

# **Nauka o materiálu**

Bohdan Filipi

Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství  
se sídlem VŠB – Technická univerzita Ostrava

# **Nauka o materiálu**

Ing. Bohdan Filipi, Ph.D.

Učební texty pro posluchače Fakulty bezpečnostního inženýrství  
© Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2003

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hoření materiálů</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Hořlavá hmota</b>	<b>2</b>
2.1.1	Chemické složení	2
2.1.2	Prostorové parametry hmoty	11
2.1.3	Tepelné vlastnosti hořlavých hmot	11
<b>2.2</b>	<b>Zdroje zapálení</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Oxidační prostředí</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>Laboratorní zkoušky tuhých hořlavých materiálů</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Stanovení zapalitelnosti</b>	<b>23</b>
3.1.1	Setchkinův test - ČSN 64 0149	23
3.1.2	Metoda ISO 5657	25
3.1.3	Kyslíkové číslo (Oxygen Index Test)	26
<b>3.2</b>	<b>Stanovení hořlavosti na základě šíření plamene</b>	<b>27</b>
3.2.1	ČSN 64 0757 - Test hořlavosti fólií	28
3.2.2	ČSN 80 0824 - Test hořlavosti textilních materiálů	29
3.2.3	ČSN 73 0863 - Šíření plamene po povrchu stavebních hmot	30
3.2.4	ČSN 64 7464 - Hořlavost lehčených hmot	32
3.2.5	IEC 60695 - část 10-11: Zkoušky plamenem - metoda horizontální a vertikální zkoušky plamenem 50 W	33
3.2.6	ISO 5658-2 - „IMO test“	34
3.2.7	Test radiačním panelem pro podlahové krytiny - ISO 9239	35
3.2.8	Dvoustopový tunelový test - ASTM D3806	37
<b>3.3</b>	<b>Hodnocení hořlavosti materiálů na základě vývoje tepla</b>	<b>38</b>
3.3.1	ČSN 44 1352 - Kyslíkový kalorimetr	39
3.3.2	Požární výhřevnost	42
3.3.3	ČSN 73 0862 - Hořlavost stavebních hmot	48
3.3.3.1	ČSN 73 0862 změna B	53
3.3.4	ČSN 73 0861 - Stanovení nehořlavosti stavebních hmot	55
3.3.5	Kónický kalorimetr	56
3.3.6	Spalovací mikrokalorimetr	63
3.3.7	Jednoduchý test pro stanovení rychlosti uvolňování tepla	64
<b>4</b>	<b>Kouř</b>	<b>65</b>
<b>4.1</b>	<b>Stanovení optické hustoty kouře</b>	<b>68</b>
4.1.1	ČSN 64 0150 - Stanovení optické hustoty kouře	71
4.1.2	Jednokomorový test ČSN EN ISO 5659-2	72
4.1.3	Dvoukomorový test - ISO 5924	72
4.1.4	Další metody pro stanovení produkce kouře	73
<b>4.2</b>	<b>Toxicita kouře</b>	<b>74</b>
4.2.1	Analytické stanovování toxicity kouře	75
4.2.2	Stanovení toxicity dýmu na živých organismech	78
<b>4.3</b>	<b>Korozivita kouřových zplodin</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>Termická analýza</b>	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>Využití TA při studiu polymerních materiálů v PO</b>	<b>84</b>
<b>5.2</b>	<b>Využití TA v PO</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Testování hořlavosti ve větším měřítku</b>	<b>88</b>
<b>6.1</b>	<b>ISO 9705 - Rohový pokojový test</b>	<b>90</b>

<b>6.2</b>	<b>Nábytkové kalorimetry</b> .....	<b>96</b>
6.2.1	Projekt CBUF.....	98
<b>6.3</b>	<b>Kalorimetry středního měřítka</b> .....	<b>100</b>
<b>6.4</b>	<b>Single Burning Item Test - prEN 13823</b> .....	<b>101</b>
<b>6.5</b>	<b>Průmyslové kalorimetry - (<i>Industrial calorimeters</i>)</b> .....	<b>106</b>
<b>6.6</b>	<b>ČSN 73 0867 - Velkorozměrové zkušební zařízení IMADOS</b> .....	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Hodnocení situace v oblasti testování hořlavosti v ČR</b> .....	<b>110</b>
7.1	Zkoušky vznětlivosti .....	110
7.2	Zkoušky hořlavosti sledující šíření plamene .....	111
7.3	Zkoušky hořlavosti sledující uvolňování tepla .....	112
<b>8</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>117</b>

# 1 Úvod

Požáry každoročně způsobují značné ztráty na životech a zdraví lidí a současně nemalé škody na majetku a životním prostředí. V České republice tak každoročně zahyne přes 100 osob, mnohonásobný je počet zraněných a přímé materiální škody dosahují kolem 1 miliardy korun. Příčin tohoto stavu je celá řada, ale obecně lze říci, že pokud požár vynikne v objektu, který je postaven, vybaven a používán v souladu s požadavky požární bezpečnosti, jeho průběh a důsledky by neměly být katastrofické. Zmíněné požadavky se týkají především oblasti požární bezpečnosti staveb, konkrétně zákonů, vyhlášek a v neposlední řadě i technických norem. Mezi technickými normami mají důležitou pozici normy zkušební. Bez znalosti a respektování požárně technických vlastností materiálů, ať jsou použity jako stavební materiály a nebo tvoří vybavení interiéru objektu, není možno tyto požadavky splnit.

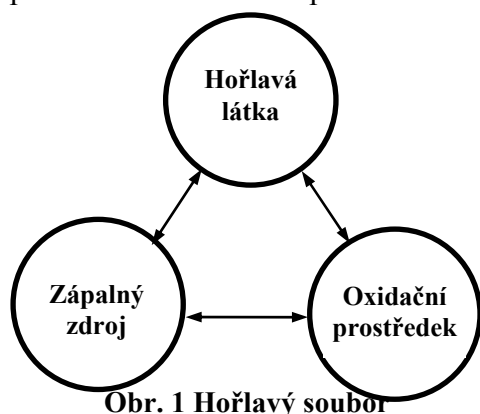
Minulá léta převládalo v oblasti technické normalizace byrokratické pojetí. To spočívalo v tom, že vše bylo normalizováno a co nebylo v normě, bylo nepřijatelné. Současný trend je možno označit jako liberální, jinými slovy - v technických předpisech je obsažen pouze jistý „minimální standard“, který musí být naplněn, ovšem konkrétní postup jeho dosažení, závisí na inženýrských schopnostech architekta, projektanta a dalších osob na tom daném projektu zúčastněných. To samozřejmě klade jiné a vyšší nároky na odborné znalosti a schopnosti invence, než bývalý byrokratický přístup. Tato změna v přístupu k technické normalizaci se projevila mimo jiné i v tom, že celá řada technických norem se stala nezávaznými. Týká se to především tzv. prováděcích norem. Vedle toho závaznými zůstaly normy zkušební a mezi nimi i ty, které umožňují stanovovat požárně technické vlastnosti materiálů.

Tato publikace je zaměřena na oblast požárně technického zkušebnictví, na charakteristiky popisující zapalitelnost, hořlavost a vývoj dýmu tuhých materiálů. Aby však práce byla ucelenější, je pozornost věnována i obecným aspektům hoření a tvorby dýmu. V další části jsou uvedeny nejběžnější syntetické polymerní materiály, s důrazem na jejich výrobu vlastnosti a použití, a rizika s nimi spojená.

Vzhledem k tomu, že současný stav u nás je dán zejména závazkem přizpůsobení se a harmonizací s evropským právním systémem a evropskou normalizací, jsou v práci vedle normalizovaných zkušebních metod platných v ČR, uvedeny a komentovány nejvýznamnější zahraniční a mezinárodní zkušební standardy CEN a ISO.

## 2 Hoření materiálů

Hoření je složitý fyzikálně chemický fenomén, jehož základem jsou oxidačně redukční procesy provázené vývojem tepla a světla. Asi tolik praví obecná definice tohoto procesu. Pod touto, na první pohled, jednoduchou a lapidární definicí se skrývá mnoho problémů. A ty se pokusím v úvodních kapitolách tohoto textu aspoň zčásti osvětlit.



Položíme si jednoduchou otázku: Jaké podmínky musí být splněny, aby bylo možno zapálit nějakou hmotu? Tyto podmínky definuje tak zvaný „hořlavý soubor“. Graficky je znázorněn na obrázku 1. Není důležitá orientace trojúhelníku, všechny podmínky (znázorněné v jeho vrcholech) musí však být v každém konkrétním případě (úspěšného zapálení) s určitou mírou splněny. Na jednom místě v určitém čase musí být přítomen hořlavý materiál, ten musí být obklopen prostředím s určitým oxidačním potenciálem a konečně musí být přítomen určitý energetický potenciál. Podrobnější, ale poněkud jiné, znázornění klasického Faradayova trojúhelníku je uvedeno v [1]. V něm Košík nabízí čtyřvrcholové uspořádání

hlavních dějů při hoření, což mu umožňuje podrobnější sledování energetické a hmotnostní bilance celého procesu.

### 2.1 Hořlavá hmota

První nutnou podmínkou je přítomnost hořlavé hmoty. Hned na začátku je nutno říci, že teoreticky každá hmota, která není oxidována na maximální oxidační stupeň může být za určitých podmínek „hořlavá“. Abychom však výklad nekomplikovali, např. hořením železa či jiných „nehořlavých“ materiálů, přidržíme se běžného vymezení obecného významu tohoto pojmu, a za hořlavou hmotu budeme považovat materiál tvořený nebo obsahující organickou hmotu, který za běžných podmínek (normální tlak, teplota a vlhkost vzduchu, jenž obsahuje přibližně 21% kyslíku) je možno zapálit. Nebude-li uvedeno jinak, hořlavá hmota bude v tuším skupenství.

Hořlavou hmotu, z pohledu procesu hoření, je možno popsat mnoha parametry. Pro další výklad budou důležité především tyto vlastnosti:

- chemické složení
- uspořádání hmoty v prostoru
- tepelné vlastnosti

#### 2.1.1 Chemické složení

Chemické složení hmoty determinuje mnohé pochody v průběhu zahřívání, tepelného rozkladu i vlastního hoření. Nejjednodušším případem je chemicky homogenní hmota. Mnoho reálných hmot je však tvořeno větším množstvím chemicky homogenních (čistých) látek a jedna se tedy o směsi. Tam je situace vždy složitější, protože při jejich zahřívání může dochá-

zet k vzájemným interakcím jednotlivých složek, nebo i produktů vznikajících při jejich rozkladu.

Chemické složení předurčuje tepelnou stabilitu vnitřní stavby materiálu, která může být vyjádřena např. teplotou rozkladu. Ovšem nejenom stabilitu chemické struktury, také tvarovou stálost materiálu - mnohé se teplem deformují a nebo dochází k jejich tavení. Takže, i když se chemické složení materiálu nemění, mění se jeho uspořádání v prostoru a do jisté míry i jeho tepelné vlastnosti. Pokud nehovoříme o hoření chemických prvků (síra, fosfor, uhlík atd.), pak je hoření reakcí rozkladnou. Látky vstupující do procesu hoření jsou chemicky složitější než produkty tohoto procesu.

Převážná většina hořlavých hmot, pro něž bude používán i jednodušší termín palivo, o kterých je řeč v tomto textu, jsou na bázi uhlíku. Obecné informace o hořlavých materiálech lze nalézt v mnoha knihách a publikacích, např. [2,3], speciálně syntetické polymery pak například [4, 5, 6 a 7].

## **Povaha paliv**

Rozmanitost paliv je velmi široká, od nejjednodušších plynných uhlovodíků až po tuhá paliva s velkou molekulovou hmotností a velkou chemickou komplexností, z nichž některé se vyskytují v přírodní formě - např. celulóza, jiné jsou vyrobeny uměle - např. polyetylen a polyuretan (tabulka 1). Všechny hoří v určitých podmínkách, reagují s kyslíkem ze vzduchu, přičemž vznikají produkty hoření a uvolňuje se teplo a světelné záření. Plamen je plynná fáze fenoménu hoření, a je proto samozřejmé, že plamenné hoření kapalných nebo tuhých paliv musí být provázeno jejich přeměnou na plyn. V případě hoření kapalin je tento proces jednoduchým varem, s odpařováním (především) na povrchu, ale pro téměř všechna tuhá paliva je potřebný chemický rozklad (pyrolýza), aby se uvolnily produkty s dostatečně malou molekulovou hmotností, které mohou z hmoty tékat a umožnit vznik plamene. Jelikož toto vyžaduje mnohem více energie ve srovnání s jednoduchým odpařováním, teplota povrchu hořící tuhé látky je vysoká (obvykle kolem 400 °C) (tab.1). Výjimku z tohoto pravidla tvoří ty tuhé látky, které při zahřívání sublimují, to je přecházejí přímo z tuhé do plynné fáze bez chemického rozkladu. Například hexamethylentetramin, který sublimuje při teplotě 285-295 °C.

Hořlavá látka	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Měrné teplo [kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	Teplota tání [°C]
<b>Přírodní polymery</b>					
Celulóza	různá	cca 1,3	různá	16,1	uhelnatí
<b>Termoplasty</b>					
Polyetylen LD	940	1,90	0,35	46,5	130 -135
Polyetylen HD	970	2,30	0,44	46,5	130 -135
Polypropylen izotaktický	940	1,90	0,24	46,0	186
Polymethylmetakrylát	1190	1,42	0,19	26,2	~ 160
Polystyren	1100	1,20	0,11	41,6	240
Polyoxymethylen	1430	1,40	0,29	15,5	181
Polyvinylchlorid	1400	1,05	0,16	19,9	uhelnatí
Polyamid 66	~ 1200	1,40	0,40	31,9	250 - 260
<b>Termosety</b>					
Polyurethanová pěna	různá	~ 1,4	různá	24,4	-
Fenolická pěna	různá	-	různá	17,9	uhelnatí
Polyizokyanurátová pěna	různá	-	různá	24,4	uhelnatí

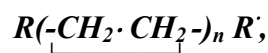
**Tab. 1** Vlastnosti vybraných tuhých paliv [2, 3]

Složení těkavých látek uvolňujících se z povrchu hořících tuhých látek bývá složité. To je možné pochopit, pokud zvážíme chemickou povahu příslušné tuhé látky. Všechny významné hořlavé látky jsou polymerními materiály s velkou molekulovou hmotností, jejichž jednotlivé molekuly se skládají z dlouhých „řetězců“ opakujících se základních strukturních jednotek, které jsou odvozeny z jednodušších molekul, známých jako monomery <sup>[8]</sup>.

Ze dvou základních typů polymerů (adičního a polykondenzačního) je jednodušší adiční polymer, protože je tvořen přímým přidáváním jednotek monomeru na konec narůstajícího polymerního řetězce. Toto je možné znázornit pomocí sledu reakcí:

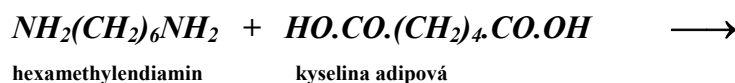


atd., kde  $R \cdot$  je volný radikál nebo atom a  $CH_2 = CH_2$  je monomer, v tomto příkladu ethen. Tento proces je známý jako polymerace vedoucí ke vzniku polyethylenu, který bude mít v ideálním případě strukturu:



monomerní jednotka

ve které monomerní jednotka má stejný komplement a uspořádání (ačkoliv jinou chemickou vazbu) atomů jako rodičovský monomer ( $CH_2 = CH_2$ );  $n$  je počet opakujících se jednotek v řetězci. Naopak polyreakce, které vedou ke vzniku polykondenzátů, jsou provázeny uvolněním jednoduchých molekul - obvykle  $H_2O$  - kdykoliv se navážou dvě jednotky monomeru. Obvykle do reakce vstupují dva různé monomery, např. v případě výroby polyamidu 66 - hexamethyldiamin a kyselina adipová. První fáze této reakce probíhá podle schématu:

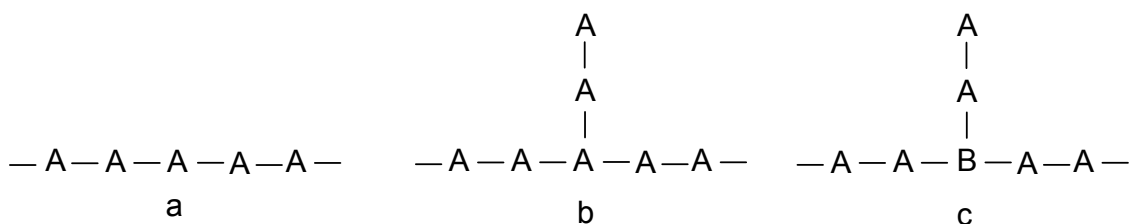


Vzorec Nylonu 66 lze zapsat ve tvaru, který byl výše použit pro vzorec polyethylenu, to je:



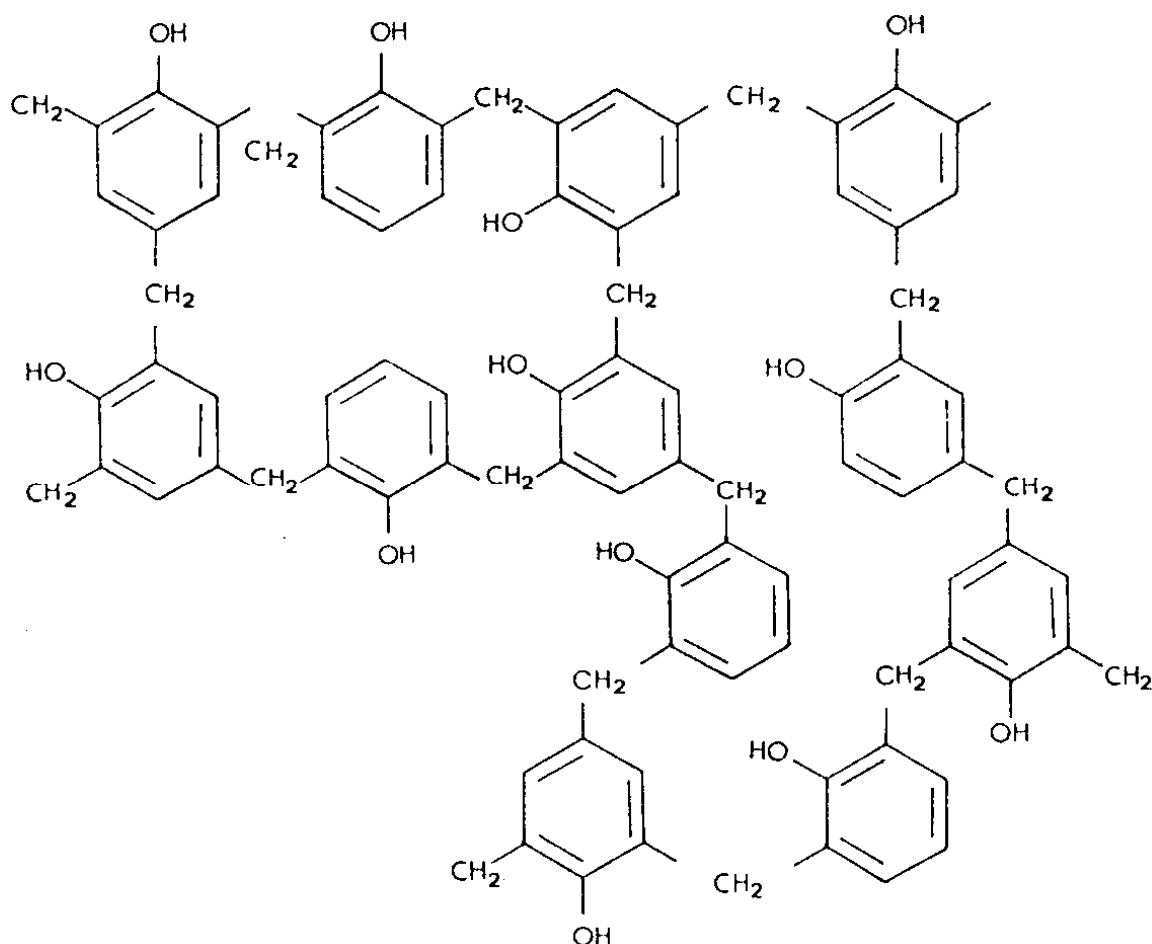
Je možno poznamenat, že celulóza, která je nerozšířenějším přírodním polymerem vyskytujícím se ve všech vyšších rostlinách, je kondenzačním polymerem monosacharidu D-glukózy. Základní nutnou vlastností jakéhokoliv monomeru je, že musí obsahovat alespoň dvě reaktivní skupiny, neboli centra, které umožňují vytvoření vazby se sousedními jednotkami a vznik polymerního řetězce. Délka řetězce (to znamená hodnota  $n$  ve výše uvedených vzorcích) je závislá na monomerních látkách a reakčních podmínkách v průběhu polymerace - délka řetězce polymeru má podstatný vliv na vlastnosti konečného produktu. Vlastnosti mohou být rovněž upraveny přidáním postranních řetězců - rozvětvením polymeru. Toho lze dosáhnout modifikací podmínek vzniku polymeru takovým způsobem, aby způsobily spontánní vytváření bočních řetězců (obrázek 2b) nebo přidáním malého množství monomeru se třemi reaktivními skupinami (jednotka B na obrázku 2c). To bude mít za následek vznik struktury s příčnou vazbou (vazba mezi řetězci), jejíž fyzikální vlastnosti jsou většinou velmi odlišné od nevětveného ekvivalentu, nebo od pouze mírně rozvětvené struktury.





**Obr. 2** Základní struktury polymerních řetězců

Příkladem mohou být expandované polyurethany. U většiny pružných, měkkých pěnových hmot je počet příčných vazeb velmi nízký, ovšem jejich podstatným zvýšením (např. zvýšením podílu trojfukčního monomeru B na obrázku 2c) vznikne polyurethan vhodný pro tuhé pěnové hmoty. Co se týče hořlavosti, je množství těkavých látek při tepelné dekompozici polymeru mnohem menší u struktur s velkým počtem příčných vazeb, protože z větší části materiálu vznikají netěkavé uhlíkaté zbytky, tudíž se účinně snižuje dodávka plynného paliva do plamene. Příkladem mohou být fenolové pryskyřice, ze kterých při zahřátí na teplotu překračující 500 °C lze dostat více než 60 % uhlíkatého zbytku<sup>[9]</sup>. Na obrázku 3 je struktura typické fenolické pryskyřice. Přírodním polymerem, vykazujícím velký podíl příčných vazeb



**Obr. 3** Typická struktura s příčnými vazbami fenolformaldehydových pryskyřic

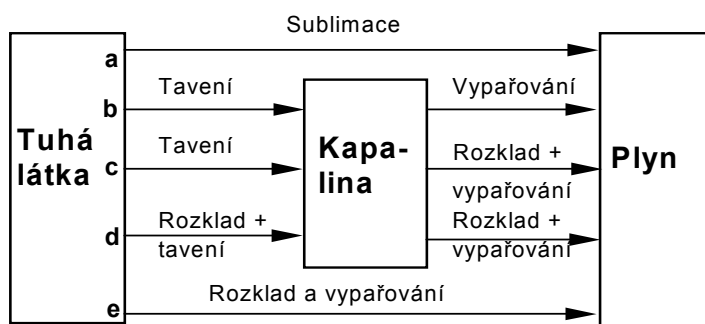
je lignin, který je „cementem“ spojujícím celulóзовé struktury u rostlin vyššího řádu a poskytujícím větší tuhost a odolnost buněčným stěnám. Syntetické polymery lze rozdělit do

dvou hlavních skupin, a to na termoplastické a teplem tvrditelné pryskyřice (tab. 2). Třetí skupinu - elastomery - lze rozlišit podle jejich, pryži podobných, vlastností <sup>[10]</sup>.

Z hlediska požárního chování, hlavní rozdíl mezi termoplastickými a teplem tvrditelnými polymery je takový, že ty druhé mají strukturu s příčnými vazbami a při zahřívání se netaví. Při dostatečně vysoké teplotě se mnohé rozkládají, a přímo z tuhé látky vznikají těkavé látky, po kterých zůstávají uhlíkaté zbytky (např. fenolické pryskyřice, obrázek 3), přestože u polyuretanů typičtějším produktem dekompozice je kapalná olejovitá látka. Tento jev, pozorovaný u měkkých, pružných polyuretanových pěn je způsoben rozkladnými reakcemi, tedy chemickými reakcemi, a nejedná se proto o měknutí a tavení. Na druhé straně termoplasty při zahřívání měknou a taví se, což modifikuje jejich chování v podmínkách hoření. Šíření požáru může být urychleno odkapáváním nebo rozléváním se hořící kaluže roztaveného polymeru.

### Tepelná dekompozice a stabilita polymerů

Produkce plynných těkavých látek z hořlavých tuhých látek většinou zahrnuje dekompozici (pyrolýzu) polymerních molekul vyskytujících se na povrchu při zvýšených teplotách. U některých látek tomu předchází tavení, které je závislé na povaze materiálu (obrázek 4 a tabulka 2).



**Obr. 4** Tvorba těkavých látek z tuhých materiálů <sup>[11]</sup>

Označení z obr. 4	Mechanismus	Příklad
a	Sublimace	Hexamethylentetramin
b	Tavení a vypařování bez chemických změn	Parafíny s nízkou molekulovou hmotností
c	Tavení, potom rozklad provázený vypařováním lehčích frakcí	Termoplasty, parafíny s vysokou molekulovou hmotností
d	Rozkladem vyniklý kapalný produkt se dále rozkládá za vzniku těkavých látek	Polyurethany
e	Rozklad s přímou produkcí těkavých látek	Celulóza a většina termosetických pryskyřic

**Tab. 2** Tvorba těkavých látek z hořlavých tuhých hmot <sup>[11]</sup> upraveno

Těkavé látky jsou tvořeny směsí produktů pyrolýzy, jejichž spektrum hmotností molekul se pohybuje od nejlehčích jednoduchých molekul (vodík, ethen atd.) až po látky s relativně vysokou molekulovou hmotností, které těkají pouze při takových povrchových teplotách, při kterých jejich tepelná energie může překonat kohezní síly v tenké vrstvě na povrchu paliva. Při plamenném hoření bude většina z nich spotřebována plamenem, ale za jiných podmínek, např. při pyrolýze bez hoření, nebo u některých materiálů, při bezplamenném hoření, budou produkty vysoko vroucích kapalin a dehtů kondenzovat, a při smísení se studeným vzduchem vytvářet aerosolový kouř.

Při vysokých teplotách, některé adiční polymery (např. PMMA - polymethylmetakrylát) projdou reverzí polymeračního procesu (rovnice R1a a b), známé jako „unzipping“ nebo „end chain scission“ (depolymerací) za vzniku značného množství monomeru jako produktu dekompozice (tab. 4). Takové chování je přímým důsledkem chemické struktury monomerních jednotek <sup>[9]</sup>. Toto může kontrastovat s pyrolýzou polyethylenu, při které se uplatňuje

úplně náhodný mechanismus štěpení, opět jako důsledek struktury monomeru. Na tomto místě je třeba zmínit, že neexistuje přesný ekvivalent k procesu „*unzipping*“ u pyrolýzy makromolekulárních materiálů vzniklých polykondenzací.

Polymer	Teplotní rozsah [°C]	Monomer [%]
Polymethylen	325-450	0,03
Polyethylen	393-444	0,03
Polypropylen	328-410	0,17
Polymethylakrylát	292-399	0,7
Polyethylenoxid	324-363	3,9
Polystyren	366-375	40,6
Polymethylmetakrylát	246-354	91,4
Polytetrafluorethylen	504-517	96,6
Poly $\alpha$ -methylstyren	259-349	100
Polyoxymethylen	pod 200	100

**Tab. 3 Výtěžnost monomeru při pyrolýze některých polymerů**

Kromě „*end chain scission*“ (koncového štěpení řetězce) a „*random chain scission*“ (náhodného štěpení řetězce - krakování), které jsou výše popsány, rozlišujeme ještě dva další mechanismy dekompozice - jsou to „*chain stripping*“ („vysvlékání se z lehkých podílů“) a vznik příčných vazeb (zesíťování) - „*cross-linking*“<sup>[12]</sup>. *Chain stripping* je proces, u kterého základní řetězec polymeru zůstává neporušený, avšak od hlavního řetězce se odštěpují boční části makromolekuly. Názorným příkladem je tepelná dekompozice polyvinylchloridu (PVC), který při teplotě okolo 120 °C začíná ztrácet molekuly chlorovodíku, zanechává uhlíkatý zbytek. Ačkoliv zbytek při vysoké teplotě hoří (a produkuje velké množství tepla a kouře), HCl je velmi účinným inhibátorem hoření a jeho uvolňování může vést k uhašení šířícího se plamene. Proto se říká, že PVC má nízkou hořlavost, nebo potenciál hořet. Toto platí pro tvrdé PVC a některé měkčené modifikace, které se používají jako elektrické izolace, ovšem většina flexibilních - měkkých PVC obsahuje aditiva - plastifikátory - které je činí více hořlavými. Přesto i tvrdé PVC může hořet, pokud pro to nastanou vhodné podmínky.

Polymery, které projdou během pyrolýzy procesem vzniku příčných vazeb, mají tendenci při zahřívání uhelnatět (*charring*). Přestože by se následkem toho mělo snížit množství paliva pro hoření plamenem, u termoplastů je vliv na hořlavost zřídka významný. Nicméně, jak již bylo zmíněno, uhelnatící polymery (*charring polymers*), např. fenolické pryskyřice, mají jiný způsob hoření. Jejich struktura je i v normálním stavu vysoce zesíťovaná (*cross-linked*) a je vždy velmi pravděpodobné, že proces tvorby příčných vazeb bude během pyrolýzy dále pokračovat.

Některé požární vlastnosti hořlavých materiálů lze demonstrovat na vlastnostech těkavých látek, obzvláště jejich skladby, reaktivity a rychlosti tvorby. Tepelnou stabilitu lze kvantifikovat, např. stanovením změny rychlosti dekompozičních reakcí při změně teploty. Výsledky lze vyjádřit mnoha způsoby, nejběžnější vyplývá z předpokladu, že pyrolýza probíhá podle jednoduché kinetické rovnice:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = -k' \cdot m,$$

kde  $m$  vyjadřuje hmotnost (nebo lépe koncentraci) polymeru, a i když se jedná o velké zjednodušení, můžeme říci že  $k'$  je rychlostní koeficient. Nicméně to dovoluje, aby teplotní závislost procesu byla vyjádřena standardní formulí, pomocí Arrheniovy rovnice pro rychlostní koeficient, to je

$$k' = A \exp(-E_A / RT), \quad [s^{-1}]$$

kde:  $E_A$  je aktivační energie [ $J \cdot mol^{-1}$ ],  
 $R$  je plynová konstanta [ $8.314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ],  
 $T$  je teplota [K] a konstanta  
 $A$  je předexponenciální faktor.

Bylo již publikováno mnoho výzkumných prací týkajících se dekompozice polymerů, např. Madorský<sup>[9]</sup>, ale s ohledem na chemickou komplexnost, kombinovanou s problémy interpretace dat pocházejících z různých zdrojů a experimentálních technik, není možné takovéto informace v nynějším kontextu přímo použít. Některé aktivační energie, které byly získány z předchozích studií, a jsou často citovány i v jiných publikacích<sup>[13,14]</sup>, jsou zde uvedeny kvůli ucelenosti (tabulka 4). Nicméně bez znalosti předexponenciálního faktoru není možné stanovit relativní rychlost dekompozice. Prakticky jsou proto významnější hodnoty relativní tepelné stability látek, publikované rovněž Madorským. V této práci uvedl data relativní tepelné stability organických polymerů, které jsou vyjádřené jako teplota, při které bude malý vzorek polymeru v průběhu 30 minut z poloviny dekomponován - můžeme říct, že je to „teplota poločasů tepelné životnosti polymeru“. Výběr z těchto dat je připojen k tabulce 4 (poslední sloupec). Některé další faktory ovlivňující tepelnou stabilitu látek jsou uvedeny v tabulce 5<sup>[9]</sup>. Je možné provést částečné porovnání údajů obsažených v těchto tabulkách s hodnotami tepla nutného pro zplyňování polymerů - tabulka 6 (Tewarson a Pion<sup>[15]</sup>). Nicméně je třeba mít na mysli, že data Madorského se týkají „čistých“ polymerů, zatímco data z tabulky 6 byla získána ze vzorků komerčních materiálů - mnohé obsahují aditiva, která ovlivňují jejich chování.

Polymer	Molekulová hmotnost	Teplotní rozsah	Aktivační energie	Rel. tepel. stabilita
		[°C]	[kJ/mol]	[°C]
Fenolická pryskyřice	-	332-355	18	-
Polymethylmetakrylát	15000	225-256	30	283
Polymethylakrylát	-	271-286	34	328
Triacetát celulózy	-	283-306	45	-
Polyethylenoxid	10000	320-335	46	345
Celulóza	-	261-291	50	-
Polystyren	230000	318-348	55	364
Poly $\alpha$ -methylstyren	350000	229-275	55	287
Polypropylen	-	336-366	58	387
Polyethylen	20000	360-392	63	406
Polymethylen	Vysoká	345-396	72	415

**Tab. 4 Aktivační energie tepelného rozkladu a tepelná stabilita některých polymerů**

Faktor	Vliv na tepelnou stabilitu	Příklady	Relativní tepelná stabilita
Větvení řetězce	Oslabuje	Polymethylen Polyethylen Polypropylen Polyisobutylen	415 °C 406 °C 387 °C 348 °C
Dvojná vazba v hlavním řetězci	Oslabuje	Polypropylen Polyisopren	387 °C 323 °C
Benzenové jádro v hlavním řetězci	Zvyšuje	Polybenzyl Polystyren	430 °C 364 °C
Vysoká molekulová hmotnost	Zvyšuje	PMMA <sup>B</sup> PMMA <sup>A</sup>	327 °C 283 °C
Zesíťování řetězce	Zvyšuje	Polydivinylbenzen Polystyren	399 °C 364 °C
Atom kyslíku v hlavním řetězci	Oslabuje	Polymethylen Polyethylenoxid Polyoxymethylen	415 °C 345 °C < 200 °C

PMMA<sup>B</sup> - molekulová hmotnost  $1,5 \times 10^5$

PMMA<sup>A</sup> - molekulová hmotnost  $5,1 \times 10^6$

**Tab. 5** Vlivy struktury na tepelné vlastnosti polymerů

Hořlavina	$L_V$	$\dot{Q}_F''$	$\dot{Q}_L''$	$\dot{m}_{ideal}''$
	[kJ.g <sup>-1</sup> ]	[kW.m <sup>-2</sup> ]	[kW.m <sup>-2</sup> ]	[g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Fenolická pěna (tuhá, FR)	3,74	25,1	98,7	11 <sup>b</sup>
Polyizokyanurátová pěna (tuhá, se skelnými vlákny, FR)	3,67	33,1	28,4	9 <sup>b</sup>
Polyoxymethylen	2,43	38,5	13,8	16
Polyethylen	2,32	32,6	26,3	14
Polykarbonát	2,07	61,9	74,1	25
Polypropylen	2,03	28,0	18,8	14
Dřevo - Douglasova jedle	1,82	23,8	23,8	13 <sup>b</sup>
Polystyren	1,76	61,5	50,2	35
Polyester (vyztužený skleněnými vlákny, FR)	1,75	29,3	21,8	17
Polymethylmetakrylát	1,62	38,5	21,3	24
Polyizokyanurátová pěna (tuhá)	1,52	50,2	58,5	33
Polyurethanová pěna (tuhá)	1,52	68,1	57,7	45
Polyester (vyztužený skleněnými vlákny)	1,39	24,7	16,3	18
Polystyrenová pěna (tvrdá)	1,36	34,3	23,4	25
Polyurethanová pěna (měkká)	1,22	51,2	24,3	32
Methyl alkohol (kapalný)	1,20	38,1	22,2	32
Polyurethanová pěna (tuhá, FR)	1,19	31,4	21,3	26
Ethyl alkohol (kapalný)	0,97	38,9	24,7	40
Styren (kapalný)	0,64	72,8	43,5	114
Methylmetakrylát (kapalný)	0,52	20,9	25,5	76
Benzen (kapalný)	0,49	72,8	42,2	149
Heptan (kapalný)	0,48	44,3	30,5	93

- <sup>b</sup> - Žhnoucí materiály.  $\dot{m}_{ideal}''$  je dán jako maximum rychlosti hoření  
FR - Materiály se sníženou hořlavostí  
 $\dot{Q}_F''$  - Tepelný tok z plamene na povrch materiálu  
 $\dot{Q}_L''$  - Tepelné ztráty z povrchu hořlaviny  
 $\dot{m}_{ideal}''$  - Rychlost hoření (úbytku hmoty)  
 $L_V$  - Teplo potřebné ke zplyňování hořlaviny

**Tab. 6** Některé „hořlavostní parametry“ vybraných látek <sup>[15]</sup>

Přestože by se na první pohled mohlo zdát, že směs těkavých látek má druhořadý význam z hlediska jejich schopnosti shořet v plynné fázi, avšak takový pohled by nedovoloval podrobně pochopit chování požáru. Reaktivita složek bude ovlivňovat, jak snadno se plamen na povrchu tuhé látky ustálí, jak dokonalé bude hoření a jaké množství sazí bude vyprodukováno. Další aspekt - množství tepla vyzářeného z plamene do okolí a na hořící povrch - rovněž ovlivní množství kouře uvolněného během hoření. Protože těkavé látky obsahující aromatické skupiny jako je benzen (např. z uhlíkatých zbytků vytvořených degradací PVC), nebo styren (z polystyrenu), hoří plamenem s velkým obsahem sazí a vyznačujícím se vysokou intenzitou vyzářování. Na rozdíl např. od polyoxymethylenu, který hoří nesvítícím plamenem, jednoduše proto, že těkavé látky obsahují pouze formaldehyd, který běžně hoří bezzbytku, a neprodukuje tedy saze. Také toxicita produktů hoření je dána složením těkavých látek, ovšem základní toxickou látkou je oxid uhelnatý, který je produktem procesu hoření všech běžných paliv. Množství toxických produktů ve spalinách je silně závislé na podmínkách hoření a přístupu vzduchu. Obecnými otázkami tepelného rozkladu a hoření materiálu se zabývá i celá řada badatelů v Česku a na Slovensku, např.: M. Košík<sup>[16,17]</sup>, Balog<sup>[18,19]</sup>, Osvald<sup>[20]</sup>, Vaniš<sup>[21]</sup>, Masařík<sup>[22]</sup> a Ševčec<sup>[23]</sup>.

## 2.1.2 *Prostorové parametry hmoty*

Snadnost zapálení, ale i průběh dalšího hoření, významnou mírou ovlivňuje uspořádání hmoty v prostoru. Abychom si přiblížili tento faktor, uveďme si jednoduchý příklad: Dřevo - máme dřevěný trám daného profilu a daného chemického složení a vedle toho třísky nebo hobliny ze stejného dřeva s úplně stejným chemickým složením. Je zřejmé, že dřevo s volnějším prostorovým uspořádáním zapálíme mnohem snadněji než totéž dřevo v kompaktní formě. Prostorové parametry bychom v jistém smyslu mohli také vyjádřit jako plochu povrchu určitého objemu hmoty. Jistě, trám, zaujímající jistý objem, má menší povrch než hobliny ve stejném objemu. Řekli jsme si, že hobliny zapálíme snadněji, a ještě dodáme, že budou hořet intenzivněji. Budeme-li však hmotu stále více „načechrávat“, dostaneme se k momentu, že sice hoblinu malým zdrojem zapálíme, ale další hobliny v okolí již zapáleny nebudou a hoření je přerušeno. Taková hmota má potom své prostorové uspořádání příliš volné a neumožňuje, po zapálení, další samovolné hoření. Je zřejmé, že postupným načechráváním hmoty počínaje od kompaktního dřeva se bude postupně snadněji zapalovat a do jistého stupně volnosti uspořádání i rychleji hořet. Toto načechrávání však má, jak bylo uvedeno, své meze a po překročení jisté hranice se bude rychlost a intenzita hoření snižovat, až nakonec volné šíření plamene po zapálení nenastane.

Pozastavme se ještě u problému, jakým způsobem je ovlivňováno zapalování hmoty jejím prostorovým uspořádáním. Pro jednoduchost zůstaňme opět u dřeva. Zmíněný trám, např. zápalkou nezapálíme, ale připravíme-li dřevěný vzorek větší štíhlosti, pak můžeme být při zapalování úspěšnější. Bude také záviset na struktuře povrchu. Např. hrubý řez povrchu zježeného třískami nám při zapalování dává větší šanci, než hladký hoblovaný povrch materiálu téhož profilu. Důvod je snad zřejmý i z toho, co až dosud bylo řečeno. V prvním případě zapalujeme dřevěné třísky - tedy hmotu s volnějším uspořádáním, nikoli kompaktní dřevo.

Dalším aspektem je tvarová a objemová stálost hořlavé hmoty. Některé materiály při zahřívání měknou a tají, proto jejich výchozí stav uspořádání hmoty v prostoru není stabilní. Tato skutečnost ovlivňuje jak zapalování, tak i další hoření.

S prostorovým uspořádáním hmoty souvisí i celková geometrie uspořádání hořlavého souboru, především orientace tepelného zdroje vzhledem k hořlavému materiálu. Je-li zdroj tepla (kap. 2.2) lokálního charakteru a působí-li na materiál shora, bude schopnost materiálu šířit hoření menší, než v případě, bude-li materiál zapalován v jiném místě. I když samotné zapalování ovlivněno být nemusí.

## 2.1.3 *Tepelné vlastnosti hořlavých hmot*

Tepelné vlastnosti paliv ovlivňují jak proces jejich zapalování, tak i další průběh samovolného hoření. Dvě nezákladnější tepelné charakteristiky látek, ve vztahu k hořlavosti, jsou tepelná vodivost a měrné teplo. V zásadě platí, že materiál s větší tepelnou vodivostí by měl být ve fázi zapalování odolnější. Faktem však je, že spolu s touto vlastností souvisí i měrné teplo (tepelná kapacita) materiálu. Tepelná vodivost ovlivňuje rozptylování tepla v materiálu. Je to jedna ze základních materiálových fyzikálních konstant, vyjadřujeme ji jako koeficient tepelné vodivosti a najdeme jej v tabulkách a nebo jej poměrně jednoduše experimentálně stanovíme. Pro homogenní tuhé materiály je závislý na teplotě. Pro vícefázové hořlaviny, a to je např. případ volněji prostorově uspořádané hmoty, je situace komplikovanější. Jednak zde máme dřevo, z tohoto pohledu dosti komplikovaný materiál, a pak i vzduch. Problémy v tepelně technických úvahách o dřevě způsobuje voda, která je v dřevní hmotě vždy přítomná. Transport tepla, který je úměrný právě tepelné vodivosti materiálu, se v našem případě realizuje ve třech prostředích tuhém, kapalném a plynném. Není nutno zde dále problém roz-

vádět, snad jen připomenou známé věci z fyziky. V tuhém prostředí se teplo šíří pouze vedením (kondukcí). V kapalném prostředí je to složitější, ale lze říci, že převládá proudění (konvekce), ale spolupůsobí i přenos tepla vedením, např. u kapilárně rozptýlené vody. V plynech ke dvěma již zmíněným transportním mechanismům musíme přiřadit i sálání (tepelnou radiaci). Ve větších objemech při nižších teplotách převládá proudění, při vysokých teplotách pak sálání. Při zmenšujících se objemech plynu může svou roli hrát teplo přenesené vedením.

Přenos tepla vedením je realizován přímo ve hmotě. Tepelná energie absorbovaná v povrchové vrstvě materiálu zvyšuje její tepelný potenciál. To se projevuje zvýšením její teploty, jinak řečeno zvýšením amplitudy kmitů sousedních atomů kolem základního rovnovážného stavu. Tato energie pak rozkmitává sousední atomy a proniká tak dále nehybným materiálovým prostředím. Proces vedení tepla ustane, zaniknou-li ve hmotě teplotní rozdíly - vyrovnají-li se teploty ve všech místech sledované hmoty.

Přenos tepla prouděním je taktéž závislý na hmotném prostředí. Ovšem na rozdíl od tepla transportovaného vedením, musí současně docházet i k transportu (pohybu) vlastní hmoty. Tak jak proudí ohřátá tekutina, dochází kontinuálně i k „proudění“ energie - tepla - v této hmotě obsažené. Energie je v samotném procesu proudění tepla „pasivní“, v pohybu je nosné proudící médium. Tento mechanismus se uplatňuje ve hmotách v kapalném nebo plyném skupenství, případně ve vícefázových systémech - fluidních vrstvách, aerosolech, kapalných emulzích a suspenzích.

Přenos tepla zářením je zvláštním případem. Hmotné prostředí je pouze zdrojem tepelného záření, jinak se na přenosu energie nepodílí, naopak, až na výjimky (tzv. průteplivé hmoty), přenosu energie brání. Přenos tepla radiací je zprostředkováván energetickými kvanty - fotony - jejichž energie, spadá do části elektromagnetického spektra, které nazýváme tepelné záření. Jako každé elektromagnetické záření, i tepelné záření nejlépe proniká nehmotným prostředím - vakuem. Plynné prostředí toto záření částečně absorbuje, čímž se zahřívá, především je-li tvořeno víceatomovými plyny ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  atd.). Absorpce tepelného záření je závislá na chemickém složení prostředí jímž prochází, a také na vlastním kmitočtu - energii záření.

\* \* \*

Měrné teplo materiálu při přenosu tepla úzce souvisí s jeho tepelnou vodivostí a společně určují rychlost zahřívání hořlavé hmoty.

Měrné teplo, přesněji, měrné specifické teplo udává, kolik tepla je nutno dodat jednotce hmotnosti materiálu, aby se jeho teplota zvýšila o  $1^\circ C$ . Zahříváme-li materiál lokálně působícím zdrojem tepla, pak nejteplejší bude vždy povrch, který je s tímto zdrojem v nejtěsnějším kontaktu. Teplo absorbované hmotou bude ovšem rozváděno do chladnějších částí hmoty a rychlost vzestupu teploty v místě působení zdroje tepla nebude určována pouze měrným teplem.

Neměli bychom však opomenout další tepelné charakteristiky materiálu, které také ovlivňují procesy zahřívání hmoty. Jsou to: *koeficient přestupu tepla* a *koeficient tepelného sálání* a *absorpce*. Ty se uplatňují při přestupu tepla fázovým rozhraním. Určují efektivnost přenosu tepla ze zdroje do hmoty, ale také ztráty tepla, které je odvedeno z hmoty do chladnějšího okolí. Jsou těsně svázány jak se složením materiálu, ale také i s charakterem a kvalitou jeho povrchu. Koeficient přestupu tepla je konstanta vztahovaná na jednotku povrchu, jímž transport tepla probíhá. Je-li vymezena plocha, např.  $1\text{ cm}^2$  na průmětu nerovného povrchu, pak je skutečná jeho plocha větší - např. povrch hrubého řezu dřevěného vzorku. Není důležitá plocha průmětu, ale skutečný povrch rozhraní fází.

Koeficienty tepelné vodivosti a měrného tepla některých materiálů jsou uvedeny v tabulce 1. V ní vidíme, že např. polyetylen a polystyren mají obě tyto charakteristiky dosti odlišné. Ve srovnání s polystyrenem je tepelná vodivost polyethylenu  $4\times$  a měrné teplo  $2\times$  vyšší.



Jejich tepelně mechanické vlastnosti jsou si naopak dosti podobné. Budeme-li zahřívát větší objemy těchto materiálů, bude povrchová teplota polystyrenu stoupat daleko rychleji, a teplotní spád ve hmotě bude vyšší. Výsledkem je, že polystyren se zapálí daleko rychleji a snáze.

## 2.2 Zdroje zapálení

Energetické zdroje používané k zapalování nazýváme zápalnými zdroji nebo zdroji zapálení. Na několika místech předcházejícího textu již o nich byla zmínka. Teď se podíváme na věc právě z tohoto vrcholu pomyslného trojúhelníku na obrázku 1.

Zápalným zdrojem může být zdroj libovolné formy energie mající dostatečný potenciál potřebný k zapálení konkrétní hmoty. Minimální množství energie nutné k zapálení je dáno především chemickým složením hořlaviny a jejími prostorovými parametry (všemi aspekty, které byly zmíněny v souvislosti s prostorovým uspořádáním), také teplotou samotného materiálu a jeho okolí, a samozřejmě také na oxidačním potenciálu prostředí.

Vrátíme se k našemu příkladu: Bude-li dřevěnému trámu dodáno dostatečné množství tepla, také dojde k jeho zapálení, přesto však především tepelná vodivost dřeva způsobí, že toho tepla bude muset být nepoměrně více než při zapalování dřevěné třísky nebo hobliny.

Začali jsme tím, že zdrojem zapálení může být vlastně jakákoli forma energie, bylo by asi tedy vhodné si tuto množinu nějak „rozškatulkovat“.

Prvním kritériem dělení zdrojů je druh nebo forma energie:

- Tepelná energie
- Mechanická energie
- Chemická energie
- Elektrická energie
- Elektromagnetické záření
- Jaderná energie

Ne všechny formy energie jsou běžnými zdroji zapálení, ale všechny jimi mohou být. Je ovšem nutno říci, že všechny netepelné formy energie se při procesu zapalování transformují na energii tepelnou. Vyjmenované formy energie, jako možné zdroje zapálení, je proto vhodné považovat za tzv. primární zdroje. Vlastní proces zapalování je provázen často složitějšími mechanismy, ve kterých se jedna forma energie mění na druhou i ve více než dvou navazujících procesech transformace. Konečnou formou energie, která iniciuje zapálení hořlavé hmoty, je teplo. Tepelnou energii, jako primární zdroj si necháme na konec, ona je totiž v tomto procesu dost výjimečná, ne důležitostí, ale spíše výskytem.

Mechanická energie. Nejčastějším případem zdroje zapálení v této kategorii je třecí teplo. V prehistorii to byl vlastně jediný bezpečný zdroj zapálení, vzpomeňme: vysušená kůra a rychle se otáčející hůlka z tvrdého dřeva. Teplo vzniká i při rychlé komprimaci plynu - zdroj zapálení u vznětových spalovacích motorů. Třecí teplo je zdrojem zapálení při škrtnutí zápalkou, v různých třecích mechanismech u roznětek v oboru výbušinářském, a i vznícení traskavin úderem. Zdrojem zapálení při požárech, především u technologických procesů, jsou nedostatečně mazané kluzné plochy a podobně.

Chemická energie. Chemické procesy jsou z hlediska termochemie buď exotermní nebo endotermní. Ty, které jsou exotermní, mohou být zdrojem zapálení. Tyto procesy jsou známy jak z anorganické, tak i organické chemie. Nejčastějším reálným mechanismem zapálení, ve kterém chemická energie vystupuje jako primární energetický zdroj, je proces zvaný samovznícení. To se ještě dělí, podle uplatňujícího se startovacího mechanismu, na chemické a biologické samovznícení. U obou je však zdrojem tepla chemická exotermní reakce - např. oxidace siričků kovů nebo enzymatický rozklad organické hmoty. Je ovšem nutno zdůraznit, že chemická energie je vlastně zdrojem tepla při jakémkoli hoření. Teď však hovoříme o

chemických zdrojích vznícení. O samotném procesu hoření budeme hovořit v dalších kapitolách.

Elektrická energie. Průchodem elektrického proudu elektricky vodivým materiálem vzniká teplo, tzv. Joulovo teplo. Uvedená věta je vyjádřením Joulova zákona a vztah pro množství vznikajícího tepla  $Q$  je:

$$Q = R I^2 t, \quad [J]$$

kde:  $R$  - je resistance vodiče  
 $I$  - je protékající proud (u střídavého proudu se dosazuje jeho efektivní hodnota)  
 $t$  - je doba průchodu proudu

Joulovo teplo ohřívá každý vodič, kterým protéká proud<sup>1</sup>. Tímto vodičem může být, kromě běžných elektrických vodičů, i ionizované plynné prostředí, např. vzduch. Zdrojem zapálení může být např. přetížený elektrický vodič, velký přechodový odpor, ale i blesk při bouřce. Blesk, který zapálí strom - kterým projde elektrický proud do země (zde tedy zastupuje funkci elektrického „hořlavého“ vodiče) je možno považovat i jako primární zapalovací zdroj. Elektrická energie vysokofrekvenčního zdroje je příčinou tzv. indukčního ohřevu - indukční průmyslové pece, ale i mikrovlnné trouby doma. Teplo zde vzniká působením tzv. vířivých proudů.

Elektromagnetické záření. Zprostředkovává přenos energie pomocí kvant energie - fotonů. Každý foton je nositelem energie, jejíž velikost je přímo úměrná frekvenci záření. Je dána vztahem:

$$E = h \cdot \nu \quad [J]$$

kde:  $h$  - je Planckova konstanta ( $6.6256 \cdot 10^{-34}$ ) [J.s] a  
 $\nu$  - je kmitočet záření [ $s^{-1}$ ]

Kmitočet elektromagnetického záření je řádově  $10 \div 10^{24}$  Hz, což odpovídá vlnovým délkám  $10^8 \div 10^{-16}$  m. Část tohoto frekvenčního spektra připadá na takzvané tepelné a infračervené záření. Oblast infračerveného záření navazuje na oblast viditelného světla ( $0.4 \div 0.7$  nanometrů) a pokračuje směrem k větším vlnovým délkám, k nižším energiím a kmitočtům.

Každé těleso zahřáté na teplotu vyšší než 0 K emituje elektromagnetické (tepelné) záření podle Stefanova - Boltzmanova zákona. Tento definuje intenzitu vyzařování jako přímo úměrnou čtvrté mocnině absolutní (Kelvinovy) teploty. Matematicky vyjádřeno:

$$E = \sigma_0 T^4 \quad [W m^{-2}]$$

kde:  $\sigma_0$  - je Stefanova - Boltzmanova konstanta -  $5,775 \cdot 10^{-8}$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]  
 $T$  - je absolutní teplota [K]

V praxi je ovšem intenzita vyzařované energie nižší, protože žádné těleso v přírodě nemá charakter absolutně černého tělesa. Snižuje se zavedením koeficientu sálání  $\varepsilon$ , který nabývá hodnot teoreticky od 0 do 1. U reálných těles, se hodnota emisního koeficientu nachází v intervalu  $0,03 \div 0,97$ .

Uvedené vztahy jsou pouze základní. V reálných podmínkách je však situace mnohem složitější, základní vztahy jsou upřesňovány zahrnutím dalších faktorů, které emisi a absorpci záření ovlivňují. Nemělo by význam je zde podrobně rozvádět. Uvedeme však aspoň ve zkratce některé z nich, které se dotýkají vztahů v hořlavém souboru.

---

<sup>1</sup> Pozor! Nezaměňovat se třením elektronů o atomy či vazby mezi atomy ve hmotě - ono je to asi složitější.

- Teplo z povrchu zahřátého tělesa je vyzařováno do všech stran. Maximum vyzařování vychází ve směru kolmém. To znamená, že i zde záleží na geometrii povrchu.
- Intenzita vyzařování je závislá na vlnové délce.
- Emisní koeficient je závislý na teplotě a vlastnostech povrchu. Je ovlivněn barvou hmoty - je známým faktem, že světlé povrchy vystavené tepelné radiaci se zahřívají méně než povrchy tmavé. Totéž platí i pro vyzařování tepla. Absorpční, resp. emisní koeficient se při zahřívání materiálů podléhajících tepelné degradaci vždy mění - ve většině případů se s postupem degradace zvyšuje.
- Čím vyšší je teplota vyzařujícího povrchu hmoty, tím je maximum vyzařované energie posunuto ke kratším vlnovým délkám (emitované fotony mají vyšší energii). Tuto skutečnost vyjadřuje Wienův zákon.

Jaderná energie. Tento druh energie nepatří k běžným primárním zdrojům zapálení - musíme ovšem odmyslet výbuchy jaderných náloží, a nebo takové katastrofy, jako byl např. výbuch jaderného reaktoru v Černobylu. Zdrojem tepla jsou v tomto případě procesy probíhající na subatomární bázi, při nichž vznikají tzv. štěpné produkty. Ty představují jednak neutrální atomy nižší atomové hmotnosti, elementární částice a kvanta záření. Tepelná energie vzniká jednak interakcí elementárních částic obrovských energií s okolní hmotou a jednak je obsažena v emitovaných fotonech.

Ve své podstatě je jaderná energie zdrojem nejprimárnějším z primárních. Od vzniku vesmíru v nepřetržité časové řadě až k dnešnímu Slunci - primárnímu zdroji většiny energetických zdrojů na zemi - vyjma právě jaderných. I subatomární (jaderné) procesy mohou být slučovací i rozkladné. Štěpení jader je proces rozkladný, slučování vodíku za vzniku helia, které probíhá ve hvězdách, je jaderná syntéza. Na zemi tento druhý proces zatím nezvládáme.

Tepelná energie. Tepelná energie je konečnou fází případných transformací všech forem energie a je bezprostřední příčinou iniciace procesu hoření. Teplo, jako primární zapalovací zdroj, se vlastně nevyskytuje. Teplo vzniká jako důsledek transformací energie, bez vnější příčiny se žádná hmota nezahřeje (opět s výjimkou jaderných procesů).

\* \* \*

Je-li hořlavé látce dodáváno teplo, dochází k nárůstu jejího tepelného potenciálu. Transport tepla je možný jen z prostředí o vyšší teplotě. Čím je rozdíl teplot (teplotní gradient) vyšší, tím je přenos tepla mohutnější. Množství skutečně předaného tepla z tepelného zdroje do ohřívajícího materiálu závisí na způsobu přenosu a také na materiálových vlastnostech zdroje, příjemce, a také zprostředkujícího média - nejedná-li se o přímý kontakt hořlavé hmoty s horkým povrchem.

