledku měření. Příklad měření hloubky zuhelnatění je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 3 Měření hloubky zuhelnatění (zdroj NFPA 923, obrázek 6.3.2.6)

[5] Tran, H.C. and White, R.H., 1992. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. Fire and Materials, 16(4), pp.197–206. doi:10.1002/fam.810160406.

[6] McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C., & Campbell, G. (2009). The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. Archaeological and Anthropological Sciences, 1(4). https://doi.org/10.1007/s12520-009-0018-z

2 Čistá oblast vypálení

Čistá oblast vypálení (Clean Burn) je účinek požáru pozorovatelný na nehořlavých površích stěn či stropu v místnosti, kde došlo k požáru. Vznikají v místech, kde dochází ke kontaktu exponovaného povrchu s přímým plamenem nebo intenzivně vyzařovaným teplem, čímž dochází k oxidaci již usazených zplodin hoření a zabránění usazování nových zplodin hoření na povrchu, viz obrázek níže. Vznikají tak světlé oblasti, jejich ohraničující linie jsou v ostrém kontrastu s okolními tmavými oblastmi, zabarvenými v důsledku usazení zplodin hoření. [1]

Obrázek 4 Ostře ohraničená plocha oblasti čistého vypalování vzniklá v důsledku blízkosti plamenného hoření v počáteční fázi požáru (Zdroj: HZS ČR)

Rozsah plochy vzniklé čistým vypalováním je úměrný celkové tepelné expozici daného povrchu, a proto může být v některých případech výrazně ovlivněn ventilačními podmínkami požáru v uzavřeném prostoru, které významně ovlivňují průběh tepelné expozice. Poloha oblasti čistého vypalování může být relevantní k určení místa vzniku požáru, avšak obdobné vzory se mohou objevit i v oblastech ventilačních cest, zejména u požárů řízených ventilací. V takovém případě přítomnost čisté plochy ve ventilační cestě nemusí mít vztah k místu vzniku požáru. [1]

Obrázek 5 Ostře ohraničeno plocha čistého vypalování vzniklá v důsledku blízkosti plamenného hoření v počáteční fázi požáru (Zdroj: HZS ČR)

Obrázek 6 Plocha čistého vypalování na stropě nad místem vzniku požáru (Zdroj: HZS ČR)

3 Změna barevnosti

Změna barvy materiálu může poskytnout informaci o jeho vystavení určité teplotě. Bez znalosti konkrétního mechanismu změny barvy v daném materiálu však nelze tuto změnu kvantifikovat. V praxi je proto vhodnější porovnávat zasažené oblasti s částmi nezasaženými. Je také nutné vzít v úvahu, že hodnocení barevných změn je subjektivní, a tedy se může u jednotlivých vyšetřovatelů lišit.

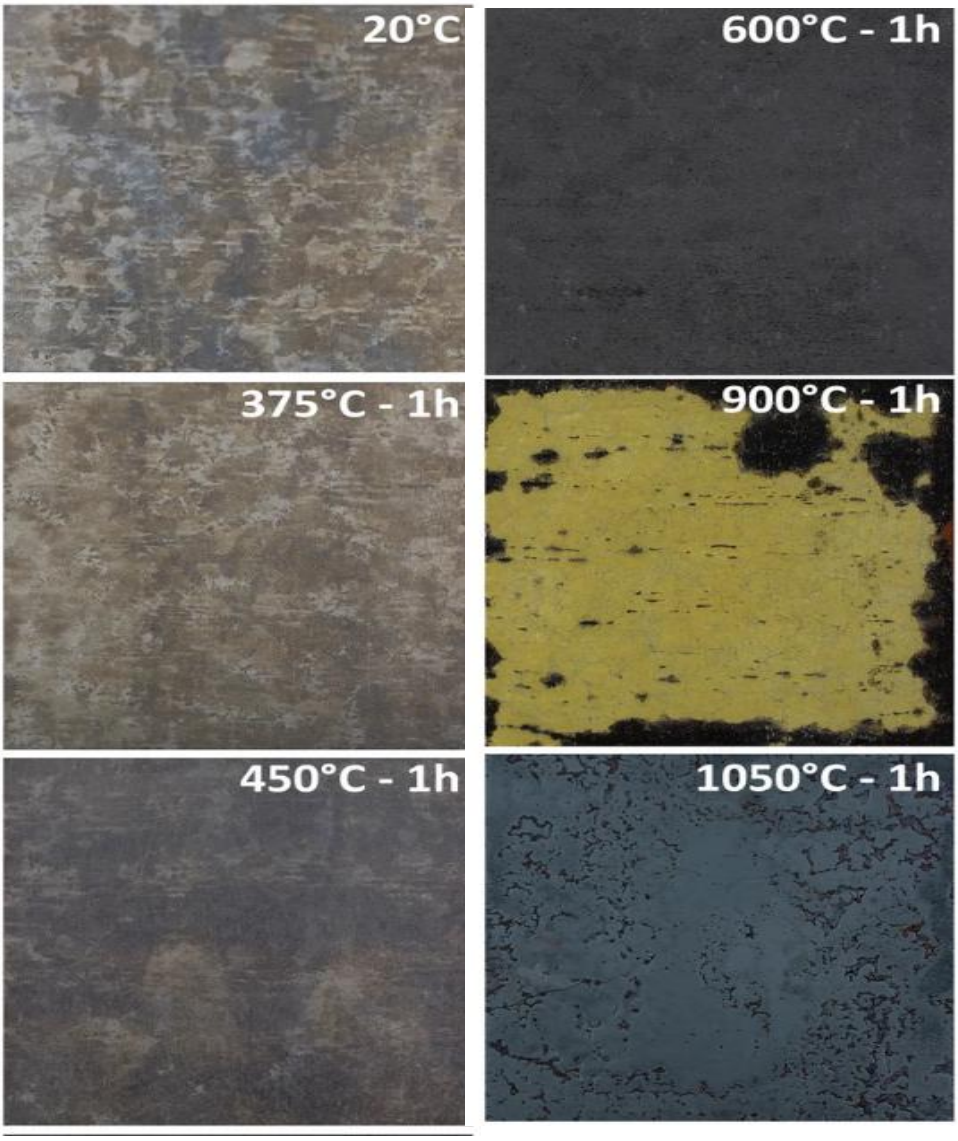
Jako příklad lze uvést článek Casaroli et al (2022) [7], který byl zaměřen na simulaci požáru působícího na pozinkované ocelové plechy, běžně používané pro konstrukční části nábytku, transformátorů a vzduchovodů. S výjimkou hliníkových slitin jsou teploty tání běžných kovových materiálů v domácnostech a průmyslu (např. ocel, nerezová ocel, slitiny mědi) natolik vysoké, že jich nelze při typickém požáru dosáhnout. [7]

Metalurgická šetření v rámci zmíněného článku zahrnovalo zbarvení povrchu pomocí fotografické analýzy, morfologii a chemické složení povrchových oxidů pomocí SEM (Scanning Electron Microscope) a EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) a změny mikrostruktury v závislosti na teplotě pomocí LOM (Light Optical Microscope). [7]

Vizuální analýza ukázala, že mezi teplotami 20 °C a 375 °C se barva povrchu výrazně nezměnila. V teplotním intervalu 415 °C-450 °C se zinková vrstva stala tmavší a neprůhlednější a zvýšila se její drsnost. Od 525 °C do 600 °C byla barva povrchu rovnoměrně neprůhledná a tmavě šedá. Přítomnost oxidu železitého byla patrná

[7] Casaroli, A., Boniardi, M., Gerosa, R. *et al.,* 2022. Metallurgical Analysis as a Useful Method for Fire Investigation: the Case of Galvanized Steel Sheets. *Fire Technol* **58**, 553–570. https://doi.org/10.1007/s10694-021-01158-2

od teploty 750 °C a s rostoucí teplotou se zvětšovala. Při 900 °C se množství zinkové vrstvy silně snížilo a nabylo žluté barvy. Při 1050 °C zcela zmizela. [7] Vizuální změny jsou uvedeny na obrázku níže.



4 Usazeniny a kondenzát zplodin hoření na povrchu

Usazeniny a kondenzát zplodin hoření patří mezi nejčastěji pozorovatelné projevy požáru. Mohou být identifikovány na jakémkoli povrchu v prostoru zasaženém požárem. Přítomnost nebo naopak absence těchto usazenin je důležitým indikátorem, a proto je zásadní jejich výskyt důkladně zadokumentovat.

Zplodiny hoření se typicky usazují na chladnějších površích, přičemž nejčastější výskyt lze pozorovat v horních partiích stěn a stropů. Výrazné usazeniny mohou být patrné také ve vedlejších místnostech, pokud jsou propojeny otevřeným stavebním otvorem, který umožňuje migraci kouře a horkých plynů, viz následující obrázek.

Obrázek 8 Usazený kondenzát kouře na stropu a stěně naznačující výšku neutrální roviny (Zdroj: HZS ČR)

Kouř obsahuje pevné částice, kapalné aerosoly a plyny. Pevné částice a kapalné aerosoly jsou unášeny při výměně plynů v místnosti. Pokud narazí na pevný povrch přilnou k němu, plynné složky kouře mohou na povrchu kondenzovat. Ropné produkty či většina plastu při hoření vytvářejí částice, které jsou převážně uhlíkové částice (saze), které ulpívají na chladných površích. V průběhu požáru může dojít k jejich následnému odstranění spálení. [1]

Zplodiny hoření se nebudou usazovat na površích které jsou něčím zakryté, tento fakt lze použít při původní lokalizaci polohy vypínačů, předmětů či těl obětí, která mohly být po požáru (v rámci jeho lokalizace/likvidace) přesunuty, viz následující obrázek.

Obrázek 9 Linie usazených zplodin hoření na stropě naznačující původní polohu zářivkového tělesa (Zdroj: HZS ČR)

5 Deformace kovových konstrukcí

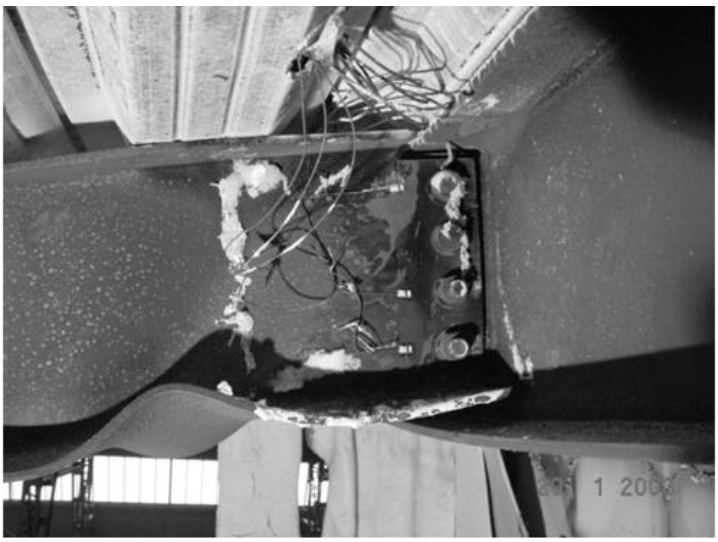
Pokud jsou kovové konstrukce (např. příhradové nosníky, traverzy, sádrokartonové profily) či kovovém vybavení (např. regály) vystaveny tepelné expozici z požáru dochází ke změně pevnosti v jejich dílčích částech, viz obrázek níže.

