



# PRODUKTY HOŘENÍ A JEJICH ZPLODINY

Doc. Ing. Václav Kupilík, CSc. (PKPO)

## 1. Úvod

Proces hoření je složitý děj, jehož průběh je závislý na mnoha faktorech, především na teplotě a množství kyslíku v ovzduší. V každém případě to záleží na podmínkách spalování, a to: teplotě hoření, obsahu kyslíku, velikosti spalovaných částic – měrnému povrchu atd. V průběhu spalování dochází nejprve k tepelnému rozkladu, tzv. pyrolyse, přičemž se uvolňují hořlavé plyny, které se dále spalují. Konečnými produkty spalování mohou být např. u polyethylenu (PE), polypropylenu (PP) nebo polyethylenglykol-tereftalátu (PET) oxid uhličitý a voda. U polyvinylchloridu (PVC), stejně jako u chlorovaných organických sloučenin obecně, vzniká kromě toho vždy ještě chlorovodík a větší nebo menší počet polychlorovaných sloučenin.

Tím, že PVC obsahuje v molekule chlor, při jeho spalování vznikají toxické zplodiny. Hlavními produkty „dokonalého spalování“ (při nelimitujícím přístupu kyslíku) jsou oxid uhličitý, voda a chlorovodík. To by nebyl však závažný problém, poněvadž silně kyselý chlorovodík lze ze spalin poměrně jednoduše odstranit. Horší je přítomnost vedlejších produktů, k nimž patří již zmíněné vysoce toxické polychlorované dibenzofurany (DBF) a dibenzodioxiny (DBD). Hoření plastů na vzduchu je vždy provázeno také tvorbou oxidu dusnatého a dusičitého.

Ve skutečnosti vznikají kromě konečných produktů dokonalého spalování také produkty spalování nedokonalého, k nimž patří saze a oxid uhelnatý. Jedna z příčin štiplavého zápachu kouře je látka silně dráždivá akrolein a oxid uhelnatý známý jako „krevní jed“, jehož nebezpečí spočívá v jeho schopnosti vázat se na červené krvinky (hemoglobin). Saze bývají považovány za formu uhlíku, ale ve skutečnosti obsahují značná množství kondenzovaných aromatických uhlovodíků, z nichž mnohé jsou karcinogenní. V závislosti na jejich dávce nejsou akutně toxické, ale mohou způsobit při dlouhodobé expozici vážné poškození zdraví.

## 2. Produkty hoření

Každý materiál prochází při hoření chemickými změnami. Při požáru vznikají tyto základní produkty: teplo, světlo, kouř, hořlavé nespálené plyny a nespálený tuhý zbytek (popel).

Teplo je produktem hoření a intenzita jeho vývinu závisí na velikosti plamenů. Je často hlavní příčinou dalšího vznícení látek, popálení osob, dehydratace zasahujících hasičů a poranění dýchacích cest. Plamen jsou hořící plyny a páry. Při správné koncentraci kyslíku jsou plameny velmi horké a méně svítivé. Snížení svítivosti plamene je zapříčiněno větším uvolňováním uhlíku. Plamen se objevuje při každém typu hoření s výjimkou žhnutí. Podle barvy plamene lze v některých případech určit hořící látku.

Hoření je proces, při kterém dochází k uvolňování energie, tepelného nebo jiného záření. Nemusí jít vždy o slučování (oxidaci), ale může jít i o rozkladnou reakci (výbuch, tlení, tepelný rozklad). S kouřem se lze setkat u všech požárů i když některé materiály vyvíjejí při svém hoření více nebo méně množství kouře. Účinky kouře mohou být smrtelné nebo přinejmenším nebezpečné lidskému životu jako oheň sám.