Proveďme si jednoduchou bilanci tepelných toků v hořlavém souboru:

$$Q_{\text{dopadající}} = Q_{\text{odražený}} + Q_{\text{akumulovaný}} + Q_{\text{prošlý}}$$

$$Q_{\text{akumulovaný}} = Q_{\text{pohlčený}} + Q_{\text{ztrátový}}$$

Na obrázku 5 je znázorněna bilance tepelných toků v případě jednostranně zahřívání desky. Dopadající tepelný tok je konstantní a působí na omezenou plochu. Protože platí zákon o zachování energie, můžeme napsat bilanční rovnici ve tvaru:

$$Q_{\text{dop}} = Q_p + Q_{\text{odr}} + Q_{\text{ztr}} + Q_{\text{prošlý}}$$

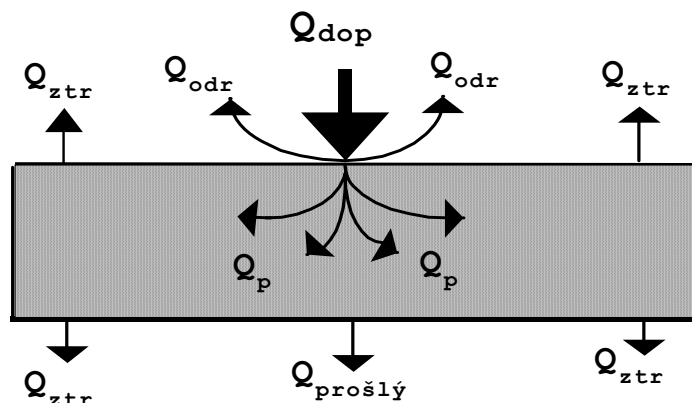
- $Q_{dop}$  - je tepelný tok dopadající na zahříváný materiál
- $Q_p$  - je tepelný tok pohlcený a rozptýlený, zvyšující teplotu materiálu
- $Q_{odr}$  - je tepelný tok odražený
- $Q_{ztr}$  - je tepelný tok odvedený z materiálu do okolního prostředí
- $Q_{prošlý}$  - je tepelný tok prostupující hmotou (uplatňuje se pouze u průteplivých materiálů, je-li dopadající energie ve formě elektromagnetického záření)

Znázorněná tepelná bilance platí pouze tehdy, když v ohřívané látce nedochází k žádným změnám ve složení, tzn. že teplo se spotřebovává pouze na ohřev tohoto materiálu. V případě, že se složení materiálu během ohřevu mění, mění se i energetická bilance systému. Dochází-li např. k vypařování vody, potom část tepla dotuje výparné teplo. Ještě složitější situace však nastane, začnou-li ve hmotě následkem vysoké teploty probíhat rozkladné procesy, při nichž se mění podstata látky.

V této situaci se, vzhledem k uvedenému modelu, změní celá řada výchozích předpokladů. Rozkladné chemické procesy jsou svým charakterem jak exotermní, tak i endotermní povahy. U endotermních procesů se část pohlceného tepla spotřebuje v průběhu rozkladných procesů, a toto teplo již nezvyšuje teplotu zahříváného materiálu - obdobně jako výparné teplo. Exotermicky zabarvené rozkladné procesy naopak zvyšují tepelný obsah a způsobují zvyšování teploty materiálu a jeho další rozklad. Teplo produkované exotermními procesy při rozkladu materiálu nazýváme také vnitřními tepelnými zdroji. Vnitřní tepelné zdroje je pak nutno započítat do bilanční rovnice. Vyčíslení tepla produkovaného vnitřními zdroji je velice obtížné a jsou známa jen přibližná řešení u nekomplikovaných hořlavých souborů. (Blahož a Kalousek <sup>[24]</sup>).

U jednostranně zahříváného materiálu probíhá ohřev nerovnoměrně. Nejteplejší je strana přivrácená k tepelnému zdroji, nejchladnější je naopak strana odvrácená. Rozkladné procesy jsou iniciovány ve hmotě v okamžiku, kdy tato dosáhne určitou teplotu a stane se nestabilní. Tato tepelná nestabilita postihuje zpočátku pouze zahříváný povrch hmoty a jen v minimální tloušťce. Postupným zvyšováním teploty povrchu a prohříváním materiálu, se v oblasti nestability nachází stále větší objem zahřáté hmoty. I v případě, že se charakter rozkladných procesů nemění, tzn. že tepelný efekt reakcí je konstantní, celkové množství tepla produkovaného vnitřními tepelnými zdroji se zvyšuje, protože reaguje větší množství hmoty. Předpoklad, že charakter rozkladných reakcí se nemění, však většinou nebývá splněn. Rozkladem původního materiálu vzniká materiál nový, mající pozmeněné chemické složení a tento materiál se pak rozkládá dále, podle jiných chemických rovnic, s jinými tepelnými projevy. Avšak i v případě, že mechanismus rozkladu zůstává zachován, rozkladné procesy při vyšší teplotě probíhají rychleji a teplo vznikající v daném objemu a čase je větší. Dochází-li ke změně podstaty ohříváného materiálu, výrazně se mění i další parametry látky: tepelná vodivost, měrné teplo, koeficient absorpce a vyzařování, mění se hmotnost látky, její hustota, dochází ke změnám tvaru a objemu látky.

Celá záležitost se dále komplikuje, zakalkulujeme-li do svých úvah vznik plyných produktů. Ty pak jednak z hmoty odvádějí teplo a jednak ovlivňují podmínky přestupu tepla



Obr. 5 Tepelná bilance zahříváného materiálu

od zdroje do hmoty. Je zřejmé, že zde bude záležet na chemickém složení a objemu uvolňovaných plynných zplodin.

\* \* \*

Ve vztahu k zapalované hmotě není nejpodstatnější primární zdroj energie, ale jeho poslední forma, která na hmotu bezprostředně působí.

V případě běžné zápalky, při jejím použití jako zdroje zapálení, je primární energií mechanická energie tření, která ohřeje místo styku zápalky se škrtačí plochou. Chemické reakce iniciované tímto teplem zapálí hlavičku zápalky a od ní se zapálí dřívko. Plamen hořící zápalky (chemická reakce hoření dřeva) je pak bezprostředním zápalným zdrojem.

Zápalné zdroje, podle jejich zásoby energie, dělíme na:

- zdroje krátkodobě působící (např. jiskra, zápalka, cigareta)
- zdroje dlouhodobě působící (plamen kahanu, hořící svíčka)

Podle velikosti plochy, na kterou zápalný zdroj působí, rozlišujeme zdroje:

- působící na malou plochu (běžné malé zápalné zdroje)
- celoplošně, případně celoobjemově působící (sálavé zdroje, horké prostředí)

V návrhu mezinárodní normy ISO (*International Organization for Standardization*) číslo 10093 <sup>[25]</sup>, který vypracovala technická komise ISO/TC61 pro plasty, se zápalné zdroje dělí do pěti tříd.

- **Třída Sm** představuje žhnoucí zápalné zdroje (*Smouldering*). Tato třída je reprezentována zapálenou cigaretou.
- **Třída E** představuje elektrické zápalné zdroje (*Electric*). Tato třída je reprezentována žhaveným drátem a elektrickým obloukem.
- **Třída DF** představuje zdroje s difúzním plamenem (*Diffusion Flame*). Tato třída je reprezentována zápalkou nebo svíčkou.
- **Třída PF** představuje plamenné zdroje, v nichž je spalována předem připravená směs paliva se vzduchem (*Premixed Flame*) - kinetický plamen. Tato třída je reprezentována laboratorním hořákem, letovací lampou apod.
- **Třída R** představuje nekontaktní - tepelně radiační zdroje (*Radiative*). Tato třída je reprezentována radiačními, elektricky nebo plynem vyhřívanými zdroji.

Tato ISO norma dále podrobně specifikuje konkrétní zápalné zdroje výše uvedených tříd.

Pro třídu **Sm** je to konkrétní zdroj - hořící (žhnoucí) cigareta.

Pro třídu **E** dva zdroje představované žhaveným odporovým drátem.

Pro třídu **DF** čtyři zdroje. Jsou to čtyři typy plynových hořáků různého tepelného výkonu.

Pro třídu **PF** také čtyři zdroje o různém tepelném výkonu.

Pro třídu **R** dva zdroje, jeden elektricky vyhřívaný a druhý vyhřívaný plynem.

V normě uvedené, zdroje mají být přednostně používány v nových návrzích zkušebních metodik, zejména pro testování plastů.

Zápalné zdroje používané při testování hořlavých hmot jsou různé povahy. Různé jsou také zapalovací procedury u jednotlivých zkušebních postupů. Důležitou roli přitom hraje:

- Geometrie zapalování. Vzájemná orientace zapalovaného materiálu a zdroje - zapalování vertikálně umístěného materiálu zdrojem umístěným u spodního okraje je účinnější než při zapalování shora.
- Doba zapalování. Někdy jsou materiály zapalovány jen krátce, u jiných metod působí zapalovací zdroj trvale po celou dobu trvání testu. Ve druhém případě zápalný zdroj neslouží pouze k zapálení, ale představuje trvalou tepelnou zátěž studovaného materiálu.
- Plocha zapalování. Používají se zdroje působící víceméně bodově, zdroje lineární, plošné zdroje (působící jednostranně - především tepelně radiační zdroje) a zdroje způsobující ohřev celoplošně (v celém objemu zahřívané hmoty - horké okolní prostředí).
- Způsob zapalování. Většinou se používají samostatné, přímo působící zdroje zapálení. Vyskytují se však kombinované zapalovací procedury - zdroj s menší hustotou tepelného toku slouží k dekompozici paliva (sekundární zápalný zdroj) a další zdroj iniciuje hoření takto vzniklých rozkladných produktů. V tomto smyslu se způsob zapalování můžeme rozdělit na přímý a nepřímý (kombinované zapalování).

## 2.3 Oxidační prostředí

Do reakcí probíhajících při hoření materiálů vstupují chemické látky, které je možno obecně nazvat oxidační prostředky. Nejběžnějším oxidačním prostředkem je kyslík. Jeho obsah ve vzduchu činí 20,95 %. Kyslík je však možno nahradit i jiným oxidačním prostředkem, např. fluorem, chlorem.

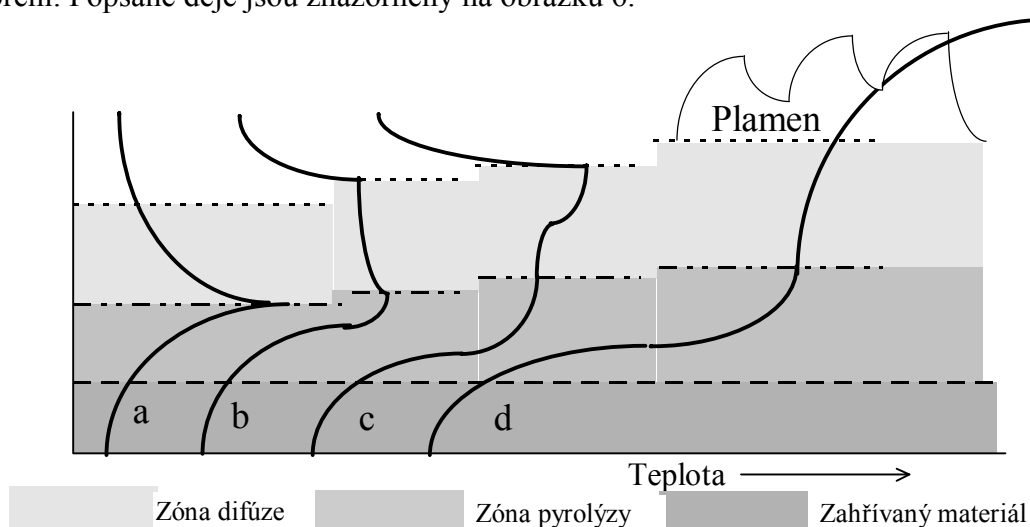
Oxidačně působící látky mají téměř zaplněnou valenční atomovou sféru. U kyslíku, který je v 6. skupině periodické tabulky, najdeme 2 chybějící elektrony, u prvků 7. skupiny (F, Cl, atd.) pak elektron jeden. Vzhledem k tomu, že je pro fluor snazší doplnit valenční orbit než pro kyslík, chová se fluor i chlor v porovnání s kyslíkem jako mohutnější oxidační prostředek. Naštěstí žijeme v kyslíkaté atmosféře, takže se fluoračních a chloračních reakcí nemusíme příliš obávat. Je však nutno o nich uvažovat v souvislostech s bezpečností v chemickém průmyslu, kde jsou halogenační reakce (díky vysoké reaktivitě těchto prvků) velmi častým technologickým postupem. Dále však budeme pod pojmem oxidační prostředí uvažovat pouze prostředí obsahující kyslík.

V reálném prostředí vzdušné atmosféry je kyslík všudypřítomný a jeho koncentrace je dostačující k tomu, aby umožňovala hoření běžných hořlavých hmot. V případě, že by koncentrace kyslíku ve vzduchu byla jiná než stávající, dostávali bychom jiné výsledky požárně technických testů. Schopnost látky reagovat s kyslíkem je podmíněna chemickým složením látky, parciálním tlakem kyslíku a teplotou látky.

Zahříváme-li hořlavou hmotu v prostředí obsahujícím kyslík, dojde za určité teploty k reakci této hmoty s kyslíkem. V některých případech, především při reakci hořlavých prvků s kyslíkem, dochází k oxidaci přímo na povrchu hmoty - oxidaci nepředchází fáze termického rozkladu hmoty na látky jednodušší. To jsou však případy spíše ojedinělé, protože hořlavých prvků je dosti málo - z plynů je to pouze vodík, kapalných prvků je obecně málo a všechny jsou nehořlavé, a v tuhém skupenství to jsou uhlík, síra, fosfor, dále alkalické kovy, kovy alkalických zemin. Hořet však mohou i některé další prvky, zvláště v jemně rozptýleném stavu: kovy 3. hlavní podskupiny, ale třeba i železo, chrom a některé další - tyto látky nazýváme pyroforní.

Vraťme se ale k podmínkám hoření materiálu při normálním obsahu kyslíku ve vzduchu. Jak bylo uvedeno, tuhé hořlaviny se působením tepla přeměňují na hořlaviny v plynném skupenství - mechanismy jejich vzniku jsou znázorněny na obrázku 4 a v tabulce 2. V této

fázi (před iniciováním procesu hoření) nemusí ještě mít složení okolního prostředí, a tedy ani obsah kyslíku, významný vliv. Závisí to ale na mnoha faktorech, především však na složení tuhé hořlaviny (od toho se odvíjí možný způsob rozkladu) a na teplotě povrchové vrstvy materiálu. Oba tyto faktory pak determinují teplotu, množství a složení směsi plyných produktů. Čím vyšší je teplota tuhé hořlaviny, tím více se při rozkladu uplatňuje kyslík - dochází k pomalé oxidaci a v produktech lze nalézt těkavé kyslíkaté uhlovodíky (nejčastěji aldehydy). Na povrchu tuhé hořlaviny se vytvoří pyrolýzní zóna, která má určitou hloubku. Nad povrchem tuhé hořlaviny se vytvoří plynná vrstva - nazvěme ji difúzní zóna - udržovaná stálým doplňováním produktů z pyrolýzní zóny, z opačného směru do ní difunduje vzduch. V difúzní zóně se vytvoří teplotní spád a v opačném směru i kyslíkový koncentrační spád, nejteplejší a nejchudší na obsah kyslíku bude difúzní vrstva v těsném kontaktu s povrchem tuhého paliva. Výška této vrstvy a velikost těchto gradientů bude závislá na složení produktů pyrolýzy a rychlosti jejich tvorby. Vznik difúzní zóny může zpomalit rychlost vzestupu teploty na povrchu paliva. Předpokládejme však, že v důsledku již proběhlého rozkladu paliva vznikla tmavá karbonizovaná vrstva s nižším koeficientem tepelné vodivosti a s vyšší pohltivostí tepelného záření, a proto bude teplota i nadále stoupat. Následkem toho se bude rychlost rozkladných reakcí zvyšovat (mohou být iniciovány i další rozkladné procesy) a bude růst i tloušťka pyrolýzní vrstvy. Zvětší se i tloušťka difúzní zóny a v ní se zvýší teplotní gradient. V difúzní zóně se zvyšuje i rychlost reakcí plyných hořlavín s kyslíkem a začne se vyvíjet teplo. Začnou-li převažovat řetězové oxidační reakce plyných hořlavín, začne teplota v horní vrstvě difúzní zóny prudce růst, až se vytvoří světlo emitující zóna a iniciuje se plamenné hoření. Popsané děje jsou znázorněny na obrázku 6.



**Obr. 6 Průběhy teplot při pyrolýze tuhého paliva**

- Průběh a** Vytvořila se pyrolýzní a difúzní zóna. Vnitřní tepelné zdroje v pyrolýzní ani difúzní zóně nezpůsobují vzrůst teploty, nedochází k významné oxidaci.
- Průběh b** V pyrolýzní zóně se působením vnitřních tepelných zdrojů zvyšuje teplota, oxidace v difúzní zóně se zrychluje. Narůstá tloušťka pyrolýzní a difúzní vrstvy.
- Průběh c** Oxidace v difúzní zóně způsobuje významný vzestup teploty. Nadále narůstá tloušťka pyrolýzní a difúzní zóny
- Průběh d** V difúzní zóně se iniciovalo plamenné hoření.

Některé hořlavé látky jsou schopny hořet i v prostředí neobsahujícím oxidační prostředek. Nelze však říct, že oxidační prostředek k hoření nepotřebují. Takové látky tedy musí

mít oxidační prostředek přítomen ve své struktuře. Mohou to být chemicky homogenní látky - např. nitroglycerin, trinitrotoluen a pod., nebo směsi - např. střelný prach, tuhé pohonné hmoty do raket, pyrotechnické slože atd. Tyto látky jsou jistě z mnoha hledisek velmi zajímavé, převážnou většinu z nich však není možno studovat s použitím běžných požárně technických zkušebních metod. Podmínkám a způsobu hoření těchto látek proto nebude věnována pozornost.

\* \* \*

Proces hoření z pohledu oxidačního vrcholu trojúhelníku hořlavého souboru dělíme v zásadě na dva způsoby. Hoření řízené palivem a hoření řízené oxidačním prostředím.

Hoření řízené palivem. Oxidačního prostředku je dostatek, rychlost produkce tepla a další propagace procesu je závislá na rychlosti pyrolýzy. Za této situace je všechno vyprodukované plynné palivo alespoň částečně zoxidováno. Hoření bývá dokonalejší, vzniká málo sazí.

Hoření řízené oxidačním prostředkem. Z pyrolýzní zóny přichází více paliva, než je možno v horké zóně zoxidovat. Hoření je pomalejší a méně dokonalé, ve spalných produktech je velké množství nezoxidovaného plynného paliva a uhlíkatých látek.

Oxidační mohutnost vzduchu je dostačující pro mnohé látky, které pak nazýváme látkami hořlavými - hořlavými. V rámci studia procesů volného hoření v pozemských podmínkách nemá valný smysl zabývat se hořením materiálů v prostředí se zvýšeným obsahem kyslíku. Těmto otázkám se dnes věnuje především NASA, která řeší požární bezpečnost na palubách amerických kosmických objektů s lidskou posádkou, ve kterých se k dýchání používá kyslíkodusíková směs se značně vyšším obsahem kyslíku. NASA ale provádí i další zajímavé výzkumy, např. hoření materiálů v podmínkách beztížného stavu.



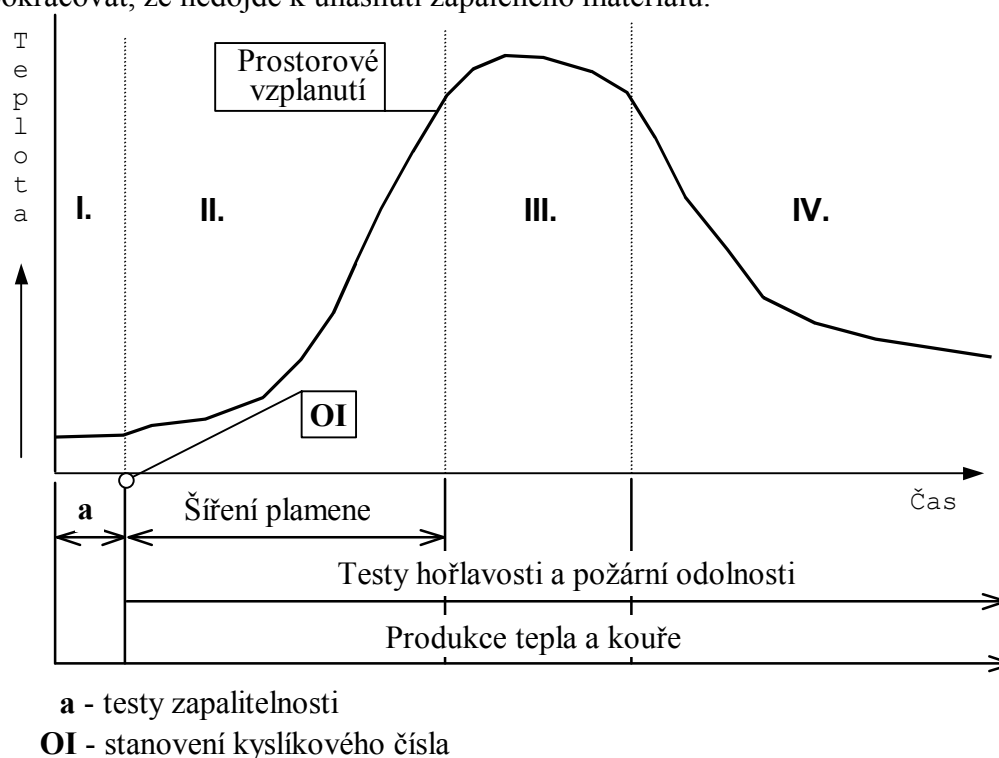
### 3 Laboratorní zkoušky tuhých hořlavých materiálů

Požární zkušebnictví se zaměřuje na následující oblasti:

1. Posuzování vznětlivosti - zapalitelnosti materiálů
2. Posuzování hořlavosti
3. Posuzování tvorby kouře

Proces zahřívání hořlavého materiálu a jeho následné hoření se často pro názornost převádí do grafické podoby, obrázek 7. Předpokládá se, že hoření probíhá v uzavřeném prostoru, v němž je omezené množství hořlavých hmot. V procesu rozvoje požáru rozlišujeme 4 fáze.

V **první fázi** působí zápalný zdroj na hořlavý materiál. Materiál se zahřívá, dochází k jeho rozkladu a na konci této fáze je materiál zapálen. Předpokládá se, že proces hoření bude pokračovat, že nedojde k uhasnutí zapáleného materiálu.



Obr. 7 Fáze rozvoje požáru v uzavřeném objektu

Ve **druhé fázi** je dominantním jevem šíření zóny hoření. Vznikajícím teplem se postupně zahřívá další, dosud nehořící materiál, což umožňuje jednak plošné šíření plamene, a současně prohříváním hořícího materiálu do hloubky se zvyšuje množství produkovaných hořlavých zplodin a hoření se stává intenzivnější. Teplota v prostoru stoupá. Rychlost hoření, nebo jinak řečeno, rychlost uvolňování tepla je limitováno rychlostí pyrolýzy - hoření je řízeno palivem. Uvažujeme-li uzavřený prostor, pak zásoby kyslíku jsou v něm omezené a s pokračujícím hořením se jeho koncentrace snižuje. V důsledku toho jsou oxidační reakce bržděny, současně se zpomaluje i šíření plamene. Předehřátý materiál, který by za normální koncentrace kyslíku hořel plamenem, za této situace nehoří a hořlavé produkty rozkladu se hromadí v prostoru - rychlost hoření je řízena oxidačním potenciálem prostředí. Za této situace může dojít k prudkému, někdy i skokovému rozšíření plamene na celý povrch hořlavého materiálu, provázenému rychlým vyhořením nashromážděných plynných hořavin v prostoru. Příčinou toho

může být náhlé vniknutí okysličovadla do prostoru požáru, způsobené nejčastěji porušením uzavřenosti objektu. V tom okamžiku také prudce vzroste teplota v objektu. Tento jev se nazývá prostorové ventilační vzplanutí, nebo také prostorové ventilační vznícení (což je však méně přesný termín) - v cizí literatuře se používá termín *backdraught*. Vysoká teplota horní vrstvy kouře může iniciovat jiný mechanismus rychlého rozšíření požáru. Je to tzv. prostorové tepelné vzplanutí (*flash-over* nebo *over-flash*, psáno také bez spojovníku). Teplota kouře musí dosáhnout hodnoty cca 600 °C, při zpětném tepelném toku na povrch materiálu o hustotě 30 kW.m<sup>-2</sup>, přísun kyslíku není v tomto případě nutný. Možnosti dalšího zvyšování teploty v prostoru se stávají omezené, protože hořící plocha se již dále zvětšovat nemůže a postup pyrolýzní zóny do hloubky materiálu se zpomaluje. Hoření přechází do kulminační fáze.

**Třetí fáze**, fáze ustáleného hoření, je charakterizována víceméně konstantní rychlostí produkce tepla. Hořlavé materiály prohořívají do hloubky, místy plamenné hoření přechází ve žhnutí.

**Čtvrtá fáze** dokumentuje dohořívání hořlavé látky. Plamenné hoření postupně ztrácí na intenzitě, hořící plocha přestává být souvislá. Plamenné hoření prochází do stádia žhnutí.

Tento obrázek tedy dokumentuje průběh hoření. Nám zde slouží pro znázornění oblastí, které pokrývají jednotlivé obory požárního zkušebnictví. Jak je vidět, požárně - technickými materiálovými testy je samostatně pokryta pouze I. a II. fáze. V první fázi jsou to testy zapalitelnosti. Ve II. fázi testy pro hodnocení tendence materiálu k šíření plamene. Další fáze, tedy III. a IV. nejsou samostatně hodnoceny žádným testem. Je však zřejmé, že rozhodujícím způsobem ovlivňují výsledky testů založených na sledování produkovaného tepla a kouře. Fáze III. má také významnou roli v testech zaměřených na požární odolnost stavebních konstrukcí a prvků, neboť v jejím průběhu se uvolní převážná většina z celkově vyprodukovaného tepla. Těmito testy se však tento text nezabývá.

Délka jednotlivých fází závisí na charakteru hořlavých látek a ne jejich uspořádání v prostoru. Při požárech tavících se materiálů (a také kapalných paliv) bývá nejdélsí fáze III., zatímco II. a IV. fáze jsou velice krátké, resp. téměř zanikají. U karbonizujících materiálů je III. fáze naopak velmi krátká, nejdélsí bývá fáze IV.

Výsledky některých testů umožňují kategorizaci materiálů a jsou využívány pro projektování budov a vybavování objektů. Výsledky testů mohou být také podkladem pro oceňování bezpečnostního rizika. Zde je však nutná značná opatrnost, protože možnosti interpretace výsledků zkoušek jsou značně omezené. I v odborné veřejnosti je možné často zaslechnout názory, jak který z testů se blíží reálným podmínkám požáru. Navrhovatelé zkušebních norem však musí sledovat především kvalitu výsledků, to ale vždy vylučuje možnost přiblížení se reálným podmínkám požáru. Kvalitní výsledky lze dosáhnout, vytvoří-li se pro zkoušku prostředí co nejlépe izolované od okolí, a s co nejjednoznačněji definovanými podmínkami uvnitř systému. Mimo jiné je nutno definovat geometrii prostoru, druh a parametry zápalného zdroje a způsob jeho aplikace, tvar a množství zkušebního vzorku materiálu a způsob jeho kondicionování, aerodynamické poměry ve zkušebním zařízení atd. Kvalita zkušebního postupu se projeví v dobré reprodukovatelnosti a opakovatelnosti výsledků zkoušky. Vzhledem k tomu, že požáry mají živelný průběh ovlivňovaný mnoha, i měnícími se faktory, je jakákoli snaha o blízkost podmínek testů s reálnou požární situací zcestná. Kvalitní zkušební normy, mezi než je možno zařadit i metodiky ISO, na toto upozorňují textem tohoto významu:

**Upozornění:** *Výsledky žádného požárně technického testu nelze jednoznačně vztahovat k reálnému požáru. Požární testy se provádějí v podmínkách daných zkušebními postupy, které v přirozených podmínkách hoření nemohou být splňovány.*

Ve většině českých technických zkušebních norem takovéto upozornění chybí.

### 3.1 Stanovení zapalitelnosti

Zapalitelnost tuhých materiálů je definována jako schopnost přechodu hořlavé hmoty působením tepelného zdroje do nestabilního stavu, ve kterém jsou iniciovány a probíhají termooxidační procesy projevující se emisí světla a tepla. Posuzujeme-li vznětlivost materiálů, často si nevšímáme dalšího vývoje procesu hoření po zapálení. Zajímá nás pouze ten limitní stav hořlavého souboru, při němž pozorujeme počátek hoření. Zapalitelnost nejčastěji hodnotíme jako určitou mezní teplotu materiálu nebo jeho okolí, nebo tepelný výkon, který je nutno dodat zapalovanému materiálu.

Nejlépe teoreticky definovaný parametr, vhodný pro popis procesu zapálení, je aktivační energie dekompozice nebo zapálení materiálu. Potíží je však v tom, že její praktické stanovení je velice obtížné, navíc je ji možno stanovit pouze jako hodnotu materiálovou.

Proces zapalování již byl částečně popsán výše. Zde je doplněn obrázkem se znázorněnými kritickými teplotami, určujícími úspěšnost zapálení - obrázek 8.

Zkoušený materiál vložíme do prostředí s teplotou  $T$ . Sledujme průběh teploty materiálu **1**. Tento materiál se ohřeje na teplotu prostředí a tu si podrží. K jeho zapálení nedojde. Materiál **2** se ohřeje na teplotu, při níž se aktivují vnitřní tepelné zdroje. Toto vznikající teplo ohřeje materiál na teplotu vyšší, než je okolní. Avšak produkované rozkladné zplodiny nejsou v těchto podmínkách samozápalné, a proto po vyčerpání vnitřních zdrojů se teplota sníží zpět na teplotu okolí. Materiál číslo **3** se zahřívá podobně jako materiál **2**. Avšak při teplotě, na kterou se vnitřními zdroji zahřeje, uvolňuje dostatečné množství hořlavých plynů, které jsou v daných podmínkách samozápalné. Materiál **3** se vznítí.

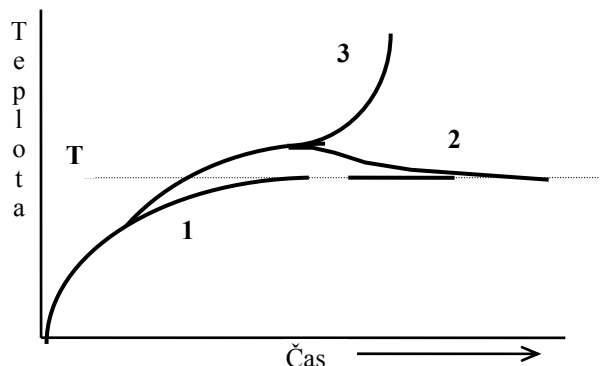
Výše již také byla zmínka o samovznícení. Mám zato, že proces samovznícení se od „normálního“ vznícení nijak významně neliší, a že jde vlastně o proces jeden. Rozdíl je jen v tom, že (u samovznětlivých materiálů) zvýšení teploty, které musí zabezpečit vnitřní tepelné zdroje, je vždy mnohem vyšší než u normálních materiálů. Současně i teplo nutné pro iniciaci vnitřních tepelných zdrojů je nižší. V případě bílého fosforu je to teplota, které může být dosaženo i v normálních podmínkách. Přesto ani v tomto zvláštním případě nelze říci, že fosforu nebylo nutno při vznícení dodat žádné teplo. Zápalné teplo je již obsaženo ve hmotě samé a k jejímu zapálení dojde, doplní-li se hořlavý soubor vhodným oxidačním prostředkem. Teplota vznícení fosforu je přibližně  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

V této kapitole jsou uvedeny jen testy materiálové. Testy určené pro stanovení zapalitelnosti výrobků, např. hraček, textilních podlahových krytin, střešních pláštů atd. zde uvedené nejsou.

#### 3.1.1 Setchkinův test - ČSN 64 0149

Nejrozšířenější metodou pro stanovení parametrů zapalitelnosti tuhých materiálů je Setchkinův test (zkušební zařízení je na obrázku 9). Ten umožňuje stanovit:

A. **Teplotu vzplanutí** (FIT - *Flame Ignition Temperature*). Teplota vzplanutí je nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem zkoumaného vzorku materiálu, při které se uvolní z materiálu dostatečné množství rozkladných zplodin, které s proudícím vzduchem vytvoří směs schopnou zapálení pomocí vnějšího plamenného zdroje.

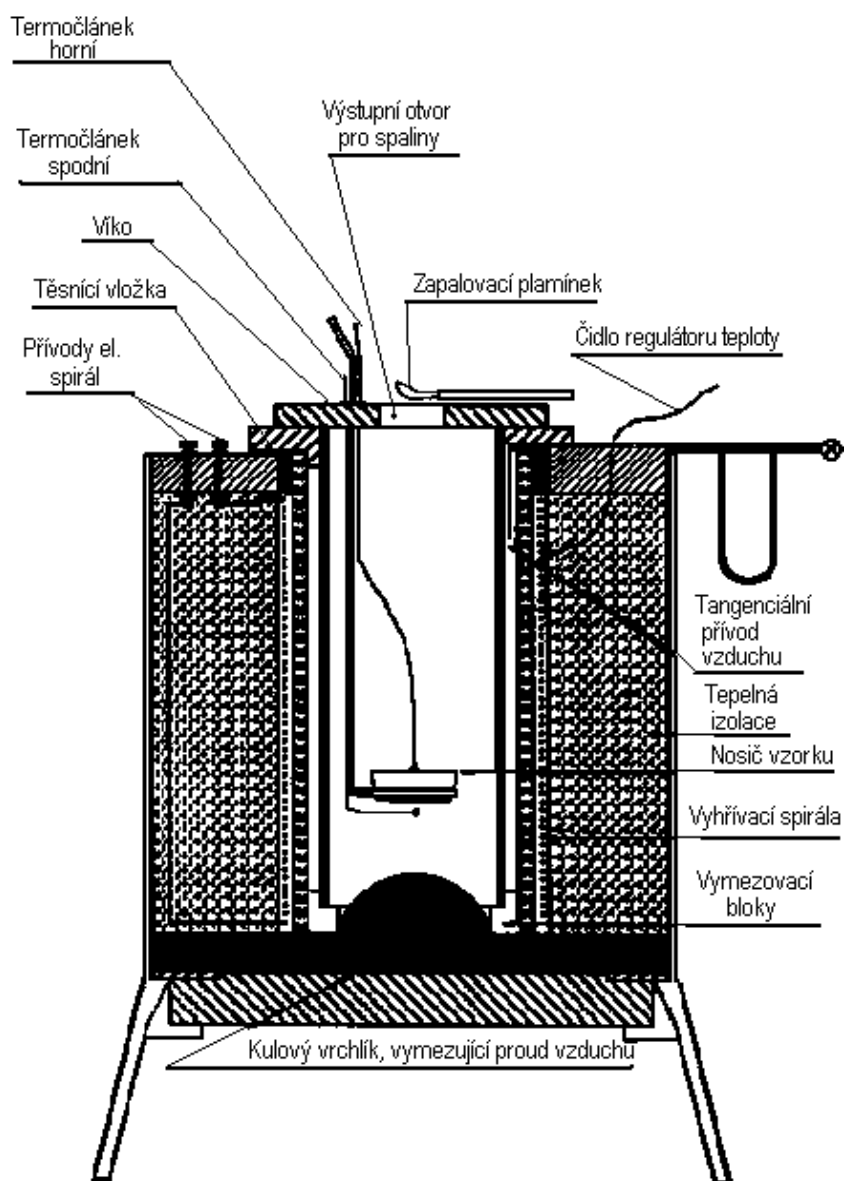


Obr. 8 Mezní teploty při stanovení vznícení materiálu

B. **Teplotu vznícení** (SIT - *Spontaneous Ignition Temperature*). Teplota vznícení je definována podobně, s tím rozdílem, že vzniklé zplodiny rozkladu jsou samozápalné a k iniciaci hoření dochází bez použití vnějšího pomocného zdroje.

C. **Teplotu žhnutí** (GT - *Glowing Temperature*). Teplota žhnutí je definována jako nejnižší teplota vzduchu, při které se iniciuje bezplamenné hoření zkoušeného materiálu. Teplota žhnutí se podle ČSN stanovuje v případě, že do 750 °C není zaregistrováno vzplanutí nebo vznícení materiálu.

Je nutno si ovšem uvědomit, že dochází-li u materiálu ke žhnutí při teplotách pod hodnotou FIT a SIT, existuje jisté riziko, že materiál ve stádiu žhnutí se může rozhořet plamenem při zlepšených podmínkách přístupu kyslíku, a nebo jako žhnucí může působit jako iniciátor hoření snadněji zapalitelného materiálu. Žhnutí je nejčastěji pozorováno na celulózových materiálech, avšak i některých plastech (s vysoce zesíťovanou strukturou nebo plněných celulózovým materiálem).

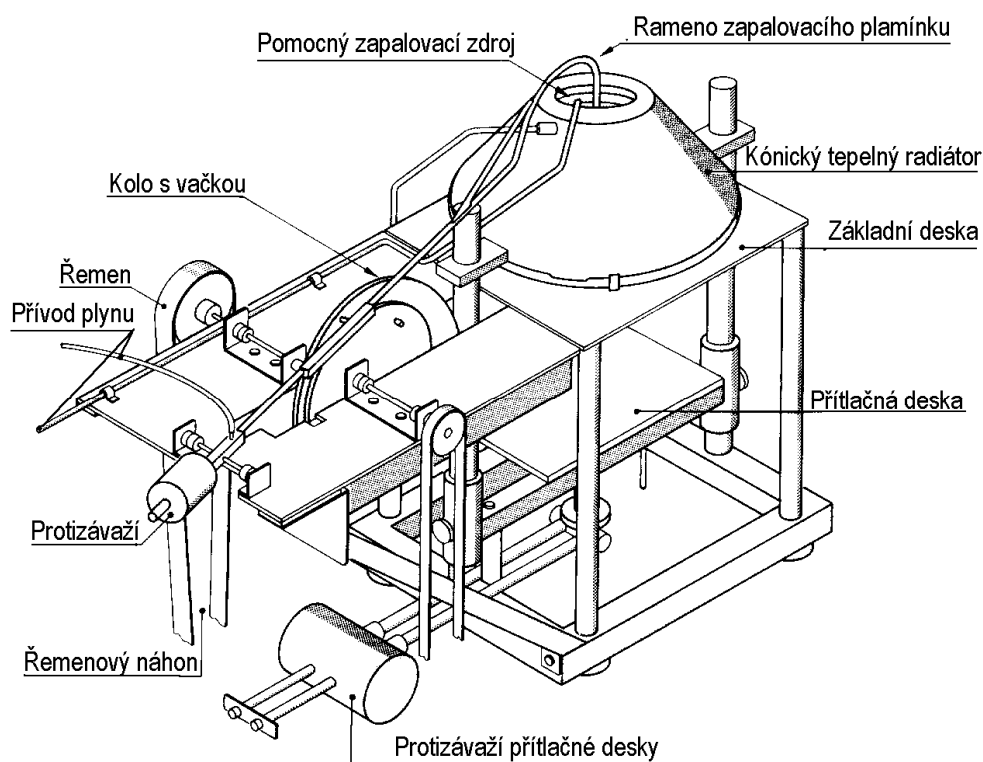


Obr. 9 Řez pecí pro stanovování vznětlivosti materiálů (ČSN 64 0149)

Tato zkouška se provádí v elektricky vyhřívané peci. Konstrukční řešení pece zabezpečuje, že na zkoušený materiál nepůsobí sálavé teplo vyhřívaného povrchu pece, ale jen teplý vzduch, který proudí okolo studovaného materiálu konstantní rychlostí. To znamená, že při vyšší teplotě je do pece vpouštěno menší objemové množství vzduchu než při teplotě nižší. Důsledkem toho je však také to, že rozkladné zplodiny z materiálu, zkoušeného při nižší teplotě, jsou protékajícím vzduchem ředěny více než při vyšší teplotě vzduchu, při které jsou rozkladné reakce rychlejší. Teplota vzduchu je snímána termočlánkem umístěným 1 cm pod miskou se vzorkem. Tato metoda je popsána v ČSN 64 0149 <sup>[26]</sup>, vychází však z ISO 871 <sup>[27]</sup>.

### 3.1.2 Metoda ISO 5657

Další metoda - ISO 5657 <sup>[28]</sup> - umožňuje testovat zapalitelnost tuhých materiálů pomocí zdroje sálavého tepla. Je určena pro testování stavebních materiálů, umožňuje měření i vrstvených hmot složených z různých druhů materiálů. Sleduje se zde čas do vzplanutí materiálů, které je iniciováno zapalovacím plamínkem, který je v intervalu 5 s sklápěn nad exponovaný povrch studovaného materiálu. Tato metodika nepředpokládá stanovování vznětlivosti materiálů bez použití zapalovacího plamínku. Jednak proto, že použitý radiální zdroj neposkytuje k tomu dostatečný tepelný tok, ale i proto, že je zajímavější zjistit kritické hodnoty tepelných toků, při kterých se materiál zahřeje natolik, že jej lze zapálit pomocným tepelným zdrojem - plamínkem.



Obr. 10 Zkušební zařízení podle ISO 5657

Tepelná energie absorbovaná testovaným materiálem se spotřebovává na jeho ohřev, a po dosažení určité teploty i na jeho rozklad. Zplodiny tepelného rozkladu, dosáhnou-li nad povrchem materiálu určité koncentrace, jsou zapáleny plamenem pomocného hořáčku. Zkouška se provádí při různých úrovních tepelně radiálního toku. Maximální hustota tepelného toku kónického radiátoru je  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . S klesající hustotou tepelného toku dopadajícího na materiál se prodlužují časy do zapálení, a od určité hustoty dopadajícího tepelného toku se již materiál nezapálí. Výstupem z tohoto testu není tedy jednoduchá číselná hodnota,

ale vztah mezi tepelnou expozicí materiálu a dobou do jeho zapálení a údaj o bezpečném tepelně radiačním toku. Tato metodika u nás zatím nebyla zařazena do soustavy ČSN. Na Slovensku je platná pod označením STN ISO 5657 [29].

\* \* \*

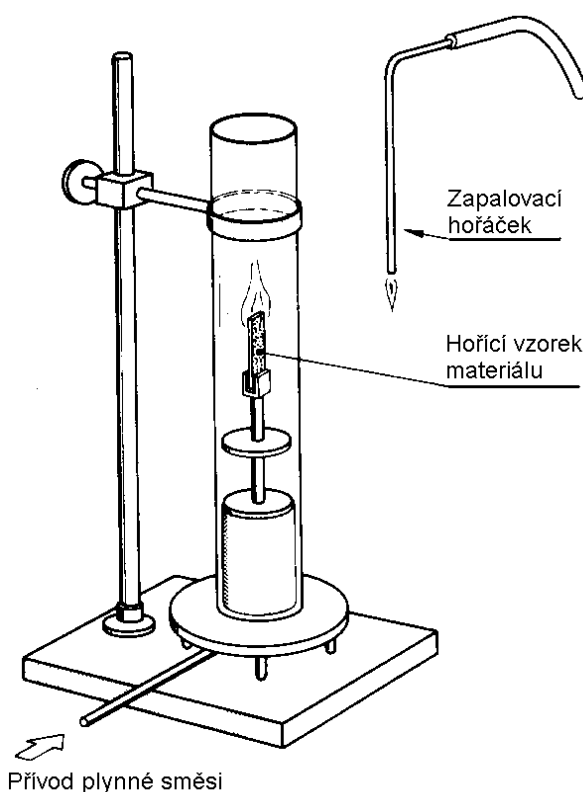
Na konci I. fáze (obr. 7) dochází k zapálení materiálu. Jak bude proces probíhat poté, bude závislé na existujících konkrétních podmínkách. Především na charakteristice zapalovacího zdroje, na oxidační schopnosti okolní atmosféry a samotném materiálu. Materiál může hořet dále, potom se bude rozšiřovat zóna hoření, a nebo se hoření přeruší. Druhá možnost se stane pravděpodobnější, dojde-li k přerušení dodávky tepla zapalovacím zdrojem. Možnost studia podmínek hoření materiálu v okolí bodu zapálení, umožňuje metoda pro stanovení kyslíkového čísla. Tuto metodu do požárního zkušebnictví zavedli Fenimore a Martin [30] na konci 60. let.

### 3.1.3 Kyslíkové číslo (Oxygen Index Test)

Kyslíkové číslo je nejnižší koncentrace kyslíku ve směsi s dusíkem, při němž materiál hoří definovaným způsobem. Jak již z definice vyplývá, zkouška se provádí v atmosféře s nastavitelným obsahem kyslíku. Vzorek zkoušeného materiálu ve svislé poloze se zapaluje plamínkem plynového hořáku na horním konci. Tvar a rozměry zkušebních vzorků jsou stanoveny normou. Zkoušený materiál je obtékán kyslík/dusíkovou směsí proudící skleněným válcem konstantní rychlostí směrem vzhůru. Po zapálení materiálu (max. 30 s) se odstraní zapalovací plamínek a sleduje se další průběh hoření.

Aby byla možná další propagace hoření zkoušeného materiálu po přerušení dodávky vnějšího tepla, je nutné, aby teplo uvolněné v zóně hoření bylo dostatečné. Připomeňme, že hoření probíhá v poloze pro materiál nejméně vhodné - ve směru shora dolů, a také, že při zapalování se materiálu dodává minimum energie nutné pro jeho zapálení. Další případné šíření plamene, resp. procesy s tím spojené, musí být energeticky pokryty teplem hořícího materiálu. Množství vznikajícího tepla je v tomto případě závislé pouze na koncentraci kyslíku v prostředí, v němž hoření probíhá. Kyslíkové číslo materiálu je vyjádřeno koncentrací kyslíku, při níž materiál po zapálení do 3 minut uhasne, avšak při minimálním zvýšení koncentrace kyslíku bude hoření pokračovat dále. Jinak řečeno - při koncentračních podmínkách kyslíkového čísla není materiál schopen samovolného šíření plamene, a přeneseno do schématu průběhu požáru: nenastane II. fáze hoření - propagace hoření.

Kritérium tříminutového hoření není vždy aplikovatelné. Především u materiálu v podobě fólií nebo lehčených materiálů a také tavících se materiálů, které hoří velmi rychle, se sleduje vzdálenost, kterou překoná zóna hoření. Konečné stanovení hodnoty kyslíkového čísla zkoušeného materiálu se provádí statisticky pomocí Dixonova kritéria. Tento způsob vyhodnocování byl



Obr. 11 Schéma stanovení kyslíkového čísla

zaveden pro jednoznačnější definování výsledku, zejména pro méně homogenní nebo nekonstantně hořící materiály, zanechávající objemné uhlíkaté zbytky.

Kyslíková čísla běžných materiálů se nacházejí v rozmezí 17 - 40. Poměrně značné množství materiálů má kyslíkové číslo vyšší než 21, což přibližně odpovídá obsahu kyslíku ve vzduchu. Bylo by však hlubokým omylem domnívat se, že tyto materiály ve vzdušné atmosféře obecně nebudou hořet. Za samozhášivé jsou někdy označovány materiály až s kyslíkovým číslem 27 a vyšším.

Úpravou aparatury pro stanovení OI se stanovuje kyslíkové číslo za zvýšené teploty a tzv. teplotní index materiálu. Ten je definován nejnižší teplotou zkušební atmosféry, v níž zkušební vzorek materiálu hoří definovaným způsobem. Relevantní je samozřejmě jen u materiálů s OI vyšším než 21, a z těch jen u materiálů, které se při takových teplotách netaví. Stanovení kyslíkového čísla je popsáno v ČSN ISO 4589-2 <sup>[31]</sup> (dříve ČSN 64 0756), v ISO 4589-2: 1996 <sup>[32]</sup> a v mnoha dalších národních normách. Je to jedna z nejrozšířenějších zkušebních metod, současně je to metoda velice univerzální a její použitelnost není zdaleka omezena jen na syntetické polymery. Teplotní index ani kyslíkové číslo za zvýšené teploty v ČR zavedeny nejsou, jejich stanovení je uvedeno v ISO 4589-3: 1996 <sup>[33]</sup>.

### 3.2 Stanovení hořlavosti na základě šíření plamene

Hořlavost materiálů je posuzována na základě vnějších projevů procesu hoření. V praxi jsou využívány dva principy:

- **Hodnocení tendence šíření zóny hoření**
- **Hodnocení uvolňovaného tepla**

Má-li proces hoření po zapálení materiálu pokračovat, musí být tepelná bilance hořlavého systému kladná a rostoucí. Tato podmínka potom umožní další šíření plamene. Limitní rovnovážný stav, vyjádřený koncentrací kyslíku, představuje pro daný materiál jeho hodnota kyslíkového čísla. V oblasti doprava od této meze, tedy v oblasti kladné tepelné bilance, se nachází hořlavý soubor, který umožňuje další propagaci hoření. Markantní vnější charakteristikou této situace je právě proces šíření plamene.

Testů hořlavosti materiálů, kterými se hodnotí schopnost materiálů šířit plamen, je poměrně hodně. Je to dáno především tím, že žádná z existujících metod není univerzální. Nelze totiž navrhnout zkušební postup, který by poskytoval parametr šíření plamene jako charakteristikou materiálovou. Vždy se jedná o zkoušky určené pro určité tvarové modifikace nebo oblasti použití materiálů. Máme tak testy, jimiž určujeme např. hořlavost fólií, textilních materiálů, podlahových krytin, deskových materiálů a stavebních materiálů a jejich povrchových úprav, elektrických kabelů a pod. Potřeba zavedení rozdílných metod pro stanovení parametrů šíření zóny hoření různých tvarových modifikací materiálů vychází z nutnosti použití rozdílných zdrojů zapálení. Je logické, že např. pro testování fólií nebo textilních materiálů se nebude příliš hodit zdroj s vysokým tepelným výkonem, který je naopak potřebný pro stanovení této charakteristiky pro stavební nebo deskové materiály. V této oblasti požárního zkušebnictví máme proto někdy možnost výběru nejvhodnější metody, např. volbou charakteru iniciačního zdroje - buď plamenného, tepelně radiačního, nebo i kombinovaného (u deskových materiálů).

V dalším textu jsou popsány a diskutovány následující zkušební metody:

ČSN 64 0757 pro fólie <sup>[34]</sup>

ČSN 80 0824 pro textilní materiály <sup>[35]</sup>

ČSN 73 0863 pro stavební hmoty <sup>[36]</sup>

ČSN 64 5464 pro lehčené plasy <sup>[37]</sup>

ISO 5658-2: 1996 pro konstrukční materiály <sup>[38]</sup>

ISO 9237 pro podlahové krytiny [39]

ASTM D3806 pro deskové materiály [40]

Mimo uvedených norem existují v této oblasti zkoušení i další, ty však nejsou podle mého názoru v ČR ani v mezinárodním měřítku pro hodnocení materiálů často používány. Nepřihlížím ani k metodám zaměřeným výhradně pro specifickou oblast použití, např. metoda pro hodnocení šíření plamene po povrchu střešních pláštů, nebo již výše zmíněných elektrických vodičů. Vybrané metody jsou univerzálnějšího použití.

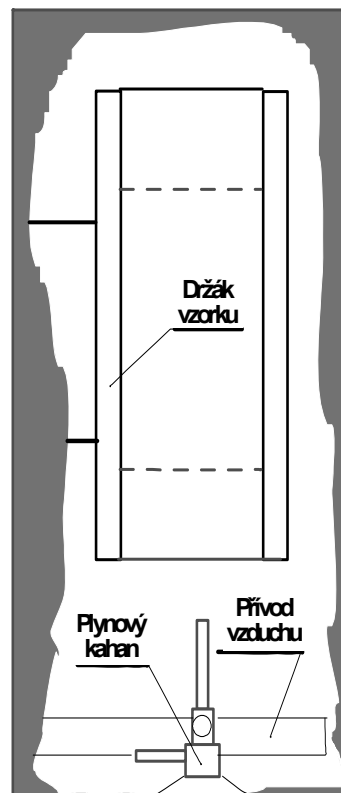
Mezi hodnotícími kritérii, které jsou pro většinu metod v zásadě stejné, jsou údaje charakterizující míru rozšíření zóny hoření a rychlost jejího šíření, nebo povrchovou teplotu materiálu a minimální tepelný tok umožňující propagaci hoření.

Bylo již řečeno, že odlišnosti v testovacích aparaturách najdeme u zapalovacích zdrojů. V uvedených metodách se objevují 2 typy: zdroje plamenné (různého výkonu) a zdroj je sálavé, případně jejich kombinace. Rozdílnosti jsou navíc i ve způsobu zapalování, v poloze vzorku zkoušeného materiálu a ve vzájemné poloze zápalného zdroje a zkoušeného materiálu. Specifické odlišnosti jsou popsány u jednotlivých probíraných metod.

### 3.2.1 ČSN 64 0757 - Test hořlavosti fólií

#### Popis zařízení a zkušební postupu

Zkoušený vzorek materiálu je ve svislé poloze, je zapalován na spodním okraji plamenem plynového kahanu. Výkon tepelného zdroje je definován průměrem hořáku a výškou plamene. Není uveden průtok plynu a není tedy definován ani jeho tepelný výkon. Plamen zápalného zdroje působí na spodním konci zkoušeného materiálu. Špička plamene dosahuje spodního okraje materiálu. Hořák se dá sklopit z pracovní svislé polohy o 90° do polohy horizontální, ve které teplo zápalného zdroje přímo na zapalovaný materiál nepůsobí. Zkušební zařízení je na obrázku 12. Zkouška se provádí v komoře z ocelového plechu se čtvercovou základnou o hraně 300 mm a výšce 800 mm, ve které je umožněno volné proudění vzduchu. Nasávací otvory jsou prakticky po celém obvodu základny komory. Při hoření materiálu tak v komoře vzniká komínový efekt podporující šíření plamene. Zkušební vzorek materiálu má délku 450 mm, jeho šířka je dána rozměry držáku vzorku a je 90 mm. V držáku jsou ve vzdálenosti 75 mm od obou konců, tedy nahoře a dole, umístěny značky v podobě napnutých drátů. Tyto značky vymezují sledovanou délku zkušební vzorku - 300 mm. Po zapálení vzorku se hořák sklopí a sleduje se postup plamene. U této metody se nesleduje vrchol plamene, jak je to běžnější u ostatních metod, ale spíše základna plamene; konkrétně zóna uhelnatění materiálů. Jakmile zóna uhelnatění postoupí na spodní značku, začíná se sledovat čas; měření času se ukončí, jakmile se sledovaná oblast přesune k horní značce. Vyhodnocuje se celkový postup plamene, a dosáhne-li oblast uhelnatění horní značky, pak i rychlost naměřená na sledovaném 300mm úseku vzorku.



Obr. 12 Test hořlavosti fólií

ČSN 64 0757 vychází z normy ISO/R 1326, podle které je na základě zaznamenaného postupu hoření možno určit třídu materiálu:



- 3. třída - hoření se rozšíří na celou délku materiálu
- 2. třída - hoření se přeruší mezi kontrolními značkami
- 1. třída - hoření nepřekročí spodní značku, nebo se ani nezapálí do 15 sekund.

Pro třídu 3. se doplní rychlost hoření. Pro třídu 2. se uvede délka vyhořelé části a doba hoření.

### Diskuse

Sledování zóny uhelnatění je u mnoha materiálů velice ztížené. Předně, mnohé plasty neuhelnatí, některé další, i když uhelnatí ale jsou tmavé barvy - pak je určení hranice uhelnatění spíše intuitivní, což zanáší do výsledků značné nepřesnosti. Termoplastické fólie mají často tendenci se při zahřívání smršťovat. V těchto případech dochází k situaci, že zkoušený materiál smrštěním unikne z horké oblasti nad plamenem a nebo se vytaví a vůbec nedojde k jeho zapálení. To je případ fólií z PE nebo PP, což jsou jednoznačně v malých tloušťkách snadno zapalitelné materiály. I když se smršťující materiály podaří zapálit, během pokusu se snadno vysmeknou z držáku a pak, protože se různě a náhodně mění jejich tvar, neprobíhá hoření za standardních podmínek. U fólií, které teplem měknou a karbonizují, se zase stává, že hořící kusy materiálů odpadávají. Hoření se pak stává velice nerovnoměrné. S odpadnutím hořící části vzorku se skokově sníží množství tepla v zóně hoření. Okamžik odpadnutí i objem utržené části vzorku je spíše náhodný. Vždy však potom dojde ke snížení intenzity a zpomalení hoření, často i k uhasnutí vzorku. Takovýto průběh pokusu je nutno považovat za charakteristický pro daný materiál a ze série naměřených hodnot jako výsledek dávat nejméně příznivou hodnotu - největší rozšíření, případně nejvyšší dosaženou rychlost hoření.

Subjektivní chyba obsluhy vznikající v případě obtížně pozorovatelné zóny uhelnatění by bylo možno odstranit změnou hodnotícího kritéria. Místo zóny uhelnatění sledovat čelo plamene. To by bylo ovšem velmi obtížné prosadit, protože by nové výsledky byly s těmi původními neporovnatelné. Je to však podle mého názoru chyba v metodice. U zjevně hořlavých materiálů, které se nepodaří zapálit, je nutné do zkušebního protokolu uvést, že tato metoda není vhodná pro ten který materiál. Přestože metodu nelze aplikovat na poměrně značné množství běžně vyráběných fólií, není to v textu normy nikde uvedeno.

### **3.2.2 ČSN 80 0824 - Test hořlavosti textilních materiálů**

Hodnotícím kritériem je zde opět tendence materiálů k šíření plamene po zapálení.

#### **Popis zařízení a zkušební postupu**

Zdrojem zapálení je nesvítilivý plamen hořáku, v němž hoří směs plynu s přisávaným vzduchem. Výška plamene se nastavuje na 4 cm, přičemž je pro zviditelnění plamene doporučováno jeho dopování vhodným kovovým kationem. Doba zapalování se nastavuje od 3 do 15 sekund, je řízena pomocí spínače a elektromagnetického ventilu na přítoku plynu. Zkušební vzorky materiálu mají délku 450 milimetrů, jejich šířku vymezuje držák na cca 70 mm. Držák vzorku je přestavitelný do dvou alternativních poloh. V základní poloze je zkoušený materiál upnutý pod úhlem 45° a je zapalován na svém spodním okraji. Hořák je v tomto případě kolmý a ústí hořáku je 20 mm pod spodním okrajem vzorku. Při druhém možném uspořádání zkoušky je vzorek s nosičem v poloze svislé a je zapalován plamínkem hořáku skloněným pod úhlem 45°.

Postup plamene je zaznamenáván pomocí přepalujících se nití, které jsou napnuty těsně nad povrchem studované textilie, kolmo na podélnou osu vzorku. Nítě ovládají elektrické spínací kontakty. Podél vzorku je celkem 8 kontaktů, které pak umožňují sledovat měnící se rychlost šíření plamene i na menších úsecích. Rozhodujícími jsou však kontakty první a poslední, jejichž příslušné nitě vymezují měřenou délku vzorku (420 mm). Po přepálení

spodní nitě zapne příslušný kontakt mechanismus měření času, a kontakt horní nitě, po svém přepálení, měření času zastaví. Délka prohoření materiálu se stanovuje tzv. dotrhávací zkouškou. Při ní se na poškozený vzorek vyjmutý z držáku působí určitým napětím, vyvozovaným hmotností závaží. Tímto napětím se přetrhnou některé nitě, které byly během zkoušky tepelně poškozené. Méně poškozené a nepoškozené nitě se nepřetrhnou. Hmotnost závaží použitého k dotrhávací zkoušce se stanoví z normy na základě plošné hmotnosti zkoušené textilie.