Obrázek 10 Deformace kovové regálu, šipka naznačuje směr šíření požáru (Zdroj: HZS ČR)

Pro stavební účely se používá běžná konstrukční ocel. Jedná o nízkolegovanou ocel, která není tepelně upravována. Tato ocel si zachovává své materiálové vlastnosti do zhruba 400 °C nad touto teplotou se již projevuje redukce meze pevnosti a meze kluzu. Pokud dojde k ohřátí konstrukce do cca 600 °C a jejímu postupnému zchladnutí materiálové vlastnosti se opět vrátí na původní hodnoty. Při překročení teploty 600 °C se materiálové vlastnosti po zchlazení zcela nevrátí na původní hodnoty.[8]

Při požáru dochází k nárůstu teploty v některých částech konstrukce, případně i v celé konstrukci při vzniku prostorového požáru. Ocelové konstrukce jsou subtilní a tím dochází k rychlému prohřátí i uvnitř průřezu. Vlivem vysoké teploty dochází, k poklesu pevnosti a ke zvětšování poměrného přetvoření, viz obrázky níže.

[8] Rada Václav, 2012. Ocelové konstrukce po požáru. České vysoké učení technické v Praze.



Obrázek 11 Deformace spojení nosníku s žebrovou deskou a sloupu během sedmé velké požární zkoušky v Cardingtonu (převzato z Wang , 2002. [9]

Obrázek 12 Deformace exponované části sloupu. (Poznámka: Původní rozsah ochrany lze určit podle bílé zbytkové čáry kolem sloupu.), (převzato z British Steel, 1999,Figure 6.9 [10]*)*

Působení vysoké teploty během požáru způsobuje teplotní roztažnost konstrukčních prvků. Pokud je tomuto roztažení bráněno, vznikají v konstrukci vnitřní síly a napětí. Na rozdíl od běžného provozního stavu se při požáru objevuje protažení, se kterým se za normálních podmínek běžně nepočítá, a které může být zdrojem významných vnitřních sil.

[9] Wang Y.C., 2002. Steel and Composite Structures, Behaviour and Design for Fire Safety, Spon Press, London 2002, ISBN 0-415-24436-6.

[10] British Steel, 1999. The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire, Swinden Technology Centre. Dostupné na https://www.steelconstruction.info/images/0/0d/The_Behaviour_of_Multi-storey_Steel_Framed_Buildings_in_fire.pdf.

Pokud není prvkům umožněno volné prodloužení, může dojít k překročení redukované pevnosti materiálu, neboť ta se s rostoucí teplotou výrazně snižuje. Výsledkem může být nejen deformace jednotlivých prvků, ale i poruchy větších celků nebo celé konstrukce. [8]

Při požáru v daném prostoru dochází k postupné tepelné expozici kovových konstrukcí, její intenzita klesá se vzdáleností od místa vzniku požáru. Celkové tepelná expozice bývá tedy největší u kovových konstrukcí, které jsou nejblíže k místu vzniku požáru, což se projevuje jejich výraznou deformací v porovnaní s konstrukcemi, které jsou místu vzniku požáru více vzdálené. Vyhodnocení účinků intenzity či směru deformace kovových částí či konstrukcí tak může pomoci při určení polohy místa vzniku požáru.

6 Účinky požáru na sádrokartonových deskách

Sádrokartonová deska má poměrně předvídatelnou odezvu na expozici požáru. Nejprve dochází k odhoření papíru na povrchu strany přivrácené k požáru. Sádra pod papírem následně může měnit barvu v důsledku pyrolýzy organického pojiva. Při dalším zahřívání dochází ke změně barvy na větší ploše, papír na odvrácené straně může zuhelnatět. Pokud je sádrokartonový deska vystavené přímému plamennému působení, může v tomto místě být povrch výrazně světlý (čistá plocha). Působením tepla dochází také dehydrataci chemicky vázané vody v sádrové hmotě tzv. kalcinaci. Kalcinace nastává na straně přilehlé k požáru a postupuje ke straně odvrácené. Při kalcinaci dochází ke ztrátě pevnosti sádrokartonové desky, kalcinované oblasti na sádrokartonové desce také bývají světlejší než oblasti s nízkou kalcinací či oblasti nezasažené. Hloubka kalcinace je úměrné tepelné expozici působící na sádrokartonovou desku. Při intenzivním déle trvajícím požáru dochází k rozsáhlé kalcinaci, jež má za následek zborcení sádrokartonových desek ze stropní konstrukce (nejčastěji) a ze stěn. Protipožární sádrokartonová deska obsahuje minerální vlákna či jiné zpevňující prvky, čímž je zachována větší pevnost desky i po její intenzivní kalcinaci. [11]

Kalcinace sádrokartonových desek je indikátorem, že tato stavební konstrukce byla vystavena tepelnému působení. Oblast, kde je kalcinace nejintenzivnější může být určena jak vizuálně, tak i měřením hloubky kalcinace. Relativní rozdíly v odstínu barvy či naměřené hloubce kalcinace jednotlivých bodů (ploch) lze použít jako indikátor pro stanovení místa s největší tepelnou expozicí v důsledku všech podstatných faktorů jako je doba trvání požáru, ventilace a požární zatížení.

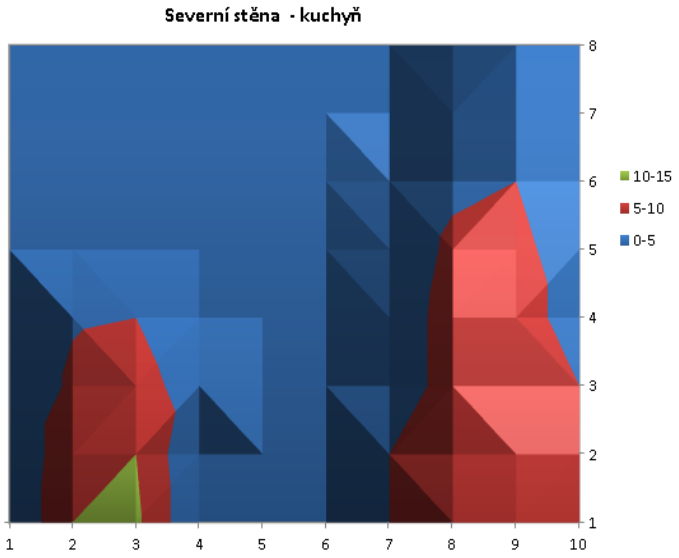
Při vyhodnocování hloubky kalcinace je potřeba vyhodnotit všechny možné aspekty jako např.

- Je možné, že tepelná expozice způsobující hloubku kalcinace, pochází z jednoho či více zdrojů tepla či paliva, čímž je možné určit více zdrojů tepla či požáru.
- Porovnání jednotlivých měření je potřeba provádět pouze u stejného materiálu a tloušťky sádrokartonových desek.
- Při vyhodnocení hloubky kalcinace je potřeba brát v úvahu povrchovou úpravy sádrokartonových desek. Barvy, tapety, štuky mohou ovlivnit naměřené hodnoty.
- Měření by měla být prováděna konzistentním způsobem, aby se co nejvíce eliminovaly chyby měření.
- Při likvidaci požáru může dojít k poškození a znemožnění měření sádrokartonových desek z důvodu aplikace hasební vody na jejich povrch. [11]

Měření hloubky kalcinace může být prováděno pomocí měřícího trnu s tupou špičkou (velikost průřezu trnu cca 1,9 – 3,1 mm^2), který se vtlačí za vytvoření přítlačného odporu do měřeného bodu. Na připojené stupnici se následně odečte hloubka kalcinace, tj. do jaké hloubky trn pronikl. Pro každé měření je potřeba vytvářet obdobný přítlačný odpor či může být měřící trn připojen k siloměru, jenž vytváří konstantní měřící tlak (cca

[11] Kopecký, S., Řepík, J. & Škoda, J. (2018) Lokalizace kriminalistického ohniska pomocí metody měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek. *TZB-info*, 29. ledna 2018. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/16873-lokalizace-kriminalistickeho-ohniska-pomoci-metody-mereni-hloubky-kalcinace-sadrokartonovych-desek.

800-900 g/mm2). Ideální vertikální/horizontální rozestup mezi měřícími body je cca 30 cm či méně. Naměřené a zaznamenané výsledky lze pak digitálně převést do grafické podoby (např. pomocí MS Excel), viz následující obrázek.[11]



7 Odhoření materiálu – hmotnostní úbytek

Během požáru dochází k přeměně paliva na produkty hoření, teplo a světlo. Tento proces má za následek odhoření paliva, tj. ubytek hmoty materiálu, viz následující obrázky.

Obrázek 14 Hmotnostní úbytek materiálu područek křesel, šipka naznačuje směr šíření požáru (Zdroj: HZS ČR)

Obrázek 15 Hmotnostní úbytek proutěného koše, šipka naznačuje směr šíření požáru (Zdroj: HZS ČR)

Během požáru může také u nehořlavých materiálů docházet k úbytku hmoty, a to v důsledku odpařování, kalcinace či sublimace. Rychlost úbytku hmoty obecně na tepelném toku dopadající na povrch materiálu, rychlosti růstu intenzity požáru a rychlosti uvolňování tepla samotného materiálu, viz obrázek níže. Jak dochází ke zvýšení intenzity požáru při jeho šíření dochází také ke zvýšení rychlosti úbytku hmoty.

Obrázek 16 Hmotnostní úbytek pohovky, šipka naznačuje směr šíření požáru (Zdroj: HZS ČR)

Pro určení úbytku hmoty materiálu lze využít vzorové materiály, výrobky či vybavení, které se porovná se shořelým originálem. Zjištěný úbytek hmoty může být ukazatel celkové tepelné expozice (charakteristická dobou trvání a intenzitou), které byl materiál či materiály vystaveny. Při posuzování úbytku hmoty je však potřeba brát v potaz další aspekty jako např. nesymetričnost či krytí posuzovaného objektu z hlediska úbytku hmoty.

8 Tavení materiálu

Tavení materiálu je fyzikální změna skupenství vyvolaná působením tepla. Na požářišti lze často pozorovat znovu ztuhlý materiál, který během požáru dosáhl bodu tavení. Různé materiály se taví při odlišných teplotách, od hodnot lehce přesahujících pokojovou teplotu až po řádově tisíce stupňů Celsia. Každý materiál má svou charakteristickou teplotu tavení (viz příklad, tabulka 1).

