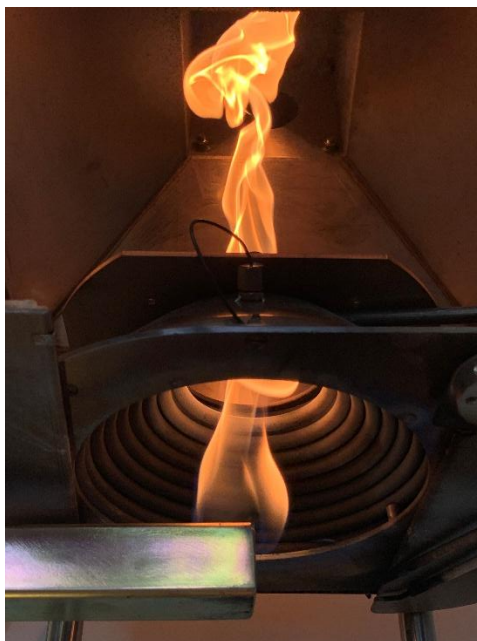


SDRUŽENÍ POŽÁRNÍHO A BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**JAKUB BACA
KAROL BALOG
ALEŠ DUDÁČEK
DANA CHUDOVÁ**

**APLIKACE POŽÁRNĚ
TECHNICKÝCH CHARAKTERISTIK
MATERIÁLŮ A KALCINACE
SDK DESEK PRO POTŘEBY
ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN POŽÁRŮ**



SDRUŽENÍ POŽÁRNÍHO A BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ

JAKUB BACA
KAROL BALOG
ALEŠ DUDÁČEK
DANA CHUDOVÁ

**APLIKACE POŽÁRNĚ
TECHNICKÝCH CHARAKTERISTIK
MATERIÁLŮ A KALCINACE
SDK DESEK PRO POTŘEBY ZJIŠŤOVÁNÍ
PŘÍČIN POŽÁRŮ**

EDICE SPBI SPEKTRUM

SDRUŽENÍ POŽÁRNÍHO A BEZPEČNOSTNÍHO INŽENÝRSTVÍ



© Baca J., Balog K., Dudáček A., Chudová D., 2025

ISBN 978-80-7385-281-8

Tato kniha, ani žádná její část nesmí být kopírována, rozmnožována, ani jinak šířena bez předchozího písemného souhlasu vydavatele.

Veškerá práva autorů a Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. jsou vyhrazena.



Příjemci podpory:

Poskytovatel:

**Název projektu Inovace a rozvoj nástrojů v oblasti zjišťování příčin vzniku
požárů s identifikačním kódem VJ01010046**

**Aplikace požárně technických charakteristik materiálů a kalcinace SDK desek
pro potřeby zjišťování příčin požárů**

Jakub Baca, prof. Ing. Karol Balog, Ph.D., prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček,
Ing. Dana Chudová, Ph.D.

Vydalo Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s. v Ostravě, roku 2025.

1. vydání

Publikace neprošla jazykovou úpravou

ISBN 978-80-7385-281-8

Úvod

Zjišťování příčin požárů představuje komplexní a často velmi náročný proces, který vyžaduje systematický přístup, detailní znalosti z oblasti požární bezpečnosti a využití moderních vědeckých metod. Jedním z klíčových kroků v procesu zjišťování příčin požárů je studium požárně technických charakteristik materiálů tedy jejich vlastností, které popisují chování materiálů při tepelném působení. Tyto charakteristiky, zahrnující například teplotu vznícení, rychlost šíření plamene, hořlavost či uvolňování energie, mohou sehrát zásadní roli při identifikaci místa vzniku požáru a stanovení postupu jeho šíření.

Významnou částí této knihy je využití kalcinace sádrokartonových (dále jen „SDK“) desek jako identifikace místa vzniku požáru na základě teplotního zatížení požárem. Kalcinace SDK desek je fyzikálně chemický proces, při němž v důsledku vysoké teploty dochází k dehydrataci sádrového jádra, což zanechává vizuálně a materiálově identifikovatelné změny. Tyto změny lze využít jako orientační ukazatel intenzity a trvání tepelného působení v dané části požářiště.

Publikace se zaměřuje na propojení teoretických poznatků s praktickým využitím požárně technických charakteristik a je určena především odborníkům zabývajícím se požární prevencí, vyšetřováním požárů, soudním znalectvím v oblasti požární ochrany a souvisejícími technickými obory. Cílem je čtenáři poskytnout přehled současných metodik, experimentálních postupů i limitů při aplikaci těchto poznatků na skutečné případy a ukázat, jak mohou přispět ke spolehlivějšímu a přesnějšímu určení příčin požárů.

Každý požár na území České republiky eviduje příslušný Hasičský záchranný sbor kraje (dále jen „HZS“) a stanovuje jeho příčinu vzniku požáru. Za správnost vyjádření příčiny vzniku požáru je zodpovědný vyšetřovatel požáru (dále jen „VP“). Jedná se o odborníka, který má za úkol objasnění okolností vzniku požáru, podle charakteristických stop šíření požáru stanoví samotnou oblast, kde se nachází místo vzniku požáru a poté samotné místo vzniku požáru, tzv. kriminalistické ohnisko požáru. Tato práce vyžaduje hluboké znalosti z oblasti požární bezpečnosti, fyziky, chemie, kriminalistiky a právních předpisů. Práce vyšetřovatele zahrnuje několik klíčových fází, z nichž jedna z nejdůležitějších je ohledání místa požáru. Ohledání místa požáru je činnost, jejíž výsledkem je zjištění místa vzniku požáru a stanovení samotné příčiny vzniku požáru nebo vyšetřovatelských verzí, které jsou dále prověřovány. Při vyšetřování příčin požárů se také provádí rozhovory se svědky a vyhodnocují se všechny dostupné dokumenty související s místem požáru, například stavební plány, rozmístění elektroinstalace, a také dokumentace požární ochrany. HZS zajišťuje nepřetržitě vyšetřování příčin vzniku požáru prostřednictvím VP. Spolu s vyšetřováním je nepřetržitě zajištěna služba expertízní skupiny a chemické laboratoře.

Ohledání požářiště

Ohledání místa požáru za účelem stanovení jeho příčiny, je neopakovatelná činnost, která se musí provádět odpovědně, precizně a bez chyb. Požářiště je považováno za místo činu, proto musí být oblast přísně kontrolována, aby byly uchovány důkazy a přístup byl umožněn pouze oprávněným osobám. Oblast se vymezuje v těch místech, kde bylo zaznamenáno bezprostřední hoření a také bezprostřední ohrožení. Ohledání je důležitý důkazní prostředek, ze kterého lze činit závěry na podkladu zkoumání předmětu ohledání. Z praxe VP je známo, že ohledání je náročná činnost jak z technického, tak časového hlediska.

Cílem ohledání požářiště je nalezení charakteristických stop šíření požáru a jiných věcných důkazů, kdy na těchto podkladech je možné stanovit místo vzniku požáru tzv. kriminalistické ohnisko požáru a samotnou příčinu požáru. Zjištěné stopy, předměty a jiný důkazní materiál, který může mít vztah k příčině vzniku požáru je nutné řádně zdokumentovat nebo odborně odebrat. Existuje mnoho ukazatelů, které lze použít k určení možného původu. Oblast, ve které začal požár, bude obecně hořet po delší čas, což bude oblast s nejvyšší požárem způsobenou degradací. Požáry mají tendenci hořet vzhůru, proto se pravděpodobně místo vzniku požáru nachází na spodním místě požářiště. Z tohoto předpokladu nemůže vždy VP vycházet, protože požáry se mohou šířit všemi směry s ohledem na druh paliva a podmínek hoření.

Požární účinky na určité materiály mohou indikovat směr požáru. Vzhledem k tomu, že oheň hoří nahoru a z objektu směrem ven, mohou se na povrchu v blízkosti požáru nacházet charakteristické vzory. Jedním ze vzorů, který se může na požářišti vyskytnout je tzv. V vzor, kdy konec V směřuje k bodu, kde došlo k samotnému vzniku požáru. Větrání však může ovlivnit cestu nebo tvar vzorů. Požáry skla nebo plastů mají tendenci tavit se ve směru požáru, takže tavení těchto materiálů může sloužit jako směrové ukazatele.

Strukturální poškození budovy, lze také použít k lokalizaci místa vzniku požáru. V některých případech se budovy mohou zhroutit nebo oblast, ve které vznikl požár, je nejvíce znatelně degradována. Stejně tak okna a stropní konstrukce pravděpodobně selhávají nejdříve v místech, které se nacházejí těsně v okolí místa vzniku požáru. Nicméně, to není v žádném případě přesná metoda určení místa vzniku, protože zhroutení a poškození budovy je ovlivněno četnými faktory, nejen samotným požárem. V podstatě je možné určit oblast, ve které byl iniciován požár na základě spuštění kouřových a požárních hlásičů. Hlásiče mohou být využity jako forma záznamu. První spuštěný hlásič naznačuje, že požár pravděpodobně začal v této místnosti. Pořadí, ve kterém byly spuštěny poplachy, lze dále použít k určení cesty šíření požáru. Tyto informace však nejsou u všech požářišť k dispozici.

Při vyšetřování požárů může docházet k systematickému odstraňování nečistot z požářiště za účelem zjištění možného původu požáru. Po odstranění nečistot a dalších důkazů může být místo lehce vyčištěno, aby byly patrné vzory po účinku požáru. V závislosti na rozsahu poškození požárem může být požářiště zničeno, zvláště v případě, že oheň působil po dlouhou dobu. Požářiště může být také zničeno nedbalým vedením zásahu bez ohledu na to, že po hasebním zásahu nastupují kolegové, kteří mají za úkol objasnit příčinu vzniku požáru.

Růst požáru, ať už rychlý nebo pomalý, a jeho teplota může být naznačena poškozením na místě. Požární poškození skla může také naznačovat teplotu hoření. Rychlé zvýšení teploty může způsobit zřetelné rozbití skla, zatímco velmi pomalé nahromadění tepla má tendenci způsobovat, že sklo se spíše změkčuje, než praskne. Při ohledávání je důležité vzít v potaz počínání hasičů. Součástí vyšetřování jsou také analýzy vzorků či materiálů nacházejících se na místě požáru, technologických procesů nebo záznamů bezpečnostních zařízení. V rámci šetření vyšetřovatel požárů spolupracuje s hasiči, policií a

dalšími znalci. Získané důkazy slouží k identifikaci možného zavinění, ať už z nedbalosti či úmyslného jednání nebo technickou závadu.

Po shromáždění všech důkazů a informací VP zpracuje závěrečnou zprávu (odborné vyjádření), která obsahuje podrobný popis příčiny vzniku požáru, jeho šíření, případně identifikuje možné nedostatky v prevenci nebo bezpečnostních opatřeních. Tato zpráva slouží nejen k prevenci budoucích požárů, ale také jako důkazní materiál pro případná správní nebo soudní řízení. V rámci požární prevence je práce vyšetřovatele požárů klíčová pro provázání stavební prevence zajišťující požární bezpečnost ve fázi výstavby nebo změn užívání staveb a kontrolní činnosti, které zajišťuje kontrolu dodržování předpisů o požární ochraně v průběhu užívání staveb.

Samotný sběr informací a prvotní statické ohledání může započít už v průběhu hasebních prací jednotky požární ochrany. Sledováním průběhu hasebního zásahu je možné získat poznatky a údaje, které by byly po likvidaci požáru jen velmi těžce zjistitelné, nebo se poté nedají zjistit vůbec. Z tohoto důvodu je důležité včasný příjezd VP na místo požáru. VP může spolu s velitelem zásahu a hasiči koordinovat postup a činnost na místě požáru. Zejména v době likvidace požáru jednotkami HZS, které v rámci své činnosti odstraňují zbylý hořlavý materiál z požářiště a rozebírají stavební konstrukce. Před takovou činností, je žádoucí pořídit fotodokumentaci z místa a posbírání všech stop, které později mohou vést ke zjištění příčin vzniku požáru. Dále je v počátku a průběhu hasebního zásahu také zvýšená pravděpodobnost toho, že na místě požáru se nacházejí všichni svědci požáru, kteří mohou mít důležité informace vedoucí ke stanovení samotné příčiny vzniku požáru. Ohledání požáru můžeme rozdělit na dvě fáze: Statické a dynamické. Tyto fáze jsou vykonávány VP, který v určitých případech spolupracuje s Policií České republiky, kteří v případě podezření z trestné činnosti vedou vyšetřování požáru. VP spolupracuje s Policií České republiky (dále jen „PČR“) při vyšetřování těchto případů. Poskytuje odborné vyjádření, které pomůže k objasnění a orgány PČR rozhodují, jak dále postupovat v daném případě, a tedy zda případ předají ke správnímu řízení pod agendou HZS nebo případ odloží či zahájí stíhání pro trestný čin. Dále může být k šetření požáru přizván například Technický ústav požární ochrany, Institut ochrany obyvatelstva nebo jiní experti z různých oborů jako jsou například experti PČR z odvětví elektrotechniky nebo chemie. Policie České republiky pak může přibrat další znalce za účelem zpracování znaleckých posudků.

Statické ohledání

VP nemanipuluje s věcmi ani nepoškozuje požářiště svým počínáním. Pouze dokumentuje, jak požářiště vypadá pomocí fotografií, nebo dostupným vybavením pro dokumentaci. VP se snaží zachytit viditelné ohniskové příznaky a charakteristické stopy šíření požáru, které poukážou možné šíření požáru a pomůžou stanovit místo, kde probíhalo nejintenzivnější hoření a stanovit oblast, kde došlo k samotnému vzniku požáru. Dokumentací se dále snaží zachytit rozmístění předmětů, materiálů a zařízení nebo se na základě svědeckých informací svědků nebo zasahujících hasičů snaží zjistit jejich přesnou polohu před samotným vznikem požáru či před hasebním zásahem, jelikož z důvodu vedení hasebního zásahu nebo cizího zavinění mohlo dojít k přemístění. Postup statického ohledání se samozřejmě liší požár od požáru, ale například při stavebního objektu je nutné zdokumentovat okna a dveře a zjistit, zda-li došlo k jejich rozbití v důsledku činností před požárem, v přímé souvislosti s účinky požáru nebo z důvodu vedení hasebního zásahu. VP dále v objektech musí zjistit z jakého důvodu došlo k vypnutí elektrické instalace, pokud tato situace nastala. V tomto případě zjišťuje vypnutí jednotlivých jističů a důvod jejich vypnutí. Tato informace může být nápomocná pro stanovení iniciátoru požáru nebo tato skutečnost mohla nastat v důsledku účinků požáru. Také se mohlo jednat o počínání hasičů, kteří z důvodu hasebního zásahu provedli vypnutí elektrické energie. Důležité je také zaznamenat povětrnostní podmínky, protože teplota a vítr mohou mít vliv na požár, pokud jde o šíření

a směr požáru. To platí zejména, pokud se požár nachází ve venkovních prostorech. Dále se může zabývat přítomností nebezpečných či hořlavých látek, které se nachází nebo nacházely v místě požářiště. V této fázi se také stanovuje další postup ohledání místa požáru. Dále může vzejít potřeba dokumentace požáru pomocí přístroje Spheron, který umožní rychlé a efektivní zachycení prostoru včetně 3D záznamu, fotografií nebo jiných důležitých údajů. Přístroj dále obsahuje funkci LiDAR nebo laserové měření, které může být poté využito pro měření vzdáleností, analýzu poškození a další. Touto technologií disponuje např. Technický ústav požární ochrany, který může být na místo povolán. V současné době VP provede dokumentaci místa požáru pomocí 360° kamery, která je významným pomocníkem pro následný ucelený náhled na místo požáru po ohledání. Snímky pořízené 360°kamerou lze aplikovat do aplikace Jestřáb, která po zpracování umožňuje virtuální prohlídku místa požáru. Takto zachycené místo požáru, ale nenahradí sofistikovanější techniku typu Spheron, jelikož dochází ke zkreslení místa požáru a nelze provádět pomocí těchto snímků měření vzdáleností. Z důvodu nestability objektu lze provést statické ohledání pomocí dronu, který může vniknout do prostoru, kde by hrozilo nebezpečí pro VP a pořídit jedinečné fotky použitelné k dokumentaci místa požáru.

Dynamické ohledání

Jedná se o stádium navazující na statické ohledání. K dynamickému ohledání se přistupuje tehdy, pomínou-li veškeré okolnosti, které by znemožňovali fyzickou manipulaci s věcmi na požářišti a zároveň došlo k důkladnému zachycení místa požáru pomocí dostupných a požadovaných metod. Dynamické ohledání je založeno na manipulaci s věcmi v místě požáru a rozebírání konstrukcí, které překázejí v zájmových prostorech a jedná se o nezbytnost pro stanovení místa vzniku požáru a samotné příčiny vzniku požáru. Vrstva po vrstvě se odstraňují materiály, popel a zbytky, přičemž se zaznamenávají stopy naznačující možné ohnisko požáru, shromažďují důkazní materiály a relevantní předměty. Správné dynamické ohledání má za cíl dostat se tzv. na podlahu, zejména jednoznačně v oblasti, kde bylo ohledáním stanovena oblast vzniku požáru (širší perimetr). Pokud je to nutné, odebírají se vzorky pro další analýzy a odborné zkoumání. Každý nalezený důkaz či odebraný vzorek musí být pečlivě zdokumentován včetně přesného místa nálezů.

Při dynamickém ohledání místa požáru dochází k fyzické manipulaci s předměty. Vyšetřovatelé začínají s oblastmi, které jsou nejméně degradované, což jim umožňuje později se vrátit do místa vzniku požáru, které bývá obvykle nejvíce zasaženo. Opomenuté úkony na začátku nebo během šetření se těžko dohánějí a mohou chybět při určování příčin požáru.

Pokud jsou během šetření nalezeny stopy naznačující úmyslné založení požáru, je dynamické ohledání odloženo do příjezdu služebního psa PČR, který je specializovaný na vyhledávání akceleračních hoření, a chemického experta, kteří provádí prohlídku místa a asistují během dynamického ohledání.

1 Forenzní vědy

Forenzní vědy (anglicky *forensic sciences*) jsou vědecké disciplíny, které se využívají při vyšetřování trestných činů a dalších právních sporů. Jejich cílem je analyzovat, interpretovat a prezentovat důkazy tak, aby mohly být použity při soudních řízeních.

Základními charakteristikami forenzních věd je, že spojují vědecké metody s právními otázkami. Používají se především v kriminalistice a při vyšetřování příčin mimořádných událostí. Důkazy, na kterých je založeno stanovení závěru musí být přesné, ověřitelné a přijatelné u soudu.

Forenzní vědy se uplatňují u policie a v kriminalistických laboratořích, v soudním znalectví, advokacii a státním zastupitelství, u bezpečnostních složek a na akademických a výzkumných pracovištích.

Forenzní vědy při vyšetřování příčin požárů

Vyšetřování požárů je jednou z oblastí, kde se forenzní vědy uplatňují velmi konkrétně a prakticky. Forenzní vyšetřování požáru je systematický a metodicky vedený proces, jehož cílem je zjistit příčinu, průběh a místo vzniku požáru. Vyšetřovatelé při něm využívají znalosti z oblasti požární dynamiky, materiálového inženýrství, kriminalistiky a analytické chemie.

Vyšetřování se obvykle dělí do několika fází:

Zajištění místa požáru

Po likvidaci požáru je nezbytné fyzicky zabezpečit požářiště tak, aby nebyla porušena kontinuita důkazního materiálu. V této fázi se spolupracuje s jednotkami požární ochrany, které informují o průběhu zásahu, Policií ČR, která místo může uzavřít a střežit jako místo činu a případně se přivou soudní znalci či specialisté z oboru elektro, stavebnictví nebo chemie. Cílem je zabránit vstupu nepovolaných osob, kontaminaci důkazů nebo neúmyslné manipulaci s materiálem, které mohou být klíčové pro pozdější analýzu.

Vizuální inspekce a dokumentace

VP provádí systematickou vizuální prohlídku požářiště, při níž zaznamenává: intenzitu poškození různých konstrukcí a materiálů, směr šíření požáru (např. pomocí V-vzorů na stěnách, úrovně kalcinace materiálů apod.), stopy činnosti hořlavých kapalin, neobvyklé spaliny nebo zbytky elektrických zařízení, možné známky narušení konstrukce nebo manipulace, které by mohly souviset s úmyslným zapálením.

Používají se různé nástroje pro dokumentaci, jako jsou digitální fotoaparáty, termokamery, 3D skenery, drony nebo schematické nákresy, aby bylo možné později provést přesnou analýzu.

Odběr a uchování vzorků

V místech, která vykazují známky možného úmyslného zapálení (např. neobvyklé spalovací vzorce, vysoká míra destrukce v izolovaném prostoru), dochází k cílenému odběru vzorků. Odebírají se například: zbytky z podlahy, kobereců nebo stěn, kde může být přítomen akcelerant (např. benzín), kabeláž, zásuvky či pojistky, kde mohlo dojít ke zkratu, zbytky stavebních materiálů (včetně sádkkartonu) pro analýzu stupně poškození, kalcinace nebo změny materiálové struktury.

Vzorky musí být uloženy v nepropustných kontejnerech (např. kovových), řádně označeny a dokumentovány dle pravidel důkazního řetězce (tzv. *chain of custody*).

Forenzní laboratorní analýza

Odebrané vzorky jsou podrobeny instrumentálním metodám analýzy, nejčastěji je to plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií (GC-MS) pro detekci přítomnosti hořlavých kapalin, FTIR spektroskopie pro identifikaci změn ve složení materiálů, elektronová mikroskopie pro hodnocení struktury kalcinovaných částí (např. sádrokarton nebo elektroinstalace), termická analýza (např. TGA, DSC) ke stanovení rozkladu a ztráty vody nebo jiných těkavých složek.

V případě podezření na elektrickou příčinu požáru se zkoumají komponenty elektroinstalace na stopy obloukového výboje, zkratu, přetížení nebo chybné instalace.

Stanovení místa a příčiny vzniku požáru

Na základě kombinace terénních zjištění a laboratorních výsledků se provádí rekonstrukce průběhu požáru a určuje se pravděpodobné ohnisko (typicky oblast s největší destrukcí, výraznou kalcinací nebo stopami urychlovačů), hodnotí se možné zdroje zapálení (otevřený plamen, elektrické zařízení, chemická reakce), prověřují se časové souvislosti (např. pomocí svědeckých výpovědí, záznamů z kamer nebo časových údajů z požárních čidel) a posuzuje se případná přítomnost cizího zavinění nebo nedbalosti.

Důležitým podpůrným faktorem bývá analýza materiálových změn, jako je právě stupeň kalcinace sádrokartonu, která pomáhá určit teplotní zatížení a délku působení tepla v konkrétní části prostoru.

Závěrečná dokumentace a znalecký posudek

Závěrečnou fází vyšetřování je vypracování odborného vyjádření, které obsahuje: podrobný popis nálezů z místa požáru, výsledky laboratorních zkoušek a interpretaci, fotografie, plány a případné 3D modely, formulaci pravděpodobné příčiny požáru a další možné alternativy (vyloučené i nevyloučené) a celkové zhodnocení, zda mohlo jít o úmyslné zapálení nebo technickou závadu.

V případě soudního řízení mohou být zpracovány znalecké posudky prostřednictvím znalce z oboru případně znaleckým ústavem, který slouží jako důkazní prostředek.

2 Vlastnosti materiálů z hlediska možnosti iniciace a hoření materiálů a šíření požáru

Šíření požáru je ovlivněno vlastnostmi materiálů jako jsou fyzikálně chemické vlastnosti nebo požárně technické charakteristiky. Jejich množství a rozmístění výrazně určuje směr a rychlost šíření. Pro objektivní posouzení příčiny vzniku požáru musí být získán přehled o předmětech a jejich materiálech, které se v oblasti zasažené požárem nacházely. Poskytnuté informace slouží k analýze podmínek vedoucích ke vzniku požáru, přičemž zohledňují fyzikálně chemické vlastnosti jednotlivých látek a materiálů. Slouží také k objasnění průběhu požáru, jeho šíření a následků, k určení pravděpodobného místa vzniku a ověření přítomnosti konkrétních materiálů v daném prostoru. Stopy znečištění na konstrukčních prvcích, rozsah poškození ohněm a nalezené zbytky mohou naznačit, zda a v jakém množství se v objektu určité látky skutečně nacházely. Identifikace látky může být obtížná. V těchto blíže neurčitých a přesně nestanovených případech, je možné danou látku odebrat a odeslat na požárně technickou expertízu do Technického ústavu požární ochrany.

2.1 Požárně technické charakteristiky

Z hlediska chemických vlastností nejvíce ovlivňuje šíření požáru jejich chemická stabilita a obsah kyslíku. Z fyzikálního hlediska je to skupenství hořlavé látky, stupeň dělitelnosti a směsný poměr. Z toho vyplývá, že největší rychlost šíření budou mít plynné látky. Stupeň dělitelnosti je neméně důležitý. Určitě jinou rychlostí odhořívá dřevěný trám než dřevěné hobliny. Směsný poměr udává stupeň promísení hořlavé látky s oxidačním činidlem. Čím větší je povrch látky přístupný hoření, tím je hoření rychlejší. Rychlost hoření usazeného prachu je diametrálně odlišná od rychlosti hoření rozvířeného prachu. Znalost požárně technických charakteristik látek v místě požářiště je důležitá také pro zasahující hasiče z pohledu taktiky vedení zásahu. Zejména nevhodně použité hasivo může napáchat velké škody. Například pro hašení hořlavé kapaliny nepolárního charakteru, se nemůže použít voda.

Požárně technická charakteristika je dle vyhlášky č. 246/2001 Sb., o požární prevenci ve znění pozdějších předpisů vlastnost látky vyjádřená měřitelnou hodnotou nebo stanovená na základě měřitelných hodnot více dílčích vlastností anebo jev vystihující chování látky při procesu hoření nebo s ním související.

2.2 Metody vhodné pro stanovení PTCH pro využití při vyšetřování příčin požáru

Při vyšetřování požáru může VP velmi pomoci znalost požárně technických charakteristik (PTCH) materiálů, které byly zdrojem hoření anebo se nacházely v jeho blízkosti. Nejčastěji využívanými PTCH při vyšetřování požáru je teplota vzplanutí nebo teplota vznícení. Existuje však celá řada dalších PTCH, které lze pro potřeby vyšetřování požárů využít.

Stanovení vznětlivosti

Teplota vzplanutí je nejnižší teplota vzduchu, proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu. Teplota vznícení je nejnižší teplota vzduchu, proudícího kolem vzorku, při které dojde k samovolnému zapálení vzorku nebo produktů jeho rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje. Zkušebními zařízením pro stanovení obou teplot je elektrická odporová pec podle Setchkina – viz Obrázek 2.1.



Obrázek 2.1 Setchkinova pec

Teplota vzplanutí a teplota vznícení tedy udávají schopnost materiálů zapálit se při zahřívání za zvýšených teplot. Tato schopnost bývá nazývána zapalitelností anebo také vznětlivostí. Vznětlivost se stanoví dle ČSN 64 0149 Stanovení vznětlivosti materiálů.

Test žhavou smyčkou

Další metodou stanovení vzplanutí případně šíření hoření je zkouška žhavou smyčkou, která je vyobrazena na Obrázek 2.2 Je to zkouška používaná hlavně v oblasti elektrických zařízení, přístrojů a strojů, plastových dílů a dalších nevodivých materiálů, které mohou být vystaveny tepelnému namáhání během provozu. Cílem zkoušky je ověřit odolnost materiálů vůči vznícení a šíření plamene, pokud jsou vystaveny vysoké teplotě – např. při poruše elektrického zařízení. Test simuluje, jak by se materiál choval, pokud by přišlo k přehřátí vodičů nebo kontaktu s horkým předmětem.

Zkouška probíhá tak, že se žhavá smyčka (nejčastěji z nikel-chromové slitiny) ohřeje na definovanou teplotu (obvykle 550 °C, 650 °C, 750 °C nebo 850 °C podle normy a účelu) a přitlačí se na 30 sekund k testovanému vzorku stanovenou silou. Přitom se sleduje, zda materiál vzplane nebo doutná, doba hoření materiálu po odstranění smyčky, případně zda odkapávající částice zapálí podložku ze stanoveného papíru pod vzorkem. Výsledkem zkoušky je, zda materiál vyhoví či nevyhoví na základě jeho vzplanutí nebo zda plamen zhasne do 30 s po odstranění žhavé smyčky, a nezačne hořet podložka umístěná pod vzorkem.



Obrázek 2.2 Zařízení pro zkoušení žhavou smyčkou

Zkouška probíhá podle normy ČSN EN 60695-2-10 až 13 (nebo IEC 60695-2-x). V praxi se tento test využívá v elektrotechnickém průmyslu (např. u zásuvek, krytů, rozvaděčů, spotřebičů) a v automobilovém průmyslu pro plasty v interiéru.

Kalorimetrické metody

Jedním z klíčových parametrů ovlivňujících hoření materiálu je množství tepla uvolněného při jeho spalování, tzv. výhřevnost nebo spalné teplo. Tato hodnota, udávaná obvykle v jednotkách MJ/kg, vyjadřuje množství energie, které se uvolní při úplném spálení daného množství materiálu.

- **Stanovení spalného tepla** – spalné teplo má zásadní vliv na intenzitu požáru, jeho dynamiku a rychlost šíření, a rovněž významně ovlivňuje požární zatížení v prostoru. Například dřevo má spalné teplo přibližně 18 MJ/kg, zatímco plasty, jako je polyethylen nebo polystyren, dosahují hodnot až kolem 40–45 MJ/kg, což ukazuje na jejich vyšší energetický potenciál při hoření. Vyšší hodnota spalného tepla znamená, že materiál může přispět k rychlejšímu rozvoji požáru a vyšší teplotě v zasaženém prostoru. Spalné teplo se stanoví podle ČSN EN ISO 1716 – Reakce na oheň – Stanovení spalného tepla, kdy se k měření využívá kyslíkový kalorimetr (viz Obrázek 2.3).