Nepodaří-li se zapálit materiál skloněný pod úhlem 45° do 15 sekund, pak se materiál zkouší ve svislé poloze. Postup a doba zapalování jsou stejné jako v základní poloze vzorku.

Základním hodnotícím kritériem je index rozšíření plamene. Udává se v procentech celkové délky ohněm poškozené části vzorku (stanovené dotrhávací zkouškou). Je-li index rozšíření 100 %, udává se rychlost postupu plamene v měřeném úseku vzorku.

### **Diskuse**

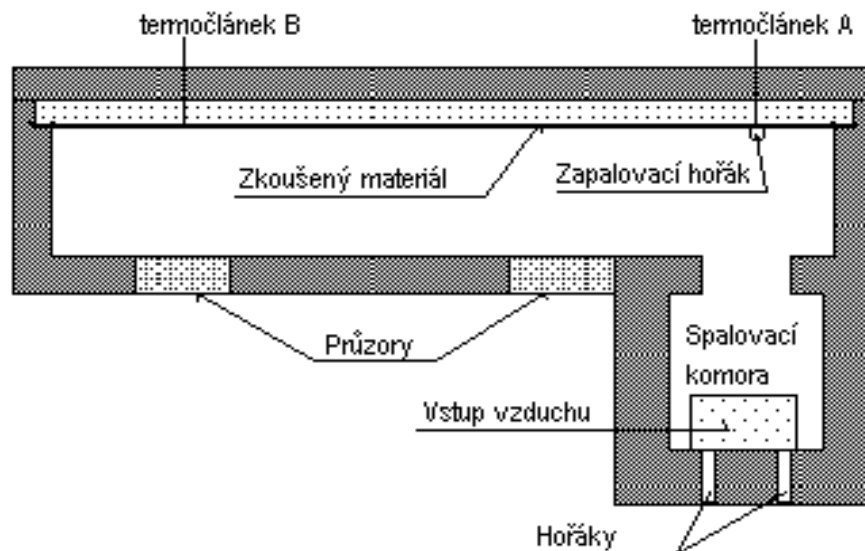
V normě je patrná snaha o maximálně možné zobektivizování zkušební postupu. Oproti fóliovému testu je lépe definovaný zdroj i podmínky zapalování. Viditelná výška nebarveného plamene je závislá na světelných podmínkách v laboratoři. Nebarvíme-li plamen při nastavování jeho výšky a nastavujeme-li jej jen podle jeho modré špičky, pak do hořáku vpouštíme více plynu a hořák má větší tepelný výkon. Doba zapalování je nastavena na spínacích hodinách a její opakovatelnost je velice dobrá. Průtok plynu a tedy i tepelný výkon hořáku je sice udán jen výškou plamene, ale i zde je doporučena objektivnější vizuální kontrola jeho barvením. Dobrým a nenáročným způsobem jsou vyloučeny subjektivní chyby měření i při registraci průchodu plamene a konečně i při určení oblasti poškození zkoušeného materiálu dotrhávací zkouškou.

Pro zkoušené materiály je stanoveno omezující kritérium týkající se jejich složení. Původně bylo dáno, že lze zkoušet textilie vyrobené z přírodních materiálů, nebo směsných materiálů s obsahem max. 20 % syntetických příměsí. V současně platném znění normy je obsah syntetických příměsí zvýšen na maximálně 50 %. Je to jistě značné omezení použitelnosti metody, přesto je to z hlediska objektivnosti získávaných výsledků omezení vhodné. Při zkoušení čistě syntetických materiálů, případně i směsných materiálů, v nichž je podíl přírodních vláken příliš nízký, dochází k jevu popsanému při testování fólií. Z hořícího materiálu odpadávají (vlivem měknutí nebo tavení syntetických vláken) kusy hořícího materiálu a průběh hoření je značně nerovnoměrný. Dostatečný podíl přírodních vláken zajišťuje celistvost a více méně i tvarovou stálost hořící části materiálu, což se projeví v poměrně rovnoměrném průběhu hoření vzorků. To se také podílí na dobré reprodukovatelnosti a opakovatelnosti zkoušky.

### **3.2.3 ČSN 73 0863 - Šíření plamene po povrchu stavebních hmot**

#### **Popis zařízení a zkušební postupu**

Stavební hmoty se zkouší v tloušťce odpovídající jejich skutečným tloušťkám v konstrukcích, nejvýše však v tloušťce 50 milimetrů. Plošné rozměry zkušební vzorku jsou 350 × 1050 mm. Vzorek zkoušené hmoty je v testovacím zařízení uložen horizontálně (delší hranou) a zkoušená plocha tvoří vertikální rovinu. Na zkoušenou hmotu působí kombinované tepelné namáhání. Primární zdroj tepla tvoří 4 plynové hořáky umístěné ve zvláštní komoře. Spalovací komora je propojena se zkušební komorou, v níž tvoří zadní svislou stěnu zkoušená hmota. Horká směs vzduchu a spalin proudí horizontálním směrem podél povrchu studovaného materiálu. Vzduch do zkušebního zařízení vstupuje otvorem ve dnu spalovací komory, výstup spalin je umožněn otvorem v horní části pracovního prostoru, na vzdáleném konci komory. Vstupní otvor je plynule uzavíratelný, což umožňuje regulaci průtoku vzduchu. Zkušební zařízení je na obrázku 13.



Obr. 13 ČSN 73 0863 - Schéma zkušebního zařízení

Po upevnění vzorku zkoušené hmoty se zapálí hlavní plynové hořáky. Průtok topného plynu musí zajišťovat na výstupu spalovací komory teplotu definovanou podle normové teplotní křivky (ČSN 73 0851<sup>[41]</sup>). Zkoušená hmota je zahřívána především teplem proudu horkého vzduchu. Omezená oblast vzorku nacházející se před spalovací komorou je namáhána také tepelnou radiací. V pracovním prostoru, proti ústí spalovací komory, je umístěn pomocný plynový hořák, kterým se zapálí hořlavé zplodiny tepelného rozkladu studovaného materiálu. Pro snadnější detekci okamžiku zapálení materiálu a průchodu čela plamene stanovenou vzdáleností jsou umístěny dva termočláanky měřící povrchovou teplotu zkoušeného materiálu. Vzdálenost mezi termočláanky je 600 mm. Je zřejmé, že tepelné namáhání zkoušeného materiálu není po celé jeho délce konstantní. Nejvyšší je v místech proti ústí spalovací komory, potom (tak jak spaliny chladnou), se postupně snižuje. Průběh hustot tepelných toků exponujících povrch zkoušených materiálů není uváděn. Jistou podobnost je možno nalézt u IMO testu (kapitola 3.2.5), tam je ohřev materiálu realizován tepelnou radiací - zde je vzorek materiálu zahříván teplem proudících horkých plynů, tedy konvekcí a radiací.

Před měřením musí být zkušební zařízení zcejchováno. Regulací rychlosti proudění vzduchu a průtoku plynu je nutno dosáhnout nárůstu teplot ve dvou měřených bodech podle v normě uvedené tabulky. Tyto teploty jsou měřeny na povrchu desky z nehořlavého materiálu, která se do přístroje vloží do pozice zkoušeného materiálu. Při cejchování zařízení se nezapaluje pomocný plynový hořák.

### Výpočty

Ze záznamu průběhu zkoušek tří vzorků se stanoví aritmetický průměr času vznícení materiálu  $\tau_A$  a čas průchodu plamene druhým kontrolním bodem  $\tau_B$ . **Index šíření plamene** se stanoví z rovnice:

$$i_s = \frac{600}{\tau_B} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

V případě potřeby lze stanovit **rychlost šíření plamene** po povrchu stavební hmoty podle rovnice:

$$v_s = \frac{600}{\tau_B - \tau_A} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

## Diskuse

Norma nepředepisuje konkrétní topný plyn ani detaily používaných hořáků. Detailněji není popsán ani materiál použitý pro vnitřní obložení zkušebního prostoru. Je uvedeno pouze, že se jedná o šamotové tvarovky. Existuje ovšem celá řada šamotových výrobků, které mohou mít různé charakteristiky ohřevu. To může být na obtíž při cejchování zařízení. Je při něm nutno hlídat teploty ve spalovacím prostoru - (normová teplotní křivka), současně i teploty ve dvou bodech v pracovním prostoru. Byť jsou povolené odchylky teplot v obou bodech poměrně velké, je cejchování přístroje náročná záležitost, a může se stát, že dodrží-li se průběh teplot v pracovním prostoru, nebude moci být dodržen průběh teplot ve spalovacím prostoru.

V normě není taktéž uvedeno, jaké materiály (stavební hmoty) je možno testovat. Norma počítá, že některé materiály se mohou teplem bortit a deformovat, napočítá však, že některé běžně používané stavební materiály působením tepla měknou a roztékají se - např. pěnový PS používaný na zateplení staveb.

Zkušebnímu zařízení je také možno vyčíst, že rozložení tepelného toku podél zkušebních vzorků není rovnoměrnější. Prudce klesá mimo dosah přímého sálání ze spalovací komory.

ČSN 73 0863 je zajímavá především tím, že teplotní režim ohřevu zkoušeného materiálu vychází z normové teplotní křivky, všeobecně (i v zahraničí) používané při zkouškách požární odolnosti stavebních konstrukcí. To by mohlo být jejím kladem, nevýhodou je ovšem fakt, že je to metoda zavedená pouze v ČR a snad ještě na Slovensku.

### **3.2.4 ČSN 64 7464 - Hořlavost lehčených hmot**

Podstatou zkoušky je stanovení rychlosti hoření lehčených hmot na bázi makromolekulárních látek na zkušebních vzorcích v horizontální poloze.

#### **Popis zařízení a zkušebního postupu**

Zdrojem zapálení je plamen plynového hořáku. Ústí hořáku má tvar štěrbinu o rozměrech  $48 \times 3$  mm. Zkušební vzorky jsou při zkoušce umístěny na nosiči vyrobeném z kovové síťky. Zkušební vzorek má rozměry  $150 \times 50$  mm a tloušťku 13 mm (případně menší). Zkouší se série 5 vzorků. Každý vzorek se opatří, ve vzdálenosti 25 mm od jednoho konce, čarou přes celou šířku. Tato čára slouží jako kontrolní značka pro měření rychlosti hoření.

Zkouška se provádí ve spalovací komoře z azbestocementových desek. V přední stěně komory je pozorovací okénko. Definované proudění vzduchu zajišťuje podélný otvor ve spodní části přední stěny a komínek ve středu horní stěny komory.

Zkoušený vzorek se zapaluje současně po celé své šířce. Zapalování trvá 60 sekund, poté se hořák odstraní nebo vypne přívod plynu. Po zapálení se sleduje postup plamene a zaznamená se čas průchodu plamene kontrolní značkou. Měření času se spouští od začátku zapalování.

Zkouška končí, dohoří-li vzorek ke kontrolní značce (čas  $t_b$ ), nebo dojde-li k uhasnutí vzorku. Uhasne-li vzorek, zaznamená se doba hoření (čas  $t_c$ ) a změří se délka maximálního postupu čela plamene ( $L_e$ ).

#### **Výpočty**

Dosáhl-li plamen kontrolní značky, vypočítá se rychlost hoření  $x$  podle vztahu:

$$x = \frac{125}{t_b} \quad [\text{mm.s}^{-1}]$$

jestliže plamen kontrolní značku nedosáhl, vypočítá se rychlost hoření podle vztahu:

$$x_l = \frac{L_e}{t_c} \quad [\text{mm.s}^{-1}]$$

Za výsledek se považuje vždy aritmetický průměr z 5 měření.

### **Diskuse**

Uvedenou metodu nelze použít pro materiály, které se při zapalování taví a odkapávající tavenina ucpává štěrbinu hořáku nebo výrazně deformuje zapalovací plamen.

V normě není dostatečně specifikována záležitost zapalování vzorků. Jde zejména o použitý topný plyn - připouští se víceméně libovolný. Tepelný výkon hořáku je definován pouze rozměry plamene: výškou „viditelného plamene“ a výškou „vnitřního kuželu“ plamene. Tyto rozměry budou ovlivněny konstrukcí hořáku (průměr trysky hořáku, množství přisávaného vzduchu) a druhem a tlakem spalovaného plynu. Taktéž způsob zapalování může ovlivnit výsledky měření. Připouští se jak zapálení pevně umístěného hořáku v definované poloze (vzhledem k zapalovanému vzorku), tak i přisunutí zapáleného hořáku do této definované polohy. Manipulaci s hořákem je možno provádět jen otevíratelným otvorem (pozorovacím okénkem) v přední stěně spalovací komory. Ještě problematičtější je odsunutí hořáku po ukončení zapalování. V tom případě je nutno opět otevřít pozorovací okénko a hořák vyjmout. Změna aerodynamiky vnitřního prostoru spalovací komory je nepochybná a zvláště u méně hořlavých materiálů může ovlivnit průběh jejich hoření. Připuštění alternativního způsobu zapalování vzorků zjednodušuje měření, protože není nutno vždy proměřovat předepsané parametry plamene, na druhou stranu však může ovlivňovat naměřené výsledky.

Tato metoda je často používána i v zahraničí, obdobnou zahraniční normou je např. americká ASTM D 4986-91<sup>[42]</sup> a ruská RS 5272-75.

### **3.2.5 IEC 60695 - část 10-11: Zkoušky plamenem - metoda horizontální a vertikální zkoušky plamenem 50 W**

Norma vznikla revizí ISO 1210, současně byla schválena Evropskou komisí pro standardizaci v elektrotechnice CENELEC jako EN 60695-11-10. Tato norma je prakticky shodná s velmi známým a rozšířeným testem UL-94.

#### **Popis zařízení a zkušební postupu**

Metoda je určena pro stanovení relativní hořlavosti plastů (včetně lehčených) a jiných nekovových materiálů s objemovou hmotností vyšší než 250 kg.m<sup>-3</sup>. Zkušební těleso má tvar tyčinky délky 125 mm a 13 mm šířky. Tloušťka zkušebních vzorků může být maximálně 13 mm. Zápalným zdrojem je hořák vnitřního průměru 9,5 mm, výška nesvítivého plamene je 20 mm. Palivem je methan.

**Metoda A** Zkouška se vzorkem v horizontální poloze. Zaznamenává se délka poškození vzorku a čas hoření. Z těchto údajů se vypočítá lineární rychlost hoření. V horizontální rovině 10 mm pod vzorkem je umístěna kovová síťka zachycující odpařující kousky a kapky. Při zkoušení materiálů za tepla tvarově nestálých je možno použít speciální podpurný držák.

**Metoda B** Zkouška se vzorkem ve vertikální poloze. Měří se čas do uhasnutí vzorku po oddálení zdroje zapálení, případně dobu zhnutí po ukončení plamenného hoření. Zjišťuje se také zda odpařující kapky nebo kousky ze zkoušeného materiálu zapálí celulózový tampón na podložce.

Zajímavé u tohoto testu se dvojí zapalování. Po první aplikaci zápalného zdroje (10 s)

se změní doba dohořívání  $t_1$  a okamžitě se provede druhé zapalování (opět po dobu 10 s) a poté se zaznamenává druhý čas dohořívání  $t_2$ , případně doba žhnutí  $t_3$ . Celková doba dohořívání  $t_f$  je součtem  $t_1 + t_2$ . Zajímavé je i to, že testování ve vertikální poloze vzorků se provádí se dvěma sériemi zkušebních vzorků. První série je kondicionována v prostředí za standardních podmínek (23 °C a 50% relativní vlhkosti). Stejnou procedurou procházejí i vzorky pro metodu A. Druhá série vzorků se kondicuje při teplotě 70 °C. Na základě výsledků obou zkoušek je možno zkoušené materiály zařadit do definovaných kategorií.

### **Klasifikační systém**

**Metoda A** (horizontální test) má dva klasifikační stupně: HB 40 a HB 75 (HB - *Horizontal Burning*)

Materiál klasifikovaný HB 40 musí splňovat jedno z následujících kritérií:

- po zapálení (oddálení zápalného zdroje) materiál nehoří plamenem
- čelo plamene nedosáhne značky 100 mm od zapalovaného okraje
- pokud čelo plamene překročí tuto značku, avšak lineární rychlost hoření není vyšší než  $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Pokud materiál ani v jednom z těchto bodů nevyhoví, je klasifikován jako HB 75 pokud lineární rychlost hoření nepřekročí hodnotu  $75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

**Metoda B** (vertikální test) má tři klasifikační stupně: V-0, V-1, V-2.

Kritéria pro zařazování materiálů jsou v následující tabulce.

Kritérium	Kategorie		
	V-0	V-1	V-2
doba dohořívání každého zkušebního tělesa	$\leq 10 \text{ s}$	$\leq 30 \text{ s}$	$\leq 30 \text{ s}$
celková doba dohořívání $t_f$ pro obě kondicionované série	$\leq 50 \text{ s}$	$\leq 250 \text{ s}$	$\leq 250 \text{ s}$
součet doby dohořívání a dožehu po druhé aplikaci plamene ( $t_2 + t_3$ )	$\leq 30 \text{ s}$	$\leq 60 \text{ s}$	$\leq 60 \text{ s}$
proces dohořívání nebo dožehu postoupí až k držáku	Ne	Ne	Ne
vata se zapálí odpadavajícimi kapkami nebo kousky materiálu	Ne	Ne	Ano

Pokud výsledky zkoušky uvedeným kritériím neodpovídají, nelze testovaný materiál metodou B hodnotit. Tento materiál se hodnotí horizontálním testem (metoda A).

### **3.2.6 ISO 5658-2 - „IMO test“**

Metoda je určena pro stanovení šíření plamene po povrchu horizontálně umístěných konstrukčních materiálů. Tento zkušební postup byl převzat od IMO (*International Maritime Organization*), kde byl zaveden pod označením A.653(16). Do souboru ISO norem byl zařazen technickou komisí pro požární bezpečnost staveb - TC92. Zkušební zařízení je znázorněno na obrázku 14.

#### **Popis zařízení a zkušebního postupu**

Podstatou zkoušky je stanovení rychlosti postupu plamene po povrchu stavebních materiálů. Zkoušený materiál je namáhán tepelnou radiací. Zdrojem tepla je plynem vytápěný plochý keramický panel vyzařující tepelný tok v horizontálním směru. Zkušební vzorky jsou 800 mm

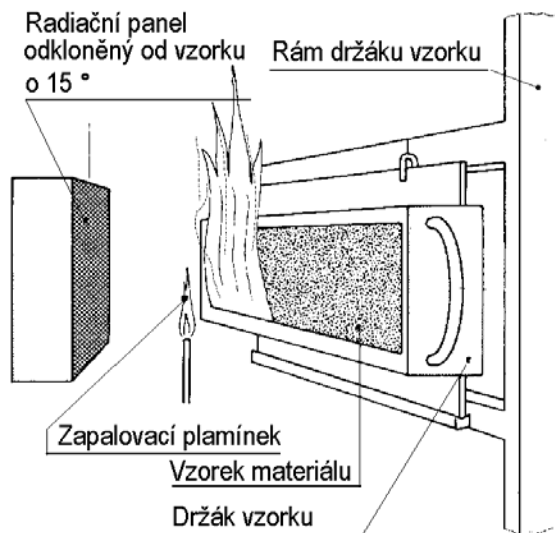
dlouhé, 150 mm vysoké, jejich maximální tloušťka je 70 mm; materiály s přirozenou tloušťkou menší než 50 mm jsou zkoušeny v používané tloušťce. Úhel mezi čelní plochou zkoušeného materiálu a povrchem radičního panelu činí v horizontální rovině 15°. Hustota tepelného toku dopadajícího na zkoušený materiál je nejvyšší na zapalovaném konci, kde má hodnotu asi  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ , podél vzorku postupně klesá a na opačném konci činí asi  $1,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Rozložení tepelně radičního pole musí odpovídat podmínkám pro kalibraci zařízení. Kalibrační body jsou od sebe vzdáleny 50 mm.

Působením sálavého tepla dochází k tepelnému rozkladu materiálu. Z jeho povrchu unikající plynné produkty rozkladu jsou zapalovány plamenem pomocného hořáku. Po zapálení se šíří čelo plamene v horizontálním směru po povrchu studovaného materiálu.

Zkouška začíná vložením zkoušeného materiálu do určené polohy před sálající panel. Úroveň tepelné radiace dopadající na studovaný materiál musí odpovídat kalibračním podmínkám. Současně s vložením materiálu se zapálí pomocný plynový hořák pro iniciaci hoření a začíná se měřit čas zkoušky. Při zkoušce se zjišťuje okamžik zapálení zkoušeného materiálu, časy průchodu čela plamene naznačenými

50mm úseky, čas, ve kterém čelo plamene dosáhne konce vzorku, resp. pozice čela plamene, na níž se postup plamene zastavil. Zkouška končí, dosáhne-li čelo plamene konce vzorku, zastaví-li se postup čela plamene a plamen zhasne, případně nedojde-li k zapálení materiálu po 10 minutách od začátku zkoušky. Po skončení zkoušky se vyhodnocuje průměrné teplo pro ustálené hoření a kritický tepelný tok zhášení materiálu - tj. tepelný tok dopadající na vzorek v místě, ve kterém se postup plamene zastavil a hoření materiálu se přerušilo.

Tato metoda byla přijata celou řadou států a mezinárodních normalizačních seskupení. Nebyla však začleněna do systému Euronorem, a proto se zatím neuvažuje ani o jejím zavedení v ČR.



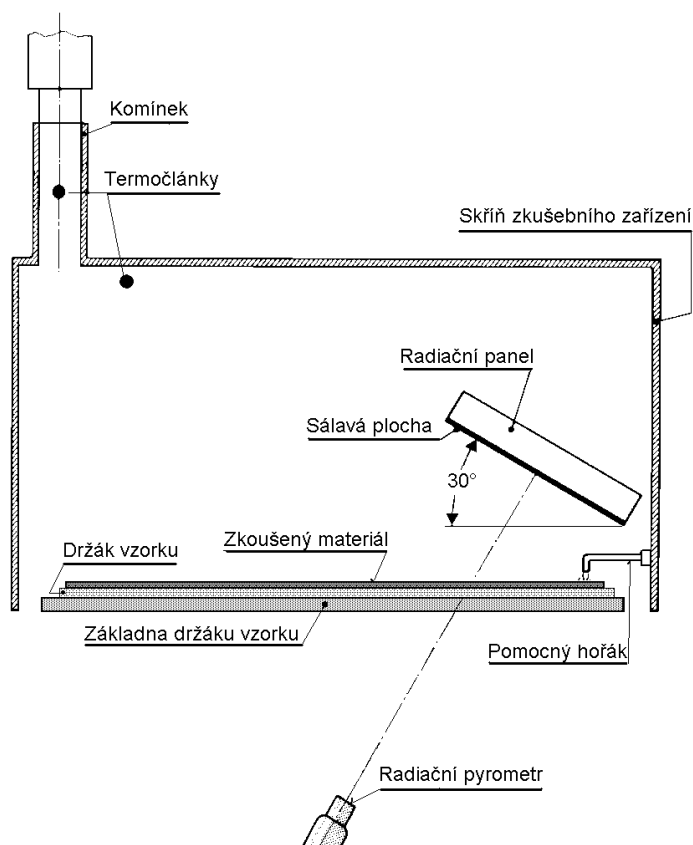
Obr. 14 Zkušební zařízení ISO 5658

### 3.2.7 Test radičním panelem pro podlahové krytiny - ISO 9239

Test slouží pro posouzení schopnosti šíření plamene po povrchu podlahových krytin. Při zkoušce se sleduje kritický tepelný tok, zapalitelnost krytin, je doporučováno sledovat i optickou hustotu vznikajícího kouře. Zkušební aparatura může být doplněna i systémem pro měření produkovaného tepla na základě spotřeby kyslíku. Podrobněji se tomuto parametru budeme věnovat v kapitole 3.3. V angličtině je tento test označován jako *Flooring Radiation Panel Test*. Schéma zkušebního zařízení je na obrázku 15.

#### Popis zařízení a zkušebního postupu

Vzorky zkoušených materiálů o rozměru 1050 x 350 mm a v přirozené tloušťce jsou v horizontální poloze exponovány tepelnou radiací. Zdrojem tepelné radiace je keramický panel o rozměrech 457 x 305 mm, vytápěný plynem na teplotu asi 815 °C. Panel je od zkoušeného materiálu odkloněn o 30°, což má za následek, že rozložení hustoty tepelného toku je podél vzorku nekonstantní. Profil hustoty tepelného toku je normován, maximum je na zapalovaném konci vzorku (asi  $11 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a nejnižší na opačném konci (asi  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Tepelná radiace zahřívá zkoušený materiál, vlastní zapálení je však iniciováno pomocným plynovým



**Obr. 15 Zkušební zařízení podle ISO 9239**

hořákem. Zkušební zařízení je umístěno ve skříni o rozměrech 1400 x 500 mm (půdorys) a výšky 710 mm (měřeno od roviny základny zkoušeného materiálu). Vzduch do komory vstupuje po obvodu držáku vzorku, spaliny ze zkušebního zařízení vystupují komínkem ve stropě komory.

Zkušební zařízení je nutno před započítím měření kalibrovat. Kalibrace spočívá v nastavení předepsaných hodnot tepelné radiace v daných bodech v rovině povrchu vzorku pomocí radiometrů. Při provozu je pak tepelný výkon plynového radiátoru kontrolován bezkontaktním teploměrem (radiálním pyrometrem).

Ve výsledcích se uvádí:

- Kritický tepelný tok, což je úroveň tepelné radiace v místě, ve kterém se zastavil postup zóny hoření,
- čas do uhasnutí vzorku, přičemž čas se začíná měřit od okamžiku vložení materiálu do zkušebního zařízení a
- čas do zapálení vzorku.
- Připojí se slovní popis průběhu zkoušky a celkové hodnocení.

### **Diskuse**

Uvedená zkušební metoda je normována v mnoha zemích světa, v USA např. jako ASTM E684 - 93a<sup>[43]</sup>, ASTM E970<sup>[44]</sup>, nebo NFPA 253<sup>[45]</sup>, jako mezinárodní standard ISO 9239 a nejnověji jako prEN ISO 9239 pro hodnocení podlahových krytin v zemích Evropské unie. V ČR není tato metoda zatím normována.



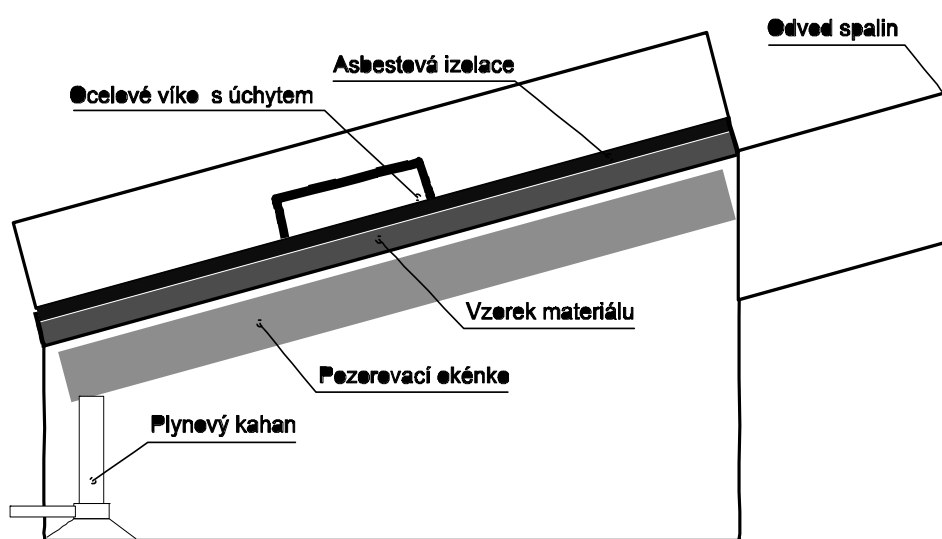
### 3.2.8 Dvoustopový tunelový test - ASTM D3806

Definuje zkoušku hořlavosti deskových materiálů.

#### Popis zařízení a zkušební postupu

Podstatou zkoušky je stanovení indexu šíření plamene, případně rychlosti šíření plamene po povrchu materiálu. Popisovaná metoda vychází z velkorozměrové zkoušky ASTM E84<sup>2</sup> celé zkušební zařízení bylo zmenšeno v poměru 12,5 : 1, úměrně byl také snížen tepelný výkon hořáku a zkoušený vzorek materiálu byl nakloněn.

Zkoušený materiál je namáhán plamenem plynového hořáku na svém dolním konci a vizuálně se v 15sekundových intervalech stanovuje pozice čela plamene. Zkouška trvá 4 minuty, po celou tuto dobu hoří plamen hořáku. Na konci 4. minuty se hořák vypne a ještě 1 minutu se sleduje chování zkoušeného materiálu.



Obr. 16 Schéma dvoustopového tunelu

Zkušební zařízení (obrázek 16) tvoří polozakrytý tunel, v jehož horní části skloněné pod úhlem 30° k horizontální rovině se nachází nosič vzorku. Nosič vzorku tvoří strop tunelu. Pod níže položeným koncem vzorku ve vzdálenosti 1 palce od hrany vzorku se nachází plynový hořák (Meckerův laboratorní kahan). Délka vzorku je asi 600 mm (24 palců), šířka je 100 mm, tloušťka materiálu není předepsaná. Je možno zkoušet deskové materiály do tloušťky 40 mm. Zkoušený materiál v definované poloze se zatíží ocelovým víkem, chráněným na spodní straně asbestocementovou deskou. Hmotnost víka částečně brání deformacím zkoušených materiálů, které mohou nastat během zkoušky.

Před započítáním zkoušky se zkušební zařízení kalibruje na tzv. nulovou délku rozšíření plamene. Tato kalibrace spočívá v tom, že se nastaví průtok plynu kahanem tak, aby plamen pozorovaný na desce z vypáleného azbestocementu měl konstantní délku  $L_a$  v rozmezí 6 ÷ 8 palců. S tímto nastaveným průtokem plynu je pak nutno provádět zkoušku. Postup čela plamene se odečítá průzorem podél celé délky vzorku umístěným v čelní stěně tunelu a krytým žáruvzdorným sklem. Na skle průzoru je vyznačena stupnice v palcích.

<sup>2</sup> Původem je to však Steinerův 25stopový horizontální tunel navržený pro *Underwriters Laboratories (UL)*

## Výpočty

$$\text{Index rozšíření} \quad I = 100 \cdot \frac{L_s - L_a}{23} \quad [\%]$$

Je-li index rozšíření 100 %, vyhodnocuje se rychlost šíření plamene

$$v = 25,4 \cdot \frac{(L_s - L_a)}{t} \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$L_s$  - je maximální postup plamene (v palcích)

$L_a$  - je nastavená délka plamene (v palcích)

$t$  - je čas, za který dosáhne čelo plamene konce vzorku (v sekundách)

## Diskuse

ASTM D3806 je určena především pro zkoušení celulósových materiálů se sníženou hořlavostí. V ČR tato metoda normována není, přesto však příslušné zkušební zařízení vlastní řada laboratoří. Díky tomu a také díky značné univerzálnosti a jednoduchosti metody, lze na něm stanovovat hořlavost různých materiálů, mimo jiné i sendvičových kompozicích, pro které vlastně žádný normovaný postup u nás není. Konstrukce tunelu umožňuje zkoušet vzorky do tloušťky cca 40 mm, včetně např. vzduchových mezer. Omezená možnost použití metody je u měknoucích tavicích se plastů, které se deformují, trhají a stékají a ucpávají ústí hořáku.

### **3.3 Hodnocení hořlavosti materiálů na základě vývoje tepla**

Šíření plamene po povrchu materiálů je z hlediska požární ochrany významnou charakteristikou materiálu. Materiál vykazující vysokou hodnotu šíření plamene bude obecně považován za hořlavější než ten, který plamen šíří pomalu a nebo nešíří vůbec. Jaké vlivy se ale uplatňují na schopnosti materiálu šířit plamen? Těch vlivů je celá řada a můžeme je rozdělit na vlivy samotného materiálu a na vlivy prostředí. Materiálové vlivy jsou jak chemické, tak fyzikální povahy. Chemické vlivy zásadního významu jsou dva: chemické složení (ve smyslu prvkové skladby) a uspořádání vnitřní struktury. Tyto faktory ovlivňují tepelnou stabilitu materiálu, determinují mechanismus jeho rozkladu a v neposlední řadě přímo určují množství tepla uvolněného při hoření. Teplo uvolňované při hoření materiálu, spolu s fyzikálními materiálovými vlastnostmi a vlivy okolí, bude určovat schopnost materiálů šířit oheň, jinými slovy, určovat tento významný faktor hořlavosti materiálů.

Mnohé metody hodnocení hořlavosti materiálů vycházejí právě z toho, že teplo uvolňované při hoření materiálu je rozhodujícím faktorem určujícím hořlavost. Tyto metody se také označují také jako metody kalorimetrické. Zkušebních metod je opět celá řada, některé jsou určeny pro konkrétní výrobky nebo skupiny materiálu, jiné mají obecnější použití.

Přístup k návrhu kalorimetrických metod je možno rozdělit do dvou směrů:

- A.** Hoření při zkoušce probíhá v prostředí izolovaném od vnějšího okolí za striktně daných podmínek. Je možné také říct, že v těchto podmínkách dochází k řízenému hoření, tedy spalování materiálu.
- B.** Proces hoření probíhá v normálních podmínkách. Podmínky zkoušky omezují např. rozměry, orientaci a skladbu zkušebních vzorků, předepisují typ zápalného zdroje a způsob zapalování - vlastní hoření materiálu je však samovolné.

První směr - řízený proces spalování - je sice více vzdálen reálným požárním podmínkám, ale na druhé straně umožňuje testování širší škály materiálů a výsledky těchto zkoušek mají vyšší přesnost, jsou lépe reprodukovatelné a zpracovatelné. Typickým představitelem

této filozofie stanovování hořlavosti je stanovení spalného tepla a výhřevnosti v kyslíkovém kalorimetru podle ČSN 44 1352 <sup>[47]</sup>. Do této skupiny je však možno zařadit i další metody, např. ČSN 73 0862, ISO 5660, ISO DIS 13927.

Druhý směr - tedy víceméně volné hoření zkoušených hmot - je reprezentován především velkorozměrovými testy hořlavosti. Zde uvádím jen zkoušku podle ČSN 73 0864 Požární výhřevnost - i když i ta je vlastně velkorozměrovou zkouškou. Do samostatné kapitoly velkorozměrových zkoušek jsem zařadil metody pro zkoušení hořlavosti stavebních konstrukcí výrobků nebo vybavení interiérů.

\* \* \*

Uvolňované teplo se nejčastěji stanovuje na základě naměřeného rozdílu teplot. Fyzikálním základem těchto měření je kalorimetrická rovnice:

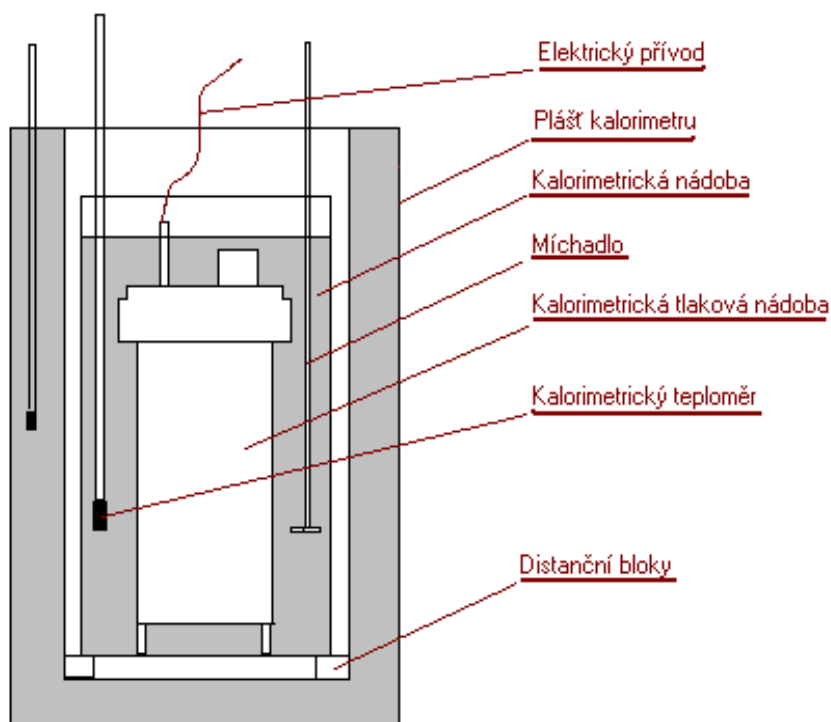
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t, \quad [J]$$

kde  $m$  - je hmota  
 $c$  - je měrné teplo  
 $\Delta t$  - je rozdíl teplot

ISO 5660 (a některé další metody) hodnotí uvolňované teplo na základě jiného principu, který bude vysvětlen dále.

### 3.3.1 ČSN 44 1352 - Kyslíkový kalorimetr

Metoda stanovení spalného tepla a výhřevnosti tuhých paliv má v rámci požárních testů význačnou pozici. Spalné teplo udává maximální množství tepla, které lze z materiálu uvolnit chemickou cestou. Spalné teplo je fyzikálně chemickou konstantou materiálu a lze jej



Obr. 17 Schéma kyslíkového kalorimetru

pro daný materiál vypočítat. Obecně je to součet slučovacích tepele produktů hoření jednotlivých prvků obsažených v měřeném materiálu. Výpočty jsou uvedeny např. v <sup>[11,46]</sup>. Mimo spalného tepla lze touto metodou stanovit i hodnotu výhřevnosti materiálu. Výhřevnost se stanoví ze spalného tepla výpočtem za předpokladu, že je znám obsah vodíku v měřeném materiálu, nebo množství vody vzniklé při hoření. Rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že výhřevnost je spalné teplo snížené o výparné teplo vody. Podmínkou nutnou pro přímý výpočet

spalného tepla, tak i pro dopočet výhřevnosti je znalost přesného kvantitativního i kvalitativního složení, jak výchozího materiálu, tak i konečných produktů rozkladu. Je tedy jasné, že přímý výpočet je teoreticky možný, v praxi však, až na nečetné výjimky, je obtížně uskutečnitelný.

Tato metoda byla pro potřeby požárního zkušebnictví převzata z oboru paliv a energetiky, kde se zcela běžně používá pro stanovování výhřevnosti tuhých paliv. Výhřevnost paliva je pak vstupním údajem pro optimalizování spalovacího procesu pro dosažení maximálně možné účinnosti energetických zařízení.

### **Popis zařízení a zkušebního postupu**

Podstatou zkoušky je spálení materiálu (o hmotnosti kolem 1 g) v ocelové tlakové nádobě v atmosféře kyslíku pod tlakem 2 ÷ 3 MPa. Tato tzv. kalorimetrická tlaková nádoba je umístěna v tepelně izolované kalorimetrické nádobě, která je naplněna vodou určité hmotnosti. Teplo uvolněné spálením paliva se rozptýlí ve vodě v kalorimetrické nádobě. Vzestup teploty vody v průběhu měření je přímo úměrný množství tohoto vzniklého tepla. Vzorek testovaného materiálu se zapaluje teplem elektricky rozžhaveného tenkého ocelového drátku. Zapalovací drátek musí být zvážen a musí být známo jeho spalné teplo. Váží se také případný zbytek drátku po skončení zkoušky.

Měřicí zařízení je nutno kalibrovat. Účelem kalibrace je stanovení měrného tepla kalorimetru (tepelná kapacita kalorimetru). Tato hodnota se zjišťuje měřením v kalorimetru, ale místo vzorku neznámého paliva se spálí látka se známým spalným teplem. Ze zjištěného rozdílu teplot v kalorimetrické nádobě vypočteme, při známém množství uvolněného tepla, tuto konstantu kalorimetru.

### **Výpočty**

Spalné teplo se počítá ze vztahu:

$$Q_s^a = \frac{C(D_t - K) - c}{m} \quad [\text{J} \cdot \text{g}^{-1}]$$

- kde  $C$  je tepelná kapacita kalorimetru [ $\text{J} \cdot \text{°C}^{-1}$ ]  
 $D_t$  je celkový vzestup teploty v hlavním úseku [ $\text{°C}$ ]  
 $K$  je oprava na výměnu tepla s okolím [ $\text{°C}$ ]  
 $c$  je součet oprav [J]  
 $m$  je hmotnost navážky vzorku [g]

Oprava na výměnu tepla s okolím se počítá ze vztahu:

$$K = 0,5(d_H + d_K) + (n - 1)d_K \quad [\text{°C}]$$

- kde  $d_H$  je průměrná změna teploty v počátečním úseku [ $\text{°C}$ ]  
 $d_K$  je průměrná změna teploty v konečném úseku [ $\text{°C}$ ]  
 $n$  je počet minut v hlavním úseku

Výhřevnost paliva se počítá ze vztahu:

$$Q_i^a = Q_s^a - 24,42 \cdot (W^a + 8,94 H^a) \quad [\text{J} \cdot \text{g}^{-1}]$$

kde 24,42 je koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku  $[\text{J} \cdot \text{g}^{-1}]$

$W^a$  obsah vody ve vzorku [%]

8,94 koeficient přepočtu vodíku na vodu

$H^a$  obsah vodíku ve vzorku [%]

Norma uvádí přípustné rozdíly stanovené hodnoty spalného tepla. A to jednak v jedné laboratoři -  $0,12 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a také v různých laboratořích -  $0,33 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Při přepočtu na palivo se spalným teplem  $40 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  to v jedné laboratoři činí 0,3 % a mezilaboratorně může rozdíl ve výsledcích být 0,825 %.

### Diskuse

Měření je principiálně jednoduchá záležitost, stejně tak i vlastní zkušební zařízení. Díky konstrukčnímu řešení přístroje a propracovanému zkušebnímu postupu umožňuje tato metoda získávat velice kvalitní a přesné výsledky. Zkušební vzorky paliva mohou být v libovolné tvarové formě: prášek, hobliny, granule, mohou být i v kompaktní formě. Na tomtéž přístroji lze stanovit i spalné teplo pastovitých a kapalných materiálů za předpokladu, že nejsou příliš těkavé. Spalné teplo je čistě materiálová záležitost a nezáleží proto na prostorovém uspořádání testované hořlaviny.

Pro výpočty v požární bezpečnosti staveb se - na škodu věci - nepoužívá hodnota spalného tepla, ale výhřevnost materiálů.

Stanovení spalného tepla se provádí při teplotě okolí  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při této teplotě voda, která vzniká při spalování vodíku, zkapalní - současně se uvolní kondenzační teplo vody, které se přičítá k teplu uvolněnému chemickými reakcemi. Výše zmíněná výhřevnost je pak spalné teplo snižené o kondenzační teplo vzniklé vody. Při požárně technických výpočtech, ve kterých se výhřevnost látek vyskytuje, se předpokládá, že spaliny v uvažovaném prostoru mají teplotu nad  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a tudíž voda zůstává v plynném skupenství.

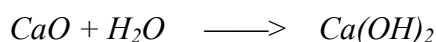
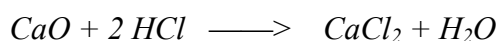
Největší rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností má vodík, z uhlovodíků pak methan. Další uhlovodíky mají tento rozdíl menší. Rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností klesá se zvyšujícím se atomárním poměrem C/H, viz tabulka 7. U benzenu, kde je tento poměr 1:1, je výhřevnost vzhledem ke spalnému teplu nižší již pouze o 4 %. U prvků je spalné teplo rovno výhřevnosti (samozřejmě s výjimkou vodíku).

Palivo	Spalné teplo [MJ. m <sup>-3</sup> ]	Výhřevnost [MJ. m <sup>-3</sup> ]	Rozdíl
Vodík	12,77	10,76	15 %
Methan	39,86	35,80	10 %
Ethan	70,42	64,35	8,6 %

**Tab. 7 Porovnání výhřevnosti a spalného tepla**

Množství uvolněného tepla, které by se rovnalo spalnému teplu je při reálných podmínkách hoření materiálu nedosažitelné. Teplo, které se uvolní při volném hoření tuhých materiálů na vzduchu, je však nižší i v porovnání s výhřevností. Jak bylo již uvedeno, výhřevnost se stanovuje výpočtem ze známého obsahu vodíku a vody ve studovaném materiálu. Pokud se nejedná o čistou látku známého chemického složení, je nutno obsah vodíku stanovit experimentálně, např. elementární analýzou, případně stanovit množství vzniklé vody po spálení navážky, např. chromatograficky. V obou případech je však nutno připomenout, že vodík může být v látce přítomen jak ve formě vody (volné i vázané), nebo je vázán na uhlík a nebo je v hydroxylové skupině (další možnosti je možno zanedbat). Principiálně by v hodnotě výhřevnosti mělo být od spalného tepla odečteno jen kondenzační teplo vody vzniklé oxidací vodíku, nikoli vody, která byla obsažena

v původním vzorku a která se jen vypařila a poté opět zkondenzovala. Odečteme-li totiž kondenzační teplo i té části vody, která se chemické reakce neúčastnila, dopouštíme se chyby. Voda obsažená ve spalovaném materiálu se vypařuje - k tomu spotřebuje část vznikajícího tepla - po ochlazení produktů hoření kondenzující voda výparné teplo ve stejné hodnotě zase uvolní. Voda vzniklá při spalování žádné výparné teplo nespotřebovala, ale při ochlazení se kondenzační teplo vody připočetlo k teplu vzniklému spalováním. Situace je však ještě složitější - kromě „původu“ vodíku bychom měli zvažovat i možné reakce vzniklých produktů hoření. Konkrétně, budeme např. zjišťovat výhřevnost polyvinylchloridu plněného uhlíčanem vápenatým. Při spalování tohoto materiálu se část vodíku sloučí s chlorem za vzniku chlorovodíku, který se rozpustí ve vodě za vzniku kyseliny chlorovodíkové. Dá se také předpokládat, že přítomný vápenec se alespoň částečně endotermně rozloží na oxid vápenatý a molekulu oxidu uhličitého. Oxid vápenatý pak může dále reagovat jak s HCl, tak i s vodou



Obě tyto reakce jsou exotermní. Vznikající teplo, přestože přímo nesouvisí s procesem spalování, zvyšuje hodnotu spalného tepla.

S vodou je to v uvedeném příkladu taky komplikované. Bude správnější odečíst kondenzační teplo vody na základě obsahu vodíku stanoveného elementární analýzou původního paliva? Část vody může reagovat za vzniku hydroxidu vápenatého - tudíž se kondenzační teplo neuvolní. K jinému obsahu vody potom dojdeme na základě jejího stanovení z výplachu kalorimetrické tlakové nádoby po zkoušce.

Předešlé řádky mají dokumentovat některé z komplikací při stanovování výhřevnosti a do jisté míry i spalného tepla - v případech, kdy se dají očekávat nějaké reakce spalných produktů. Výpočet výhřevnosti paliva má nesporný význam při spalovacích procesech v energetice. Běžná uhlovodíková tuhá či kapalná paliva jsou spalována v optimalizovaných podmínkách přísunu jak paliva, tak i vzduchu. Ve spalovacím prostoru v žádném případě ke kondenzaci páry nedochází. Z teoretického ani praktického hlediska však neshledávám nutnost používání hodnot výhřevnosti při výpočtech požární bezpečnosti staveb. Nepřehlédnutelným argumentem pro zachování současného pojetí je však tradice. Jak v ČR, tak i často v zahraničí je jako základ pro výpočty požární bezpečnosti staveb považována právě „komplikovaná“ výhřevnost materiálů.

Hodnota výhřevnosti není přesnějším vyjádřením uvolněného tepla a její stanovení je značně komplikované. Mám zato, že hodnoty výhřevnosti jsou někdy ze spalného tepla určovány odhadem. Toto podezření podporuje i fakt, že zatímco cena kyslíkového kalorimetru je přibližně 50 tis. Kč, cena zařízení na elementární analýzu je odhadem minimálně 10× vyšší.

Zastánci užívání výhřevnosti odmítají spalné teplo především asi z důvodů tradice, taky jim však vadí, že je vyšší - přestože rozdíl není u tuhých hořlavých látek v průměru vyšší než 5 %. Z pohledu dosahované vysoké přesnosti stanovování spalného tepla je tento rozdíl významný, ovšem z pohledu dalšího použití této hodnoty - ve značné míře empirických a přibližných výpočtech požární bezpečnosti staveb - je zmíněných 5 % silně pod hodnotou dosažitelné přesnosti výpočtů.

### 3.3.2 Požární výhřevnost

Požární výhřevnost se stanovuje testem podle ČSN 73 0864<sup>[48]</sup>. Tuto metodu zařazují hned za klasický kyslíkový kalorimetr, i když je to velkorozměrová zkouška. Činím tak ze dvou důvodů: požární výhřevnost je statickou veličinou a v diskusi bude s kyslíkovou kalorimetrií často srovnávána.

## Popis zařízení a zkušební postupu

Požární výhřevnost je významnou požárně technickou charakteristikou v oboru požární bezpečnosti staveb. V normě je definována množstvím tepla, které se při hoření za definovaných podmínek uvolní z jednotky hmotnosti zkoušené látky, přičemž voda zůstává v podobě páry ve spalínách.

Zkouška se provádí v uzavřeném prostoru tvaru krychle o hraně 2,5 m. Stěny i strop jsou obloženy sádrovými tvarovkami, podlaha je z šamotových tvárníc. Ve stěnách spalovací komory je umístěno ve 4 vodorovných rovinách 48 termočlánků, ve stropě jsou 4 termočlánky. Uprostřed stropu se nachází vývod zplodin hoření (o průřezu 160 × 160 mm), ve kterém jsou umístěny další 4 termočlánky. V přední stěně je uzavíratelný vstupní otvor. V zadní stěně u podlahy v rohu komory je umístěno potrubí pro přívod vzduchu a uprostřed stěny u podlahy uzavíratelný otvor pro vsunutí kalibračního hořáku - oba otvory mají průřez 160 × 160 mm. Průběh zkoušky lze sledovat dvěma zasklenými průzory v boční stěně komory. Vstupním otvorem při provozu pece proudí vzduch v množství 700 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

Zkoušený materiál může být ve 3 tvarových modifikacích: látky v soudržném stavu se zkouší ve tvaru bloku nebo hranice, sypké se zkouší ve tvaru hromady.

**Ve tvaru bloku** se zkouší látky s objemovou hmotností 100 kg.m<sup>-3</sup> a nižší. Základna bloku má rozměry 400 × 300 mm, jeho výška závisí na objemové hmotnosti: nejlehčí materiály 400 mm, středně těžké 300 mm a nejtěžší 200 mm.

**Ve tvaru hranice** se zkoušejí materiály s objemovou hmotností vyšší než 100 kg.m<sup>-3</sup>. Hranice má rozměry 400 × 300 mm a výšku 200 mm. Je tvořena ze 14 hranolů o průřezu 50 × 50 mm (8 hranolů má délku 300 mm a zbylých 6 je dlouhých 400 mm). Hranice je tvořena 4 vrstvami hranolů a vyplňuje objem 24 litrů, přičemž zkoušená hmota zaujímá 50 % tohoto objemu.

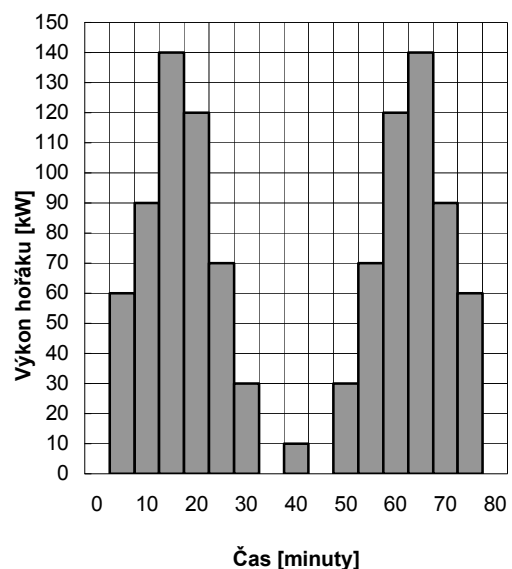
**Hromada** se vytvoří nasypáním 24 litrů zkoušeného materiálu na dno sběrné vany. Vrchol takto vzniklého kužele je ve středu spalovací vany. Na objemové hmotnosti zkoušeného materiálu v tomto případě nezáleží.

Zdroj vznícení je tvořen 100 g celulózy (buničina) rovnoměrně napojené 410 ml 96% ethanolu. Zdroj se zapaluje elektrickým palníkem. Umístění zdroje vznícení závisí na použitém tvaru vzorku: v případě bloku a hranice se umístí doprostřed pod zkoušený materiál a v případě hromady se přikládá shora na její povrch. Rozměry zapalovacího zdroje ani jeho přesné umístění v případě zapalování hromady není uvedeno. Celkové uvolněné teplo ani dobu hoření zdroje norma neuvádí. Podle výpočtu ze spalných tepel obou látek má teplo uvolněné zdrojem zapálení hodnotu 9,8 MJ.

Vzorek je umístěn na váze, která je ve středu spalovací komory. Vzorek ve tvaru bloku a hranice se podkládá roštem.

Zařízení pro záznam teplot a hmotnosti zkoušeného vzorku musí registrovat jednotlivá měření v intervalu max. 15 sekund.

Pro kalibraci zařízení se používá plynový hořák s difúzním plamenem spalující propan. Jeho výkon je nastavitelný v rozmezí od 0 do 50 kW. Doporučuje se hořák čtvercového tvaru o straně 300 mm. Hořák se umísťuje doprostřed komory. Kalibrace zařízení se pro-



Obr. 18 Schéma kalibrace kalorimetru

vádí podle časového schématu na obrázku 18. Celkové teplo uvolněné spálením plynu při kalibraci je 309 MJ.

### **Výpočty**

Při kalibraci zařízení i při vlastním měření se zaznamenávají teploty ve všech měřicích bodech, při měření současně i hmotnost zkoušeného materiálu. Je-li interval sběru dat 15 sekund, pak při měření trvajícím 1 hodinu získáme 13440 hodnot teploty. Teploty stěn (ve 4 horizontálních rovinách), stropu a vystupujících zplodin hoření se v jednotlivých časových intervalech průměrují. Tím se jejich počet zredukuje na 2160 hodnot. Tyto hodnoty se dosazují do devíti rovnic pro výpočet jednotlivých členů polymerického rozvoje ( $X_{(1+9j)}$ ), který má tvar:

$$P_{l,j} = A_0 + A_1X_{1,j} + A_2X_{2,j} + A_3X_{3,j} + A_4X_{4,j} + A_5X_{5,j} + A_6X_{6,j} + A_7X_{7,j} + A_8X_{7,j} + A_9X_{9,j}$$

$X_{1,j}, X_{2,j}, X_{3,j}$  jsou argumenty rozvoje zohledňující teplotu stěn a stropu v jednotlivých časových intervalech měření,

$X_{4,j}, X_{5,j}, X_{6,j}$  jsou argumenty rozvoje zohledňující vzestup nebo pokles teploty stěn a stropu v jednotlivých časových intervalech měření,

$X_{7,j}, X_{8,j}, X_{9,j}$  jsou argumenty rozvoje zohledňující teplotu odváděných spalin hoření.

$P_{l,j}$  je okamžitý tepelný výkon v  $j$ -tém intervalu měření [kW].

Z vypočtených hodnot  $P_{l,j}$  se stanoví množství uvolněného tepla při hoření vzorku v průběhu zkoušky  $Q_n$  [kJ].

$$Q_n = \Delta\tau \cdot \sum_{j=1}^n P_{l,j}$$

kde  $\Delta\tau$  je délka intervalu měření [s].

Požární výhřevnost vzorku se vypočte ze vztahu:

$$H_p = \frac{1}{m} \cdot (Q_n - Q_z)$$

kde:  $H_p$  - je požární výhřevnost vzorku [MJ.kg<sup>-1</sup>]

$m$  - hmotnost vzorku před zkouškou [kg]

$Q_z$  - je teplo dodané zdrojem vznícení [MJ]

Požární výhřevnost zkoušené látky se vypočte aritmetickým průměrem požární výhřevnosti, minimálně ze 2 vzorků, přičemž se tyto hodnoty nesmí lišit o více, než 15 % (z vyšší hodnoty).

### **Diskuse**

Tato metoda, přestože její výstupní veličina je statická, nám poskytuje možnost sledovat dynamiku procesu hoření. Nebyl by zásadní problém, přestože to v normě uvedeno není, získat hodnotu uvolňovaného tepla v závislosti na úbytku hmotnosti. Lze sledovat i rychlost odhořívání, dynamiku rozhořívání a další zajímavé charakteristiky zkoušených materiálů. Je proto škoda, že data získaná při měření nejsou lépe zužitkována. Také by nebylo zbytečné doplnit zkušební zařízení systémem pro měření optické hustoty kouře.

Klasická metoda stanovení výhřevnosti tuhých látek zabezpečuje dokonalé spálení zkoušené látky. A protože při volném odhořívání látek k jejich dokonalému spálení nedojde,



byla vypracována metoda pro stanovení požární výhřevnosti. Porovnejme některé aspekty průběhu hoření materiálů v obou zařízeních.

Tvar zkušebních vzorků: U kyslíkového kalorimetru (dále KK) na tvaru vzorku nezáleží. Hmotnost vzorku má být taková, aby vzestup teploty v kalorimetru byl v rozmezí  $2 \div 3$  °C. U požárního kalorimetru (dále PK) jsou 3 různé modifikace tvaru vzorku, přičemž je zřejmé, že výsledná hodnota požární výhřevnosti je často ovlivňována tvarem vzorku a jeho prostorovým uspořádáním. Rozměry vzorku ve tvaru hranice a objem hromady jsou konstantní, v případě bloku závisí na objemové hmotnosti zkoušené látky. V normě, v článku 18 je uvedeno, že látky v soudržném stavu se zkoušejí ve tvaru bloku nebo hranice, látky v rozděleném stavu ve tvaru hromady. Podrobnější návod - jaký tvar vzorku ke zkoušce použít ve sporných případech (materiály v rolích: textilie, koberce, izolační lepenky, atd.) již uveden není.