Tabulka 1 Teploty tavení nejběžnějších materiálů

Materiál	**Teplota tavení [°C]**
Chrom	1840
Platina	1773
Křemen ($Si0_2$)	1682-1700
Žáruvzdorná cihla	1638-1650
Porcelán	1550
Železo	1540
Uhlíková ocel	1516
Nikl	1455
Nerezová ocel	1427
Šedá litina	1350-1400
Bílá litina	1050-1100
Měď	**1082**
Zlato	1063
Bronz	982
Stříbro	960
Mosaz	932
Hliník	660
Hořčík	637
Sklo	593-1427
Zinek	375
Olovo	327
Zinkové odlitky	300-400
Cín	232
Termoplasty	
Nylon	176-265
Polyethylen	122-135
Polystyren	120-160
Akryl	90-105
ABS	88-125
PVC	73-105
Parafín	54
Vosk	49-75

Teploty tavení běžných kovů se pohybují v rozmezí 183 °C (cín[12]) až 1460 °C (ocel[13]). Termoplasty měknou a tají při relativně nízkých teplotách v rozmezí 75 °C až 400 °C.

Při vyhodnocování zbytků kovů po požáru je nutné zohlednit možnost legování – mísení dvou a více kovů, z nichž alespoň jeden je v kapalném stavu. Vzniklá slitina pak má nižší teplotu tavení než původní. Kovy jako měď a železo (ocel) může být ovlivněna legováním s kovy, které mají nižší teplotou tání jako např. hliník, zinek a olovo (viz tabulka 1). Výsledná teplota tání takovéto slitiny je vždy nižší než teplota tání kovu čisté mědi či ocele.

Hranice mezi roztavenými a neroztavenými částmi materiálu může vyšetřovateli požáru dávat informaci, kterou lze vyhodnotit jako stopu požáru či směr šíření požáru. Ze znalosti tavení konkrétního materiálu lze odhadnout teplotu, které bylo v dané oblasti dosaženo.

Teplota plamene při hoření dřeva a uhlovodíkových paliv (např. plastů, benzínu) je obdobná, obvykle v rozmezí 1000–1100 °C, i když tyto paliva uvolňují teplo různou rychlostí. Rozdíly v dosažených teplotách jsou proto více ovlivněny ventilačními podmínkami než druhem paliva. Dobře ventilované požáry (např. střešní konstrukce, požáry podkroví s následným narušením střešní konstrukce apod.) dosahují vyšších teplot než požáry v uzavřených prostorech (např. sklepy, místnosti bez oken).

V případech, kdy byly v prostoru dosaženy maximální teploty, lze nalézt i stopy tavení měděných vodičů. Tyto stopy však mohou být snadno zaměněny za známky elektrického zkratu[14] (viz kapitola Arc Mapping Metodiky FING 2). Je proto nezbytné jejich výskyt vždy posuzovat v kontextu okolních podmínek a pravděpodobného tepelného zatížení.

Tabulka níže znázorňuje fyzikální účinky teplot na různé materiály, jak byly popsány v Maraveas, et al, 2017. Obsahuje informace o teplotním chování různých materiálů, jejich typických příkladech použití, stavech při vystavení teplotám a teplotních rozmezích, ve kterých dochází ke změnám.[15]

Tabulka 2 Fyzikální účinky teplot na různé materiály (přeloženo z Maraveas, et al, 2017 [15])

Materiál	**Příklady**	**Stav**	**Teplota (°C)**
Polystyren	Izolační pěna; stínítka; držadla	Měkne	50–60
Polyethylen	Háčky na záclony; rádiové kontejnery	Taje a teče	120
Polyethylen	Tašky; fólie	Smršťuje se	49
Polyethylen	Lahve; kbelíky	Měkne a taje	66
Barvy na bázi vinylu	Barvy na ocelové konstrukce	Taje, teče, pění nebo hoří	120
UHMW/HD	Potrubí na vodu a odpad	Taje, teče, pění nebo hoří	190

[12] Cín má teplotu tání přibližně 231.9 °C (ASTM E3, 2018), avšak v praxi se může pohybovat mírně níže z důvodu přítomnosti legujících prvků.

[13] Tato hodnota může být zavádějící, protože ocel není homogenní materiál a její teplota tavení se může lišit v závislosti na jejím složení (např. množství uhlíku a příměsí). Obecně se teplota tání uhlíkových ocelí pohybuje v rozmezí 1425 °C až 1540 °C. Uvedená teplota demonstruje orientační hodnotu, která je zjednodušená pro obecné srovnání s jinými kovy, nikoli přesnou hodnotu pro všechny typy ocelí.

[14] Podrobněji kapitola Arc Mapping Metodiky FING 2

[15] Maraveas, C., Fasoulakis, Z. and Tsavdaridis, K.D., 2017. Post-fire assessment and reinstatement of steel structures. *Journal of structural fire engineering*, *8*(2), pp.181-201.

Materiál	Příklady	Stav	Teplota (°C)
Polyethylenové potrubí		Povrchové praskání; hluboké trhliny	290–590
Beton	Konstrukce	Opadává, práší se; světle zbarvený	590–950
Beton	Konstrukce	Rozsáhlé opadávání	950
Olovo	Olověné potrubí; těsnění; baterie	Ostré hrany zaobleny nebo vytvořeny kapky	300–350
Zinek	Instalatérské prvky; těsnění; pozinkovaný povrch	Tvoří se kapky	400
Ocel (konstrukční)	Konstrukce	Hrubý, erodovaný povrch	560–660
Hliník	Malé strojní díly; držáky; svítidla; kuchyňské náčiní	Tvoří se kapky	650
Tavené sklo	Skleněné bloky; láhve; ozdoby	Měkne nebo přilne	700–750
Tavené sklo		Zaoblené	750
Tabulové sklo	Skleněné desky; tvrzené sklo	Měkne nebo přilne	700–750
Tabulové sklo		Zaoblené	800
Stříbro	Šperky; stolní nádobí; mince	Tvoří se kapky	950
Mosaz	Kliky dveří; zámky; svítidla; přezky	Ostré hrany zaobleny nebo vytvořeny kapky	900–1 000
Bronz	Rámy oken; umělecké předměty	Ostré hrany zaobleny nebo vytvořeny kapky	1 000

Plasty jsou často prvními materiály ovlivněnými požárem, měknou a tají již při teplotách 100 °C až 200 °C, zatímco sklo se taví podle svého složení za vyšších teplot, například sodnovápenaté sklo při 700 °C až 800 °C, to může být dosaženo u požárů dřevěných staveb.[16]

Kovy jsou užitečné jako další indikátor intenzity požáru. Například hliník taje při 660 °C, což není v případě silného požáru neobvyklé. Vzhledem k jeho vysoké tepelné vodivosti však lokalizované plameny obvykle neroztaví silnější kovové součásti. To platí zejména pro požáry hořlavých kapalin, jejichž typická doba trvání je krátká, takže ani kovy s relativně nízkým bodem tání nemusí být tavením zasaženy. Zinkovo-hliníkové slitiny, známé také jako slitiny zbytků (pop metal), s bodem tání okolo 380 °C jsou běžné. Naproti tomu mosaz (875–980 °C) a měď (1080 °C) představují materiály, jejichž tavení může indikovat vystavení velmi vysokým teplotám. Měď, běžně používaná ve vodovodních potrubích a elektrických vedeních, může být nalezena roztavená i v oblastech, kde byla přítomna voda, což vyvrací mylné domněnky o použití urychlovačů hoření.[16]

Teploty plamenů hořlavých kapalin tedy nejsou vždy vyšší než u běžných materiálů, a proto roztavené kovy nelze považovat za přímý důkaz použití urychlovačů. Roztavený hliník může navíc reagovat s mědí a vytvářet bimetalické slitiny, přičemž vznik eutektické slitiny hliníku s mědí může nastat již při teplotě 548 °C. Zahřátý hliník tak může pronikat do zahřátých měděných vodičů v elektrických systémech a zařízeních. Podobně zinek, pokud dopadne na žhavou ocel, může způsobit metalurgické průniky.Litina, která taje v rozmezí 1200

[16] Icove, D. J., & Hayne, G. A., 2018. Kirk's Fire Investigation, 8th edition. Pearson.(Kapitola Melting Points of Materials)

°C až 1450 °C, se může roztavit v extrémně intenzivních požárech, jako jsou například požáry dřevěných konstrukcí v plném rozsahu. Nálezy roztavené litiny v popelu a troskách takových požárů jsou zdokumentované a mohou potvrzovat dosažení velmi vysokých teplot, zpravidla kolem 1300 °C.[16]

Tavení kovů, jako je měď, mosaz, bronz, hliník nebo litina, poskytuje indicie o dosažených teplotách. U hliníku a zinku, jak již bylo uvedeno, lze v extrémních požárech nalézt eutektické slitiny. Měď je navíc velmi citlivá na oxidaci, která se může projevit změnou barvy (na černou nebo zelenou). Tento proces je důsledkem zahřívání mědi na vzduchu, při kterém vzniká oxid měďnatý (černý povlak). Pokud je expozice dostatečně dlouhá, může dojít k úplnému přeměnění měděného předmětu, např. vodiče, na oxid. Stupeň oxidace měděných vodičů tak může sloužit jako ukazatel intenzity a délky působení požáru. Vodiče uložené v trubkách bývají vůči oxidaci méně náchylné, protože mají omezený přístup vzduchu a bývají chráněny redukční atmosférou vzniklou rozkladem izolačních materiálů. Povrch měděných a dalších kovových vodičů může také zezelenat v důsledku tvorby chloridu měďnatého, který vzniká reakcí s plynným chlorovodíkem (HCl) uvolněným při pyrolýze PVC izolace. [16]

Přítomnost roztavených kovů by měla být dokumentována a vyhodnocena v kontextu okolních podmínek. Nenaznačuje sama o sobě úmyslné zapálení, ale může pomoci odlišit běžné požáry od těch se zvláštními podmínkami ventilace či zatížení palivem. Tyto informace mohou napomoci stanovit rozdíly mezi teplotami vznikajícími při náhodných požárech s běžnou ventilací a teplotami dosaženými při požárech ovlivněných zvýšeným přísunem vzduchu nebo neobvykle vysokým zatížením palivem (např. chemickými akcelerátory při žhářství).

Je však důležité poznamenat, že interpretace těchto jevů nemůže být považována za absolutní pravidlo, neboť výsledné teploty tavení, a tedy i chování materiálu při požáru, mohou být ovlivněny řadou dalších faktorů, například délkou expozice teplotě nebo přítomností jiných chemických látek.