Obrázek 2.3 Kyslíkový kalorimetr

- **Metoda kónického kalorimetru** – celkové uvolněné teplo, ale také průběh uvolňování tepla resp. rychlost uvolňování tepla (HRR) lze získat tzv. metodou kónické kalorimetrie v souladu s ČSN ISO 5660-1 – Reakce na oheň – Měření rychlosti uvolňování tepla, produkce kouře a hmotnostního úbytku pomocí kónické kalorimetrie. Metoda (viz Obrázek 2.4) je užívána především pro stanovení rychlosti uvolňování tepla při tepelném namáháním hořlavých materiálů. Standardně se zkouší vzorky o velikosti 10 x 10 cm a tloušťce 6 cm při dvou hustotách tepelného toku (35 kW/m^2 a 50 kW/m^2). Při měření je možné získat také další charakteristiky, které přibližují průběh hoření od zapálení vzorku až po ukončení zkoušky např. úbytek hmotnosti, optickou hustotu kouře, produkci spalin zejména oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého případně dalších sloučenin. Přestože tato metoda slouží spíše jako vstup pro modelování šíření požáru rámci projektování stavby, lze ji využít také při vyšetřování požáru. HRR je klíčovým parametrem, protože charakterizuje intenzitu hoření materiálu v čase. VP může na základě HRR odhadnout, jak jednotlivé materiály mohly přispět k rozvoji požáru, a který materiál k tomu nejvíce přispěl.



Obrázek 2.4 Kónický kalorimetr

- **Mikrokalorimetr** – pokud jsou k dispozici pouze malá množství vzorků, lze pro stanovení spalného tepla a průběhu uvolňování tepla použít spalovací mikrokalorimetr (viz Obrázek 2.5). Přístroj pracuje na principu měření spotřeby kyslíku při spalování velmi malého vzorku (1–20 mg) přičemž vyhodnocuje spalné teplo, rychlost uvolňování tepla a další parametry, obdobně jako u kónické kalorimetrie avšak pod řízenými podmínkami. Metoda odpovídá řadě zahraničních standartů např. ASTM D7309 – Standard Test Method for Determining Flammability Characteristics of Plastics and Other Solid Materials Using Microscale Combustion Calorimetry. Spalovací mikrokalorimetr je tedy vhodné použít v okamžiku, kdy není možné použít klasickou kónickou kalorimetrii z důvodu malého množství vzorku. Mikrokalorimetrie umožňuje např. porovnat neznámý vzorek z místa požáru s databází známých materiálů. Tím lze zpětně identifikovat materiál a jeho pravděpodobný původ. Ve spojení s dalšími metodami (např. FTIR, TGA, GC-MS) poskytuje mikrokalorimetr rychlé, kvantitativní informace o hořlavosti materiálu. Je vhodný zejména pro screening podezřelých vzorků, které se následně analyzují podrobněji.



Obrázek 2.5 Mikrokalorimetr

Termická analýza

V oblasti vyšetřování příčin požárů je důležitým a často podceňovaným nástrojem termická analýza (viz Obrázek 2.6). Termická analýza je soubor analytických metod, které sledují změny fyzikálních nebo chemických vlastností materiálu při jeho zahřívání.

Nejpoužívanějšími technikami jsou:

- TGA (termogravimetrická analýza)
- DSC (diferenciální skenovací kalorimetrie)
- DTA (diferenciální termická analýza)
- případně TMA/DTMA (termomechanická analýza).

TGA sleduje změnu hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě, zpravidla při zahřívání v řízené atmosféře (vzduch, dusík, kyslík). Díky TGA lze stanovit, v jakých teplotních intervalech dochází ke ztrátě hmotnosti – např. vypařování vody, uvolnění těkavých látek, rozklad polymerů. Všechny tyto teploty jsou specifické pro různé materiály a mohou přispět k identifikaci.

Po úplném rozkladu materiálu většinou zůstává tzv. reziduum neboli zbytek. Nejčastěji se jedná o plniva, saze, anorganické příměsi, retardéry hoření apod. Na základě velikosti rezidua lze kvantifikovat podíl hořlavých nebo nehořlavých složek. Protože TA může probíhat v různých atmosférách, může se jejím prostřednictvím rozlišit mezi tepelným rozkladem a oxidací.



Obrázek 2.6 Zařízení METTLER TOLEDO TGA/DCS 2

DSC měří, kolik tepelné energie materiál absorbuje nebo uvolní při zahřívání nebo ochlazování. Porovnává se vzorek s referenční látkou, přičemž se sledují tepelné toky v závislosti na teplotě nebo čase. Pomocí DSC lze zjistit skelný přechod polymerních materiálů, bod tání a krystalizace, exotermní a endotermní reakce. Při VP může termická analýza sloužit zejména k identifikaci typu polymerního materiálu na základě teploty skelného přechodu, bodu tání a exotermických rozkladů. Dále také k posouzení tepelného poškození vzorku např. pokles teploty skelného přechodu může naznačit, že byl materiál vystaven vysoké teplotě, i když není zcela zuhelnatělý. Určení, zda došlo ke změně struktury materiálu např. po požáru může amorfnní část částečně překrystalizovat.

Pro stanovení termické analýzy lze využít těchto technických předpisů:

- ASTM E1131 – Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry
- ASTM D3418 – Standard Test Method for Transition Temperatures of Polymers by DSC
- ČSN EN ISO 11357 – DSC analýza plastů (v několika dílech)
- ČSN EN ISO 11358 – TGA analýza plastů

Metody založené na šíření plamene

Šíření plamene po povrchu materiálů je podstatným kritériem při hodnocení požární bezpečnosti stavebních a průmyslových materiálů. Šíření plamene po povrchu materiálů lze také využít při zjišťování příčiny požárů, kdy se řeší, jak rychle se požár šířil po daném materiálu. Testů, kterými se hodnotí schopnost materiálů šířit plamen, je relativně hodně jelikož tyto metody nejsou univerzální. Jednotlivé zkušební metody se zabývají testováním například textilních materiálů, stavebních hmot, plastů, konstrukčních materiálů, podlahových krytin případně deskových materiálů.

Příkladem zkoušek hořlavosti deskových materiálů je dvoustopový tunelový test dle ASTM D 3806 Standard Test Method for Measuring Ignition and Flame Spread of Plastics in a Two-Foot Tunnel Furnace, kterým se stanovuje index šíření plamene, případně rychlost šíření plamene po povrchu materiálu. Index šíření plamene se určuje z naměřené vzdálenosti a času šíření plamene. Vyjadřuje se jako číselná hodnota bez jednotky, která umožňuje srovnání materiálů. Zkušebním zařízením je dvoustopový tunel – viz Obrázek 2.7, který vznikl jako zmenšený model velkorozměrové zkoušky ASTM E84 v poměru 12,5:1 u něhož byl snížen tepelný výkon hořáku a byl nakloněn. Metoda dvoustopového tunelu umožňuje odhadnout, jak by se materiál mohl chovat při větším měřítku zkoušky. Neposkytuje přímou klasifikaci dle požárních tříd, ale slouží jako předběžné srovnání.



Obrázek 2.7 Dvoustopový tunel

Další zkušební metodou, kterou lze aplikovat při vyšetřování požáru je zkouška podlahových krytin dle ISO 9239-1: Reakce podlahových krytin na oheň: Stanovení hořlavosti pomocí zářiče (Reaction to fire tests: Flooring Part 1: Determination of the burning behaviour using a radiant heat source, viz Obrázek 2.8). Tato zkušební metoda je navržena pro simulaci požáru v chodbách a únikových cestách (kde podlahy často přispívají k šíření ohně) a stanovení šíření plamene a produkce kouře podlahových krytin při vystavení tepelnému toku z radičního panelu. Během zkoušky se sleduje šíření plamene (měřeno v čase jako vzdálenost od zapálení) a produkce kouře (pomocí optického systému). Výsledkem zkoušky je pak kritický tepelný tok, což je hodnota v kW/m^2 , pod níž se již plamen nešíří dál. Obecně lze říci čím vyšší kritický tepelný tok, tím méně je materiál hořlavý. Během této zkoušky lze měřit vývoj kouře prostřednictvím optické hustoty.



Obrázek 2.8 zařízení pro test podlahových krytin

Velmi univerzálním nástrojem pro testování zapalitelnosti textilních materiálů je zařízení Autoflamm, vyobrazené na Obrázek 2.9, které provádí zkoušky zapalitelnosti a šíření plamene po povrchu textilních materiálů, a to podle evropských a mezinárodních norem. Hodnotí se také jak se plamen šíří po povrchu textilie ve vertikální nebo horizontální orientaci. Zařízení Autoflamm, lze použít např. dle těchto norem:

- ČSN EN ISO 6940 – Textilie. Hořlavost. Zjišťování snadnosti zapálení svisle umístěných vzorků
- ČSN EN ISO 6941 – Textilie. Hořlavost. Měření rychlosti šíření plamene svisle umístěných vzorků
- EN 14878 – Zapalitelnost textilií pro dětská pyžama
- DIN 4102-1 (B2) – Reakce na oheň stavebních materiálů (včetně textilií).



Obrázek 2.9 Autoflamm

3 Význam požárně technických charakteristik pro účely vyšetřování požárů

Požárně technické charakteristiky hrají v procesu vyšetřování příčin požárů zásadní roli. Umožňují vyšetřovatelům lépe pochopit chování materiálů a látek za podmínek hoření, a tím přispívají k objektivnímu stanovení mechanismu vzniku a šíření požáru. Například teplota vzplanutí a vznícení jsou pro vyšetřovatele zásadní při posuzování reálnosti vzniku požáru za konkrétních podmínek. Pokud se na místě nacházely hořlavé látky, teplota vzplanutí vyšetřovateli napoví, zda okolní teplota mohla postačovat k vytvoření zápalné směsi a následnému zapálení například při styku s otevřeným plamenem nebo horkým povrchem. V kombinaci s informacemi o teplotním režimu v místě vzniku požáru (např. provozní teploty strojů, povrchové teploty elektroinstalací) umožňují tyto hodnoty vyloučit či potvrdit některé hypotézy o příčině zapálení.

Další požárně technickou charakteristikou, kterou vyšetřovatel využívá je spalné teplo. Tato PTCH slouží především k odhadu celkové energetické bilance požáru a k identifikaci materiálů, které mohly významně přispět k rozvoji požáru. Pokud se při prohlídce naleznou stopy po látkách s vysokou výhřevností (spalným teplem) například organická rozpouštědla, může to naznačovat přítomnost akcelarantu hoření nebo neoprávněné manipulace. Spalné teplo rovněž pomáhá při rekonstrukci intenzity hoření a posouzení rozsahu poškození konstrukcí.

Rychlost uvolňovaného tepla je klíčová při modelování dynamiky požáru. Umožňuje vyšetřovateli určit, jak rychle mohlo dojít k rozvoji plně rozvinutého požáru, a tím ověřit nebo zpochybnit výpovědi svědků, reakci požárně bezpečnostních zařízení nebo časový průběh události. HRR je rovněž zásadní při analýze, které materiály v interiéru nejvíce ovlivnily šíření požáru příkladem je čalouněný nábytek, plasty nebo podlahové krytiny.

Vyšetřovateli požáru jsou také užitečné výsledky termických analýz zejména v případech, kdy je třeba ověřit chování neznámé látky nebo materiálu při zahřívání. Umožňují zjistit, zda konkrétní materiál mohl za daných podmínek iniciovat požár nebo přispět k jeho rozvoji. Například lze pomocí těchto analýz detekovat, že se materiál při určité teplotě taví nebo rozkládá, čímž lze podpořit hypotézu o sekundárním šíření požáru.

Rychlost šíření plamene po povrchu ať už pevných materiálů nebo třeba textilií umožňuje vyšetřovateli posoudit, jak se požár mohl šířit po různých površích (podlahy, stěny, stropy, nábytek). Je zvláště důležitá v případech, kdy je nutné určit, zda a jak rychle mohl požár přejít z místa iniciace do dalších částí objektu. Pomáhá také identifikovat přímou cestu šíření plamene, a tím i zpětně lokalizovat původní ohnisko.

4 Využití PTCH při Zjišťování příčin požáru

Příklad využití znalostí PTCH je zřejmý z následujících příkladů:

4.1 Požár pece pro pekařské výrobky

K požáru došlo během noční směny. Požár byl zpozorován mistrovou směny, která procházela kolem pece a všimla si pohledem do odvětrávacího okénka pece, že v peci jsou plameny. Během chvilky bylo zjištěno, že se požár rozšířil po celé lince a v prostoru se objevil kouř.

Samotnému požáru předcházely nestandardní jevy, které směnová mistrová musela řešit. Během směny bylo zjištěno, že pečené bábovky se rozpadají. Mistrová měla podezření, že rozpadání způsobuje špatná kvalita těsta. Proto všechny bábovky byly vyjmuty z pece, těsto z forem vyklopeny, prázdné formy vyfoukány a formy zpět vloženy do pece, aby zůstaly přehřáté. Do pece bylo umístěno 550 prázdných forem. A teplota pece byla nastavena na teplotu 275 °C. Doba nahřívání „prázdných“ forem byla 40 – 50 minut.

Během vyšetřování příčiny vzniku požáru a zpracování znaleckého posudku byla zjištěna celá řada skutečností, které v prvním okamžiku nebyly zřejmé.

Pro vymazávání forem na pečení v pekárnách se používají rostlinné tuky. Tyto tuky mohou ulpívat na vnějším povrchu forem a vnitřních zařízeních pece. Vlivem působení tepla v peci dochází postupně k jeho polymeraci a karbonizaci. Postupem času může dojít k navrstvení takto vzniklého hořlavého materiálu, protože polymerovaný materiál ani ve větší vrstvě nestéká z forem. Při výskytu iniciačního zdroje může dojít k zapálení této vrstvy. Tato situace nastala také v uvedené pekárně. Během provozní doby bábovkových dvouforem docházelo k postupnému usazování rostlinného oleje a jeho postupné polymeraci a karbonizaci. Postupně se tak na každé bábovkové dvouformě usadilo cca 1,3 kg hořlavé hmoty. Takové množství hořlavého materiálu v případě zahřátí na teplotu vznícení je schopno iniciovat požár. Proto také zpracovatelé znaleckého posudku se zaměřili na stanovení požárně technických vlastností daného materiálu.

Hodnoceným materiálem byly nánosy polymerizovaného, částečně karbonizovaného rostlinného tuku Trennaktiv PR 100. Tato hmota vznikala opětovným usazováním čerstvého oleje na již polymerizované a částečně karbonizované zbytky oleje na formě pro bábovky. Doba usazování nebyla známa, předpokládalo se několik let.

Posuzovaný rostlinný tuk Trennaktiv PR 100 byl směsí slunečnicového, řepkového a palmového oleje. Dle bezpečnostního listu je jeho teplota vzplanutí v rozpětí 140 – 230 °C a teplota vznícení 360 – 460 °C.

Tabulka 4.1 PTCH jedlých olejů

Olej	Teplota vzplanutí [°C]	Teplota vznícení [°C]	Spalné teplo
Slunečnicový olej	311	410	39,2
Řepkový olej	320	400	39,5
Palmový olej	216	316	39,7

Vzorky pro jednotlivé metody pro stanovení PTCH byly získány mechanickým očištěním bábovkové dvouformy po jejím rozebrání – viz Obrázek 4.1 a Obrázek 4.2 Hmotnost takto získaného

materiálu byla přibližně 1,3 kg. Část silně karbonizované hmoty zůstala na bábovkových formách. Polymerovaný rostlinný tuk se na formě vyskytoval v měnící se konzistenci. Na povrchu měkká, pružně plastická, světlejší, nepolymerovaná hmota méně tepelně degradovaného tuku, která se postupně s hloubkou měnila na tvrdou více karbonizovanou hmotu se zesíťovanou strukturou.



Obrázek 4.1 Fotodokumentace stavu znečištění rozebrané bábovkové dvouformy



Obrázek 4.2 Celkové množství získaného zpolymerovaného tuku z jedné dvouformy

Stanovení spalného tepla ČSN EN ISO 1716

Zkouška byla provedena na poloautomatickém kalorimetru IKA C 200 v automatickém režimu práce. Pro zkoušku byly připraveny čtyři vzorky, které byly vybrány dle stupně karbonizace. Vzorek číslo 3 byl nejvíce karbonizován.

Tabulka 4.2 Naměřené hodnoty spalného tepla

Vzorek č.	Navážka [g]	Naměřené spalné teplo [J.kg ⁻¹]	Popis
1	0,9306	35 629	pružná konzistence hnědé barvy
2	0,9223	32 602	tužší konzistence hnědočené barvy
3	0,9181	29 912	tvrdá konzistence téměř černé barvy
4	0,9681	35 276	pružná konzistence hnědé barvy

Spalné teplo posuzované hmoty zpolymerizovaného, částečně karbonizovaného rostlinného tuku hnědé až černé barvy dle stupně karbonizace se nachází v rozmezí **29,9 – 35,6 MJ.kg⁻¹**.

Stanovení zapalitelnosti ČSN 64 0149

Pro zjištění vznětlivosti materiálu byla s ohledem na podmínky v cykloterické peci stanovena teplota vzplanutí. Zkouška byla provedena v Setchkinově peci výrobce Clasic. Vzorky o hmotnosti 3 g byly zvoleny tak, aby byly zastoupeny všechny stupně karbonizace tuku. Každý vzorek obsahoval jak měkkou hmotu hnědé barvy, tak i pevnou více karbonizovanou část až pevnou plně karbonizovanou látku téměř černé barvy.

Tabulka 4.3 Naměřené hodnoty teplot vzplanutí

Vzorek č.	Teplota [°C]	Průtok vzduchu [J.kg ⁻¹]	Popis
1	360	3,4	Vzplanutí: ne, zbytek: zkarbonizovaná tuhá porézní hmota
2	376	3,35	Vzplanutí: v čase 5:40 min, zbytek: hořící černá kapalina, poměrně málo sazí
3	350	3,45	Vzplanutí: ne, zbytek: tekutý černé barvy, na povrchu měkká membrána
4	361	3,4	Vzplanutí: v čase 9:36 min,

			zbytek: hořící černá kapalina, poměrně málo sazí
--	--	--	---

Teplota vzplanutí zkoušeného vzorku hmotnosti 3 g, který obsahoval měkčí hmotu hnědé barvy, tak i pevné více karbonizované části až pevnou plně karbonizovanou látku téměř černé barvy je **360 °C**.

Hodnocení vzorku na kónickém kalorimetru dle ISO 5660

Zkouška byla provedena na kónickém kalorimetru společnosti Fire testing technology, L.t.d.



Obrázek 4.3 Vzorek zpolymerovaného tuku pro hodnocení na kónickém kalorimetru

Materiál byl zkoušen za těchto podmínek:

- Hustota tepelně radiačního toku 12 kW.m⁻²; bez použití jiskřiště;
- Hustota tepelně radiačního toku 12 kW.m⁻²; s použitím jiskřiště, v čase 1050 s použito přímé zapálení malým plamínkem;
- Hustota tepelně radiačního toku 50 kW.m⁻²; s použitím jiskřiště;

Tabulka 4.4 Výsledky zjištěné na kónickém kalorimetru

Hustota tep. toku [kW.m ²]	Doba hoření [s]	Max./prům. HRR [kW.m ²]	Rychlost odhořívání [g.m ⁻² .s ⁻¹]
12	-	5,44/0	0,0
12	cca 600 s	384/154	5,1
50	cca 300 s	596/406	13,6

Termická analýza

Analýzy řepkového a slunečnicového oleje byly provedeny na přístroji METTLER – TOLEDO TGA/SDTA v teplotním rozmezí 25 - 800 °C, v rozmezí 120 – 500 °C s konstantním přírůstkem teploty 2,5 °C.min⁻¹ ve vzdušné atmosféře. Analýza byla provedena ve dvou režimech. Nejdříve jako hladina

oleje a poté jako rozptýlený olej v oxidu hlinitém kvůli zvětšení plochy, což se projevilo oxidací od nižších teplot a také začínajícím rozkladem o 100 °C dříve než olej v hladině. Tato varianta více simuluje realitu, kdy olej je na formě nastříkán v tenké vrstvě. Analýzy zpolymerovaného materiálu byly provedeny na přístroji METTLER – TOLEDO TGA/DSC v teplotním rozmezí 25 - 750 °C s konstantním přírůstkem teploty 20 °C.min⁻¹ ve vzdušné atmosféře. Zpolymerované odseparované zbytky tuku na dvouformách na pečení nebyly homogenní konzistence. Na povrchu byla hmota měkká, světlejší a lepkavá, v hlubších vrstvách tuhne a tmavne. Na povrchu je hmota čerstvější méně tepelně zdegradovaná a zoxidovaná, do větších hloubek degradace postupuje a hmota získává polymerní zesíťovanou strukturu – má charakter reaktoplastu, je v běžných rozpouštědlech nerozpustný a netavitelný. Byly provedeny analýzy dvou vzorků. Jeden z povrchových vrstev a druhý z větší hloubky. Při analýze více zkarbonizované hmoty se hmotnost vzorku do teploty 295 °C snižuje jen velmi pozvolna, úbytek činí necelá 2 %. Tento úbytek je spojen s odtékáním látek s nižší molekulovou hmotností vzniklých při předešlém zahřívání. Od teploty 295 °C úbytek hmotnosti postupně akceleruje. Do teploty 500 °C se rozložilo dalších 82,5 % hmoty. Tento úbytek hmotnosti je spojen s rozkladem analyzovaného materiálu. Rychlost úbytku hmotnosti dosahuje maxima při 430 °C a má hodnotu 3,66 mg.min⁻¹. Na záznamu DSC se rozklad projevuje exotermními reakcemi s maximem kolem 390 °C. V této fázi dochází ke karbonizaci hmoty. Konečný úbytek hmoty vzorku mezi teplotami 500–690 °C činí 17 %, tento úbytek je pozvolnější a je doprovázen výrazným uvolňováním tepla (s maximem při teplotě 600 °C). Celkově se ze vzorku o hmotnosti 17,88 mg uvolnilo 55,2 Joulů, což přepočteno odpovídá 2,9 kJ.g⁻¹. Rozklad méně zkarbonizované hmoty probíhá ve dvou fázích. Zpočátku do 230 °C je hmotnost prakticky konstantní. V první aktivní fázi rozkladu mezi 230–500 °C se rozloží téměř 85 % hmoty vzorku. Od začátku tepelné degradace dochází k uvolňování tepla. Na záznamu DSC jsou patrné dvě maxima při teplotě 283 °C a 385 °C (toto maximum je nejmohutnější). V první fázi dochází k rozkladu materiálu na jednodušší sloučeniny, které ze vzorku těkají, současně s tím však dochází ke karbonizaci hmoty, která je tepelně stabilnější. Ve druhé fázi v rozmezí teplot 500–640 °C oxiduje i vzniklý karbonizovaný zbytek. Hmotnostní úbytek je pomalejší než v první fázi a doprovází ho značný vývoj tepla, které vrcholí kolem teploty 570°C. Úbytek hmotnosti v této fázi činí 14,5 % a celkové uvolněné teplo činí 46,8 J, při hmotnosti vzorku 8,4 mg, přepočtené uvolněné teplo má hodnotu 5,6 kJ.g⁻¹.

Diskuze

Zbytky rostlinných olejů používaných na vymazávání forem se v malé míře mohou podílet na procesu vznícení, ale jejich vliv na rozvoj a intenzitu požáru by byl minimální. Kapalný tuk ulpívá na zařízení jen v tenké vrstvě. Tuhá hmota se na rozdíl od tekutého oleje usazuje na vnějším povrchu forem v tloušťce až několik centimetrů. V reálných podmínkách tento materiál významně zvyšuje požární zatížení v peci.

Zpolymerizovaný tuk má hodnotu spalného tepla 29,9 – 35,6 MJ.kg⁻¹, spalné teplo rostlinných olejů je přibližně 39 MJ.Kg⁻¹. Spalné teplo zpolymerovaného tuku je o něco nižší než u původních rostlinných olejů.

Teplota vzplanutí polymerovaného tuku je 360 °C. V případě původních rostlinných olejů se pohybuje v rozmezí 216-320 °C. Polymerovaná hmota je obtížněji zapalitelná, což je způsobeno částečnou oxidací a karbonizací. Přesto se jedná o materiál snadno zapalitelný v podmínkách pekárenských pecí.

Tepelná stabilita tuhé hmoty je vyšší u více degradovaného materiálu. U méně degradovaného je hmota stabilní do teploty 265 °C, u více degradovaného je to až do teploty 294 °C. Podle výsledků DSC analýzy je se více tepla uvolní rozkladem více karbonizované hmoty. Nutné je si uvědomit, že na formách ulpívá také čerstvý rostlinný tuk, který má ještě nižší tepelnou stabilitu. Čerstvý rostlinný tuk

se tak může zapálit nejdříve a přispět k zapálení teplotně stabilnějších vrstev. Teplo vznikající při termické analýze je teplo rozkladné, tzn. že nevzniká při hoření. Reálné teplo vyvíjené během hoření má hodnotu podstatně vyšší. To je dokladováno hodnotou spalného tepla, respektive výsledky zkoušky na kónickém kalorimetru.

4.2 Samovznícení dřevní štěpky

Dřevní štěpka je recyklovaný materiál tvořený odřezky z masivního dřeva, dřevěnými obaly, demoličním dřevem, dřevotřískovými deskami, OSB-deskami, překližkou a nábytkovým dřevem. Jedná se o materiál, který vzniká jako odpad při zpracování dřeva či cíleným drcením zbytkových dřevních částí. Dřevní štěpka je nehomogenní materiál, jehož složení závisí na okamžité přejímce zboží.



Obrázek 4.4 Dřevní štěpka

Dřevní štěpka vzniká mletím dovezeného kusového materiálu a z důvodu plynulosti výroby se vykupuje a naskladňuje ve venkovních či vnitřních skladech. Před naskladněním projde 3x procesem mletí, kdy také dochází k odstranění nečistot. Pomletý materiál se naskladňuje. Výsledkem mletí jsou frakce F1 (do 300 x 100 x 50 mm) a F2 (menší než F1). Frakce F1 je tvořena většími kusy materiálu a je dále naskladňována. Proces skladování začíná cca v měsíci dubnu, aby byl k dispozici zhruba od ledna následujícího roku. Skladování frakce F1 trvá nejméně 9 měsíců. Frakce F2 je primárně určena k okamžitému zpracování. Naskladňována je maximálně na dobu jednoho měsíce. Průběžně je sklad navážen a odebírán.



Obrázek 4.5 Venkovní sklad

Sklad je obvykle tvořen betonovými panely a asfaltovým živičným povrchem. Uskladněný materiál bývá po obvodu ohrazen dřevěnou kulatinou. Výška skladování se obvykle pohybuje okolo 15 metrů. Naskladňování skladu je prováděno těžkou technikou. Návoz začíná vždy na jednom místě skladu a materiál se postupně vrství.

Ve skladech dřevní štěpky dochází pravidelně k samovznícení a následnému hoření skladovaného materiálu. Toto hoření je nežádoucí, proto nejen pro zjišťování příčin požárů, ale zejména pro nastavení požárně bezpečného skladování materiálu je zapotřebí znát požárně technické charakteristiky materiálů.

Stanovení vybraných požárně technických charakteristik

Stanovení spalného tepla bylo provedeno pro drcený recyklát F1 (části menší než 1 mm) a drcený recyklát F2 (části menší než 1 mm).

Tabulka 4.5 Naměřené hodnoty spalného tepla dle ČSN EN ISO 1716

Drcený recyklát	Naměřené spalné teplo [J.g ⁻¹]
F1	17 263
F2	17 489


Spalné teplo posuzovaných recyklátů se pohybuje nad hodnotou **17 MJ.kg⁻¹**. Rozdílná spalná tepla nejsou ovlivněna velikostí recyklátu, ale složením testované hmoty. Recyklát není konzistentní hmota. V jeho objemu se vyskytují jak různá dřevní hmota, tak i další materiály využívané v nábytkářském průmyslu jako barvy, lepidla, tmely apod.








Stanovení zapalitelnosti dle ČSN 64 0149


Stanovení teploty vzplanutí drceného recyklátu F1.

Pro jednotlivá měření teploty vzplanutí byly použity vzorky o hmotnosti 2 g drceného recyklátu F1 (části menší než 1 mm). Objemová hmotnost je 30,7 kg/m³.

Tabulka 4.6 Výsledné hodnoty jednotlivých měření frakce F1

Vzorek č.	Teplota [°C]	Průtok vzduchu [l.min. ⁻¹]	Popis	Vzorek po zkoušce
1	212	4,45	Vzplanutí: ne, zbytek: hmota beze změny	




				
2	222	4,3	Vzplanutí: ne zbytek: stejná konzistence, došlo k mírnému ztmavnutí (zhnědnutí), po vysypání vzorku z kelímku byla změna barvy lépe patrná	 
3	241	4,2	Vzplanutí: ne zbytek: stejná konzistence, došlo k ztmavnutí (zhnědnutí), po vysypání vzorku z kelímku bylo patrné žhnutí materiálu	 
4	252	4,15	Vzplanutí: ne, žhnutí zbytek: zuhelnatělý, nedošlo k výraznému úbytku hmoty, po vysypání vzorek místy žhne	 







5	262	4,1	Vzplanutí: ne, žhnutí zbytek: zuhelnatělý, místy patrný jemný šedý popel, patrná změna objemu, po vysypání vzorek místy žhne	
---	-----	-----	---	---



Stanovení teploty vzplanutí drceného recyklátu F2

Pro jednotlivá měření teploty vzplanutí byly použity vzorky o hmotnosti 2 g drceného recyklátu F2 (části větší než 1 mm). Objemová hmotnost 30,7 kg/m³.