Při zkoušce sypkých hmot se zrnitost neuvádí, to znamená, že objem hromady vyplňuje hmota více či méně dokonale v závislosti na velikosti, pravidelnosti a tvaru zrn a také na poměrném zastoupení zrn v určité velikosti v celkovém množství látky. Zkoušený vzorek bude hutnější, bude-li velikost zrn malá a bude-li vzorek obsahovat velký podíl jemnějších frakcí. Mnohé materiály, budou-li jemně zrněné, prohoří do hloubky jen málo, tudíž i výsledná hodnota požární výhřevnosti bude nízká. V případě, když hromada neprohoří v celém svém objemu, si troufám tvrdit, že kdyby byla zapalována zdrojem dostatečného výkonu, míra prohoření by byla vyšší. Opět poukazují na nedostatečnost zápalného zdroje!

Další tvarovou modifikací vzorků u PK je hranice. Ta je tvořena hranolky o průřezu  $50 \times 50$  mm. Je celá řada materiálů, ze kterých lze takové hranolky připravit. Je také ovšem dost velké množství materiálů, ze kterých to možné není, např. vláknité materiály, textilní materiály, fóliové materiály, lepenky a mnohé termoplasty.

Nejméně problematický je případ vzorků ve tvaru bloku. Jedná se o materiály s objemovou hmotností nižší než  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Jde tedy především o lehčené plasty.

Nedostatkem PK je i to, že při stanovování požární výhřevnosti některých materiálů je možná volba tvaru vzorku podle výsledku. Zadavatel zajisté zvolí takový tvar (hranici nebo hromadu) u kterého měření poskytne nižší hodnotu požární výhřevnosti – většinou to bude vzorek ve tvaru hromady.

Je jasné, že KK je na tom lépe než PK.

Zapalování: U KK se zapalování vzorku provádí rozžhaveným drátkem ovitým kolem vzorku materiálu. Drátek je žhaven průchodem elektrického proudu. Jeho teplota je velmi vysoká - dochází k jeho roztavení a shoření. I když celkové množství tepla dodané zkoušenému materiálu není vysoké, postačuje ke zcela bezpečnému zapálení materiálu i v případě, že jeho spalné teplo je nízké. Není-li materiál bezpečně zapálen, případně neshoří-li zcela, přidá se ke zkoušenému materiálu snadno hořlavá látka (nejčastěji kyselina benzoová), která zapálení a dokonalé shoření umožní.

U PK je situace se zapalováním opět složitější. K zapálení vzorků ve všech tvarových variantách slouží celulózový tampón napojený ethylalkoholem. Celkové teplo dodané tímto zdrojem má hodnotu 9,8 MJ - to odpovídá přibližně 0,6 kg (asi  $1 \text{ dm}^3$ ) dřeva. Ethanol uvolní 8,1 MJ a celulóza 1,7 MJ. Zapalovací zdroj se vkládá pod rošt, do středu půdorysné plochy vzorku ve tvaru hranice nebo bloku. V tomto uspořádání je teplo produkované zdrojem předáváno studovanému materiálu s poměrně dobrou účinností. I když to v obou případech není stejné. V případě zapalování vzorku ve tvaru hromady leží zápalný zdroj na jejím povrchu, výškově 5 cm nad její základnou (měřeno k nižší hraně zdroje). V normě to sice uvedeno není, ale předpokládám, že se zápalný zdroj přikládá na „návětrnou“ stranu hromady. Teplo produkované zdrojem se v tomto případě podílí jen ve velice malé míře na vlastním ohřevu zkoušeného materiálu

Způsob hoření zdroje a také míra dokonalosti přestupu tepla do zapalovaného materiálu bude také záviset na velikosti zrn. Na povrch hromady tvořené jemnozrnným materiálem, celulósový tampón těsně dolehne a bude pak hořet jen na vnějším volném povrchu. Nehořící spodní strana tampónu bude navíc ochlazována v důsledku odčerpávaného výparného tepla ethylalkoholu, které má hodnotu  $0,97 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ . Zatímco na hromadu tvořenou materiálem hrubozrnným celulósový tampón těsně nedolehne, vzduch bude mít přístup ze všech stran, a pak bude hořet i jeho spodní strana. V tomto případě se také značně zintenzivní přestup tepla do materiálu, protože materiál, který je v kontaktu s tampónem, bude zahříván přímo plamenem. Mimoto, bude-li hořet ze všech stran, bude hořet kratší dobu a jeho tepelný výkon bude vyšší. Zapalování je tedy v rámci jednotlivých tvarových modifikací vzorků nestandardní.

Palivo	Teplota plamene [°C]	Tloušťka plamene [m]	Emisivita [-]	Radiační teplo dopadající na povrch kapaliny [kW]
Ethanol	1218	0,18	0,066	0,21
Benzín	1026	0,22	0,36	1,50
Petrolej	990	0,18	0,37	1,08
Benzen	921			2,51
po 2 minutách		0,22	0,59	
po 5 minutách		0,29	0,70	
po 8 minutách		0,30	0,72	

Tab. 8 Charakteristiky plamene kapalin v nádobě o průměru 0,3 m

Volba ethanolu jako paliva zápalného zdroje je bezesporu správná pro zapalování hranice a kvádry - tedy v případě že zdroj je umístěn pod zapalovaným materiálem. V případě, že leží na povrchu, je ethanol nevhodným palivem. Ethanol hoří téměř dokonale a plamen má vysokou teplotu, ovšem díky tomu má plamen také velice nízký emisní koeficient a jen malý podíl vznikajícího tepla se ve formě tepelného záření vrací na hořící povrch. Rasbash a kol. [49] studovali emisní parametry při hoření různých kapalin - tabulka 8

Tewarson [50] uvádí podíl konvenčního a radiačního tepla z celkového uvolněného tepla při hoření v zařízení *Factory Mutual Flammability Apparatus* pro některá kapalná paliva - tabulka 9. Hodnota X zde vyjadřuje efektivitu hoření paliva, v dalších sloupcích jsou uvedeny podíly této hodnoty odvedené konvekcí a radiací.

Palivo	X	X <sub>konv.</sub>	X <sub>rad.</sub>
Methanol	0,993	0,853	0,141
Heptan	0,690	0,374	0,316
Styren	0,550	0,180	0,370

Tab. 9 Konvekční a radiační teplo plamene

**Průběh hoření:** Hoření materiálu v KK je velice rychlé až explozivní. Materiál shoří dokonale. U PK je průběh hoření závislý na několika faktorech. Především je to opět tvar vzorku a s tím spojený způsob zapalování.

**Hranice:** Vzorek se zapaluje odspodu. Hoření se rozšiřuje svisle vzhůru a do stran. Výměna tepla probíhá prouděním, vedením i sáláním. Teplo produkované již hořícími hranolkami v nižších vrstvách spolupůsobí při zapalování hranolků ve vyšších vrstvách. Přístup vzduchu ke všem hranolkům je dobrý, materiál odhořívá na celém povrchu hranolků. Hoření materiálu je poměrně rychlé a poměrně efektivní.

**Blok:** Nebude-li vzorek z termoplastického materiálu, tedy nebude-li při zapalování docházet k jeho tavení, bude se zahřívat pouze na povrchu. Hořící zóna po rozšíření po spodní ploše bloku (umístěného na roštu) bude postupovat nahoru po svislých stěnách. Hořící plocha je maximálně rovná povrchu bloku. Přestup tepla probíhá po spodní vodorovné ploše a po svislých stěnách především prouděním, po horní vodorovné ploše sáláním. Ve hmotě se teplo šíří pouze vedením. Vzhledem k tomu, že se v případě bloku jedná především o pěnové materiály, je jejich tepelná vodivost velice nízká a prohřívání pomalé.

Jiná situace nastává, jedná-li se o termoplasty, které se působením zápalného zdroje taví. V tom případě mohou poměrně rychle roztát a budou odhořívát v kaluži na dně sběrné vany. U pěnových materiálů se sníženou hořlavostí, nebo u pěnového PVC by mohlo dojít dokonce k uhašení zápalného zdroje.

**Hromada:** Pro hoření je to nejméně vhodný tvar vzorku. Zapalování je obtížné, teplo zápalného zdroje je využito minimálně. Přestup tepla prouděním zcela odpadá, přestup tepla radiací je omezený, přestup tepla vedením je omezován výše zmíněným skupenským výparným teplem a posléze také nízkou tepelnou vodivostí (v důsledku zrnitosti materiálu). Není-li materiál termoplastický a netaje, pak se hoření šíří po povrchu hromady vzhůru a současně - pomaleji - po obvodu hromady. Rychlost prohořívání do hloubky materiálu je daná kvalitou materiálu (jeho chemickým složením) a také zrnitostí materiálu. Jemně zrněný materiál bude odhořívát pouze po povrchu a plocha hoření se rovná volnému povrchu hromady, zatím co u vzorků hrubšího zrna může materiál prohořívát v celém profilu (obdobně jako u hranice) a hořící plocha může být i několikrát větší. U tavicích se látek dochází během zapalování a vlastního hoření k roztékání materiálu<sup>3</sup>. Materiál pak odhořívá v kaluži ve sběrné vaně, a plocha hoření je maximálně rovna půdorysné ploše vany.

Velikost plochy vzorků v různých tvarových variantách je následující:

Blok při výšce	20 cm	5200 cm <sup>2</sup>
	30 cm	6600 cm <sup>2</sup>
	40 cm	8000 cm <sup>2</sup>
Hranice	20 cm	9600 cm <sup>2</sup>
Hromada při výšce	20 cm	asi 5000 cm <sup>2</sup>

Požární kalorimetr je zevnitř obložen sádrovými tvárnici. Proto není možné, aby se vnitřní povrchové teploty pohybovaly výrazně nad 100 °C. Je-li teplota stropu při zkoušce kolem 100 °C, potom stěny a podlaha komory jsou chladnější. Je tedy na místě otázka nakolik voda vzniklá při hoření zůstává v plynném stavu. Nepochybně při hoření látek s malou výhřevností dochází ke kondenzaci vodní páry a část vody přitom uvolní kondenzační teplo. Vypočtené hodnoty potom nejsou „čistou“ výhřevností, ale hodnotami pohybujícími se někde mezi „požárním spalným teplem“ a požární výhřevností. Podíl zkondenzované vody bude nižší u výhřevnějších látek a vyšší u látek s nižší výhřevností. Je to ale faktor méně významný, protože komorou proudí vzduch. Výměna vzduchu je velice intenzivní - protéká-li komorou 700 m<sup>3</sup> vzduchu za hodinu, pak se za tuto dobu vymění vzduch 44,8krát. Většina vodních par proto kondenzuje až mimo komoru a hodnotu požární výhřevnosti tak ovlivní jen málo.

Přesto, srovnáme-li opět KK a PK, potom je výsledek opět jednoznačně ve prospěch klasické kalorimetrie. U kyslíkového kalorimetru je proces hoření a bilance vznikající vody standardní a chyba stanovení spalného tepla nezávislá na množství uvolňovaného tepla.

Na závěr této kapitoly ještě krátký pohled na hodnotovou normu požární výhřevnosti hořlavých látek ČSN 73 0824<sup>[51]</sup>. Zde zjistíme, že z celkově 132 uvedených látek byla

<sup>3</sup> Hrozí nebezpečí vytékání taveniny ze záchytné vany, která má objem 12,5 litrů a zkoušený materiál 24 litrů!

zkouška v požárním kalorimetru provedena pouze u 44. To pro projektanty znamená, že pro 88 látek budou muset použít hodnotu výhřevnosti stanovenou v kyslíkovém kalorimetru. A je zde opět otázka: Vyplatí se za této situace drahé testování, jehož výsledkem je nejistá hodnota?

Spalné teplo, výhřevnost i požární výhřevnost jsou veličiny vyjádřené číselnou hodnotou - množstvím tepla uvolněného při hoření z jednotky hmotnosti. Tyto charakteristiky mají statickou povahu a neposkytují nám žádnou informaci o rozložení vývoje tepla v časové ose od zapálení přes postupné rozhořívání, případně až k ukončení hoření zkoušeného materiálu. Měnicí se množství uvolňovaného tepla v průběhu procesu hoření nám umožňují sledovat dynamické kalorimetrické metody. Znalost rozložení množství produkovaného tepla v čase je nutnou podmínkou pro posuzování dynamiky procesu v průběhu všech fází hoření a je dnes je základním předpokladem pro jakoukoli seriózní práci v mnoha oblastech požární vědy.

### **3.3.3 ČSN 73 0862 - Hořlavost stavebních hmot**

O něco lépe se dynamika procesu hoření dá sledovat při stanovování hořlavosti stavebních hmot podle ČSN 73 0862 <sup>[52]</sup>.

V roce 1981 vstoupila v platnost norma, která definovala hořlavost stavebních hmot na základě tepla uvolňovaného při hoření. Byla to velmi radikální změna, protože dříve platná ČSN 73 0853 hodnotila hořlavost stavebních hmot pouze na základě zjištěného úbytku hmotnosti materiálu během jeho tepelného namáhání.

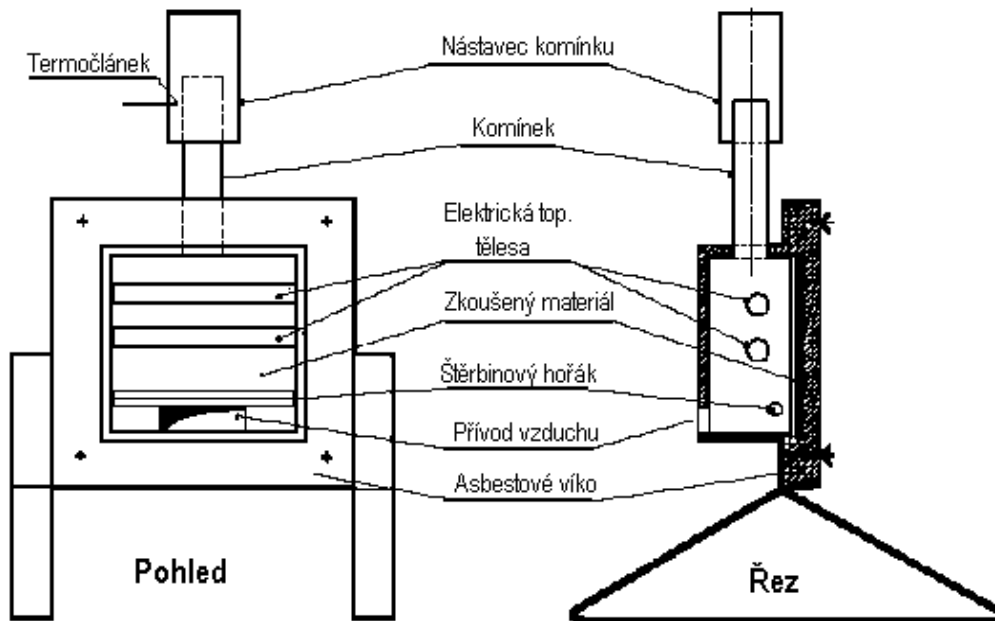
Zkušební zařízení použité v ČSN 73 0862 bylo převzato bez zásadních změn z britské normy BS 476: Part 6 *Fire propagation test*. K zásadním změnám však došlo v samotném postupu zkoušení a zejména ve způsobu vyhodnocování zkoušky - to však tehdy věděl asi jen sám autor naší normy.

#### **Popis zařízení a zkušebního postupu**

Zkoušený materiál má rozměry 220 × 195 mm a tloušťku 3 ÷ 30 mm. Zkušební vzorek se vkládá do zkušebního zařízení ve vertikální poloze, zkoušenou plochou směrem k tepelným zdrojům. Tepelné namáhání zkoušeného materiálu je realizováno dvěma druhy zdrojů, podélným šterbinovým plynovým hořákem umístěným ve spodní části spalovacího prostoru a dvěma tepelně radiačními zdroji (elektrickými odporovými spirálami) o příkonu 1 kW. Tepelný výkon plamenného hořáku při zkoušce je asi 600 W a dvou odporových spirál činí dohromady asi 1300 W. Výkony tepelných zdrojů jsou udávány nepřímo, nastavují se při kalibraci zařízení a jsou vázány na dosažení určitých teplot spalin v určitých časech zkoušky. Teplota spalin se měří v komínku, do kterého ústí spalovací komora. Vzduch vstupuje do zkušebního otvoru otvorem ve spodní části zadní stěny. Průtok vzduchu je regulovatelný změnou světlosti vstupního otvoru. Zkušební zařízení je na obrázku 19.

Před měřením je nutno zařízení seřídit, resp. nastavit výkon tepelných zdrojů a seřídit průtok vzduchu vstupujícího do spalovacího prostoru. Kalibrace i vlastní měření má tři na sebe navazující časové úseky. Při kalibraci se do pozice zkoušeného materiálu vloží azbestová deska. V první části kalibrace se zapálí plynový hořák, množství plynu musí být takové, aby teplota spalin naměřená v komínku byla na konci 3. minuty  $90 \pm 5$  °C. Poté se přívod plynu uzavře a zařízení se nechá 2 minuty chladnout. Změnou průtoku vzduchu nasávaného vstupním otvorem je nutno zajistit, aby na konci 5. minuty teplota vzduchu v komínku klesla na hodnotu  $55 \pm 5$  °C. Na začátku 6. minuty se znovu zapálí plynový hořák a zapnou se elektrická topná tělesa. Teplota na konci 20. minuty musí dosáhnout hodnoty v rozmezí  $260 \pm 10$  °C. Výši dosažené teploty ve třetím úseku kalibrace je možno ovlivnit pouze

seřizováním výkonu sálavých zdrojů. Průběh teploty spalin v komínku při kalibraci a při zkoušce je na obrázku 20.

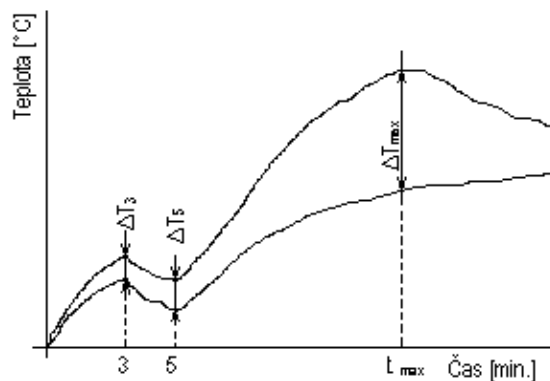


Obr. 19 Schéma zkušebního zařízení podle ČSN 73 0862

### Vyhodnocování měření a výpočty

Vlastní zkouška pak probíhá, stejně jako při seřizování aparatury, ve třech časových úsecích a na vzorek působí oba typy tepelných zdrojů nastaveným výkonem. Je-li materiál hořlavý, potom jsou teploty spalin vyšší než při seřizování přístroje.

Míra hořlavosti testovaných materiálů se stanoví na základě zjištěných hodnot rozdílů teplot spalin v průběhu zkoušky. V prvním úseku zkoušky, kdy je v činnosti pouze plamenný zdroj, se z průběhu teploty spalin zjišťuje, došlo-li k zapálení zkoušeného materiálu. Z rozdílu teplot při kalibraci a při zkoušce se na konci 3. minuty získá hodnota  $\Delta T_3$ . V následujícím dvouminutovém úseku se zjišťuje, zda teplo dodané plynovým hořákem bylo dostatečné pro udržení dalšího hoření zapáleného materiálu, anebo je jeho hoření přerušeno a teplota v komínku začne klesat. Na konci 5. minuty se odečítá hodnota  $\Delta T_5$ . V konečném úseku působí na zkoušený materiál kombinované tepelné namáhání až do konce zkoušky. Srovnáním průběhu teplot se odečte  $\Delta T_{\max}$  a  $\tau_{\max}$ , což je jednak maximální rozdíl teplot mezi zkouškou a kalibrací v průběhu celé zkoušky a čas od začátku zkoušky k dosažení příslušné hodnoty  $\Delta T_{\max}$ . Zjištěné hodnoty spolu s objemovou hmotností zkoušeného materiálu se dosadí do vztahu pro výpočet  $Q$ .



Obr. 20 Průběh teplot při cejchování a zkoušce

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta T_5}{\Delta T_3 \cdot \rho}} \cdot \overline{\Delta T}_{\max} \cdot \frac{20}{\tau_{\max}}$$

Vypočtená hodnota Q zařadí zkoušený materiál pod určitý stupeň hořlavosti podle tabulky 10

Hodnota Q	Stupeň hořlavosti	Slovní označení
$Q \leq 50$	<b>A</b>	<b>Nehořlavé</b>
$50 < Q \leq 150$	<b>B</b>	<b>Nesnadno hořlavé</b>
$150 < Q \leq 300$	<b>C1</b>	<b>Těžce hořlavé</b>
$300 < Q \leq 600$	<b>C2</b>	<b>Středně hořlavé</b>
$Q > 600$	<b>C3</b>	<b>Lehce hořlavé</b>

**Tab. 10** Hodnoty Q pro zařazení stavebních hmot do tříd hořlavosti

## Diskuse

Zastavme se u konstrukce vztahu pro výpočet hodnoty Q.

### První člen rovnice s odmocninou

$\Delta T_5$  - Hoří-li materiál samovolně i po zhasnutí plamene hořáku je hodnota  $\Delta T_5$  vysoká, a vyšší bude také hodnota Q. Naopak nedojde-li k zapálení vzorku materiálu plamenným hořákem, bude teplota v komínku po uhasnutí plamene klesat a  $\Delta T_5$  bude nízká. Hodnota  $\Delta T_5$  bude někde v rozmezí uvedených případů, když sice k zapálení materiálu dojde, ale pak se samovolné hoření přeruší.

$\Delta T_3$  - Charakterizuje jednak snadnost zapálení (zapalitelnost) materiálu, ale i schopnost šíření plamene. Čím dříve dojde k zapálení materiálu a čím větší plochu během tří minut plamen zasáhne, tím bude hodnota  $\Delta T_3$  vyšší. Dalo by se předpokládat bych, že také zjištěná hořlavost by v tom případě měla být větší. Avšak vzhledem k tomu, že se  $\Delta T_3$  nachází ve jmenovateli zlomku, bude hodnota Q tím vyšší, čím nižší bude hodnota  $\Delta T_3$ , to znamená - pokud nedojde k zapálení materiálu! Navíc umístění tohoto členu do jmenovatele znemožňuje výpočet zlomku v případě, když je roven nule - k tomu problému ještě později.

$\rho$  - Objemová hmotnost materiálu (nejedná-li se o porézní materiály) je hodnotou, která přímo neovlivňuje průběh zkoušky, avšak hodnotu Q ovlivňuje dosti významně. Běžné kompaktní stavební hmoty mají objemovou hmotnost 0,5 až 2 g.cm<sup>-3</sup>. Vzhledem k tomu, že tato veličina je opět ve jmenovateli, pak lehčí materiály budou Q zvyšovat a těžší snižovat. Příslušný faktor k uvedenému rozmezí  $\rho$  je  $1,41 \div 0,71$ . Pro lehčený materiál, který má objemovou hmotnost např. 50 kg.m<sup>-3</sup> (0,05 g.cm<sup>-3</sup>) však tento faktor činí již 4,47. Je otázkou, jaký význam zde má hodnota  $\rho$ . Má být hmota hořlavější jen proto, že má malou objemovou hmotnost? Lehčené plasty se při zahřívání chovají různě. O některých, např. tvrdá PUR pěna, je možno říci, že při zahřívání a hoření se jejich objemová hmotnost výrazně měnit nebude. Úbytek hmotnosti je provázen zmenšením objemu při zachování tvaru vzorku. Většina ostatních, především termoplasty, se však buď zcela roztaví a stékají do vaničky na dně komory, nebo měknou a ztrácejí pěnovou strukturu, přičemž si plošný tvar a rozměry mohou do jisté míry zachovat. Hoří-li roztavená pěna pouze ve vaničce, je namísto jistý zvětšující faktor, protože plocha hoření se zredukuje na půdorysnou plochu vaničky (195 × 60 mm). Ovšem při zahřívání roztají i nelehčené formy některých termoplastů, na což se již ohled nebere. Vztah k hodnotám naměřených teplot (tedy i k hodnotě Q) by byl zřetelnější, kdyby se při výpočtu místo objemové hmotnosti brala v úvahu hmotnost a tloušťka zkoušeného materiálu. Navíc odmocnina, která se zde nachází, znemožňuje výpočty pro záporné  $\Delta T_5$  nebo  $\Delta T_3$ .

### Další členy rovnice

$\Delta T_{\max}$  - Vyšší hodnota zvyšuje Q. V tomto případě přímo, na rozdíl od  $\Delta T_5$  a  $\Delta T_3$ , které jsou pod odmocninou.

Podíl  $20/\tau_{\max}$  - Je-li hodnota  $\Delta T_{\max}$  dosaženo ve 20. minutě, tedy až na konci zkoušky, chová se tento člen k hodnotě Q neutrálně. Čím je hodnota  $\tau_{\max}$  nižší, tím se Q zvyšuje.

\* \* \*

Aby bylo možno vyhnout se případům, ve kterých by vztah s odmocninou neměl v oboru reálných čísel řešení, je v normě uvedeno, že pokud  $\Delta T_5$  nebo  $\Delta T_3$  je záporný nebo nulový, nahrazuje se výraz pod odmocninou v rovnici hodnotou 1. Je-li hodnota Q takto konstruována, je nutno se vyhnout případům matematicky neřešitelných možností. Jaký dopad má ovšem toto řešení na výsledné hořlavosti látek? Tyto případy sice nejsou tak časté, ale vyskytují se, a proto budou probrány podrobněji.

$\Delta T_3$  vychází záporný, např. v případě, že se materiál plamenným zdrojem nezapálí, ale teplo plamene se spotřebuje na ohřev zkoušeného materiálu ve větší míře než při cejchování zařízení. Třeba proto, že materiál má větší tepelnou vodivost, nebo větší tepelnou kapacitu, nebo se toto teplo spotřebuje na tavení materiálu, vypaření vody (z hmot obsahujících vlhkost), na iniciaci a průběh endotermních rozkladných reakcí. Nedojde-li k zapálení materiálu, pak jako záporný vychází často i  $\Delta T_5$ . Když ovšem dojde k zapálení materiálu až na konci třiminutové fáze zapalování, může být  $\Delta T_3$  záporný, ovšem v tom případě je  $\Delta T_5$  kladný, s hodnotou i několika desítek stupňů. Byl-li by tento rozdíl např. jen 16 °C, znamenalo-by to, že hodnota Q by měla být 4× vyšší. Ovšem za odmocninu je nutno dosadit 1, a tím vlastně hodnotu Q 4× snížit - v případě pěnových materiálů (viz případ uvedený výše) snížit ještě jednou 4×. Uvědomíme-li si, že rozdíl 1 °C může způsobit, že výsledná hodnota může být až 16× vyšší, pak je zde jistě něco v nepořádku. Materiál s hodnotou Q = 40 je s rezervou ve stupni hořlavosti A, s hodnotou 16× vyšší, tj. 640 je již bezpečně mezi lehce hořlavými materiály ve stupni hořlavosti C3.

Vyhodnocováním zkoušky je značně problematické. Řešení je asi jediné - změna výpočetního vztahu. Předně by se měla odstranit odmocnina a také  $\Delta T_3$  nesmí být ve jmenovateli. Objemovou hmotnost nahradit vztahem, v němž by se znevýhodnila malá tloušťka vzorku (viz dále) a vystupovala by v něm hmotnost vzorku. Také by bylo vhodnější rozdělit vztah do několika členů, které by reprezentovaly jednak chování materiálu v průběhu zapalování (např.  $\Delta T_5$  a  $\Delta T_3$  a další) a jednak v průběhu dalšího hoření. Tento další člen by mohl mít dosud používaný tvar:  $\Delta T_{\max} \cdot 20/\tau_{\max}$ . Toto řešení by povolovalo nulovou nebo i zápornou hodnotu  $\Delta T_5$  nebo  $\Delta T_3$ .

### Tloušťka zkoušených materiálů

Platné znění ČSN 73 0862 stanoví v čl.19, že tloušťka vzorků je 3 až 30 mm. V materiálech obsahujících více než 50 % organických látek, jsou rozmezí tlouštěk předepsány v závislosti na jejich objemové hmotnosti:

20 ÷ 30 mm pro materiály s objemovou hmotností do 100 kg.m<sup>-3</sup>

5 ÷ 20 mm pro materiály s objemovou hmotností nad 100 až do 700 kg.m<sup>-3</sup>

3 ÷ 5 mm pro materiály s objemovou hmotností nad 700 kg.m<sup>-3</sup>.

Bude také vhodné připomenout, že tato metoda hodnotí hořlavost hmot jako takových, tedy nikoli jako výrobků s jistými danými výrobními tloušťkami, případně různou skladbou hmot. Další věc, která zde už podrobněji komentována není: U vrstvených hmot je nutno každou hmotu použitou v konstrukci posuzovat samostatně, bez ohledu v jaké hloubce se ten který materiál nachází a jaké další materiály jej kryjí!

Jak tedy souvisí povolené tloušťky stavebních hmot s jejich hořlavostí? Z uvedeného plyne, že čím je zkoušená hmota lehčí, tím je povolená tloušťka vzorku větší. Tím se má částečně vyrovnávat hmotnost zkušebních vzorků. V tabulce 11 jsou uvedeny hmotnosti vzorků určité přípustné tloušťky pro různé objemové hmotnosti.

Skupina	$\rho$	Min. tloušťka	Hmotnost	Max. tloušťka	Hmotnost
	[kg.m <sup>-3</sup> ]	[m]	[g]	[m]	[g]
1.	50	0,02	<b>42,9</b>	0,03	64,4
	100	0,02	<b>85,8</b>	0,03	<b>128,7</b>
2.	110	0,005	<b>23,6</b>	0,02	94,4
	500	0,005	107,3	0,02	429,0
	700	0,005	150,2	0,02	<b>600,6</b>
3.	710	0,003	<b>91,4</b>	0,005	152,3
	1000	0,003	128,7	0,005	214,5
	1500	0,003	193,1	0,005	<b>321,8</b>
4.	200	0,003	<b>25,7</b>	0,03	257,4
	1000	0,003	128,7	0,03	1287,0
	3000	0,003	386,1	0,03	<b>3861,0</b>

**Tab. 11 Hmotnosti různých tlouštěk vzorků pro stanovení hořlavosti stavebních hmot podle ČSN 73 0862**

Zvýrazněné hodnoty představují navzájem nejvzdálenější možné hodnoty hmotnosti vzorků. U nejlehčích hmot (skupina 1.) je rozdíl hmotnosti 3násobný, u hmot střední objemové hmotnosti (skupina 2.) je rozdíl více než 25násobný a u hmot nejtěžších (skupina 3) je možný rozdíl hmotností vzorků 3,5násobný. U 4. skupiny, tj. hmot obsahujících méně než 50 hm.% hořlavých látek, může být rozdíl hmotností až 150násobný!

Množství uvolněného tepla závisí více na hmotnosti zkoušené hmoty, tedy na tloušťce vzorku, než na jeho objemové hmotnosti. To platí především v případě, že zkoušená hmota prohoří celou tloušťkou ještě před koncem zkoušky, a v důsledku toho se začne v závěru zkoušky snižovat množství uvolňovaného tepla - tedy i teplota spalin v komínku. Příznivější hodnotu hořlavosti bude mít hmota zkoušená v menší tloušťce a zájemci o provádění této zkoušky si to jistě dovedou spočítat. Jako nejzávažnější se tato chyba normy jeví u materiálů 2. a 4. skupiny materiálů. Do 2. skupiny materiálů (podle tab. 11) spadá většina druhů dřeva a aglomerovaných dřevních hmot. Do 4. skupiny náleží hmoty na bázi minerálních materiálů (sádra, cement, minerální vlákna a pod.) plněných nebo pojených organickými materiály (celulózové materiály, lehčené plasty, organická pojiva). Hmoty ve 2. skupině budou většinou zařazovány mezi hořlavé - stupeň B až C3, hmoty ve 4. skupině budou většinou nehořlavé a nesehnadno hořlavé - stupeň hořlavosti A nebo B.

Předepsané tloušťky zkušebních vzorků stavebních hmot lze zpochybnit i jinak, z pohledu reálných tlouštěk používaných hmot. Uvedu pár příkladů:

a) Překližky a dřevotřískové desky: svou objemovou hmotností větší než 700 kg.m<sup>-3</sup> by měly být zkoušeny v tloušťce 3 až 5 mm. V konstrukci stavebního prvku nebo i samostatně jsou tyto hmoty ve většině případů používány ve větších tloušťkách. Zkouška provedená na dřevotřískové desce tloušťky 3 mm poskytne nepochybně nižší hodnotu Q, než kdyby byla tato hmota zkoušena v použité tloušťce - např. 10 nebo 20 mm.

b) Lehčené hmoty: Opakem jsou případy lehčených hmot v malých tloušťkách, používané např. jako parotěsné vložky, tepelné nebo akustické izolace. Nelze zkoušet hmotu tenčí než 20 mm.

Řešení problému s předepsanou tloušťkou je snadné. Neposuzovat hmotu jako takovou, ale konkrétní výrobek v přirozené tloušťce. Omezení maximální použitelné tloušťky, dané konstrukcí zkušební aparatury (asi 30 mm), by mohlo být vyřešeno úpravou přístroje. Domnívám se, že tloušťka 50 mm by mohla být dostatečná.



Některými jinými aspekty této normy se zabývali Osvald a Krakovský z VŠLD ve Zvolení <sup>[54]</sup>

*Poznámka:* V době zpracovávání tohoto textu proběhla diskuse k probíhající revizi ČSN 73 0862. Z výsledků diskuse vyplývá, že žádné významné změny v normě nenastanou. Žádná z výše uvedených připomínek nebyla nakonec akceptována, což znamená, že kritizované nedostatky jsou stále v platnosti a že z těchto hledisek se norma nez kvalitnila. Naopak, přibyly další dvě diskutabilní věci. Dřevaři prosadili, aby se v budoucnu vzorky dřev a dřevních hmot zkoušely v jednotné tloušťce 10 mm. To je ovšem nekompatibilní opatření vzhledem k jiným materiálům a také se pozbývá možnost rozlišení hořlavosti tenčích nebo hrubších dřevěných materiálů. Revize také do budoucna asi znemožní, nebo aspoň sníží možnost posouzení dynamiky hoření materiálu při zkoušce, neboť zkušební laboratoře již nebudou povinny do dokumentace o zkoušce zařazovat záznam průběhu teploty. Byl jsem sice ujišťován, že pokud si záznam teplot zákazník od testovací laboratoře vyžádá, jistě mu ji ona poskytne. Zákazník obdrží jen všechny nutné hodnoty pro výpočet Q, samotnou hodnotu Q a výsledné zařazení testované stavební hmoty. Bez znalosti průběhu teploty při zkoušce se žádné další poznatky o hoření testované hmoty odvodit nedají.

### 3.3.3.1 ČSN 73 0862 změna B

Když se na trhu objevily zpěňující hmoty retardující hoření (většinou se jedná o hmoty nanášené nátěrem, nástřikem, máčením nebo poléváním), byla do systému stanovování stupně hořlavosti stavebních hmot zavedena významná změna. Tyto hmoty působením tepla vytvářejí vrstvu pěny tloušťky 10 i více milimetrů. Jednoduchá úvaha, vycházející z konstrukce přístroje podle ČSN 73 0862, vedla patrně k závěru, že je-li tloušťka napěněného nátěru větší než 5 mm, dojde k ucpání štěrbinu plynového hořáku, a to znemožní zapalování zkoušeného materiálu. Patrně však toto experimentálně nikdo neověřoval. Problém byl vyřešen vypracováním změny B ČSN 73 0862. Ta je tedy určena pro stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot opatřených zmíněnými nátěry. Pro tyto požárně retardační hmoty se také používá označení intumescentní. Intumescentní nátěry se aplikují na kovové konstrukce, elektrické kabely, samostatně jako ucpávkové hmoty, ale především na hořlavé stavební hmoty na bázi dřeva. Dřevo a dřevní hmoty opatřené těmito nátěry jsou také podle této normy nejčastěji testovány. Změna B předepisuje určování stupně hořlavosti takové stavební hmoty na základě úbytku hmotnosti vzorku před a po provedené zkoušce. Jinými slovy do systému ČSN byla znovu zařazena jednou již opuštěná metoda (viz úvod kapitoly).

#### Podstata zkoušky

Vzorek hmoty s nátěrem o rozměrech 200 × 100 mm, s tloušťkou v rozmezí předepsaném pro standardní zkoušku, se po dobu 10 minut vystaví působení plamene plynového hořáku, tepelného výkonu 550 W. Úbytek hmotnosti po zkoušce, vyjádřený v procentech, je pak rozhodující pro určení stupně hořlavosti hmoty (tab. 12). Vzhledem k tomu, že dřevo a materiály na bázi dřeva jsou navlhavé a současně obsahují jisté rovnovážné množství vody, je nutné zkušební vzorky před zkouškou a po zkoušce klimatizovat. Po zkoušce především proto aby se obnovila a ustálila rovnovážná přirozená vlhkost hmoty.

Skupina hořlavosti		Hmotnostní úbytek - $\Delta m$ [%]	Doba žhnutí - $\tau$ [min]
<b>A</b>	<b>Nehořlavý</b>	$\Delta m \leq 2$	$\tau = 0$
<b>B</b>	<b>Nesnadno hořlavý</b>	$2 < \Delta m \leq 5$	$\tau \leq 3$
<b>C1</b>	<b>Těžce hořlavý</b>	$5 < \Delta m \leq 10$	$3 < \tau \leq 10$
<b>C2</b>	<b>Středně hořlavý</b>	$10 < \Delta m \leq 50$	$10 < \tau \leq 20$
<b>C3</b>	<b>Lehce hořlavý</b>	$\Delta m > 50$	$\tau > 20$

Tab. 12 Kritéria pro zařazení stavebních hmot do stupňů hořlavosti

## Diskuse

Opět je důležité vycházet ze všeobecných zásad bezpečnosti. Předně, systémově není správné, aby se materiály do stupňů hořlavosti stavebních hmot zaříd'ovaly podle dvou zcela rozdílných postupů zkoušení a na základě zcela odlišného principu hodnocení.

Z požárně bezpečnostního hlediska běžné materiály se podrobují přísnější zkoušce než materiály, které musí splňovat vyšší bezpečnostní požadavky. Vyšší přísnost zkoušky standardním postupem vyplývá ze srovnání obou postupů.

**Standardní postup:** plamenný zdroj má výkon cca 600 W, tepelně radiační zdroje mají celkový výkon asi 1200 W, doba tepelné expozice materiálu vnějšími zdroji je 18 minut (nepočítáme-li dvouminutový úsek bez tepelného namáhání). Vzorek má vertikální polohu a je zapalován ve spodní části, navíc ve zkušebním zařízení působí komínový efekt, který podporuje hoření.

**Změna B:** výkon plamenného zdroje 550 W, doba tepelné expozice materiálu je pouze 10 minut, zkoušený vzorek je odkloněn od vertikální roviny o 45 %, vzorek se zapaluje ve středu exponované plochy, uspořádání zkoušky nevyvozuje nucený přísun vzduchu k exponované ploše, neuplatňuje se komínový efekt.

\* \* \*

Zkušenosti z naší laboratoře ukazují, že většina intumescentních nátěrů aplikovaných na rostlém i aglomerovaném dřevě nezpůsobí celkové ucpání štěrbiny hořáku a uhašení plamene, a zásadně tak nebrání používání standardního postupu testování. Používám formulaci „většina nátěrů“ pouze z opatrnosti, skutečnost je taková, že jsme v naší laboratoři dosud nenarazili na nátěr, který by nebylo možné zkoušet standardním postupem..

Fakt, že plamen hořáku hoří dále i když vrstva vzniklé pěny je větší než vzdálenost štěrbiny od původního povrchu zkoušeného vzorku, je mnoha zkouškami ověřen. Vysvětlení je vcelku jednoduché - nátěrová hmota při zahřívání měkne a stává se plastickou. V tomto plastickém stavu pak začíná napěňování. Dynamický tlak plynu proudícího ze štěrbiny v této měkké vyvíjející se pění, vytvoří volný prostor - podélný žlábek, ve kterém plamen hoří dále. Dalším zahříváním vznikající pěny dochází k její mineralizaci a karbonizaci, přičemž pěna částečně tuhne a černá. Nelze ovšem tvrdit, že je plamen vždy po celé délce štěrbiny rovnoměrný, někdy dochází k nerovnoměrnostem ve výšce napěněné vrstvy, stejně tak bývá někdy nekonstantní hloubka vytvořeného žlábků. To jsou sice nepravidelnosti ve standardním průběhu zkoušky, ale podle mého názoru jej výrazně neovlivňují. Toto ovlivnění je jistě menší než v případě zkoušení tavících se materiálů, které stékají do žlábků na dně komory a kdy se tepelný tok elektrických spirál i teplo plamene hořáku podílí na tepelném namáhání studovaného materiálu jen krátce a nesrovnatelně méně než u netajících materiálů. A pro tavící se materiály tento postup vyhovuje?!

Další argument proti změně B vychází také ze zkušenosti a souvisí se zjišťovaným úbytkem hmotnosti vzorku. Do jisté míry platí, že čím je vrstva nátěru větší, tím vyšší je i vrstva vzniklé pěny. Platí také to, že vyšší vrstva pěny zvyšuje ochranný efekt. Na druhé straně ovšem také platí, že čím vyšší je vrstva nátěru, tím vyšší je i úbytek hmotnosti vzorku po zkoušce. Tento úbytek, při aplikaci kvalitních nátěrů, je ovšem způsoben především úbytkem hmotnosti samotného nátěru. Není problém upravit dřevo nátěrem tak, aby po zkoušce zůstalo zcela neporušené. Logicky by potom mělo být zařazeno jako nehořlavé. Ovšem úbytek hmotnosti nátěru zařadí takový materiál jako hořlavý. Tloušťka nátěru pak musí být volena tak, aby vyhověla zkoušce, a ne s ohledem na optimální ochranný účinek.

Přes všechny uvedené výhrady je nutno připustit, že nátěr, který neumožní použít standardní postup stanovení stupně hořlavosti, existovat může a v tom případě je dobře, že s tím norma počítá.

Řešení by mohlo být kompromisem se zachováním změny B. Text normy by mohl být změněn v tomto smyslu: „Všechny materiály se zkoušejí standardně. Pokud dojde k napětění a/nebo zvětšení objemu zkoušené hmoty do takové míry, že plamen šterbinového hořáku nemůže dále volně hořet, zkouší se tato hmota postupem podle změny B“.

### **3.3.4 ČSN 73 0861 - Stanovení nehořlavosti stavebních hmot**

V této normě je popsán postup zkoušky, kritéria pro hodnocení a konstrukce zkušebního zařízení. Zkouška slouží pro stanovení nehořlavosti stavebních hmot.

#### **Popis zkušebního zařízení**

Zkušební zařízení je tvořeno svisle orientovanou válcovou elektricky vyhřívanou pecí. Ve spodní části na pec navazuje dlouhý plechový nástavec ve tvaru komolého kužele. Tento nástavec zajišťuje požadované podmínky proudění vzduchu zkušebním zařízením. Vzorek zkoušeného materiálu je ve tvaru válečku o průměru 45 mm a výšce 50 mm. Součástí aparatury je regulátor teploty v peci a dále tři termočlánky. Jeden termočlánek snímá teplotu v těžišti vzorku  $T_c$  (vkládá se vyvrtným otvorem až do poloviny výšky válečku), druhý termočlánek snímá povrchovou teplotu vzorku  $T_s$  (v polovině výšky válcové stěny vzorku) a třetí termočlánek měří teplotu pece  $T_f$  (a současně slouží i k regulaci teploty pece). Regulační termočlánek je ve vzdálenosti 10 mm od vyhřívaného povrchu pece. Regulátorem se udržuje teplota v peci na hodnotě 750 °C, přičemž teplota stěny pece je přibližně 830 °C. Schéma zkušebního zařízení je na obrázku 21.

#### **Postup zkoušky a vyhodnocování měření**

Zkouška začíná vložením předem zváženého vzorku materiálu do definované pozice v peci a sleduje se:

- teplota na termočláncích,
- doba případného plamenného hoření vzorku (zjišťuje se celkový čas většinou i přerušovaného hoření),
- po provedené zkoušce a vychladnutí vzorku se vzorek zváží.

Zkouška trvá asi 30 minut, přičemž její ukončení závisí na průběhu teplot na termočláncích. Konec zkoušky je dán ustálením měřených teplot.

Vyhoví-li zkoušená hmota podmínkám nehořlavosti, určuje se z průběhu teplot na třech termočláncích a z hmotnostního úbytku vzorku. Z průběhu teplot se stanoví maximální hodnoty a rovnovážné teploty na konci zkoušky. Z nich se pak stanoví rozdíly příslušných teplot:

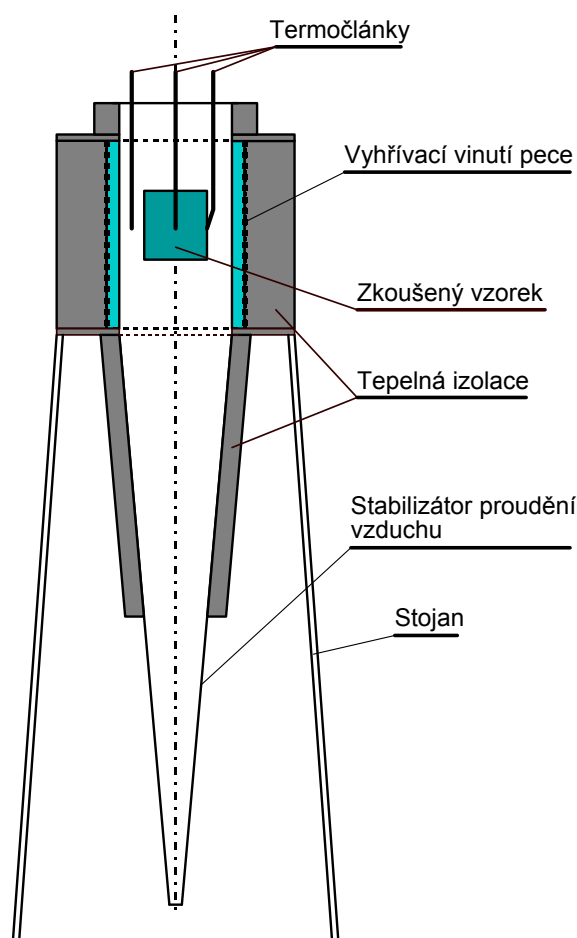
$$\Delta T_f = T_{f(\max)} - T_{f(\text{kon})} \text{ pro nárůst teploty v peci,}$$

$$\Delta T_c = T_{c(\max)} - T_{c(\text{kon})} \text{ pro nárůst teploty ve středu vzorku a}$$

$$\Delta T_s = T_{s(\max)} - T_{s(\text{kon})} \text{ pro nárůst teploty na povrchu vzorku.}$$

Zkoušený materiál je hodnocen jako nehořlavý v případě, že:

- ani jeden změřený nárůst teploty není vyšší než 50 °C,
- doba plamenného hoření vzorku není delší než 20 s,
- hmotnostní úbytek vzorku v průběhu zkoušky není vyšší než 50 %.



Obr. 21 Schéma zařízení podle ČSN 73 0861

### Diskuse

Tato zkouška je ve světě velice rozšířená. V jednotlivých státech však mohou být odlišná kritéria pro hodnocení materiálu. V systému ČSN jsou dvě metody pro potvrzení nehořlavosti stavebních hmot. Mimo ČSN 73 0861 je to také ČSN 73 0862, resp. změna B této normy. Není nikde uvedeno, ve kterých případech se mají uvedené normy aplikovat. Je přirozené, že výsledky obou postupů nemusí být totožné a je jen na uživateli, který z výsledků použije. Patrně to bude vždy ten příznivější.

Jako nedostatek ČSN 73 0861 je možno chápat předepsaný tvar vzorku. Ne každou stavební hmotu lze do požadovaného tvaru zformovat. Nelze proto stanovit nehořlavost např. sypkých materiálů, materiálů tvořených více hmotami (např. vrstvené materiály). Nehořlavost těchto typů materiálů však nelze prokázat ani zkouškou podle ČSN 73 0862.

### **3.3.5 Kónický kalorimetr**

Tato norma obsahuje v současnosti nejužitečnější a nejprogresivnější zkušební postup pro testování hořlavých látek v rámci požárního zkušebnictví. Hlavním smyslem této normy je stanovení rychlosti uvolňování tepla při tepelném namáhání hořlavých materiálů. Je to v podstatě dynamická kalorimetrická metoda, poskytující celou řadu významných údajů popisujících průběh hoření od zapálení vzorku až po jeho uhasnutí. Kalorimetrické výpočty tradičně vycházejí z různých modifikací kalorimetrické rovnice. Autoři této normy využili postup jiný.

V roce 1917 Thornton<sup>[55]</sup> ukázal, že pro velké množství organických kapalin a plynů platí, že teplo uvolněné jejich spálením přepočtené na hmotnostní jednotku spotřebovaného kyslíku je do jisté míry konstantní. Huggett<sup>[56]</sup> zjistil, že to také platí pro tuhé látky a publikoval také přibližnou hodnotu této konstanty - 13,1 MJ.kg<sup>-1</sup> kyslíku (tab. 13).

Již v roce 1968 Hinkley a kol.<sup>[57]</sup> navrhli, že změny v koncentraci kyslíku ve zplodinách hoření by mohly být použity ke zjištění rychlosti uvolňování tepla v *British Fire Propagation Test*. Asi první aplikací, ve které byla použita tato metoda, byl tunelový test ASTM E84<sup>[58]</sup> - v roce 1977. Později Sensening<sup>[59]</sup> využil měření spotřeby kyslíku v testování hořlavých úprav stěn. Koncem 70. a začátkem 80. let byla technika měření zdokonalována v *National Bureau of Standards* (NBS), později přejmenovaném na *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Parker<sup>[60]</sup> v roce 1982 publikoval matematické formulace pro výpočty rychlosti vývoje tepla na základě spotřeby kyslíku pro různé aplikace. Ve stejném roce Babrauskas<sup>[61]</sup> publikoval první návrh kónického kalorimetru. V roce 1987 byl kónický kalorimetr doplněn optickým systémem pro sledování vývoje kouře a systémem pro gravimetrické stanovení tuhých částic v kouři<sup>[62]</sup>.

Polymery	Výhřevnost [kJ.g <sup>-1</sup> ]	Uvolněné teplo [kJ.g O <sub>2</sub> <sup>-1</sup> ]	Přírodní látky	Výhřevnost [kJ.g <sup>-1</sup> ]	Uvolněné teplo [kJ.g O <sub>2</sub> <sup>-1</sup> ]
Polyethylen	43,28	12,65	Celulóza	16,09	13,60
Polypropylen	43,31	12,66	Bavlna	15,55	13,61
Polyisobutylen	43,71	13,14	Bituminózní uhlí	35,17	13,51
Polystyren	39,85	12,97	Novinový papír	18,40	13,40
Polybutadien	42,75	13,14	Vlnitá lepenka	16,04	13,70
Polyvinylchlorid	16,43	12,84	Tvrdé dřevo	19,30	12,26
Polyvinylidenchlorid	8,99	13,61	Javorové dřevo	17,76	12,51
Polyvinylidenfluorid	13,32	13,32	Lignit	24,78	13,12
Polymethylmetakrylát	24,89	12,98			
Polyakrylonitril	30,80	13,61			
Polyethylentereftalát	22,00	13,21			
Polykarbonát	29,72	13,12			
Triacetát celulózy	17,62	13,23			
Polyamid 6	29,58	12,67			
Isobutanpolysulfan	20,12	12,59			

**Tab. 13 Množství uvolněného tepla na 1 gram spotřebovaného kyslíku**

První návrh normy byl publikován v USA v roce 1986. V konečné verzi byla norma zveřejněna jako *Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Material and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter* (ASTM E 1354-90). V ISO byl návrh normy publikován v roce 1990 (ISO DIS 5660), jeho konečná podoba v roce 1993 (ISO 5660). Tato norma však neobsahovala měření kouřových charakteristik, ani optické ani gravimetrické. Postupně tuto zkušební metodu zařadila mezi své národní standardy řada zemí, například i Slovensko STN ISO 5660-1 (73 0860). Slovensko však nejen převzalo tento mezinárodní standard do souboru národních norem, ale také vlastní 2 kompletní kónické kalorimetry. Kónické kalorimetry jsou i v Polsku a Maďarsku. Česká republika tento standard nepřevzala, a co je ještě horší, na území republiky kónický kalorimetr zatím není v provozu. V současné době kompletuje kónický kalorimetr Technický ústav PO v Praze - Modřanech (zatím bez potřebného programového vybavení) a jednodušší zařízení podle ISO/DIS 13927 vlastní VŠB-TU Ostrava. V České republice se kompetentní orgány brání zavedení tohoto standardu především proto, že v Evropské unii je proti jejímu převzetí značný odpor - zvláště silný je ze strany Německa a Francie. Námitky jsou následující:

- Příliš drahé zkušební zařízení
- Příliš malé rozměry zkušební vzorku
- Příliš složitá metoda, nehodící se pro servisní měření
- Není možno sledovat fázi rozvoje požáru - šíření plamene.

Jakkoli je na těchto argumentech něco pravdivého, skutečnost je taková, že jiná zkušební metoda srovnatelných kvalit prostě neexistuje. Co se týká možnosti sledování šíření plamene, tak samozřejmě přímo tento parametr zjišťovat nelze. Ovšem existují možnosti předpovědi šíření plamene z dat naměřených na kónickém kalorimetru, např. Jianmin<sup>[63]</sup>. Navrhované varianty, např. francouzský *Epiradiateur test*<sup>[64]</sup> nebo německý *Brandschacht test*<sup>[65]</sup>, jím rozhodně není. Tyto metody, které aspirovaly na zařazení mezi evropské normy CEN jsou jen málo rozšířené mimo země původu.

Jak uvádí Babrauskas<sup>[66]</sup>, kónický kalorimetr je dále upravován a používán pro speciální měření. Např. NASA<sup>[67]</sup> standardizovala zkušební postup pro měření prováděné v kontrolované atmosféře, jinou modifikaci normovala NFPA<sup>[68]</sup> a Ministerstvo obrany USA<sup>[69]</sup>.

Metoda kónického kalorimetru patří do souboru zkušebních postupů vyvinutých pro testování stavebních hmot, je však použitelná i obecně pro hořlavé materiály a byla přijata i technickou komisí ISO pro plasty.

V dalším textu při popisu zkušebního zařízení, postupu měření a vyhodnocování zkoušky byla použita norma ISO 5660 (1993)<sup>[70]</sup>.

Norma ISO 5660 Požární zkoušky - reakce na oheň, se skládá ze tří částí:

1. část: Rychlost uvolňování tepla ze stavebních materiálů
2. část: Dynamické měření dýmu
3. část: Rychlost hoření stavebních materiálů.

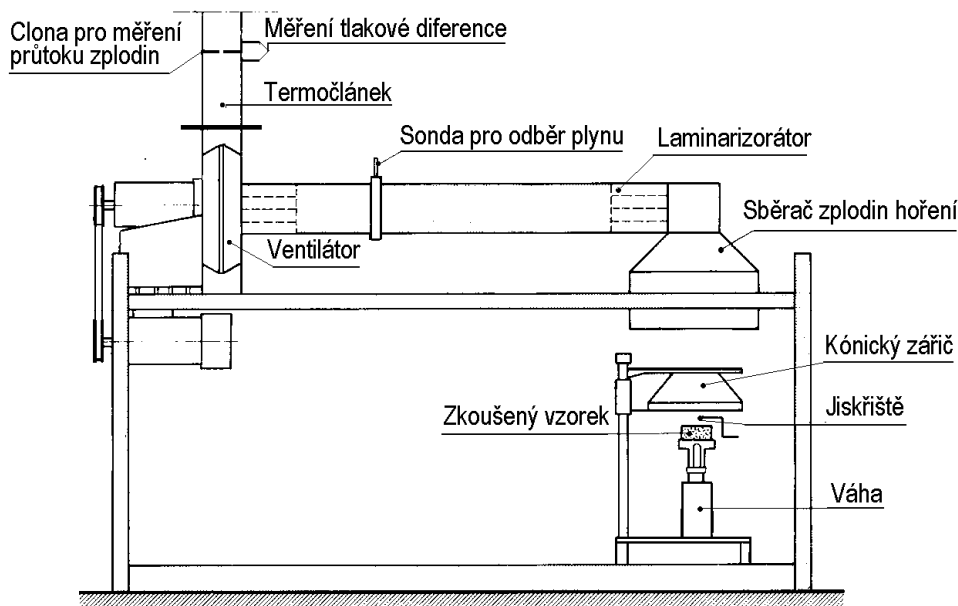
Poslední dvě části normy jsou zatím předmětem diskuse v ISO/TC 92, proto se jimi nebudeme zabývat.

Obsahem ISO 5660-1 je popis zkušebního zařízení a vyhodnocování rychlosti uvolňování tepla z hořlavých materiálů. Rychlost uvolňování tepla se stanovuje měřením spotřeby kyslíku odvozené z hmotnostního průtoku spalin a koncentrace kyslíku v nich obsaženého. Tato zkušební metoda je založena na empirickém vztahu, který definuje, že při hoření se uvolňuje přibližně 13,1 MJ na 1 kg spotřebovaného kyslíku. Součástí zkoušky je i měření času do zapálení materiálu, takže lze říci, že v sobě zahrnuje i ISO 5657 Stanovení vznětlivosti. Zkoušený materiál je při zkoušce exponován tepelně radiačním tokem určité hodnoty.

### **Zkušební zařízení**

Zkušební aparatura (obr. 22) je sestavena z několika dílčích systémů:

- **vážní systém s nosičem vzorku**
- **systém iniciačního zdroje**
- **systém pro jímání a odvod spalin**
- **systém pro analýzu zplodin hoření**
- **systém pro sběr a zpracování dat**
- **systémy pro kalibraci**



Obr. 22 Schéma zkušebního zařízení podle ISO 5660

**Vázní systém.** Na elektronické váze, která zajišťuje průběžné sledování hmotnosti, je umístěn vzorek zkoušeného materiálu. Držák zabezpečuje neměnné půdorysné rozměry zkoušeného materiálu.

**Iničiační zdroj.** Zkoušený materiál je tepelně namáhán sálavým teplem. Zdrojem radiace je elektrický odporový topný element ve tvaru komolého kužele o příkonu 5000 W při 240 V. Tvar zářiče zajišťuje homogenitu sálavého toku dopadajícího na povrch zkoušeného materiálu. Maximální hustota tepelného toku je  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Konstantní úroveň sálavého toku se udržuje pomocí regulátoru teploty a tří paralelně zapojených regulačních termočláneků snímajících povrchovou teplotu zářiče. Sálavý tok musí být v rovině exponovaného povrchu vzorku homogenní na ploše  $50 \times 50 \text{ mm}$ . Absorbované teplo způsobuje termický rozklad materiálu, zapálení plyných produktů rozkladu zajišťuje elektrická jiskra.