Kdykoli jsou na požářišti nalezeny zbytky roztaveného kovu, mohou posloužit k odhadu minimální teploty dosažené v daném místě konstrukce. Vyšetřovatel by měl vždy zaznamenat jejich přítomnost, rozsah a rozmístění. a vyhodnocena v kontextu okolních podmínek. Nenaznačuje sama o sobě úmyslné zapálení, ale může pomoci odlišit běžné požáry od těch se zvláštními podmínkami ventilace či zatížení palivem.

9 Oxidace

Oxidace je základní chemický proces spojený s hořením. Oxidace některých nehořlavých materiálů může vyvolat účinky požáru, které mohou vytvářet rozhraní a stopy požáru, jenž může vyšetřovatel požárů vyhodnotit. Lokální stopy požáru, například na plášti strojních zařízení, mohou být významnými indikátory vnitřních zvýšených teplot, které vyžadují detailní ohledání.

Účinky oxidace představují změnu barvy a změnu textury. Čím vyšší teplota a delší doba expozice požáru, tím výraznější budou účinky způsobené oxidací. Oxidace může pokračovat i po likvidaci požáru, a to reakcí se vzdušných kyslíkem. Její intenzita bude záviset na době po likvidaci požáru a okolní vlhkosti.

Při mírném zahřívání pozinkovaná ocel získává matně bělavý povrch v důsledku oxidace zinkového povlaku. Tato oxidace může také snižovat ochranu proti korozi, kterou jinak zinkový povlak poskytoval. Pokud je takto nechráněná ocel následně vystavená vlhkosti dochází ke korozi, což je další forma oxidace. Zkorodované plochy tak mohou poskytovat informaci o účincích požáru.

Pokud požár působí na nechráněné železo nebo ocel, získá povrch nejprve modrošedou matnost. Při zvýšených teplotách se železo může také slučovat s kyslíkem za vzniku černých oxidů. Oxidační reakce může vytvořit silné vrstvy oxidu, které se mohou odlupovat. Po požáru, pokud byl kov mokrý, se může objevit obvyklý rezavě zbarvený oxid.

Pokud je měď vystavená teplu tvoří se na jejím povrchu tmavě červený nebo černý oxid. Barva není určující, tloušťka vytvořeného oxidu závisí na době trvání a intenzitě teplu, kterému byla měď vystavena.

Vliv oxidace na vzhled kovových povrchů po požáru může sloužit jako důležitý ukazatel směru šíření požáru a intenzity tepelného působení. Tento přístup byl prakticky uplatněn například v diplomové práci Sanža Šafránka (2015), která analyzuje rozdíly v barvě, textuře a rozsahu tepelně ovlivněných ploch karoserie v závislosti na směru a typu požáru. [17]

10 Drolení, odlupování vrchní vrstvy zděných či betonových konstrukcí.

Drolení, odlupování vrstvy zděných či betonových konstrukcí při požáru je v důsledku ztráty pevnosti v tahu na povrchu materiálu způsobená změnou teploty, jenž má za následek působení mechanických sil v materiálu. V betonu či omítce jsou mechanické síly ovlivněné síly několika faktory:

- Vlhkost přítomná v materiálu.
- Rozdílná roztažnost mezi výztužnou armaturou (ocelové tyče a kari sítě) a okolním betonem
- Rozdílná roztažnost mezi betonovou směsí a výplňovým kamenivem (nejčastěji u křemičitých kameniv)
- Rozdílná roztažnost mezi stranou vystavenou požáru a stranou opačnou.
- Hasební zásah, rychlé ochlazení zahřátého materiálu vodou.

Místa, kde dojde k odloupnutí vrchní vrstvy mohou být světlejší než okolní, protože dochází k odkrytí čistého materiálu pod povrchem, což může být v kontrastu s okolními plochy, kde bývají usazené zplodiny hoření, viz obrázky níže.

Obrázek 17 Odloupnutí štukové vrstvy cihlové stěny (Zdroj: HZS ČR)

[17] Sanža Šafránek, O., 2015. *Stopy šíření požáru na karoseriích a konstrukčních dílech dopravních prostředků*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství.

Obrázek 18 Odloupnutím vrchní vrstvy litého betonového stropu (Zdroj: HZS ČR)

Dalším faktorem při drolení betonu je zatížení a napětí v materiálu v daném místě. V těchto oblastech vysokého namáhání či zatížení může dojít během požáru k odloupnutí materiálu, jenž přímo nemusí souviset s polohou místa vznik požáru (např. spodních straně stropu či nosníků). Je také třeba vzít v úvahu, že k deformaci a následném odpadnutí materiálu může také nastat z jiných důvodů než působením požáru např. mrazem, chemikáliemi, mechanickým pohybem, působící silou nebo únavou materiálu.

11 Teplotní roztažnost a deformace materiálu

Velké množství materiálů při požárech dočasně nebo trvale mění tvar. Většina materiálů se při zahřívání roztahuje. Pokud je stavební konstrukce či jiná struktura vyrobena z různých materiálů s různou teplotní expanzí, může pří působení požáru dojít k poruše celistvosti a pevnosti tohoto prvku.

Prohýbání (deformace) ocelových nosníků a sloupů nastává, při teplotách cca 500 °C. Při zvýšených teplotách dochází ke ztrátě pevnosti ocele, čím vyšší celkový tepelná expozice působí na daný prvek tím je potřeba nižší zatížení potřebné k vytvoření deformace. Deformace nosníků může být také důsledek jeho tepelné roztažnosti, pokud jsou jeho konce nepohyblivě uchyceny.

Tepelné deformaci mohou podléhat také kovové potrubní systémy a armatury, čímž může docházet k jejich uvolnění či ztrátě celistvosti. Povrchy stěn (štukové, sádrové omítky, sádrokartonové desky) mohou také podléhat v případě působení požáru tepelné roztažnosti, což se projeví jejich popraskání, oddělení od nosného povrchu či konstrukce.

Na následujícím obrázku je uvedeno praskání kompozitní desky kolem vnitřního sloupu.

Obrázek 19 Praskání kompozitní desky kolem vnitřního sloupu (Poznámka: Konstrukce nevykazovala žádné známky selhání, avšak došlo k rozsáhlému praskání kolem vnitřního sloupu. Důkazy naznačují, že k tomu došlo v závěrečných fázích chladicího procesu.), (převzato z British Steel, 1999, Figure 6.46 [18])

12 Poškození těl usmrcených osob

Tělo člověka, který byl usmrcen při požáru nebo explozi, může vykazovat charakteristické účinky, které naznačují způsob působení požáru. Stejně tak je třeba vzít v úvahu poškození oděvu či jiných doplňků (čepice, obuv aj.) usmrcených osob.

Kůže, tuk, svaly a kosti reagují při vystavení zvýšené teplotě. Dle celkové tepelné expozice působící na tělo, může mít oběť měřitelné popáleniny (I – IV) či může dojít ke kompletnímu odhoření určitých částí těla. Tyto účinky lze vyhodnocovat např. v souvislostí s polohou a orientací vůči zdroji tepla.

[18] British Steel, 1999. The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire, Swinden Technology Centre. Dostupné na https://www.steelconstruction.info/images/0/0d/The_Behaviour_of_Multi-storey_Steel_Framed_Buildings_in_fire.pdf.

Pokud dochází k působení požáru na kůži, dochází ke změně barvy (od zčervenání až po zuhelnatění) a fyzického stavu, kdy kůže se může napínat, smršťovat a roztahovat. Trhliny na kůži v důsledku expozice požáru jsou povrchové a lze je odlišit od traumatických poranění, která se deformují a vyboulí podél trajektorie rány.

Tělo samotné je významným zdrojem paliva, kdy může dojít k roztavení a odhoření tělesného tuku. Pokud se tělo nachází ve zvýšené poloze vůči požáru, například v křesle nebo na posteli, dochází k intenzivnějšímu odhoření jeho částí. Odhořívání tělesného tuku podporuje porézní materiál (tkanina, koberec, dřevo), který tak funguje na principu kontu.

13 Účinky na skle

Okenní výplně v případě požáru mohou reagovat různými způsoby. Může docházet k usazování kondenzátu kouře, může dojít k jeho popraskání v důsledku rozdílných teplot či mechanickým silám či může dojít k jeho roztavení.

Pokud je sklo vsazeno do rámu, tento rám částečně chrání okraje skla před sálavým teplem. Vzniká tak teplotní rozdíl mezi chráněnými a nechráněnými částmi, to často vede k prasklinám vycházejícím z okrajů. Tyto praskliny mohou vznikat na různých místech obvodu rámu, dále se šířit a vzájemně spojovat. Při požáru nižší intenzity nemusí dojít k úplnému vypadnutí skla z rámu.

Obecně při požáru nevzniká takový přetlak, který by sám o sobě sklo rozbil. Pokud však dojde k prudkému přetlaku (např. při deflagraci nebo detonaci), skleněné úlomky bývají rozmetány směrem ven od okenního otvoru. Naopak při porušení skla zvenčí (například násilným vniknutím, vhozením předmětu, zápalnou lahví apod.) budou úlomky nalezeny uvnitř objektu. Tyto vnitřní úlomky jsou obvykle méně pokryté sazí a kondenzátem kouře.

Tvrzené sklo, běžně používané např. v okenních výplních vozidel, sprchových koutech či komerčních objektech, se při působení vysoké teploty nebo výbuchu rozpadá na velké množství malých krychlových fragmentů.[17]

Mechanicky poškozené sklo vykazuje typický „pavučinový“ vzor trhlin. Úlomky mají ostré, nepravidelné hrany, jejich velikost závisí na směru a síle nárazu. Na hranách jsou často patrné konchoidní lomové linie – zakřivené linie vzniklé uvolněním vnitřního napětí. Tyto linie jsou na jedné straně skla orientovány přibližně kolmo k povrchu, odkud náraz přišel, a na opačné straně se začínají zakřivovat, lámou se ve směru působení síly.[19]

Sklo, která bylo poškozeno požárem má úlomky s rovnoměrnými a hladkými hranami. Toto sklo také může být v důsledku vysokých teplot deformované či zvlněné. Může také dojít k roztavení či ztrátě původního tvaru, viz následující obrázek.