Tabulka 4.7 Výsledné hodnoty jednotlivých měření frakce F2

Vzorek č.	Teplota [°C]	Průtok vzduchu [l.min. ⁻¹]	Popis	Vzorek po zkoušce
1	190	4,7	Vzplanutí: ne, zbytek: hmota beze změny	
2	207	4,6	Vzplanutí: ne zbytek: stejná konzistence, došlo k mírnému ztmavnutí (zhnědnutí) materiálu	
3	226	4,45	Vzplanutí: ne zbytek: stejná konzistence, došlo ztmavnutí (zhnědnutí) materiálu	



4	231	4,4	Vzplanutí: ne, zbytek: stejná konzistence, došlo k ztmavnutí (zhnědnutí) materiálu	
5	232	4,4	Vzplanutí: ne, zbytek: stejná konzistence, došlo k ztmavnutí (zhnědnutí) materiálu	
6	237	4,35	Vzplanutí: ne, zbytek: stejná konzistence, došlo k ztmavnutí (zhnědnutí) materiálu	
7	242	4,3	Vzplanutí: ne, zbytek: stejná konzistence, došlo k výraznému ztmavnutí materiálu, který v průběhu zkoušky žhnul ve spodních částech vzorku. Po vytažení z pece, cca po 1 min, došlo k rozšíření žhnutí do horní části vzorku, jak je vidět na obrázku.	
8	254	4,2	Vzplanutí: ne, zbytek: během měření docházelo ke žhnutí	
9	266	4,1	Vzplanutí: ne, zbytek: během měření docházelo ke žhnutí po vytažení černý zuhelnatělý zbytek uprostřed patrné žhnutí	





10	275	4,0	Vzplanutí: ne, zbytek: během měření docházelo ke žhnutí, po vytažení černý zuhelnatělý zbytek uprostřed patrné žhnutí	
11	283	4,0	Vzplanutí: ne, zbytek: během měření docházelo ke žhnutí, po vytažení černý zuhelnatělý zbytek uprostřed patrné žhnutí	

Při sedmém měření, které probíhalo při teplotě 242 °C, docházelo ke žhnutí spodních vrstev materiálu. Toto žhnutí však nebylo po vytažení vzorku z pece patrné. Pozorována byla pouze změna barvy vzorku. Avšak cca po 1 min, kdy byl vzorek ponechán v laboratoři, došlo k rozšíření žhnutí ze spodní části vzorku do jeho horní vrstvy, jak je možno vidět na obrázku.

Stanovení teploty vznícení drceného recyklátu F1


Tabulka 4.8 Výsledné hodnoty jednotlivých měření frakce F1






Vzorek č.	Teplota [°C]	Průtok vzduchu [l.min. ⁻¹]	Popis	Vzorek po zkoušce
1	288	4,0	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku	
2	319	3,7	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý zbytek, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku	

				
3	382	3,1	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý zbytek, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku	
4	398	3,15	Vznícení: ne, zbytek: popel	 

Stanovení teploty vznícení drceného recyklátu F2

Tabulka 4.9 Výsledné hodnoty jednotlivých měření frakce F2

Vzorek č.	Teplota [°C]	Průtok vzduchu [l.min. ⁻¹]	Popis	Vzorek po zkoušce
1	292	3,85	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý zbytek, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku	

2	311	3,6	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý zbytek, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku	
3	334	3,5	Vznícení: ne, zbytek: zuhelnatělý zbytek, uprostřed žhne, došlo k uvolnění prchavých složek, a ke zmenšení objemu vzorku cca na polovinu původního objemu	
4	343	3,45	Vznícení: ne, zbytek: žhnutí, zmenšení objemu vzorku cca na polovinu původního objemu	
5	357	3,4	Vznícení: ne, zbytek: žhnutí, zmenšení objemu vzorku cca na polovinu původního objemu	
6	382	3,1	Vznícení: ne, zbytek: popel	

Během provedených měření nebyla stanovena teplota vzplanutí ani teplota vznícení. Z naměřených hodnot je zřejmé, že u frakcí F1 (měření 1 - 5) a frakce F 2 (měření 1 - 11) docházelo ke žhnutí materiálu. Teplota žhnutí je 241 °C. Při vyšších teplotách docházelo vždy k žhnutí. Proto nebyla stanovena teplota vznícení.

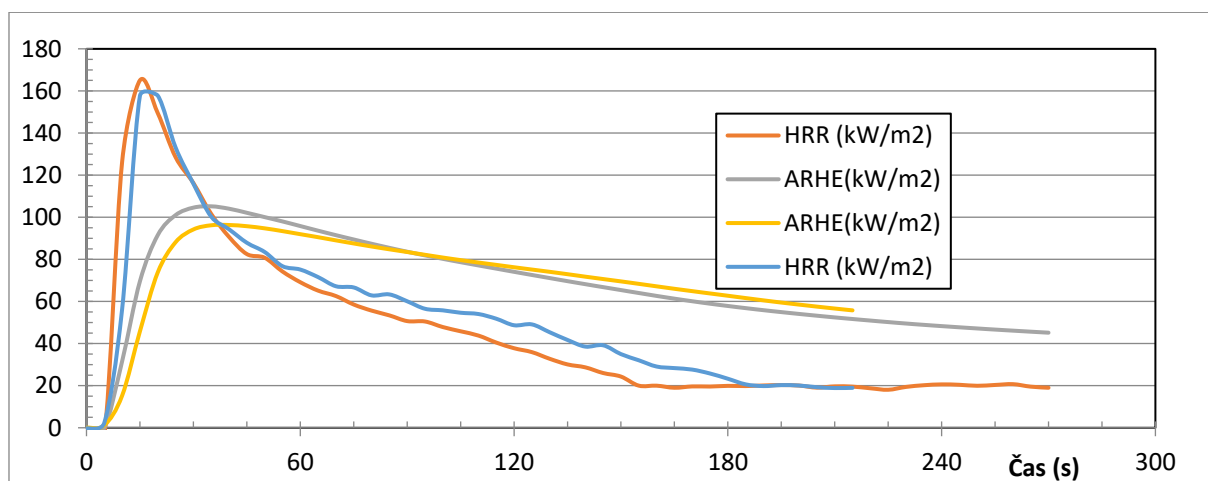
Stanovení vývoje tepla a oxidů uhlíku metodou kónického kalorimetru

Materiál byl zkoušen při hustotách tepelných toků 35 a 50 kW/m². Měření probíhalo s rozemletou dřevní štěpkou o navážce 18,4 g. Navážka byla vsypána do misky 100 x 100 mm, výška mírně upěchovaného vzorku byla 6 mm, objemová hmotnost 30,7 kg/m³. Na obrázku 1 je vzorek studovaného materiálu v misce před zkouškou.

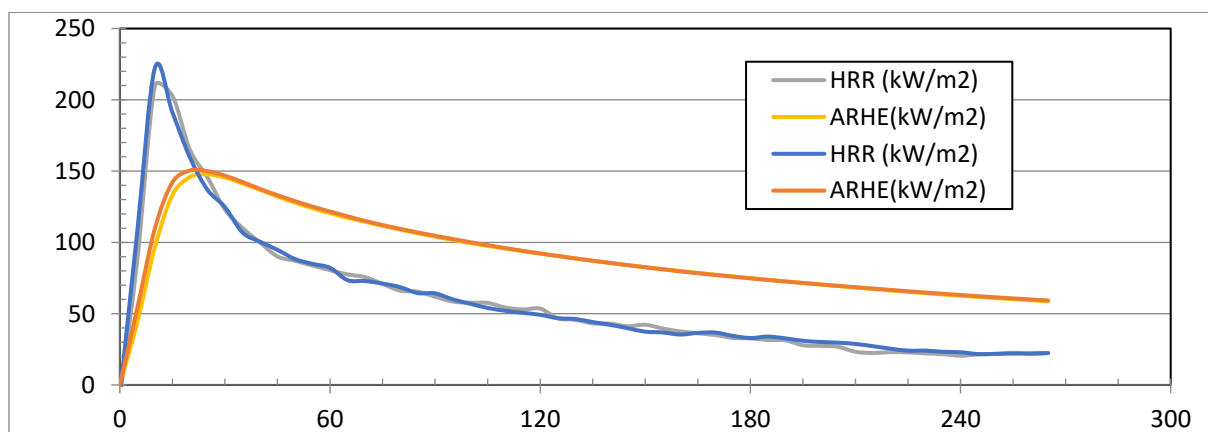


Obrázek 4.6 Vzorek materiálu

Čas do zapálení byl velice krátký: při nižší expozici 7 a při vyšší 3,5 sekundy. Materiál rychle ohořel na povrchu, pak pokračovalo již jen bezplamenné hoření velmi nízké intenzity. Z tepelných charakteristik byla vyhodnocována okamžitá rychlost vývoje tepla HRR (Heat Release Rate) a její zprůměrovaná hodnota ARHE (Average Rate of Heat Emission). Na grafech 1 a 2 je průběh HRR a ARHE během měření při obou expozicích (měření bylo 2x opakováno).



Obrázek 4.7 Průběh HRR a ARHE při 35 kW/m²



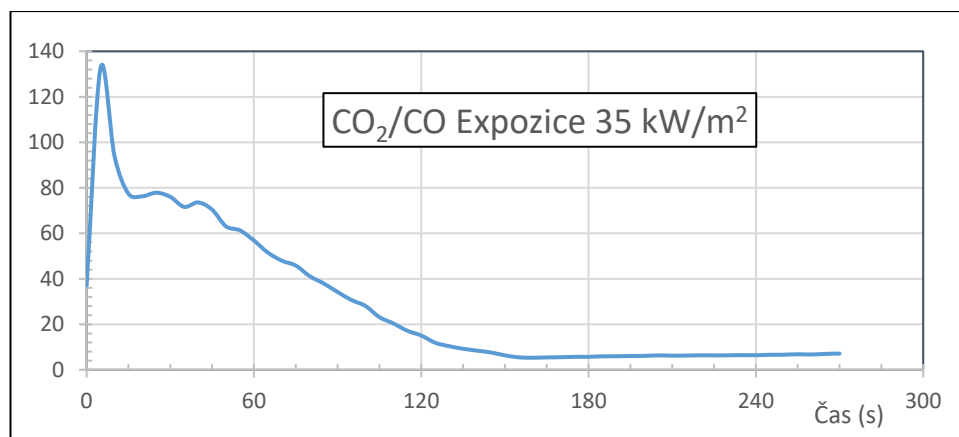
Obrázek 4.8 Průběh HRR a ARHE při 50 kW/m²

Vzorek materiálu po zkoušce – viz Obrázek 4.9, na posledním snímku je pod zpopelnatělým šedým povrchem patrná vrstva černého zkarbonizovaného materiálu .

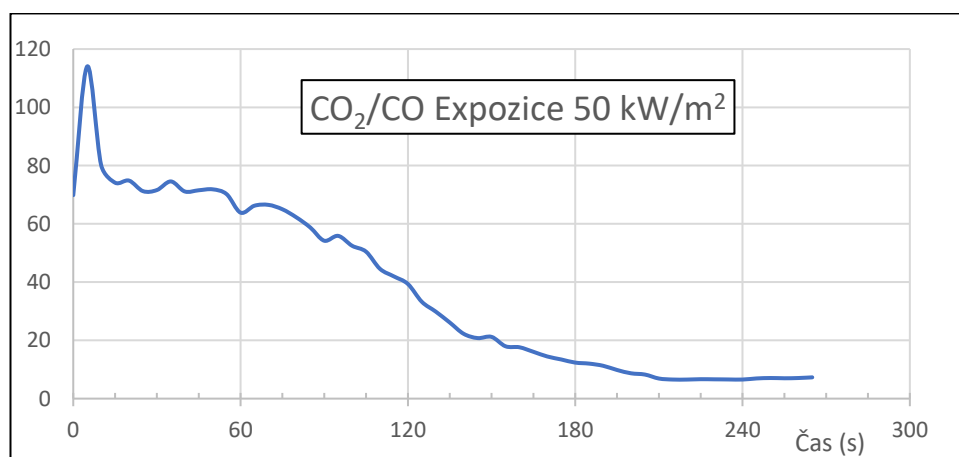


Obrázek 4.9 Materiál po zkoušce

Plamenné hoření rozemleté dřevní štěrpkou bylo velmi omezené, hmotnostní úbytky byly nízké, v čase 215 s zbytek činil 39 % (při 35 kW/m²) a 29 % (při 50 kW/m²). „Dokonalost“ hoření materiálu lze zobrazit poměrem produkovaného oxidu uhličitého a uhoelnatého. Vyšší hodnota podílu svědčí o dokonalejším spálení materiálu. Na obrázcích Obrázek 4.10 a Obrázek 4.11 jsou tyto hodnoty v grafech.



Obrázek 4.10 Poměr uvolňovaného CO₂ a CO při expozici 35 kW/m²



Obrázek 4.11 Poměr uvolňovaného CO₂ a CO při expozici 50 kW/m²

Z grafů je patné, že hoření je nejefektivnější hned po zapálení, v maximu je vyšší při nižší tepelné expozici – hoření je poměrně dokonalé, protože odhořívají rozkladné produkty vznikající ještě před zapálením. Poté se plamen snižuje, a hoření je rovnoměrnější. Postupně odhořívá materiál na povrchu, který současně karbonizuje a vytváří tak tepelnou i difuzní bariéru. Intenzita hoření postupně klesá,

současně klesá i poměr CO₂/CO. Ten dosáhne ustálené hodnoty v čase 150 s, resp. 210 s. To již hoření probíhá bezplamenným způsobem. Důvodem rozdílných časů je primární tepelná zátěž, při expozici vyšší hustotou tepelného toku (50 kW/m²) proniká teplo hlouběji pod povrch a po delší dobu se udrží plamenné hoření. Zanedbáme-li počátek záznamu, lze říci, že při ustáleném plamenném hoření poměr oxidů uhlíku 75 po přechodu do žhnutí klesá tato hodnota na 7. Účinnost spalování v režimu žhnutí klesá na desetinu ve srovnání s plamenným hořením.

Termická analýza

Důvodem k provedení termické analýzy (TA), byly výsledky elementární analýzy vzorku materiálu odebraného ze skládky.

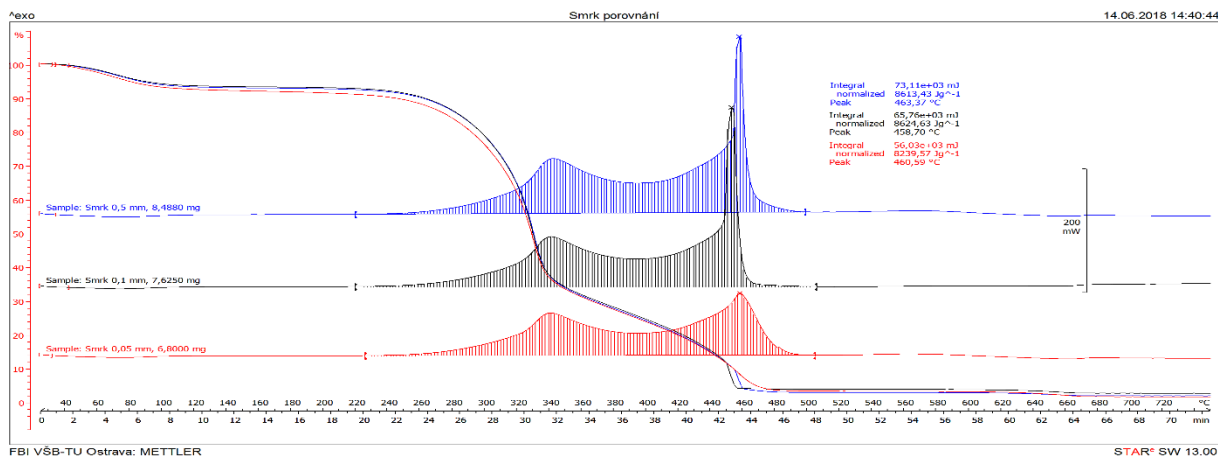
Tabulka 4.10 Elementární rozbor

Hodnocený parametr		Vzorek F1	Vzorek F2	Pelety ^a	Piliny ^a	Lesní štěpka ^b
Uhlík	C ^d [%]	49,31	49,15	47,03	50,00	46,89
Vodík	H ^d [%]	5,94	5,85	6,59	5,86	5,14
Dusík	N ^d [%]	1,74	2,52	0,00	0,14	0,34
Síra	S ^d [%]	0,05	0,05	0,00	0,02	0,04
Kyslík	O ^d [%]	41,37	40,34	46,38	42,07	47,59

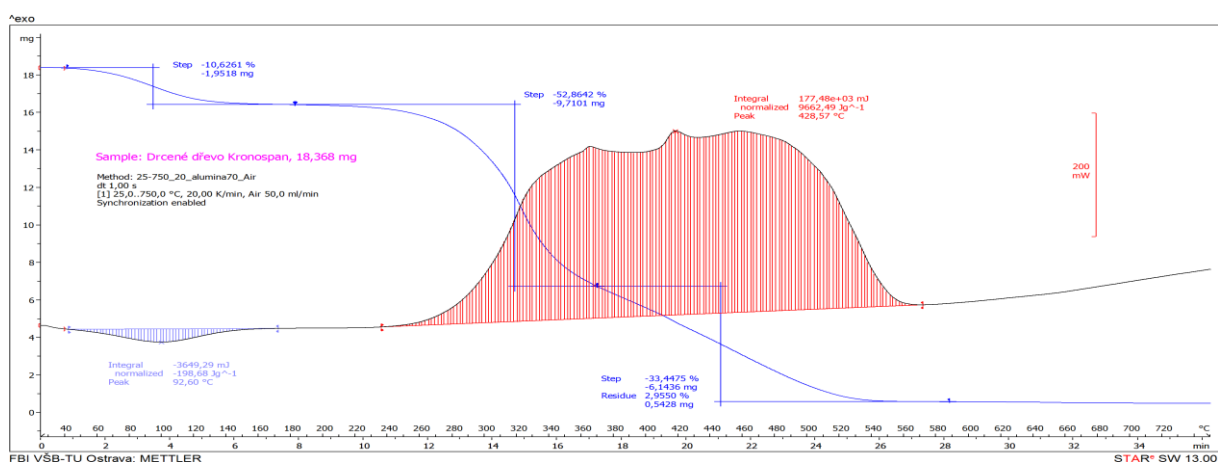
Bylo předem jasné, že tento materiál není tvořen jen dřevní hmotou. Po provedené TA je zřejmé, že složení odebraného vzorku odpovídá spíše dřevotřískce nebo OSB než čisté dřevní hmotě. Rozdíl je především v tom, že aglomerované hmoty obsahují i pověrně velký podíl pryskyřic, nejčastěji fenolformaldehydové.

Vzorky materiálu byly podrobeny termogravimetrické analýze (TGA) a diferenční skenovací kalorimetrii (DSC). Na TGA průběžně sledujeme změnu hmotnosti vzorku při rovnoměrně stoupající teplotě. DSC umožňuje sledovat tepelný tok mezi analyzovaným a srovnávacím materiálem – srovnávací materiál je v rozsahu provozních teplot zcela pasivní. Vyhodnocením záznamu DSC rozlišíme oblasti s převažujícími endo- a exotermními procesy. Obě analýzy probíhají současně, takže v jednotlivých fázích měření na jednotné teplotní (časové) škále jsou změny hmotnosti propojeny s probíhajícími tepelnými efekty.

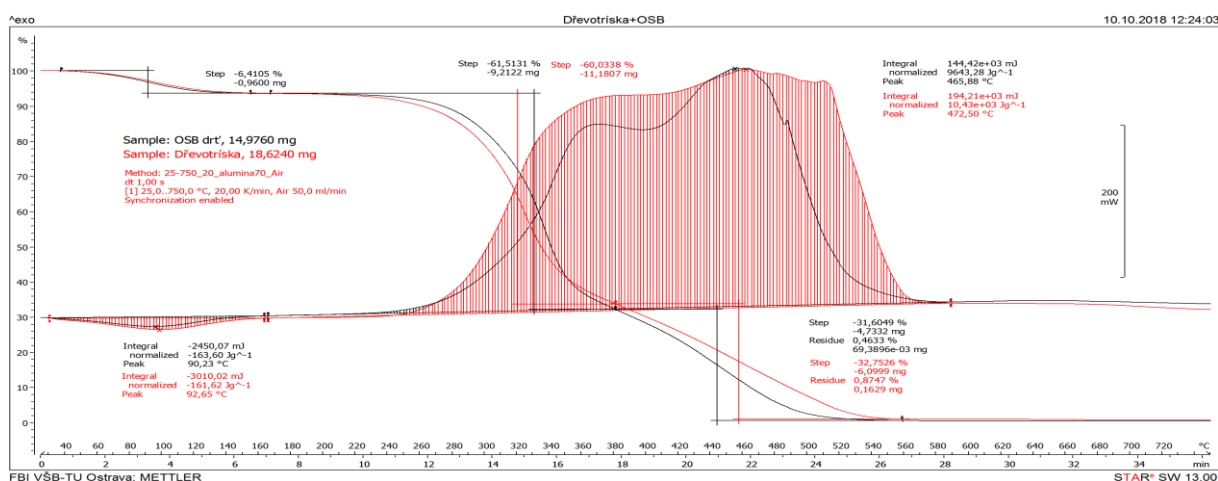
Následující záznamy TA ukazují rozdíly mezi čistou dřevní hmotou (smrk) a hmotou ze skládky, srovnání je doplněno záznamy analýzy vzorků dřevotřísky a OSB desky – vše v podobě drti.



Obrázek 4.12 Záznam TA smrkové dřevo



Obrázek 4.13 Drť odebraná ze skládky



Obrázek 4.14 Záznam TA materiálu dřevotřísky a OSB

Na Obrázek 4.12 je záznam TA smrkového dřeva. Jsou to tři analýzy v jednom záznamu, liší se jen jemností analyzované drtě. Charakteristické pro dřevo jsou dvě oddělené fáze exotermního rozkladu. V první fázi ohřevu probíhá vysušování dřeva (endotermní oblast do teploty asi 120 °C). Tepelný rozklad začíná při teplotě asi 220 °C, postupně se uvolňují těkavější sloučeniny a začínají karbonizační procesy, vývoj tepla je poměrně malý. Tato fáze končí při teplotě 400 °C, kdy dřevo je již zuhelnatělé.

Vývoj tepla se dále zvyšuje v důsledku nastupujících oxidačních procesů, které vrcholí iniciací bezplamenného hoření – maximum vývoje tepla se nachází kolem 460 °C. Rozklad končí kolem teploty 480 °C

Průběhy analýz materiálů na dalších obrázcích (viz Obrázek 4.13 a Obrázek 4.14) se od smrku výrazně liší, avšak jsou si průběhem dosti podobné. Na obrázku 9 je záznam analýzy materiálu ze skládky a na grafu 10 jsou dvě sloučené analýzy aglomerovaného dřeva – tedy dřevní hmoty s PF pryskyřicí. Začátek rozkladu je prakticky shodný se dřevem, je ale patrné, že vývoj tepla narůstá rychleji, karbonizuje současně jak dřevní hmota, tak i pryskyřice. Druhá fáze rozkladu u těchto materiálů (oxidace uhlíkatých zbytků) je na záznamech podstatně hůře identifikovatelná – obě fáze prakticky na sebe plynule navazují. Teplota vyvinutá při rozkladu je vyšší u dřeva s pryskyřicí – plochy pod křivkou záznamu DSC (na obrázcích šrafované).

Přítomnost polykondenzátů na bázi formaldehydu (PF, MF a UF pryskyřice) v dřevní hmotě patrně značně ovlivňuje možnosti jejího samovznícení. Z polykondenzátů vždy odtékávají základní komponenty (fenol, močovina, melamin a formaldehyd), přičemž především fenol a formaldehyd jsou účinné desinfekční prostředky. Proto určitě tlumí, případně zcela zabrání množení plísní, bakterií a podobných, které jsou příčinou biologického rozkladu dřevní hmoty, který je primárním zdrojem energie v procesech vedoucích k samovznícení. V další fázi, při vyšších teplotách může být přítomnost těchto sloučenin naopak akcelerátorem procesu samozahřívání, neboť zejména formaldehyd je poměrně reaktivní sloučenina. Všechny uvedené pryskyřice také snižují vlhnutí (nasákavost) dřevní hmoty. Tedy opět, biogenní fázi samoohřevu tlumí a chemickou naopak spíše akcelerují.

Dle Babrauskase (2003) mají piliny a dřevní štěpka sklon k samovznícení. Babrauskas (2003) uvádí příklad experimentu, kdy došlo k samovznícení hromady dřevní štěpky o výšce 7 m za 9 měsíců. Přitom dále uvádí, že doporučené skladování dřevní štěpky se pohybuje od 8 do 18 m v závislosti na materiálu. Babrauskas (2003) rovněž uvádí, že k zahřívání dřevní štěpky dochází přímým dýcháním živých buněk, mikrobiálním působením a růstem hub a přímou oxidací nenasycených mastných kyselin a jiných organických částí. Ve světě došlo k celé řadě případů samovznícení skladů dřevní štěpky. Např. ve Švédsku se samovznítil 19 m vysoký sklad dřevní štěpky po období s větším výskytem srážek. Jako příčina byla stanovena vysoká přítomnost pryskyřice a jemného podílu materiálu.

Diskuse výsledků

Z provedené rešerše odborné literatury, která se týká skladování drcených materiálů na bázi dřeva nebo obecněji na bázi lignocelulózy, bylo zjištěno, že konkrétní pokyny pro skladování těchto materiálů nejsou v české odborné literatuře dostatečně zastoupeny.

Přitom je známo, že k požárům pevných biopaliv na bázi dřeva, zejména štěpky, na velkých skládkách u tepláren nebo elektráren, dochází poměrně často. V zahraniční literatuře jsou uváděny podrobné pokyny a v některých případech jsou uváděny i v oficiálních metodických pokynech (NFPA 230).

Návrh pro bezpečné skladování dřevní štěpky z recyklovaného dřeva vychází z experimentálně zjištěného hodnocení sklonu tohoto materiálu k samovznícení v důsledku oxidace materiálu vzdušným kyslíkem, s opravou pro biologické samovznícení, dále z výsledků dříve provedených hodnocení, provedených v laboratořích FBI u obdobných materiálů, a z údajů uvedených v odborné literatuře, a z praktických zkušeností se skladováním drcených materiálů na bázi dřeva. Opatření jsou určena pro skladování materiálů ve venkovním prostředí.

6 Problematika stanovení PTCH

Požárně technická charakteristika materiálu je soubor fyzikálních, chemických a tepelných vlastností, které určují chování materiálu při působení vysoké teploty nebo ohně. Z těchto charakteristik lze odvodit, jak snadno se materiál vznítí, jak rychle se oheň po materiálu šíří, kolik energie materiál uvolní, kolik kouře a toxických plynů materiál uvolní. Celkově lze tedy říci, že je to soubor charakteristik, kterými lze popsat jaký má daný materiál vliv na rozvoj a intenzitu požáru. Požárně technické charakteristiky ovlivňuje celá řada faktorů jako například chemické složení, skupenství, povaha paliv, prostorové parametry hmoty, forma a orientace, homogenita hmoty, tepelné vlastnosti hořlavých hmot, vlhkost, stáří a degradace a další. [1]

Chemické složení materiálu zásadně ovlivňuje procesy probíhající při jeho zahřívání, tepelném rozkladu i samotném hoření. Nejjednodušší situace nastává u chemicky homogenní látky. Ve většině případů však materiály představují směsi více chemicky čistých složek, což dělá jejich chování při zahřívání složitějším. Při těchto procesech totiž dochází k interakcím nejen mezi jednotlivými složkami, ale i mezi produkty jejich rozkladu.

Chemické složení materiálu také předurčuje jeho tepelnou stabilitu, která může být charakterizována například teplotou rozkladu. Neovlivňuje však pouze chemickou stálost, ale i tvarovou stabilitu. Některé materiály se při zahřívání deformují nebo taví. I když chemické složení zůstává beze změny, může dojít ke změnám v prostorovém uspořádání materiálu a tím i v jeho tepelných vlastnostech.

Pokud nejde o hoření chemických prvků (např. vodíku, síry, fosforu či uhlíku), pak je hoření zpravidla rozkladný proces. Látky vstupující do hoření bývají chemicky složitější, mají tedy vyšší molekulovou hmotnost než produkty, které při hoření vznikají. Většina hořlavých materiálů je založena na sloučeninách uhlíku a vodíku.

Hořlaviny představují velmi rozmanitou skupinu látek od nejjednodušších plynů, jako je vodík nebo uhlovodíky, přes kapalné látky až po složitá tuhá paliva s vysokou molekulovou hmotností a značnou chemickou komplexností. Některé se vyskytují v přírodní formě, například celulóza, jiné jsou syntetického původu, jako například polyetylen či polyuretan. Všechny tyto látky mohou za určitých podmínek hořet. Při tomto procesu vznikají produkty hoření, uvolňuje se teplo a často také světelné záření. Plamen představuje plynnou fázi hoření, a proto je logické, že plamenné hoření kapalin a tuhých látek musí být spojeno s jejich přeměnou na plynné složky. U kapalných látek dochází k tomuto přechodu zpravidla prostým vypařováním. Naproti tomu u většiny tuhých paliv je nezbytný chemický rozklad (termolýza), během kterého se tvoří těkavé látky s nízkou molekulovou hmotností schopné přejít do plynné fáze a udržet hoření v podobě plamene. Tento proces vyžaduje výrazně více energie než vypařování, a proto dosahuje povrch tuhých hořlavín při hoření vysokých teplot obvykle kolem 400 °C. Výjimku tvoří tuhé látky, které při zahřívání sublimují tzn. přecházejí přímo z pevného do plynného skupenství bez chemického rozkladu. Typickým příkladem je tuhý líh (hexamethylentetramin), který sublimuje při teplotě 285–295 °C.

Prostorové uspořádání hmoty má výrazný vliv na zapalitelnost materiálu a především na průběh jeho dalšího hoření. Příkladem je dřevo, tedy materiál používaný v každodenním životě. Konkrétně pak dřevěný trám určitého profilu a složení a vedle něj dřevěné třísky nebo hobliny ze stejného materiálu. Přestože chemické složení obou forem je totožné, rozdíl v jejich prostorové struktuře zásadně ovlivňuje chování při hoření. Třísky či hobliny, tedy materiál s volnějším uspořádáním, lze zapálit mnohem snáze než kompaktní trám. Tento rozdíl lze popsat i z hlediska poměru povrchové plochy k objemu. Hobliny o stejném objemu jako trám mají výrazně větší celkový povrch, což usnadňuje přístup kyslíku a urychluje zahřívání, proto se nejen snáze zapálí, ale i intenzivněji hoří. Podobné je to i uměle vyrobeného materiálu jako je například polyester. Polyesterová deska (dekorativní panel) a vedle toho jemná

polyesterová vlákna ve formě výplňového rouna nebo netkané textilie. Obě formy mají stejné chemické složení, ale výrazně odlišné prostorové uspořádání. Zatímco hustě tkaná látka klade plameni větší odpor kvůli menší dostupnosti kyslíku a menší ploše vystavené sálavému teplu, jemná, "načechraná" struktura rouna se zapálí výrazně rychleji.

Zapalování je rovněž ovlivněno konkrétní formou a povrchovou úpravou materiálu. Příkladem může být opět dřevěný trám, který zápalkou není pravděpodobně zapálit. Pokud však bude dřevo rozděleno do tenkých lišt či třísek, zapálení bude snazší. Také drsnost povrchu hraje svou roli. Hrubě řezaný povrch se zježenými třískami podporuje snadnější zapálení než hladký, hoblovaný povrch.