Systém kónického radiátoru a držáku vzorku umožňuje dvě varianty uspořádání:

- Standardní vertikální, kdy radiační tok působí ve svislém směru na vzorek v horizontální pozici
- Horizontální uspořádání, při němž na svisle orientovaný povrch vzorku dopadá tepelný tok v horizontálním směru.

**Systém pro jímání a odvod spalin.** Nad výstupem spalin je umístěn plechový zvon ve tvaru čtyřbokého komolého jehlanu, který je zaústěn do vodorovného potrubí. Na konci potrubí je ventilátor, který zajišťuje nasávání zplodin hoření a jejich odvod z objektu.

Potrubí má kruhový průřez. Na vstupu u sběrného zvonu je opatřeno laminarizátorem proudění. Z proudu zplodin hoření je kontinuálně odebírán pomocí sondy vzorek zplodin, který je průběžně analyzován. Na potrubí je možno instalovat zařízení na měření kouřových charakteristik. Ve výtlačném potrubí za ventilátorem je umístěna clona pro měření rychlosti proudění spalin. Poblíž clony je v proudu spalin umístěn termočlánek. Systém pro jímání a odvod spalin zajišťuje průtoky v mezích  $0,012 \div 0,035 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

System pro analyzu zplodin hoření. Na odběrovou sondu ve tvaru prstence je napojena měřicí aparatura pro analyzu zplodin hoření. Po nutné předúpravě spalin (odfiltrování tuhých částic, vysušení atd.) se pomocí analyzátoru stanovuje obsah kyslíku. Je také doporučeno stanovování obsahu CO, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, možné je ovšem i napojení dalších analyzátorů a stanovování např. HCl, HCN, NH<sub>3</sub> a dalších plynů. Analyzátor kyslíku musí mít přesnost minimálně 50 ppm.<sup>4</sup>

System pro sběr a zpracování dat. Součástí zařízení je počítač doplněný technologickými kartami a speciálním softwarem, který zajišťuje sběr a zpracování dat, řídí a monitoruje přípravu a průběh měření. Na připojené tiskárně pak vytiskne protokol o měření. Data se odečítají v intervalu 5 s nebo kratším, údaje musí být snímány s přesností 0,01 % z plného měřicího rozsahu.

### **Kalibrace**

Ke kalibraci tepelného zářiče slouží radiometr<sup>5</sup>, pomocí něhož se zjišťuje hustota tepelně radiačního toku v úrovni povrchu zkoušeného vzorku. Tepelná radiace se měří při různých teplotách radiátoru a získaná kalibrační křivka pak slouží k určení povrchové teploty spirály radiátoru pro požadovanou emisi tepla. Teplota zářiče se je udržována vhodným regulátorem (nejlépe PID). Při kalibraci systému pro měření rychlosti uvolňování tepla se používá kalibrační hořák, ve kterém se spaluje methan. Kalibračním hořákem se také zjišťuje zpoždění odezvy analyzátoru kyslíku a všech dalších měřicích systémů. Tyto hodnoty se pak používají při dalších výpočtech.

### **Zkušební vzorky**

Vzorek materiálu má rozměry 100 × 100 mm a tloušťku do 50 mm. Tlustší materiály je nutno na tuto tloušťku opracovat. Lze zkoušet i vrstvené materiály a rovněž materiály, v nichž je mezi vrstvami vzduchová mezera. Konstrukce nosiče umožňuje zkoušení tavících se materiálů, z tohoto hlediska nejsou vyloučeny ani sypké a pastovité materiály, ani kapaliny.

### **Postup zkoušky**

Pomocí regulátoru teploty se nastaví požadovaná hustota tepelného toku kónického zářiče. Materiály se zkouší při tepelném namáhání konstantní úrovně. Zapne se ventilátor pro odtah zplodin, zapne se časovací zařízení pro přeskok zapalovací jiskry a zapne se systém pro sběr dat. Zaznamená se čas do zapálení vzorku, dále se zaznamenává hmotnost vzorku, průtok a teplota proudícího vzduchu a obsah kyslíku. Je-li zapojen optický systém pro měření optické hustoty kouře, případně další plynové analyzátor (CO, CO<sub>2</sub>, HCl, ...), zaznamenávají se i tyto hodnoty. Zkouška končí po shoření vzorku, respektive sníží-li se rychlost hmotnostního úbytku pod určitou minimální hodnotu.

### **Výpočty**

#### **Kalibrační konstanta pro analyzu spotřeby kyslíku**

Při kalibraci se používá kalibrační hořák, v němž se spaluje metan. Výkon hořáku je 5, resp. 10 kW.

---

<sup>4</sup> Zkušební zařízení bývá často doplňováno systémem pro gravimetrické a optické měření parametrů kouře.

<sup>5</sup> Radiometr je měřicí zařízení, které registruje dopadající tepelnou energii. Nejčastěji se používá Gordonův fóliový typ. Kruhová membrána z vhodného kovu tvoří jednu větev termočlánekového páru. Druhou větev tvoří termočlánekové dráty připájené ke středu a v určité vzdálenosti od středu membrány. Tím se vytvoří diferenční zapojení 2 termočláneků a na vývodech je napětí odpovídající rozdílu teplot v těchto bodech membrány. Teplotní rozdíl je vyvolán chlazením obvodu membrány a je přímo úměrný tepelnému toku absorbovanému membránou. Teplotní profil na membráně má tvar paraboly. Membrána je na přijímací ploše začerněna trvanlivým matným materiálem.



Kalibrační konstanta se počítá ze vztahu:

$$C = \frac{10}{12,54 \cdot 10^3 \cdot 1,10} \sqrt{\frac{T_e}{\Delta p}} \frac{1,105 - 1,5x_{O_2}}{x_{O_2}^0 - x_{O_2}} \quad [(\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{K})^{1/2}]$$

kde: 10 - je výkon hořáku (v tomto případě 10 kW)

$12,54 \cdot 10^3$  - hodnota  $\Delta h_c/r_0$  pro methan:  $\Delta h_c$  je výhřevnost [ $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ] a  $r_0$  je stechiometrický poměr paliva a kyslíku

1,105 - je faktor objemové expanze

1,10 - poměr molových hmotností kyslíku a vzduchu

$T_e$  - teplota zplodin v měřicí clonce [K]

$\Delta p$  - rozdíl tlaku na clonce [Pa]

$X_{O_2}$  - údaj analyzátoru kyslíku, molový zlomek kyslíku

$X_{O_2}^0$  - počáteční hodnota údaje na analyzátoru kyslíku.

Rychlost uvolňování tepla  $q(t)$  se vypočítá ze vztahu:

$$\dot{q}(t) = \left( \frac{\Delta h_c}{r_0} \right) \cdot 1,10 C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1,105 - 1,5 X_{O_2}} \quad [\text{kW}]$$

za zlomek  $\frac{\Delta h_c}{r_0}$  se dosazuje  $13,1 \cdot 10^3$  [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] - není-li známa přesnější hodnota pro

zkoušený materiál

C- je kalibrační konstanta

$X_{O_2}$  - je údaj obsahu kyslíku vypočtený s ohledem na zpoždění analyzátoru

$X_{O_2}(t) = X_{O_2}^1 \cdot (t + t_d)$ , kde:  $X_{O_2}^1$  je údaj odečtený na analyzátoru kyslíku v čase  $t$  a  $t_d$  je časové zpoždění analyzátoru kyslíku

Rychlost uvolňování tepla z jednotky plochy vzorku se vypočte:

$$\dot{q}''(t) = \dot{q}(t) / A_s, \quad [\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}]$$

za  $A_s$  se dosazuje plocha exponovaného povrchu vzorku [ $\text{m}^2$ ].

### Zpřesněné výpočty

V uvedených výpočtech se předpokládá, že uhlík je oxidován až na oxid uhličitý. Ne vždy však uhlík oxiduje dokonale, jeho část se oxiduje jen na oxid uhelnatý. V tom případě je ovšem výsledný údaj vývinu tepla chybný - výpočtem obdržíme hodnotu vyšší. Pro zpřesnění výsledků analýzy musíme mimo zjištěného obsahu kyslíku znát i obsah CO a CO<sub>2</sub>, případně také H<sub>2</sub>O.

Obdobně jako při analýze O<sub>2</sub>, musíme stanovit zpoždění odezvy dalších analyzátorů  $t_d$ . Pomocí této hodnoty korigujeme údaj příslušného analyzátoru.

$$X_{O_2}(t) = X_{O_2}^1(t + t_d) \quad [\text{s}] \quad \text{pro kyslík,}$$

$$X_{CO_2}(t) = X_{CO_2}^1(t + t_d) \quad [\text{s}] \quad \text{pro oxid uhličitý,}$$

$$X_{CO}(t) = X_{CO}^1(t + t_d) \quad [\text{s}] \quad \text{pro oxid uhelnatý a}$$

$$X_{H_2O}(t) = X_{H_2O}^1(t + t_d^3) \quad [s] \quad \text{pro vodu}$$

$t_d, t_d^1, t_d^2, t_d^3 \dots$  jsou časová zpoždění jednotlivých analyzátorů.

$X_{O_2}^1, X_{CO_2}^1, X_{CO}^1$  a  $X_{H_2O}^1 \dots$  jsou údaje odečtené v čase  $t$  na příslušném analyzátoru

Rychlost uvolňování tepla pak vypočítáme ze vztahu:

$$\dot{q} = 1,1 \cdot \frac{\Delta h_c}{r_0} X_{O_2}^a \frac{\Phi - 0,175(1 - \Phi) \frac{X_{CO}}{X_{CO_2}}}{1 - \Phi + 1,105\Phi} \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}}$$

kde:  $X_{O_2}^a$  - je molový zlomek okolního kyslíku:  $X_{O_2}^a = (1 - X_{H_2O}^0) X_{O_2}^0$ , v něm  $X_{H_2O}^0$  je molový zlomek obsažené vodní páry.

$\Phi$  - faktor spotřeby se vypočte ze vztahu:

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^0 (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} (1 - X_{CO_2}^0)}{X_{O_2}^0 (1 - X_{CO_2} - X_{CO} - X_{O_2})}$$

V otevřeném spalovacím systému není možno měřit průtok přiváděného vzduchu již na vstupu - což by bylo snazší a i přesnější. Průtok se proto měří až na výstupu ze zařízení, avšak je nutno vzít v úvahu, že v tomto místě již jde o vlhkou směs vzduchu a spalin hoření. Objem spalin se zmenší o spotřebovaný kyslík, ale současně zvětší o vznikající plynné zplodiny hoření - nejčastěji to budou CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Známe-li obsahy těchto plynů, potom můžeme, započtením objemové expanze plynů, zpřesnit hmotnostní průtok  $\dot{m}_e$  v odtahovém potrubí.

$$\dot{m}_e = \sqrt{\frac{M_e}{M_a}} \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}}$$

kde  $M_e$  je molová hmotnost spalných plynů [kg.kmol<sup>-1</sup>], obdržíme ji výpočtem ze vztahu:

$$M_e = 4 \cdot [4,5 + (1 - X_{H_2O}) \cdot (2,5 + X_{O_2} + 4 X_{CO_2})]$$

$M_a$  - molová hmotnost vzduchu [kg.kmol<sup>-1</sup>] - dosazujeme hodnotu 29.

Zpřesněný výpočet rychlosti vývinu tepla provedeme pomocí vztahu

$$\dot{q}(t) = 1,10 \cdot \left( \frac{\Delta h_c}{r_0} \right) \cdot (1 - X_{H_2O}) \left( \frac{X_{O_2}^0 \cdot (1 - X_{O_2} - X_{CO_2})}{1 - X_{O_2}^0 - X_{CO_2}^0} \cdot X_{O_2} \right) \cdot \dot{m}_e$$

Rychlost úbytku hmotnosti  $dm/dt$  se zjišťuje v jednotlivých časových intervalech od začátku až do ukončení zkoušky. Z těchto hodnot stanovujeme pak hodnoty efektivní výhřevnosti

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\dot{q}(t)}{dm/dt}$$

kde  $q(t)$  je tepelný výkon uvolňovaný v čase  $t$ .

Další vyhodnocované charakteristiky charakterizují průběh rozhořívání materiálu po jeho zapálení v čase  $t_{ig}$ . Stanovuje se průměrná rychlost uvolňování tepla v časovém úseku

180 s od zapálení  $q''_{180}$  a 300 s  $q''_{300}$ , tyto hodnoty se uvádějí v  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Celkové uvolněné teplo v průběhu celé zkoušky přepočtené na jednotku plochy se označuje  $q''_{\text{tot}}$ , tato charakteristika má rozměr  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ .

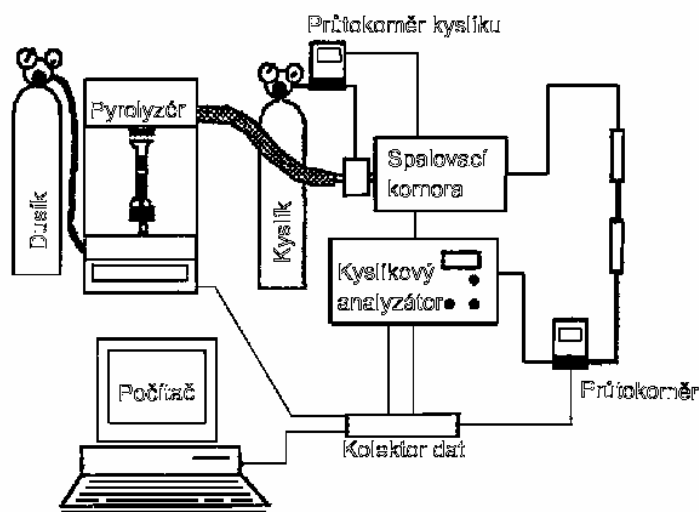
### 3.3.6 Spalovací mikrokalorimetr

Toto zkušební zařízení je kombinací termogravimetrického zařízení a kalorimetru na bázi spotřeby kyslíku. První informace o tomto zařízení podal Gracik a kol. na konferenci věnované kalorimetrii v roce 1995 [71, 72].

#### Princip měření

Mikrogramové množství studovaného materiálu se prudce zahřeje v pyrolyzáru termogravimetrického zařízení. Rychlost ohřevu je vyšší než  $200 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ . Rozklad probíhá v dusikové atmosféře. Pyrolýzní zplodiny se spalují na spalovacím válci, do něhož se přivádí kyslík. Tento proces odpovídá anaerobní termolýze, která probíhá v neoxidační, redukční vrstvě tepelně namáhaného materiálu a generuje rozkladné plynné produkty, které vystupují na povrch materiálu, kde dochází po promísení se vzduchem k jejich spalování v difúzním plameni.

Na obrázku 23 je schéma měřicího zařízení. Úbytek hmotnosti se sleduje kontinuálně v průběhu celé zkoušky v termogravimetrickém analyzátoru. Prchavé rozkladné produkty se v proudu čistého dusíku vedou vyhřívanou trubicí do vyhřívané komůrky, do níž se přivádí kyslík. Předehřátá směs pyrolýzních produktů, dusíku a kyslíku vstupuje do spalovací komory ve tvaru - do spirály stočené trubky, vyhřívané na konstantní teplotu. Spalovací proces probíhá při přebytku kyslíku. Dokonalé hoření pyrolýzních zplodin v trubkovém reaktoru odpovídá procesu hoření v dobře ventilovaném difúzním plameni. Stejně tak je ovšem možné provádět analýzu v režimu nedokonalého spalování. Produkty spalování (při dokonalém i nedokonalém hoření) jsou za výstupem z reaktoru čištěny. Jsou zbavovány vody a dalších kondenzujících frakcí a odstraňuje se z nich oxid uhličitý. Takto předčištěná plynná směs je analyzovaná na obsah kyslíku, případně i dalších plynů.



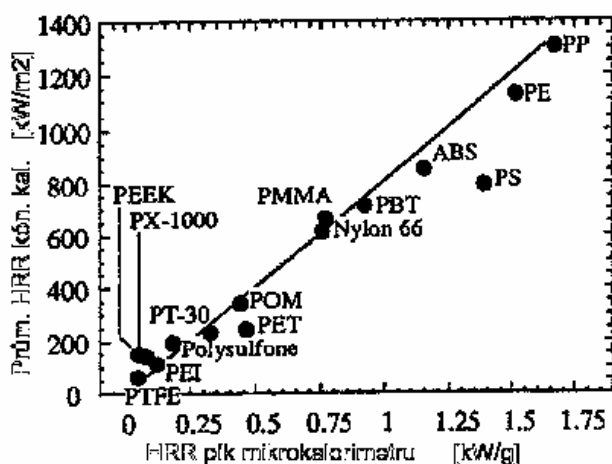
Obr. 23 Schéma mikrokalorimetru

Z naměřených údajů jsou vyhodnocovány následující charakteristiky:

- Rychlost uvolňování tepla je vyhodnocována na základě spotřeby kyslíku zjištěné analýzou obsahu kyslíku v předčištěné směsi zplodin.
- Celkové uvolněné teplo se obdrží numerickou integrací rychlosti uvolňování tepla.
- Uhlíkatý zbytek je dán zbytkovou hmotností studovaného materiálu.
- Efektivní výhřevnost se vypočítá poměrem celkového uvolněného tepla a úbytkem hmotnosti vzorku.

- Efektivita spalování je dána poměrem efektivní výhřevnosti a výhřevnosti stanovené na kyslíkovém kalorimetru.
- Jednotlivé komponenty přístroje jsou napojeny na počítač, který řídí jednotlivé procesy a provádí všechny výpočty.

Porovnání výsledků získaných popsanou metodou s výsledky na kónickém kalorimetru jsou uvedeny v <sup>[73]</sup>. Autoři dokládají dobrou korelaci svých výsledků s rychlostí vývoje tepla naměřeného na kónickém kalorimetru - obr. 24.



Obr. 24 Porovnání hodnot HRR (ISO 5660 a mikrokalorimetr)

### 3.3.7 Jednoduchý test pro stanovení rychlosti uvolňování tepla

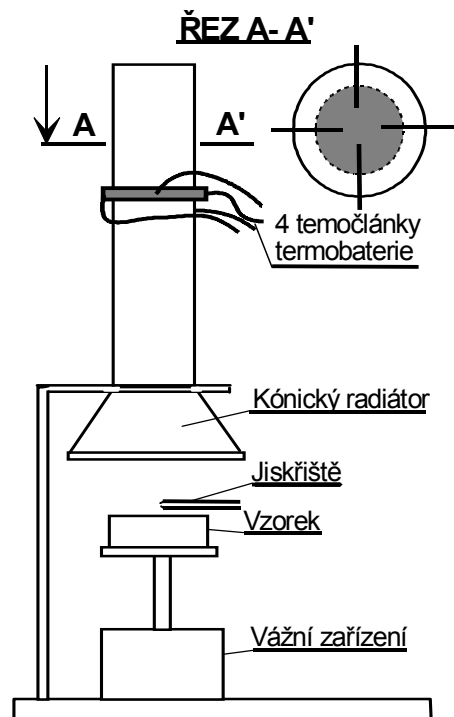
Technická komise pro plasty (ISO TC61) předložila v únoru 1998 k diskusi návrh zjednodušené metodiky pro stanovení rychlosti uvolňování tepla v průběhu hoření materiálů (ISO/DIS 13927 <sup>[74]</sup>).

#### Popis zařízení

Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 25. Část aparatury určená k dekompozici materiálu je totožná s kónickým kalorimetrem - jedná se o kónický zářič (max. tepelný tok  $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ), nosič vzorku (tentokrát pouze ve vertikálním uspořádání zkoušky - exponovaná plocha je v horizontální rovině), vážní zařízení a jiskřiště pro vysokonapěťovou jiskru, sloužící k zapálení prchavých rozklaných produktů. Na radiátor je napojen svislý válec délky 600 mm a vnitřního průměru 115 mm. Uvnitř komínového nástavce je v ose válce umístěna termobaterie složená ze čtyř termočlánků. Termočlánky jsou vpleteny do měděné sítěky a jejich teplé konce jsou 17 mm od osy válce. Měděná síťka má průměr 70 mm. V naposledy publikovaném textu této normy se již měděná síťka nezmiňuje.

Tepelný tok zářiče je cejchován pomocí radiometru. Konstantní tepelný výkon je řízen termoregulátorem pomocí 3 termočlánkových čidel připevněných k tělesu zářiče.

Kalibrace termobaterie se provádí pomocí hořáku spalujícího methan. Kalibraci je nutno provést pro všechny používané úrovně hustoty tepelného toku, a samozřejmě při zapnutém a výkonnostně stabilizovaném radiátoru. Zde se teplo uvolněné samotným radiátorem podílí na zvýšení teploty proudících spalin, a tím i velikosti výstupního napětí na termobaterii. U kalorimetrických systémů na principu spotřeby kyslíku teplo z radiátoru měření uvolňovaného tepla při hoření neovlivňuje.



Obr. 25 Schéma zařízení podle ISO/DIS 13927

Při měření rychlosti uvolňovaného tepla se kontinuálně, nebo v intervalech max. 5 s zaznamenávají údaje o hmotnosti zkoušeného materiálu a napětí na termobaterii. Stejně jako při měření na kónickém kalorimetru se provádí série měření stejného materiálu při různých úrovních tepelného toku zářiče. Z naměřených hodnot se pak stanovují tyto parametry:

- čas do zapálení (trvalého hoření zkoušeného materiálu) [s]
- délka trvání testu [s]
- úbytek hmotnosti [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] reprezentovaný křivkou
- hodnoty uvolněného tepla 180 s po zapálení -  $q_{180}$ , 300 s po zapálení -  $q_{300}$  a hodnotu maximální rychlosti uvolňování tepla  $q_{\text{max}}$ . Hodnoty  $q$  se získají z hodnot naměřených na výstupu termobaterie porovnáním s kalibrační křivkou
- hmotnost zbytku vzorku po zkoušce [g] a [% původní hmotnosti]
- rychlost úbytku hmotnosti vzorku [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
- průměrná rychlost úbytku hmotnosti vzorku [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ] vypočtenou v čase od začátku do ukončení zkoušky

I když to v návrhu normy není, výstupní parametry je možno doplnit i údajem efektivní výhřevnosti (analogicky s ISO 5660) - podíl uvolňovaného tepla a hmotnostního úbytku. Všechny vyhodnocované parametry je možno počítat průběžně v čase trvání zkoušky. Výstupy pak je možno prezentovat ve formě grafu nebo tabulky. Pro dynamické vyhodnocování zkoušky je vhodné propojit zkušební aparaturu s počítačem.

## 4 Kouř

Proces tepelného rozkladu a hoření organických hmot doprovází vznik kouře (dýmu). Kouř je

disperzní aerosol a jsou v něm zastoupeny látky ve třech skupenstvích - tedy: plyny a páry, kapalně částice a částice tuhé hmoty.

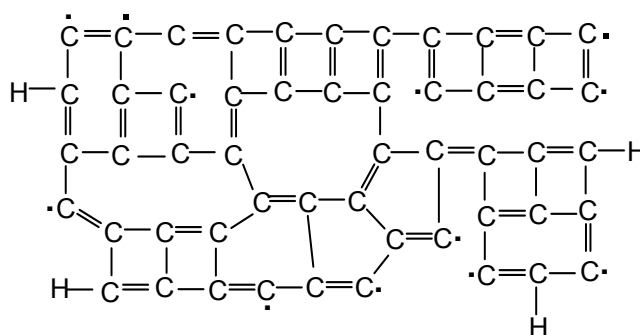
- Plynné složky kouře jsou tvořeny jednak plyny obsaženými ve vzduchu ( $O_2$ ,  $N_2$  atd.) a také produkty rozkladu oxidovanými i neoxidovanými ( $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $HCl$ ,  $H_2O$ ,  $NO_x$  atd.). Podíl plynných složek zastoupených ve hmotě kouře je závislý na teplotě kouře, neboť obsahuje i páry snadno kondenzujících kapalin. Jedná se především o vodu (v níž se však rozpouští i některé plyny -  $HCl$ ,  $NH_3$ ), ale také například uhlovodíky.
- Kapalná složka kouře je tvořena mlhou (drobnými kapičkami) z kondenzovaných par vzniklých při tepelné degradaci hořlavých látek. V horkém kouři je podíl kapalně fáze víceméně nulový, jeho postupným chladnutím, po překročení rosného bodu přítomných par, dochází k jejich kondenzaci. Kondenzační centra vznikají nejnázve na tuhých částicích obsažených v kouři.
- Tuhé částice v kouři jsou v podstatě dvojího druhu. Toto dělení vychází z mechanismu vzniku a původu částic. V první skupině jsou částice, které se do kouře dostaly působením termických vzestupných proudů - částice popele, částice tuhých hořlavých látek (i hořících a žhnoucích) ale také prach z okolí požáru. Jsou to tedy látky, které neprošly žádnou fázovou změnou a do kouře se dostaly pouze mechanickým působením. Ve druhé skupině látek tvořících tuhou fázi kouře jsou produkty vzniklé přeměnou z plynné fáze. Jsou to látky, které jsou obecně označovány jako saze. Saze jsou tvořeny převážně amorfním uhlíkem, který vzniká tepelným rozkladem plynných produktů pyrolýzy tuhých hořlavin (u kapalin vypařováním) při nedostatku kyslíku. Je to tedy produkt karbonizace hořlavých plynů a par.

### Vznik sazí

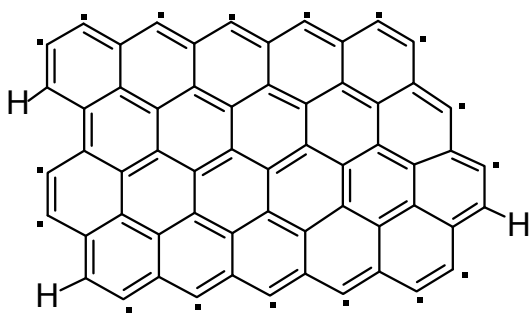
Uvolňované plynné horké látky při styku s okolním kyslíkem hoří. Vytváří se určitá struktura plamene. Hoření ovšem nemůže probíhat v celém objemu plamene. I zde platí podmínka přítomnosti všech tří složek hořlavého souboru - palivo, energie a oxidační prostředek. Řešili-li případ pro palivo v plynné fázi, pak podmínky umožňující hoření v plameni můžeme také definovat koncentrací hořlavých plynů. Hoření může probíhat jen v zóně plamene, ve které se palivo nachází mezi dolní a horní mezí hořlavosti. V této zóně tedy dochází k vývinu tepla, které udržuje celý proces hoření. Pod touto zónou se nachází palivo, nad horní koncentrační mezí a tudíž k hoření docházet nemůže. Avšak v této oblasti je palivo zahřáté na velmi vysokou teplotu ( $1200\text{ }^\circ\text{C}$  a více) proto dochází k jeho termickému rozkladu. Dochází při něm především k odštěpení bočních řetězců, k dehydrataci (částečně oxidovaných produktů) a dehydrogenaci uhlovodíkových řetězců. To má za následek zdvojování vazeb, cyklizaci a tvorbu prostorových struktur.

Při těchto reakcích výrazně klesá poměr  $H/C$ , tudíž tento proces nazýváme karbonizací. Látky se stoupajícím obsahem uhlíku se stávají tepelně stálejšími a s kyslíkem reagují až při vyšších teplotách. Pokud je teplota pyrolyzních produktů nižší, potom již k jejich řetězové oxidaci a tudíž ani k hoření dojít nemůže. Je

také vhodné připomenout, že při cyklizaci a zejména při vzniku prostorově uspořádaných struktur, výrazně stoupá molekulová hmotnost vznikajících sloučenin, což spolu s poklesem teploty vede k postupné kondenzaci karbonizačních produktů až na tuhé skupenství. Dosta-



**Obr. 26** Struktura amorfního uhlíku



**Obr. 27** Struktura grafitického uhlíku

tečně prokarbonizované produkty vznikající popsanými procesy nazýváme saze. Saze jsou makromolekulární povahy a jsou tvořeny převážně amorfním uhlíkem. Na obrázku 26 je typická struktura sazí. Na obrázku 27 je znázorněna struktura grafitická, kterou je možno někdy nalézt v uhlíkatých zbytcích po pyrolýze makromolekulárních materiálů. V uhlíkatých zbytcích pozorovaných pod mikroskopem lze rozlišit oblasti s amorfní strukturou a oblasti

s lépe prokarbonizovanou strukturou grafitickou.

Mezi látky s nižším stupněm karbonizace, které vznikají souběžně se saze, patří polyaromatické uhlovodíky PAU (*PAH*). O PAU bude uvedeno více v kapitole o toxických účincích kouře.

S reakcemi probíhajícími v plamenné zóně těsně souvisí i barva plamene. Pokud nedochází ke karbonizaci plynné hořlaviny (vodík, methylalkohol, ethylalkohol) barva plamene je modrá - nesvitivý plamen. Pokud ke karbonizaci paliva v plameni dochází, pak barva plamene je žlutá - svítivý plamen (uhlovodíková paliva, parafin, aj.). Žlutá až žlutobílá - barva plamene je způsobena emisí záření částicěk žhavých uhlíkatých látek v plameni. Pokud uhlíkaté částice zoxidují (shoří), k tvorbě sazí nedojde (plamen petrolejové lampy, parafinové svíčky apod.). Pokud je tok plynného paliva do zóny plamene vysoký a palivo snadno karbonizuje, pak je hoření provázeno vznikem sazí. V tom případě již plamen není tak svítivý, ale má tmažlutou barvu. Světelné (ale i tepelné) záření plamene je vznikajícími sazovými částicemi absorbováno. Absorpční koeficient sazí je velmi vysoký, až 0,98.

Množství vznikajících sazí je dáno složením hořlavé látky a také podmínkami hoření. Větší sklon k tvorbě sazí mají látky obsahující ve struktuře vícenásobné vazby a nenasycené cyklické struktury. Současně tvorbu sazí ovlivňuje i množství tepla, které se při hoření látky vyvíjí. Větší tendenci k tvorbě sazí mají látky s vyšší hodnotou spalného tepla. Svou roli také hraje energetická náročnost zplyňování paliva. Hořlavá látka potřebující na tvorbu plynného paliva větší množství tepla má menší sklon k tvorbě sazí. Výše zmíněné faktory spolu souvisí a navzájem se ovlivňují. Přímé propojení těchto materiálových faktorů je i s dalšími podmínkami hoření. Nejvýraznějším faktorem je zde hořící plocha a objem difúzní zóny. Čím větší je hořící plocha, tím obtížněji dochází k oxidaci plynné hořlaviny a tím také více těchto plynů zkarbonizuje. Zcela stejné je to i při narůstajícím objemu difúzní zóny nad povrchem tuhé nebo kapalné hořlaviny. Objem difúzní zóny je ovlivňován rychlostí tvorby plynných hořlavín - u volného hoření především velikostí poměru produkovaného tepla a potřebným teplem ke zplyňování kapalné nebo tuhé hořlaviny. To je však jen přibližným vyjádřením situace. Při bližším pohledu je zřejmé, že jen část produkovaného tepla se zpětně vrací na povrch paliva a že podíl tohoto tepla je závislý především na emisních vlastnostech samotného plamene a reflexních a současně i emisních schopnostech samotného paliva a okolního prostředí.

#### ***Několik příkladů:***

1. Plamen benzinového zapalovače hoří svítivým plamenem bez sazí díky malému objemu difúzní zóny; kdežto plamen hořící benzinové kaluže produkuje saze. Totéž u dalších paliv polyolefinového typu, např. PE, PP atd., které v malém objemu hoří prakticky bez viditelného kouře a ve větším objemu silně kouří.
2. Alkoholy a další látky obsahující hydroxylové a aldehydové skupiny (PMMA, POM) hoří prakticky bez produkce sazí i ve větším objemu. Důvodem je zde nižší produkce tepla při

hoření a charakter paliva v plynné fázi, které prakticky nekarbonizuje. Dokladem toho je nesvítivý plamen.

3. Paliva obsahující nenasycené vazby, např. acetylen, benzen, polystyren atd. produkují i při hoření v malém objemu značné množství sazí a jejich plamen je žlutý až červený.

### **Stárnutí kouře**

Kouř po svém vzniku prochází určitým vývojem. Změny k nimž v kouři dochází, jsou různé povahy. Po opuštění horké plamenné zóny, dochází k prudkému ochlazení kouře. S klesající teplotou dochází ke kondenzaci par v kouři a tím se zvětšuje podíl kapalné fáze. Páry však kondenzují také na chladnějších plochách a přestávají tak být součástí kouře. Současně však také dochází ke shlukování kapalných částic za vniku kapiček větších průměrů. Zánikem vzešlých termických proudů s větší vzdáleností od místa hoření také zaniká nejmohutnější síla udržující hmotné částice ve vznosu a dochází proto vlivem gravitace k rychlejší sedimentaci kouře. Tuhé a kapalně částice malých rozměrů udržuje ve vznosu také Brownův pohyb. Tak, jak chladne kouř, chladne i z kondenzovaná kapalná fáze (voda, uhlovodíky), čímž se zlepšuje jejich schopnost jímat a rozpouštět některé plynné látky obsažené v kouři např. HCl, NH<sub>3</sub>, HCN a pod. Vznikají tak např. vodní roztoky - slabé elektrolyty - mající korozivní vlastnosti. Určitým vývojem prochází i tuhá fáze kouře. Tuhé částice, především saze, ulpívají na chladných plochách v okolí a také při jejich vzájemném přiblížení a dotyku dochází k jejich spojování do objemnějších částic, které padají na zem.

Různé scénáře stárnutí kouře lze sledovat vzniká-li kouř ve volném nebo v uzavřeném prostoru.

### **Rizikové faktory spojené s vývojem kouře**

Riziko spojené s vývojem kouře je velice vážné. Ze statistik vyplývá, že důsledky způsobené kouřem jsou mnohem závažnější, než přímými účinky hoření. V důsledku kouře umírá většina obětí požáru. Kouř způsobuje větší přímé i následné hmotné škody. Hlavní rizikové faktory působení kouře jsou následující:

1. Snížení viditelnosti v zakouřených objektech.
2. Toxicita kouře.
3. Korozivita kouře.
4. Kouřem je transportováno značné množství tepla, což přispívá k rychlejšímu ohřevu okolních hmot a rozšiřování požáru.
5. Při nedokonalém hoření vznikají hořlavé plyny a páry, které mohou dosáhnout výbušných koncentrací. Riziko vzniku prostorového vznícení - *Flashover* nebo *Backdraught*.

První tři rizikové faktory se stanovují standardizovanými požárně technickými testy. Transportem hmoty a energie se zabývá požární termodynamika. Vznikající teplo se stanovuje testy reakce na oheň, především ISO 5660 a dalšími. Riziko možného výbuchu hořlavých zplodin hoření je možno hodnotit standardními zkouškami pro stanovení mezí hořlavosti (výbušnosti) plynů a par.

## **4.1 Stanovení optické hustoty kouře**

Možnost vidění je dána jistou minimální intenzitou světla dopadajícího na sítnici oka. Tedy jistým počtem fotonů za sekundu. Fotony v zakouřeném prostoru se však do oka dostá-



vají obtížněji, než v prostředí bez kouře. Fotony v zakouřeném prostředí jsou jednak absorbovány - především tuhými částicemi, a na kapalných částicích dochází k jejich odrazu. V obou případech, tedy jak v případě zániku fotonů srážkou se sazovou částicí (energie fotonů se přitom mění v teplo), tak i rozptylu fotonu při dopadu na reflexní povrch kapičky kapaliny, nedopadnou mnohé fotony do oka, byť by před interakcí s kouřem měly správný směr. Nedostatečný tok fotonů na sítnici oka má fyziologický důsledek podobný slepotě.

Množství světla absorbovaného nebo rozptýleného v kouři se označuje jako optická hustota, respektive měrná optická hustota kouře. Teoretický základ řešení vychází z Bouge-rova zákona:

$$T = T_0 e^{-\sigma \cdot L}$$

kde: T je procentní podíl světla prošlého měřeným prostředím,  
 $T_0$  je počáteční intenzita světla (100),  
 $\sigma$  je koeficient zeslabení,  
L je délka světelného paprsku a  
e je základ přirozených logaritmů

Pro monodispersní aerosol je koeficient zeslabení přímo úměrný počtu a velikosti částic. Optická hustota prostředí je definována vztahem:

$$D = \log\left(\frac{100}{T}\right), \text{ resp.: } D = \sigma L / 2,303$$

Vztah, ve kterém vystupuje koeficient zeslabení je pro výpočty hustoty dýmu nevhodný, protože kouřové zplodiny nevytváří monodispersní aerosol - především rozměry tuhých částic jsou různé. Snadněji lze určit propustnost (transmitanci) prostředí. Takže konečný vztah, z něhož lze vypočítat měrnou optickou hustotu zakouřeného prostředí je následující:

$$D_s = \frac{V}{A \cdot L} \cdot D, \text{ resp.: } D_s = \frac{V}{A \cdot L} \cdot \log_{10} \frac{T_0}{T} \quad [ - ]$$

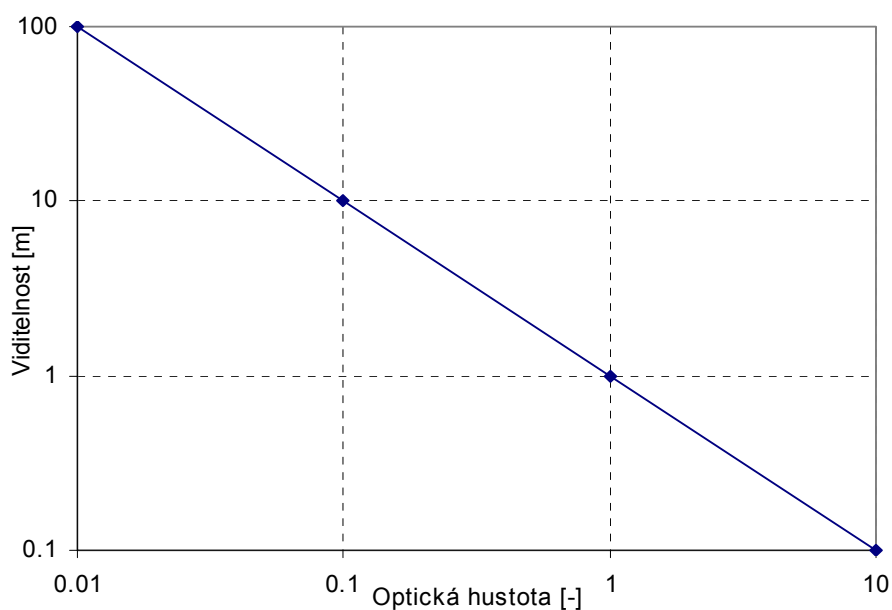
kde:  $D_s$  je měrná optická hustota,  
V je objem kouře (zkušebního zařízení),  
A je plocha exponovaného materiálu a  
L je délka paprsku procházejícího kouřem

Toto bezrozměrné vyjádření měrné optické hustoty kouře se používá zejména při dynamických testech, při nichž je plocha hoření v průběhu zkoušky konstantní. Běžnější vyjádření měrné (resp. specifické) optické hustoty kouře, především v testech s nedefinovanou plochou hoření nebo tam, kde hořící plocha není konstantní se měrná optická hustota vyjadřuje jako funkce hmotnosti: (*Mass Optical Density - MOD* \*lit. ISO 5659-1(2)):

$$D_s = \frac{V}{L \cdot m} \cdot \log \frac{T_0}{T} \quad [m^2 \cdot g^{-1}]$$

Toto vyjádření měrné optické hustoty je běžné u statických (akumulačních) testů.

Vztah mezi optickou hustotou prostředí (při tloušťce vrstvy kouře 1m) a viditelností je patrný na následujícím obrázku.



**Obr. 28 Viditelnost v zakouřeném prostoru**

Zde je vidět, že pokud jsou obě veličiny vyneseny v logaritmických stupnicích, je jejich závislost přímková.

Metody pro stanovení optické hustoty kouře dělíme na:

- statické (akumulační) metody a
- dynamické metody

U statických metod se vznikající kouř akumuluje v uzavřeném prostoru kouřové komory. V ní je zařízení pro homogenizaci kouře a optický systém sestávající ze zdroje světla, který vysílá rovnoběžný svazek paprsků do prostoru komory a světlocitlivého čidla (fotoodpor, fototranzistor), které dopadající světlo zachytí. Zdroj světla (žhavené vlákno žárovky, laserová dioda)<sup>6</sup> je nutno napájet ze stabilizovaného zdroje. Signál z přijímacího čidla je nutno zesílit. S výhodou se používá logaritmický zesilovač, neboť optická hustota (i měrná optická hustota) je funkcí logaritmu naměřené intenzity prošlého světla (transmitance). Osa optického systému je buď horizontální nebo vertikální.

<sup>6</sup> Jednotlivé typy světelných zdrojů jsou porovnávány v kapitole 6.1

### **4.1.1 ČSN 64 0150 - Stanovení optické hustoty kouře**

Tato norma popisuje statickou zkušební metodu a potřebné zkušební zařízení.

Zkouška spočívá ve změření snížení intenzity světla procházejícího prostorem kouřové komory vyplněné dýmem vznikajícím při pyrolýze nebo hoření vzorku určité hmotnosti za daných podmínek testu. Snížení intenzity světla určuje schopnost materiálu vytvářet dým. Hmotnost vzorků materiálů pro zkoušku je 1 g. Vzorek má být v granulích o rozměrech 2 až 3 milimetrů. U vzorků s objemovou hmotností menší než  $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  se kelímek zaplní vzorkem do 3/4 výšky, zváženým s přesností na tisícinu gramu.

#### **Zkušební zařízení**

Dýmová komora s vnitřními rozměry 600 x 900 x 900 mm (o objemu  $0,486 \text{ m}^3$ ) je vyrobená z ocelového plechu. V přední části jsou uzavíratelná dvířka se skleněným průzorem. Ve dně komory se nachází uzavíratelný otvor, který se otevírá současně s odsávacím ventilátorem po skončení měření. Ve středu stropu je umístěn ventilátor sloužící k homogenizaci dýmu v komoře. K dekompozici zkoušených materiálů slouží elektrická odporová pícka s možností nastavení teploty s přesností  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Teplota pece se měří termočlánkem. Do elektrické pícky se vkládá kelímek výšky 12 mm a průměru 25 mm.

Optický systém tvoří na straně zdroje: halogenová žárovka, duté zrcadlo, kondenzor s optickým filtrem s maximem propustnosti v oblasti vlnových délek 400-600 nm, kruhová clona a objektiv. Na straně přijímače je objektiv a v jeho ohnisku fotodiody. Výstupní proud diody se měří přístrojem s citlivostí  $10 \mu\text{A}$ .

Měření se uskutečňuje za podmínek bezplamenného rozkladu při teplotě pece  $400^\circ\text{C}$  (resp. nižší) a plamenného hoření při teplotě  $700^\circ\text{C}$ . Je doporučeno provádět měření při teplotách pece 300, 400, 425, 450, 475, 500, 600, 700 a  $800^\circ\text{C}$ , v případě, že při teplotě  $400^\circ\text{C}$  zkoušený materiál nehoří plamenem, nebo při teplotách 325, 350, 375, 400, 500, 600, 700 a  $800^\circ\text{C}$  v případě, že materiál při teplotě  $400^\circ\text{C}$  hoří plamenem.

Do vyhřáté pícky se vloží vzorek zkoušeného materiálu a rychle se uzavřou dvířka dýmové komory. Uvede se do provozu homogenizační ventilátor. Na přístroji se odečítá minimální hodnota intenzity světla, které prošlo vrstvou kouře.

#### **Diskuse**

ČSN 64 0150 patří mezi standardní akumulační metody. Osa optického měřicího systému je horizontální. Při tomto uspořádání je v případě vzniku určitého rozvrstvení vzniklého kouře jistá možnost chyby měření. Toto riziko nehrozí při vertikálním uspořádání systému měření, avšak výsledky měření mohou být ovlivněny padáním tuhých částic kouře na dno komory, v případě, kdy sedimentující částice dopadnou na aktivní optickou plochu. Při návrhu této normy se však mělo přihlížet i k tomu, že kapalné i tuhé částice ulpívají i na všech vnitřních stěnách komory, což vždy ovlivňuje výsledek měření. Po provedeném měření a odvětrání komory signál fotodiody nestoupne nikdy na původní hodnotu 100% propustnosti. Tento nedostatek optického měření hustoty kouře je v mnohých cizích zkušebních zařízeních eliminován, např. v ISO 5924 - u dvoukomorového testu. Je však pravda, že tato chyba měření není u statických metod tak závažná, jako u dynamických měřících metod. Dynamická testovací metoda pro stanovení optické hustoty kouře není v ČR normována.

### 4.1.2 Jednokomorový test ČSN EN ISO 5659-2

Tento test vychází z ISO 5659-2, plasty - vývoj kouře - část 2: stanovení optické hustoty kouře metodou jednokomorového testu. Norma byla převedena do souboru EN a současně v roce 1999 jako ČSN EN ISO 5659-2 do systému českých technických norem. Prakticky stejná je i statická kouřová komora NBS, která je krátce popsána dále.

Norma popisuje metodu pro měření vývinu kouře při hoření plastů včetně kompozitů v tloušťce max. 25 mm. Metoda je použitelná i pro jiné materiály, v podstatě pro jakékoli tuhé hmoty.

#### Zkušební zařízení

Vzorky zkoušených materiálů se zkoušejí v horizontální poloze. Tepelné namáhání je realizováno kónickým tepelným radiátorem (viz ISO 5657), tepelným tokem konstantní intenzity. Zkouška se provádí s nebo i bez pomocného zapalovacího plamínku. Pomocný hořáček je pevnou součástí zkušebního zařízení a je umístěn nad povrchem studovaného materiálu. Vznikající kouř je shromažďován v kouřové komoře o rozměrech 914 × 914 × 610 mm. Vývin kouře je registrován fotometricky, jako zeslabení intenzity světelného paprsku procházejícího vertikálně objemem komory. Útlum světelného paprsku se vyhodnocuje jako měrná optická hustota kouře.

Zkušební vzorky mají plošné rozměry 75 × 75 mm a jsou v přirozené tloušťce, maximálně do 25 mm. Tři vzorky se zkouší při hustotě tepelného toku 25 kW.m<sup>-2</sup> bez zapalovacího plamínku a poslední tři vzorky se zkouší při dvojnásobné hustotě tepelného toku (50 kW.m<sup>-2</sup>) bez zapalovacího plamínku. Zkouška trvá 10 minut.

Hodnota specifické optické hustoty se vypočte ze vztahu:

$$Ds_{10} = 132 \cdot \log \frac{100}{T}$$

kde:  $Ds_{10}$  je specifická optická hustota kouře

T - hodnota minimální propustnosti světla v procentech

132 - konstanta zahrnující objem zkušební komory, délku měřicího paprsku a plochu exponovaného materiálu.

$Ds_{10}$  se udává jako průměr ze tří měření za stejných podmínek.

### 4.1.3 Dvoukomorový test - ISO 5924

*(Fire Tests - Reaction to Fire - Smoke generated by building products (Dual chamber test)).*

Tato ISO metoda vznikla v technické komisi pro bezpečnost staveb (TC 91). Ve svém oboru (statické měřicí metody) patří k nejrozšířenějším. Zkušební zařízení je tvořeno systémem dvou propojených komor. První - dekompoziční komora je spojena u dna a pod stropem s druhou - kouřovou měřicí komorou o rozměrech 600 x 1500 x 1300 mm (šířka x hloubka x výška), objem měřicí komory je tedy 1,17 m<sup>3</sup>. V dekompoziční komoře (půdorysných rozměrů 600 x 325 mm) je umístěn základní díl z ISO 5657 - kónický zářič a pákový mechanismus nosiče vzorku (bez ramínka se zapalovacím plamínkem). Zkušební vzorky mají čtvercový půdorys o hraně 165 mm, před zkouškou se zabalí do tenké hliníkové fólie, v níž je vyříznut kruhový otvor o průměru 140 mm. Při tomto testu je tedy plocha, z níž se kouř vyvíjí, konstantní. Materiály se testují v přirozené tloušťce, maximálně však do 70 mm.

Zkouška probíhá při konstantním tepelném namáhání, přičemž se zkouška provádí při různých hustotách tepelného toku (10, 20, 30, 40 a 50 kW.m<sup>-2</sup>). Měření trvá 20 minut od vlo-

žení vzorku. V průběhu měření vznikající zplodiny proudí z dekompoziční komory do měřicí komory. Transport kouře je vyvoláván jednak přirozeným termickým prouděním, současně však tomu napomáhá cylindrický ventilátor umístěný pod horním spojovacím otvorem mezi jednotlivými částmi komory. Světlo ze zdroje prochází měřicí komorou napříč (délka měřicího svazku paprsku je 300 mm) a dopadá na fotodiodu. Stejně jako u ČSN 54 0150 je bílé světlo žhaveného wolframového vlákna halogenové žárovky filtrováno a na čidlo dopadá světlo vlnových délek, na něž je lidské oko nejcitlivější. Optický systém je doplněn zařízením znemožňujícím ulpívání částic kouře na optických plochách vysílače i přijímače světla. Je to řešeno trubkovými nástavci, které zasahují do prostoru měřicí komory a do nichž je vháněno určité množství vzduchu. Přídavný proudící vzduch vytváří v tubusech určitý přetlak, čímž brání vniknutí kouře a optické plochy zůstávají čisté. Dochází sice k malému zředění kouře, a tudíž i ke snížení jeho optické hustoty, avšak za 20 minut činí „přírůstek“ objemu jen cca 1%.

Výsledkem zkoušky je optická hustota kouře pro daný materiál a danou intenzitu aplikovaného tepelného záření. Z pěti opakovaných měření při jedné úrovni tepelného namáhání se počítá průměrná maximální hodnota  $D_{mm}$  (*Mean maximum smoke density*). Dalším parametrem je maximální optická hustota  $D_{hm}$  (*Heights mean maximum*), která se stanoví jako maximální hodnota ze všech  $D_{mm}$ . K této se uvádí i příslušná hodnota tepelného toku. Ke všem optickým hustotám se uvádí i časy dosažení příslušných hodnot, a došlo-li během jednotlivých zkoušek k zapálení materiálu, pak i časy zapálení. Dochází-li v průběhu jedné zkoušky po dosažení maximální hustoty k poklesu optické hustoty (vlivem stárnutí kouře) uvádí se i hodnoty zbytkové optické hustoty  $D_r$  (*Residual density*). Stanoví se také úbytky hmotnosti zkoušených vzorků u všech provedených měření.

## **Diskuse**

U této metody se nevyhodnocuje měrná optická hustota, ale pouze optická hustota. To znamená, že se ve výpočetním vztahu nevyskytuje ani objem komory, ani délka měřicího paprsku, ani plocha resp. hmotnost zkoušeného vzorku. Je však pochopitelné, že tyto parametry se na výsledcích projevují. Měrné hodnoty se samozřejmě dají, jsou-li žádány, dopočítat.

Způsob homogenizace kouře v měřicí komoře je vhodnější než u ČSN 64 0150, válcový ventilátor budí cirkulaci obsahu komory kolem vodorovné osy, rovnoběžně s osou měřicího optického systému. Tento způsob proudění brání vrstvení kouře a současně i zpomaluje usazování hmotnějších částic na dně komory. U české normy je osa cirkulace svislá, to znamená kolmá na měřicí osu. Také je zde, na rozdíl od ČSN, zajištěna čistota vnějších optických ploch fotometru.

### **4.1.4 Další metody pro stanovení produkce kouře**

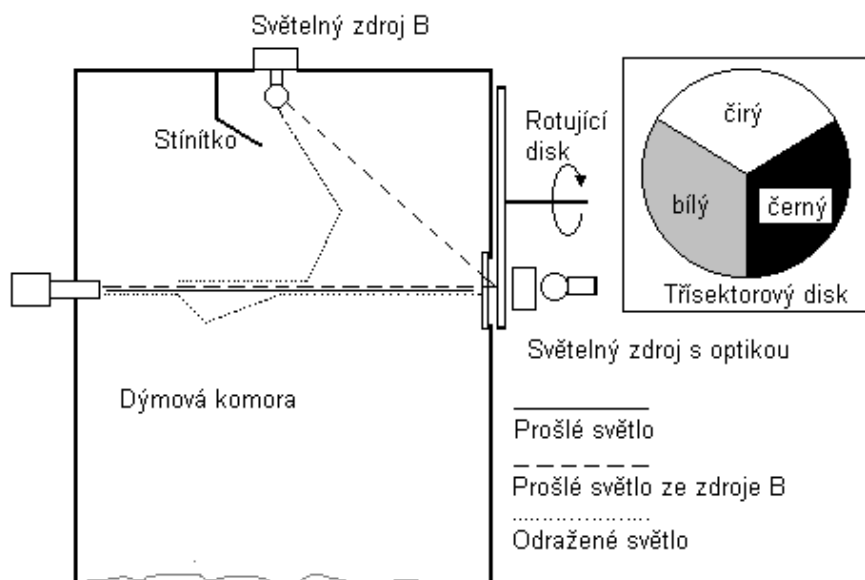
Poměrně rozšířenou statickou metodou je metoda *NBS Smoke Chamber* (v USA ASTM E662, ASTM F814, ve Velké Británii BS 6401). Kouřová komora má rozměry 914 x 914 x 610 mm (objem komory činí 0,51 m<sup>3</sup>). Zkušební vzorky mají rozměry 75 x 75 mm a tloušťku maximálně 25 mm. Zkoušejí se ve svislé poloze. Tepelné namáhání je realizováno tepelnou radiací konstantní hustoty 25 kW.m<sup>-2</sup>. Zdrojem tepelného záření je plošný elektricky vyhřívaný element. Tepelný zdroj i zkoušený materiál je ve svislé poloze. Optická hustota kouře se stanovuje v režimu plamenného hoření a bezplamenného rozkladu. V případě plamenného hoření na zkušební vzorky mimo tepelné radiace působí i zapalovací plamen. Optická osa měřicího systému je svislá, světelný zdroj je ve dnu komory. Usazování kouře na optické ploše je bráněno vyhříváním průzoru. Vzestupné termické proudění nad touto vodorovnou plochou brání jak kondenzaci par z kouře, tak i usazování tuhých částic. Horní průzor však žádnou speciální ochranu proti usazování tuhých či kapalných částic nemá. Uspořádání zdroje a zkoušeného

materiálu neumožňuje regulární měření tavicích se materiálů. Vyhodnocuje se měrná optická hustota a v případě plamenného hoření i doba zapálení.

\* \* \*

Zajímavé jsou také měřicí metody umožňující vedle standardní optické hustoty kouře stanovení kontrastních vlastností kouře. Pro studium kontrastu kouře jsou v kouřové komoře 2 světelné zdroje. První zdroj se nachází na optické ose světlocitlivého čidla a umožňuje měření jako pohlcené, tak i odražené části světelného toku. Druhý světelný zdroj osvětluje prostor dýmové komory z boku, přičemž stínící přepážka zabraňuje přímému osvětlení detektoru. Zkušební zařízení (obrázek 29) je doplněno rotujícím kotoučem rozděleným na 3 sektory po 120° - transparentní, bílý a černý. Kotouč je umístěn v optické ose mezi zdrojem a detektorem světla. Je-li v optické ose transparentní sektor kotouče, svítí první zdroj a lze stanovit optickou hustotu kouře. Protne-li optickou osu černý sektor, dopadá na detektor světelný tok **a**, který je tvořen pouze fotony odraženými částicemi kouře. Protíná-li optickou osu bílý sektor, dopadají na detektor jak fotony odražené na částicích kouře, tak současně i fotony odražené od bílého povrchu terče - světelný tok **b**. Světelný kontrast kouře se uvádí jako kontrastní koeficient:

$$K_1 = \frac{b}{a}, \text{ nebo } K_2 = \frac{b-a}{a}$$



Obr. 29 Schéma měření optické hustoty a kontrastních charakteristik kouře

## 4.2 Toxicita kouře

Dalším rizikovým faktorem spojeným s tvorbou kouře je jeho toxicita. Toxicita kouře je závislá na složení materiálu a také na podmínkách jeho vzniku. Hlavními prvky v hořlavinách je uhlík a vodík. Mimo těchto prvků mohou hořlavé látky obsahovat i kyslík, dusík, halové prvky, síru, případně i další, obsažené ponejvíce v různých přísadách.

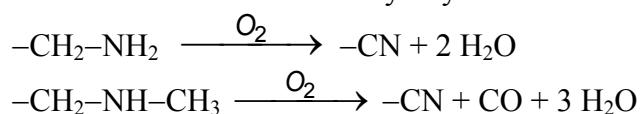
**Uhlík** při hoření oxiduje za vzniku  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}$ , případně složitějších sloučenin často částečně oxidovaných - např. aldehydů. Při tepelném rozkladu většinou vznikají složitější produkty méně oxidované, většinou nenasycené, někdy cyklické.  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}$  v produktech pyrolýzy nacházíme výjimečně, v malém množství především při vysokoteplotní pyrolýze.

**Vodík** v případě plamenného hoření oxiduje za vzniku vody. Při pyrolýze karbonizujících hmot se může odštěpovat i plynný vodík.

**Kyslík** navázaný v molekule hořlaviny se ve zplodinách nachází v podobě vody, oxidů uhlíku, aldehydů apod. Poměrně vzácně se kyslík v hořlavinách nachází v podobě nitroskupiny -NO<sub>2</sub> (nátěrové hmoty a tmely na bázi nitrocelulózy, celulooid ale i některá barviva). V těchto případech se kyslík vznikající při tepelném rozkladu látky účastní procesu hoření paliva jako oxidační prostředek.

**Dusík.** Dusík se v hořlavinách nachází v podobě aminoskupiny (-NH<sub>2</sub>, -NH-, N≡), kyanové skupiny (-CN), nitroskupiny (-NO<sub>2</sub>), případně azoskupiny (-N=N-). Toxicita kouře způsobovaná dusíkatými látkami je závislá na vazebné konfiguraci dusíku v hořlavině a na podmínkách jejího rozkladu.

Je-li dusík v hořlavině obsažen v podobě aminoskupiny, vzniká při tepelném rozkladu amoniak, resp. aminosloučeniny. V podmínkách vysokoteplotního rozkladu (800 °C a více) jsou ve sloučeninách často nacházeny i kyanové sloučeniny nebo i kyanovodík.



Je-li dusík v palivu vázaný v kyanoskupině, pak v produktech hoření převažují kyanosloučeniny a samotný kyanovodík i při rozkladu za nižších teplot.