[19] Icove, D. J., & Hayne, G. A., 2018. Kirk's Fire Investigation, 8th edition. Pearson. (Kapitola 7.4.5)

Obrázek 20 Na okrajích tepelně prasklého skla nejsou patrné prakticky žádné konchoidní lomové linie (převzato z Icove, 2018, Figure 7-36)[19]

Tepelná destrukce skla může být způsobena také nerovnoměrným zahříváním, které vytváří vnitřní napětí. Výsledné trhliny mají tendenci se náhodně zakřivovat, na rozdíl od přímějších lomů způsobených mechanickým poškozením. [19]

Kromě charakteru lomu lze také rozlišit, kdy bylo sklo rozbito. Například úlomky s nánosem sazí, uhlíků nebo popela na hranách nasvědčují, že sklo bylo rozbito před nebo na začátku požáru. Pokud jsou skleněné hrany čisté a leží pod spálenými troskami, lze usuzovat, že k rozbití došlo až během hašení nebo při úklidových pracích. Sklo bez sazí na kobercích, na kterém leží zuhelnatělý materiál, bývá silným důkazem dřívějšího poškození. [19]

Umístění skla na požářišti je důležité pro interpretaci a může mít důkazní hodnotu. Například sklo s relativně malým množstvím sazí nalezené na koberci v místnosti, přičemž všechny trosky způsobené požárem leží na něm, by bylo silným důkazem, že okno bylo rozbito před požárem nebo velmi brzy po jeho začátku. Sklo nalezené na povrchu trosek pravděpodobně pochází z rozbití během hašení nebo úklidových prací. [19]

Rozbití okenní výplně často nastává těsně před celkovým vzplanutím prostoru (flashover). Vypadnutí skla může umožnit přístup čerstvého vzduchu, což spouští zpětné vznícení (backdraft). Náhlé zahřátí, např. pomocí akcelerantu, může vést k prasknutí celé okenní tabule, avšak ve výsledné analýze není rozdíl mezi pomalým a rychlým nárůstem teploty snadno zjistitelný.

Při prudkém ochlazení horkého skla vodou(nebo keramických materiálů) vznikají malé trhliny označované jako „crazing“, ty mohou být rovné či půlměsícovité, a někdy neprocházejí celou tloušťkou materiálu. Laboratorní testy ukázaly, že popraskání skla (crazing), podobně jako vznik důlků (cratering -vrypy na povrchu v malých kruhových defektech), je způsobeno působením vody na okno, které je zahřáté požárem, obvykle během hašení. Úzké úlomky nebo dlouhé střepy skla naznačují, že došlo k určitému typu výbuchu. [19]

Úzké nebo dlouhé střepy mohou naznačovat výbuch, zatímco saze nebo lesklé vrstvy na skle indikují, že výbuch nastal v pozdní fázi požáru (např. smoke explosion nebo blackdraft). Úlomky odmrštěné daleko od místa okna mohou být rovněž důsledkem zásahu hasicího proudu. Absence sazí nebo jen velmi tenká vrstva svědčí o výbuchu na začátku požáru, pravděpodobně způsobeném výbušným zařízením nebo deflagrací směsi paliva a par. [19]

V malých okenních tabulích může dojít k vyskočení výplně z rámu vlivem rozdílné tepelné roztažnosti mezi jednotlivými částmi. Nepokryté úlomky bez sazí mohou být vystaveny přímému plameni nebo pocházet z vnější vrstvy dvojskla/trojskla.

Vzhled usazenin na vnitřním povrchu okenního skla má menší důkazní hodnotu, než se dříve předpokládalo. Kvůli běžnému používání syntetických materiálů v čalounění, nástěnných a podlahových krytinách již přítomnost hustých, olejovitých sazí nemůže být spolehlivým indikátorem použití ropných destilátů jako akcelerantů. Barva, hustota a přilnavost kouřových usazenin jsou spíše spojeny se stupněm ventilace požáru než s typem použitých paliv. [19]

Tavení skla, ať už je součástí okna, nábytku nebo elektrické žárovky, může být užitečné při určování směru šíření požáru. Teplo způsobuje rozpínání skla na zahřívané straně, což často vede k ohnutí okna nebo k „vydutí“ směrem ke zdroji tepla. Když sklo dosáhne teploty přibližně 750 °C, začne nejprve měknout na straně přivrácení k teplu, což způsobí jeho prověšení nebo tok tímto směrem, protože ztrácí svou strukturální pevnost. Když se žárovka zahřívá, rozpínající se plyn uvnitř vytváří přetlak, který způsobuje vydutí měknoucí části žárovky směrem k plamenům. [19]

3. ČÁST B Stopy požárů

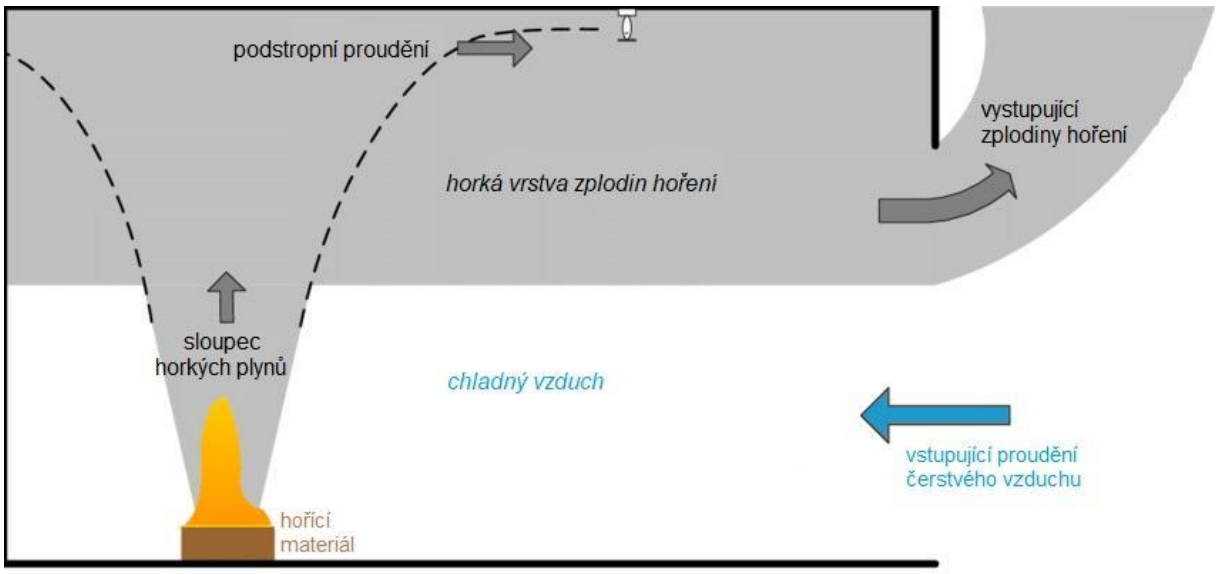
14 Vybrané druhy stop požáru podle způsobu jejich vzniku

Jak již bylo uvedeno při hodnocení stop požáru v uzavřeném prostoru je klíčové pochopit dynamiku šíření požáru a faktory, které ovlivňují jeho intenzitu a průběh. Následující podkapitoly se zaměřují na různé fáze požáru, jejich charakteristiky a vzniklé stopy.

14.1 Stopy požáru způsobené sloupcem horkých plynů

Po iniciaci požáru v uzavřeném prostoru dochází k nárůstu stále většího množství energie, viz následující obrázek. Ohraničení daného prostoru stavebními konstrukcemi nemá zpočátku znatelný vliv na vlastní požár. Požár je řízen pouze palivem a má lokální charakter. Postupně dochází ke zvyšování teploty produktů hoření a snižování jejich hustoty, což má za následek nárůst teplotní diference a vzniku vztlaku. Nad hořícím materiálem se formuje sloupec horkých plynů, který postupně stoupá až na úroveň stropu, kde se začne rozprostírat až k ohraničujícím stavebním konstrukcím. Sloupec horkých plynů je trojrozměrný, konického tvaru a stopy které vytváří představují jeho dvourozměrné řezy zobrazených na stěnách či stropech.[20]

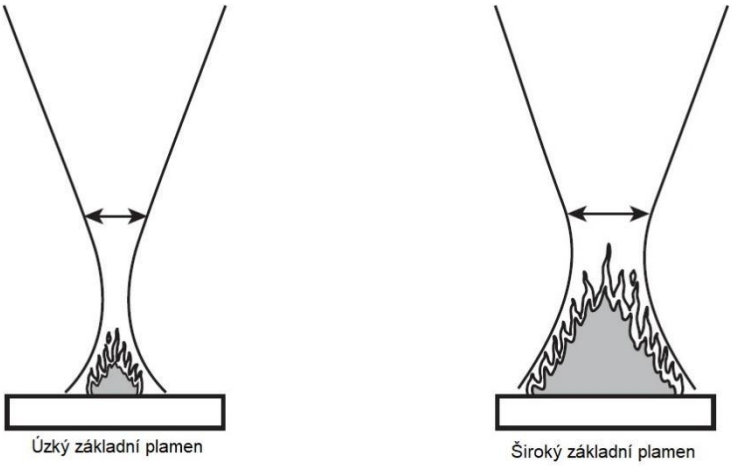
[20] Lentini, J.J., 2018. *Scientific protocols for fire investigation*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.



Obrázek 21 Dynamika požáru v uzavřeném prostoru (převzato z Lentini, 2018, Figure 3.43)[20]

Tím, jak sloupec horkých plynů stoupá směrem vzhůru, dochází ke přisávání chladného vzduch čímž teplota sloupce horkých plynů se vzrůstající výškou klesá. Proto je vytváření stop nejintenzivněji v místě, kde je povrch materiálu, na kterém jsou stopy tvořeny vystaven teplotám stejným nebo vyšším, než je teplota jeho pyrolýzy. Pokud nad vznikajícím požárem není stop a místo vzniku se nachází daleko od stěn horké plyny a kouř stoupají vertikálně, dokud se nakonec neochladí na teplotu okolního vzduchu. V tomto okamžiku se kouř a horké plyny rozvrství a rozptýlí se ve vzduchu. Toto jsou běžné podmínky pro venkovní požáry, avšak stejné podmínky mohou existovat při požáru v uzavřeném prostoru, a to ve Fázi I., počátečního vzplanutí (Incipient ignition), kdy je nízká rychlost uvolňování tepla, nebo při požárech ve velkých prostorách s vysokým stopem, např. atrium. [20]

Šířka sloupce horkých plynů se mění s velikostí základny plamene a se šířícím se požárem se bude rozšiřovat, jak zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 22 Vliv základny plamene na šířku stopy (Přeloženo z NFPA 923. Figure 6.3.19.1.3(b))[1]

Požár ve fázi I. zpravidla vytváří stopy ve tvaru obráceného kužele. Tato stopa je pozorovatelná pouze v případě, že dojde k samovolné likvidaci požáru z důvodu nedostatku kyslíku či paliva. Pokud má požár

možnost se dále šířit, dochází k Fázi II. Růst (Growth), kde se zvyšuje rychlost uvolňování tepla a výšky plamene. Stopa, kterou požár v této fázi vytváří, přechází do sloupcovitého tvaru a dále do kuželovitých tvarů V, U či tvaru přesýpacích hodin. Při přechodu požáru do Fáze III. Plně rozvinutý požár (Fully developed fire dochází k celkovému vzplanutí (Flashover) v daném prostoru a původní stopy vytvořené v okolí místa vzniku požáru mohou být pozměněny či překryty jinými výraznějšími stopami způsobenými intenzivní distribucí tepla v daném prostoru.