Kouř nad ohněm je složen zpravidla ze 3 částí:

- a) horké páry a plyny z hořících materiálů
- b) nespálené rozložené materiály
- c) množství vzduchu, který byl pohlcen dýmem a plyny

Rychlost, kterou je kouř produkován, je určena těmito faktory:

- a) obvod požáru
- b) kalorický výkon požáru
- c) efektivní výška sloupce spalin nad ohněm

### 3. Zdravotní ohrožení ze zplodin hoření

Zdravotní ohrožení může být způsobeno:

#### 1) z nedostatku kyslíku:

Množství kyslíku ve vzduchu vyvolává problémy uvedené v této tabulce

| Množství O <sub>2</sub> [%] | Zdravotní problémy                                      |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| 21                          | Žádné problémy – normální podmínky                      |
| 17                          | Zhoršená koordinace svalové činnosti, zrychlené dýchání |
| 12                          | Bolesti hlavy, závratě, rychlá únava (malátnost)        |
| 9                           | Bezvědomí                                               |
| 6                           | Smrt po několika minutách                               |

#### 2) ze zvýšené teploty prostředí:

Vdechnutí horkých zplodin hoření může poškodit dýchací cesty, přičemž je-li horký vzduch navíc nasycen vodní parou, poškození dýchacích cest je výraznější. Důsledkem vdechnutí vzduchu o teplotě cca 50°C může mít vážné snížení krevního tlaku a selhání oběhového systému, edém (otok) plic, který v nejhorším případě končí smrtí následkem, udušení.

#### 3) z kouře:

Kouř u požáru je směs částic uhlíku, dehtu, prachu, hořlavých plynů a par. Některé částičky kouře při vdechování dráždí dýchací cesty, jiné podporují vznik rakoviny nebo mohou mít i smrtelné účinky. Hloubka vdechnutí takových částiček závisí na velikosti dané částice. V neposlední řadě je třeba si uvědomit, že úměrně s množstvím uvolňovaného kouře se snižuje viditelnost v místě zásahu a je velmi ztížena i orientace v neznámém prostředí.

#### 4) z toxicity vznikajících plynů a par:

Společný účinek těchto látek je synergický, což znamená, že celková toxicita celého souboru látek je větší než pouhé sečtení jednotlivých látek na lidský organismus. Toxické plyny mají několik škodlivých účinků. Některé působí přímo na plíce a způsobují jejich otok (např. HCl, SO<sub>2</sub>, HCN atd.), další se spojují s červenými krvinkami a snižují schopnost krve přenášet kyslík (např. CO), kdy výsledkem ovšem vždy může být udušení člověka. K nejčastějším toxickým plynům u požárů patří oxid uhličitý CO<sub>2</sub>, oxid uhelnatý CO, nitrozní plyny (NO<sub>x</sub>), chlorovodík (HCl), kyanovodík (HCN) a fosgen (COCl<sub>2</sub>).

## 5) účinky zplodin hoření na lidský organismus:

### Oxidy uhlíku:

Oxid uhelnatý je lehčí než vzduch, bez barvy a zápachu a vzniká při každém hoření. Jeho hlavní nebezpečí spočívá v jeho schopnosti vázat se na hemoglobin (červené krvinky), na který se za normálních okolností váží molekuly vzdušného kyslíku přenášené krví do celého těla. Je prokázáno, že koncentrace CO ve vzduchu nad 0,05 % může již být nebezpečná a nad 1 % může dojít k bezvědomí nebo smrti postižených bez jakýchkoli předchozích příznaků nevolnosti. CO<sub>2</sub> je bezbarvý nehořlavý plyn. Vzduch normálně obsahuje cca 0,03 % CO<sub>2</sub>, kdy jako produkt látkové výměny je odstraňován z plic člověka dýcháním. Při cca koncentraci CO<sub>2</sub> ve vzduchu dochází ke zrychlenému dýchání doprovázenému bolestmi hlavy. Závratěmi, pocením a rozrušením. Mezi 10 až 12 % CO<sub>2</sub> ve vzduchu může dojít během několika minut ke smrti postiženého následkem ochrnutí dýchacího centra mozku.

### Chlorovodík:

Chlorovodík je bezbarvý plyn, který po rozpuštění ve vodě reaguje silně kyselé a je označován jako kyselina chlorovodíková HCl (z 1 kg PVC se uvolní až 400 l HCl). Ta poškozuje sliznice (poleptání) a od 2 kg.m<sup>-3</sup> může způsobit smrt. Při použití vody či vodní mlhy tak může vzniknout překvapivě silná kyselina chlorovodíková se silnými korozivními účinky na veškerý používaný materiál a samozřejmě i na organismus zasahujících hasičů.

### Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>:

Pod pojmem oxidy dusíku NO<sub>x</sub> se rozumí nejčastěji oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO<sub>2</sub>. Oxidy dusíku se tvoří při spalování paliv a dalších chemických procesech. Při něm se tvoří především NO, který při ochlazení se rychle oxiduje na NO<sub>2</sub> a s vodní parou se mění na HNO<sub>3</sub> a HNO<sub>2</sub>.

### Kyanovodík HCN:

Jde o bezbarvý plyn lehčí než vzduch s hořko mandlovým zápachem způsobující tkáňové dušení (tzv. inhalační jed). Vstřebává se plicemi i kůží, přičemž toto vstřebávání je tím rychlejší, čím je kůže teplejší a vlhčí. Organismus reaguje na přítomnost HCN zvýšením srdeční frekvence až na 100 tepů za minutu. Koncentrace 135 ppm vyvolává smrt postiženého do 30 minut, při koncentraci 270 ppm nastává smrt okamžitě. Vzniká při tepelném rozkladu plastů - polyamidů, polyuretanů, polyakrylátů, styrénu, močovinoformaldehydových pryskyřic, umakartu, vlny, hedvábí, lepidel, laků, při požárech automobilů a letadel i při každém bytovém požáru.

### Fosgen COCl<sub>2</sub>:

Fosgen se vyskytuje jako bezbarvý plyn, jehož vdechování způsobuje dušení. Za hlavní příčinu toxického účinku je považován jeho proces hydrolýzy, kde ve styku s vlhkostí sliznic se rozkládá na CO<sub>2</sub> a HCl. Při vdechnutí do plic dochází k poškození a vzniku plicního otoku (edému) a kardiovaskulárního selhání s následkem smrti. Význam fosgenu jako bojové otravné látky již dnes není příliš aktuální.

## 4. Vliv ohně na materiály

### 1) Dřevo

U přírodního materiálu dřeva hoří produkty tepelného rozkladu - dřevoplyn. Při teplotách do 200°C se ze dřeva o hustotě cca 425°C uvolňuje vodní pára, od 280°C se uvolňují hořlavé produkty. Rychlost, jakou dřevo odhořívá, závisí na sálající intenzitě. Rozklad postupuje od povrchu, na němž se tvoří dřevěné uhlí při teplotě 400 - 500°C. To zahřívá přilehlou vrstvu dřeva, takže funguje jako tepelná izolace přispívající ke zpomalování hoření dřeva. Uvnitř dřevěných nosníků se nachází nepoškozené dřevo mající únosnost, kterou dřevo ztratí

až po postupu pyrolýzy do spodnějších struktur dřeva. Pokud je dřevěná konstrukce lepená, je pro hoření rozhodující typ lepidla a zejména vrstva lepidla vystavená přímému styku se žářem.

## **2) Beton:**

Pro beton je rozhodující obsah vlhkosti, cementu, druh kameniva, zatížení a nashromážděné procento tepla. Pevnost v tlaku vydrží obvykle až do teploty 200°C, nepatrné zmenšení je patrné přibližně při cca 500°C. Teplota 600°C není v betonu často dosažena ani ve velkém ohni, a proto beton udržuje svou stavební celistvost i po dlouhém jeho působení. Je-li beton vystaven ohni, snese nevratnou změnu barvy. Během požáru je náchylný ke drolení a to tehdy, když kus nebo vrstva betonu praskne a zlomí. Drolení může být způsobeno pomocí následujících faktorů uvnitř materiálu:

- nadměrný tlak,
- vysokotlaké páry,
- štěpení kameniva

Extrémně vysoké teploty ve srovnání s relativně chladnými teplotami způsobují drolení na hloubku cca 50 mm.

## **3) Ocel:**

Ocel velmi rychle vede teplo a tím materiál je značně oslaben, když je vystaven vysoké teplotě. Vysokopevnostní a tepelně zpracované slitiny ztrácí pevnost mnohem rychleji než měkká ocel při zvýšení teploty. Naopak, opři ochlazení měkká ocel brzy znovu získá původní pevnost. Vysokopevnostní a tepelně zpracovaná slitina je nastalo oslabená při teplotách okolo 300 - 400°C. Toto tepelné zpracování a zvyšování pevnosti může způsobit například křehkost, což je obvykle nežádoucí pro konstrukční navrhování. Měkká ocel vykazuje limitní teplotu 550°C, ocel tažená za studena běžně používaná jako předpínací výztuž do předpjatého betonu rychle ztrácí pevnost při teplotách okolo 400°C. Je důležité poznamenat, že jednou zahřátá ocel tažená za studena znovu nezíská po ochlazení původní pevnost.