Dusík vázaný v nitroskupině se v produktech hoření nachází nejčastěji v podobě směsi oxidů dusíku (NO + N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Při rozkladu azoskupin vzniká (někdy již za nízkých teplot) plynný dusík. Azoskupiny se v plastech nejčastěji nacházejí v barvivech. Tepelně nestabilní azosloučeniny se používají jako nadouvadla při výrobě pěnových hmot.

**Halové prvky** (F, Cl, Br). Nejčastěji se v plastech vyskytuje chlor (PVC, PVDC, chlorkaučuk aj.), méně častý je výskyt fluoru (PTFE). Brom se do struktury plastu dostává především při přípravě hmot se sníženou hořlavostí.

Halové prvky se v kouři vyskytují především jako halogenvodíky, případně jako halogenované nízkomolekulární produkty. Halogenvodík se následně rozpouští ve vznikající vodě a vytváří mlhu halogenvodíkové kyseliny (HF, HCl, HBr). Za zvláštních podmínek rozkladu by z chlorovaných plastů mohl vznikat i fosgen COCl<sub>2</sub>, ten však bývá v kouři detekován velmi vzácně.

**Síra.** Síra se běžně nachází v pryžích, ve kterých tvoří sirné můstky spojující lineární makromolekuly kaučuků. V hlavním řetězci jsou sirné atomy přítomny ve speciálních plastech polysulfidech (thioplasty -S<sub>x</sub>-) a polysulfonech (polyethersulfony -SO<sub>2</sub>-). Ve zplodinách hoření se síra nejčastěji nachází ve formě oxidu siřičitého, resp. jednodušších thiosloučenin. Při pyrolýze převažují thiosloučeniny. Při nízkoteplotní pyrolýze thioplastů můžeme očekávat i vznik sirovodíku H<sub>2</sub>S.

#### 4.2.1 Analytické stanovování toxicity kouře

Při studiu toxicity kouřových zplodin se využívají vhodné analytické metody, které umožní stanovit jejich složení. Existuje však i jiný přístup k tomuto problému, což je přímé sledování toxických účinků kouře na živých organismech. Komplexnější výsledky poskytuje kombinace obou uvedených postupů.

V oblasti přístrojové analýzy plynných zplodin lze volit mezi:

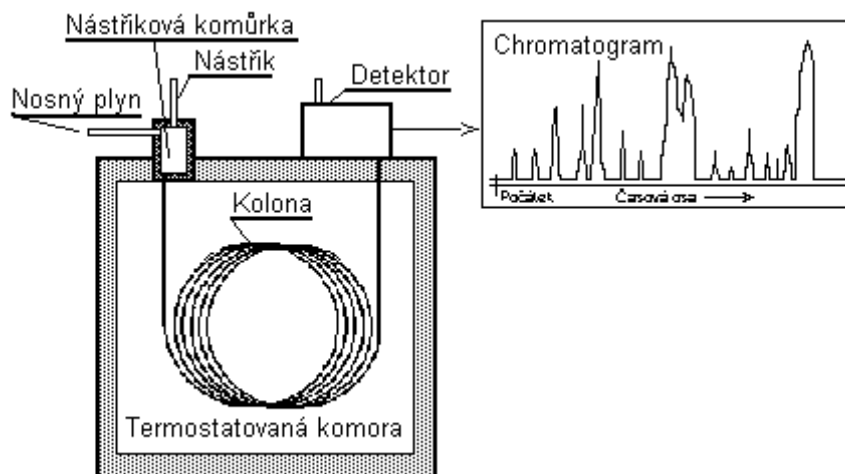
- a) Jednoučelovými analyzátory pro jednotlivé toxické složky kouře
- b) Komplexní analýzou plynných kouřových zplodin

Jednoučelové analyzátory jsou analytické přístroje, které umožňují průběžné stanovení koncentrace jednoho plynu. Při potřebě stanovení více toxických látek v kouři musí být použito více příslušných přístrojů. Je zde nutné mít na paměti, že konkrétní plyny musí být před přivedením k analyzátoru vždy předčištěny. Způsob předúpravy je závislý na konkrétním měřeném plynu. Vždy se jedná o filtraci tuhých podílů. Je-li studovaná látka nerozpustná ve vodě, pak je nutno analyzovaný plyn důkladně vysušit. Někdy je naopak potřebné přivodní potrubí k analyzátoru vyhřívat, aby nedocházelo ke kondenzaci. V jiných případech je nutno ze směsi plynů odstranit plyn, na který je měřicí systém analyzátoru také citlivý. Stanovit při jednom měření větší počet plynů může být proto značně problematické.

Nesporná výhoda použití analyzátorů je v tom, že měření je kontinuální a získávají se koncentrace plynů v závislosti na čase. Pro přesná měření se však předem musí zjistit časová zpoždění signálů jednotlivých analyzátorů způsobená dopravním zpožděním plynů (přechodem od místa odběru přes jednotlivé prvky v řetězci předčišťování až ke vstupu analyzátoru) a rychlost reakce samotných analyzátorů.

Analýza pomocí jednoučelových analyzátorů je vhodná v případě, když jsou známy hlavní toxické látky v kouři, nebo když je nutno studovat dynamiku procesu tvorby vybraných toxikantů.

Komplexní analýza plynných produktů kouře poskytuje kvalitativní a kvantitativní údaje o jednotlivých látkách v něm obsažených. Mezi nejvhodnější metody pro tento účel patří chromatografie. Mezi chromatografickými metodami pak jako nejvhodnější je plynová chromatografie (GC - *Gas Chromatography*). Schéma plynového chromatografu je na obrázku 30. Podstatou chromatografických metod je rozdělení analyzované směsi na jednotlivé látky a jejich následné kvalitativní a kvantitativní určení. Dělení směsi probíhá na chromatografické koloně. Kolony jsou několika druhů: náplňové a kapilární, kolony mohou být kovové nebo skleněné.



**Obr. 30 Schéma plynového chromatografu**

Náplňové kolony (kovové i skleněné) mají vnitřní průměr 2 ÷ 3 mm a jsou dlouhé typicky 1 ÷ 5 m. Náplň kolony je tvořena jemným zrnitým práškovým materiálem (adsorbentem), který je často impregnován kapalnou látkou (parafiny, silikony apod.) pro dosažení specifických dělicích schopností náplně kolony. Jiným typem náplně do kolony je sytký porézní materiál s přesně definovanou velikostí pórů - tzv. molekulová síta.



Kapilární kolony mají vnitřní průměr v desetinách milimetru a délku řádově  $10 \div 10^2$  m. Vnitřní stěny jsou opatřeny tenkým povlakem aktivní látky zajišťující adsorpční dělení směsi.

Analyzovaná směs plynů se dávkuje do vyhřívané vstřikovací komůrky, do které se také přivádí nosný plyn ( $N_2$ , Ar). Nosný plyn (nesmí reagovat s žádnou analyzovanou složkou směsi) obohacený analyzovanou směsí prochází kolonou, v níž dochází k rozdělení směsi na jednotlivé látky. Na výstupu z kolony je umístěno vhodné čidlo, které jednotlivé složky postupně detekuje a převádí na elektrický signál. Detektory pracují na různém principu - plamenně ionizačním, tepelně vodivostním aj.

Velmi vhodné je napojení plynového chromatografu na hmotnostní spektrometr (GC-MS: *Gas Chromatograph - Mass Spectrometer*). Signál z detektoru vykreslený na zapisovači se nazývá chromatogram. Z chromatogramu se chemická kvalita určuje nejčastěji z elučních časů, které jsou (pro danou kolonu a podmínky analýzy) pro jednotlivé plyny (při jakkoli složitých vstupujících směsích) konstantní. Z plochy píků na chromatogramu se určuje kvantita jednotlivých složek směsi.

Podrobnější GC analýzu složitějších směsí, např. kouřových zplodin nelze provést při jednom nástřiku. Je nutno provést několik analýz na různých kolonách při různých teplotách kolony, případně i s různými detektory. Laboratoře specializující se na studium složení produktů hoření nebo pyrolýzy jsou schopné zjistit i několik set jednotlivých látek.

Nevýhodou GC je časová náročnost měření a pochopitelně i dávkový (tedy nekontinuální) režim analýzy. Chromatografické metody nejsou vhodné pro studium dynamiky vývoje jednotlivých látek v kouřových plynech. Jistou možností zde je odběr vzorků kouře do zásobníků a jejich následná analýza. Avšak samotné vzorkování je vážný technický problém, neboť mnohé látky ve směsi mohou vzájemně, nebo se vzduchem, reagovat, nízko vroucí kapaliny včetně vody kondenzují. Dobrým řešením je rychlé ochlazení kouře na velmi nízké teploty, např. pomocí kapalného dusíku. Zabrání se tím dalším reakcím jednotlivých složek zplodin, avšak nese to s sebou další problémy při dávkování do chromatografu. Chromatografické analýzy se používají tehdy, žádá-li se identifikace maximálně možného množství látek.

Nejkvalitnější výsledky přináší sledování časového průběhu vývoje hlavních škodlivin na analyzátořech a současně i celková chromatografická analýza.

Výsledky přístrojové analýzy jsou schopné poskytnout velmi podrobné informace o složení kouře. Z nich potom lze podle množství jednotlivých toxikantů stanovit celkovou toxicitu jejich směsi.

### **Odhad toxických účinků**

Výsledky přístrojové analýzy kouře mohou být použity pro odhad toxických účinků na živé organismy. Metody odhadu toxických účinků kouře bez použití pokusných zvířat jsou uvedeny v ISO TR 9122-5 a ISO 13344.

K výpočtu předpovězené hodnoty toxicity se používají naměřené hodnoty koncentrací jednotlivých látek a známých hodnot  $LC_{50}$  resp.  $LD_{50}$  pro tyto látky.

- $LC_{50}$  - letální (smrtná) koncentrace konkrétní toxické látky jejímž účinkem hyne 50 % pokusných zvířat
- $LD_{50}$  - letální (smrtná) dávka toxické látky, při níž hyne 50 % pokusných zvířat, je-li škodlivina inhalována po dobu 30 min.

Toxickou dávku obdržíme vynásobením koncentrace škodliviny dobou expozice. Hodnoty  $LC_{50}$  a  $LD_{50}$  lze vyhledat v toxikologických tabulkách. Frakční účinná dávka toxické látky FED je dána poměrem zjištěné koncentrace této látky v ovzduší a její hodnotou  $LC_{50}$ .

$$FED = \frac{C}{LC_{50}} \dots \text{pro dobu inhalace 30 s}$$

$$FED = \frac{C \cdot t}{LD_{50}} \dots \text{ pro jiné doby expozice.}$$

Frakční účinná dávka směsi toxických látek - kouře se vypočítá ze vztahu:

$$FED = \sum \frac{C_i}{LC_{50i}} = \frac{[CO]}{LC_{50CO}} + \frac{[HCN]}{LC_{50HCN}} + \frac{[HCl]}{LC_{50HCl}} + \dots$$

Je známo, že vyšší koncentrace CO<sub>2</sub> a současné snížení koncentrace O<sub>2</sub> prohlubuje dýchání - tento efekt se nazývá hyperventilace. V důsledku toho se zintenzivňuje vstřebávání toxických látek v plicích. Tento fakt je také možno zohlednit při výpočtu FED.

$$FED = \frac{m \cdot [CO]}{[CO_2] - b} + \frac{21 - [O_2]}{21 - LC_{50O_2}} + \frac{[HCN]}{LC_{50HCN}} + \frac{[HCl]}{LC_{50HCl}} + \dots$$

m a b jsou koeficienty závislé na koncentraci CO<sub>2</sub>.

Jiné vyjádření frakční účinné dávky vychází ze základních typů toxických látek: samostatně jsou zastoupeny CO a HCN a v sumárním tvaru dráždivé látky kyselého charakteru (HCl, HBr, HF) a organické dráždivé látky. Výpočetní vztah má pak tvar:

$$FED = \left[ \frac{[CO]}{LC_{50CO}} + \frac{[HCN]}{LC_{50HCN}} + \frac{[kyselé\ iri\ tan\ ty]}{LC_{50kys.\ iri\ tan\ ty}} + \frac{[organ.\ irit.]}{LC_{50org.\ irit.}} \right] \cdot V_{CO_2} + A$$

Členy za závorkou (VCO<sub>2</sub> a A) zohledňují míru účinku hyperventilace a jsou závislé na koncentraci CO<sub>2</sub> v toxické směsi.

CO <sub>2</sub>	VCO <sub>2</sub>	A
≤ 2,5	1	0
3,0	1,25	0,1
4,0	1,4	0,2
5,0	1,5	0,25

Hodnotu smrtelné koncentrace LC<sub>50</sub> směsi toxických plynů obsažených v kouři při spálení m gramů látky, přičemž kouř se rozptýlí v objemu V se vypočte ze vztahu

$$LC_{50} = \frac{m}{FED \cdot V} \quad [g \cdot m^{-3}]$$

#### 4.2.2 Stanovení toxicity dýmu na živých organismech

Přístrojová analýza dýmu může poskytnout velmi podrobné a přesné výsledky o jeho složení. Z těchto výsledků lze vypočítat toxicitu rozhodujících toxikantů v analyzované směsi. To v mnoha případech v praxi zcela postačuje, zejména při porovnávání toxicity kouře z různých materiálů, nebo při studiu kouře z jednoho materiálu produkovaného za různých podmínek.

Skutečná toxicita kouře se však od vypočtené často liší. Skutečnou toxicitou je myšlena přímá reakce živého organismu na kouřové zplodiny. Důvody, proč tomu tak je, jsou následující:

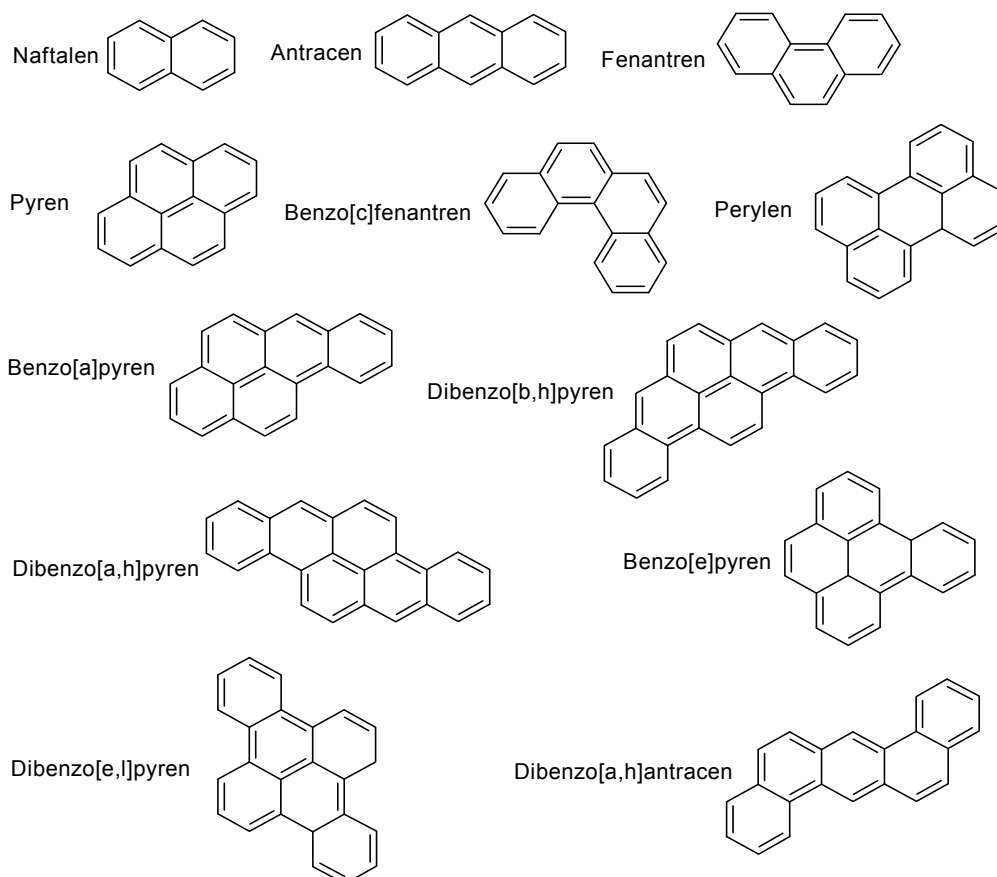
- není zohledněn synergismus ani antagonismus působení jednotlivých toxických plynů,
- většinou není zohledňována snížená koncentrace kyslíku v prostředí,
- významnou roli hraje i teplota prostředí,
- není zohledňována ani snížená odolnost organismu plynoucí z velké psychické zátěže (ohrožení požárem, snížená viditelnost atd.).

Takže pro objasnění uvedených vlivů je nutno toxické účinky kouře testovat na živých organismech. Zkoušky se provádějí nejčastěji na laboratorních myších.

Při zkouškách se kouř připravuje buď ve speciálních pyrolyzerech za definovaných podmínek rozkladu, anebo za podmínek volného hoření zkoušených materiálů. Laboratorní pokusná zvířata mohou být kouřem exponována buď na celém povrchu těla (jsou volně umístěna v kouřové expoziční komoře), anebo jsou umístěna ve speciálních expozičních aparaturách, v nichž jsou zvířata částečně fixována a exponována je pouze jejich hlava. Druhý způsob expozice umožňuje napojení testovaných zvířat na různé diagnostické přístroje (EKG, EEG apod.) a současně je možno provádět rozbor jejich krve. Volně se pohybující zvířata jsou však méně stresována než zvířata částečně znehybněná s připojenými elektrodami a s nabodnutou kanylou a je nutno počítat s tím, že výsledky v obou případech nemusí být stejné. Paralelně s testy na živých organismech je vhodné provádět i přístrojovou analýzu kouřových zplodin.

V problematice toxického působení kouře nelze opominout i jeho účinky nepřímé. Velmi významné a často opomíjené jsou kancerogenní a mutagenní účinky kouře. Tyto účinky projevují zejména látky označované PAU (anglicky PAH). Za těmito zkratkami se skrývají polyaromatické uhlovodíky (Polyaromatic Hydrocarbons). Jedná se o sloučeniny s kondenzovanými benzenovými jádry. Jsou to látky kapalného nebo tuhého skupenství, ve vodě nerozpustné. Jsou málo reaktivní a tedy poměrně stálé s charakteristickým aromatickým zápachem. Řada polyaromátů začíná naftalenem a antracénem. Další PAU s významnou kancerogenní, resp. mutagenní aktivitou jsou uvedeny na obrázku 31.

Polyaromáty vznikají při karbonizačních procesech, např. při karbonizaci (koksování) uhlí. V menší míře však vznikají i při hoření organických materiálů, zejména při hoření za omezeného přístupu vzduchu. Dobré podmínky pro jejich vznik jsou v horké zóně plamene, ve které dochází ke karbonizaci plynných produktů rozkladu hořících látek (viz také tvorba kouře). PAU adsorbované na sazové částice potom unikají z horkého prostředí. Díky jejich vysoké tepelné odolnosti mají šanci plamennou zónou projít neoxidovány.



**Obr. 31 Vybrané nebezpečné polyaromáty vznikající při požárech**

Výskyt těchto látek na požářišti studovali Ševěček a kol. <sup>[104]</sup>. V tabulkách 14 a 15 jsou uvedeny výsledky stanovení vybraných PAU zachycených na oděvech zasahujících hasičů.

PAU	Vzorek 1 [mg.l <sup>-1</sup> ]	Vzorek 2 [mg.l <sup>-1</sup> ]	Vzorek 3 [mg.l <sup>-1</sup> ]	Vzorek 4 [mg.l <sup>-1</sup> ]
Naftalen	*	8,57	2,44	*
Acenaftylen	*	15,61	25,40	2,36
Fluoren	2,62	*	28,59	*
Fenantren	28,00	184,97	85,95	20,50
Antracen	5,21	*	*	4,80
Fluoranten	48,27	230,63	53,80	28,34
Pyren	52,59	265,31	73,32	34,97
Benzo[a]antracen	43,91	*	36,59	26,88
Chrysen	69,57	446,33	*	58,78
Benzo[a]pyren	*	95,35	16,67	*
Dibenzo[a,h]antracen	*	156,00	9,80	*

Poznámka: \* - v koncentraci menší než mez detekce

**Tab. 14 Polyaromáty nalezené v ochranných oblecích**

Vedle stanovených koncentrací stanovených PAU byl také proveden statistický odhad množství dalších neidentifikovaných polyaromátů.

Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
2556 mg.l <sup>-1</sup>	12482 mg.l <sup>-1</sup>	3791 mg.l <sup>-1</sup>	993 mg.l <sup>-1</sup>

**Tab. 15 Odhad celkových obsahů PAU**

Uvedené obsahy PAU jsou velice významné, zejména u vzorku 2. Koncentrace jsou uváděny v miligramech na litr rozpouštědla použitého k extrakci, všechny obleky byly macerovány stejným množstvím rozpouštědla.

Nádorové bujení je spuštěno množením tkáňových buněk s narušeným genetickým kódem. Změněný genetický kód pohlavních buněk se projeví defekty na dalších generacích. Některé polyaromáty jsou látkami, které jsou schopny modifikovat řetězce DNA v jádrech tkáňových i pohlavních buněk, a jsou tedy zodpovědné za vznik nádorů i mutací (vrozených vad) potomků.

Kancerogenita a mutagenita kouře se odhaduje z výsledků analýz. Kancerogenita jednotlivých látek se zjišťuje na živých organismech – např. myších, krysách, vepřích. Mutagenita se ověřuje na hmyzu; zvláště vhodné pro tyto účely jsou vinné mušky (*Drosophila melanogaster*), jejichž generační cyklus trvá asi jeden týden. To umožňuje sledovat testovaný soubor mušek pohodlně na několika generacích.

Výskyt PAU na požářištích je nesporný. Jsou jimi ohrožováni jednak zasahující hasiči, kteří ale většinou pracují v ochranných oděvech a s dýchacími přístroji. Takže pokud dodržují základní hygienická pravidla, zejména dodržuje-li se na stanici pravidelné praní zásahových obleků, objektivně jim významné riziko nehrozí. Ohroženější skupinu tvoří likvidační čtyři při odstraňování zbytků po požáru, a taky pracovníci při vyšetřování příčin požáru, kteří si tohoto rizika nemusí být vědomi. Pracují proto často bez ochranných pomůcek a bez ochrany dýchacích cest. Je nutno připomenout, že PAU jsou rozpustné v tucích a pronikají tudíž do těla i pokožkou. Pro tyto osoby je nezbytné snížit možnost kontaminace těmito látkami na minimum.

PAU jsou sice stabilní látky, ale poměrně rychle se rozkládají UV zářením. Kontaminované oděvy je možno PAU zbavit také běžným vypráním.

### 4.3 Korozivita kouřových zplodin

Chemická reakce kouře je většinou kyselá. Kyselé plyny (HCl, HBr, HF atd.) se rozpouštějí ve vodě a vytvářejí v kouři mlhu slabých kyselin, která se usazuje na povrchu konstrukcí a předmětů na požářišti. Kyselá mlha také proniká do trhlin, pod kryty elektrických přístrojů a rozvaděčů. Největší škody způsobené korozi vznikají na elektrických zařízeních, na kontaktech relé, na svorkovnicích apod. korozivita kouřových zplodin se ale projevuje i na kovových a železobetonových konstrukcích. Železobeton se při požáru zahřeje někdy na několik set stupňů. Armovací železo má oproti betonu vyšší tepelnou roztažnost, tudíž v železobetonových konstrukcích na styku železa a betonu vzniká určité napětí, které se dále zvýší při požárním zásahu, při jejich rychlém ochlazení vodou. Podél prutů výztuže pak mohou vznikat v krycím betonu trhliny zasahující až k povrchu oceli. Slabá kyselina, která trhlinou pronikne až k výztuži způsobí korozi oceli čímž oslabuje její adhezi s betonem a výztuž pak částečně ztrácí svou funkci. Takto postižená konstrukce má nižší nosnost. Jsou-li teploty při požáru zvláště vysoké (a hasiči nešetří vodou) může být stabilita konstrukcí objektu narušena natolik, že musí být zlikvidován – i když na první pohled žádné deformace konstrukcí nejsou patrné.

Korozivní působení zplodin požáru popisuje norma ISO 11907 z roku 1998. Tato norma byla zpracována s Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC – International Electrotechnical Commission). Norma má 4 části, v nich popisuje jednu statickou a dvě dynamické metody stanovení korozivity kouřových zplodin.

Principem všech metod je sledování působení korozivních zplodin na korozní detektor. Detektor má tvar destičky plošného spoje – tedy PES skelný laminát s naválcovanou měděnou fólií s vyleptaným obrazcem vodivých plošek a spojů. Povrch části obrazce je opatřen ochranným lakem, část tvoří nechráněná měď. Na detektor působí plynné zplodiny hoření po předepsanou dobu. testy se provádějí jednak v režimu nucené kondenzace zplodin (v tom případě je detektor umístěn na chladicím bloku, jím protéká voda) a nebo bez nucené kondenzace (bez chlazení detektoru). Míra kondenzace se zjišťuje změnou elektrické vodivosti mědi na detektoru. Vodivost se měří ihned po provedené zkoušce, a poté po 24 hodinách. Rozdíl ve vodivostech detektoru je úměrný koncentraci kyselých plynů v kondenzátu.

## 5 Termická analýza

Termickou analýzou je nazývána jakákoli analytická metoda, při níž je sledována libovolná charakteristika (vlastnost hmoty) v závislosti na teplotě. Nejčastěji jsou sledovány změny hmotnosti (TGA), tepelné zabarvení probíhajících procesů (DTA, DSC), změny objemu (dilatometrie), změny elektrické vodivosti (konduktometrie) atd.

Termoanalytické metody mohou být statické nebo dynamické. U statických metod se sledují změny v materiálu v prostředí s konstantní teplotou. U dynamických metod není teplota prostředí konstantní ale většinou stálou rychlostí stoupající, resp. klesající.

V oboru požární ochrany se využívá především termogravimetrická analýza TGA a diferenčně termická analýza DTA. Tyto analytické metody umožňují sledovat:

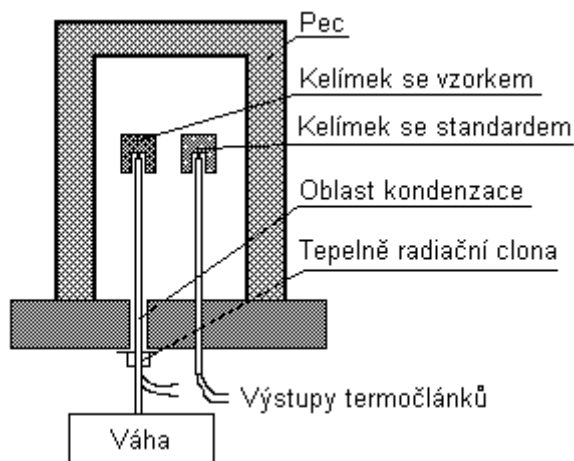
- dehydratační pochody - určování volné a vázané vody (TG, DTA)
- tepelný rozklad - organických a anorganických látek (TG, DTA)
- reakce v tuhé fázi - oxidaci, redukci, korozi (TG, DTA)
- katalýzu (TG, DTA)
- reakční mechanismy a jejich kinetiku (TG, DTA)
- reakční tepla (DTA)
- tepelnou stálost materiálů (TG)

Vyrábějí se samostatné přístroje pro provádění termogravimetrické analýzy - označované jako termováhy i přístroje pro provádění diferenční termické analýzy. Vedle toho však existují kombinované aparatury umožňující provádět paralelně TGA i DTA.

Dynamická TGA spočívá v kontinuálním snímání hmotnosti zkoušené látky v závislosti na lineárně stoupající teplotě. Váha v analyzátoru může být mechanická nebo elektronická. V elektronické váze je přímo na jejím výstupu elektrický signál úměrný hmotnosti. U mechanické váhy je nutno převést pohyb vahadla na elektrický signál vhodným převodníkem, např. na principu změny indukčnosti. Výsledkem analýzy je termogravimetrická křivka v souřadném systému: hmotnost, resp. úbytek hmotnosti a teplota. Často se provádí 1. derivace TG signálu, která se nazývá derivační termogravimetrie - DTG. Na této derivované křivce je patrná rychlost změny hmotnosti, taktéž v závislosti na teplotě.

DTA spočívá na sledování rozdílu teplot ve studovaném materiálu a v materiálu srovnávacím. Srovnávací materiál nesmí v rozsahu pracovních teplot vykazovat žádné fyzikální nebo chemické změny, je inertní. Těmto podmínkám vyhovuje např. oxid hlinitý -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Teplota v obou materiálech se snímá nejčastěji termočlánky. Nejvhodnějším typem termočlánku je Pt-RhPt. Signál DTA se získává z rozdílového zapojení obou termočlánků.

Teplota v pracovním prostoru se řídí regulátorem tak, aby její změna za časovou jednotku byla konstantní. Běžně vyráběné termoanalyzátory mají nastavitelnou rychlost změny teploty, typicky od desetin až po desítky  $^{\circ}\text{C}$  za minutu. Speciální přístroje umožňují provádět TA i za jiných podmínek ohřevu, např. při stupňovitém ohřevu (s prodlevami na určitých teplotách po stanovenou dobu), s různou rychlostí ohřevu v průběhu analýzy atd., také existují přístroje umožňující nárůst teploty ve stovkách  $^{\circ}\text{C}$  za minutu. Některé přístroje umožňují provádění TA v řízené atmosféře. Porovnáním záznamů analýzy jednoho materiálu provedené ve vzdušné atmosféře a v inertním prostředí lze zjistit vliv kyslíku na probíhající rozkladné procesy.



Obr. 32 Jednoduché schéma zařízení pro TG a DTA

## 5.1 Využití TA při studiu polymerních materiálů v PO

Při analýze organických materiálů narážíme na řadu problémů, které jsou spojeny s termogravimetrickou analýzou i diferenční termickou analýzou.

### Problémy při TGA

Při tepelném rozkladu dochází k degradaci materiálu, která je spojena s výrazným poklesem hmotnosti - u čistých organických látek až 100 %. Při rozkladu vznikající plynné produkty kondenzují na chladnějším místech vnitřního povrchu pece. Tím nejchladnějším místem v peci je nosič vzorku spojený s vážním zařízením, který musí volně procházet z horkého prostoru pece do prostředí s konstantní teplotou, v němž musí být váha umístěna. Je nutno si uvědomit, že na váze spočívá nejen samotný kelímek se vzorkem, ale i nosič (keramická dvojkapilára s termočlánkem). Během rozkladu organické hmoty tedy dochází ke ztrátě hmotnosti vzorku v kelímku, ovšem část vzniklých produktů kondenzuje na chladnějším nosiči, což zvyšuje hmotnost celého vážného systému. S postupně stoupající teplotou v peci se s určitým zpožděním zahřívá i kapilára se zkondenzovanými zbytky, které se pak znovu odpařují (případně sublimují), nebo rozkládají, což je ovšem registrováno jako pokles hmotnosti analyzovaného materiálu.

Přenosu hmoty z kelímku na kapiláru během TA nelze nikdy zcela zabránit. Je však možno jej omezit. Nejčastěji tím, že horký prostor v peci udržujeme v mírném podtlaku, který je zajištěn odsáváním pecní atmosféry. Kondenzace schopné plynné látky pak nedifundují kolem chladnější kapiláry, ale jsou z prostoru pece odváděny a kondenzují až v systému odvodu odčerpávané atmosféry, a to už chybu registrované hmotnosti nezpůsobuje.

Když je vyhodnocován záznam TG analýzy, je vždy určitá nejistota hodnoty aktuální hmotnosti zkoušeného vzorku materiálu. A vzhledem k tomu, že není známo, zda zaznamenaný úbytek hmotnosti je způsobován rozkladem materiálu v kelímku anebo kondenzátu na kapiláře, není možno výstupní hodnoty korigovat. Často se také stává, že i když se zkoušený materiál zcela rozloží a při tom ze záznamu signálu váhy vyplývá, že nějaký „zbytek“ existuje. Tento zbytek nemusí představovat chybu vážního systému, ale právě výše popsaný deposit kondenzátu. Větší nejistota průběhu hmotnosti analyzovaného materiálu je dosahována u přístrojů s mechanickými váhami, u nichž musí být boční vůle průchodu kapiláry mezi pecí a vážním prostorem větší než u přístrojů vybavených elektronickými váhami.

S ohledem na uvedený nepříznivý efekt u TG je nutno analýzy organických materiálů provádět až do maximální teploty, resp. vždy stejné, dostatečně vysoké teploty - např.



1000 °C. Znamená to, že není vhodné žádnou analýzu ukončovat předčasně. V tom případě by potom následná analýza, ukončená při teplotě vyšší, mohla skončit se zápornou konečnou hmotností. Může totiž dojít k tomu, že část kondenzátu zbylého na kapiláře z předešlé analýzy, ukončené při nižší teplotě, přejde do plynného stavu až při následné analýze, probíhající do vyšší teploty.

### **Problémy při DTA**

Jak bylo uvedeno, při DTA se sleduje rozdíl teploty vzorku zkoušeného materiálu a teploty vzorku materiálu standardního. Standardní materiál v průběhu měření nemění své tepelné vlastnosti a samozřejmě ani hmotnost. Proto je přestup tepla z povrchu pece na teplý spoj termočlánu do značné míry konstantní a vzestup teploty rovnoměrný. Zkoušený organický materiál se postupně, často v několika fázích, rozkládá. To znamená, že jednak se mění jeho makrostruktura, chemické složení a dochází k úbytku hmotnosti. Všechny změny mají vliv na tepelné vlastnosti studovaného materiálu. Z tepelných vlastností jsou nejpodstatnější: tepelná vodivost, měrné teplo a absorpční koeficient. Proto je přestup tepla z povrchu pece na teplý spoj termočlánu nekonstantní a navíc nedefinovatelný, a tedy - pro každý materiál jiný.

Tepelná vodivost je u většiny materiálů funkcí teploty. Mění se také ovšem i se změnou kvality původního materiálu. Zjednodušeně můžeme organické makromolekulární materiály podle hlavních charakteristik rozkladných procesů rozdělit do tří skupin: tavící se materiály, uhelnatící materiály a uhelnatící roztavené materiály.

- U tavících se materiálů probíhá rozklad víceméně v jedné fázi. V průběhu tavení může dojít ke změně hutnosti materiálu slinutím (zánikem disperzního charakteru původní formy vzorku). Tavenina po dosažení určité teploty se začíná rozkládat, vzniká tak kapalná směs jednodušších produktů, které postupně přecházejí do plynného skupenství.
- U karbonizujících materiálů často nedochází k výraznější změně objemu původního vzorku, původní hutná struktura postupně zvyšuje pórovitost.
- U materiálů, které se zpočátku taví a následně karbonizují, dochází nejdříve ke slinutí materiálu a poté, po dosažení teploty rozkladu, k jeho napěňování. Často se vytvoří tuhá zkarbonizovaná krusta vytvářející čepičku nad horním obvodem kelímku, přičemž vlastní objem kelímku je prázdný. K tomuto efektu dochází u látek, jejichž tavenina je málo viskózní a neumožňuje volný únik plynných produktů rozkladu, např. u polyamidů.

Dané skutečnosti mají zásadní vliv na přestup tepla na teplý spoj termočlánu v kelímku se zkoušeným vzorkem materiálu. Kdyby se tepelné vlastnosti vzorku v průběhu zkoušky neměnily, pak by se i teplé spoje termočlánu zahřívaly stejně a rozdíl teploty v obou kelímcích by byly měly být nulové. Samozřejmě jen pokud ve vzorku neprobíhají žádné pochody uvolňující nebo spotřebovávající teplo. Body nulových rozdílů teplot v průběhu DTA vytvářejí tzv. nulovou linii DTA. Odchyly signálu DTA od nulové linie jsou dokladem probíhajících exotermních nebo endotermních procesů. Vzhledem k nejistotě průběhu nulové linie je dosti obtížné záznamy DTA vyhodnocovat a prakticky nemožné je vyhodnocování kvantitativní. Kvantitativní vyhodnocování je obtížné i při analýzách anorganických materiálů. Pro tyto účely je vhodnější metoda DSC (*Differential Scanning Calorimetry*).

\* \* \*

Prvním krokem vyhodnocování DTA je určení průběhu nulové linie. Přes značné nejistoty s tím spojené je možno použít určitá pravidla.

1. Nedochází-li ve vzorku k žádným tepelným reakcím, je průběh nulové linie totožný se znamem DTA.
2. První reakce při rozkladu organických látek má většinou endotermní průběh.

3. Poslední reakcí před dosažením konstantní hmotnosti bývá často reakce exotermní.

Ad 1. Toto pravidlo lze aplikovat víceméně vždy v počáteční a konečné fázi DTA. To znamená do první registrované změny hmotnosti, resp. po dosažení ustálené hmotnosti v poslední fázi analýzy. Omezeně lze první pravidlo použít i mimo počáteční a koncový úsek analýzy, je-li jistota, že v určitém intervalu teplot k těmto změnám nedochází - čili v určitých teplotních mezích stability meziproductů tepelného rozkladu. U organických materiálů však tyto oblasti stability většinou nenacházíme, běžně však jsou při analýze anorganických materiálů. Oblasti tepelné stability lze nalézt na termogravimetrických křivkách (TG a DTG).

Ad 2. Toto pravidlo je méně spolehlivé, nelze jej vždy uplatnit například u materiálů, u kterých dochází k povrchové oxidaci. Při ní dochází k vázání kyslíku na povrchu analyzovaného materiálu, což by se mohlo projevit i s malým přírůstkem hmotnosti (TG, DTG), avšak často paralelně probíhají i dekompoziční reakce s endotermním průběhem, které jsou spojeny s úbytkem hmotnosti. Endotermní charakter mají i procesy tavení, avšak při poměrně malých nastavených citlivostech záznamu signálu DTA nebývá tento endopík na záznamu často nelesen. Nízká citlivost záznamu při analýzách organických materiálů je nutná, protože některé další rozkladné reakce uvolňují nebo pohlcují mnohonásobně větší množství tepla než u prosté změny fáze.

Ad 3. Toto pravidlo platí jednoznačně pro materiály, které během analýzy uhelnatí. U nich je poslední fázi rozkladu oxidace uhlíkatého zbytku provázena výrazným uvolňováním tepla při poměrně pomalém snižování hmotnosti. Před exotermní oblastí příslušející žhnutí uhlíkatých zbytků se často na záznamu TG nachází oblast, v níž se hmotnost zbytků nemění. V podmínkách tepelného rozkladu při TA, kdy na rozdíl od běžného zapalování, je zahřívání materiálu velmi pomalé, se jistý podíl uhlíkatého zbytku vytvoří i při rozkladu materiálů, které běžně uhlíkaté zbytky nevytvářejí - PE, PP apod. Toto pravidlo nemusí také platit u materiálů s anorganickými plnivy. Jsou-li plasty plněny např. uhličitany (vápenec, dolomit), probíhá v určitých teplotních mezích i rozklad plniva, který má endotermní zabarvení. Teplota počátku rozkladu minerálního plniva je však často vyšší než poslední fáze rozkladu organického materiálu. Může se ale stát, že oxidace uhlíkatého zbytku je překryta endotermní reakcí rozkladu plniva. Přítomnost anorganického plniva v organické hmotě je snadno zjištěitelná - po skončené analýze zůstane v kelímku minerální zbytek.

\* \* \*

Pomalé zahřívání zkoušených materiálů při TA je také důvodem poměrně pomalých průběhů reakcí, kterými vzorky prochází. Důsledkem toho je, že i když při jejich rozkladu vznikají hořlavé těkavé látky, nedochází k jejich zapálení. A pokud v plynné fázi oxidují, dochází pouze k pomalé oxidaci v prostoru pece, a přestože tato reakce má exotermní průběh, na záznamu DTA se to nemusí projevit, protože vznikající teplo není lokalizováno pouze na zkoušený materiál, ale zahřívá oba termočlánky. Pro snadnější a přesnější interpretaci DTA (ale i pro termogravimetrii) je velice výhodné provádět TA jednak ve vzdušné atmosféře a současně i v inertním prostředí. Porovnáním obou analýz stejného materiálu lze snadno identifikovat všechny oxidační reakce - ty na záznamu analýzy provedené v inertní atmosféře nenalezneme.

## 5.2 Využití TA v PO

Termická analýza (TG, DTA, DSC) přináší řadu velmi užitečných informací o materiálech. Metody TA umožňují především sledovat rozkladné procesy při zahřívání materiálu. Přesnější metody (především DSC) umožňují stanovení aktivačních energií těchto procesů.

Poměrně časté byly pokusy o nalezení závislosti mezi TA a běžnými požárně technickými charakteristikami materiálů - zejména FIT a SIT. Žádná významnější závislost však nebyla nalezena. Je samozřejmé, že teplota vzplanutí a vznícení materiálu musí spadat do oblasti jeho aktivního rozkladu, v níž dochází k úbytku hmotnosti. Není ovšem při tom důležité, zda se FIT nebo SIT nachází v exotermním nebo endotermním průběhu rozkladu materiálu.

Na první pohled může být zarážející, že vzplanutí či vznícení může nastat v endotermní fázi rozkladu materiálu. Je nutno si však uvědomit, že tepelné zabarvení probíhajících rozkladných procesů není v žádné souvislosti s chemickou kvalitou vznikajících produktů. Rozkládá-li se organická hmota, pak i produkty této degradace musí být v převážné většině hořlavé. Již dříve také bylo řečeno, že v záznamech DTA většiny plastů bývají počáteční fáze tepelného rozkladu nejčastěji endotermní povahy.

Je ovšem také dobré připomenout, že hledat nějaký vztah mezi vzplanutím a vznícením v Setchkinově peci a při TA je málo produktivní snaha. Charakteristické teploty (FIT, SIT a GT) nejsou teploty zkoušeného materiálu, ale teploty proudícího vzduchu, zahřívajícího studovaný materiál. Teplota samotného materiálu v okamžiku provozovaného vzplanutí nebo vznícení vlastně není vůbec známa. Je však zřejmé, že může být vlivem vnějších tepelných zdrojů až o několik desítek stupňů vyšší.

Významným pomocníkem je TA při přípravě plastů se sníženou hořlavostí. Lze velice dobře sledovat ovlivnění výsledného retardačního efektu se změnou poměrů jednotlivých komponentů retardačních systémů, což umožňuje stanovit optimální složení a nutné množství retardujících přísad.

## 6 Testování hořlavosti ve větším měřítku

Doposud jsme se zabývali laboratorními testy, při kterých jsou zkouškám podrobovány pouze vzorky malých rozměrů a hmotností. Tyto tzv. *bench top* testy jsou nejpočetnější, nejrozšířenější a také nejčastěji používané a prováděné. Mají bezesporu mnoho výhod, a to jak z pohledu ekonomického:

- časová nenáročnost,
- prostorová nenáročnost,
- většinou nízké pořizovací náklady,
- nízké provozní náklady,

tak i z dalších hledisek většinou vycházejících z předmětu zaměření konkrétních zkušebních metod:

- snadnost stanovení a zajištění standardních podmínek zkoušky,
- opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků,
- snadnost eliminace možných rušivých vlivů,
- snadnost likvidace zbytků po hoření ve všech skupenstvích.

Vedle nesporných výhod mají však laboratorní testy řadu nevýhod. Ty se týkají především:

- omezené použitelnosti výsledků zkoušek v praxi,
- jednoúčelovosti zkušebních postupů,
- malých rozměrů zkušebních vzorků,
- žádné nebo silně omezené možnosti volby podmínek zkoušky,
- zkoušeny jsou převážně jen vzorky hmot a materiálů, nikoli výrobky z nich nebo kombinace různých materiálů.

To, že se současně vyvíjejí zkušební metody, kterými se dají testovat i materiály větších formátů, však svědčí o jisté poptávce po nich a taky o tom, že malé testy nesplňují všechny požadavky na požární zkoušky kladené. Jaké jsou konkrétní důvody stále důraznějších požadavků na možnosti zkoušení hořlavosti větších celků? Především je zde snaha ověřovat teoretické modely rozvoje požáru. Na různých modelech se v posledních letech usilovně pracuje v celé řadě zemí - v USA, Velké Británii, Austrálii a dalších.

Asi hlavním nedostatkem laboratorních metod je malá možnost sledování fáze rozvoje hoření v podmínkách bližších reálnému požáru. To platí, přestože existuje celá řada malých metod zaměřených na zjišťování rychlosti povrchového šíření plamene (některé z nich byly probrány i v tomto textu dříve).

Uvažujme dříve popisované metody, např. pro zkoušení textilních materiálů a fólií. Textilní materiály zkoušíme v délce cca 40 cm, při sklonu 45° nebo ve svislé poloze. Šíření plamene na fóliových materiálech hodnotíme na svislých vzorcích v délce 30 cm. Zvláště u svislé polohy zkoušeného materiálu tyto zkoušky naznačí, jak by mohla probíhat časná fáze rozhořívání materiálu. Připomeňme také, že tyto zkušební postupy využívají častěji výrobci materiálu, nikoli uživatelé. Výsledky takto získané nelze přímo aplikovat, např. na materiál textilního závěsu visícího od stropu až k podlaze, tedy v délkách značně větších než u malých laboratorních metod. Jsou to totiž výsledky obdržené za striktně omezených podmínek zkoušky.

Malé metody většinou také neumožňují provádění zkoušek při různých úrovních tepelného namáhání. Zkouška tak začíná při teplotě zkušební aparatury i zkoušeného materiálu kolem 20 °C. I z tohoto důvodu pak získané výsledky charakterizují maximálně jen krátký

okamžik rozhořivání materiálu. Stále se hovoří o zkoušení textilií a fólií, kde typická zkouška trvá několik sekund nebo maximálně pár desítek sekund a za tuto dobu se vyvine jen velmi málo tepla.

Bylo již řečeno, že většinou se jedná o zkoušky materiálové, to znamená že se zkouší jisté reprezentativní vzorky materiálů. Co se ale bude dít, bude-li hořet určitá kombinace materiálů, nebo výrobek, jenž je tvořen kombinací různých materiálů a jenž má nějaké tvary a je nějak orientován v prostoru? Pak nám jsou výsledky malých materiálových testů, máme-li předpovědět průběh hoření materiálu ve větším měřítku, v mnoha ohledech k ničemu.

Malým metodám lze také vytknout omezení ze strany zapalovacích zdrojů a způsobů jejich aplikace. I zde je to dáno snahou o popis chování se materiálu v průběhu zapalování, případně časné fáze rozšiřování hoření. Nízké výkony zapalovacích zdrojů jsou v malých testech žádoucí často proto, abychom obdrželi výsledky typu „hoří“ a „nehoří“. Je zřejmé, že při vyšších výkonech zapalovacích zdrojů bychom obdrželi výsledek „nehoří“ u menšího počtu materiálů. Také by se mnohé metody staly méně „přesnými“ - zejména ty, u nichž se subjektivně sledují různé fenomény hoření, neboť všechny probíhající reakce by byly rychlejší.

Nedostatky laboratorních testů jsou tedy všeobecně známé. Je ovšem reálným a schůdnějším řešením pouze zvětšit rozměry vzorků materiálu, zvýšit energii zapalovacích zdrojů, umožnit variabilitu prostorového uspořádání zkoušky? Nakolik zůstanou takto získané výsledky reprezentativní a co budou reprezentovat, nakolik zůstanou opakovatelné a neztratí se rozlišitelnost? Zkusme hned na tyto otázky odpovědět. Zvětšit zkušební zařízení a umožnit zkoušet materiály větších rozměrů, zvýšit tepelné namáhání zkoušených materiálů lze celkem snadno. Ovšem tímto směrem se vývoj zkušebních metod neubírá. Přínos plynoucí z výsledků z takto modifikovaných zkušebních metod by nebyl adekvátní zvýšeným nákladům pořizovacím i provozním, a navíc by tyto výsledky stejně byly neporovnatelné s výsledky z původních testů. I když je pravděpodobné, že by porovnání výsledků mohlo být zajímavé. Ovšem právě ekonomická nevýhodnost takových úprav zkušebních metod směřuje požární výzkum a vývoj zkušebních metod k vyšší kvalitě. Je-li zkoušení ve větším měřítku dražší, musí mít výstupy z těchto měření vyšší užitnou hodnotu. Lze toho dosáhnout tím, že při jednom testu stanovujeme současně více charakteristik, a také že tyto charakteristiky nebudou mít statickou povahu, ale budou snímány a hodnoceny průběžně, po celou dobu trvání pokusu. Naznačené tendence jsou koneckonců zřejmé i z nejnovějších laboratorních testů - např. již uvedený kónický kalorimetr. Zavedení kónického kalorimetru do požárního zkušebnictví je vnímáno jako zásadní, a možná nejdůležitější mezník vývoje mnoha oborů požární vědy. Princip měření uvolňovaného tepla pomocí spotřeby kyslíku ovlivnil i vývoj metod pro zkoušení materiálů ve větším měřítku. Dalo by se říci, že teprve tento princip umožnil efektivní rozvoj velkorozměrového testování hořlavosti.

Do kategorie požárních testů ve větším měřítku je možno zařadit:

- **Pokojový test - ISO 9705**
- **Nábytkový test (*Furniture Calorimeter*)**
- **SBI test**
- **Kalorimetr středního měřítka (*Intermediate Scale Calorimeter*)**
- **Průmyslový kalorimetr (*Industry Calorimeter*)**
- **Test IMADOS**

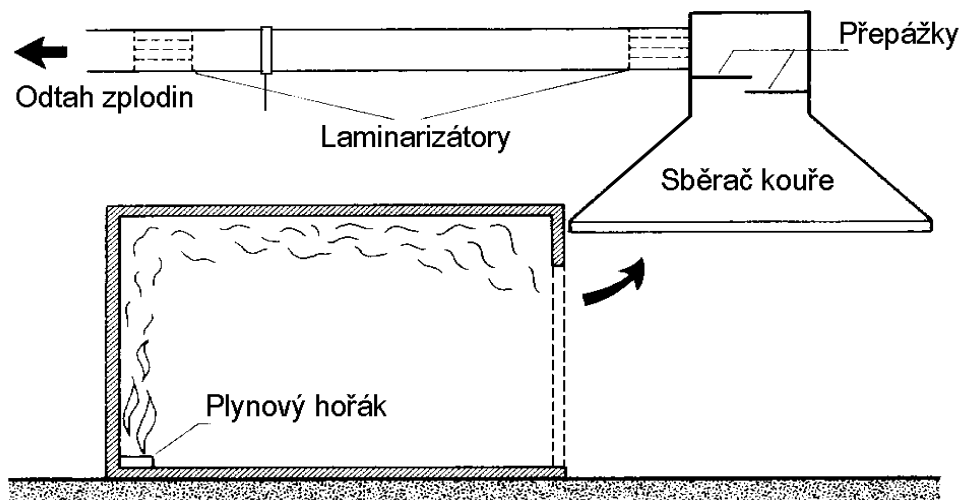
Existuje však celá řada dalších testů, které však nedoznaly většího rozšíření nebo jsou pouhými modifikacemi testů výše zmíněných, např. pokojového testu. S výjimkou IMADOS testu jsou všechny založeny na principu sledování vývoje tepla pomocí měření spotřebovaného kyslíku.

## 6.1 ISO 9705 - Rohový pokojový test

První návrh metody pro testování hořlavosti povrchových úprav stěn a stropů obytných interiérů byl publikován v r. 1982 jako materiál ASTM<sup>[76]</sup>. V roce 1984 Parker<sup>[77]</sup> zmíněný návrh podepřel preciznějším způsobem výpočtů. Tato metoda však nebyla nakonec jako standard ASTM přijata. ISO víceméně tento návrh akceptovala a v r. 1992 jej zavedla jako mezinárodní zkušební normu ISO 9705<sup>[75]</sup>.

Tato norma umožňuje sledovat volné hoření materiálů používaných k povrchovým úpravám a k obkladům stěn a stropů. Zkušební místnost má rozměry  $3,6 \times 2,4 \times 2,4$  metrů (obrázek 33). Uprostřed kratší stěny je dveřní otvor o rozměrech  $0,8 \times 2,0$  m (šířka  $\times$  výška). Nad tímto otvorem je umístěno sběrné zařízení pro jímání zplodin hoření. Půdorysné rozměry kouřového sběrače jsou  $3 \times 3$  m. Sběrač ústí do potrubí kruhového průřezu o průměru 400 mm.

Zkušební místnost je vystavěna z nehořlavých stavebních hmot s objemovou hmotností  $500 \div 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Tloušťka stěn je minimálně 20 mm.



Obr. 33 Schéma zkušebního zařízení podle ISO 9705

### Zkušební místnost je vybavena:

- zapalovacím propanovým hořákem (v rohu místnosti),
- termočlánky pro měření povrchových teplot stropu (6 ks),
- termočlánky pro měření vertikálního teplotního profilu spalných plynů (7 ks) - (v rohu za otvorem)
- radiometrem ve středu podlahy místnosti, snímajícím tepelný tok během měření

Průběh zkoušky se registruje videokamerou umístěnou před otvorem.

**Zapalovací hořák** V hořáku se spaluje propan, který poskytuje difúzní plamen. Hořák má tvar kvádrů se čtvercovým půdorysem, je vyplněn inertním zrnitým pórovitým materiálem. Do hořáku je zesodu přiváděn topný plyn, který se pórovitou hmotou rozvádí a z povrchu pak vystupuje v plošně homogenním proudu. Hořák na podlaze těsně přiléhá ke stěnám v rohu místnosti. Při zkoušce pracuje hořák prvních 10 minut s výkonem 100 kW, dalších 10 minut pak s výkonem 300 kW.

Norma připouští i alternativní zápalné zdroje - např. odpadkový koš se zmačkaným papírem (běžným kancelářským odpadem) a pod.

Povrchové teploty stěn se měří termočlánky. Záznam průběhu těchto teplot umožňuje sledovat rozvoj hoření ve zkušební místnosti a šíření plamene po stropě.

Teplotní profil prostředí ve vertikálním směru se měří termočlánky umístěnými v definovaných výškách nad podlahou ve vodorovné vzdálenosti 300 mm od stěn. Pro tato měření je nutno použít velmi tenké termočlánky, případně jiná teploměrná čidla s malou tepelnou setrvačností.

Tepelný tok na úrovni podlahy se měří neselektivním měřičem tepelného toku. Přestože největší podíl tepla dopadajícího na podlahu zkušební místnosti má charakter tepelného záření, nezanedbává se v tomto případě ani teplo přiváděné prouděním. Vhodná jsou čidla Gordonova nebo Schmidt-Boelterova typu, schopná registrovat tepelné toky kolem  $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Přijímací plocha čidla se zorným úhlem  $180^\circ$  má být maximálně 30 mm nad úrovní podlahy.

**Vzduchotechnický systém** Vzduchotechnika musí být kapacitně dimenzována tak, aby byla schopna odvést veškeré množství vznikajících zplodin hoření. Dá se předpokládat, že může vzniknout cca 4 kg zplodin za sekundu - přepočteno na normální atmosférické podmínky to znamená, že vzduchotechnika musí zajistit průtok  $12000 \text{ m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ . Díly vzduchotechniky musí být vyrobeny z nekorodujícího plechu a musí mít dostatečnou tuhost. Potrubí, napojené na sběrač kouře, je vybaveno:

- \* 2 laminarizátory proudění zplodin hoření,
- \* sondou pro odběr zplodin hoření,
- \* čidlem pro měření rychlosti proudění,
- \* termočlánkem pro měření teploty zplodin hoření a
- \* optickým systémem pro měření útlumu světla při průchodu kouřem.

Na konci potrubí je ventilátor, který nasává zplodiny hoření a kterým se také reguluje rychlost proudění.

Měření rychlosti proudění plynů je realizováno čidlem na principu Pittotovy trubice, je doporučena bidirekcionální sonda snímající rozdíl dynamického a statického tlaku vyvozeného proudícím plynným prostředím. Diferenční tlakoměr zapojený na čidlo musí mít přesnost  $\pm 5 \text{ Pa}$  a jeho měřicí rozsah musí být  $0 \div 2000 \text{ Pa}$ . Poblíž rychlostní sondy musí být umístěno teplotní čidlo (s dostatečně malou tepelnou setrvačností), ale tak aby nenarušovalo tlakové pole v okolí sondy.

Systém pro analýzu zplodin hoření V potrubí, ve vzdálenosti minimálně 100 mm za průtokoměrnou sondou, je umístěna sonda pro odběr plynných produktů hoření. Je tvořena přímou trubkou z nekorodujícího materiálu (např. PTFE) umístěnou kolmo na směr proudění a procházející horizontálně osou potrubí. Odběrová sonda je v délce 300 mm děrovaná (krajní otvory o průměru 3 mm jsou vzdálené od stěny potrubí 50 mm, ostatní otvory o  $\varnothing 2 \text{ mm}$  mají rozteč 10 mm), což umožňuje, pokud by se v horizontálním profilu proudění vyskytovaly koncentrační diference jednotlivých plynných složek, aby výsledný odebíraný vzorek byl průměrného složení. Zde však bych chtěl podotknout, že případná homogenita složení proudícího prostředí by se projevila spíše ve směru vertikálním, a to v důsledku rozdílné měrné hmotnosti složek. Připomeňme, že odběrní sonda u ISO 5660 má prstencový tvar.

Odebrané spalné plyny jsou dále filtrovány a ochlazovány, čímž jsou zbavovány tuhých částic a kondenzujících podílů včetně vodní páry. Dále jsou pak analyzovány na obsah  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  a  $\text{CO}_2$ . Jako vhodné analyzátory jsou doporučovány:

- pro kyslík - analyzátor na principu paramagnetismu  $\text{O}_2$  s přesností  $\pm 0,05 \text{ obj. \% O}_2$  a odezvou menší než 3 s,

- pro oxid uhelnatý a uhlíčitý - analyzátory na principu IČ-spektroskopie. Měřicí rozsah pro  $\text{CO} \ 0 \div 1 \%$  a  $\text{CO}_2 \ 0 \div 6 \%$  objemových s přesností  $\pm 0,02 \%$  pro CO a  $\pm 0,1 \%$  pro  $\text{CO}_2$ , s dobou odezvy max. 3 s pro oba analyzátory.

Dalšími analyzovanými složkami by mohly být uhlovodíky, oxidy dusíku, kyanovodík, chlorovodík a další.

Měření optické hustoty dýmu Pro měření propustnosti světla procházejícího vznikajícím dýmem je doporučováno zařízení tvořené:

- 2 objektivy o průměru 40 mm a ohniskové délce 50 mm - konstrukce nebo typ objektivu není uveden
- halogenová žárovka pro napětí 6 V a příkonu 10 W
- křemíková fotodioda opatřená filtrem, který propouští pouze tu část vyzařovaného spektra, na kterou je lidské oko nejcitlivější - žlutozelená oblast viditelné části spektra
- vyhodnocovací zařízení signálu fotodiody
- stabilizátor napětí pro napájení žárovky

Na potrubí jsou proti sobě namontovány vysílací část (světelný zdroj s objektivem) a přijímací část (objektiv, barevný filtr a fotodioda). Optická osa měřicího systému prochází osou potrubí a je na ni kolmá. V krytech, v nichž jsou obě části měřicího systému umístěny, musí být vytvořen určitý přetlak, aby vnější optické plochy nemohly být v kontaktu s kouřem nedocházelo k jejich znečišťování usazováním tuhých částic a kondenzátu. Jako vhodné je doporučováno technické řešení optického systému používané ve dvoukomorovém testu<sup>[78]</sup>.