Další důležitý faktor představuje tvarová a objemová stálost hořlavého materiálu. Některé látky při zahřívání měknou nebo se taví, což mění jejich původní prostorové uspořádání. Tato skutečnost ovlivňuje nejen samotné zapálení, ale i následné hoření.

Také orientace materiálu ovlivňuje zejména rychlost šíření plamene po povrchu materiálu. Příkladem může být test 100% bavlněné tkaniny ve vodorovném a svislém směru.

Pokud je textilie napnutá vodorovně po zapálení z bodu iniciace dochází k pomalejšímu šíření plamene. Oheň se šíří do stran v rovině látky, ale vzhledem k tomu, že spaliny a horký vzduch stoupají vzhůru, dochází ke slabšímu ohřevu neporušené části materiálu před plamenem. Hoření může být lokální, plamen často zhasne, pokud není podpořen větším tepelným tokem. Oproti tomu pokud textilie visí svisle jako záclona, po zapálení plamen rychle stoupá směrem vzhůru po povrchu materiálu. Horké spaliny proudí podél povrchu textilie, čímž předešřívají oblast před plamenem, což vede k výrazně rychlejšímu šíření plamene.

S prostorovou strukturou materiálu úzce souvisí i geometrie celého hořlavého uspořádání a poloha zdroje tepla. Jestliže například zápalný zdroj působí shora a je lokalizovaný, může být šíření hoření omezené. Naopak zapálení z jiné strany nebo zevnitř struktury může vést k mnohem výraznějšímu rozvoji požáru, přestože samotný úkon zapálení zůstává stejný.

Mezi dvě klíčové charakteristiky z hlediska hořlavosti patří tepelná vodivost a měrné teplo (tepelná kapacita), jejichž hodnoty pro vybrané materiály jsou uvedeny v Tabulka 6.1. Obecně platí, že materiály s vyšší tepelnou vodivostí kladou při zapalování větší odpor, protože efektivněji odvádějí teplo od místa působení zdroje. Tepelná vodivost určuje, jak rychle se teplo šíří v materiálu. Jde o jednu ze základních fyzikálních veličin, udávanou jako koeficient tepelné vodivosti. U homogenních pevných látek závisí na teplotě, ale u vícefázových nebo prostorově nehomogenních materiálů (např. porézních nebo načechraných hořlavin) je jeho stanovení a interpretace složitější, protože teplo se šíří nerovnoměrně.

Tabulka 6.1 Tepelná vodivost a měrné teplo vybraných materiálů

Materiál	Tepelná vodivost (W/m·K)	Měrné teplo (J/kg·K)	Poznámka k hořlavosti
Kovová fólie (např. hliník)	≈ 200–235	≈ 900	Extrémně vysoká tepelná vodivost; teplo se rychle rozptýlí, velmi obtížné zapálení; materiál sám není hořlavý.
Masivní dřevo	≈ 0,13–0,20	≈ 1500	Nízká tepelná vodivost, teplo zůstává lokálně, usnadňuje zapálení; vyšší měrné teplo zajišťuje pomalejší nárůst teploty v objemu.
Textilie (např. bavlna)	≈ 0,03	≈ 1300	Nízká vodivost a malá hmotnost, rychlé lokální zahřátí, snadno se zapálí, rychlé šíření plamene.
Polyuretanová pěna	≈ 0,02–0,03	≈ 1400	Velmi nízká vodivost, vysoká porozita, rychlé vzplanutí, intenzivní hoření.
Minerální vlna	≈ 0,035–0,045	≈ 800–1000	Nízká vodivost, nehořlavá díky složení, používá se jako tepelná a požární izolace.

Měrné teplo udává schopnost materiálu akumulovat dodanou energii. Vyšší měrné teplo značí, že je materiálu zapotřebí pro jeho ohřev dodat více energie, což může oddálit iniciaci materiálu, ale zároveň materiál akumuluje velké množství tepla. Materiály s nízkým měrným teplem např. plasty, textilie se při zahřátí rychle dostanou na teplotu, kdy dochází k tepelnému rozkladu a snadněji se zapálí, zatímco materiály s vysokým měrným teplem jako je voda nebo keramika se ohřívají pomaleji a k teplotě vzplanutí se dostanou obtížněji, proto jsou odolnější vůči iniciaci.

Vliv stáří materiálu na jeho hořlavost může být poměrně výrazný a závisí na typu materiálu, podmínkách jeho stárnutí (vlhkost, UV záření, teplota, chemické vlivy atd.) a na tom, jak se během času mění jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Například oxidace a degradace polymerních řetězců, hydrolytický rozklad např. u plastů vede ke vzniku menších, těkavějších molekul, což může způsobit a rychlejší iniciaci a následné hoření.

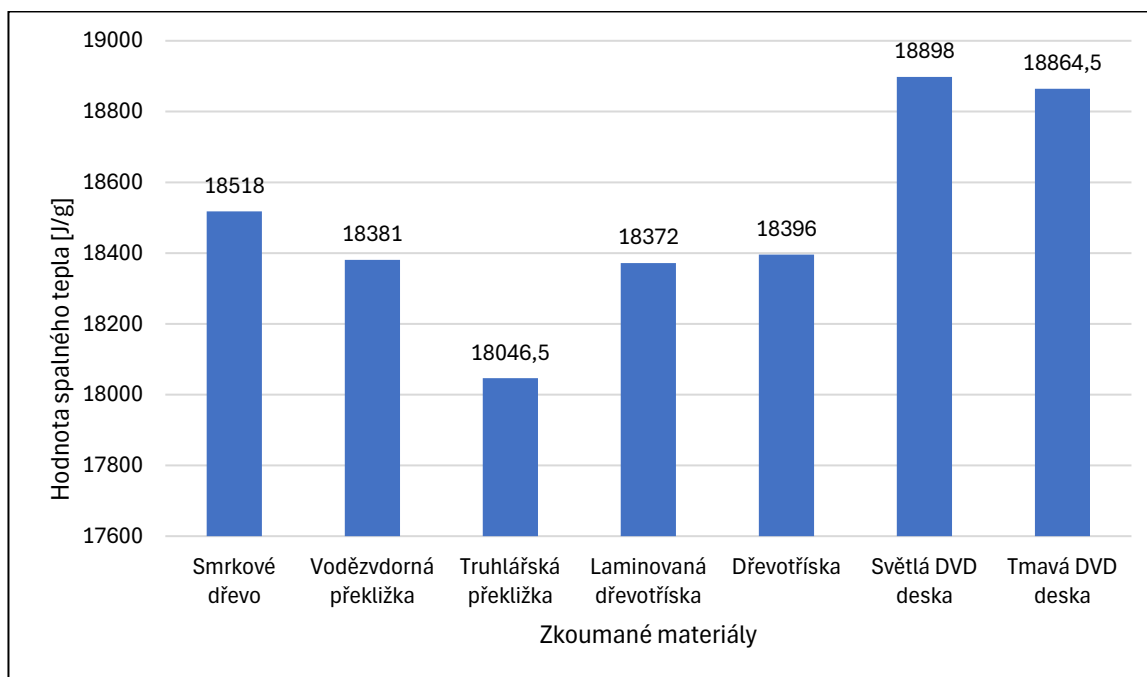
Co ovlivňuje hodnoty PTCH

Požárně technické charakteristiky také ovlivňuje způsob odběru vzorku a samotné provedení analýzy. Příkladem může být stanovení spalného tepla u nehomogenních materiálů jako jsou různé výrobky na bázi dřeva, překližky, laťovky, dřevotřískové desky apod., které jsou zobrazené na Obrázek 6.1.



Obrázek 6.1 Příklady nehomogenních materiálů na bázi dřeva

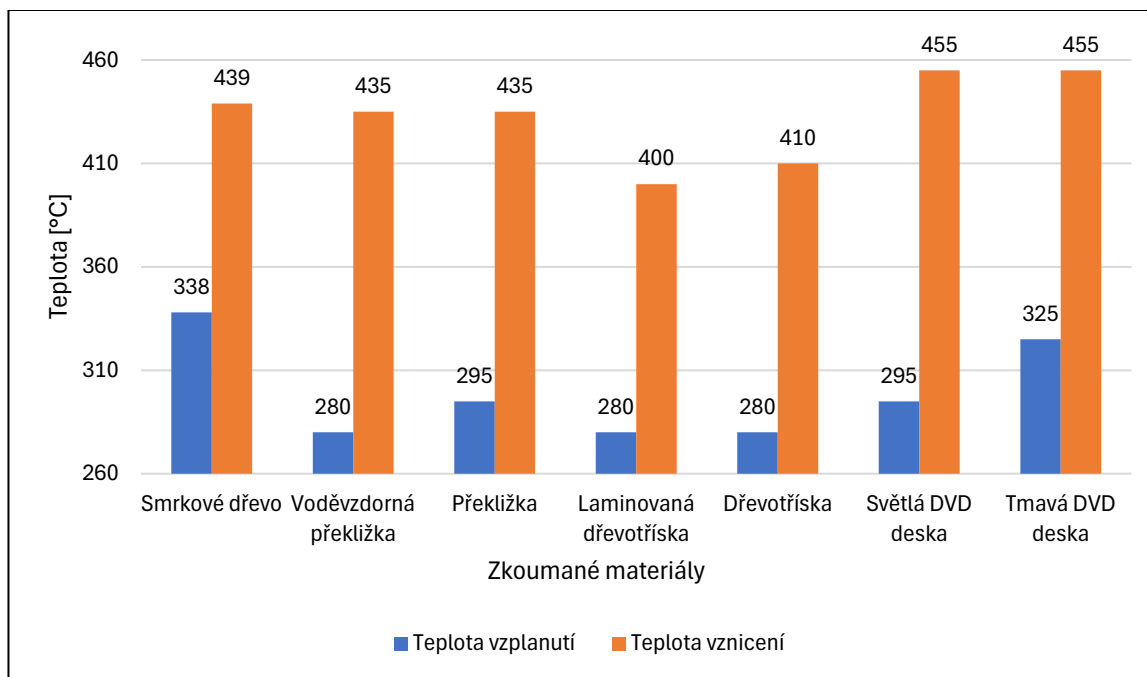
Pokud bude odebrán reprezentativní vzorek odřezáním celého průřezu materiálů, budou výsledky spalného tepla viz Obrázek 6.2.



Obrázek 6.2 Porovnání průměrných hodnot spalného tepla zkoumaných materiálů

Správný postup by však měl být, že bude měřena každá část materiálu samostatně a následně vypočítané spalné teplo na základě poměru jednotlivých hmot obsažených v celém nehomogenním materiálu.

V případě stanovení teploty vzplanutí a vznícení u výše uvedených nehomogenních materiálů je naopak vhodné postupovat tak, že bude materiál testován jako celek, protože při měření jednotlivých homogenních materiálů by výsledek byl zcela odlišný, jak je znázorněno na Obrázek 6.3.



Obrázek 6.3 Porovnání teplot vzplanutí a vznícení zkoumaných vzorků

Stanovení HRR metodou kónické kalorimetrie přímo požaduje měření materiálů všemi jejich vrstvami. Hodnoty HRR pro různé materiály při tepelném toku 35 kW/m² a 50 kW/m² jsou uvedeny v Tabulka 6.2 a Tabulka 6.3.

Tabulka 6.2 Průměrné naměřené hodnoty při hustotě tepelného toku 35 kW/m²

Materiál	Čas zapálení [s]	HRR _{max} [kW/m ²]	Čas HRR _{max} [kW/m ²]
Smrk	42,5	163,5	55
Voděvzdorná překližka	60,5	222,9	82,5
Truhlářská překližka	47	226,4	72,5
Laminovaná dřevotříska	128	191,8	147,5
Dřevotříska	58	221,6	287,5
Světlá DVD deska	57	369,8	140
Tmavá DVD deska	65	455,2	130

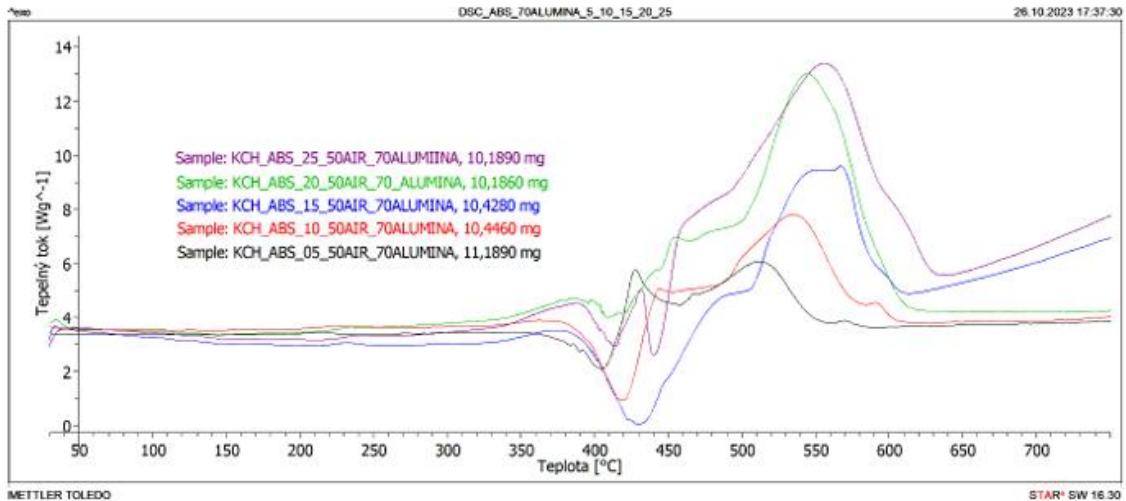
Tabulka 6.3 Průměrné naměřené hodnoty při hustotě tepelného toku 50 kW/m²

Materiál	Čas zapálení [s]	HRR _{max} [kW/m ²]	Čas HRR _{max} [kW/m ²]
Smrk	14,5	223,8	32,5
Voděvzdorná překližka	24	303,3	45
Truhlářská překližka	22	282,6	52,5
Laminovaná dřevotříska	35,5	262,2	57,5
Dřevotříska	23,5	263,7	230
Světlá DVD deska	21	435,9	105
Tmavá DVD deska	32,5	555,0	95

Požárně technické charakteristiky také ovlivní způsob vyhotovení příslušnou metodou. Příkladem je provedení termické analýzy. Křivky DTA/DSC znázorňují fyzikální a chemické změny energetického stavu analyzovaného vzorku. Výsledné křivky se však od sebe nemusí lišit jen vlivem testovaného materiálu, ale také díky podmínkám provedené analýzy, jako je nárůst teploty či použitý kelímek. Rychlost nárůstu teploty může ovlivnit kromě doby analýzy kinetiku přechodu. Výsledky DSC a TGA analýzy materiálu ABS jsou uvedeny v tabulkách Tabulka 6.4 a Tabulka 6.5, přičemž jejich grafické znázornění při různých rychlostech nárůstu teploty je patrné z obrázků Obrázek 6.4 a Obrázek 6.5.

Tabulka 6.4 Výsledky DSC analýzy materiálu ABS v kelímku z oxidu hlinitého

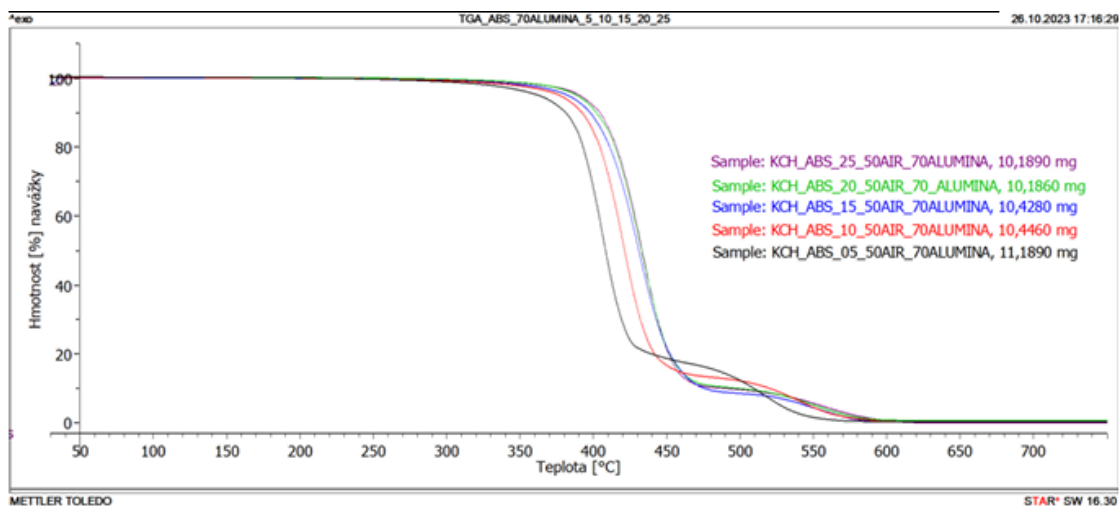
DSC při měření v kelímku z oxidu hlinitého				
Materiál	Rychlost nárůstu teploty [°C/min]	Navážka [mg]	Max 1.píku při t [°C]	Max 2.píku při t [°C]
ABS	5	11,189	425,37	508,76
	10	10,446	442,65	532,43
	15	10,428	502,80	547,41
	20	10,186	457,76	544,48
	25	10,189	435,82	556,37



Obrázek 6.4 DSC křivky materiálu ABS při různých rychlostech nárůstu teploty při měření v kelímku z oxidu hlinitého

Tabulka 6.5 Výsledky TGA analýzy materiálu ABS při měření v kelímku z oxidu hlinitého

TGA při měření v kelímku z oxidu hlinitého		
Materiál	Rychlost nárůstu teploty [°C/min]	Reziduum [mg]
ABS	5	8,10E-03
	10	8,61E-03
	15	2,06E-03
	20	4,44E-02
	25	-2,87E-02

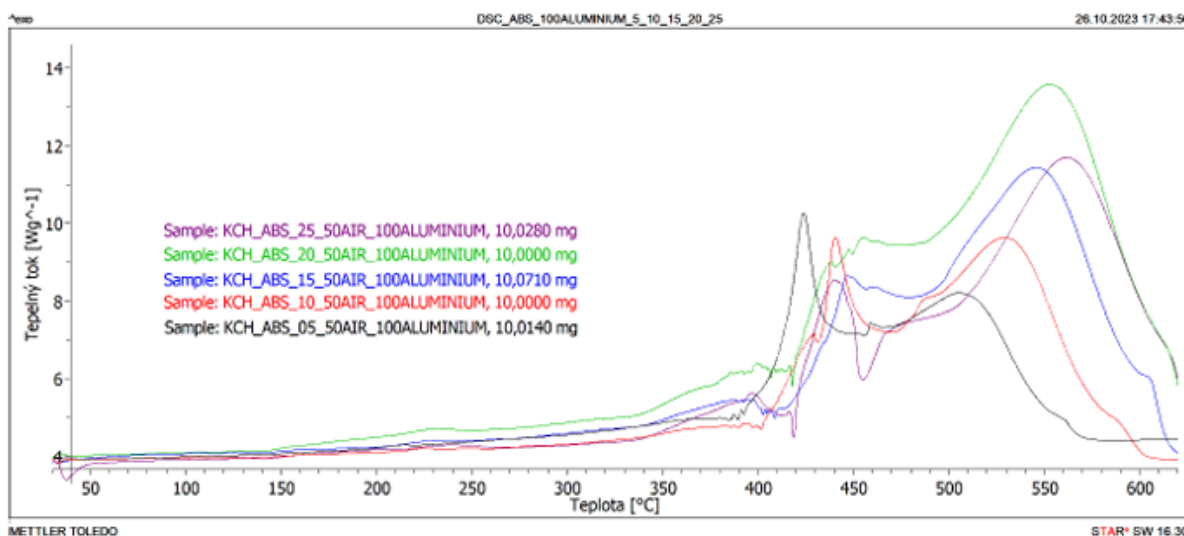


Obrázek 6.5 TGA křivky materiálu ABS při různých rychlostech nárůstu teploty při měření v kelímku z oxidu hlinitého

Výsledky analýz materiálu ABS v kelímku z alumina při různých nárůstech teploty jsou uvedeny v tabulkách Tabulka 6.6 a Tabulka 6.7, přičemž grafické znázornění výsledků DSC a TGA analýzy je zobrazeno na obrázcích Obrázek 6.6 a Obrázek 6.7.

Tabulka 6.6 Výsledky DCS analýzy materiálu ABS při měření v kelímku z alumina

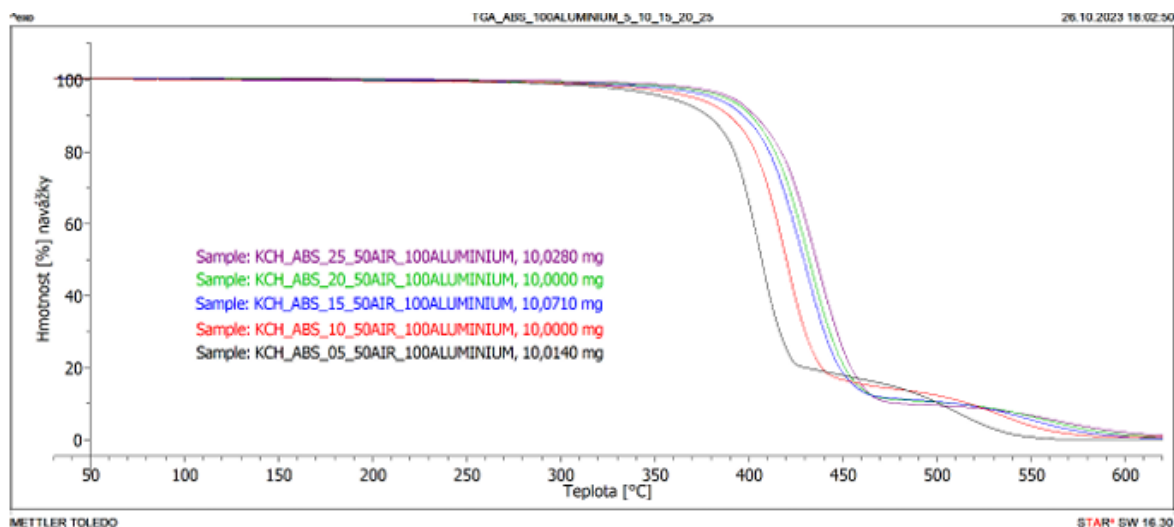
DSC při měření v kelímku z alumina				
Materiál	Rychlost nárůstu teploty [°C/min]	Navážka [mg]	Max 1.píku při t [°C]	Max 2.píku při t [°C]
ABS	5	10,014	421,41	500,28
	10	10	439,22	525,33
	15	10,071	447,07	544,13
	20	10	457,66	552,71
	25	10,028	439,58	561,25



Obrázek 6.6 DSC křivky materiálu ABS při různých rychlostech nárůstu teploty při měření v kelímku z alumina

Tabulka 6.7 Výsledky TGA analýzy materiálu ABS při měření v kelímku z alumina

TGA při měření v kelímku z alumina		
Materiál	Rychlost nárůstu teploty [°C/min]	Reziduum [mg]
ABS	5	-2,85E-02
	10	2,47E-02
	15	8,58E-03
	20	3,34E-02
	25	7,85E-02



Obrázek 6.7 TGA křivky materiálu ABS při různých rychlostech nárůstu teploty při měření v kelímku z aluminia

Odběr vzorků

Nejprve je nutné nadefinovat si, jaký je rozdíl mezi materiálem a vzorkem. Obecně lze říci, že vzorek je malá část většího celku (materiálu, látky, produktu), která je odebrána za účelem testování, analýzy nebo kontroly. Vzorek je tedy reprezentativní částí materiálu. V některých oborech existují **technické normy pro odběr vzorků** (např. ČSN, ISO, ASTM), podle kterých se musí postupovat.

Aby mohl být materiál testován, musí být vzorek dostatečně velký pro přípravu dalších vzorků podle příslušné metody. Při odběru je zapotřebí respektovat pravidla pro vzorky používané k forezním účelům.

Pro sypké materiály se používá metoda kvartování. Slovo „kvartování“ pochází z latinského *quartus* = čtvrtý. Postup výroby vzorku spočívá v tom, že se materiál **rozdělí na čtyři stejné části** – dvě se odstraní a dvě se znovu spojí pro další dělení. Postup se opakuje, dokud se nezíská vzorek požadovaného objemu.

7 Příklady srovnání PTCH materiálů

Dřevo

Dřevo patří mezi nejstarší a nejrozšířenější materiály využívané lidmi. Díky svým příznivým vlastnostem, snadné opracovatelnosti a dobré dostupnosti se používá již od dávných dob. Mezi jeho hlavní přednosti patří pevnost, relativně nízká hmotnost a výborné tepelné izolační schopnosti. Navíc jde o surovinu přírodně obnovitelnou. Na druhou stranu má i určité nevýhody, především kvůli své anizotropii, tedy odlišným vlastnostem v různých směrech. K dalším nedostatkům patří hořlavost, tvarové změny v důsledku vlhkosti (např. bobtnání, sesychání či kroucení) a náchylnost k napadení biologickými nebo živočišnými škůdci. Dřevo má široké možnosti využití. Uplatňuje se ve stavebnictví, papírenském a nábytkářském průmyslu, v energetice, ale také při výrobě hudebních nástrojů či sportovního vybavení. Při jeho zpracování se neztrácí ani odpad, který se efektivně využívá například k výrobě briket a pelet pro vytápění.

Různé druhy dřevin se liší svým chemickým složením i fyzikální strukturou, což se odráží v odlišných požárně technických vlastnostech jednotlivých druhů dřevin. Tuto skutečnost lze pozorovat v tabulkách *Tabulka 7.1* a *Tabulka 7.2*, které uvádějí průměrné výsledné hodnoty z kónického kalorimetru pro vzorky zkoušených dřevin při hustotě tepelného toku 35 kW/m² a 50 kW/m². Pro porovnání bylo zvoleno celkem osm druhů dřeva, přičemž od každého druhu byly zkoušeny dva vzorky při obou hustotách tepelného toku.

Tabulka 7.1 Průměrné hodnoty vzorků zkoušených při hustotě tepelného toku 35 kW.m⁻²

	Čas zapálení [s]	HRR _{max} [kW.m ⁻²]	Čas HRR _{max} [s]	mAHRE [kW.m ⁻²]	THR [MJ.m ⁻²]	EHC _(av) [MJ.kg ⁻¹]	Délka zkoušky [s]	Úbytek hmotnosti [%]
Smrk	46	165,1	60	60,1	103,3	11,5	2278	66,5
Borovice	24	161,6	63	103,8	235,0	16	2578	63,5
Modřín	66	167,1	83	58,3	96,6	9,5	1790	75,7
Jedle	53	154,5	70	67,5	177,0	14,7	2698	82,0
Buk	67	237,2	1443	97,3	160,6	10,7	1823	80,5
Jasan	76	165,9	93	71,3	196,8	10,7	2900	78,5
Třešeň	54	150,5	73	66,7	161,5	11,8	2453	75,0
Ořešák	68	160,4	-	79,3	202,5	13,2	2593	78,0

Tabulka 7.2 Průměrné hodnoty vzorků zkoušených při hustotě tepelného toku 50 kW.m⁻²

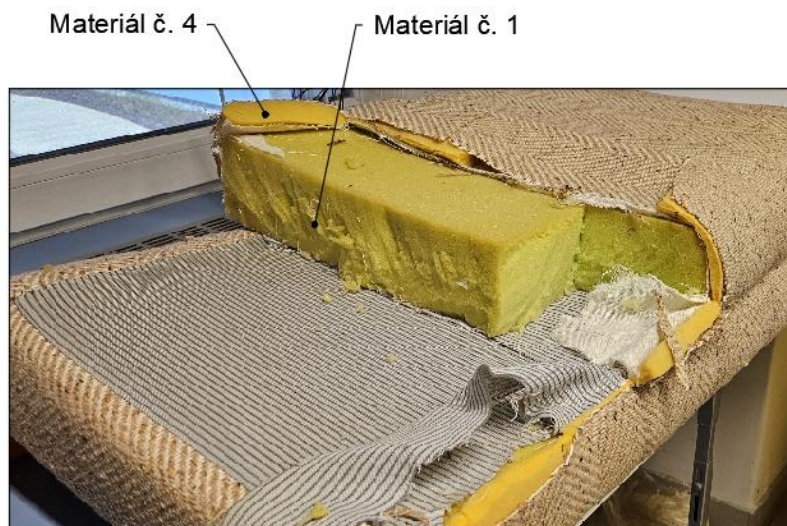
	Čas zapálení [s]	HRR _{max} [kW.m ⁻²]	Čas HRR _{max} [s]	mAHRE [kW.m ⁻²]	THR [MJ.m ⁻²]	EHC [MJ.kg ⁻¹]	Délka zkoušky [s]	Úbytek hmotnosti [%]
Smrk	14	145,0	43	79,0	158,1	14,6	2750	84,9
Borovice	21	191,5	60	118,0	246,7	15,1	2623	75,2
Modřín	24	160,2	48	92,3	101,2	12	1665	78,2
Jedle	21	155,2	40	85,1	176,4	16,2	2285	84,1
Buk	34	299,8	1228	123,3	173,0	12,3	1538	81,1
Jasan	32	175,3	55	99,7	182,0	11	2218	78,9
Třešeň	24	164,7	60	90,2	140,5	12,2	2033	81,5
Ořešák	33	171,8	53	93,2	169,6	10,5	2185	78,7

U některých průběhů HRR jsou vidět rozdílné výsledky, což bylo nejspíš způsobeno i tím, že je dřevo nehomogenní materiál. Pokud porovnáme naměřené výsledky všech druhů dřev je patrné, že nejvyšších hodnot bylo dosaženo u bukového dřeva, a to při obou tepelných tocích. Lze tedy říct, že buk je z hlediska požárního nebezpečí nejrizikovější. Teoretický předpoklad byl, že dřevo s nižší objemovou hmotností by mělo být hořlavější, což se nepotvrdilo. Při hustotě tepelného toku 35 kW.m⁻² dosáhlo HRR_{max} hodnoty 237,2 kW.m⁻², při 50 kW.m⁻² bylo HRR_{max} 299,8 kW.m⁻². Obou těchto hodnot bylo dosaženo až při druhém píku. Bukové dřevo bylo jediné, u kterého byl druhý pík vyšší než první. Výjimkou je jeden vzorek ořechu, který při hustotě tepelného 35 kW.m⁻² měl druhý pík také vyšší. Z jehličnatých vzorků, byla nejhořlavější borovice. U té byly naměřeny v celkovém pořadí druhé nejvyšší hodnoty. Při hustotě tepelného toku 35 kW.m⁻² bylo HRR_{max} 161,6 kW.m⁻², při 50 kW.m⁻² bylo HRR_{max} 191,5 kW.m⁻².