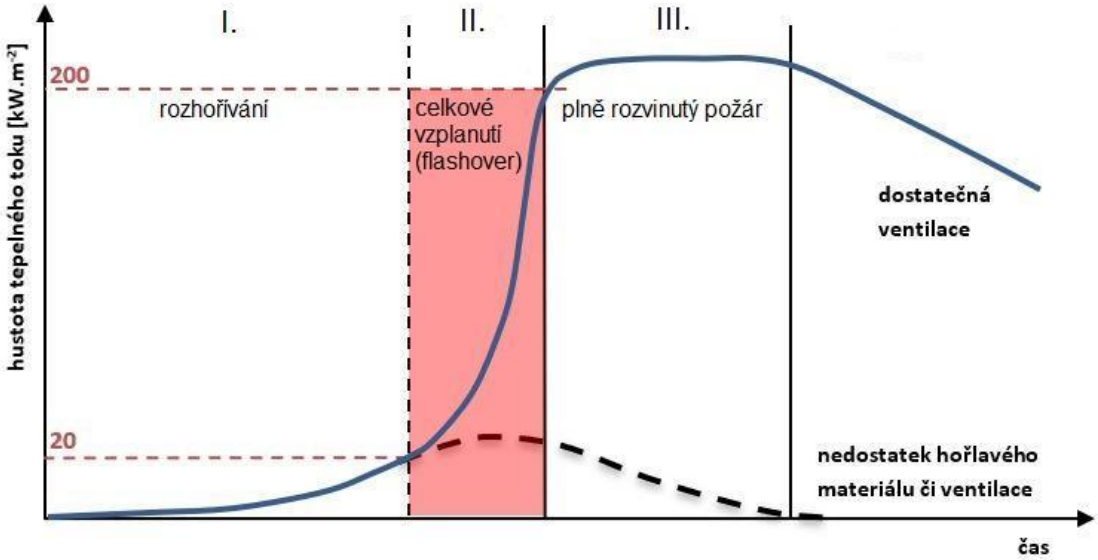
Stopy požáru způsobené sloupcem horkých plynů mohou mít nejčastěji tyto tvary:

(1) stopa ve tvaru „A“
(2) stopa ve tvaru sloupce
(3) stopa ve tvaru obráceného komolého kužele
(4) stopa ve tvaru „U“
(5) stopa ve tvaru „V“
(6) stopa kruhového či půlkruhového tvaru.

Úhel a tvar vzniklých stop závisí zejména na:

- rychlosti uvolňování tepla (HRR- heat release rate - má zásadní vliv na tvar vznikajících obrazců),
- geometrie paliva,
- ventilační účinky,
- hořlavost povrchu materiálu, na kterém stopa vzniká,
- přítomnost vodorovných konstrukcí či zařízení, jako jsou stropy, police, desky stolů nebo převislá konstrukce na vnější straně budovy.

Jednotlivé Fáze v uzavřeném prostoru jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Obrázek 23 Fáze požáru v uzavřeném prostoru[21]

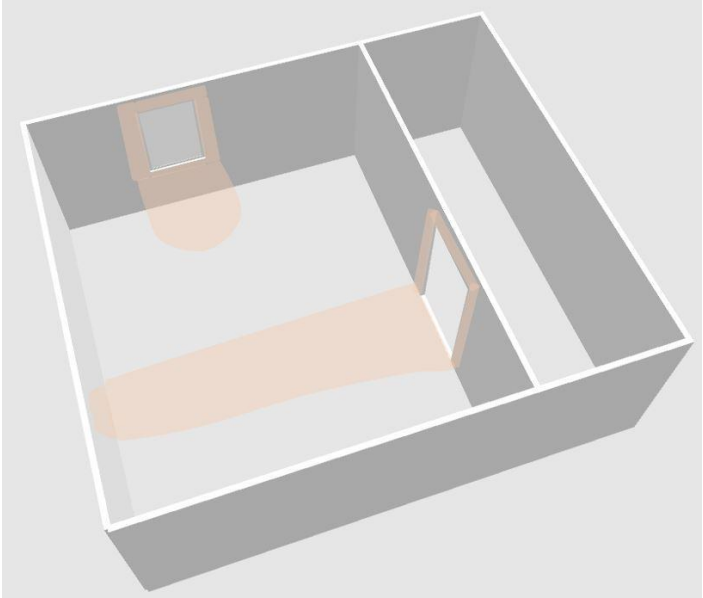
[21] V některých odborných publikací je změna také Fáze IV: Rozpad (Decay): snížený plamen a tepla, značné množství kouře, zvýšené doutnání.

14.2 Stopy požáru způsobené ventilací.

Výměna plynů při požáru stavebními otvory (okna, dveře) nebo jinými otvory v konstrukci výrazně zvyšuje rychlost proudění přes hořící materiály a požár, který má intenzitní výměnu plynů hoří s vyšší rychlostí uvolňování tepla, což může zvýšit rychlost vytváření účinků požáru jako zuhelnatění, odlupování betonu nebo deformace kovové součásti. Místo, kde došlo k intenzitním poškození požárem je indikátor vysoké rychlosti uvolňování tepla, intenzitních ventilačních účinků nebo dlouhé expozice požáru. Tyto oblasti však nutně nejsou vždy místem vzniku požáru. Může dojít například k rozšíření požáru z pomalu hořícího materiálu na rychle hořící materiál, který následně způsobí převážnou většinu poškození.

Vliv ventilace na intenzitu požáru či tvorbu stop s ohledem na dynamiku požáru v uzavřeném prostoru není nijak významný, pokud se jedná o požár řízený palivem (požár ve Fázi I. a Fázi II.). Ventilace se však stává dominantním faktorem ovlivňující intenzitu poškození požárem, pokud se jedná o požár řízený ventilací (požár ve Fázi III.). V tomto režimu je intenzita požáru až 10-ti násobná oproti jeho fázi rozhořívání a volného rozvoje.

Tato intenzita požáru není však v celém prostoru, ale pouze v oblastech, kde může vstupovat čerstvý vzduch stavebním otvorem (tzv. ventilační cestou) do uzavřeného prostoru a účastnit se tak hoření. V okolí těchto otvorů (nejčastěji dveře či okna), v prostoru před nimi a na protějších stěnách lze tak nalézt silné lokální poškození hořlavého materiálu či výrazné stopy na stavebních konstrukcí či vybavení. Tyto stopy či účinky požáru však nemusí být relevantní k místu vzniku požáru. Naopak oblastech vzdálených od ventilačního otvoru dochází ke snížení dostupného kyslíku, což v těchto místech může snížit intenzitu požáru či zastavit plamenné hoření. Příklad rozložení míst předpokládaného vzniku intenzivního poškození a ventilačních stop, viz následující obrázek.

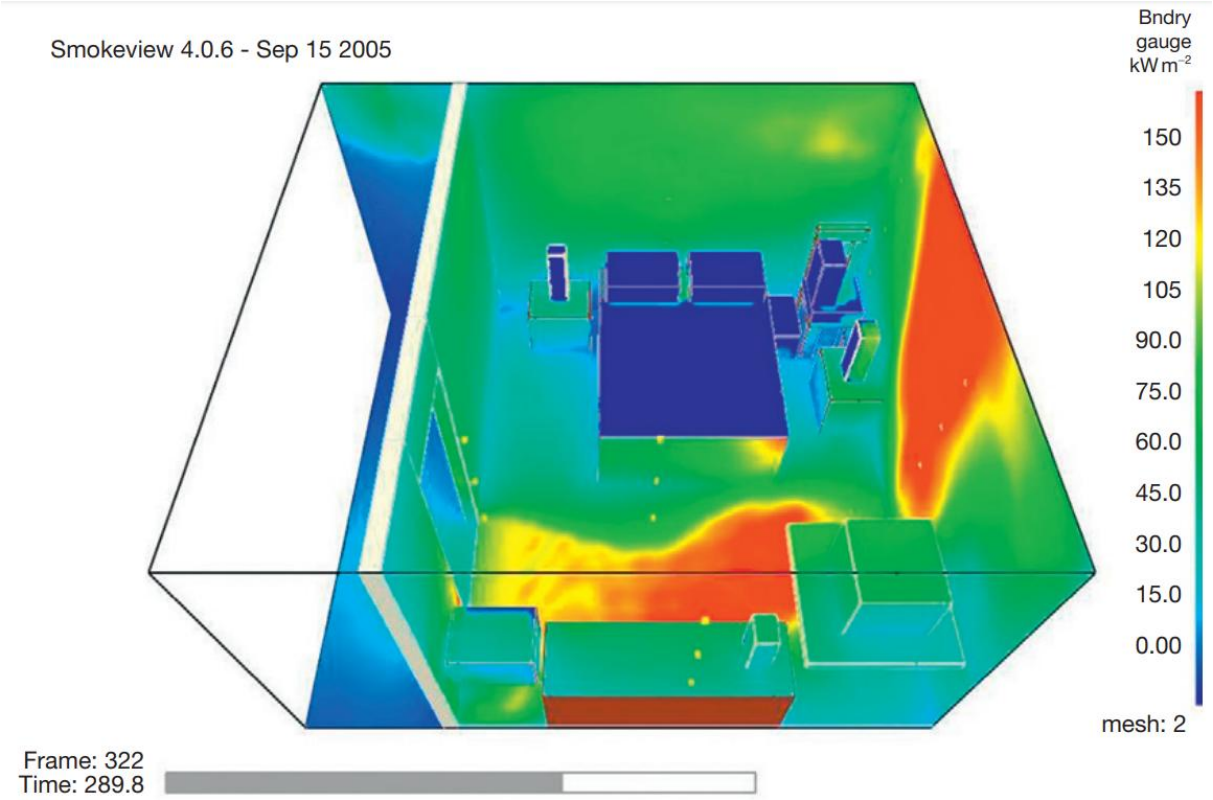


Obrázek 24 Dobře ventilovaný prostor

Pro ventilační stopy bývá charakteristické

- intenzivnějšího poškození a účinky požáru v oblasti proudění vzduchu do místnosti otevřeným stavebním otvorem;
- intenzivnějšího poškození a účinky požáru v oblasti naproti otevřeném stavením otvoru;
- intenzivnějšího poškození a účinky požáru v okolí otevřeného stavením otvoru.

Příklad výstup z modelu Fire Dynamics Simulator (FDS) znázorňující účinky ventilace je zobrazen na následujícím obrázku. Požár vznikl napravo od čela postele, modelová situace v cca 7 minutě plně rozvinutého požáru (Fáze III.) ukazuje dominantní intenzitu požáru pouze v oblasti proudícího vzduchu do prostoru otevřenými dveřmi.[22]



Obrázek 25 Výstup z modelu FDS znázorňující účinky ventilace (Převzato z Lentini,2019, Figure 3.27 [10])

Příklad fotodokumentace ventilačních stop v okolí okenního otvoru, naproti vstupních dveří. Je uveden na následujícím obrázku.