Protože charakteristiky a pevnost oceli jsou velmi proměnlivé při požáru, musí být konstrukční ocel chráněna proti vysokým teplotám při požáru těmito způsoby:

- a) obalení konstrukční oceli izolantem
- b) užití vody pro ochlazování konstrukční oceli
- c) aplikace protipožárního nátěru

## **4) Plasty a polymery:**

Požárně nebezpečné vlastnosti plastů jsou charakterizovány:

- hořlavostí,
- intenzitou hoření,
- vznícením a vzplanutím,
- teplotou zápalnosti,
- výhřevností,
- dýmotvornou schopností,
- náchylností k tepelnému rozkladu - toxickými produkty

Plasty se rozdělují na 3 hlavní typy:

- 1) termoplasty (plastomery) -- makromolekulární látky, které se zahřátím stávají plastickými a dají se libovolně tvarovat (PE, PP, PS, PA, PVC, PMMA a další),
- 2) reaktoplasty (termosety, duromery) - makromolekulární látky teplem tvrditelné; vlivem tepla při tvarování se mění jejich struktura - dochází k vytvrzování a novým zahřátím je není možno uvést do plastického stavu (PF - fenolformaldehydové pryskyřice, UF - močovinoformaldehydové pryskyřice atd.),
- 3) elastomery (elasty) - makromolekulární látky s elastickými vlastnostmi, které nelze zahřátím tvarovat (přírodní či butadienový kaučuk apod.).

Hořlavost plastů je největší, když jejich makromolekuly sestávají pouze z atomů uhlíku a vodíku. Termoplasty rychle ztrácí mechanickou pevnost, při žáru fyzický tvar a rychle se z nich stává roztavený materiál. Důležitým faktorem ovlivňujícím rychlost rozkladů a hoření plastů je jejich součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Čím je menší, tím více se koncentruje přiváděná tepelná energie v jednom místě, odkud je shromážděnou energií silně zahřívána a vytváří značné množství hořlavých plynů a par, které rychle dosáhnou spodní koncentrační hranice zapálení a hmota může značně hořet. Naproti tomu plasty s vyšší součinitelem  $\lambda$  (např. silikony) jsou hůře zapalitelné.

Hořlavost plastů značně ovlivňují změkčovadla a plniva. anorganická plniva hořlavost snižují (křemičitý skelný prášek, jílovitá zrna atd.) hořlavost snižují, kdežto plniva organického původu (papírový či textilní odpad) ji naopak zvyšují. Výrobky z většiny plastů se deformují za poměrně nízkých teplot - kolem 200 až 250°C.

## 5) Sádra:

Sádra se vyrábí vypalováním sádrovce, což je síran vápenatý s krystalickou z vodou  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . Na této bázi jsou doposud vyráběny 3 základní typy:

- a) opláštěné sádrokartony s jádrem s možností vyztužování skleněnými nebo minerálními vlákny,
- b) sádrovláknité desky:
  - b<sub>1</sub>) sendvičové konstrukce, kde pláštěm místo kartonu je skleněná rohož nebo tkanina - např. Fireboard,
  - b<sub>2</sub>) homogenní sádrové desky vyztužené delšími (např. celulóзовými vlákny v celém průřezu, avšak bez opláštění - např. Fermacell,
- c) plné sádrové dílce pro nenosné příčky.

Z hlediska požární odolnosti je [sádrokarton](#) obecně velmi výkonný materiál. To je způsobeno krystalicky vázanou vodou ve hmotě sádrového jádra desek, která při požáru funguje jako automatický hasicí přístroj. Z každého metru čtverečního sádrokartonu se během požáru uvolní přibližně 1,5 litru vody, která je po jistou dobu schopna zpomalit rozvoj požáru.

## 5. Závěr:

***S narůstajícím počtem požárů je třeba si uvědomit nejen vlastnosti nejčastěji používaných materiálů, ale i jejich riziko při jejich rozkladu, se kterým se hasiči setkávají při likvidaci požárů.***