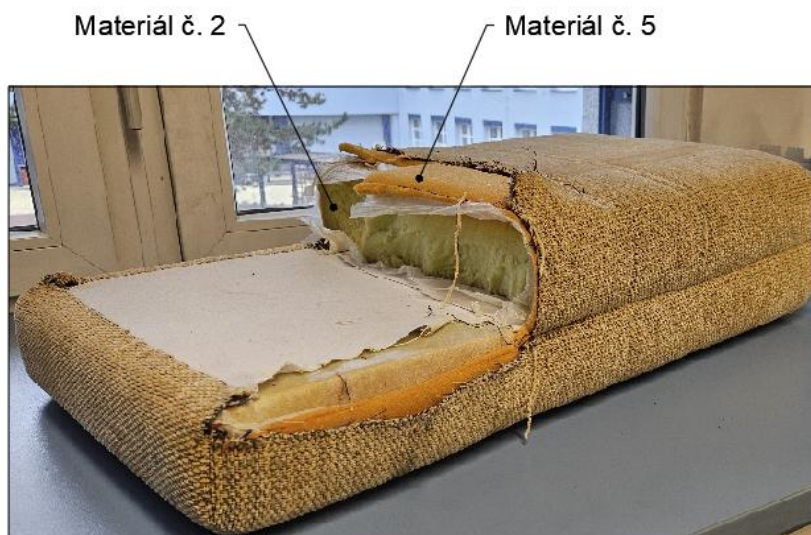
PUR

Polyuretany jsou syntetické polymery, s kterými jsou lidé v každodenním kontaktu a využívají se v mnoha průmyslových odvětvích. Vlastnosti pěn vytvořených z polyuretanu jsou dány chemickým složením dané pěny, které se definují při výrobě, a rovněž poměrem komponent. Hlavními komponenty jsou: izokyanáty, polyalkoholy a voda. PTCH jednotlivých polyuretanů se od sebe liší právě z důvodu jejich složení. Obecně jsou PUR hořlavé látky, proto se za účelem snížení hořlavosti do nich přidávají tzv. retardéry hoření. Retardanty hoření, označované také jako samozhášivé látky nebo zpomalovače hoření, jsou chemické nebo fyzikálně-chemické nástroje používané k omezení nebo zamezení šíření hoření v materiálech. Jejich účinek spočívá ve zvýšení tepelné stability a snížení hořlavosti či zápalnosti materiálů prostřednictvím fyzikálních, chemických, nebo častěji kombinovaných mechanismů.

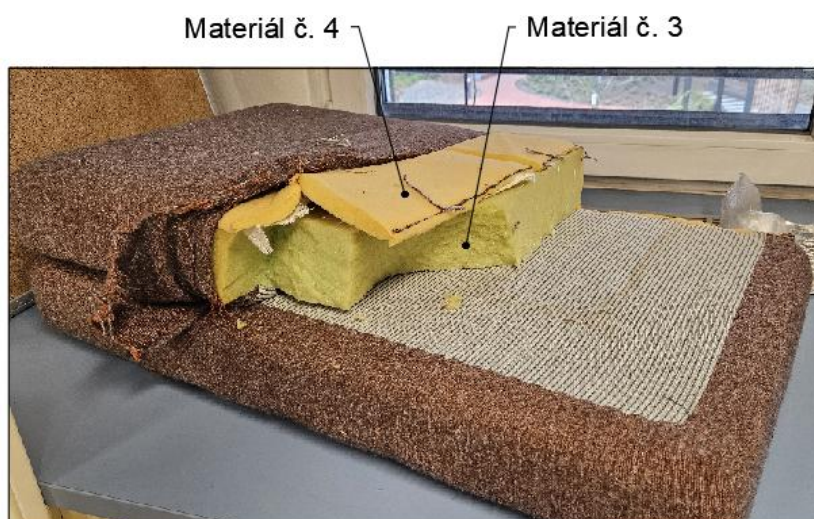
V Tabulka 7.3 jsou uvedeny hodnoty spalného tepla a teplot vzplanutí a vznícení různých PUR pěn. Jednotlivé PUR pěny, jejichž vzhled je zachycen na Obrázcích Obrázek 7.1 až Obrázek 7.3, byly odebrány ze sedacích částí tří křesel, které se nacházely v Hotelu Centrum, vybudovaném v 80. letech 20. století ve městě Frýdek-Místek. Tyto křesla byla použita při velkorozměrových zkouškách v rámci programu „Strategická podpora rozvoje bezpečnostního výzkumu ČR 2019–2025“.



Obrázek 7.1 Materiál č. 1 a 4



Obrázek 7.2 Materiál č. 2 a 5



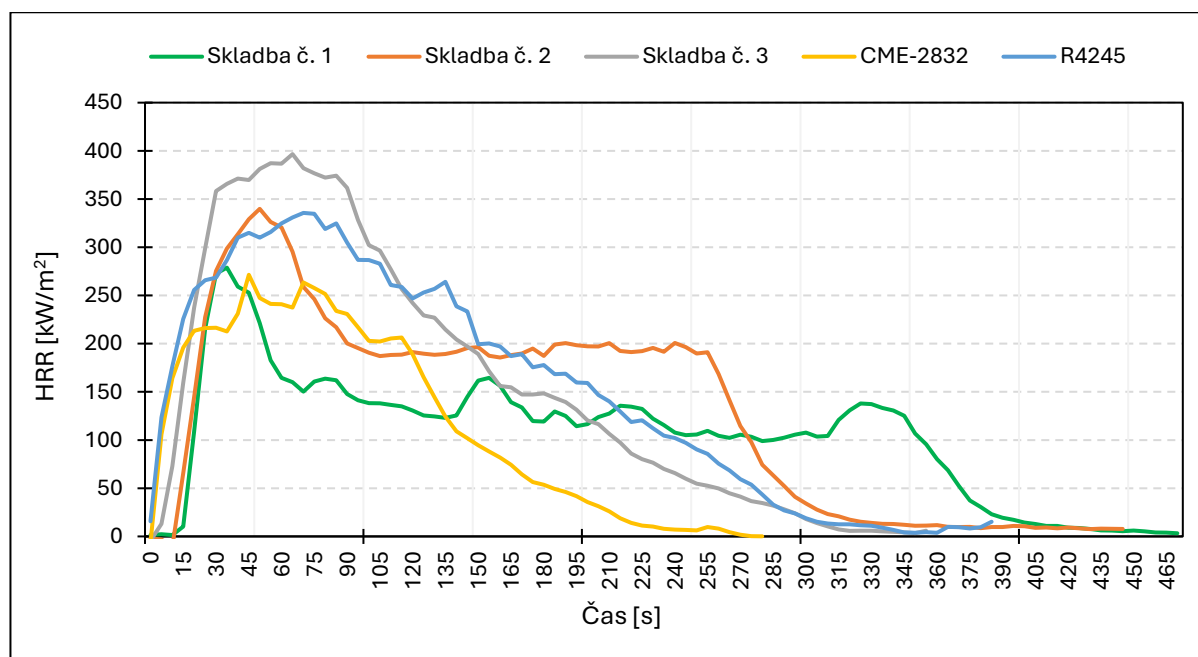
Obrázek 7.3 Materiál č. 3 a 4

Dále byly zakoupeny další dva materiály, které byly dle výrobce vyrobeny v provedení se sníženou hořlavostí. Jednalo se o materiál CNE-2832, který byl zakoupen u firmy Melli Interiéry CZ, s.r.o. Dle dostupných informací od prodejce se jedná o speciální nehořlavou pěnu s příměsí grafitu. Na základě technického listu tato pěna splňuje požadavky norem ČSN ISO 3795, TL 1010, normy FMVSS 302 a Směrnice Evropského parlamentu a Rady 95/28/ES. Další zakoupený materiál byl PUR pěna R4245 koupený u společnosti Hilding Anders Česká republika a.s. Podle informací dodavatele se jedná o samozhášivou pěnu s dobrou teplotní stabilitou, určenou převážně do nemocničních zařízení, léčen nebo sanatorií.

Tabulka 7.3 Spalné teplo, teplota vzplanutí a teplota vznícení různých druhů PUR pěn

	Spalné teplo [MJ/kg]	Teplota vzplanutí [°C]	Teplota vznícení [°C]
Materiál č. 1	28,477	360	390
Materiál č. 2	29,065	380	395
Materiál č. 3	28,438	360	390
Materiál č. 4	28,095	380	405
Materiál č. 5	28,158	380	400
CME-2832	27,028	370	390
R4245	28,930	375	415

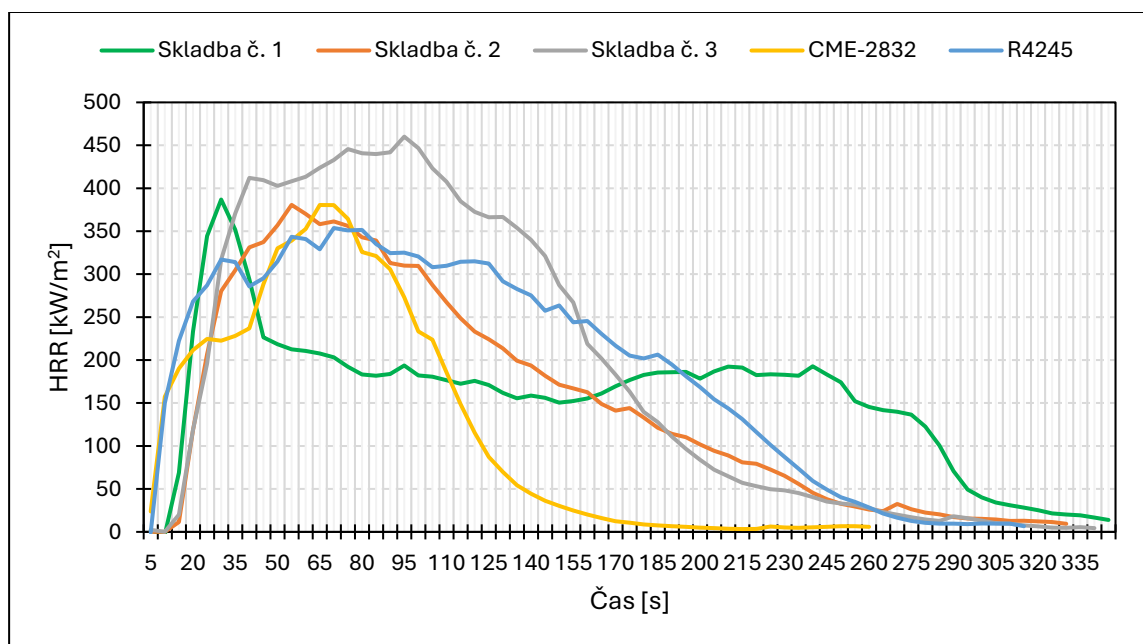
Výsledné hodnoty HRR z kónického kalorimetru při hustotách tepelných toků 35 kW/m^2 a 50 kW/m^2 jsou patrné z Obrázků Obrázek 7.4 a Obrázek 7.5. Byly měřeny tři kompletní skladby (skladba 1-3) a poté samostatné PUR pěny CME-2832 a R4245.



Obrázek 7.4 Aritmetický průměr HRR různých PUR pěn při 35 kW/m^2

Při tepelné zátěži 35 kW/m² vykazuje nejvyšší průměrnou hodnotu vrcholové rychlosti uvolňování tepla skladba č. 3, která je tvořena materiály č. 3 a č. 4. Tyto materiály mají nižší teploty vzplanutí a vznícení, což mohlo přispět k vyšší HRR. Skladby zároveň obsahovaly textilie, které prodloužily dobu do zapálení ve srovnání s materiály CME-2832 a R4245. Textilní složka tak mohla částečně ovlivnit výsledky.

Nejnižší hodnotu HRR pak zaznamenal materiál CME-2832, pravděpodobně díky obsahu retardérům hoření. Tento materiál také hořel plamenem nejkratší dobu v průměru 261,5 sekundy u dvou testovaných vzorků.



Obrázek 7.5 Aritmetický průměr HRR různých PUR pěn při 50 kW/m²

Při hustotě tepelného toku 50 kW/m² vykazuje nejvyšší hodnotu maximální rychlosti uvolňování tepla skladba č. 3. Průměrné maximální hodnoty HRR u skladby č. 1, skladby č. 2 a materiálu CME-2832 se pohybují na velmi podobné úrovni, přibližně 386 kW/m², 380 kW/m² a 380 kW/m². Hodnoty HRR u materiálu CME-2832 se obdobně jako při nižší hustotě tepelného toku vyznačuje strmějším a rychlejším poklesem HRR po dosažení maxima, což je opět patrné z průběhu křivky. Doba plamenného hoření je u tohoto materiálu kratší, v průměru 233 sekund u obou vzorků.

8 Příklady praktického využití požárně technických charakteristik v praxi - Kalcinace

Kalcinace je proces tepelného rozkladu látek, při kterém dochází k jejich zahřátí na vysokou teplotu bez přítomnosti nebo s omezeným přístupem vzduchu (kyslíku). Tento pojem se používá v různých oborech a význam se mírně liší podle kontextu. Při vyšetřování příčin požárů je kalcinace sádrokartonových desek jedním z důležitých ukazatelů, který může pomoci lokalizovat ohnisko požáru a odhadnout intenzitu teploty v dané oblasti.

Mezi prvními, kteří se začali zabývat chováním sádrokartonu při požáru, byly Spojené státy americké, kde v roce 1970 byl sádrokarton použit přibližně v 90 % budov. Byly zkoumány strukturální změny, ke kterým dochází při kalcinaci sádrokartonové desky, a možnosti využití kalcinace pro zjištění příčin požáru. Z hlediska zjišťování příčin vzniku požáru je důležité, že kalcinace začíná na straně přivrácené k požáru a postupuje směrem na stranu odvrácenou. Přestup tepla z exponované strany (na straně požáru) na odvrácenou stranu je v počáteční fázi požáru silně zpomalen, což způsobuje značné zpoždění nárůstu teploty na odvrácené straně sádrokartonové desky. Bylo zjištěno, že kalcinovaná část SDK desky má menší hustotu, než nekalcinovaná část. Tudiž, čím je hloubka kalcinace v SDK desce větší, tím větší bylo její celkové vystavení podmínkám požáru (tepelemu toku a doby expozice). [2][3]

8.1 Vizualní změny

Sádrokarton se při požáru chová poměrně předvídatelně. Stopy po požáru bývají často dobře čitelné a jasně ohraničené. Na straně požáru nejprve povrch papíru zuhelnatí a posléze odhoří. Pod papírem se nachází sádrová hmota, která mění barvu vlivem probíhající pyrolýzy organického pojiva a dalších přísad. Při delším ohřevu může dojít k zuhelnatění i na odvrácené straně SDK desky. Část stěny přímo vystavená plamenům je světlejší a změna barvy je pozorovatelná i v průřezu desky. Na straně požáru dochází k postupnému zesvětlování průřezu směrem k odvrácené straně. Toto bylo vyzorováno zejména v případě laboratorních testů, kde je SDK vzorek vystaven přímému tepelnému zatížení bez spalování jiného hořlavého materiálu. Vzorek se dále nechá jenom vychladnout a nepůsobí na něj ani hasební voda. Při dlouhotrvajícím působení tepelného zatížení může dojít ke změně barvy v celém průřezu a odhoření papíru na odvrácené straně. V případech reálného požáru bylo v rámci testování zjištěno, že dochází k průniku spalin do poškozené (kalcinované) části SDK desky a tím ke změně barvy do šedé až černé. Dále bylo výzkumem vyzorováno, že dochází k dalším barevným změnám na povrchu přivrácené strany SDK směrem k požáru. Toto se doposud nepodařilo spolehlivě prokázat, ale pravděpodobně se jedná o působení hasební vody a jejich nečistot, kdy v této části dochází k významnému působení účinků požáru a hasební vody. Jedná se o místa, kde se ve větší míře soustředí hasební zásah. Často se jedná o barevnou změnu do zelené nebo modré barvy. SDK deska bude v této fázi chemicky dehydratovaná a dojde k výrazným strukturálním změnám. Po požáru často zůstávají svíse sádrokartonové stěny celistvé, u stropů však může dojít k destrukci vlivem hasební vody nebo mechanickým působením při zásahu. Toto závisí zejména na vedení zásahu a přítomnost vyztužujících prvků obsažených v sádrové hmotě. Dále pak na samotném uchycení SDK desek v profilech.

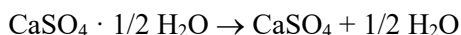
8.2 Strukturální změny

Při požáru dochází v SDK desce ke kalcinaci, což je teplotní proces, při kterém se z pevného materiálu vylučuje voda a dochází k dalším chemickým a fyzikálním změnám sádrového jádra SDK desky. Pokud je deska zahřívána, dochází k postupné kalcinaci při teplotách od 100 do 120 °C. Materiál

postupně uvolňuje vodu (dehydratuje) a materiál dihydrátu síranu vápenatého je vrácen zpět do původního sypkého materiálu hemihydrátu síranu vápenatého.



Při teplotách 300 °C dochází ke kompletní dehydrataci a vzniku síranu vápenatého.



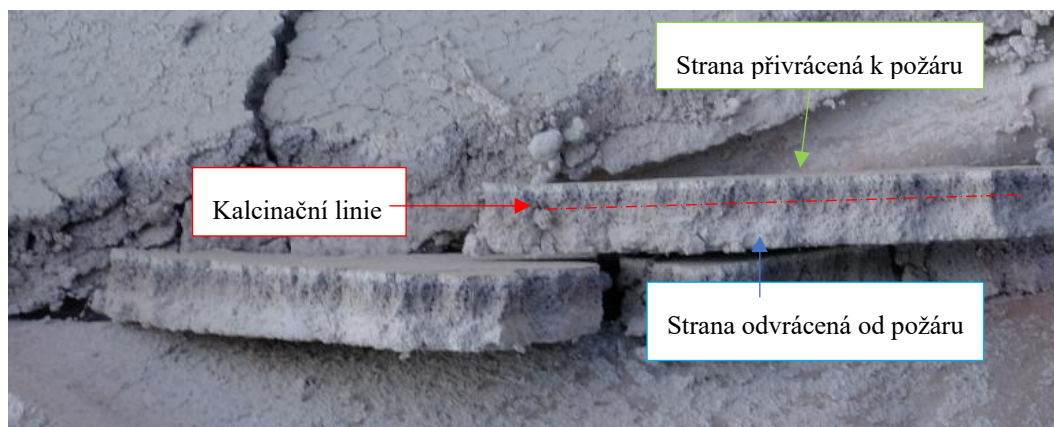
Dehydratace je doprovázena významnou změnou hmotnosti, hustoty a pevnosti exponované desky. Z hlediska zjišťování příčin požáru je důležité, že kalcinace začíná na straně přivrácené k požáru, a postupuje směrem k odvrácené straně. Z výzkumů vyplývá, že hloubka kalcinace souvisí s celkovou tepelnou expozicí, které je sádrokarton vystaven. Čím větší hloubka kalcinace zasahuje do sádrokartonu, tím větší tepelný tok na toto místo působil po delší dobu. Tato data mohou být užitečná pro zjištění situace na místě požáru a mohou být použita k přesnější lokalizaci ohniska. [4]

8.3 Metody měření použitelné v České republice

Bylo zjištěno, že prostor, na který účinky požáru působí nejdéle, bývá nejvíce degradován. SDK konstrukce se od dřevěných konstrukcí chovají odlišně, a ne vždy je možné použít pouze vizuální hodnocení. Někdy je nutné použít sofistikovanější metodu nebo technický prostředek. Významnou metodou používanou v ČR je pozorování usazených sazí na SDK stěnách. U menších požárů, kde nedojde k intenzivnímu hoření v celém prostoru, lze pozorovat bílá vypálená místa s přímým působením plamenů a okolní černé usazené saze. Toto pozorování ve většině případů spolehlivě ukazuje na místo intenzivního hoření a možné ohnisko požáru.

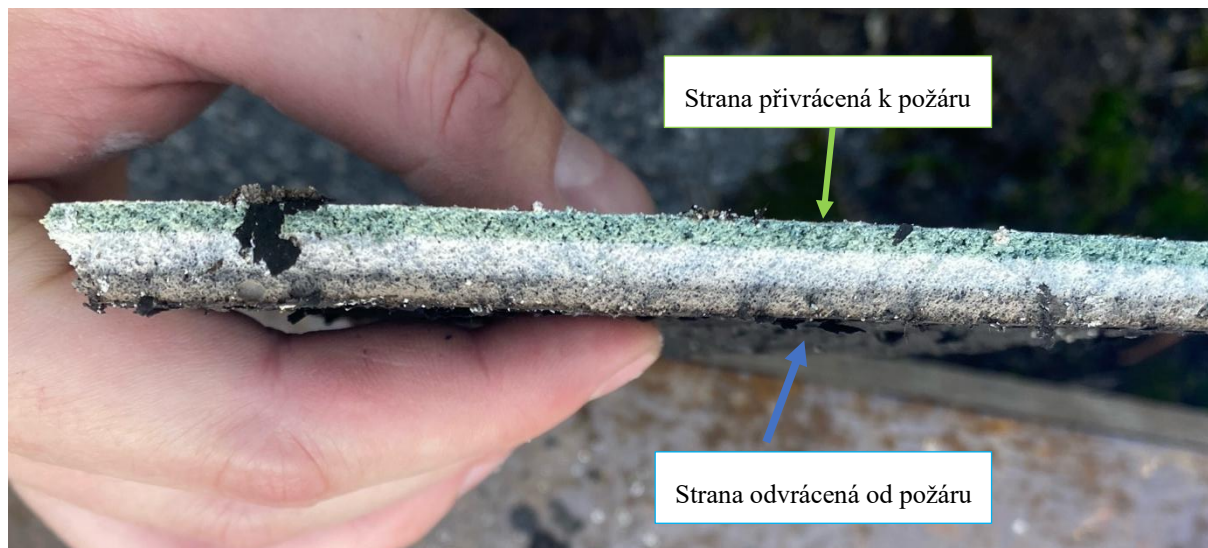
V současné době bylo teoreticky možné posoudit hloubku kalcinace v SDK desce v ČR pomocí řezu požárem poškozené stěny. Vyšetřovatel příčin požáru musí stěnu „rozbít“ a vizuálně posoudit změnu barev v řezu, aby našel kalcinační linii (přechod mezi dehydratovanou a „nepoškozenou“ částí SDK desky). V tomto případě musí vyšetřovatel zjistit, kde je hloubka kalcinace nejhlubší, a tím určit místo s nejdelším působením účinků požáru. Pro posouzení řezu není vhodné použít řezný nástroj, protože by došlo k promíchání kalcinované a nekalcinované vrstvy.

Níže si rozebereme různé druhy průřezu a vyobrazení kalcinační linie při laboratorním testování a při podmínkách reálného požáru. Na Obrázek č. 8.1 je zobrazena odlomená SDK deska mimo místo vzniku požáru, kde lze vidět tmavší zabarvení na straně přivrácené k požáru. Zároveň lze vidět tenkou vrstvu o tloušťce cca 1-2 mm, která je bělejší. Toto ovšem neodpovídá naměřené kalcinaci v tomto místě požáru, která byla kolem 5-6 cm.



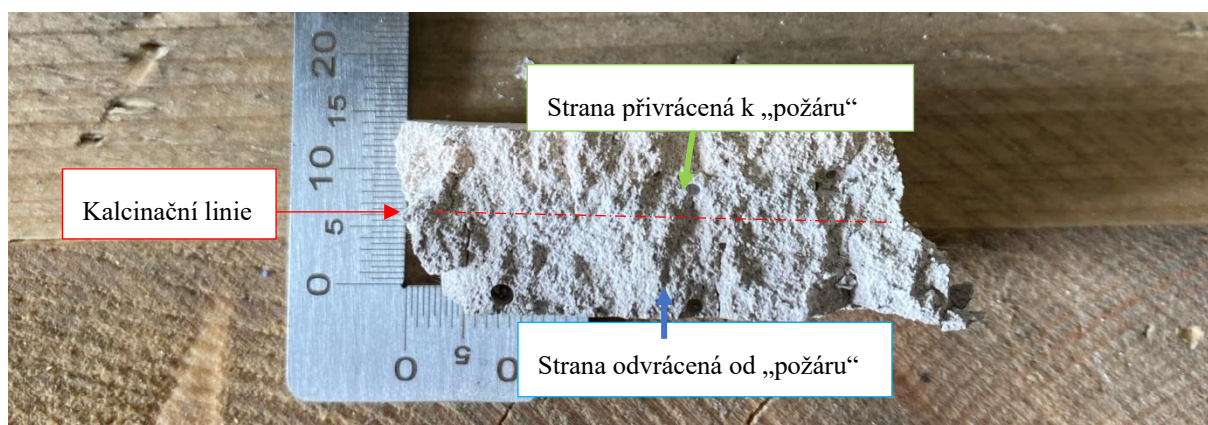
Obrázek č. 8.1 Zobrazení kalcinační linie. SDK deska byla vystavena účinkům reálného požáru.

Dále bude představen lom SDK desky (viz Obrázek č. 8.2), která se nacházela přímo v místě vzniku požáru, kde byl soustředěný hasební zásah. V tomto případě se SDK deska rozvrstvila na celkem 3 zóny. Od strany přivrácené k požáru se jedná o „zelenou“ vrstvu, která dále přechází v „bílou“ vrstvu a poslední vrstva je tmavá. Jedná se o úlomek, kde není zřejmá kalcinační linie. Podle měření se nachází na přechodu bílé vrstvy na tmavou. V tomto případě došlo k významnému účinku požáru a zejména plamenného hoření v tomto místě. Tedy nedošlo k velkému zatížení tohoto prostoru s ohledem na působení zplodin hoření, které mohou ovlivnit barvu jednotlivé vrstvy.



Obrázek č. 8.2 Na obrázku lze vidět lom SDK desky z místa vzniku požáru.

Jako poslední bude představen lom SDK desky, která byla testována v laboratorních podmínkách a SDK deska byla vystavena čistě účinkům požáru bez jiných spalovaných materiálů v podmínkách reálného požáru. V tomto případě byla vrstva přivrácená k požáru čistě bílá a šlo v určitých částech SDK desky určit, kde se nachází kalcinační linie – viz Obrázek č. 8.3.



Obrázek č. 8.3 Pohled na lom SDK desky spálené v podmínkách zkušební pece.

Vyjádření kalcinační linie je teoreticky možné určit v podmínkách laboratorního testování, avšak v reálných podmínkách požáru se jedná o neaplikovatelnou metodu.

Další možnou metodou je oškrábání SDK desky k místu přechodu do „nepoškozené“ části. Tato metoda byla vyzkoušena pouze během laboratorního testování SDK desky, kdy byla snaha oškrábat „kalcinovanou“ vrstvu na „nekalcinovanou“ vrstvu. V plynové peci došlo ke spálení vzorku SDK desky

o rozměrech 1 x 1 m s tloušťkou 15 mm. Po spálení proběhla snaha oškrábat kalcinovanou vrstvu na kalcinační linii. Bylo vyzkoušeno mnoho způsobů jako například drátěná škrabka, ale žádný pokus nebyl v tomto případě úspěšný. Tedy nedošlo k prokazatelnému „oškrábání“ kalcinované vrstvy a změření hloubky kalcinace.

Trvalo více než půl století, než byl vynalezen první nástroj na určování hloubky kalcinace. Na základě dalších výzkumů byly navrženy sofistikovanější nástroje. Pro účely výzkumu v rámci projektu FING byl použit z USA dovezený jeden z používaných technických prostředků (viz Obrázek č. 8.4), který byl dále testován a vylepšován. Původně byl tento prostředek určen k měření tloušťky protipožárního nástřiku, nikoli hloubky kalcinace SDK desky. Zároveň se jedná o jediný komerčně prodávaný prostředek, který lze využít k měření hloubky kalcinace, ačkoli jeho původní určení je jiné. Nástroj je vyroben z lisovaného plastu a je vybaven nerezovou penetrační jehlou s aretačním šroubkem. Po uvolnění aretačního šroubku se penetrační jehla může volně posouvat.



Obrázek č. 8.4 Dovezený technický prostředek pro měření tloušťky protipožárního nástřiku používaný pro měření hloubky kalcinace.

V současné době je měření hloubky kalcinace jednou ze čtyř možností (viz Obrázek č. 8.5), kde vyšetřovatel požáru může analyticky vyjádřit účinky požáru na požářišti.