[22] Lentini, J.J., 2018. Scientific protocols for fire investigation. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. (Kapitola 3.10)

Obrázek 26 Ventilační stopa v okolí okenního otvoru, naproti vstupních dveří (Zdroj: HZS ČR)

14.3 Stopy požáru způsobené celkovým vzplanutím (flashover)

Při přechodu požáru do celkového vzplanutí (přechod z Fáze II. do Fáze III.) dochází k postupnému snižování vytvořené horké vrstvy kouře pod stropem místnosti. Sálavé a konvektivní teplo z této vrstvy kouře způsobí iniciaci přítomného hořlavého materiálu v místnosti, a to v celém půdorysu místnosti. Nejdříve budou teplem ze snižující se horké vrstvy kouře namáhané povrchy nejblíže k vrstvě kouře např. desky stolů, horní části nábytku, dveří a oken. Jakmile vrstva horkých zplodin hoření klesne na úroveň podlahy zvýší se intenzita účinků požáru v celém prostoru místnosti. Dochází k zuhelnatění i spodních částí nábytku, koberců, podlahových krytin, soklových lišt, spodních částí dveří apod. Celkové vzplanutí v místnosti může také způsobit vypálení děr v podlahových krytinách. Poškození a účinky požáru se po celkovém vzplanutí (ve Fázi III.) vytvářejí násobnou rychlostí než v počáteční fázi požáru. Příklad rozvoj požáru v uzavřeném prostoru je znázorněn na následujícím obrázku. [20]

Obrázek 27 Rozvoj požáru v uzavřeném prostoru (Převzato z Bengtsson et al.*, 2005, Figure 61* [23]*)*

14.4 Stopy požáru způsobené hašením

Voda nebo jiné hasební činidlo používané pro likvidaci požáru je schopno vytvářet či měnit stopy požáru. Hasební zásah může změnit šíření požáru a ovlivnit tak průběh požáru. V místech, kde jsou nasazeny hasební proudy tak šíření požáru je zpomaleno či zcela zastaveno, v místech, kde není fronta hašení se požár může dále šířit. Nasazení vodních proudů, např. kompaktních, vysokotlakých či speciální např. CCS Cobra může svojí kinetikou vytvářet stopy na stěnách či zařízeních. Tyto stopy se zpravidla nacházejí na stěnách či v okolí vstupních dveří či okna kudy je veden hasební zásah do zasažené místnosti. Nasazení vodních proudů, zejména kompaktních může také způsobit destrukci stavebních konstrukcí. Při použití přetlakové ventilace může také dojít k narušení přirozené výměny plynů, což může pozměnit velikost či polohu vytvářených stop. V rámci šetření požáru je tak vhodné zjistit, jakým způsobem a jakými prostředky byl veden hasební zásah. Případy stop požáru způsobené hašením jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

[23] Bengtsson, L.-G. *et al.* (2005) *Enclosure fires*. Karlstad: Swedish Rescue Services Agency.

Obrázek 28 Stopy na stěně způsobené vysokotlakým proudem CCS Cobra (Zdroj: HZS ČR)

Obrázek 29 Stopa na elektrickém zařízení (měnič FVE) způsobená vysokotlakým proudem CCS Cobra (Zdroj: HZS ČR)

Obrázek 30 Stopy na komínovém tělese způsobené vysokotlakým proudem CCS Cobra (Zdroj: HZS ČR)

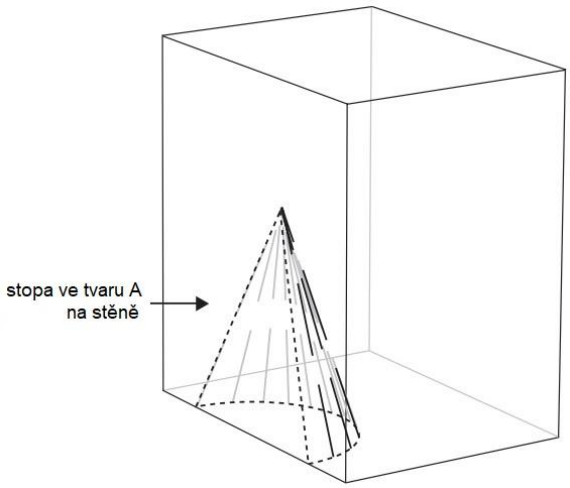
15 Tvar stopy požáru vzniklé sloupcem horkých zplodin hoření

Existují základní identifikovatelné tvary stop požáru, který vznikají v počáteční fázi požáru v okolí místa vzniku požáru. Je třeba mít však ale na paměti, že dynamika požáru v uzavřeném prostoru má mnoho proměnných faktorů, které mají vliv na způsob vytváření a zejména tvar stop požáru, nemusí být tyto tvary stop vždy identifikovatelné u každého požáru. Tvar stopy může být od základního tvaru částečně odlišný či může být vytvořen zcela jiný tvar.

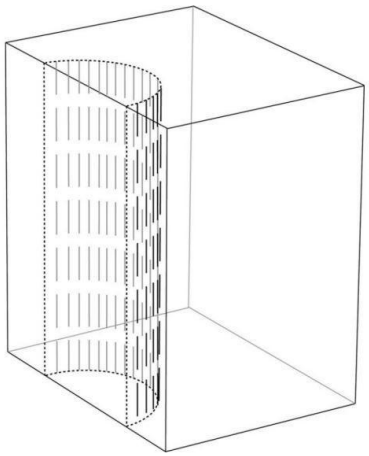
15.1 Stopa požáru ve tvaru písmene A

Pokud vznikající požár nemá dostatečnou rychlost uvolňování tepla (HRR), jeho plameny tak nedosahují ke stropu. Takový to požár může vytvořit v místě vzniku požáru stopu, jejíž ohraničující linie převezmou tvar vznikajícího plamenného hoření, tj. tvar písmene A, viz následující obrázek. [24]

[24] Lentini, J.J., 2018. Scientific protocols for fire investigation. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.(Kapitola 3.9)



Pokud požár dále roste dochází ke změně tvaru z písmene A do sloupcovitého tvaru. Tento tvar má velmi krátkou životnost, protože jakmile se plameny dotknou vodorovných konstrukcí začíná se formovat kónický tvar viz následující obrázek. [24]

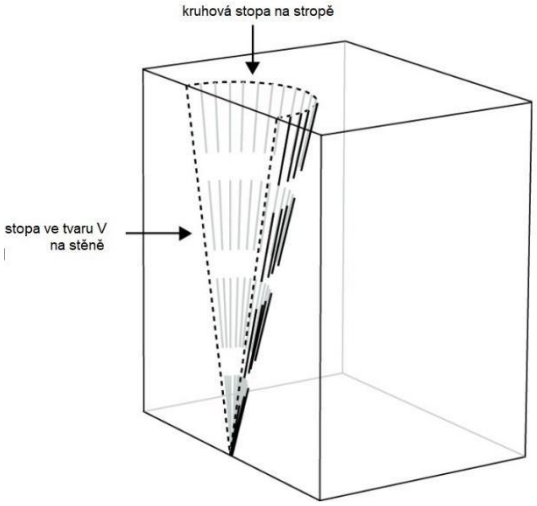


Obrázek 32 Průsečík sloupcovitého požáru s přilehlou stěnou (Převzato z Lentini,2019, Figure 3.18) [24]

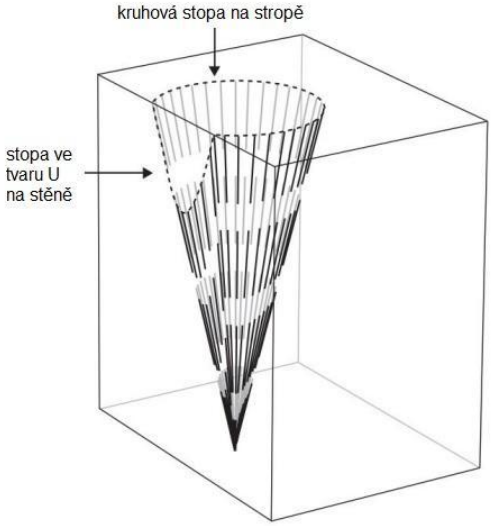
15.2 Stopa požáru ve tvaru obráceného komolého kužele, kónická stopa

Tato stopa vzniká, pokud má požár již dostatečné HRR na to, aby plamenné hoření dosáhlo stopní konstrukce či jiného vodorovného povrchu. Kuželovitá stopa vzniká, když je stoupající sloupec horkých plynů narazí na vodorovnou konstrukci (strop). Tento vodorovný povrch pak mění vztlakové proudění sloupce horkých plynů na horizontální podstropní proudění a pod stropem se vytváří horká vrstva zplodin hoření, která se začíná zvětšovat směrem dolů k podlaze. Toto způsobí, že se tato stopa horizontálně rozšiřuje v horních úrovních a způsobuje poškození protínajících se povrchů. [24]

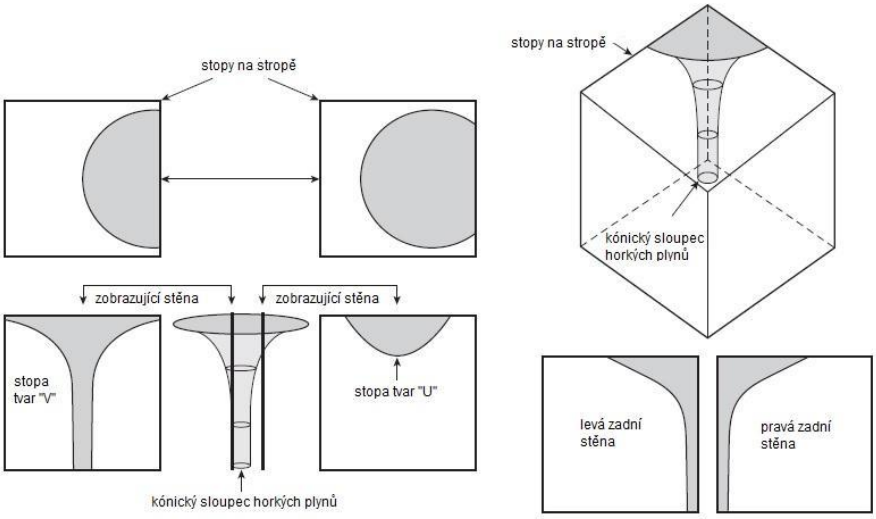
Na svislém povrchu (tj. stěnách) se tak vytvoří obrazec který odpovídá přibližně tvaru průmětem řezu obráceného komolého kužele jeho modifikací např. písmene V, obrazce trychtýře, přesýpacích hodin či dalšího kónického tvaru. Pokud je zdroj hoření ve větší vzdálenosti od svislého povrchu, tvoří se stopa ve tvaru U. Na vodorovném povrchu (nejčastěji stropě) dochází k formování stopy ve tvaru kruhu či půlkruhu. Příklady jsou uvedeny na obrázcích níže.