V ISO 5660 je však uvažováno o optickém měření hustoty kouře, v němž jako zdroj světla je použitý laser. Podrobnější popis však není uveden. Výrobci zařízení podle ISO 5660 však běžně tyto laserové měřicí systémy dodávají.

Srovnáváme-li oba systémy, pak je dobré si uvědomit, že:

1. Laserové světlo je frekvenčně velmi přesně specifikováno vlnovou délkou záření. Barevný filtr neodfiltruje tak dokonale světlo halogenové žárovky. Samotná vlnová délka světla by neměla při měření vadit, avšak vzhledem k možným rozdílným vlastnostem záření - laserové zdroje emitují často polarizované záření - by se mohly uplatnit zcela jiné zákonitosti rozptylu záření a tím i obdržené výsledky měření by byly různé. Proto je nutno pro laserové měření volit zdroje nepolarizovaného světla.
2. Zdroje laserového záření emitují velice úzký svazek paprsků. Typický průměr svazku paprsků je udáván ve zlomcích milimetrů. Klasické světelné zdroje vyzařují světlo všesměrově. Toto světlo je pak optickými prvky (zrcadly, čočkami) soustředováno do kruhového svazku rovnoběžných paprsků s typickým průměrem řádově v centimetrech.

Bude-li proudící hmota kouře dostatečně homogenizována a proudění bude laminární, nebude tato skutečnost ovlivňovat úroveň signálu na výstupu fotodiody. Při nedostatečné homogenitě proudící směsi v potrubí bude hodnota signálu na výstupu fotodiody velmi kolísavá. Má-li měřicí svazek paprsků větší průměr, pak je případná nehomogenita prostředí, jímž světlo prochází samovolně více kompenzována. Tato skutečnost může ovlivnit okamžitě hodnoty parametrů kouře (není-li u laserových zdrojů elektronicky kompenzována), na hodnoty parametrů kouře získávané integrací významný vliv nemá.



## Kalibrace a měření

### Kalibrace uvolňovaného tepla

Vzhledem k tomu, že na rozdíl od ISO 5660 je u této metody používán plamenný zapalovací zdroj, je nutno provést kalibraci měřicího systému spotřeby kyslíku.

Při kalibraci je propanový hořák umístěn přímo pod sběračem dýmu. Systém se kalibruje při tepelném výkonu hořáku 100 a 300 kW. Tepelný výkon hořáku se vypočte ze vztahu:

$$\dot{q}_b = \dot{m}_b \Delta h_{c,eff}$$

kde  $\dot{q}_b$  - je rychlost uvolňování tepla v hořáku [kW]  
 $\dot{m}_b$  - je hmotností průtok propanu hořákem [g.s<sup>-1</sup>]  
 $\Delta h_{c,eff}$  - je spalné teplo propanu - dosazuje se hodnota 46,4 [kJ.g<sup>-1</sup>]

### Odezva systému

Zjišťuje se časové zpoždění v systému, které vzniká při transportu zplodin hoření z místa vzniku k měřicím systémům zařízení. Časové zpoždění se stanovuje předepsaným postupem pomocí plynového hořáku při různých úrovních tepelných výkonů: 0 kW, 100 kW, 300 kW, 100 kW a 0 kW. Časové zpoždění se odečítá, dosáhne-li sledovaná hodnota úrovně 10 % nižší, než je konečný stav. Časové zpoždění nemá být větší než 20 s.

Zjišťuje se také odezva systému na různé objemové průtoky potrubím. Při tomto měření se sledují změny hodnoty rychlosti vývinu tepla při průtocích 2,5, 3 a 3,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> za současného působení hořáku nastaveného na výkon 300 kW. Odchylky zjištěné hodnoty HRR nemají být větší než 10 % od nominální hodnoty tepla dodávaného hořákem.

### Postup měření

- Zkušební místnost se vybaví zkoušeným materiálem. Ten se aplikuje tak, jak se předpokládá jeho použití v běžné stavbě. Na sledovaný povrch stěn, příp. stropu, se namaluje čtvercová síť s modulem 0,3 m, s počátkem v zapalovaném rohu místnosti.
- Záznamové a měřicí přístroje se zapnou a všechna data se zapisují minimálně po dobu jedné minuty před zahájením měření.
- Vlastní test začíná zapálením plynového hořáku.
- Zaznamenávají se všechny významné momenty zkoušky, především:
  - čas do zapálení stěn, stropu
  - šíření plamene po povrchu stěn a stropu
  - čas změny výstupního výkonu hořáku
  - pohyby spodní vrstvy kouře
  - výšlehy plamene z dveřního otvoru
  - chování se zkoušeného materiálu: stékání, deformace, odpadávání atd.
- Za normálních okolností trvá zkouška 20 minut, nebo méně, nastane-li *flash-over*. Poté se při vypnutém hořáku dále pozoruje zkušební místnost a zaznamenává se aktuální situace.

### Prezentace výsledků zkoušky

Výsledky zkoušky jsou prezentovány dvěma způsoby. Jednak v dynamické podobě, jako řada okamžitých hodnot v závislosti na čase, a také jako statické údaje, často jako sumární hodnoty získané integrací průběhů hodnot předchozích. Okamžité hodnoty mohou být ve tvaru nume-

rickém - tabulky na papíru nebo v souboru ve vhodném formátu na vhodném paměťovém médiu a nebo v podobě grafu.

Výsledky dynamického charakteru:

- a) časový průběh naměřené hustoty tepelného toku v centru podlahy
- b) časový průběh průtoku potrubím
- c) časový průběh rychlosti uvolňování tepla
- d) časový průběh uvolňování oxidu uhelnatého
- e) časový průběh uvolňování oxidu uhličitého
- f) časový průběh měřené optické hustoty kouře

Tyto výsledky mohou být doplněny dalšími nepovinnými:

- g) časový průběh povrchových teplot stěn
- h) časový průběh teplotního profilu ve vertikálním směru
- i) časový průběh hmotnostního toku dveřním otvorem
- j) časový průběh konvektivního tepelného toku dveřním otvorem
- k) časový záznam vývinu uhlovodíků, chlorovodíku, oxidů dusíku, kyanovodíku, případně dalších plynných produktů

Výsledky statického charakteru:

- a) doba do okamžiku prostorového vzplanutí (flash-over) [s]
- b) celkové uvolněné teplo [MJ]
- c) maximální rychlost uvolňování tepla [kW]
- d) průměrná rychlost uvolňování tepla [kW]
- e) maximální hodnota produkce kouře [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- f) průměrná hodnota produkce kouře [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- g) celková produkce CO [g]
- h) celková produkce CO<sub>2</sub> [g]
- i) i ...x) celkové výtěžky dalších analyzovaných plynů [g]

Tyto hodnotové výstupy jsou doplněny popisem průběhu zkoušky doloženým fotodokumentací a/nebo videozáznamem.

*NORDTEST method NT FIRE 025 (ISO 9705:1993)* umožňuje klasifikovat zkoušené materiály na základě obdržených hodnot významných charakteristik<sup>[79]</sup> - tabulka 16

Klasifikačních tříd je 5, A (materiály nejméně nebezpečné) až E (materiály nejnebezpečnější).

Třída	Doba do flash-over [s]	Rychlost uvolňování tepla [kW]		Množství uvolněného kouře [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	
		Maximum	Ø hodnota	Maximum	Ø hodnota
<b>A</b>	20	300	50	2,3	0,7
<b>B</b>	20	700	100	16,1	1,2
<b>C</b>	12	700	100	16,1	1,2
<b>D</b>	10	900	100	16,1	1,2
<b>E</b>	2	900	-	16,1	-

**Tab. 16 Kritéria NORDTEST pro třídění materiálů podle výsledků pokojového testu**

Z výsledků naměřených podle ISO 9705 vychází i IMO ve svých kritériích pro výběr materiálů pro použití při konstrukcích lodí [79].

### Výpočty

a) Objemový průtok, vztažený na atmosférický tlak a teplotu 25 °C, se vypočte ze vztahu

$$\dot{V}_{298} = 22,4 \left( Ak_t / k_p \right) \left( \Delta p / T_s \right)^{1/2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

kde: A- je plocha průřezu potrubí [m<sup>2</sup>]

k<sub>t</sub>- je poměr průměrného hmotnostního průtoku jednotkou plochy k hmotnostnímu průtoku jednotkou plochy v ose potrubí [-]

k<sub>p</sub>- je korekční faktor na charakter proudění v potrubí. Je-li Reynoldsovo číslo větší než 3800, má k<sub>p</sub> hodnotu 1.08 [-]

Δp- je tlakový rozdíl naměřený na bidirekcionální sondě [Pa]

T<sub>s</sub>- je teplota proudícího plynu [K]

b) Rychlost vývinu tepla ze zkoušeného materiálu se vypočítá ze vztahu:

$$\dot{q} = E^1 \dot{V}_{298} X_{O_2}^a \left[ \frac{\Phi}{\Phi(\alpha-1)+1} \right] - \frac{E^1}{E_{C_3H_8}} \cdot \dot{q}_b,$$

kde: Φ - je faktor úbytku kyslíku, je dán vztahem:

$$\Phi = \frac{X_{O_2}^0 (1 - X_{CO_2}) - X_{O_2} (1 - X_{CO_2}^0)}{X_{O_2}^0 (1 - X_{CO_2} - X_{O_2})}$$

Molární zlomek kyslíku v okolním prostředí je dán vztahem

$$X_{O_2}^a = X_{O_2}^0 (1 - X_{H_2O}^0),$$

X<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>a</sup> by měl být stanoven před odstraněním vody (vysušením) analyzované směsi plynů.

$\dot{q}$  - je rychlost uvolňování tepla [kW]

E<sup>1</sup> - je teplo uvolněné přispěním jednotky objemu spotřebovaného kyslíku

E<sup>1</sup> = 17,2.10<sup>3</sup> kW.m<sup>-3</sup> při hoření zkoušeného materiálu

E<sub>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></sub> = 16,8.10<sup>3</sup> kW.m<sup>-3</sup> - při hoření propanu

α - je expanzní faktor zohledňující chemické reakce vzduchu ochuzeného o O<sub>2</sub>

α = 1,105 - při hoření testovaných materiálů

X<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>a</sup> - je molární zlomek kyslíku ve vlhkém okolním vzduchu

X<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>0</sup> - je výchozí hodnota (molární zlomek) odečtená na analyzátoru kyslíku

X<sub>O<sub>2</sub></sub> - je údaj analyzátoru kyslíku během měření (molární zlomek)

X<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>b</sup> - je základní výchozí hodnota odečtená na analyzátoru CO<sub>2</sub> (molární zlomek)

X<sub>CO<sub>2</sub></sub> - je údaj analyzátoru CO<sub>2</sub> během měření (molární zlomek)

c) Propustnost světla. Optická hustota prostředí je reprezentována extinkčním koeficientem, který se vypočítá ze vztahu

$$k = \frac{1}{L} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad [\text{m}^{-1}]$$

kde  $I_0$  - je intenzita světla procházející nezakouřeným prostředím  
 $I$  - je intenzita světla prošlá zakouřeným prostředím  
 $L$  - je délka paprsku procházejícího zakouřeným prostředím (tloušťka vrstvy kouře)

Z tohoto vztahu se vypočítá okamžitá míra útlumu světla kouřem  $R_{inst}$  a celkové množství kouře  $R_{tot}$ .

$$R_{inst} = k \cdot \dot{V}_s \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$R_{tot} = \int_0^t k \dot{V}_s \cdot dt \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

kde  $\dot{V}_s$  - je objemový průtok potrubím při aktuální teplotě protékajících plynů  
 $t$  - je doba od zapálení hořáku

## Diskuse

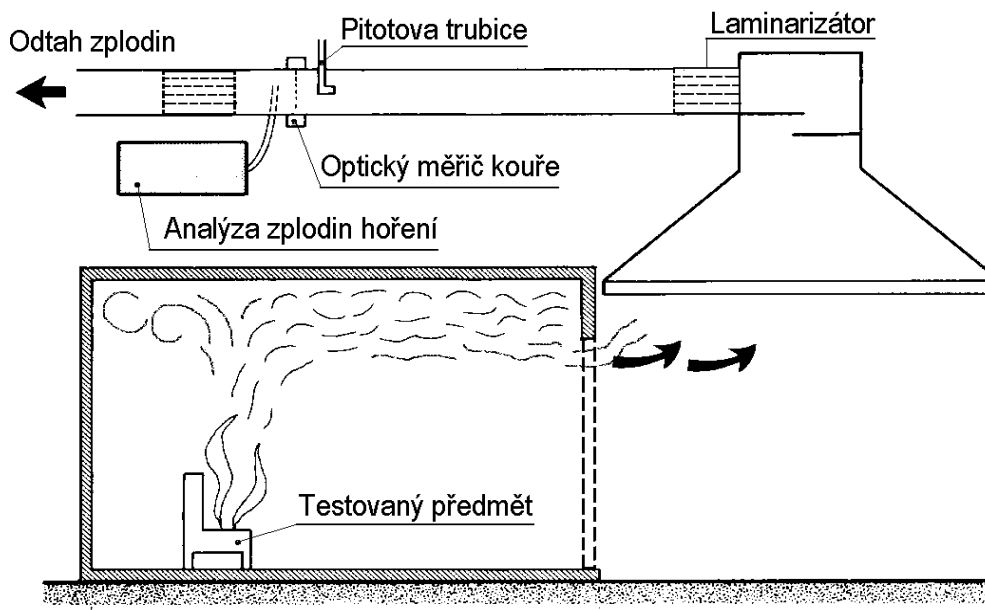
Tato zkušební metoda poskytuje velmi hodnotné výstupní údaje. Je to především průběh okamžité hodnoty uvolňovaného tepla, průběh hustoty tepelného toku v úrovni podlahy zkušební místnosti a průběh vývoje kouře. Velice významné jsou i údaje popisující postup šíření plamene. V tomto směru jsme však odkázáni jen na vizuální pozorování, resp. fotografickou dokumentaci a/nebo videozáznam. Možnosti pozorovat šíření plamene po povrchu stropu jsou omezené v důsledku hromadění kouře v prostoru nad úrovní horní hrany dveřního otvoru.

V případě, že je rozvoj plochy hoření v průběhu zkoušky dobře zdokumentován, bylo by možno dále precizovat obraz uvolňování tepla i kouře prezentací dat v podobě „efektivních“ okamžitých hodnot přepočtených na plochu a nebo i na přírůstek hořící plochy v čase.

V porovnání s ISO 5660 zde není možno sledovat změnu hmotnosti zkoušeného materiálu. Chybí zde tedy možnost získat informace vztažené k měnícímu se složení studovaného materiálu během jeho postupné degradace.

## 6.2 Nábytkové kalorimetry

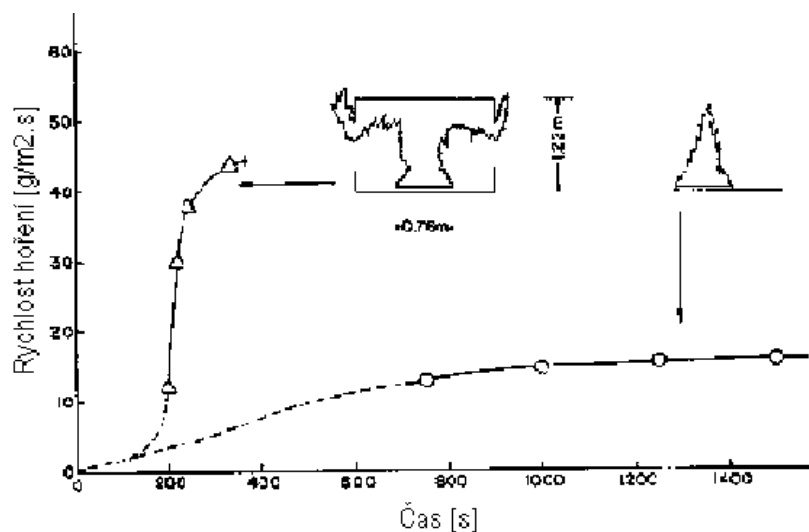
ISO 9705 poskytuje možnost studovat především rozvoj požáru hořlavých stěn a stropů. Toto zkušební zařízení je však možné využít jako univerzální velkorozměrový kalorimetr a provádět v něm zkoušky hořlavosti běžných hořlavých hmot a výrobků - i těch, které neslouží k obkladům stěn. Byly provedeny zkoušky s různými typy hořlavých výrobků používaných při vybavování běžných obytných interiérů. Největší pozornost je zaměřena na čalounické výrobky - židle, křesla, pohovky, matrace atd. Pracoviště specializující se právě na zkoušení čalounického zboží vyvinuly pro tento účel zkušební metody a zařízení - různé typy nábytkových kalorimetrů. Některé byly již zpracovány do podoby technických norem <sup>[80, 81, 82, 83]</sup>.



Obr. 34 Nábytkový kalorimetr

Varianta nábytkového kalorimetru, používající nezměněné zařízení ISO 9705 je na obrázku 34. Stejně jako u pokojového testu není ani zde použito vážní zařízení pro sledování hmotnosti hořlavé hmoty. Rozměry, tvar a vybavení systému pro sběr a odvod zplodin hoření je u obou zařízení identické. V jiných variantách nábytkového kalorimetru je z ISO 9705 použita pouze vzduchotechnická část zařízení. Hoření v tomto případě probíhá na volném prostranství a zkoušený předmět je obvykle umístěn na vážním zařízení. Snímaný úbytek hmotnosti zkoušeného vzorku umožňuje vyhodnocování jeho efektivní výhřevnosti. Tento typ nábytkového kalorimetru nezvěme otevřeným. V otevřeném nábytkovém kalorimetru sice neprobíhá hoření zkoušeného objektu pod širým nebem, přesto však je (vzhledem k pokojovému nábytkovému kalorimetru) prostor kolem hořícího vzorku daleko volnější. Uvedená skutečnost může mít jistý vliv na průběh hoření. Drysdale<sup>[11]</sup> uvádí příklad hoření desek polymethylmetakrylátu v polozavřeném prostoru a na volném prostranství. Na obrázku 35 je dokumentována rychlost odhořívání PMMA v obou variantách. Vyšší rychlost odhořívání materiálu v omezeném prostoru

je možno vysvětlit lepším přívodem oxidačního prostředí do oxidační zóny plamene a především zvýšením zpětného tepelného toku na povrch hořícího materiálu. V tomto konkrétním případě je však nutno připomenout, že polymethylmetakrylát hoří téměř bez vývoje kouře, což u hoření plastů je dost netypické. Množství, barva a další fyzikální vlastnosti kouře významně ovlivňují hustotu tepel-



Obr. 35 Rychlost hoření desky PMMA (Friedman, 1975<sup>[84]</sup>)

ného toku dopadajícího na povrch hořícího materiálu, přičemž rychlost rozkladu materiálu je obecně přímo úměrná dodávané energii. Navíc Friedman svá měření prováděl v prostoru půdorysně i na výšku značně menším, než je u pokojového testu, tudíž i zpětný tepelný tok byl vyšší než v případě hoření ve větším prostoru vymezeném zkušební místností ISO. Tyto skutečnosti naznačují, že při vzájemném porovnávání výsledků získaných z pokojového a otevřeného nábytkového kalorimetru je namístě obezřetnost. Případné rozdíly ve výsledcích získaných z obou kalorimetrů budou závislé na materiálech (jejich skladbě a množství), z nichž jsou testované vzorky vyrobeny. Výsledky měření na různých typech nábytkových kalorimetrů byly publikovány např. [85 a 88].

V rámci výzkumných projektů probíhá rozsáhlé testování čalouněného nábytku. V USA tyto práce koordinuje *National Institute for Standards and Technology* (NIST) ve dvou samostatných projektech [86 a 87]. V Evropě se velkorozměrovým požárním testům věnuje velká pozornost zejména ve Velké Británii a ve Švédsku. V posledních letech se problematikou hořlavosti čalouněného nábytku intenzivně zabývá i Evropské společenství. Evropský projekt zahájený v r. 1993 se nazývá *Combustion Behaviour of Upholstered Furniture (CBUF Project)* [89]. Podílelo se na něm 11 institucí z 8 států: 4 z Velké Británie a po jedné z Belgie, Dánska, Finska, Francie, Itálie a Německa.

### 6.2.1 Projekt CBUF

CBUF je jedním v nejrozsáhlejších projektů, které se kdy realizovaly v oblasti požárního výzkumu. Mimo vlastního testování (kónický kalorimetr, nábytkový kalorimetr a pokojový test), při němž se zjišťují parametry hořlavosti, se pozornost zaměřuje i na studium složení a toxicitu požárních plynů. Mimoto se velice intenzivně pracuje na vylepšování zkušebních postupů při testování ve velkém i malém měřítku. Výsledky a zkušenosti jsou využívány pro další vylepšování matematických modelů požáru a v návaznosti na ně i analýzy rizika. Dosažené výsledky je možno shrnout do následujících bodů [90, 91]:

- Výška a poloha vrstvy kouře v místnosti je vhodným ukazatelem pro posouzení možnosti přežití osob při požáru. Polohu vrstvy kouře lze odvodit z rychlosti uvolňování tepla (HRR). Je proto možno říct, že stanovení kouře a toxických plynů není nezbytně nutné.
- Hodnoty HRR lze stanovit na kónickém kalorimetru. Byly vyhotoveny celkem tři modely hoření v různých měřítkách, na nichž byly korelace hodnot HRR ze zkoušek v malém a velkém měřítku prokázány. Z toho plyne, že provádění zkoušek ve velkém měřítku není pro předpověď průběhu hoření nezbytná.
- Vymezení průběhu hoření může být založeno na testování malých vzorků, a to jak jednotlivých materiálů (potahy, čalounické výplně, různé vložky a pod.), tak i reprezentativních kombinovaných sestav těchto materiálů v jednom vzorku. Aby bylo možno provést výsledky malých zkoušek na průběh hoření kusu nábytku, byly zavedeny různé korekční výpočetní faktory zohledňující např. materiál nosné konstrukce (nehořlavé, dřevěné, plastové atd.), množství hořlavých hmot a pod. pro různé typy čalouněného nábytku (čalouněná židle, křeslo, gauč, postel atd.).
- Byly vyvinuty a ověřeny zkušební postupy pro měření toxických plynů. Jako vhodné postupy pro tyto účely byly vybrány: ionová chromatografie spolu s FTIR (*Fourier Transformation Infrared*) analýzou.
- Zvolené testovací podmínky byly shledány, že jsou v dobré shodě s podmínkami při velkorozměrovém tepelném namáhání. Způsob testování byl důkladně prověřen v mezilaboratorních okruhových zkouškách. Reprodukovatelnost a opakovatelnost testů je velmi dobrá a zcela akceptovatelná.

- Byla vytvořena databáze s údaji o rychlosti uvolňování tepla, důležitých teplotách a tepelných tocích, hustotě a množství kouře, obsahu toxických látek (např. CO, CO<sub>2</sub>, HCN, HCl, HBr, NO<sub>x</sub>) z více než 1500 testovaných kusů nábytku a materiálů.

### **Praktické výstupy z projektu CBUF**

Provedené zkoušky umožnily nábytek rozdělit podle rychlosti rozvoje hoření a s ním spojeného vývoje tepla na kusy bezpečnější a méně bezpečné.

V tabulce 17 jsou uvedeny jednotlivé kategorie odvozené z velikosti maximální hodnoty HRR, resp. času dosažení maximální hodnoty HRR.

Kategorie	Úroveň poskytované bezpečnosti	Hořlavost nábytku	Rozhodující hodnoty
I	Měl by být bezpečný ve většině variant uspořádání místnosti.	Nerozšiřuje hoření	Max. HRR ≤ 100kW
II	Měl by být bezpečný ve specifických variantách uspořádání místnosti.	Velikost požáru je menší než akceptovatelná pro určitou konfiguraci místnosti.	Max. HRR ≤ x kW
III	Měl by být bezpečný ve specifických variantách uspořádání místnosti po určitou dobu trvání požáru.	Velikost požáru je menší než akceptovatelná po určitou dobu, která závisí na uspořádání místnosti.	Max. HRR ≤ x kW, stanovená doba ≤ t sec

**Tab. 17 Kategorie bezpečnosti jednotlivých kusů čalouněného nábytku**

Hodnota x v posledním sloupci tabulky závisí na variantách uspořádání hořlavých hmot v místnosti a hodnota t na požadované bezpečné době, která je opět závislá na zvoleném uspořádání místnosti.

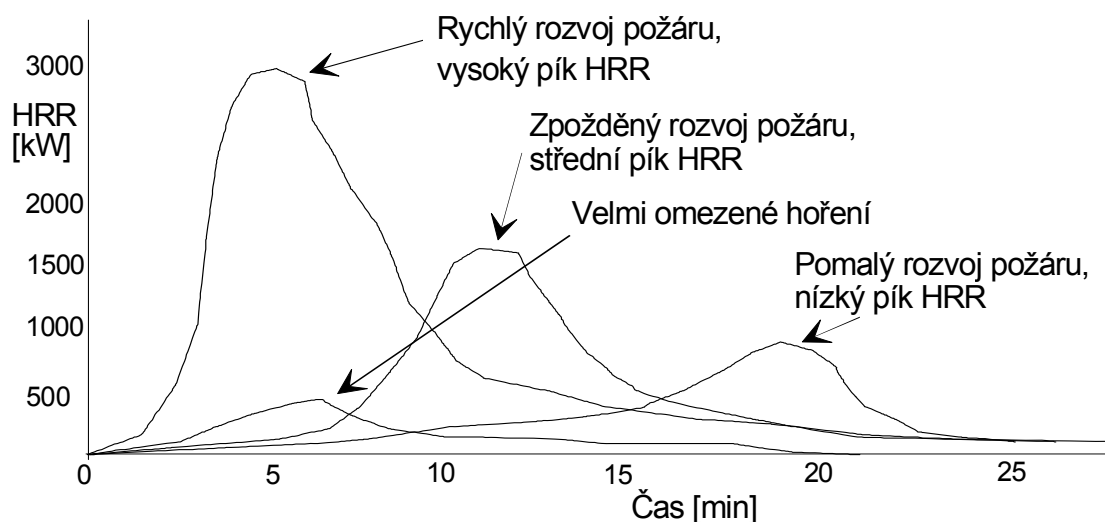
Dalším hodnotícím kritériem průběhu hoření čalouněného nábytku je index FIGRA (*The Fire Growth Rate Index*). Je obecný souhlas v tom, že:

- 1) Intenzivní hoření je nebezpečnější než mírný průběh hoření.
- 2) Rychlý rozvoj intenzity hoření je nebezpečnější než pomalý rozvoj.

Z těchto předpokladů je výpočet indexu FIGRA zřejmý, rovná se podílu hodnot maxima HRR a času dosažení tohoto maxima - jeho rozměr je: kW.s<sup>-1</sup>.

Na základě průběhu HRR byly stanoveny 4 typické průběhy hoření (obrázek 36):

- Rychlý rozvoj hoření s vysokou maximální hodnotou HRR      FIGRA = 15 ÷ 20
- Opožděný rozvoj hoření se střední hodnotou maxima HRR      FIGRA = 3 ÷ 5
- Pomalý rozvoj hoření s nízkou maximální hodnotou HRR      FIGRA = 0,4 ÷ 1



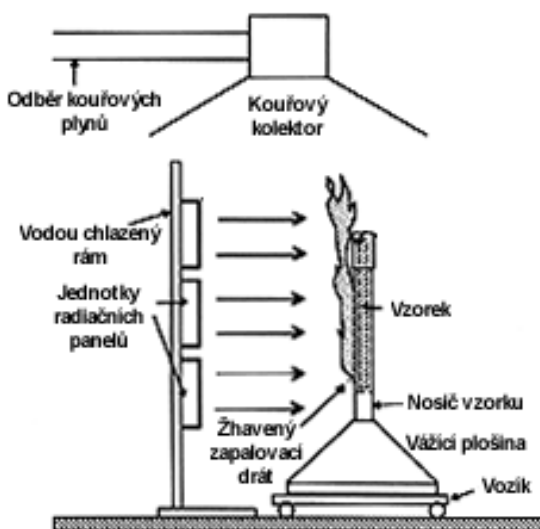
Obr. 36 Klasifikace průběhu hoření podle CBUF

### 6.3 Kalorimetry středního měřítka

Tak nějak snad mohu nazvat zkušební zařízení *The Intermediate Scale Calorimeter* (ICAL), který byl vyvinut pro zkoušky hořlavosti plošných stavebních konstrukcí - především stěn. Zatímco *Room Corner Test* slouží pouze pro hodnocení hořlavosti hořlavých povrchových úprav stěn a nepředpokládá se, že samotné konstrukce stěny jsou hořlavé, ICAL umožňuje stanovit identické hořlavostní parametry a pro hořlavé konstrukce stěn. Ovšem na rozdíl od pokojového testu hodnotí pouze vzorek stěny s definovanými rozměry.

#### Popis zařízení a zkušební postupu

Rozměry zkoušeného vzorku se liší podle konstrukce ICAL, rozdíly jsou také v použitém zápalném zdroji. Společné zařízením ICAL je celkové uspořádání experimentu. V držáku umístěném na vážném zařízení je uchycen ve svislé poloze vzorek stěnové konstrukce, zkoušená stěna je zahřívána plochým tepelně radiačním zdrojem. Ten může být vyhříván plynem, nebo je sestaven z elektrických odporových elementů. Tepelný tok dopadající na povrch studovaného materiálu je maximálně  $35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . U dolní hrany je umístěn přídavný plynový hořák sloužící k zapálení plyných produktů pyrolýzy. Toto řešení zapalování však prakticky neumožňuje stanovení rychlosti postupu plamene, neboť je velice rychlé. Pokud jsou pyrolýzní plyny produkovány u spodní hrany vzorku zapalitelné, potom jsou v dostatečném množství produkovány i z ostatní exponované plochy. Proto dochází k téměř okamžitému rozšíření plamenného hoření na celou plochu. Alterna-



Obr. 37 Schéma uspořádání zařízení ICAL



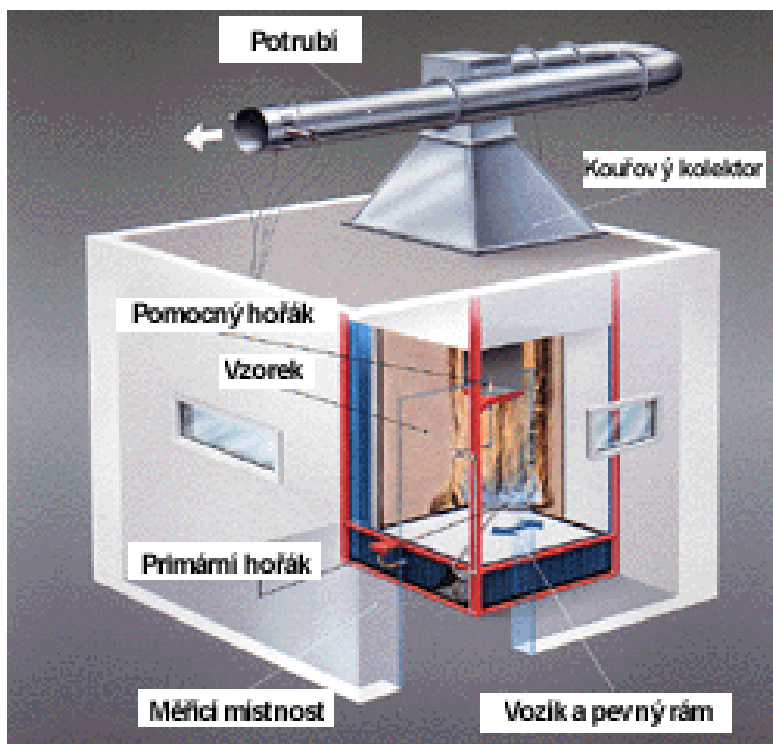
tivní uspořádání hoření zkoušeli ve *Western Fire Center v Kelso (WA)*, kde umístili zpočátku plynový hořák nad horní hranu vzorku. Postup plamene ve směru shora dolů by měl být podle všech předpokladů pomalejší. Ovšem toto řešení se neosvědčilo, neboť často stoupající termický proud vzduchu měl takovou rychlost, že zapalovací plamen hořáku sfoukl. Zplodiny hoření jsou nasávány a odváděny systémem popsáním v ISO 9705. Systém měření a vyhodnocování výsledků je obdobný jako u kónického kalorimetru, resp. ISO 9705. Opět jde tedy o variantu kalorimetru pracující na principu měření vývoje tepla na základě spotřeby kyslíku. Na obrázku 37 je schematický náčrt zařízení ICAL z *Western Fire Center* [92]. Porovnání výsledků z klasického kónického kalorimetru a japonského ICAL s elektricky vyhřívaným radiačním panelem je uveden v [93].

## 6.4 Single Burning Item Test - prEN 13823

SBI test, česky by se dalo říci „test jednoduché hořící jednotky“, je další zkušební metodou, která vychází z principu stanovení produkovaného tepla na základě stanovované spotřeby kyslíku během zkoušky. SBI test byl vyvinut CEN/TC 127 jako kompromisní řešení zkušební metody vhodné pro posuzování hořlavosti stavebních materiálů v rámci zemí Evropské unie [94]. Mnohaleté diskuse a spory, v nichž hrály velký význam ekonomické zájmy jednotlivých členských zemí, které se snažily prosadit své zaběhnuté národní standardy. Jednalo se zejména na Německo a jeho DIN 4102. Při všeobecném respektu k propracovanému systému německých norem je nutno současně zdůraznit, že právě zmíněná DIN je již dosti zastaralá. Je nutno uvítat přijaté kompromisní řešení, tedy úplně novou zkušební metodu, která vychází z aktuálních principů a požadavků moderních postupů zkoušení hořlavosti. Zcela nová zkušební metoda nezvýhodňuje žádnou ze zúčastněných zemí a navíc doplňuje mezinárodně přijaté zkušební postupy.

### Popis zkušebního zařízení

Během zkušebního provozu došlo k některým změnám v konstrukci zařízení. Je pravděpodobné, že současný návrh konstrukčního řešení je v této fázi konečný. Testovací aparatura sestává z několika celků: zkušební místnosti, vlastního SBI zařízení (zkušební plošina - vozík, rám, hořáky, kolektor kouřových zplodin a potrubí s nasávacím ventilátorem), systém rozvodu propanu, systém odvodu kouře a obecné měřicí a jiné přístroje. Jednotlivé části jsou podrobněji popsány dále. Schematický pohled na zkušební zařízení SBI je na obrázku 38.



Obr. 38 Uspořádání SBI testu

Zkušební místnost má čtvercový půdorys  $3 \times 3$  m (vnitřní rozměry) a výšku 2,4 m měřenou od roviny horní plochy rámu. Je vybudována z nehořlavých tepelně izolačních materiálů (pórobeton, sádrové desky, vláknité desky). Jedna ze stěn je opatřena otvorem pro

zavážení vozíku se zkoušeným materiálem o rozměrech minimálně 1470 × 2450 mm (šířka × výška). V ostatních stěnách jsou okénka, která umožňují sledovat probíhající zkoušku.

### **Vybavení zkušební místnosti:**

- Vozík (zkušební plošina) slouží k umístění vzorku zkoušeného materiálu do pozice, v níž je testován a současně umožňuje přípravu vzorku mimo stísněného prostoru zkušební místnosti. Horní plocha vozíku je tvořena děrovanou deskou. To umožňuje lepší přístup vzduchu ke zkoušenému materiálu, který je na vozíku připevněn. Součástí vozíku je i hlavní zapalovací propanový hořák.
- Pevný rám slouží k zavážení vozíku se zkoušeným materiálem do definované polohy a současně podepírá zvon pro jímání kouřových zplodin. K rámu je také připevněn sekundární (kalibrační) plynový hořák.
- Na sběrný zvon ve tvaru čtyřbokého komolého jehlanu je nahoře napojeno horizontální potrubí o vnitřním průměru 315 mm, které je na vnějším povrchu izolováno 50 mm minerální vlny. Toto potrubí má několik částí (ve směru proudění):
  - napojení na kolektor kouře
  - potrubí o délce 500 mm, v němž jsou ve vzdálenosti 400 mm umístěny 4 termočlánky (sekce pro měření teploty spalin)
  - potrubí 1000 mm dlouhé
  - 2 kusy 90° potrubní kolena (poloměr zakřivení v ose potrubí je 400 mm)
  - potrubí délky 1625 mm s laminarizátory proudění
  - potrubí délky 2155 mm s namontovanou bidirekcionální tlakovou sondou, 4 termočlánky, sondou pro odběr kouřových zplodin a se systémem pro optické měření hustoty kouře. Tato sekce se nazývá obecná měřicí sekce - *General measurement section*
  - potrubí délky 500 mm
  - napojení na odsávací ventilátor
- Hořáky - primární (hlavní) i sekundární (pomocný) hořák jsou typu „sandbox“. Bližší popis je uveden v kapitole věnované ISO 9705. Oba hořáky jsou shodné, mají půdorys ve tvaru rovnoramenného pravoúhlého trojúhelníku s délkou odvěsen 250 mm, výška hořáku je 80 mm. Hlavní hořák je namontován na vozíku v horizontální poloze v místě styku obou částí zkušební vzorku (viz dále popis zkušební vzorku). Pomocný hořák je upevněn na rámu ve výšce 1450 mm nad úroveň podlahy. Pomocný hořák slouží ke kalibraci zkušebního zařízení. Průtok plynu (propanu) je kontrolován průtokoměrem. Průtok propanu ( $2,3 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ) odpovídá tepelnému výkonu hořáku 105-110 kW. Hořáky jsou vybaveny zapalovacím zařízením (pomocný plynový hořáček, elektricky žhavený drát).
- Odsávací vzduchotechnika je navržena tak, aby za normálních podmínek zajistila průtok  $0.5 \div 0.65 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost proudění musí být v tomto rozsahu měřitelná s přesností  $0.05 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . To zajišťuje bidirekcionální tlaková sonda napojená na diferenční tlakoměr o rozsahu  $0 \div 200 \text{ Pa}$  s přesností  $\pm 2 \text{ Pa}$ .
- Analýza zplodin hoření. Na sondu pro odběr plynu je připojeno technologické zařízení na úpravu a kondicionování směsi spalných plynů. Na výstupu jsou potom připojeny analyzátory pro měření obsahu kyslíku a oxidu uhličitého.
  - Analyzátor  $\text{O}_2$  - je doporučen paramagnetický princip měření s měřicím rozsahem  $0 \div 21 \text{ \% O}_2$  s přesností minimálně 0.05 % s dobou odezvy max. 12 s a driftem výstupní hodnoty spolu s šumem analyzátoru menším než 0.01 % v průběhu 30 minut.
  - Analyzátor  $\text{CO}_2$  - je doporučen infračervený spektrometrický analyzátor pracující v rozsahu  $0 \div 10 \text{ \% CO}_2$  s přesností minimálně 0.1 % s linearitou 1 % z celého rozsahu a s dobou odezvy maximálně do 12 sekund.

- Měření hustoty kouře je realizováno na principu měření útlumu procházejícího světla. Je doporučeno používat typ pracující s bílým světlem, nikoli tedy s laserovým zdrojem světla.
- Další měřicí přístroje a zařízení
  - Termočlánky. Všechny používané termočlánky by měly být typu K
  - Absolutní tlakoměr pro měření barometrického tlaku vzduchu
  - Vlhkoměr pro měření relativní vlhkosti vzduchu s přesností  $\pm 1\%$  v rozsahu  $20 \div 80\%$
  - Systém pro sběr dat musí zajistit registraci a uložení měřených hodnot s přesností:
    - pro obsah kyslíku lepší než  $0.005\%$ ,
    - pro obsah  $\text{CO}_2$  - lepší než  $0.01\%$ ,
    - pro měření teplot -  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,
    - pro ostatní měření -  $0.01\%$  z rozsahu výstupní škály měřicího přístroje a pro záznam času -  $0.1\%$

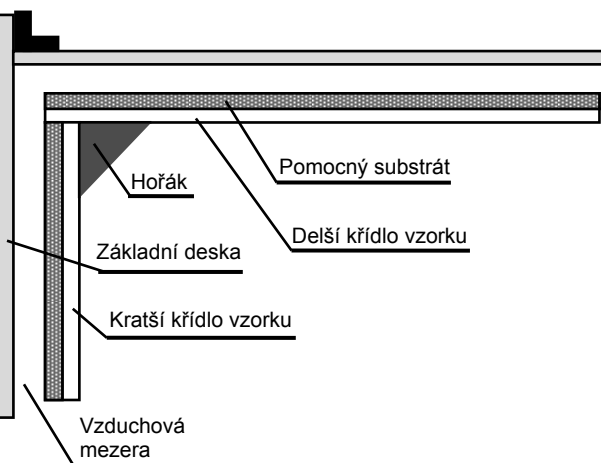
Data jsou ukládána v intervalu ne delším než 3 sekundy. Jsou registrovány tyto údaje:

- a) čas v sekundách,
- b) hmotnostní průtok propanu v  $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- c) tlaková diference v Pa,
- d) relativní intenzita světla (bezrozměrná veličina),
- e) koncentrace kyslíku v  $(V_{\text{O}_2}/V_{\text{vzduch}})\%$ ,
- f) koncentrace  $\text{CO}_2$  v  $(V_{\text{CO}_2}/V_{\text{vzduch}})\%$ ,
- g) teplota vzduchu pod vozíkem v K a
- h) 2 teplotní údaje ve vzduchovém potrubí v K.

### Testovací vzorky

Zkoušený materiál se připraví do velikosti a tvaru zkušební vzorku. Ten je sestaven ze 2 částí (křídel), která svírají pravý úhel - tvoří rohové uspořádání stěn. Výška obou křídel je stejná - 1500 mm. Delší křídlo je široké 1000 mm a kratší 500 mm. Tloušťka zkoušených materiálů je nejvíce 200 mm. Tenké materiály mohou být uchyceny na pomocném substrátu, tak jak se předpokládá při konkrétní konečné aplikaci ve stavební konstrukci.

Obě části zkušební vzorku jsou přichyceny k vápenosilikátovým deskám (*backing boards*) zajišťujícím jejich vzájemnou pozici - tedy rohové uspořádání zkušební vzorku. Tyto desky mohou být v tloušťce  $12 \pm 3\text{ mm}$  s objemovou hmotností  $800 \pm 150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Deska podpírající kratší křídlo je široká 750 mm, druhá deska je široká 1000 mm. Obě jsou vysoké 1500 milimetrů. Mezi deskami a vzorkem, respektive substrátem se vzorkem je vzduchová mezera. Vodorovný řez sestavou zkušební vzorku se znázorněným hlavním hořákem je na obrázku 39. Vzorky jsou před zkouškou kondicionovány podle prEN 13238 při standardních klimatických podmínkách  $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  a  $50 \pm 5\%$ .



**Obr. 39** Řez sestavou vzorku

## Postup zkoušky

Zkušební vzorek smontovaný na plošině vozíku je zavezen do zkušební místnosti do definované polohy. 5 minut před započítáním vlastní zkoušky se zapálí pomocný hořák a systém pro sběr dat a provede se základní nastavení systému pro sledování vývoje tepla. Poté se zapálí hlavní plynový hořák a zaznamenávají se přímo měřené veličiny: všechny teploty, útlum světla, molární zlomky  $O_2$  a  $CO_2$  a tlaková diference na rychloměrné sondě. Tyto veličiny se přepočítávají na objemový průtok. K výpočtu rychlosti uvolňování tepla (HRR) se používá spolu s koncentrací  $O_2$  i koncentrace  $CO_2$ . Rychlost produkce kouře RSP (*Rate of Smoke Production*) se vypočte z údajů útlumu světla a objemového průtoku zplodin hoření. Vizualně se hodnotí horizontální šíření plamene a odpadávající hořící kousky a kapky zkoušeného materiálu. Horizontální šíření plamene se sleduje na delším křídle zkušební vzorku. Měří se čas od zapálení hlavního hořáku do okamžiku kontaktu plamene se vzdáleným okrajem v libovolném místě mezi 500 a 1000 mm výšky vzorku. Odpadávající hořící částice vzorku jsou zaznamenávány jen do konce 10. minuty zkoušky, a to jen v případě, že dopadnou do vzdálenosti větší než 300 mm od paty vzorku. V tomto případě se rozlišují 2 situace:

- a) padající hořící kapky/částice ve sledovaném čase a oblasti,
- b) padající hořící kapky/částice ve sledovaném čase a oblasti, které hoří déle než 10 s po dopadu.

Zkouška se ukončí předčasně v případě, když:

- a) hoření materiálu je příliš intenzivní. Je-li  $HRR > 350$  kW, resp. je-li střední hodnota HRR překročena o 280 kW v průběhu 30 s. Nebo přesáhne-li teplota spalin trvale 400 °C, resp. je-li průměrná teplota překročena o 300 °C v průběhu 30 s;
- b) dopadne-li hořící či nehořící část materiálu na pískový povrch plynového hořáku a významně poruší nebo uhasí plamen.

V těchto případech se hořící vzorek uhasí a zkouška se ukončí.

## Výpočty

Výpočty veličin sledovaných v SBI testu, rovněž kalibrace zařízení vycházejí většinou z ISO 9705 (Rohový pokojový test). Navíc se zde stanoví hodnota indexu FIGRA (definice je uvedena v kapitole 6.2.1) a index SMOGRA, což je vlastně analogie indexu FIGRA vyhodnocovaná z časové závislosti vývoje kouře.

**FIGRA** (*FIre GRowth RAte index*) [ $W \cdot s^{-1}$ ] je v SBI testu definován jako maximální hodnota podílu  $RHR_{av(t)}/(t-300)$  s vynásobená 1000. Tento podíl se vypočítává pouze v té části expoziční doby, ve které hodnoty RHR a THR (*Total Heat Release* - celková produkce tepla) překročí určitou hranici:  $RHR_{av(t)} > 3$  kW a  $THR_{(t)} > 0.1$  MJ

**SMOGRA** (*SMOke Growth RAte index*) [ $cm^2 s^{-2}$ ] je v SBI testu definován jako maximální hodnota podílu  $RSP_{av(t)}/(t-300)$  s vynásobená 10000. Tento podíl se vypočítává pouze v té části expoziční doby, ve které hodnota  $RSP_{av}$  (*Rate of Smoke Production* - rychlost produkce kouře) překročí hodnotu  $0.1 m^2 s^{-1}$ .

## Diskuse a hodnocení

Starší návrh řešení zkušebního zařízení SBI předpokládal, že vzorek bude hořet na volném prostranství a bude přitom umístěn na váze. Rozměry a tvar uspořádání vzorku zkoušeného materiálu bylo identické se současnou (a patrně definitivní) verzí zkušební aparatury. Dřívější

návrh měl oproti současnému některé přednosti. Především zde byla možnost průběžného sledování hmotnosti hořícího vzorku s následnou možností vyčíslení efektivních parametrů výhřevnosti a také produkce kouře zkoušených materiálů. Hoření zkoušeného materiálu na volném prostranství zase „vyplňovalo mezeru“ mezi rohovým pokojovým testem (RPT) a zařízením typu ICAL. Čili umožňoval doplnit výsledky získané na RPT (tedy v uzavřeném prostoru) o analogické veličiny získané při hoření na volném prostranství (SBI). Podobně by se daly výsledky ICAL získané na rovinné stěně doplnit výsledky na rohovém uspořádání zkoušených materiálů. Současné řešení SBI testu některá tato srovnání neumožňuje. Důvody změny koncepce řešení zkušebního zařízení SBI mi nejsou známy. Je ale pravděpodobné, že doplnění zařízení o zkušební místnost si vynutila snaha o zlepšení reprodukovatelnosti a opakovatelnosti zkoušek. Souvisí to pravděpodobně i s přijatelnými dimenzemi vzduchotechniky. Omezující stěny (zkušební místnost) zabezpečují snadnější jímání zplodin hoření, což umožňuje použít menší průměr potrubí a nižší průtok spalných plynů. S nižším průtokem kouře se současně zlepšuje možnost odečtu spotřeby kyslíku, protože při větších objemových průtocích jsou kouřové zplodin více ředěny vzduchem, což snižuje (při dané rozlišitelnosti měření použitého kyslíkového analyzátoru) spodní mez citlivosti stanovení spotřeby kyslíku. Je nutno si uvědomit, že pokles obsahu kyslíku v proudu spalin činí i v maximu produkce tepla jen několik desetin procenta.

Méně zřetelné jsou důvody, které vedly k vyloučení vážního zařízení. I přes poměrně značnou hmotnost podpůrné konstrukce včetně vozíku by neměl být problém s dostatečnou rozlišitelností snímání čisté hmotnosti samotného zkušební vzorku. Také by neměl být zásadní problém s nežádoucím ohříváním tenzometrických čidel váhy. Vhodným konstrukčním řešením vážního systému - spolu s jejich účinnou tepelnou izolací, případně chlazením - by se daly udržovat v takových teplotních podmínkách, při kterých by byl vliv teploty s dostatečnou mírou eliminován.

Do značné míry je toto zařízení kompromisem mezi zařízením ICAL a rohovým pokojovým testem. Je otázkou, zda se toto zařízení mezi velkorozměrovými testy prosadí i v mimoevropských státech. Faktem však je, že pro stanovení hořlavosti stěn žádná vhodná celosvětová metoda neexistuje. Srovnáme-li SBI test se zařízením ICAL, pak má rohová sestava vzorku některé výhody - šíření plamene v rozích je rychlejší, vlivem jejich vzájemného osálávání, než po rovné stěně. Na druhé straně je však obtížné vyvinout dostatečně intenzivní celoplošné tepelné namáhání rohového uspořádání stěn. Při plně rozvinutém požáru jsou tepelné toky na úrovni minimálně  $50 \text{ kW.m}^{-2}$ , a to je na větší ploše realizovatelné pouze při použití radiačního panelu, což se však jeví v tomto případě dost nereálně. Zůstává tedy druhá možnost, která byla zvolena u rohového pokojového testu, tedy lokální (plošně omezený) ohřev plamenným zdrojem. Tento způsob zapalování také umožňuje sledovat rychlost rozšiřování zóny hoření. U zařízení typu ICAL, je-li použit tepelně radiační zápalný zdroj, je možnost sledování šíření plamene nereálná.

Svou hodnotu by SBI test zvýšil v případě, že by zařízení bylo přece jen doplněno vážným zařízením pro registraci úbytku hmotnosti vzorků. U rohového pokojového testu je možnost registrace úbytku hmotnosti hořavin prakticky nemožná.

SBI test se stane jednou ze základních metod pro stanovování hořlavosti stavebních materiálů a následně i pro klasifikaci těchto materiálů do tzv. Eurotříd (*Euroclasses*). Tříd v tomto systému bude celkem 7: od A1 - materiály prakticky nehořlavé až po třídu F - materiály s neomezenou hořlavostí <sup>[103]</sup>. Na stránkách 116 a 117 jsou tabulky s návrhem dělení a popisem jednotlivých tříd stavebních materiálů a materiálů používaných jako podlahové krytiny.

## 6.5 Průmyslové kalorimetry - (*Industrial calorimeters*)

Princip stanovování hořlavosti materiálů měřením spotřeby kyslíku je snadno aplikovatelný prakticky na libovolné rozměry zkoušených předmětů, od malé metody ISO 5660, přes ICAL, resp. SBI test, až po rohový pokojový test. U klasického rohového pokojového testu (např. ISO 9705) má zkušební místnost rozměry  $3,6 \times 2,4 \times 2,4$  m. Jak již bylo uvedeno, jejich použití není omezeno jen na studium hořlavých úprav stěn a stropů. Byl zmíněn pokojový nábytkový kalorimetr. Tím samozřejmě možnosti tohoto zkušebního zařízení nekončí. Provádí se zkoušky s různým typickým vybavením interiérů, např. kancelářským, obytným, dětským apod. Pro tyto účely je však plocha zkušební místnosti limitující. Takže rozměry zkušebních místností se zvětšují (*Large Room Corner Test*). Největší kalorimetry tohoto typu jsou označovány jako průmyslové kalorimetry a slouží především pro ověřování platnosti teoretických modelů hoření. Zkouší se v nich např. dopravní prostředky od osobních automobilů až po železniční vagóny nebo letadla, případně jiné sestavy hořlavých materiálů větších měřítek.

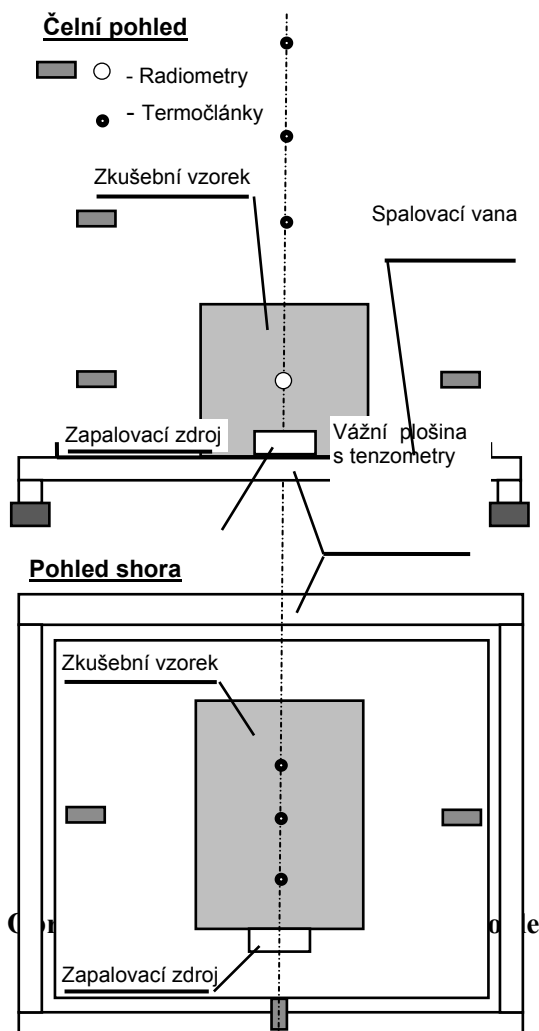
Prakticky jedinou podmínkou, kterou je potřebné při realizaci velkorozměrového zkušebního zařízení splnit, je nutnost soustředit všechny vzniklé zplodiny hoření a odvést je přes průtokoměrné zařízení a kolem odběrných sond mimo objekt kalorimetru. S tím jsou samozřejmě spojeny jisté obtíže:

- Ve větším objemu zkušebního prostoru vznikají větší zpoždění reakcí měřicích systémů, což dále komplikuje případy, kdy probíhá hoření na větší ploše a dopravní zpoždění z různých míst plochy jsou pak různá. Pro eliminaci těchto chyb měření je nutno zjistit dopravní zpoždění z různých míst uvažované plochy lokálními ohni. Ovšem i samotná korekce výsledků měření je velmi obtížná. Je možno říci, že výsledky pokusů, při kterých bude hoření probíhat ve velké ploše, budou méně přesné než u pokusů maloplošných. Chyba se nejvíce projeví na maximálních hodnotách měřených veličin.
- Z kolektoru jsou zplodiny hoření vedeny k měřicím systémům potrubím. Nasávací ventilátor (umístěný na konci potrubí) musí být dimenzován tak, aby kapacitně zvládl kontinuálně odvést všechny vznikající zplodiny hoření i v maximu hoření. S tím souvisí i dimenze potrubí. Průřez potrubí i jeho délka musí zajistit, aby protékající médium se za všech okolností nacházelo v oblasti laminárního proudění. Tomu sice mohou napomoci laminarizátory proudu, avšak ani rychlost proudu vzdušiny nesmí překročit určitou mez. Tyto podmínky mohou být splněny pouze do určitého „tepelného výkonu“ kalorimetru, které může být vyjádřeno maximální nepřekročitelnou hodnotou HRR. Připomeňme, že vnitřní průměr potrubí u kónického kalorimetru je 114 mm a u nábytkového kalorimetru, resp. rohového pokojového testu je 400 mm.
- U těchto velkorozměrových zkoušek se také nedá opomenout ani čištění vzduchu vypouštěného do okolního prostředí. Vzhledem k variabilitě složení požárních plynů je technologie pro jejich čištění na přípustnou míru (podle limitů pro jednotlivé škodliviny) velice složitá a také finančně nákladná.

## 6.6 ČSN 73 0867 - Velkorozměrové zkušební zařízení IMADOS

Toto zařízení vzniklo v rámci řešení výzkumného úkolu, který probíhal v 70. letech. Primárním důvodem byla opět potřeba zařízení, v němž by bylo možné sledovat a registrovat volné hoření hořlavých hmot ve větším měřítku než laboratorním. Zadání úkolu bylo velmi komplexní, zahrnovalo jak vybudování vlastního zkušebního zařízení a ověření jeho funkcí, vypracování zkušebního postupu, ale i provedení rutinních měření pro sestavení hodnotové normy. Úkol byl zaměřen na zvýšení bezpečnosti jednopodlažních velkoprostorových skladovacích objektů. Z toho vycházela i zvolená velikost zkušebních vzorků - standardní evropská paletová jednotka - o rozměrech  $1,2 \times 0,8 \times 0,8$  m. Výstupem byla zkušební norma ČSN 70 0867<sup>[95]</sup> a příloha k ČSN 73 0844<sup>[96]</sup>. Je asi typické, že přibližně ve stejné době, kdy byla zkušební norma schválena pro běžné použití, byla zrušena jediná zkušebna schopná provádět měření. Uživatelé ČSN 73 0844 jsou nyní odkázáni pouze na její hodnotovou přílohu, která co do uvedeného sortimentu jistě nepokrývá celou šíři skladovaných hmot.