účinek požáru (fire effect)	pozorovatelný	měřitelný
dosažená teplota	X	
úbytek hmotnosti	X	X
uhelnatění	X	X
odštěpování	X	
změna barvy	X	
tavení materiálu	X	
teplotní rozpínání a deformace	X	X
oxidace	X	
usazování částic	X	
čisté hoření	X	
kalcinace	X	X
okenní sklo	X	
nábytkové pružiny	X	
žárovky	X	
zranění osob	X	
duhový efekt	X	
zvýšené množství sazí v požárním hlásiči	X	

Obrázek č. 8.5: Určení místa vzniku požáru podle NFPA 921. [3]

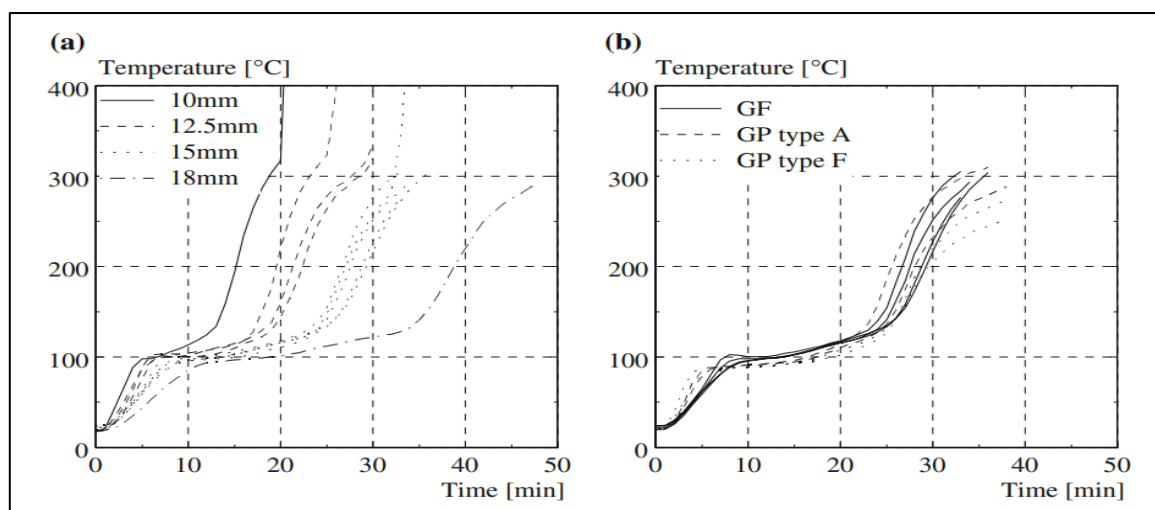
9 Laboratorní zahraniční testování SDK

V literatuře [5] byly studovány SDK desky typu A a F¹ podle EN 520 a také sádrovláknité desky podle EN 15283-2 od tří různých výrobců (viz Tabulka č. 9.1). Sádrokartonové desky typu A jsou standardní běžné desky, které obsahují porézní pojivo. Samotné sádrové jádro je bez výztuže, kdy na povrchu se nachází speciální kartón nebo laminovaný papír. Sádrokartonové desky typu F mají zlepšenou soudržnost sádrového jádra při vysokých teplotách přidáním dalších materiálů, jako jsou například skelná vlákna a různá plniva. Sádrovláknité desky mají sádrové pojivo vyztužené papírovými vlákny a obvykle mají vyšší hustotu ve srovnání s SDK deskami typu A a F. Mohou dokonce vykazovat lepší požární vlastnosti než SDK desky typu F. [5]

Tabulka č. 9.1: Tloušťka a průměrná hustota sádrokartonu testována dle normy ISO.[5]

Manufacturer	Type	Thickness tested (mm)	Density (kg/m ³)
Manufacturer 1	Gypsum fibreboard (GF)	10, 12.5, 15, 18	1186
Manufacturer 2	Gypsum plasterboard (GP) of type A	15	908
	Gypsum plasterboard (GP) of type F	15	853
	Gypsum fibreboard (GF)	12.5	1504
Manufacturer 3	Gypsum plasterboard (GP) of type A	10, 12.5, 15, 25	810
	Gypsum plasterboard (GP) of type F	15	889
	Gypsum fibreboard (GF)	12.5	1313

Na Obrázek č. 9.1 je znázorněn vývoj teplot na neexponované straně (odvrácené od požáru) pro SDK desky typu A, F a sádrovláknité desky. Testy ukázaly zejména na části obrázku (b), kde proběhlo testování různých typů SDK desek o stejné tloušťce, že zvyšování teploty do zhruba 200 °C byly v jednotlivých časových intervalech výsledky téměř totožné. Rozdíly v čase pro stejnou naměřenou teplotu byly méně než 5 minut.



Obrázek č. 9.1 (a) Vývoj teploty na neexponované straně sádrovláknitých desek různé tloušťky, b) vývoj teploty na neexponované straně různých typů sádrokartonových desek o tloušťce 15 mm. [5]

Lze tedy předpokládat, že obsah vody a sádry pro různé desky byl přibližně stejný. Přidání skelných vláken a plniv do sádrového jádra významně nezměnilo tepelné chování desek. Vyztužení však obecně zlepšuje stabilitu a mechanické vlastnosti desky (smršťování, praskání, odpadávání atd.) desek po

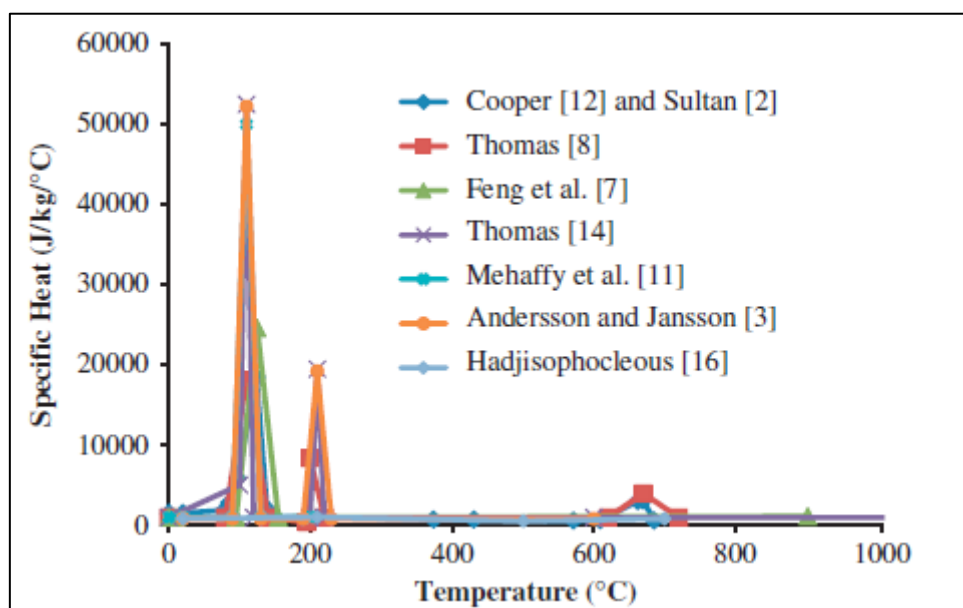
¹Typ A – standardní *sádrokartonová deska* · Typ F – požárně odolná *sádrokartonová deska*

úplném vysušení (dehydrataci). Pozoruhodné je, že hustota sádrovláknitých desek před vystavením zvýšené teploty byla mnohem vyšší než u SDK desek (viz Tabulka č. 9.1), ale nebyl pozorován žádný významný rozdíl s ohledem na chování při vystavení tepelné expozici. Hustota se tedy nezdá být relevantním parametrem pro popis tepelného chování sádrokartonových desek. Hlavním parametrem je obsah vody. Čím má sádrokartonová deska větší tloušťku, tím větší je obsah vody v sádrovém pojivu. [5]

Literatura [6] popisuje testování SDK desek ve světě a zmiňuje, že testy typově stejných SDK desek nemusí vykazovat stejné výsledky. Rozdíly jsou dány odlišným provedením jednotlivými výrobci a odlišnou strukturou v různých místech. Proto je vhodné provést testování SDK desek v České republice a porovnat výsledky s typově stejnými zkouškami provedenými ve světě.

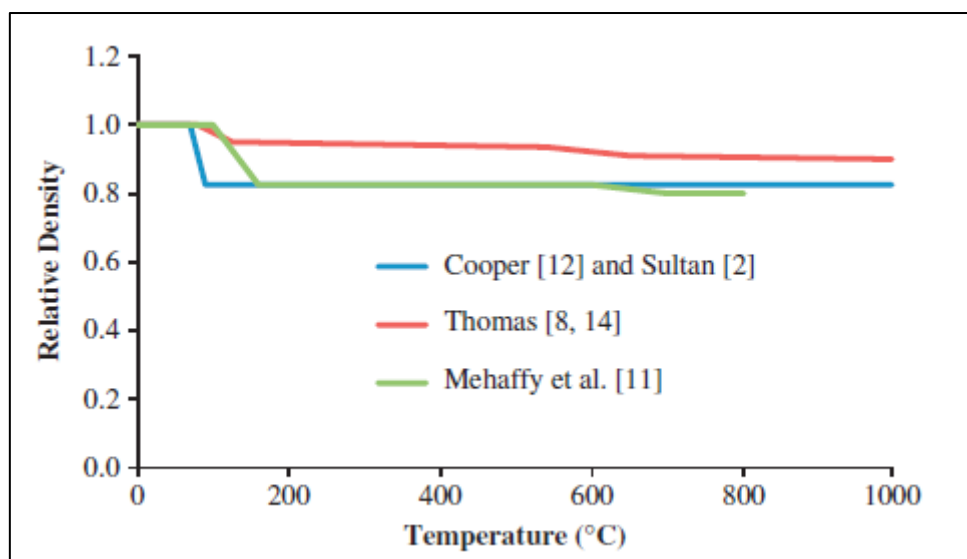
Bylo zjištěno, že první dehydratační reakce nastává při 100 až 120 °C, kdy se dihydrát síranu vápenatého mění na hemihydrát síranu vápenatého. Existuje však rozpor ohledně druhé dehydratace. Jedna studie uvádí, že druhá dehydratace nastává až při 600 °C, zatímco jiná studie ji odhaduje mezi 210 a 300 °C.

Na Obrázek č. 9.2 je znázorněna měrná tepelná kapacita SDK desky vystavené zvýšené teplotě. Nejvyšší hodnota je naměřená při teplotě okolo 100 °C, což může odpovídat první dehydrataci. Druhá nejvyšší hodnota je naměřena okolo 200 °C, kde lze předpokládat druhou dehydrataci.



Obrázek č. 9.2: Měrná tepelná kapacita SDK desky naměřená v různých studiích. [6]

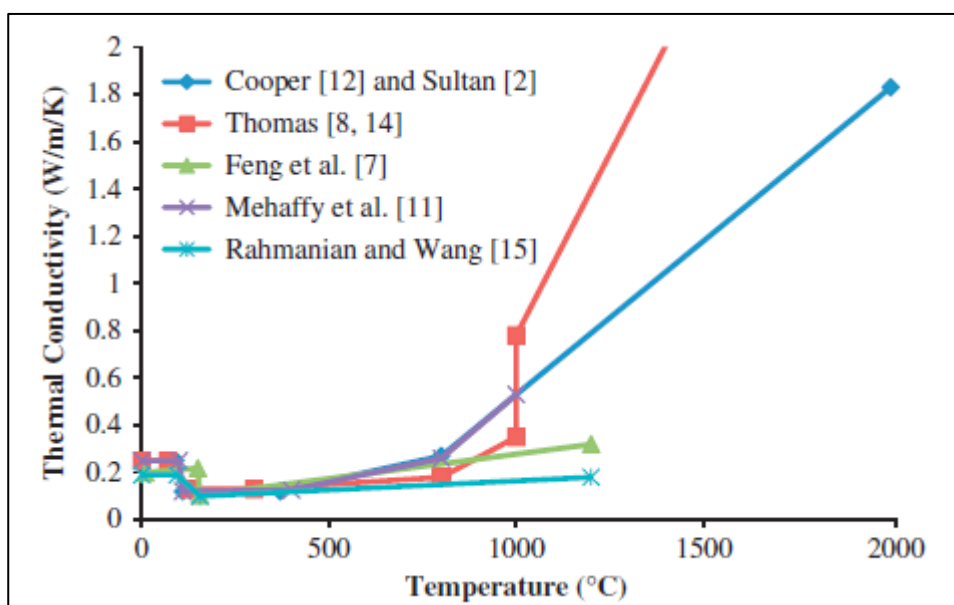
Z různých studií bylo dále vybráno chování SDK z pohledu relativní hustoty. Typická SDK deska má hustotu mezi 550 a 850 kg/m³. Hustota se mění v závislosti na obsahu vlhkosti a vzduchu v sádrovém jádru. Tyto faktory hrají důležitou roli z pohledu reakce na požár.



Obrázek č. 9.3 Relativní hustota SDK desky provedena třemi studii. [6]

Na Obrázek č. 9.3 je zobrazena relativní hustota z různých studií, které poukazují na to, že největší pokles hustoty nastává přibližně kolem 125 °C, kdy dochází k první dehydratační reakci.

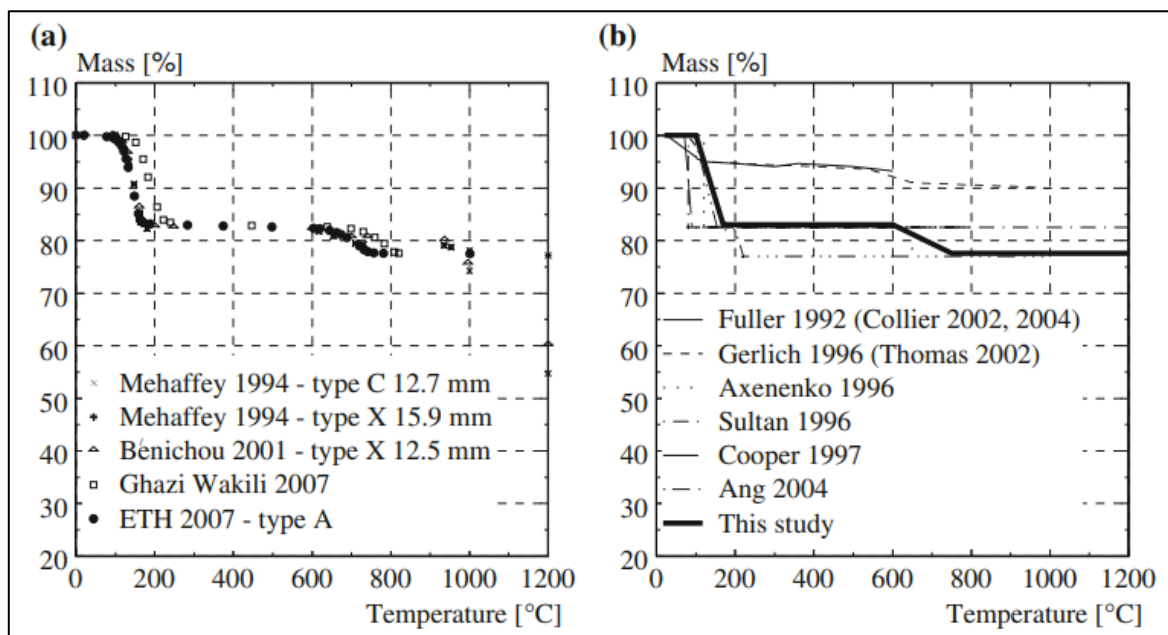
Práce se dále zmiňuje o provedených testech SDK s ohledem na porovnání tepelné vodivosti. Jak je znázorněné na Obrázek č. 9.4, existuje konzistentní shoda mezi výzkumníky ohledně tepelné vodivosti SDK desek až do 400 °C, zatímco mezi nimi existuje významná odchylka nad 400 °C.



Obrázek č. 9.4 Tepelná vodivost SDK desky z různých studií.[6]

9.1 Termická analýza TGA

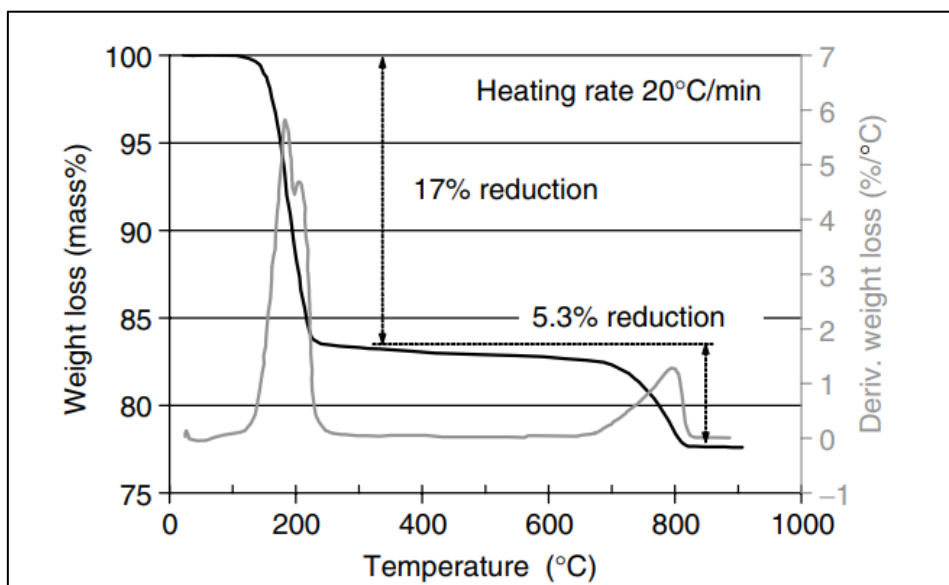
Literatura [5] se zabývá srovnáním provedených testů, které stanovují změnu hustoty s rostoucí teplotou stanovené termogravimetrickou analýzou (TGA). Analýza poukazuje mimo jiné na úbytek hmotnosti SDK desky v závislosti na zvyšování teploty. TGA analýza probíhala v Institutu pro geotechnické inženýrství ETH Zurich. Byla provedena při rychlosti zahřívání 20 °C/min. za použití SDK desky typu A. TGA prokázalo počáteční ztrátu hmotnosti asi 17 % mezi 100 až 170 °C a druhou ztrátu hmoty asi 5 % mezi 600 až 750 °C a dobře korespondovala s výsledky jiných studií, viz Obrázek č. 9.5. Dále byly měřeny plyny emitované během TGA. Mezi 100 až 170 °C se uvolňovala vodní pára a mezi 600 až 750 °C oxid uhličitý (CO₂).



Obrázek č. 9.5 (a) Ztráta hmotnosti s rostoucí teplotou měřená termogravimetrickou analýzou prováděnou různými autory; (b) Hustota závislá na teplotě použitá pro tepelnou analýzu v této studii, stejně jako v předchozích studiích. [5]

Studie se zabývala i složením zkoumané SDK desky pomocí rentgenového difraktometru. Měření ukázala, že testovaná sádrokartonová deska se skládala z více než 80 % ze sádry, asi 10 % uhličitanu vápenato-hořečnatého (CaMg(CO₃)₂) a zbývajících 10 % tvořily špatně identifikovatelné přidané materiály. K podobným výsledkům se dostaly i ostatní studie.

Literatura [12] se také zabývala zkoumáním sádrokartonové desky pomocí TGA. Výsledky jsou uvedeny na Obrázek č. 9.6 a shrnuty v Tabulka č. 9.2 pro rychlost zahřívání 20 °C/min. Vezmeme-li v úvahu křivku úbytku hmotnosti sádry v závislosti na rostoucí teplotě, jsou dva stupně rozpoznatelné: jedna začíná přibližně při 150 °C a druhá při 700 °C. Derivát úbytku hmotnosti (%/°C), který byl měřený na citlivějším přístroji, odhaluje skrytý dvojitý pík, který odpovídá dvěma po sobě jdoucím dehydratačním/kalcinačním krokům CaSO₄. Vrcholný pík kolem 800 °C, byl autory shledán jako odpovídající rozkladu CaCO₃.



Obrázek č. 9.6 Křivky termogravimetrické analýzy (TGA) sádry ve vzduchu. Úbytek hmotnosti (černá čára) a jeho derivace (šedá čára) jsou znázorněny jako funkce teploty. [12]

Tabulka č. 9.2: Tepelná vodivost sádry po různém tepelném namáhání. [12]

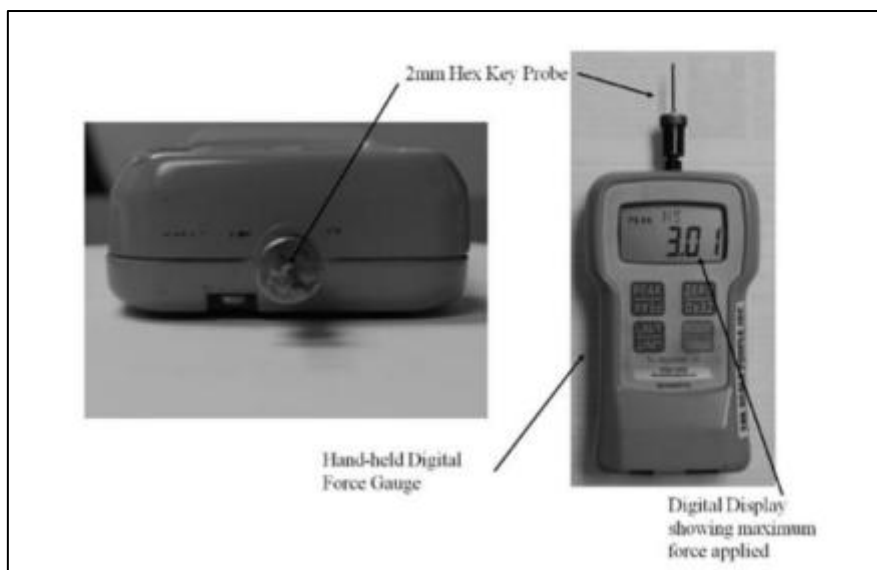
Thermal treatment	Thermal conductivity at 20°C (W/(m·K))
Delivery condition	0.28 ± 0.02
After 2 d at 200°C (CaSO ₄ ·2H ₂ O completely dehydrated)	0.14 ± 0.01
After 45 min exposition to the standard fire ISO 834 (reaching 1000°C i.e., complete decomposition of CaCO ₃)	0.27 ± 0.02

S úbytkem hmotnosti, konkrétně dehydrací H₂O, dochází ke smršťování a deformaci SDK desky. Tyto studie ukazují, při jakých teplotách se dehydratace vyskytuje. Testy probíhaly na malém množství sádry odebrané z SDK desky. Přibližně se jednalo o vzorek v rozmezí 12 až 15 g.

9.2 Nástroje a technika pro zjištění hloubky kalcinace

Ve sborníku International Symposium on Fire Investigation Science and Technology ISFI 2012 [7], byl prezentovaný výzkum, který zahrnoval testování v málem a velkém měřítku za účelem vyvinutí objektivní metody pro měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek. Výsledky testů byly potom použity k vývoji nástroje a s tím související techniky potřebné k přesnému měření hloubky kalcinace. Provedené testování probíhalo na SDK deskách značky Sheetrock tloušťky 12,7 mm a 15,9 mm. Vzorky byly vystaveny třem tepelným tokům (20, 65 a 100 kW/m²) po dobu 5, 10, 15 a 30 minut.

Mimo jiných metod jako je pozorování hloubky kalcinace byl použit snímací nástroj (hloubkoměr), který se skládal z ručního siloměru vybaveného ocelovou sondou. Použitým siloměrem byl digitální siloměr Shimpo Model FGV-100X s kapacitou 45,4 kg (100 lb) a rozlišením 0,01 kg (0,02 lb). Použitou ocelovou sondou byl 2,0 mm šestihranný klíč nařezaný na délku 25,4 mm (1 palec) a připevněný k siloměru. Velikost šestihranného klíče byla (2,0 mm [0,08 palce]), což představuje plochu dopadového povrchu 3,46 mm² (0,005 palce²).



Obrázek č. 9.7 Ruční kalcinační hloubková sonda.[7]

Na základě testů byla zvolena vhodná síla 30 N, což odpovídá tlaku $0,86 \text{ kg/mm}^2$ (1175 psi). Tato síla postačí k proniknutí sondy kalcinovanou částí, aniž by pronikla nekalcinovanou částí (dihydrátem).

V literatuře [8] byly provedeny další testy, které měly za cíl potvrdit a rozšířit měření, které bylo provedeno v literatuře [7]. Celkem bylo testováno 42 různých sádrokartonových desek za použití různých tepelných expozičních. Bylo zjištěno, že použitím síly 30 N na některé typy sádrokartonu může docházet k nadhodnocování výsledků.

Nakonec byla provedena série zkoušek pro posouzení vlivu smáčení sádrokartonové desky na přesnost měření hloubky kalcinace. Pochopení tohoto dopadu je zásadní, protože u většiny reálných požárů lze předpokládat, že hašení zvlhčuje povrchy sádrokartonových desek. Testováním bylo zjištěno, že aplikace vody zvyšuje hloubku kalcinace v průměru o 18 procent s rozsahem rozdílů mezi 4 a 34 procenty. Největší rozdíly byly zaznamenány u sádrokartonů vystavených největšímu celkovému teplu a nejdelšímu působení vody. Naopak nejmenší rozdíly byly zaznamenány u sádrokartonů vystavených nižšími teplotními expozičními a nejkratšímu působení vody. Při provádění výzkumů byl zkoumán také vliv hasební vody na přesnost měření hloubky kalcinace sádrokartonových desek. V posledních letech je kladen důraz na minimalizaci použité hasební vody při zásahu. Dodržení této zásady by nemělo dojít k výraznému ovlivnění (zvýšení) hloubky kalcinace.

Při měření provedeném 24 hodin po aplikaci vody na sádrokarton byl výsledek zvýšení hloubky kalcinace v průměru o 18 %. Když se měření opakovalo s časovým odstupem 30 dní, byla odchylka menší než 5 %.

9.3 Vyhodnocení zahraničního testování

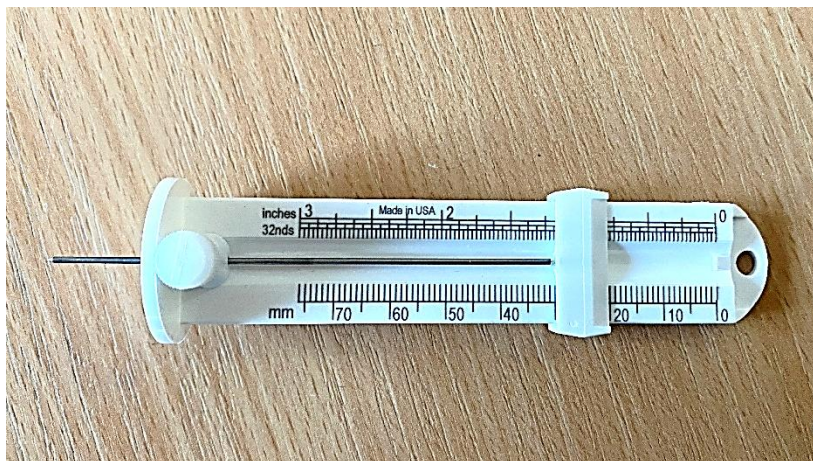
Analýza zahraničních studií a zhodnocení dostupných metod pro určení stop po požáru na SDK deskách, včetně stanovení hloubky kalcinace, ukazují na nutnost testování SDK desek používaných v České republice. Vzhledem k možným rozdílům ve složení a vlastnostech materiálů je nezbytné vypracovat metodiku pro spolehlivé stanovení stop po požáru a vytvořit vhodný technický prostředek pro měření hloubky kalcinace. Tato metodika by měla zajistit opakovatelnost měření a umožnit její využití nejen v ČR, ale i v zahraničí.

10 Testování metody a nástroje z USA

Prvotní výzkum byl zaměřený na testování metody a nástroje, které byly představeny zástupcům vyšetřovatelů požárů z České republiky, kteří absolvovali tréninkový program pro vyšetřovatele požárů ve Spojených státech amerických, kde získali teoretické poznatky metody měření hloubky kalcinace a také zkušenosti z praktického provedení.

V rámci projektu FING byl proveden velkorozměrový experiment, při kterém došlo k vytvoření místnosti, která měla vnitřní obvodové stěny obložené z SDK desek. Po likvidaci požáru proběhlo ohledání místa požáru a následně provedeno testování nástroje z USA ve spolupráci s VP, který prošel tréninkovým programem ve Spojených státech amerických. Nástroj je zobrazen níže na Obrázek č. 10.1. Jedná se o nástroj pro měření protipožárního nástříku, a ne pro měření hloubky kalcinace. Je vyroben z lisovaného plastu a je vybaven nerezovou penetrační jehlou s aretačním šroubkem. Po odaretování šroubku se penetrační jehla může volně posouvat.

Před samotným měřením hloubky kalcinace bylo provedeno klasické ohledání, které mělo určit místo vzniku požáru. Po stanovení tohoto místa byla stanovena SDK stěna v místnosti, u které došlo k měření hloubky kalcinace pro zhodnocení poškození a zjištění, zdali metoda přivezená ze Spojených států amerických může pomoci ve vyšetřování příčin vzniku požáru. Zejména z pohledu hodnocení degradace SDK stěny, která nám ukáže místo, kde došlo k nejvyšší degradaci, a tudíž se jedná pravděpodobně o místo, kde působily účinky požáru nejdéle. Samotné měření probíhá tak, že operátor vysune hrot v délce minimálně rovné tloušťce měřené SDK desky, poté palcem zatlačí na místo, kde se na samotném těle nachází nevysunutá část hrotu, čímž zvýší odpor penetrační jehly s hrotem a následně provede vpich do SDK desky, kdy záleží na uvážení operátora, jakou silou bude tlačit na nevysunutou část jehly. Po provedeném vpichu následuje odečtení hloubky zasunuté jehly v SDK desce, která má reprezentovat hloubku kalcinace v daném místě, viz Obrázek č. 10.2. Výsledek proměření SDK stěny má zjistit místo/prostor, kde je nejhlubší kalcinace. V případech, kdy došlo k tomu, že nebylo zřejmé, jestli je výsledek například 5 nebo 6 mm a měřicí ryska byla tzv. mezi celými čísly, došlo k zaokrouhlení na vyšší číslo.



Obrázek č. 10.1 Nástroj dovezený z USA



Obrázek č. 10.2 Ukázka měření, kdy je naměřeno 16 mm.

Provedeným standardním ohledáním místa požáru bylo určeno místo vzniku požáru. V tomto případě se jednalo o plastový naplněný odpadkový koš, viz Obrázek č. 10.3, který byl iniciován. SDK stěna od podlahy ke stropu a od okna ke stavebnímu výklenku byla určena k proměření se zaměřením na stanovení hloubky kalcinace.



Obrázek č. 10.3 Stanovené kriminalistické ohnisko po ohledání požářiště.

Po stanovení SDK stěny, která bude proměřena, bylo zapotřebí vyznačit měřící body, kde bude proveden vpich. Měřící body jsou od sebe vertikálně i horizontálně 200 mm vzdálené. Značení bodů proběhlo pomocí dřevěné desky, ve které byly vyvrtány 200 mm od sebe díry. Následně došlo k přiložení desky na SDK stěnu a skrz vyvrtané otvory byl použit značkovací sprej, který vyznačil měřící body, viz Obrázek č. 10.4. Následně došlo k pojmenování vertikálních řad od A až J (s vynecháním CH) a horizontální řady od 1 do 14. K takovému způsobu značení se přistoupilo z toho důvodu, abychom

zjistili polohu měřeného bodu a mohlo dojít k zapsání do Excel souboru, ze kterého se následně vytvořili vhodné grafy reprezentující hloubku kalcinace na měřené SDK stěně.



Obrázek č. 10.4 Vyznačení rastru na stanovenou měřící stěnu. Jedná se o SDK stěnu, u které bylo stanoveno kriminalistické ohnisko.