Obrázek 33 Průsečík stopy vytvořené sloupcem horkých zplodin hoření s přilehlou stěnou a stropem (Přeloženo z Lentini,2019, Figure 3.19) [24]



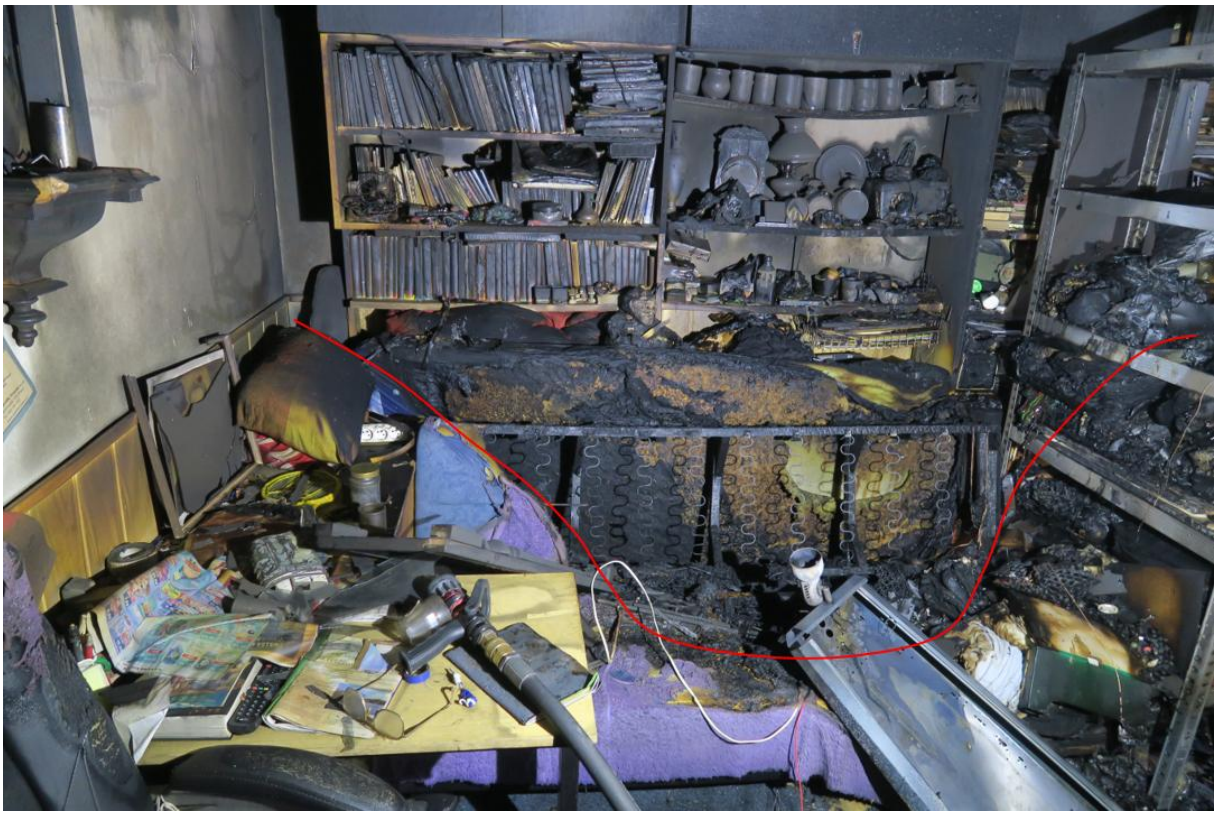
Obrázek 34 Průsečík sloupce horkých zplodin hoření vznikající v určité vzdálenosti od stěny (Přeloženo z Lentini,2019, Figure 3.20) [24]



Obrázek 35 Zjednodušený způsob vytváření stop sloupcem horkých zplodin hoření na stěnách a stopu (Přeloženo z NFPA 923. Figure 6.3.20.6 (a))[1]

Obrázek 36 Stopa vzniklá horkým sloupcem zplodin hoření (Zdroj: HZS ČR)

Obrázek 37 Stopa vzniklá horkým sloupcem zplodin hoření (Zdroj: HZS ČR)



Obrázek 38 Stopa vzniklá horkých sloupcem zplodin hoření (Zdroj: HZS ČR)

16 Nepravidelné stopy požáru

Nepravidelné vzory jsou běžné po celkovém vzplanutí, při uhašení požáru po delší době nebo při zřícen budovy. Tyto stopy mohou být důsledkem účinků horkých plynů, hořících a doutnajících úlomků, odkapávání roztavených plastů nebo přítomností hořlavých kapalin.

Nepravidelné, zakřivené nebo „hluboké“ stopy na podlahách či podlahových krytinách by neměly být vždy automaticky identifikovány jako důsledek hořlavých kapalin pouze na vzhledu a tvaru stopy (viz následující obrázek). Obdobné stopy mohou vznikat při celkovém vzplanutí v místnosti, a to zejména v dobře ventilovaných oblastech před otevřenými dveřmi nebo v případě odkapávacích plastů či odpadávání hořících úlomků. Pokud je podezření na použití hořlavé kapaliny, je potřeba její přítomnost ve stopě potvrdit/vyloučit použitím služebního psa či detekčního přístroje a následným chemickým rozborem v laboratoři. Při případném odběru stopy pro chemický rozbor je potřeba také mimo požárem zasaženou část odebrat i stopu s požárem nezasažené části podlahové krytiny pro další případné srovnání v laboratoři.

Obrázek 39 nepravidelné stopy na podlaze po iniciaci nalité hořlavé kapaliny (Zdroj: HZS ČR)

17 Stopy požáru na podlaze

Velmi často bývá užitečné zbavit podlahu nečistot, suti či jiného nahromaděného materiálu, aby bylo možné prozkoumat poškození na úrovni podlahy. Na podlaze se mohou nacházel rozsáhlé poškozené plochy s ostře ohraničenými oblastmi nízkého či žádné poškození požárem. To může naznačovat přítomnost nábytku či jiných věcí situovaných v místnosti. Naopak intenzivní poškození podlahy může naznačovat působení požáru v jeho počáteční fázi v úrovni podlahy v době, kdy podlaha nebyla pokryta napadaným materiálem (omítka, krytina, vybavení aj.).

Podlaha může být poškozena také v rámci přechodu požáru do jeho II fáze, kdy dochází k celkovému vzplanutí. Pokud je požár uhašené v této fázi, může být poškození podlahy relativně stejnoměrné, protože

vliv ventilace není nijak markantní. Pokud je však požár uhašen po jeho přechodu do Fáze III, lze předpokládat intenzitní poškození podlahy v dobře ventilovaných oblastech (před otevřenými dveřmi). [24]

Stopy požáru na odkryté podlaze, šipka naznačuje směr šíření požáru na základě hmotnostního úbytku (odhoření) prkenné podlahy je zobrazeno na následujícím obrázku.

*Obrázek 40 Stopy požáru na odkryté podlaze (*Zdroj: HZS ČR)

18 Stopy požáru po iniciaci plynu či výparů hořlavých kapalin

Je-li prvotně iniciována difúzní směs paliva a vzduchu, oblast nejsilnějších účinků požáru nemusí být nutně v místě, kde tato plynná směs byla iniciována. Nejsilnější účinky jsou tak v místech, kde hořící plynná směs dále iniciovala na sekundární požární zatížení. Dynamika požáru se bude následně odvíjet od parametrů (množství, HRR) a polohy sekundárně iniciovaného paliva (viz následující obrázek). Proto je vhodné v těchto případech určovat místo vzniku požáru zejména na přesných svědectvích a analýzou potenciálních zdrojů iniciace v místech, kde mohlo docházet k vývinu či úniku plynů či výparů. [24]

Obrázek 41 Sekundární iniciace hořlavého materiálu po explozivním hoření plynu v bytě (Zdroj: HZS ČR)

19 Seznam literatury

ASTM E3. (2018). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International.

British Steel, 1999. The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire, Swinden Technology Centre. Dostupné na https://www.steelconstruction.info/images/0/0d/The_Behaviour_of_Multi-storey_Steel_Framed_Buildings_in_fire.pdf.

Casaroli, A., Boniardi, M., Gerosa, R. et al., 2022. Metallurgical Analysis as a Useful Method for Fire Investigation: the Case of Galvanized Steel Sheets. Fire Technol 58, 553–570. https://doi.org/10.1007/s10694-021-01158-2

Icove, D. J., & Hayne, G. A., 2018. Kirk's Fire Investigation, 8th edition. Pearson.(Kapitola Melting Points of Materials)

Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. ISRN Civil Engineering, 2014, 1-15. https://doi.org/10.1155/2014/468510.

Kopecký, S., Řepík, J. & Škoda, J. (2018) Lokalizace kriminalistického ohniska pomocí metody měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek. TZB-info, 29. ledna 2018. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/16873-lokalizace-kriminalistickeho-ohniska-pomoci-metody-mereni-hloubky-kalcinace-sadrokartonovych-desek.

Lentini, J.J., 2018. Scientific protocols for fire investigation. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Maraveas, C., Fasoulakis, Z. and Tsavdaridis, K.D., 2017. Post-fire assessment and reinstatement of steel structures. Journal of structural fire engineering, 8(2), pp.181-201.

McParland, L. C., Collinson, M. E., Scott, A. C., & Campbell, G. (2009). The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. Archaeological and Anthropological Sciences, 1(4). https://doi.org/10.1007/s12520-009-0018-z

National Fire Protection Association. Technical Committee on Fire Investigations, 2021. NFPA 921, Guide for fire and explosion investigations. National Fire Protection Association.

Peatross, M. J. and Beyler, C. L. (1997). Ventilation effects on compartment fire characterization. Fire Safety Science, 5, 403-414. https://doi.org/10.3801/iafss.fss.5-403.

Rada Václav, 2012. Ocelové konstrukce po požáru. České vysoké učení technické v Praze.

Sanža Šafránek, O., 2015. Stopy šíření požáru na karoseriích a konstrukčních dílech dopravních prostředků. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství.

Tran, H.C. and White, R.H., 1992. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. Fire and Materials, 16(4), pp.197–206. doi:10.1002/fam.810160406.

Wang Y.C., 2002. Steel and Composite Structures, Behaviour and Design for Fire Safety, Spon Press, London 2002, ISBN 0-415-24436-6.

White, R. H. and Dietenberger, M. A. (2001). Wood products: thermal degradation and fire. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 9712-9716. https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01763-0

Žajdlík, T. and Šuhajda, K. (2022). Experimentální test požární odolnosti dřevěné konstrukce. Juniorstav, 55-59. https://doi.org/10.13164/juniorstav.2022.55.