### Popis zkušebního zařízení



- Vážní zařízení.** Sestává ze základového rámu obdélníkového tvaru, který zajišťuje kompaktnost a tuhost systému. V jeho rozích jsou 4 tenzometrické snímače. Na nich je položena další ocelová rámová konstrukce - vážní plošina - na které spočívá spalovací vana vyrobená ze žáruvzdorné oceli. Tato vana je od vážní plošiny oddělena tepelnou izolací.
- Systém pro měření teplot** je tvořen termočlánky. Vlastní měření je zajišťováno 5 termočlánky, jimiž jsou snímány teploty ve třech výškových úrovních nad zkoušeným vzorkem. V nejnižší hladině jsou horizontálně umístěny 3 termočlánky. Jsou použity termočlánky typu K, průměr termočlánekových drátů je 0,5 mm. Dalších několik termočláneků mělo kontrolní funkci - sloužily pro kontrolu teploty důležitých prvků vážního zařízení a povrchové teploty hořlavé střešní konstrukce zkušební haly.
- Systém pro snímání tepelně radiačních toků:** Jsou použity 4 membránové radiometry. Průměr měřicí membrány činí 40 mm. Intenzita sálání je snímána proti středu dalších stran paletové jednotky, dále ve středu čelní plochy a v úrovni spodní řady termočláneků.
- Systém pro měření postupu plamene.** Nad horní plochou paletové jednotky jsou napnuty paralelně (kolmo na směr postupu plamene) tenké manganinové dráty. Postup plamene byl vyhodnocován na základě časů postupného přepalování jednotlivých vodičů.

- e) **Zápalný zdroj.** Aby bylo možno rozlišit snadnost zapalování jednotlivých měřených materiálů, jsou určeny různé typy zapalovacích zdrojů odstupňované podle jejich tepelného výkonu. Malé zdroje tvoří celulózové tampóny navlhčené ethylalkoholem, větší zdroje jsou sestaveny z dřevěných hranolků. Dřevěné hraničky jsou zapalovány opět celulózovými tampóny s ethylalkoholem. Všechny zápalné zdroje jsou umístovány doprostřed čelní stěny paletové jednotky. Stručná charakteristika zdrojů je uvedena v tabulce 18. Jednotlivé zdroje poskytují vždy přibližně 4násobek tepla vzhledem ke zdroji předcházejícímu. Celkově tedy zdroj č.5 poskytuje 256× více tepla než zdroj č.1.

Zdroj	Popis	Uvolněné teplo
1	Celulózový tampón napojený alkoholem	700 ± 30 kJ
2	4 zdroje č.1	2800 ± 120 kJ
3	Hranice dřevěných hranolků + zdroj č.1	11200 ± 600 kJ
4	Hranice dřevěných hranolků + 4 zdroje č.1	45000 ± 2000 kJ
5	Hranice dřevěných hranolků + 4 zdroje č.1	180000 ± 8000 kJ

Tab. 18 Zapalovací zdroje používané ČSN 73 0867

- f) **Fotometrický systém pro měření optické hustoty kouře.** Systém je uspořádán vertikálně. Nahoře pod stropem zkušební haly je umístěn reflektor s halogenovou 12V žárovkou. Na přijímací straně v podlaze místnosti je zapuštěn objektiv, v jehož ohnisku je polovodičový fotoodpor. Délka měřicího paprsku činí cca 10 m.<sup>7</sup>
- g) **Systém pro registraci dat.** Výstupy ze všech měřicích systémů mají charakter elektrické veličiny. Registrace je prováděna kontinuálně pomocí liniových vícekanálových zapisovačů a současně paralelně v určitých intervalech přes měřicí ústřednu a elektrický psací stroj na papírový pás. Vyhodnocování měření se provádělo ručně systémem „tužka, pravítko, kalkulačka, papír“.
- h) **Systém vizuálního snímání.** Průběh zkoušek byly registrován 16mm kamerou doplněnou časovačem pro časosběrné snímání.

\* \* \*

Zkušební zařízení je umístěno v hale o rozměrech 42,6 × 16,8 × 12,4 m (d × š × v), takže celkový objem činí 8874 m<sup>3</sup>. Poměrně velký vnitřní objem haly zabezpečuje, že se hoření zkoušených materiálů blíží volnému hoření. V průběhu hoření musí být hala uzavřena a vnitřní objem haly slouží k akumulaci zplodin hoření. K odvětrávání haly slouží ventilátory umístěné v čelních stěnách haly a velká vrata. Hala je tedy nedílnou součástí zkušebního zařízení.

### Vyhodnocování měření

Z hodnot zaznamenaných během zkoušky se vypočtou následující parametry:

- celkové uvolněné teplo  $Q_{\text{celk}}$  [MJ],
- maximální rychlost uvolňování tepla  $Q_{\text{max}}$  [MW],
- rychlost uvolňování tepla v rozmezí 10 ÷ 90 % odhořelé hmoty  $Q_{80}$  [MW]
- maximální teplota spalin  $\delta_{\text{max}}$  [°C],
- maximální hustota tepelného toku  $F_{\text{max}}$  [W.m<sup>-2</sup>],

<sup>7</sup> Tento systém byl začleněn do zkušebního zařízení až dodatečně. Nebyl totiž zadavatelem požadován a tak ni výsledky měření nejsou v hodnotové normě uvedeny.



- rychlost šíření plamene po povrchu vzorku  $v$  [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ].
- K vypočteným hodnotám se připojuje i číslo použitého zdroje zapálení.

Pro výpočty tepelných parametrů se používají hodnoty příslušných úbytků hmotnosti  $w_x$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a spalné teplo materiálu  $H$  [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]. Spalné teplo se stanovuje klasickým postupem na kyslíkovém kalorimetru na tuhá paliva. Je-li vzorek tvořen více materiály, stanovuje se reprezentativní průměrná hodnota spalného tepla ze vztahu:

$$H = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n H_i \cdot x_i, \text{ resp. } H = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n H_i \cdot m_i \quad [\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$$

kde  $H_i$  je spalné teplo  $i$ -tého materiálu [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]  
 $x_i$  je podíl  $i$ -té složky na celkové hmotnosti vzorku [hm. %]  
 $n_i$  je hmotnost  $i$ -té složky ve vzorku [kg]  
 $m_i$  je celková hmotnost vzorku [kg]

Maximální naměřená teplota se hodnotí bez ohledu na pozici termočlánku, na kterém byla zaznamenána, tedy vyhodnocují se záznamy všech termočlánků a vybírá se teplota nejvyšší. Stejně se vyhodnocuje i maximální hodnota hustoty tepelného toku.

Testované materiály, resp. výrobky, se zařídíují pro potřeby hodnotové normy do tříd požárního nebezpečí (TPN). Nejdříve se pro každý z parametrů ( $Q_{\max}$ ,  $Q_{80}$ ,  $Q_{\text{celk}}$ ,  $\delta_{\max}$ ,  $F_{\max}$ ,  $v$  a použitý zdroj zapálení) vyhledá z tabulky skupina nebezpečí (0-5). Ze skupin požárního nebezpečí se prostým průměrem stanoví třída požárního nebezpečí. Do TPN 0 se zařídíují ty materiály (výrobky), které nelze zapálit ani zdrojem 5, do TPN 5 jsou zařazeny materiály s nejvyšším požárním nebezpečím. TPN jsou ještě doplněny indexy vyjadřujícími další rizika, např. toxicitu produktů hoření, vysokou produkci dýmu, nehoří, ale jsou teplem destruktivní.

## Diskuse

Hodnocení této zkušební metody je dnes již asi zbytečné. Avšak zkušební norma je dosud platná a proto je pár poznámek v tomto smyslu namístě.

Předem bych chtěl zdůraznit, že v době svého vzniku to byla metoda dost pokroková. To potvrzuje i další vývoj zkušebních velkorozměrových metod ve světě. V domácím požárním zkušebnictví se vlastně poprvé, ale také naposled, objevila veličina vyjadřující rychlost uvolňování tepla. Tedy jednoznačně parametr dynamického charakteru. Jiná věc je způsob stanovování tohoto parametru. Vynásobení spalného tepla a odhořené hmoty vzorku není příliš korektním a přesným postupem, zvláště u výrobků složených z více materiálů při použití průměrné vážené hodnoty spalných tepel jednotlivých komponent.

Další, a patrně nejzávažnější problém, který nebyl vyřešen, spočíval v obalech - většina výrobků ve skladech je balena, a co navíc mnohdy rozdílným způsobem, při použití různých obalových materiálů. A právě použité obalové materiály do značné míry ovlivňují zapalování a další průběh hoření - tedy i třídu požárního nebezpečí. Je však nemyslitelné, aby v hodnotové normě byly uvedeny různě balené výrobky a materiály. Nelze sice zaručit, že v hodnotové normě jsou uvedeny konfigurace s nejvyšším nebezpečím, avšak její tvůrci se o to snažili.

Značným nedostatkem hodnotové normy byl i fakt, že ne všechny výrobky byly zkoušeny na reprezentativních vzorcích. To bylo vědomé a souviselo to s omezenými finančními prostředky, které byly k dispozici.

Problémů a nedostatků bylo více, některé by byly snadněji řešitelné aplikací metody spotřeby kyslíku, některé ze systémových nedostatků by však nebyly uspokojivě řešitelné ani dnes.

## 7 Hodnocení situace v oblasti testování hořlavosti v ČR

Hodnocení jednotlivých zkoušek byla věnována pozornost v předešlých kapitolách. Protože však takto provedené hodnocení postrádá přehlednost, je vzájemné porovnání jednotlivých metod uvedeno v této kapitole. Je také vhodné v kontextu této kapitoly zhodnotit aktuální situaci ve zkoušení hořlavosti u nás, a z pohledu ISO a EN norem i ve světě.

Začněme však ještě trochu jinak. Zkušební metody jsou vždy zpracovány pro zkoušení materiálů v určité oblasti jejich použití. Jsou zavedeny zkoušky pro materiály užívané ve stavebnictví, elektrotechnice, máme textilní normy, plastikářské a jiné, např. pro materiály používané v dopravních prostředcích. Do značné míry je to způsobeno objektivní potřebou postihnout jisté vlastnosti materiálů v jejich (pro tu kterou konkrétní oblast použití) typickou. Na druhé straně existují určité zkušební metody, které by mohly být akceptovatelné i v některých dalších oblastech a státi se metodami univerzálnějšími. Situace tak trochu připomíná babylonské zmatení jazyků. Tomu přispívá i značně nevyomezené a uvolněné používání některých pojmů. Především se to týká hořlavosti.

V mnoha našich normách se v názvu vyskytuje termín hořlavost: hořlavost stavebních hmot, hořlavost plastů, hořlavost fólií, hořlavost hraček atd. Potom se však zjišťuje uvolňované teplo při hoření, nebo rychlost šíření plamene, nebo kyslíkové číslo a nebo i zapalitelnost. Přitom hořlavost je definována jako schopnost materiálu hořet, v užším slova smyslu - hořet za definovaných podmínek. Přesto že je zřejmé, že všechny tyto fenomény jsou spojeny s hořením a že tedy v jistém smyslu popisují hořlavost, toto označování norem je pro uživatele matoucí. V rámci ISO, IEC a nyní už i v CEN se používá, sice trochu kostrbatá formulace: reakce na oheň (Reaction to Fire), ale formulace správnější (korektnější).

A které požárně technické charakteristiky by mohly aspirovat na všeobecnou akceptovatelnost v širokém spektru používání hořlavých materiálů? Je to především spalné teplo, kyslíkové číslo, teplota vzplanutí (vznícení) a rychlost uvolňování tepla. Zkušební postupy, jejichž výstupem jsou uvedené charakteristiky, umožňují zkoušet materiály v různých tvarových modifikacích (někdy i v kapalném skupenství) a všechny uvedené charakteristiky je možno označit za charakteristiky materiálové - to znamená, že jsou do značné míry nezávislé na tvaru a velikosti nebo hmotnosti zkušebního vzorku.

### 7.1 Zkoušky vznětlivosti

Byly zmíněny 2 způsoby testování (vyjádření) vznětlivosti: ČSN 64 0149 (Setchkinův test) - hledá se minimální teplota ohřívacího média, při které dojde k zapálení materiálu a test ISO 5657, který vznětlivost vyjadřuje jako dobu potřebnou pro zapálení zkoušeného materiálu namáhaného tepelným tokem určité konstantní intenzity.

Oba způsoby je možno označit jako korektní a pro mnohé typy materiálů nepředstavují větší problémy. První zkouška je určena pro plasty a druhá pro stavební hmoty. Obě metody jsou však do značné míry použitelné i v jiných oborech určení či použití materiálů. Uvedené metody ale mají „potíže“ se vzorky, které při zahřívání napěňují, případně výrazně mění svůj objem. Prosté tavení zkoušených materiálů však není překážkou korektního provedení měření.

V ČR je normován pouze Setchkinův test - tedy oficiálně jen pro použití pro plasty. Ostatní obory vlastní testy primárně zaměřené na zapalitelnost normovány nemají, snad s výjimkou speciálních testů zápalnosti čalouněného nábytku při použití žhnoucí cigarety (ČSN EN 1021-1<sup>[97]</sup>) nebo ekvivalentu zápalky (ČSN EN 1021-2<sup>[98]</sup>). Vzhledem k tomu, že ČSN 64 0149 je po poslední revizi identická s ISO 871 nebo s americkou ASTM D 1929 a nábytkářské normy jsou převzaty z CEN, je situace u nás dobrá. Co se týká zapalitelnosti materiálu, domluvíme se i za hranicemi. Snad by ovšem měla být pro potřeby požární bezpeč-

nosti staveb (PBS) převzata i metoda ISO 5657. Na absenci přijatelných standardů v oblasti PBS bude upozorněno i dále.

Vznětlivost nebo snad lépe zapalitelnost (aby se nepletly pojmy), i když ne jako primární charakteristiku, zohledňují i některé další metody: některé metody sledující šíření plamene, velkorozměrová zkouška IMADOS, nábytkářský cigaretový a zápalkový test a další.

## 7.2 Zkoušky hořlavosti sledující šíření plamene

Pro přehlednost jsou jednotlivé dříve uvedené testy a jejich hlavní charakteristiky sestaveny do tabulky - tab. 19. Jak již bylo uvedeno dříve, testy sledující schopnost zkoušených materiálů šířit plamen jsou vzájemně značně nekompatibilní. Důvodem je velká rozmanitost zapalovacích zdrojů a způsobů zapalování. Zápalné zdroje, způsob zapalování a celkové uspořádání testu je voleno tak, aby se bezpečně zapálily běžně studované materiály příslušné kategorie.

Nelze zapalovat kompaktní dřevěný materiál stejným způsobem jako např. tenkou fólii nebo textilní materiál. Materiály s velkou štíhlostí - nízkou plošnou hmotností se zapalují malým plamenem na malé ploše po omezenou dobu. Kompaktní deskové materiály se tepelně exponují delší dobu a celoplošně, přičemž hustota tepelného toku atakujícího zkoušený materiál je odstupňována - v místě iniciace hoření je nejvyšší, pak podél vzorku plynule klesá. Tentýž princip tepelného namáhání testovaných materiálů je uplatněn i v ISO 9239, tady však je tepelný tok podstatně nižší intenzitou.

Z testů sledujících schopnost materiálů šířit hoření není možno ani jeden označit jako univerzální. Všechny jsou navrženy pouze pro úzkou oblast materiálů určenou především tvarem, charakterem nebo použitím hmot, resp. výrobků. Navíc všechny testovací metody mají dosti významné omezení i v rámci výrobků a materiálů, pro které jsou určeny: svislá poloha sledované plochy vzorků prakticky znemožňuje zkoušení tavících se materiálů a značně omezuje zkoušení měknoucích materiálů (ČSN 73 0863 a ISO 5658-2), u fóliového testu (ČSN 64 0757) zase nelze zapálit tenké PE a PP fólie.

Textilní a fóliové testy šíření plamene (stejně tak test pro pěnové plasty) vycházejí ze zahraničních standardů a je možno říci, že jsou pro nás v současnosti akceptovatelné. Horší je opět situace v oblasti PBS. Platná ČSN 73 0863 je česká specialita a v zahraničí naším charakteristikám šíření plamene nerozumí. Vzhledem k prioritám v přijímání zahraničních zkušebních norem do systému ČSN, kde na prvním místě jsou normy CEN, je situace i do budoucna dosti složitá. Z mezinárodního hlediska nejrozšířenější metoda šíření plamene používaná pro stavební hmoty (ISO 5658-2) nebyla v CENU přijata. Tato charakteristika bude v Evropě patrně reprezentována pouze SBI testem, protože se o přijetí ISO metody v současné době neuvažuje. Přestože se dá předpokládat, že ČR přijme SBI test jako závazný pro hodnocení stavebních materiálů, jeví se jako nutné převzít i ISO metodu. Nelze pochybovat, že státy Evropské unie, které v současné době používají ISO metodu, ve chvíli, kdy se SBI test stane závazným, tuto metodu a všechny dosavadní naměřené výsledky opustí. Už i proto, že možnost sledování šíření plamene, tak jak ji postihuje SBI test, je pouze okrajovou záležitostí.

Do systému ČSN bude také patrně přijata zkušební metoda pro hodnocení šíření plamene po povrchu podlahových krytin ISO [39], která je zařazena do souboru zkoušek pro třídění těchto materiálů v rámci Eurotříd. Je to také metoda v zahraničí poměrně rozšířená a v Evropě se ve členských zemích EU po roce 2000 stane závaznou. Vymezení EUROTRÍD pro stavební materiály a podlahové krytiny je uvedeno v tabulkách 21 a 22 na konci této kapitoly.

	ISO 9239	ČSN 64 0757	ČSN 64 0464	ČSN 80 0824	ČSN 73 0863	ISO 5658-2	ASTM D3806
<b>Oblast určení</b>	Podlahové krytiny	Plasty	Pěnové plasty	Textilní materiály	Stavební hmoty	Stavební hmoty	Požárně retardované deskové materiály
<b>Rozměry vzorku [mm]</b>	1050 x 250	450 x 60	150 x 50	450 x 70	1050 x 350	800 x 150	600 x 100
<b>Tloušťka [mm]</b>	V přirozené tloušťce	0,05 ÷ 2	13, nebo menší	Udává se plošná hmotnost	50 nebo méně	V přirozené tl. max. 50	V přirozené tl. max. 40
<b>Poloha vzorku</b>	Horizontální	Svislá	Vodorovná	Pod úhlem 45°, nebo svislá	Svislá stěna položená na delší hraně		Pod 30°-šikmý úhel
<b>Zapalovací zdroj</b>	Tepelně rad. panel + pomocný hořák	Plynový hořák	Plynový hořák	Plynový hořák	4 plynové hořáky + pomocný hořák	Tep. radiální panel + pomocný hořák	Plynový hořák
<b>Způsob zapalování</b>	Rad. teplem a plamenem	Špičkou plamene na spodním okraji vzorku	Širokým plochým plamenem	Malým plamenem na spodním okraji vzorku	Horkými spalinami, část. tep. radiací	Rad. teplem a plamenem	Plamenem na spodním okraji vzorku
<b>Doba tepel. namáhání</b>	Po celou dobu zkoušky	Po omezenou dobu	Po omezenou dobu	Po omezenou dobu	Po celou dobu zkoušky	Po celou dobu zkoušky	Po celou dobu zkoušky
<b>Směr šíření plamene</b>	Vodorovně	Svisle nahoru	Vodorovně	Nahoru	Horizontálně na svislé rovině		Na nakloněné ploše nahoru
<b>Sledované hodnoty</b>	Min. hodnota tepel. toku pro šíření plamene	Rozšíření plamene, rychlost šíření plamene	Odhořelá délka, rychlost hoření	Délka zuhelnatění, rychlost šíření plamene	Index šíření, rychlost šíření plamene	Min. hustota tepel. toku umožňující šíření plamene	Index rozšíření, rychlost šíření plamene
<b>Poznámky</b>	Čas do ukončení hoření	Sleduje se postup zóny uhlíkatění	Vzorek hoří na drátěné síťce	Sleduje se tvorba dýmu, žhnutí a odkapávání	Režim ohřevu vzorku sleduje normovou teplotní křivku	Odděleně se sleduje zapalitelnost materiálu	Sleduje se další hoření, resp. žhnutí po uhašení plamene

**Tab. 19 Přehled testů sledujících šíření plamene**

### 7.3 Zkoušky hořlavosti sledující uvolňování tepla

Platné ČSN a nejvýznamnější mezinárodní zkušební metody jsou uvedeny v tabulce 20.

Situace kolem spalného tepla a výhřevnosti (ČSN 44 1352) a požární výhřevnosti (ČSN 73 0864) byla snad dostatečně komentována v předešlých kapitolách. Nutno však ještě dodat, že ve světě bude napříště preferována spíše hodnota spalného tepla (*Gross Calorific Value*), rozhodně v rámci zemí EU, protože tato materiálová charakteristika bude používána pro hodnocení stavebních materiálů i podlahových krytin (tabulka 21 a 22). Požární výhřevnost, tak jak je definována v ČSN 73 0864, je opět toliko českou specialitou a v budoucnu

tedy v žádném případě neobstojí. Stejně jako v oblasti šíření plamene po povrchu stavebních materiálů nám situaci poněkud komplikuje schválená koncepce požárního zkušebnictví EU. Totiž, jednoznačně nejrozšířenější a v současnosti nejlepší zkušební metodou je v této oblasti ISO 5660. Tato metoda, i když je v zemích EU běžně používána, nebyla v Evropě jako zkušební standard schválena. Pro potřeby klasifikace stavebních materiálů byl přijat test SBI. Takže kónický kalorimetr se v evropských státech běžně používá a bude používat dále, ovšem zkouška na něm se asi v nejbližších letech nestane závaznou.

	ČSN 44 1352	ČSN 73 0684	ČSN 73 0862	ISO 5660	ISO 9705	EN SBI	ČSN 73 0867
<b>Oblast určení</b>	Všeobecné	Stavební hmoty	Stavební hmoty	Stavební hmoty	Stavební hmoty	Stavební hmoty	Skladované materiály a výrobky
<b>Rozměry vzorku</b>	0.5 ÷ 2 g	400 x 300 x 200 ÷ 400	220 x 195 x 3 ÷ 20	100 x 100 x max. 50	3600 x 2400 x 2400	1500 x 1000 a 1500 x 750	1200 x 800 x 800
<b>Poloha vzorku</b>	-	Ležící vzorek	Svislá	Vodorovná, resp. svislá	Strop a stěny místnosti	Rohové uspořádání	Paleta EUR na spalovací vaně
<b>Zapalovací zdroj</b>	El. žhavený drát	Etanol + celulózový tampón	Plynový hořák + 2 tepelné radiátory	Tepelný radiátor + el. jiskra	Plynový hořák	Plynový hořák	Etanol + celulózové tampóny a dřevěné hranice
<b>Princip měření</b>	Rozdíl teplot	Rozdíl teplot	Rozdíl teplot	Spotřeba O <sub>2</sub>	Spotřeba O <sub>2</sub>	Spotřeba O <sub>2</sub>	Rozdíl teplot
<b>Sledované hodnoty</b>	Spalné teplo a výhřevnost	Požární výhřevnost	Uvolňované teplo	Rychlost uvolňování tepla a mnoho dalších	Rychlost uvolňování tepla a mnoho dalších	Rychlost uvolňování tepla, šíření plamene a další	Rychlost uvolňování tepla, šíření plamene a další
<b>Poznámky</b>	Vzorek hoří v čistém O <sub>2</sub>	3 tvarové varianty vzorku		Univerzální použití	Hořlavé úpravy stěn a stropu		

**Tab. 20 Přehled zkoušek sledujících vývoj tepla**

Spalné teplo stanovené podle ČSN 44 1352 je charakteristikou významnou a nezastupitelnou, přesto je to jen charakteristika statická. Statickou charakteristikou je ovšem i požární výhřevnost. Současné potřeby požárního inženýrství však žádná statická hodnota uvolňovaného tepla neuspokojí, proto musí být k dispozici i metodiky poskytující dynamické výstupy. Zde konkrétně průběh produkovaného tepla v čase trvání zkoušky, a takovou veličinu neposkytuje žádná ze zkušebních metod normovaných v ČR.

Hořlavost stavebních hmot (ČSN 73 0862) je opět tím českým endemitem a ani po poslední revizi v r. 1999 nemá naději na delší platnost. Otázka, čím ji nahradit, je velice snadno zodpověditelná, je to ISO 5660. SBI test není v žádném případě alternativou k ČSN 73 0862, bude ale v ČR nepochybně v blízké době přijat a mohl by velmi dobře nahradit ČSN 73 0864. Náhradou za ČSN 73 0862 musí být opět malá, laboratorní zkušební metoda tedy jednoznačně kónický kalorimetr podle ISO 5660. SBI i ČSN 73 0864 jsou velkorozměrové zkušební metody.

ISO 5660 je metoda velice univerzální, poskytuje velké množství významných charakteristik, které jsou vesměs dynamického charakteru. Toto zkušební zařízení se stalo také základem pro další zkoušky, které jsou a nebo budou v rámci ISO normovány. Tím se také zhodnocuje investice vložená do zařízení. Připomeňme jen zkoušky korozivity a toxicity kouřových plynů.

S ČSN 73 0862 souvisí také problém nehořlavých stavebních hmot. ČSN 73 0862 slouží k třídění stavebních hmot do stupňů hořlavosti. Třída A reprezentuje nehořlavé sta-

vební hmoty. Takže podle platných ČSN je nehořlavost stavebních hmot možno prokázat již výše zmíněnou metodou (pokud  $Q < 50$ ) a nebo podle ČSN 73 0861 <sup>[99]</sup>, resp. ISO 1182 <sup>[100]</sup>. ČSN 73 0823 <sup>[101]</sup> uvádí stupně hořlavosti vybraných stavebních hmot (a výrobků z nich) pro obor požární bezpečnosti staveb. V praxi se pro stanovení nehořlavosti postupuje podle ČSN 73 0862, přesto že ČSN 73 0861 je ve světě rozšířeným standardem. Vzhledem k tomu, že ISO 1182 byla přijata pro klasifikaci stavebních hmot v zemích EU, lze předpokládat, že se její pozice v ČR upevní.

Třída	Testovací metoda	Klasifikační kritéria (hlavní hodnoty)	Další požadavky
<b>A1</b>	<b>EN ISO 1182 (1)</b> a současně	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ a současně $\Delta m \leq 50 \%$ a současně $t_f = 0$ (nehoří plamenem)	-
	<b>EN ISO 1716</b>	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (1) a současně $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (2) a současně $PCS \leq 1,4 \text{ MJ.m}^{-2}$ (3) a současně $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
<b>A2</b>	<b>EN ISO 1182 (1)</b> nebo	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ a současně $\Delta m \leq 50 \%$ a současně $t_f \leq 20$	-
	<b>EN ISO 1716</b> a současně	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (1) a současně $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ (2) a současně $PCS \leq 4,4 \text{ MJ.m}^{-2}$ (3) a současně $PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
	<b>EN xxxx (SBI)</b>	$FIGRA \leq 120 \text{ W.s}^{-1}$ a současně LFS < okraj vzorku a současně $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$	Vývoj kouře(5) a současně hořící kapky, kousky a/nebo kombinace obou(6)
<b>B</b>	<b>EN xxxx (SBI)</b> a současně	$FIGRA \leq 120 \text{ W.s}^{-1}$ a současně LFS < okraj vzorku a současně $THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Vývoj kouře(5) a současně hořící kapky, kousky a/nebo kombinace obou(6)
	<b>EN ISO 11925-2(8)</b> doba expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 60 s	
<b>C</b>	<b>EN xxxx (SBI)</b> a současně	$FIGRA \leq 250 \text{ W.s}^{-1}$ a současně LFS < okraj vzorku a současně $THR_{600s} \leq 15 \text{ MJ}$	Vývoj kouře(5) a současně hořící kapky, kousky a/nebo kombinace obou(6)
	<b>EN ISO 11925-2(8)</b> doba expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 60 s	
<b>D</b>	<b>EN xxxx (SBI)</b> a současně	$FIGRA \leq 750 \text{ W.s}^{-1}$	Vývoj kouře(5) a současně hořící kapky, kousky a/nebo kombinace obou(6)
	<b>EN ISO 11925-2(8)</b> doba expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 60 s	
<b>E</b>	<b>EN ISO 11925-2(8)</b> doba expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 20 s	Hořící kapky, kousky a/nebo kombinace obou(7)
<b>F</b>	Žádná	Nejsou stanoveny	Nejsou stanoveny

- (1) Pro homogenní materiály a základní komponenty z nehomogenních materiálů
- (2) Pro externí nepodstatné komponenty z nehomogenních materiálů
- (3) Pro interní nepodstatné komponenty z nehomogenních materiálů
- (4) Pro produkt jako celek
- (5) **s1** =  $SMOGR_A \leq 30 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  a  $TSP_{600s} \leq 50 \text{ m}^2$ ; **s2** =  $SMOGR_A \leq 180 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  a  $TSP_{600s} \leq 200 \text{ m}^2$ ;  
**s3** = nenastala situace s1 ani s2
- (6) **d0** = žádné hořící kapky ani částice do 600 s (při SBI testu);  
**d1** = žádné odpařující kapky ani částice hořící déle než 10s do 600 s;  
**d2** = Nenastala situace **d0** ani **d1**  
Zapálení papíru při EN ISO 11925-2 vede k označení **d2**
- (7) Vyhověl = papír se nezapálil (neuvádí se)  
Nevyhověl = papír se zapálil (označení **d2**)
- (8) Za podmínek působení plamene na plochu; je-li to pro konečné použití výrobku typické, pak zapalování na okraji

**Tab. 21 Klasifikační třídy stavebních materiálů podle jejich reakce na oheň (bez podlahových krytin)**

Třída	Testovací metoda	Klasifikační kritéria (hlavní hodnoty)	Další požadavky
<b>A1<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 1182(1)</b> a současně	$\Delta T \leq 30 \text{ °C}$ a současně $\Delta m \leq 50 \%$ a současně $t_f = 0 \text{ s}$ (nehoří plamenem)	-
	<b>EN ISO 1716</b>	$PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (1) a současně $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (2) a současně $PCS \leq 1,4 \text{ MJ.m}^{-2}$ (3) a současně $PCS \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
<b>A2<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 1182(1)</b> nebo	$\Delta T \leq 50 \text{ °C}$ a současně $\Delta m \leq 50 \%$ a současně $t_f = 20 \text{ s}$ (nehoří plamenem)	-
	<b>EN ISO 1716</b> a současně	$PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (1) a současně $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ (2) a současně $PCS \leq 4,0 \text{ MJ.m}^{-2}$ (3) a současně $PCS \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (4)	-
	<b>EN ISO 9239-1(5)</b>	Kritický tepelný tok (6) $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba kouře(7)
<b>B<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 9239-1(5)</b> a současně	Kritický tepelný tok (6) $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba kouře(7)
	<b>EN ISO 11925-2</b> doba expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 20 s	-
<b>C<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 9239-1(5)</b> a současně	Kritický tepelný tok (6) $\geq 4,5 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba kouře(7)
	<b>EN ISO 11925-2</b> doba expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 20 s	-
<b>D<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 9239-1(5)</b> a současně	Kritický tepelný tok (6) $\geq 3,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba kouře(7)
	<b>EN ISO 11925-2</b> doba expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 20 s	-
<b>E<sub>FI</sub></b>	<b>EN ISO 11925-2</b> doba expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ do 20 s	-
<b>F<sub>FI</sub></b>	Žádná	Nejsou stanoveny	Nejsou stanoveny

- (1) Pro homogenní materiály a základní komponenty z nehomogenních materiálů
- (2) Pro externí nepodstatné komponenty z nehomogenních materiálů
- (3) Pro interní nepodstatné komponenty z nehomogenních materiálů
- (4) Pro produkt jako celek
- (5) Trvání zkoušky = 30 minut
- (6) Kritický tepelný tok je definován jako sálavý tok, při kterém dojde k přerušení plamenného hoření, nebo také sálavý tok po 30 minutách zkoušky - podle toho která hodnota je nižší; tj. tepelný tok odpovídající pozici maximálního rozšíření plamene
- (7) **s1** = kouř  $\leq 750 \text{ %.min}$ ; **s2** = nenastane-li situace **s1**

**Tab. 22 Klasifikační třídy materiálů pro podlahové krytiny podle jejich reakce na oheň**



## 8 Závěr

Úvodní kapitoly jsou věnovány obecným problémům hoření materiálů. Tvoří úvod k hlavnímu tématu - k analýze situace v oblasti požárního zkušebnictví v ČR. V textu je věnována pozornost zejména testům, které se dnes souhrnně označují jako testy reakce materiálu na oheň. Byly představeny a posouzeny nejužívanější metody pro hodnocení zapalitelnosti materiálů, metody pro hodnocení hořlavosti sledující jednak šíření plamene, tak i vývoj tepla při hoření materiálů. Byly představeny metody pro hodnocení rizik spojených s tvorbou kouře. Byly také uvedeny některé metody zkoušení hořlavosti ve větších měřících. Všechny uvedené metody byly taky posuzovány z pohledu jejich nedostatků a omezení jejich použitelnosti, současně byly uvedené ČSN hodnoceny v kontextu jejich rozšíření v zahraničí. Toto hodnocení vyznívá pro naše platné metody dosti špatně.

Zkušební postupy (stejně jako jiné záležitosti) jsou normovány především proto aby se mohly provádět vždy stejně, aby takto získané výsledky byly srozumitelné, přenositelné a opakovatelné - kdekoli, kde se používají nebo získávají. Z tohoto pohledu nemají (z širšího hlediska) valný význam nějaké podnikové nebo oborové normy. Malý význam však mají i státní normy, které nejsou v mezinárodním měřítku akceptovány. To samozřejmě nemusí platit zcela obecně, určitě to však platí pro normy menších států s malou hospodářskou silou. Jiný „zvuk“ má norma ASTM, BS nebo DIN, srovnáváme-li ji s ČSN.

Konstatování, že soubor českých technických norem v této oblasti je se světově rozšířenými normami nekompatibilní, nikterak nezpochybňuje velmi dobrou úroveň požární ochrany u nás. To je nutno zdůraznit. Je dost rozšířený názor, že po vstupu do Evropské unie, tedy po přijetí jejich závazných předpisů, se např. právě naše požární bezpečnost zhorší. Je pravda, že během našeho izolovaného vývoje, v období centrálního plánování (kdy do požárního výzkumu tekly dost významné prostředky), dosáhla naše požární ochrana v mnoha směrech nadstandardní úrovně (i ve srovnání s nejrozvinutějšími zeměmi)<sup>8</sup>. V oboru požární bezpečnosti staveb se o to výrazně zasadil V. Reichel a jeho spolupracovníci. Je však dobré si uvědomit, že se na tomto stavu podílí především tzv. pasivní bezpečnost. Naše zaostávání v aktivní ochraně dokumentoval v oblasti použití EPS a některých dalších aktivních prvků A. Dudáček ve své doktorské<sup>[102]</sup> a habilitační práci.

Musíme se samozřejmě snažit dosaženou úroveň zachovat a připustit snížení požadavků na pasivní ochranu jen za podmínky zlepšení úrovně aktivní složky požární bezpečnosti. Jisté nepřehlédnutelné výhody přinese i to možné zhoršení situace - mělo by totiž přinést dost výrazné zjednodušení v současnosti platných dotyčných norem, vyhlášek a zákonů.

Vraťme se ale zpět ke zkušebním normám. Situace u nás v této oblasti není dobrá především proto, že jsme nezareagovali na vývoj ve světě. V 80. a 90. letech zaznamenal vývoj zkušebních metod podstatné zrychlení. Impulsem k tomu byl vývoj dynamických metod sledujících teplo vnikající při hoření materiálů. Většinou se jedná o metody multiparametrové, protože sledování vývoje tepla není jediným jejich výstupem. Tyto metody jsou schopny poskytnout i další užitečné informace o zapalitelnosti materiálu, o vynikajícím kouři, o hmotnostním úbytku a další. To, že v ČR dosud není ani jediný plnohodnotný kónický kalorimetr je nutno považovat za velmi nešťastné. Ve srovnatelných zemích - na Slovensku, v Maďarsku a Polsku - tyto přístroje mají a také tamní pracoviště přispívají k dalšímu výzkumu i ke shromažďování dat. V těchto zemích je taky tato metoda zařazena do jejich systémů národních norem. Proč je tedy situace u nás jiná? To by si přálo širší diskusi, možné příčiny jsou však i tyto:

---

<sup>8</sup> To je samozřejmě pozitivní stav, na druhé straně je však nutno připustit, že v liberálnějším prostředí rozvinutějších zemí by takové situace bylo ztíženo možno dosáhnout.

- 1) Bylo rozhodnuto, že přednostně budou přijímány normy CEN
- 2) V odborných kruzích je podceňován význam požárně technických charakteristik.
- 3) Dělbá oblastí výzkumu a vývoje PO v bývalém Československu
- 4) Vysoká cena moderních přístrojů

Ad 1) Byrokratické lpění na této prioritě brání kompetentním lidem z oboru PBS a státní správy zařadit do ČSN metodu ISO, pokud tato nebyla v CEN přijata, resp. pokud byla odmítnuta. V CEN však nebyla ISO 5660 odmítnuta proto, že je špatná, ale proto, že oblast výzkumu v Evropě tato instituce regulovat nebude. To, že ISO 5660 je metoda vhodná především pro výzkumné účely je fakt, a z tohoto pohledu je současný postoj CEN logický a správný. Normy CEN jsou, jak je známo, v členských státech závazné a bylo by nesmyslné předepisovat nebo na druhé straně jakkoli omezovat metody bádání. Ve všech členských zemích EU, ve kterých je požární věda na úrovni srovnatelné s námi, mají „svůj národní kalorimetr“ normován. Absence této normy u nás je těžko pochopitelná.

Ad 2) Zdůrazněná nesporně dobrá úroveň PBS u nás je založena na mnohých technických prováděcích (projektových) normách. V nich obsažené výpočetní vztahy jsou však většinou empirické. Pokud do nich některé PTCH vstupují, pak jsou většinou získávány zkouškami normovanými jen u nás, např. požární výhřevnost, šíření plamene, třídy požárního nebezpečí skladovaných hmot atd. Faktem ale zůstává, že aplikace PTCH v praxi je značně obtížná - dá se dokonce říci, že v době kdy v požární vědě neexistovalo matematické modelování, by ani nebyla moc efektivní. Situace se ale již řadu let vyvíjí pro zhodnocení některých PTCH příznivěji - matematické modelování požárů znamenalo značný pokrok, a sice především díky rozvoji výpočetní techniky a novým dynamickým měřicím metodám, které jsou schopny poskytnout důležitá vstupní data a současně dávají možnost zpětného ověření pravdivosti modelu. I zde sehrál rozhodující roli princip měření úspěšně uplatněný u kónického kalorimetru a z něhož vycházejí i všechny současné velkorozměrové testy (rohový pokojový test, nábytkové kalorimetry i SBI test).

Ad 3) Před rokem 1989 existovala ve výzkumu PO dělba práce. Hlavní správa PO v ČR garantovala výzkum a vývoj v oblasti represe, především se to týkalo věcných prostředků PO - hasičské zásahové techniky, EPS, SHZ, výzbroje a výstroje hasičů. Slovenská hlavní správa garantovala rozvoj požární vědy. V Bratislavě vznikla Požárně technická stanice<sup>9</sup>, která se postupem času stala personálně i materiálně velmi dobře vybaveným výzkumným pracovištěm. Hlavní správa SR také veškerou výzkumnou činnost koordinovala a financovala, takže by se dalo říci, že si na Slovensku potřebnost požární vědy a jejího materiálového zajištění uvědomují lépe než u nás. Z tohoto pohledu jsme na rozdělení státu doplatili.

Ad 4) Ceny moderních zkušebních aparatur jsou značně vysoké, protože se v tomto sortimentu zboží jedná o kusovou výrobu, která je drahá již v samotném svém principu. I z celosvětového měřítka existuje jen poměrně úzký okruh potenciálních zákazníků, proto není na trhu žádná konkurence, a proto jsou ceny vysoké. V Evropě snad v současnosti jsou jen dva výrobci. Přitom problém vysokých cen není zdůvodnitelný složitostí nebo náročností výroby<sup>10</sup>. Přístroj v ceně 3 až 4 miliony Kč je u nás pro vysokoškolská pracoviště bez získání grantu nedostupný. Ale ani zákazníci z komerční sféry (laboratoře zajišťující servisní měření nebo laboratoře výrobců) na tom nejsou o mnoho lépe, protože dokud nebudou výstupy z těchto přístrojů „zastřešeny“ příslušnou ČSN nebudou prodejné a tudíž i prostředky investo-

<sup>9</sup> dnes Požárně technický a expertizní ústav MV SR

<sup>10</sup> Kdyby se našel výrobce ve státě s nízkou cenou práce (např. v ČR) pak by jeho ceny, i v případě, že by některé komponenty musel dovážet, mohly být výrazně nižší.

vané do přístroje budou nenávratné. Investice vložené do výzkumu jsou v klimatu naší současné hospodářské situace, bohužel, považovány za luxus.

Uvedené příčiny možná přesně situaci nevystihují, zcela jistě však se na ní jistou mírou podílí. První důležitý krok ke zlepšení současného stavu by měl být proveden přijetím ISO 5660 a dalších moderních zkušebních metod do systému ČSN. Nemíří-li provedená analýza zcela mimo podstatu věci, pak právě tato „díra“ mnohé věci na to navazující brzdí - a stav na Slovensku by toho mohl být důkazem. Tam po schválení STN ISO 5660 si v krátkém čase dokázali pořídit i příslušná zkušební zařízení. Přitom ani na Slovensku žádná prováděcí norma není závislá na charakteristikách HRR, THR, FIGRA nebo SMOGRA a tedy ani tam žádné přímé využití těchto přístrojů v komerční oblasti není. Moderní a kvalitní přístroje pracovištím na Slovensku nepřinášejí přímé peníze ale umožňují lidem s nimi pracujícím zapojit se do mezinárodních programů vývoje a testování. V tom je asi náš největší vnitřní dluh a nebezpečí dalšího zaostávání - zůstáváme svou vinou mimo oblast mezinárodních aktivit, které určují směr dalšího vývoje.

## Seznam literatury a dalších zdrojů informací

1. Košík, M. a kol.: Polymérne materiály a ich požiarne ochrana. ALFA Bratislava 1986
2. National Fire Protection Association: NFPA Handbook, 15<sup>th</sup> ed., 1981
3. Meidl, J.: Explosive and Toxic Hazardous Materials. Glencoe Press, Fire Science Series, 1970
4. Mleziva, J.: Polymery - výroba, struktura, vlastnosti, použití. Sobotáles, Praha 1993, ISBN 80-901570-4-1
5. Mark, M. F., Bikales, N., Overberger, CH. G., Menges G.: Encyklopedia of Polymer Science and Engineering. Vol. 1-12, Wiley, Chichester 1985-1987
6. Brandrup, J., Immergat, E. H. (Editors): Polymer Handbook, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York 1975
7. Hall C.: Polymeric Materials: An Introduction for Technologists and Scientist. Macmillan Press Ltd., London 1987
8. Greenwood, C. T., Banks, W.: Synthetic High Polymers. Oliver and Boyd, Edinburgh 1968
9. Madorsky, S. L.: Thermal Degradation of Organic Polymers. Interscience, John Wiley, New York 1964
10. Billmeyer, F. W.: Textbook of Polymer Science. 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York 1971
11. Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics. 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York 1998
12. Wall, L. A.: The Pyrolysis of Polymers, in the Mechanism of Pyrolysis, Oxidation and Burning of Organic Materials. Special Publication 357. National Bureau of Standards, Washington, DC 1972
13. Williams, F. A.: „Chemical Kinetics of Pyrolysis“ in Heat Transfer in Fires. (Editor. P. L. Blackshear), John Wiley & Sons, New York 1974
14. Williams, F. A.: „Urban and wildland fire phenomenology.“ Progress in Energy an Combustion Science, 8, 1982
15. Tewarson, A., Pion, R.F.: „Flammability of plastics. I. Burning intensity.“ Combustion and Flame, 26, 1976
16. Košík, M. a kol.: Výskum deštruktívnych zmien a produktov rozkladu pri namáhaní plastov a nekovových materiálov. (Záverečná správa o riešení úlohy V-124-070-04/04), CHTF SVŠT, Bratislava 1980
17. Košík, M. a kol.: Termoanalytické štúdium procesu horenia polymérnych materiálov. Tvorba niektorých produktov. (Výskumná správa), CHTF SVŠT, Bratislava 1982
18. Balog, K.: Reakcia celulóзовých materiálov na oheň a proces horenia. (Habilitationná práca), DF TU, Zvolen 1995
19. Balog, K.: Štúdium procesu plameňového a bezplameňového horenia celulóзовých materiálov. (Kandidátska dizertačná práca). CHTF SVŠT, Bratislava 1986
20. Osvald, A.: Zmeny vlastností dreva a materiálov na báze dreva pri pôsobení energetického zdroja. (Kandidátska dizertačná práca), VŠLD , Zvolen 1982
21. Vaniš, P.: Reakce na oheň a chování polymerních materiálů v podmínkách rozvinutého požáru. (Kandidátská disertační práce), CHTF SVŠT, Bratislava 1982
22. Masařík, I.: Termooxidační rozklad, vznícení a hoření retardovaných polystyrenů. (Kandidátská disertační práce), Ústav makromolekulární chemie ČSAV, Praha 1979
23. Ševěček, P.: Studium složení uhlíkatých zbytků po tepelné degradaci vybraných polymerů. (Kandidátská disertační práce), VŠB, Ostrava 1981
24. Fait, B. a kol.: Studie matematické analýzy a modelování požáru z hlediska výzkumu tepelných jevů. VŠB, Ostrava 1975
25. ISO 10093: 1994 Plastics - Firetest - Standard Ignition Sources. Geneva, 1994
26. ČSN 64 0149 Stanovení vznětlivosti materiálů. Vydavatelství ÚNM, Praha 1978

27. ISO 871: 1996 Plastics - Determination of ignition temperature using a hot-air furnace. Geneva, 1996
28. ISO 5657: 1986 Reaction to fire tests - Igniability of building products using a radiant heat source. Geneva, 1986
29. STN ISO 5657 Testy horľavosti - Reakcia na oheň - Zápalnosť stavebných výrobkov. Bratislava 1986
30. Fenimore, C. P., Martin, F. J.: Modern Plastics. Vol. 44, p. 141, 1966
31. ČSN ISO 4589-2 (ČSN 64 0756) Plasty. Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla. Část 2: Zkouška při teplotě okolí. ČNI, Praha 1998
32. ISO 4589-2: 1996 Plastics - Determination of burning behaviour by oxygen index - Part 2, Ambient-temperature test
33. ISO 4589-3: 1996 Plastics - Determination of burning behaviour by oxygen index - Part 3, Elevated-temperature test. Geneva, 1996
34. ČSN 64 0757 Zkoušení plastů. Stanovení hořlavosti plastů ve formě fólií. Vydavatelství ÚNM, Praha 1978
35. ČSN 80 0824 Zkoušení hořlavosti plošných textilií s obsahem syntetických vláken max. 50 %. Vydavatelství ÚNM, Praha 1983
36. ČSN 73 0863 Požárně technické vlastnosti hmot. Stanovení šíření plamene po povrchu stavebních hmot. ČNI, Praha 1992
37. ČSN 64 5464 Zkoušení lehčených hmot. Zkoušení hořlavosti lehčených hmot. Vydavatelství ÚNM, Praha 1979
38. ISO 5658-2: 1996 Reaction to fire tests - Spread of flame - Part 2: Lateral spread on building products in vertical configuration. Geneva, 1996
39. ISO 9239-1: 1997 Reaction to fire tests - Horizontal surface spread of flame on floor-covering systems - Part 1: Flame spread using a radiant heat ignition source. Geneva, 1997
40. ASTM D 3806 Standard Test Method of Small-Scale Evaluation of Fire-Retardant Paints (2-Foot Tunnel Method). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1990
41. ČSN 73 0851 Stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí. Vydavatelství ÚNM, Praha 1990
42. ASTM D 4986-91 Standard Test Method for Horizontal Burning Characteristics of Cellular Polymeric Materials. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1991
43. ASTM D2859-93a Standard Test Method for Flammability of Finished Textile Floor Covering Materials. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1993
44. ASTM E970-93a Standard Test Method for Critical Radiant Flux Exposed Attic Floor Insulation Using a Radiant Heat Energy Source
45. NFPA 253 Critical Radiant Flux of Floor Covering Systems Using a Radiant Heat Energy Source. Quincy, MA
46. Orlíková, K., Danihelka, P., Kozubek, E.: Chemie hořlavin a produktů hoření. Skripta VŠB, Ostrava 1979
47. ČSN 44 1352 Tuhá paliva. Stanovení spalného tepla a výpočet výhřevnosti. Vydavatelství ÚNM, Praha 1980
48. ČSN 73 0864 Požárně technické vlastnosti hmot. Stanovení požární výhřevnosti hořlavých látek pevného skupenství. Vydavatelství ÚNM, Praha 1988
49. Rasbash, D. J.: Rogowski, Z. W. a Stark, G. W. V.: Properties of fires of liquids, Fuel, 31, p. 97-107
50. Tewarson, A.: Experimental evaluation of flammability parameters of polymeric materials. Flame Retardant Polymeric Materials, Vol. 3, p. 97-153, Plenum Press, New York and London 1982
51. ČSN 73 0824 Požární bezpečnost staveb. Výhřevnost hořlavých látek. ČNI, Praha 1992

52. ČSN 73 0862 Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot. Vydavatelství ÚNM, Praha 1981
53. Osvald, A., Krakovský, A., Čabounová, M.: Vplyv kalibračnej krivky na presnosť testovania horľavosti podľa ČSN 73 0862. In.: Zborník vedeckých prác DF - VŠLD 1989/1, ALFA Bratislava 1989, s 239-248
54. ČSN 73 0862 Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot. Změna B. Vydavatelství ÚNM, Praha 1987
55. Thornton, W.: The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds. Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. 33, 1917
56. Huggett, C.: Estimation of the Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption. Journal of Fire and Flammability, Vol. 12, p. 61-65, 1980
57. Hinkley, P., Wraight, H. and Wadley, A.: Rates of Heat Output and Heat Transfer in the Fire Propagation Test. Fire Research Note No. 709, Fire Research Station, Borehamwood, England 1968
58. Parker, W.: An Investigation of the Fire Environment in the ASTM E84 Tunnel Test. NBS Technical Note 948, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD 1977
59. Sensening, D.: An Oxygen Consumption Technique for Determining Contribution of Interior Wall Finishes to Room Fires. NBS Technical Note 1982, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD 1980
60. Parker, W.: Calculation of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. NBSIR 81-2427, NBS, Gaithersburg, MD 1982
61. Babrauskas, V.: Development of the Cone Calorimeter - A Bench-scale Rate of Heat Release Apparatus Based on Oxygen Consumption. NBSIR 82-2611, NBS, Gaithersburg, MD 1982
62. Babrauskas, V. and Mulholland, G.: Smoke and Soot Data Determination in the Cone Calorimeter. In Mathematical Modelling of Fires (ASTM STP983), American Society for Testing and Materials, p. 83-104, Philadelphia 1987
63. Jianmin, Q.: Prediction of Flame Spread Test Results from the Test Data of the Cone Calorimeter. 1990, 24 p., SP Report, 1990, ISBN 91-7848-245-3
64. NF/P 92-201 Essai par Rayonnement applicable aux matériaux rigides on rendus tels (matériaux de revêtement) de toute épaisseur et aux matériaux souples d'épaisseur supérieure à 5mm. AFNOR, France 1985
65. DIN 4102 - Brandstoffklasse B1 Prüfgrundsätze für schwerentflammbare Brandstoffe. Mitt. IfBt3, DDR 1984
66. Babrauskas, V.: Ten Years of Heat Release Research with the Cone Calorimeter. <http://www.blarg.net/~fsti/cone.html>
67. Flammability, Odor, Offgassing, and Compatibility Requirements and Test Procedures for Materials in Environments that Support Combustion (NHB 8060. 1c). Office of Safety and Mission Quality, National Aeronautic and Space Administration, Washington 1991
68. Standard Method of Test for Heat Release Rates for Upholstered Furniture Components or Composites and Mattresses Using an Oxygen Consumption Calorimeter (ANSI/NFPA 264A). National Fire Protection Association, Quincy, MA USA 1990
69. Fire and Toxicity Test Methods and Qualification Procedure for Composite Materials Systems Used in Hull, Machinery and Structural Applications inside Naval Submarines. MIL-STD-2031 (SH), Department of Defense, Philadelphia, PA USA 1991
70. ISO 5660-1 Fire Tests - Reaction to Fire - Part 1: Rate of Heat Release from Building Products - (Cone Calorimeter Method). Geneva, 1993
71. Gracik, T. D. and Long, G. L.: „Heat Release and Flammability of a Small Specimen Using Thermoanalytical Techniques“ in Fire Calorimetry. Proceedings from the 50th Calorimetry Conference, Gaithersburg, MD USA 1995
72. Gracik, T. D. and Long, G. L., Sorathia, U. A. K. and Douglas, H. E.: „A Novel Thermogravimetric Technique for Determining Flammability Characteristics of Polymeric

- Materials“. In Fire Calorimetry, Proceedings from the 50th Calorimetry Conference, Gaithersburg, MD USA 1995
73. Lyon, R. E., Walters, R. N. and Hughes, W. J.: „A Microscale Combustion Calorimeter for Determining Flammability Parameters of Materials“. In Annual Conference on Fire Research, BFRL/NIST Gaithersburg, MD USA 1996
  74. ISO/DIS 13927 Plastics - Simple heat release test using a conical radiant heater and thermopile detector. ISO/TC61/SC4, Geneva, 1998
  75. ISO 9705 Fire Tests - Full Scale Room Test for Surface Products. International Organization for Standardization, Geneva, 1992
  76. Annual Book of ASTM Standards, part 18 - Proposed Method for Room Fire Tests of Wall and Ceiling Materials and Assemblies. American Society for Testing and Materials, Philadelphia USA 1982
  77. Parker, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications“. Journal of Fire Sciences, Vol. 2, Sept./Oct. 1984
  78. ISO/TR 5924, Fire Tests - Reaction to Fire - Smoke Generated by Building Products (Dual-chamber test). International Organization for Standardization, TC91, Geneva, 1989
  79. [http://www.trd.sintel.no/units/civil/nbl/material/iso 9705.htm](http://www.trd.sintel.no/units/civil/nbl/material/iso%209705.htm)
  80. NT FIRE 032 - Testing of Upholstered Furniture in Natural Scale
  81. TB 133 Large Scale Furniture Calorimeter - California Bureau of Home Furnishing's
  82. ASTM E 1474-92 Standard Test method for Determining the Heat Release Rate of Upholstered Furniture and Mattress Components or Composites Using a Bench scale Oxygen Consumption Calorimeter. Philadelphia, PA1992
  83. UL 1056 Standard for Fire test of Upholstered Furniture. Underwriters Laboratory Inc., Northbrook, IL 1988
  84. Friedman, R.: Behaviour of fires in compartments. International Symposium on Fire Safety of Combustible Materials, Edinburg University 1995
  85. Nurbakhsh, S., Mikami, J. F. and Damant, G. H.: Full Scale Fire Tests of Upholstered Furniture with Rate of Heat Release Measurements, J. Fire Science, Vol. 9, p. 369-389, 1991
  86. Babrauskas, V. a Krasny, J. F.: Fire Behaviour of Upholstered Furniture (NBS Monograph 173). [U.S.] National Bureau of Standards 1985
  87. Parker, W. J., Tu, K.-M., Nurbakush, S. and Damant, G. H.: Furniture Flammability: An Investigation of California Technical Bulletin 133 Test. Part III: Full Scale Chair Burns (NISTIR 4375) [U.S.] National Bureau of Standards. 1990
  88. Parker, W. J., Tu, K.-M., Nurbakush, S. and Damant, G. H.: Chair Burns in the TB 133 Room, the ASTM Room, the Furniture Calorimeter and the Cone Calorimeter. In Fire Safety Science, Proc. of the Third Intl. Symp., Elsevier Applied Science, London 1991
  89. Van Hees, P.: Combustion Behaviour of Upholstered Furniture - The CBUF Project - Major Findings and Applications. URL <http://www.sp.se/fire/source/standard>
  90. Sundström, B.: Fire hazard and Upholstery - Fire Growths. In Fire Hazard, Testing, Materials and Products, A One-Day Conference, RAPRA Technology, Ltd., U. K. 1997
  91. Sundström, B.: Combustion Behaviour of Upholstered Furniture. URL: <http://www.sp.se/fire/source/research/cbuf.htm>
  92. Urbas, J., Luebbers, G. E.: The Intermediate Scale Calorimeter Development. Fire and Materials, Vol. 19, John Wiley and Sons 1995
  93. Hasemi, Y., Yoshida, M., Kikuchi, R., Yamamoto, E. and Tokaike, R.: Heat Release Rate Measured by the Cone Calorimeter and Intermediate Scale Electrical Radiant Panels. In Thirteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, March 13-20, 1996
  94. Van Mierlo, R.: Reaction to fire tests on building products exposed to the thermal attack by a single burning item (SBI test). Final OLG draft CEN/TC127 N1424, 1999

95. ČSN 73 0867 Požárně technické vlastnosti hmot. Stanovení třídy požárního nebezpečí skladovaných materiálů. ÚNM, Praha 1992
96. ČSN 73 0844 Požární bezpečnost - Sklady. ÚNM, Praha 1992
97. ČSN EN 1021-1 Nábytek - Hodnocení zápalnosti čalouněného nábytku - Část 1: Zdroj zapálení - žhnoucí cigareta. ČNI, Praha 1993
98. ČSN EN 1021-2 Nábytek - Hodnocení zápalnosti čalouněného nábytku - Část 2: Zdroj zapálení - ekvivalent plamene zápalky. ČNI, Praha 1996
99. ČSN 73 0861 Požární bezpečnost staveb. Zkoušení hořlavosti stavebních hmot. Nehořlavé stavební hmoty. ÚNM, Praha
100. ISO 1182: 1990 Fire tests - Building materials - Non-combustibility test. Geneva, 1990
101. ČSN 73 0823 Požárně technické vlastnosti hmot. Stupeň hořlavosti stavebních hmot. ÚNM, Praha 1984
102. Dudáček, A.: Organizačně technické a legislativní opatření na širší uplatnění automatizovaných signalizačně hasebních systémů. (Doktorandská disertační práce), VŠB - TU, Ostrava 1997
103. PrEN..... Fire Classification of Construction Products and Building Elements - Part 1. Classification Using Test Data from Reaction to Fire Tests. Document CEN/TC127, N1412
104. Ševěček, P. a kol.: Ekologické aspekty požárů a ekologická rizika zásahových jednotek. Výzkumná zpráva HS 260/92, VŠB Ostrava, Ostrava 1993

\*lit. ISO 5659-1(2):

Dvoukomorový test - ISO 5924 (Fire Tests - Reaction to Fire - Smoke generated by building products (Dual chamber test)).



---

**Nauka o materiálu**

Bohdan Filipi

Vydalo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, roku 2003

Vytisklo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství

1. vydání

Publikace neprošla jazykovou úpravou

**ISBN: 80-86634-11-6**