Byl stanoven postup měření a to tak, že z důvodu srovnání výsledků proběhne měření hloubky kalcinace celkem dvěma operátory. Postup měření byl takový, že proběhlo měření prvním operátorem, kdy druhý zapisoval výsledky do tabulky. Po proměření stěny prvním operátorem došlo k výměně a znovu proměření SDK stěny druhým operátorem, který předtím zapisoval výsledky.

Jednalo se o proměření celkem 140 bodů. Bylo vyzorováno subjektivním pocitem, že dochází postupně ke snížení tlaku palce a s tím související možné zkreslení výsledků. Samozřejmě není ani zaručené ani možné, aby byl při každém vpichu garantován stejný tlak palce.



Obrázek č. 10.5 Pohled na měřenou SDK stěnu.

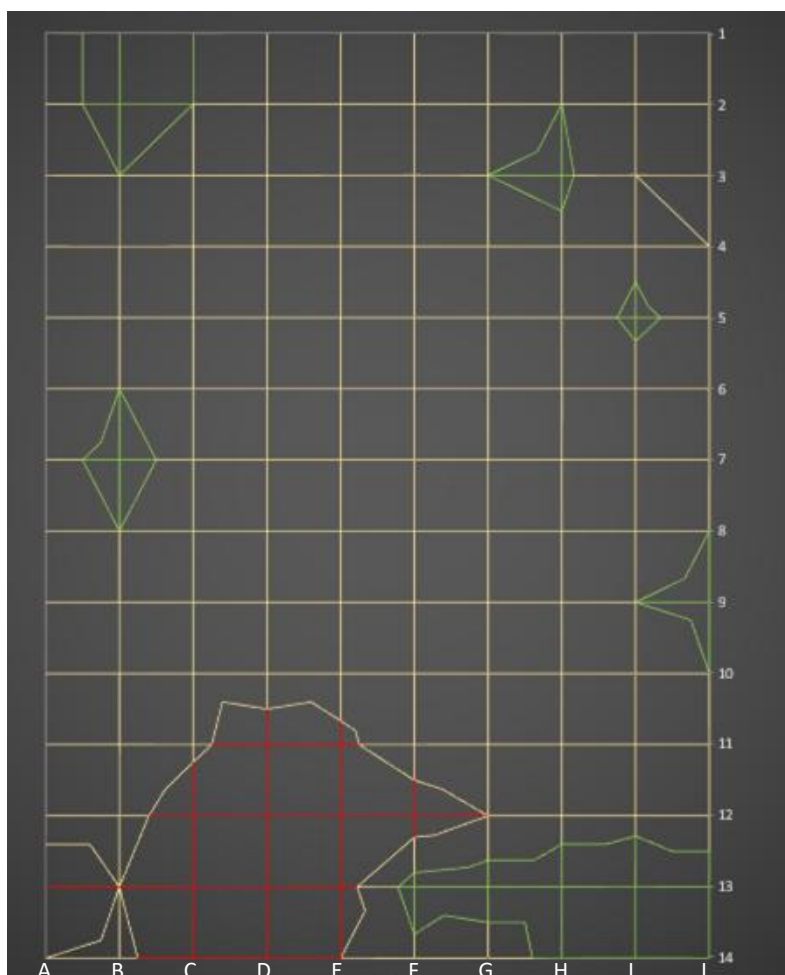


Obrázek č. 10.6 Měření s nástrojem dovezeného z USA.

Naměřené výsledky operátorem 1 a operátorem 2 byly do jisté míry rozdílné, avšak nejvyšší hloubka byla u obou naměřena v prostoru vzniku požáru = plastového koše. U jednoho operátora byla nejvyšší hloubka naměřena přesně v tomto místě, ale u druhého operátora byly naměřeny nejhlubší kalcinace i jinde na SDK stěně. V tomto případě se mohlo tak jednat z důvodu, že operátor tlačil větší silou, a tudíž se dostal do větší hloubky v určitých místech. Výsledky operátora 1 jsou představeny níže v Tabulka č. 10.1 a na Obrázek č. 10.7. V tabulce je červeným kruhem znázorněné místo, kde stál plastový koš (místo vzniku požáru) a modrý obdélník znázorňuje pozici křesla, které částečně tepelně chránilo SDK stěnu, a proto byly výsledky naměřené v tomto místě velice nízké i přesto, že se jednalo o místo v těsném sousedství místa vzniku požáru.

Tabulka č. 10.1 Naměřené hodnoty operátorem 1

6	4	5	7	6	7	6	5	10	6	1
6	4	5	6	6	6	7	5	6	9	2
7	5	6	6	7	10	5	4	10	7	3
6	5	6	6	7	6	6	6	6	10	4
6	6	5	6	5	7	6	8	4	7	5
8	5	6	6	6	7	7	6	7	7	6
6	4	6	7	6	7	6	5	6	6	7
7	5	6	7	6	5	6	5	7	5	8
6	6	6	7	6	6	5	5	5	4	9
5	6	8	7	8	6	6	5	8	5	10
6	5	9	13	11	7	5	5	5	6	11
8	8	13	13	12	13	10	7	7	7	12
13	10	13	13	12	3	2	2	0	3	13
10	9	13	10	10	6	8	0	0	3	14
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	

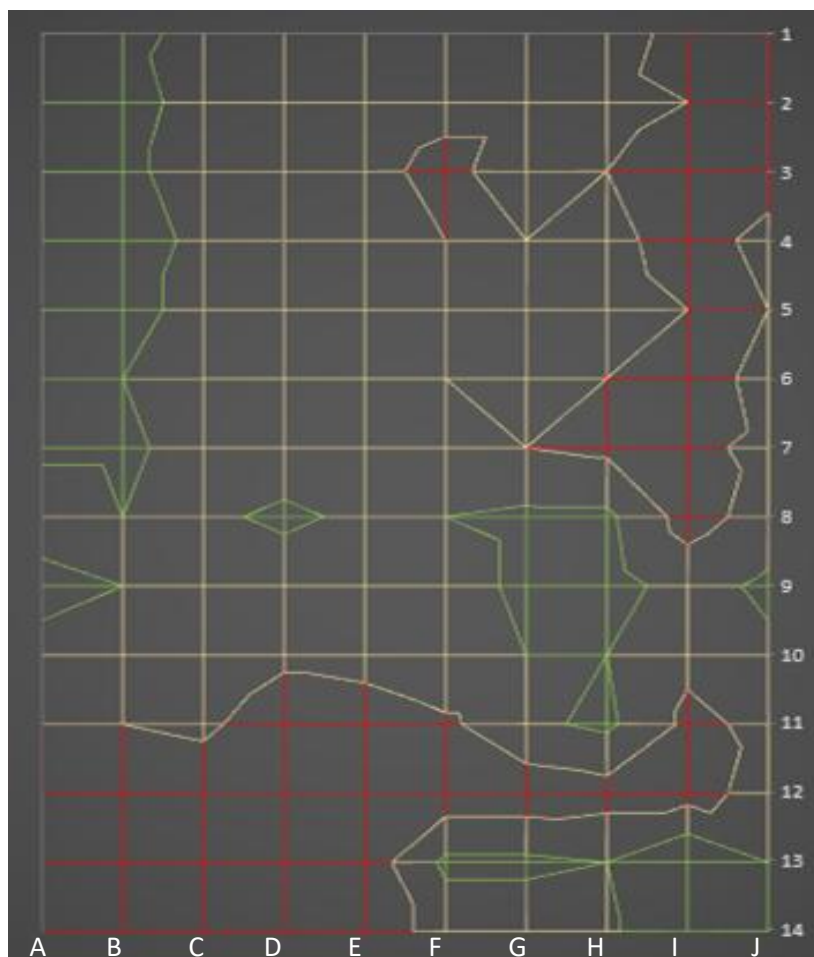


Obrázek č. 10.7 Grafické znázornění naměřené hloubky kalcinace na měřené SDK stěně operátorem 1

V případě operátora 2 došlo ke zkreslení místa, kde byla naměřena nejhlubší kalcinace. Konkrétně došlo k tomu, že nejhlubší kalcinace se nacházela ne jenom v prostoru plastového koše, ale také nad sedačkou a v rohu měřené stěny.

Tabulka č. 10.2 Tabulka naměřených hodnot operátorem 2

2	4	6	6	7	8	9	6	13	11	1
3	3	7	7	8	9	9	8	10	12	2
3	4	7	7	9	11	8	10	13	13	3
4	3	6	10	8	10	10	8	13	8	4
4	3	7	5	7	8	6	7	10	10	5
3	5	7	6	10	10	9	10	13	8	6
4	4	7	8	9	9	10	11	11	9	7
8	5	6	4	6	5	4	4	12	8	8
3	5	5	8	6	7	4	3	7	4	9
7	6	6	9	8	5	5	5	9	6	10
10	10	9	13	13	11	6	4	11	9	11
13	10	13	13	13	13	13	12	12	8	12
13	10	13	13	13	4	4	5	0	5	13
13	11	13	13	13	8	8	6	0	5	14
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	



Obrázek č. 10.8 Grafické znázornění naměřené hloubky kalcinace na měřené SDK stěně operátorem 2

Provedené testování metody a nástroje z USA poukázalo na celou řadu nedostatků a prostoru pro vylepšení. Například se jedná o:

- Možnost přesnějšího vyjádření v tabulce s podmíněným formátováním
- Časová náročnost měření a znázornění měřících bodů na zájmové SDK stěně
- Přítomnost dvou VP nebo VP plus zapisovatele.
- Potřeba eliminace významných rozdílů v provedených měření různými operátory
- Vytvoření rastru pro snadné měření
- Stanovit metodu měření použitelnou v reálných podmínkách pro práci VP
- Zvýšení citlivosti měření na jedno desetinné místo pro přesnější vyjádření výsledků

Vytvořením metody a nástroje pro stanovení hloubky kalcinace v SDK deskách může výrazně zkvalitnit práci vyšetřovatelů požáru a dát jednu z mála možností vyjádření výsledků ohledání pomocí naměřených dat. Jednalo by se o číselné a grafické znázornění účinků požáru a vyjádření degradace určitého materiálu jinak, než pouze vizuálním posouzením. Dále může metoda být nápomocná s ohledem na neobjasněné požáry. Jedná se o nezanedbatelný ukazatel, u kterého je nejzávažnější počet usmrcených osob. Každá další metoda či zlepšení práce VP může být nápomocná k objasnění příčiny vzniku požáru.

Tabulka č. 10.3 Tabulka neobjasněných požárů za 10 let v České republice.

Tabulka neobjasněných požárů za 10 let					
Rok	Počet neobjasněných požárů	Podíl v % ke všem požárům	Počet usmrcených osob	Zraněno	Přímé škody (tis. Kč) při požárech
2015	2 218	10,96	8	47	105 091,70
2016	1 301	8,00	8	54	53 851,30
2017	1 025	6,12	2	30	71 854,60
2018	1 196	5,77	5	53	84 584,50
2019	1 094	5,82	3	36	76 833,80
2020	1 000	5,77	6	35	116 310
2021	823	5,09	5	28	65 398,60
2022	1243	5,97	9	62	128 794,70
2023	991	5,58	11	55	107 767,90
2024	1 019	5,78	10	38	183 456,20
Průměr:	1 191	6,49	6,70	43,80	99 394,33

10.1 Vytvoření nástroje pro měření kalcinace

Byl proveden vývoj nástroje pro měření hloubky kalcinace, který byl nazván kalcinometr. Pro potřeby této práce bude nastíněn stručný vývoj.

Na základě provedeného testování bylo přistoupeno k vylepšení, které mělo eliminovat významné rozdíly v naměřené hloubce kalcinace provedené různými operátory. Byl vytvořen kalcinometr, kde tlak palce vystřídala tažná pružina s definovaným odporem. Pružina nebyla vybrána náhodně, ale její odpor byl stanoven na základě provedených testů v literatuře [7]. Kalcinometr je pro potřeby měření kalcinace v SDK desce vybaven tažnou pružinou, která má jeden konec přichycený v místě aretačního šroubku a druhý je přichycen na 3D tiskárně vytisknutém plastovém „držátku“, viz níže Obrázek č. 10.9. Tento kalcinometr se přiloží k požárem zasažené SDK desce a penetrační jehla se v tlačí silou pružiny do SDK desky. Po tomto úkonu se na stupnici nacházející se na kalcinometru zapíše v milimetrech hloubka, kterou penetrační jehla prošla do desky. Naměřená hloubka znamená hloubku kalcinace v místě vpichu. Tento údaj se poté vyhodnocuje vyšetřovatelem požáru pro potřeby stanovení příčiny vzniku požáru.

Síla tažné pružiny je vypočítána tak, že jehla neprojde nekalcinovanou částí SDK desky, ale zastaví se těsně před touto částí.



Obrázek č. 10.9 Pohled na upravený nástroj z USA, který byl nazván kalcinometrem.

Kalcinometr byl testovaný v rámci diplomové práce [9] provedené studentem ČVUT. Testování spočívalo v provedení normové zkoušky na plynové peci, kde bylo šest testovacích SDK desek namáháno po dobu 15 minut při teplotě kolem 800 °C. Následně došlo k vyznačení měřících bodů a provedeno měření v těchto bodech dvěma operátory kalcinometru. Naznačené body byly na každé měřící SDK desce ve stejných místech. Výsledky obou operátorů se lišili v rámci 1 mm v určitém bodě. Toto zkreslení může být dáno i strukturou SDK desky a lokálními prasklinami, které vzniknou při vysušování sádrového jádra. Tyto testy prokázaly, že se s tímto vylepšením možné dosáhnout přibližně stejných výsledků, kdy stejnou měřící plochu měří dva operátoři, tudíž dochází k přesnějšímu vyjádření výsledků naměřené kalcinace.

Dále provedené testování ukázalo vliv mikrovstvy akrylátového spreje. Docházelo ke zvýšení hloubky naměřené kalcinace o cca 1 mm. V rámci tohoto zjištění bylo přistoupeno k měření hloubky kalcinace v blízkosti naznačených bodů, ale nikoliv přímo v nich, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. V rámci tohoto testování byl dále pozorován rozdíl naměřené hloubky kalcinace v případech měření na testovacích vzorcích, které byly tepelně namáhány před 7 dny (3 vzorky) a u vzorků, které byly proměřeny po vychladnutí (3 vzorky), kdy bylo možno použít kalcinometr. Toto srovnání poskytlo výsledek, že došlo v průměru o rozdíl 1 mm. U vzorků tepelně namáhaných týden před měřením byla naměřena hloubka kalcinace v průměru o 1 mm hlubší.

Tabulka č. 10.4 Levá tabulka ukazuje průměr výsledků naměřených na SDK deskách týden po tepelném namáhání. Pravá tabulka ukazuje průměr naměřených výsledků po vychladnutí.

hloubka kalcinace [mm]		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1	2	3	3	3	3	3	4	3	4	3	2
2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
3	4	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
4	5	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2
5	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	8	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2

hloubka kalcinace [mm]		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	4	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3
4	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	7	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2
8	8	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2

Kalcinometr byl dále zaregistrován jako funkční vzorek s číselnou identifikací 0001/15-01-2024_F s názvem Modifikovaný Kalcinometr.

10.2 Velkorozměrový experiment s funkčním vzorkem

Dále byl kalcinometr testován na velkorozměrovém testování, kdy došlo k vytvoření experimentálního požáru v místnosti, která měla představovat ložnici s pracovnou. Na měřící SDK stěně byly nainstalovány termočlánky, které v odstupech pokrývaly celou vnitřní a vnější SDK stěnu. Byly nainstalovány z důvodu toho, že dojde ke srovnání naměřené hloubky kalcinace s teplotou.

Byl proveden standardní postup přípravy měření a poté dva VP provedli měření ve stejných bodech. Výsledky byly dále srovnávány, viz níže Obrázek č. 10.14 a Obrázek č. 10.15. Měření probíhalo na stěně, kde se v těsné blízkosti nacházelo kriminalistické ohnisko požáru zároveň se sedací soupravou a pracovním stolem. Samotné kriminalistické ohnisko se nacházelo cca uprostřed měřené stěny. V tomto případě došlo k iniciaci požáru v odpadkovém koši mezi sedací soupravou a pracovním stolem, který byl naplněný smíšeným odpadním materiálem.



Obrázek č. 10.10 Pohled do místnosti před iniciací požáru v plastovém koši mezi sedací soupravou a pracovním stolem



Obrázek č. 10.11 Pohled na plastový koš s odpadem těsně po iniciaci požáru.

Po celkovém vzplanutí (flashover) v prostoru kanceláře došlo k hasebnímu zásahu a samotné likvidaci požáru. Následně proběhlo zadokumentování celé místnosti a zhodnocení směru šíření požáru s určením místa vzniku požáru.



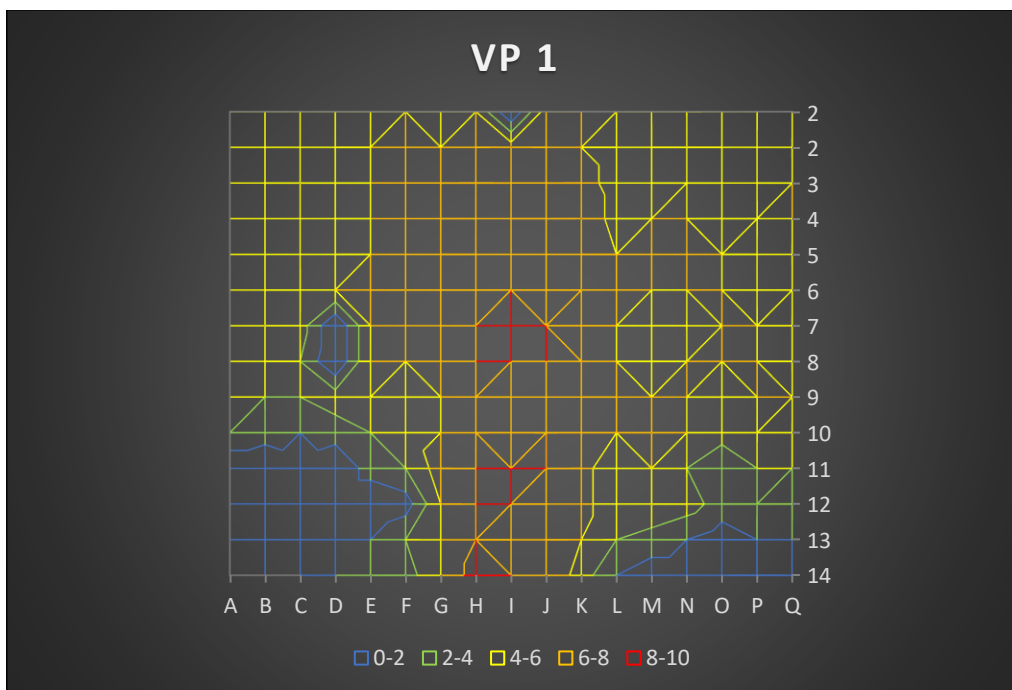
Obrázek č. 10.12 Zobrazení kriminalistického ohniska. Proběhlo proměření SDK stěny přilehlé ke kriminalistickému ohnisku.

Po uhašení požáru bylo provedeno ohledání místa požáru, kdy došlo k vymezení místa vzniku požáru stanoveného na stěnu, kde se nacházela sedací souprava, pracovní stůl a samotný koš, který byl požárem zcela zničen. Po označení tohoto místa a zadokumentování místa požáru došlo k odstranění ohořelých věcí u měřené SDK stěny a vyznačení měřících bodů. V tomto případě došlo k vyznačení měřících bodů pomocí značkovacího spreje a body měření byly od sebe vzdáleny 30 cm (viz Obrázek č. 10.13). V současnosti je vytvořena nová metoda stanovení měřících bodů pomocí laserového rastru. Následně došlo k proměření bodů pomocí kalcinometru a vyjádření výsledků v tabulce.

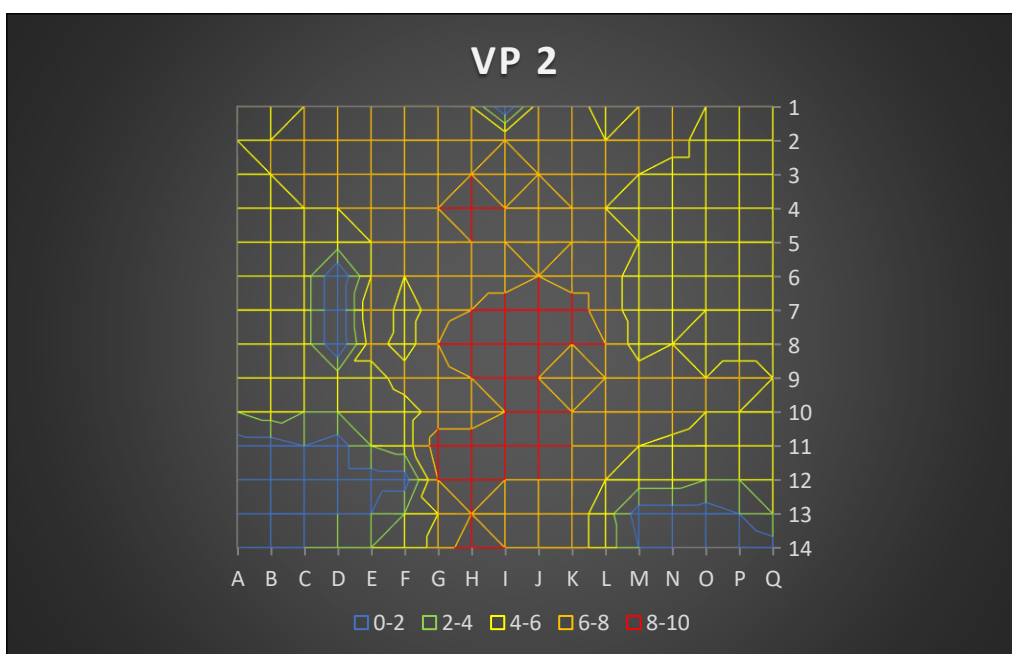


Obrázek č. 10.13 Pohled na měřenou SDK stěnu.

Po stanovení měřící plochy bylo následně přistoupeno k samotnému měření vyznačené plochy pomocí dvou operátorů (VP 1 a VP 2).



Obrázek č. 10.14 Grafické znázornění naměřených hodnot VP 1



Obrázek č. 10.15 Grafické znázornění naměřených hodnot VP2

Na uvedených grafech lze vidět, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny v oblasti stanoveného kriminalistického ohniska a v místech šíření plamenů (nad stanoveným kriminalistickým ohniskem). Tyto výsledky poukázaly na to, že pomocí kalcinometru lze na SDK stěně stanovit s větší přesností hloubku kalcinace i v případě měření hloubky různými operátory. Pro přehlednější vyjádření výsledků a závěrů měření bylo přistoupeno k vyjádření výsledků pomocí tabulky Excel, viz níže Tabulka č. 10.5.

Tabulka č. 10.5 Vyjádření výsledků naměřené kalcinace pomocí tabulky Excel.

5	5	5	5	5	6	5	6	Dřa	7	6	6	4	4	5	6	6
5	5	5	5	6	6	6	6	7	6	6	5	5	6	5	5	5
5	5	6	5	6	6	6	7	6	6	7	5	5	6	5	5	6
5	5	5	5	6	6	6	7	7	6	8	5	6	6	5	6	6
5	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	6	6	6	6	5	5
5	5	4	6	6	7	6	7	8	7	8	6	6	6	6	5	6
4	6	5	Dřa	6	6	6	8	8	8	7	6	5	4	6	6	5
5	5	4	Dřa	6	6	6	8	8	8	8	6	5	6	6	6	5
4	4	4	2	5	6	6	8	7	7	7	6	6	6	6	5	6
4	3	2	3	4	5	6	8	7	8	7	6	7	6	6	5	6
0	0	1	0	3	4	7	8	8	8	7	4	6	4	2	4	4
0	0	0	0	0	1	6	8	8	7	7	4	6	5	3	4	3
0	0	0	2	2	4	6	8	7	7	6	4	3	2	1	2	2
0	0	0	2	2	3	6	9	8	8	5	2	1	1	1	0	1

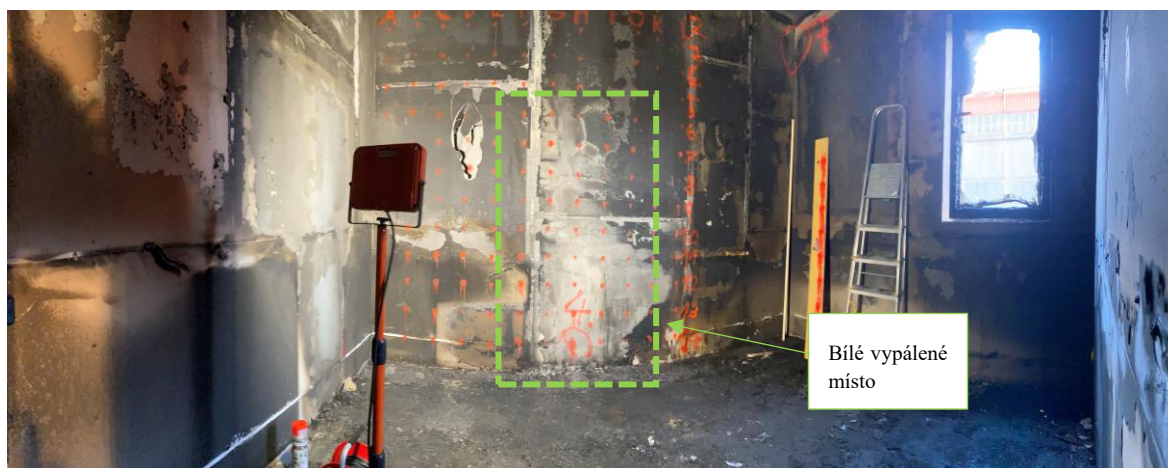
Komentář k vyjádření výsledků: V tabulce lze uprostřed vidět nejvyšší naměřené hodnoty, kdy toto místo koresponduje s místem, kde se nacházel koš a levá strana sedačky. V tomto případě značí první červený sloupec postavení koše, kdy požár se následně šířil za ventilační cestou směrem na sedačku a dál k oknu. Kdyby došlo k iniciaci požáru na levé straně sedačky, kde jsou také naměřené vysoké hodnoty kalcinace, tak nejvyšší hloubka kalcinace by byla naměřená právě jen v tomto prostoru a dál směrem k okennímu otvoru, a nikoliv v oblasti, kde stál odpadkový koš.

Výsledek měření je takový, že naměřenou hloubkou kalcinace je zřejmé, že požár vzniknul v prostoru odpadkové koše, od kterého se následně šířil na sedačku a ventilační cestou směrem k okennímu otvoru.

V případě tohoto požáru lze vizuálním pohledem si dopomoci k správnému stanovení stěny, u které se nachází místo vzniku požáru a pomůže stanovit zároveň stěnu, kde se bude měřit pomocí kalcinometru.

10.2.1 Vizuální vyjádření místa

V případě tohoto požáru došlo mimo jiné i k tomu, že lze pouze tzv. okometrickou metodou vyjádřit na SDK stěně místo, kde došlo k nejdelšímu působení plamenného hoření. Jedná se v tomto případě o bílé vypálené místo, viz níže Obrázek č. 10.16. V tomto případě docházelo k intenzivnímu vývinu plamenného hoření právě v místě, kde se nachází bílé vypálené pole, který zároveň působil na SDK stěnu. Tímto nedocházelo k usazení zplodin hoření v tomto prostoru, ale v okolí. Jedná se o typický příklad, který nastává u méně rozvinutých požárů. To znamená u případů požáru se včasným zpozorováním nebo v případě samouhašení, kdy je zasažena pouze část hořlavého materiálu v určitém místě a tím pádem dojde k lokálnímu zasažení SDK stěny, který vytvoří bílé vypálené místo. Zároveň se ve většině případů jedná o místo, kde se poblíž nacházelo ohnisko požár.



Obrázek č. 10.16 Vyjádření degradace SDK desky vizuální metodou

10.3 Vývoj kalcinometru a metody

Bylo vytvořeno celkem 6 verzí kalcinometru, které se snažily vylepšit a zjednodušit používání kalcinometru. Vývoj metody a kalcinometru byl směřován na: **Jednoduchost, rychlost, preciznost, nízkou náročnost a zvládnutelnost metody jednou osobou na požářišti.** Vývoj kalcinometru je znázorněn na Obrázek č. 10.17.



Obrázek č. 10.17: Vývoj kalcinometru z leva doprava

Verze kalcinometru na Obrázek č. 10.18, byla použita na velkorozměrovém testování FING WP4. Kalcinometr nabízí možnost zapsání výsledků až na dvě desetinná místa. Takového přesného zapsání je možné pouze z důvodu toho, že na těle má nainstalován digitální měřič, který zaznamenává výsledky naměřené hloubky. Odchylka naměřených hodnot je $\pm 0,1$ mm. Tento přístroj dále umožňuje aretaci naměřených hodnot pomocí tlačítka na digitálním měřiči. Tato funkce je užitečné při měření hodnot například u stropu, kde VP stojí na žebříku a přístroj má nad hlavou. V tomto případě může použít aretační tlačítko po naměření hodnoty a poté odečíst hodnotu po stáhnutí nástroje zpět z těžko dostupného místa. Další výhodou je manipulace s přístrojem z důvodu delšího úchytu za měřicím displejem.

Kalčinometr navíc nabízí možnost přenesení výsledků přímo do počítače. V rámci dalšího vývoje bude snaha o automatické přepsání výsledků do mobilu a tím možnost snadného měření pomocí jednoho operátora bez zapisovatele.



Obrázek č. 10.18 Testovaný kalčinometr na posledním velkorozměrovém experimentu FING WP4

V rámci testování FING WP4 byla dále představena nová metoda značení měřících bodů. Snaha byla o vyvinutí méně pracné a snadno dostupné metody. Měřící body byly zaneseny na SDK stěnu pomocí bodového laseru, který byl připojen k powerbance a umístěn na stativ, který umožnil zvednutí laseru do libovolné výšky podle potřeby. Při znázornění měřících bodů pomocí laseru má mimo snížené pracovní a zrychlení celého procesu měření kalcinace také to, že lze měřit přímo v bodech naznačených na stěně, aniž by došlo ke zkreslení výsledků z důvodu vrstvy nanesené barvy ze značkovacího spreje.

Pomocí laboratorního testování na téměř identických vzorcích bylo zjištěno, že dochází ke snížení odporu pružiny po cca 300 až 350 měřeních. Bylo vypořádováno, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami může být o cca 1 mm nižší hloubka kalcinace.

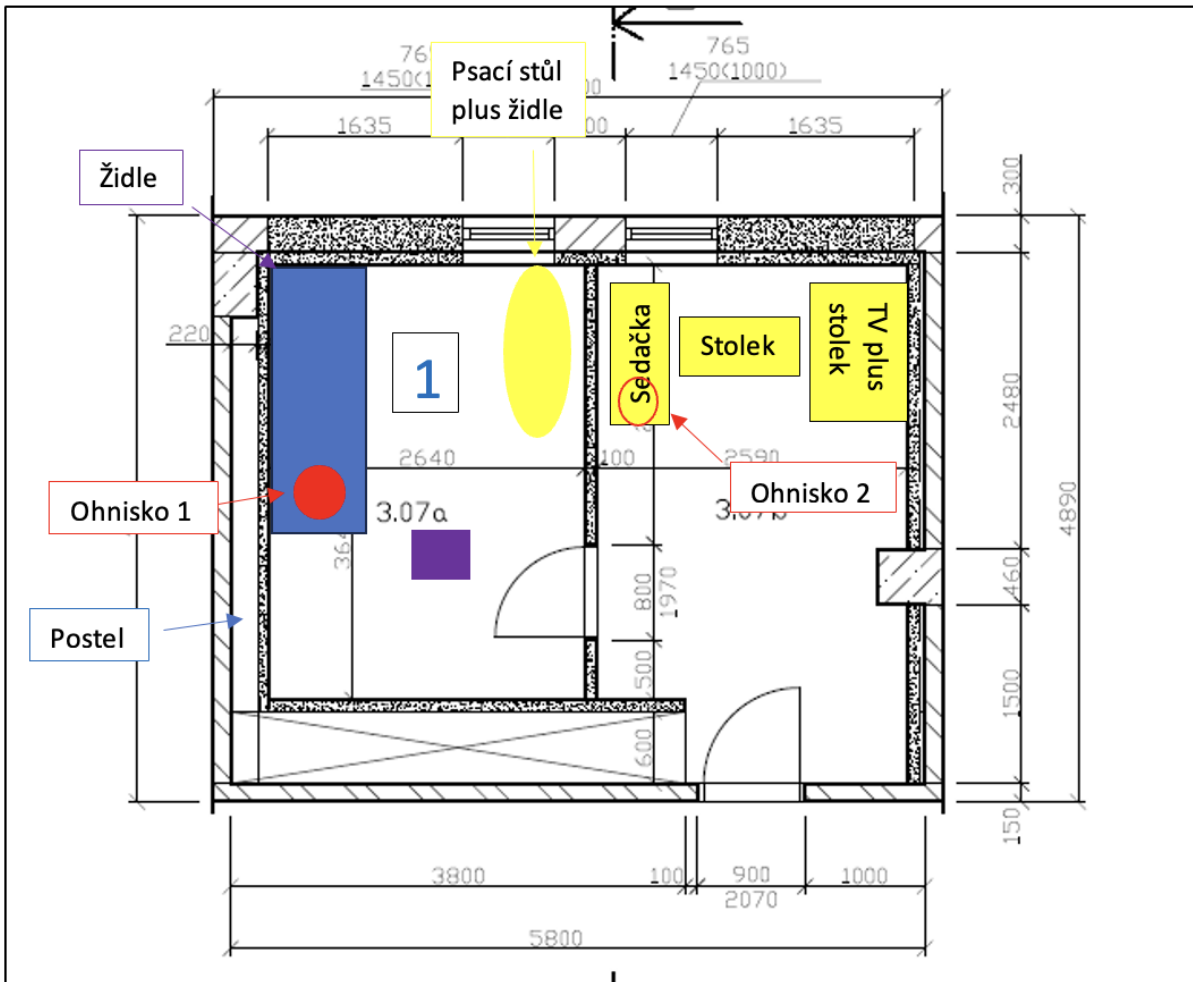


Obrázek č. 10.19 Pohled na laser umístěný na stativu.



Obrázek č. 10.20 Pohled na zobrazený rastr na měřené SDK stěně.

V rámci testování při velkorozměrovém experimentu byl testován kalcinometr i zobrazení měřících bodů pomocí laseru. V rámci testování byly vytvořeny dvě místnosti a každá z nich byla rozdělena na prostor A (ložnice) a prostor B (obývací pokoj). Scénář byl úmyslně založený požár pomocí akcelorantu hoření. Jeden den došlo k iniciaci místnosti 1, kde byl nejdřív zapálen prostor A a 10 vteřin poté zapálen i prostor B. Stejný postup následoval druhý den v místnosti 2. Poté došlo k ohledání místa požáru a následně bylo přistoupeno k měření kalcinace. V tomto případě se jednalo o dvě místa vzniku požáru v jedné místnosti.



Obrázek č. 10.21 Schématický náčrt místností s naznačením ohnisek

Na Obrázek č. 10.22 je znázorněno měření s kalcinometrem, které je oproti předešlým kalcinometrům příznivější v rámci manipulace. Dále bylo přistoupeno k zápisu hodnot na jedno desetinné místo. Tímto došlo k lepšímu a přesnějšímu vyjádření hloubky kalcinace.



Obrázek č. 10.22 Ukázka měření s kalcinometrem

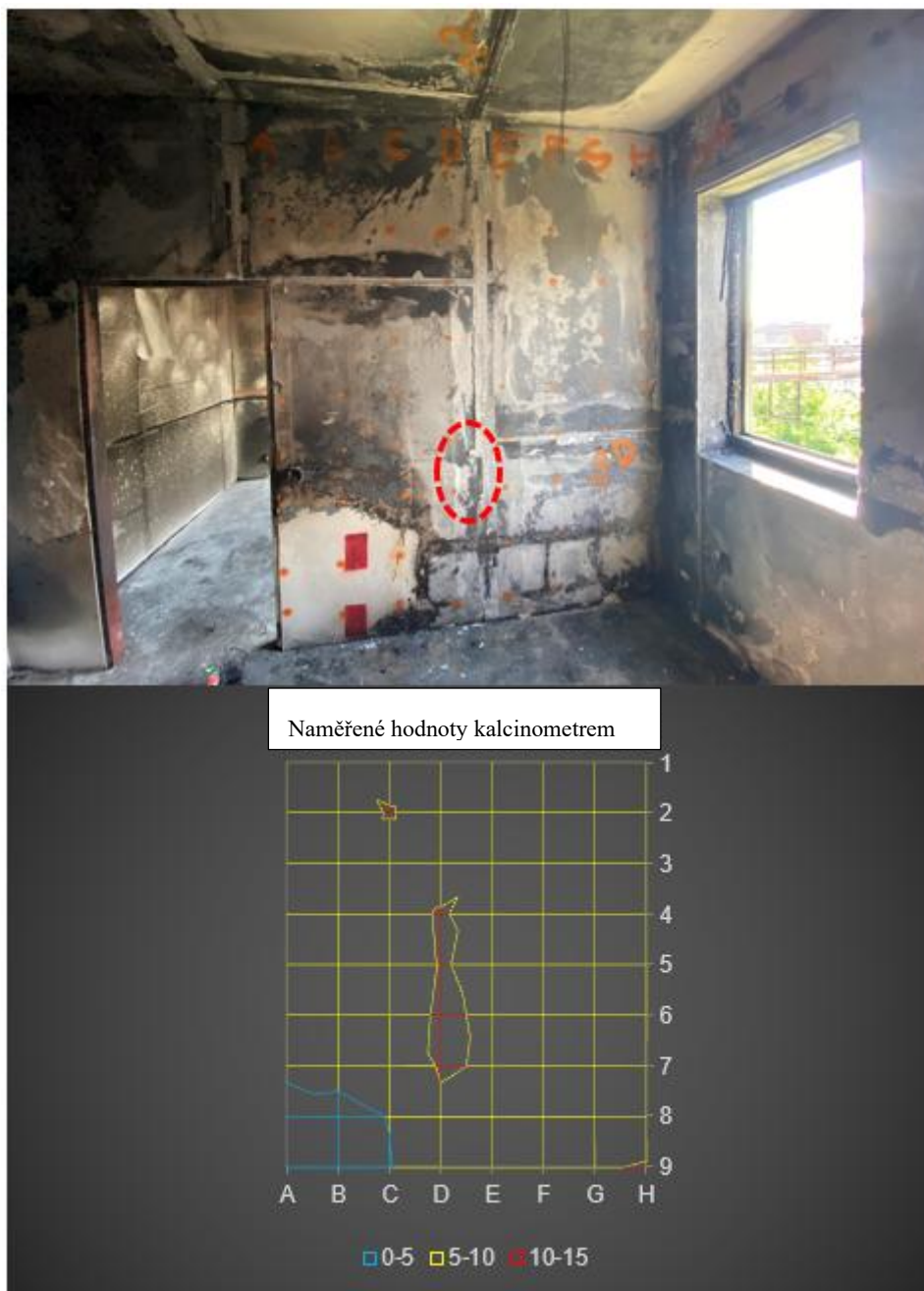
Nyní budou představeny některé výsledky z měření. Konkrétně se jedná o místnost 2, kdy budou představeny výsledky naměření v prostoru obývacího pokoje a ložnice. Ohnisko v obývacím pokoji se nacházelo na kraji sedačky (levá strana při pohledu na měřenou stěnu), kde došlo k rozliti benzínu a zapálení pomocí palníku. Po dosažení flashoveru v prostoru byl proveden hasební zásah a uhašení místnosti. Následně po ohledání psem na vyhledávání akceleraantů hoření došlo k vyklizení místnosti a měření kalcinace cca 15 hodin po požáru.



Obrázek č. 10.23 Na levém obrázku je zobrazen prostor obývacího pokoje před požárem a na pravé po požáru s vyznačeným ohniskem

Měření proběhlo celkem 4krát po sobě. Dvakrát měřil jeden operátor a dvakrát druhý. Měření bylo zjištěno, že naměřené hodnoty v místech dole u pravé strany měřené stěny, byly ovlivněny nasáklou hasební vodou. Bylo znatelné, že vpich prošel lehce bez odporu do určité hloubky. Jednalo se o body H9 a G9. Toto bylo zjištěno i pohmatem, kdy stěna v tomto místě byla mokrá, avšak na měření hloubky kalcinace to nemělo zásadní vliv, jelikož v porovnání s ohledáním místa požáru, zhodnocením stop

šíření požáru a celkové kalcinace na měřené ploše bylo zřejmé, že požár vznikl na vrchní straně sedačky. Na základě ohledání místa požáru a zhodnocením kalcinace bylo stanoveno jednoznačně místo vzniku požáru na levou stranu sedačky tak, jak je znázorněno na Obrázek č. 10.23. Jednalo se zároveň o místo, kde se nacházel nejvyšší počet bodů s vysokou naměřenou kalcinací (jednalo se o body D7 až D4). Výsledky byly prezentovány jak v grafu, tak v tabulce. V případě použití testovaného kalcinometru je přesnější vyjádření výsledku v tabulce, viz Tabulka č. 10.6. Tato metoda nabízí vyjádření výsledků na desetinné místo.



Obrázek č. 10.24 Ukazuje měřenou SDK stěnu a pod ním

Obrázek č. 10.25 Graficky znázorňuje naměřené hodnoty a místo vzniku požáru

Tabulka č. 10.6 Znáznornění naměřených hodnot.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	8,3	9,4	8,8	8,5	8,5	8,1	9	8,7
2	7,8	8,4	10,2	8,5	9,2	8,4	9,1	8,6
3	8,6	8,7	8,5	8,7	9,6	9	9	8,5
4	8,4	8,5	9	10,2	9	8,9	9,1	8,6
5	7,4	7,2	8	10,1	9,6	7,8	9	8,6
6	6,3	7,1	8,8	10,3	9,7	7,9	8,5	9,5
7	6,3	6	6,5	10,4	9,6	8,5	8,6	7,8
8	2,5	4	5,1	9,2	8,5	7,9	7,2	6,6
9	2,1	3,6	4,8	8,6	8,7	9	9,6	10,3

Dále se měření zaměřilo na prostor ložnice v místnosti 2. V tomto prostoru došlo k iniciaci benzínu pomocí palníku na kraji postele (levá strana z pohledu na měřenou stěnu), viz Obrázek č. 10.26. Tento prostor byl zapálen před obývacím pokojem, ale došlo pouze k lokálnímu zasažení postele z důvodu špatného přístupu vzdušného kyslíku, který byl odebrán způsobeným požárem v prostoru obývacího pokoje. Bylo přistoupeno k měření SDK stěny přiléhající k posteli. Působením požáru v tomto prostoru nedošlo k výraznému poškození a papír na straně SDK stěny přivrácené k požáru zůstal neporušen. Na základě těchto zjištění bylo vyzkoušeno měření kalcinace na sektory. Papír v tomto případě nebyl porušen, ale v místnosti se nacházelo přes 100 °C a dehydratace sádry mohla probíhat a tím způsobit kalcinaci.



Obrázek č. 10.26 Pohled do prostoru ložnice v místnosti 2 s vyznačeným ohniskem

Na Obrázek č. 10.27 je znázorněna SDK stěna a její rozdělení. Měření probíhalo tak, že v každém sektoru proběhlo celkem 10 měření v různých bodech a poté došlo k průměru těchto naměřených hodnot v každém sektoru. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány v sektoru č. 1. Tento výsledek může znamenat fakt, že horké zplodiny hoření se v rohu této místnosti hromadily a působily nejintenzivněji právě v tomto místě. Dále byly nejvyšší hodnoty naměřené v sektoru 5, 2 a 8, které se

nacházelo přímo v ohnisku nebo v prostoru nad ním. Tato metoda byla vyzkoušena pouze orientačně a z důvodu toho, jestli je možné naměřit výsledky kalcinace i na SDK stěně, u které nedošlo k poškození vrchní vrstvy papíru. Výsledky ukázaly, že spolu se standardním ohledáním je toto možné, protože v sektoru 1 nebyl žádný možný zdroj iniciace požáru a ani žádný hořlavý materiál. Vzhledem k velmi malým hodnotám, které byly naměřeny bylo přistoupeno k vyjádření výsledků na dvě desetinná místa. Přesto byl rozdíl velmi malý a rozdíl mezi sektorem 1 a 5 (místo nad ohniskem) byl téměř zanedbatelný. Ovšem při srovnání s ostatními sektory mimo ze sektorů v ohnisku a sektoru 1 byl rozdíl téměř 0,5 mm. Tudíž z toho lze vyjádřit pravděpodobné místo vzniku požáru i bez předchozího ohledání.



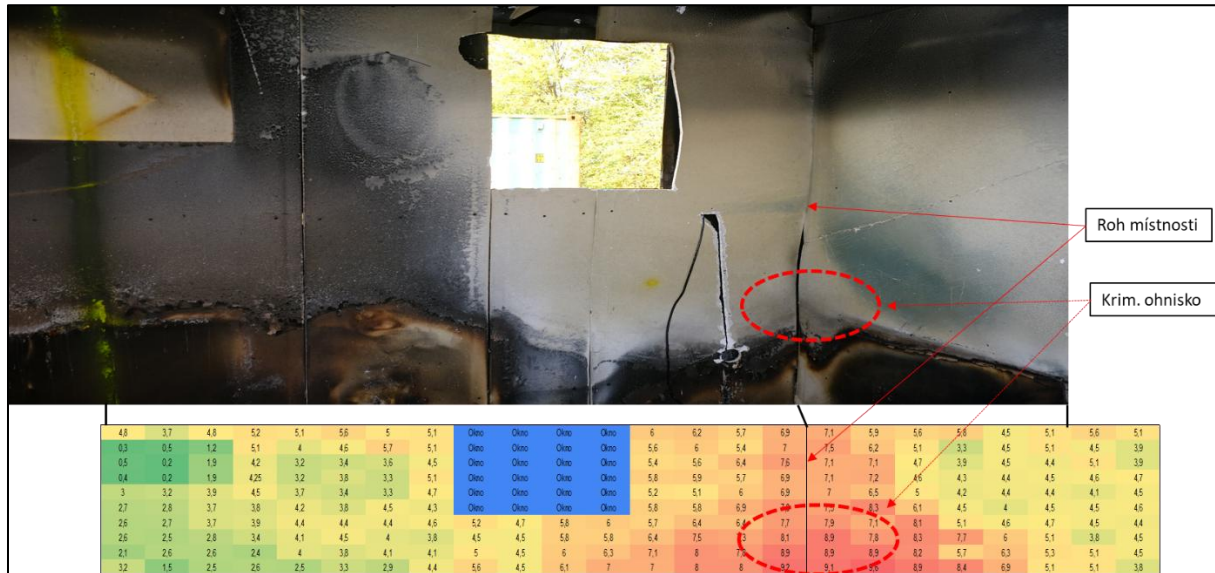
Obrázek č. 10.27 Pohled na měřenou SDK stěnu rozdělenou na sektory

Tabulka č. 10.7 V tabulce jsou vyznačeny hodnoty v jednotlivých sektorech

1,28	1,03	0,7
0,45	1,13	0,57
0,38	1,05	0,34

10.4 Příklad použití v odborném vyjádření

Níže na Obrázek č. 10.28 lze vidět možné využití a popsání naměřené hloubky kalcinace, kdy pro celkový lepší přehled o naměřené kalcinaci je nejlepší doplnit fotografií měřené plochy. S následným popisem je zřejmé, kde byla naměřena největší hloubka kalcinace v prostoru.



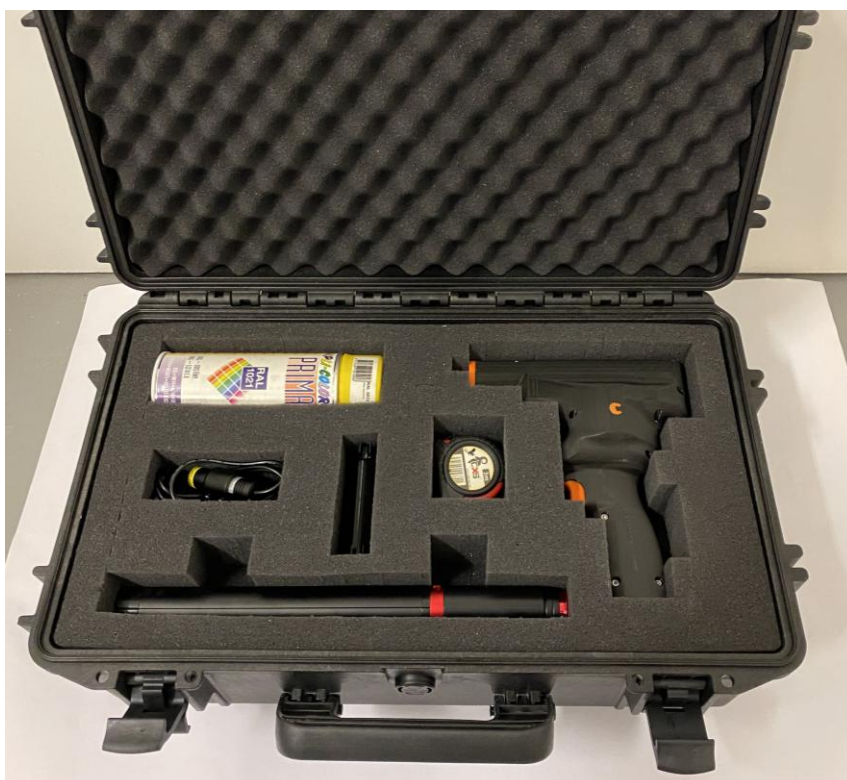
Obrázek č. 10.28 Srovnání naměřené hloubky kalcinace s fotografií měřené stěny

10.5 Aktuální verze kalcinometru

V současné době je vyvinut kalcinometr, který pro lepší úchop a manipulaci je ve tvaru „pistole“, kde spoušť zajišťuje přepis hodnot do záznamového zařízení (mobil, tablet a další). Přepsané naměřené hodnoty se zapisují do předdefinované tabulky, která vytvoří barevnou škálu podle naměřené hloubky, kde tmavší barva značí hlubší kalcinace v bodě vpichu. Dále byl kalcinometr umístěn do praktického kufříku, ve kterém se nachází všechny potřebné věci k měření. Tímto má vyšetřovatel či uživatel veškeré věci na jednom místě. V kufříku se zejména nachází stativ, laser, powerbanka a značkovací sprej. Dále je vytvořena metodika použití přístroje, kdy všechny zmíněné věci jsou zavedeny pod značkou CalciTrace. Takto vytvořená značka bude zastřešovat veškeré získané poznatky jak o samotných SDK deskách, tak o chování SDK desek při tepelné zátěži a v neposlední řadě samotné měření kalcinace.



Obrázek č. 10.29 Aktuálně vyvinutý kalcinometr



Obrázek č. 10.30 Kufřík s kalcinometrem a příslušenstvím

11 Metoda měření

V této kapitole představím postup měření s kalcinometrem a jeho vybavením. Měření je nejlépe provádět den po požáru, kdy dojde k prvotnímu „opadnutí“ hasební vody. Jako první provede vyšetřovatel požáru klasické ohledání místa požáru, kdy zejména podle charakteristických stop šíření požáru, stupně degradace hořlavého materiálu a svědeckých informací stanoví prostor vzniku požáru a příčinu či vyšetřovatelské verze příčin vzniku požáru. V nejasných případech či pochybnostech při určení místa vzniku požáru, může použít samotný kalcinometr, kterým provede kontrolní měření celého prostoru, kdy se pokusí naleznout místo nejvyšší degradace SDK stěny (tzv. kalcinace).

Po nalezení prostoru místa vzniku požáru se provede vytyčení měřené plochy. Nejlépe je proměřeni celé místnosti, které nám může poukázat z pohledu kalcinace SDK stěny samotné šíření požáru, ale tento způsob může být vzhledem k velikosti prostoru zdlouhavý. Další možností je stanovení místa měření s ohledem na podmínkách nacházejících se na místě požáru. Je dobré vybrat takovou plochu, která větší členitost pro následné srovnání. Například prostor vzniku požáru bude na sedačce a v těsné blízkosti bude postel, vyšetřovatel provede měření v místě křesla a postele. Následně provede porovnání, kde výsledky mohou být použity jako podpora jeho vizuálního vyjádření místa vzniku požáru. Jedná tak z důvodu toho, že takto provedené měření poskytne porovnání mezi dvěma hořlavými materiály s vysokým tepelným výkonem, kde rozdíly naměřené kalcinace budou zřejmé. Obecně lze ale říct, že minimální měřená plocha by měla být cca 2 m na jednu stranu a 2 m na druhou stranu od stanoveného místa prostoru vzniku požáru. V případech, kdy není možné z důvodu dispozičního řešení použít tuto metodu, tak je nutné zachytit srovnávací plochu na stěně. Srovnávací plocha může být provedena například sedací soupravou či jiným nábytkem, který „ochránil“ SDK stěnu a v těchto místech se naměří nejnižší hloubka kalcinace. Tudíž se může provést srovnání v následném vyjádření výsledků. V případech, kdy se jedná o tzv. „čistou“ plochu bez nábytku či jiného vybavení, je nutné provést zobrazení měřicí mřížky pomocí laseru a následně pomocí spreje označit vertikální a horizontální řady podle tabulky v Excelu. Jedná se tak z důvodu vyjádření výsledku a určení nejhlubší naměřené hloubky či méně hluboké v prostoru na srovnávací fotce. Pro samotné účely měření je žádoucí odstranění předmětů z plochy měření. To lze až po důkladném ohledání a zadokumentování místa požáru.

Poté se provede nastavení samotného laseru, který označí měřené body. Laser vytvoří mřížku, kde průsečíky horizontální a vertikální linie označují bod, ve kterém proběhne měření. Laser se umístí na stativ, který se postaví od měřené zdi do takové vzdálenosti, aby měřené body byly ve vzdálenosti 20 cm od sebe = doporučená vzdálenost. Nejvzdálenější možnost měření bodů od sebe je 30 cm. Tabulka přehledu vzdáleností je uvedena níže. Jedná se o vzdálenost měřené zdi od kolmice stativu s nasazeným laserem. V případě úzkých místnosti či jiného problému lze vzdálenost mezi body zkrátit. Toto zkrácení vzdálenosti bodů zapříčiní pouze více naměřených výsledků a detailnější zmapování měřené plochy. Před měřením je důležité si ověřit, že jsme schopni laserem, který vytvoří měřicí pole 11 x 11 bodů měřit stejné vzdálenosti na celé ploše měření (zhodnotit dispozici prostoru). Pokud není z nějakého důvodu možné použít samotný laser, tak je nutné použít „starší“ metodu, kdy se jedná o vyznačení samotných bodů pomocí metru a značkovacího spreje. Pomocí s metodou značkovacího spreje může například materiál na samotném místě požáru, kde se nachází například rovná lať, na kterou se vyznačí v určité vzdálenosti body, které chceme měřit a tuto lať použít k naznačení bodů na SDK zdi.

Následně po stanovení měřících bodů, se na záznamovém zařízení zapne vytvořená Google tabulka, ve které je potřeba zadat počet měřených bodů horizontálně a vertikálně. Toto provedeme tak, že zjistíme celkovou výšku a délku měřené plochy metrem. Na měřené vzdálenosti vydělíme vzdáleností bodů mezi sebou (např. 30 cm). Tím zjistíme počty měřených bodů v horizontálním a vertikálním směru, které zadáme do tabulky. Následně vznikne měřená tabulka, kde klikem začneme v levém horním rohu = bod jedna. Tento bod bude odpovídat levému hornímu rohu měřené plochy. Doporučuje se pro

přehlednost a jednoduchost začínat měření vždy v tomto bodě. Boční strany zobrazené plochy v horizontálním či vertikálním směru mohou být od stropu, podlahy či vedlejší stěny vzdáleny 30 cm, pokud se v tomto prostoru nenachází zájmová plocha měření.

V případě použití laseru s odstupovou vzdáleností takovou, že vzdálenost bodů je 30 cm od sebe, vystačí na pokrytí většiny prostorů od podlahy ke stropu, ale tato vzdálenost bude nedostačující v horizontálním směru, tudíž se v této situaci vyznačí značkovacím sprejem krajní body, na které se následně naváže. Toto je možné provést i ve vertikálním směru posunutí.

Samotné měření přístrojem kalcinometr se provádí tak, že přistoupíme k měřené stěně a první vpich provedeme v levém horním rohu měřené plochy, stojíme zády k laseru tak, že nezakrýváme plochu, kterou chceme měřit. Měření se provádí s ochrannými brýlemi. Vpich vedeme kolmo ke stěně do doby dotyku krycí plochy přístroje a samotné SDK stěny (penetrační jehla nejde vidět = buď je zasunuta v přístroji nebo v samotné stěně, což značí naměřenou hodnotu) a po samotném vpichu počkáme cca 1 s na ustálení hodnoty, kterou následně stiskem tlačítka přepíšeme do záznamového zařízení. Dále postupujeme v měření směrem k dolnímu levému bodu a poté přecházíme na další vertikální řadu.

Po měření je důležité provést fotodokumentaci měřené plochy pro následné srovnání. V případech, kdy je měřená plocha ohraničená pomocí stavebních konstrukcí, tak není třeba ji ohraničovat například pomocí spreje. V rámci pochopení problematiky měření je dobré projít si již provedené příklady měření.

Dále mimo jiné bylo dále vyzorováno, že dochází k tzv. únavě odporové pružiny, která ztrácí svůj odpor po naměření cca 300-350 bodů. V podmínkách laboratorního testování došlo po dosažení této hodnoty naměřených bodů o cca 1 mm nižší hloubka kalcinace než v předešlých testovacích plochách.

Odstup 145 cm = vzdálenost bodů 10 cm a plocha měřená 1 m ²
Odstup 180 cm = vzdálenost bodů 13 cm a plocha měřená 1,69 m ²
Odstup 210 cm = vzdálenost bodů 15 cm a plocha měřená 2,25 m ²
Odstup 275 cm = vzdálenost bodů 20 cm a plocha měřená 4 m²
Odstup 320 cm = vzdálenost bodů 23 cm a plocha měřená 5,29 m ²
Odstup 345 cm = vzdálenost bodů 25 cm a plocha měřená 6,25 m ²
Odstup 390 cm = vzdálenost bodů 28 cm a plocha měřená 7,84 m ²
Odstup 410 cm = vzdálenost bodů 30 cm a plocha měřená 9 m²

Obrázek 11.1 Odstup aktuálně používaného laseru a tím měřené plochy



Obrázek 11.2 Laser umístěný na stativu



Obrázek 11.3 Vyznačený měřicí rastr vytvořený laserem

11.1 Testování nové metody a kalcinometru

V rámci specializačního kurzu určeného pro začínající vyšetřovatele požárů byla realizována praktická část zaměřená na ohledání požářiště a určení příčiny vzniku požáru. Výcvik probíhal ve speciálně připravených tzv. požárních buňkách – dvou lodních kontejnerech, které byly konstrukčně rozděleny na dvě poloviny. Stěny byly opláštěny SDK deskami, instalována byla elektroinstalace a do interiéru byl umístěn nábytek a vybavení odpovídající běžnému domácímu či kancelářskému prostředí.

V každé buňce byl připraven specifický scénář požáru. Požár byl iniciován v předem definovaném bodě a ponechán do fáze plně rozvinutého požáru (flashover), poté došlo k jeho uhašení. Ohledání

vypálených buněk probíhalo dva dny po uhašení požáru, aby byla zachována autentičnost stop a zároveň umožněna bezpečná manipulace na samotném místě.

Úkolem vyšetřovatelů požárů bylo na základě ohledání určit místo vzniku požáru, stanovit jeho příčinu, případně navrhnout vyšetřovací verze. Po ukončení těchto činností bylo z prostoru odstraněno veškeré vybavení, a následně proběhlo analytické měření hloubky kalcinace SDK desek pomocí kalcinometru.

Před samotným měřením byla na stěnu instalována laserová projekce měřicí mřížky, která zajišťovala pravidelné rozložení bodů v horizontální i vertikální rovině. Vzdálenost mezi jednotlivými body byla stanovena na 15 cm, což umožnilo podrobný záznam změn v hloubce kalcinace. Dostatečně průkazné měření poskytuje vzdálenost měřících bodů od 20 cm do 30 cm.

Výsledky měření prokázaly vysokou míru shody mezi třemi nezávislými parametry:

- Bodem iniciace požáru,
- místem, určeným začínajícími vyšetřovateli na základě ohledání,
- a místem s největší zjištěnou hloubkou kalcinace.

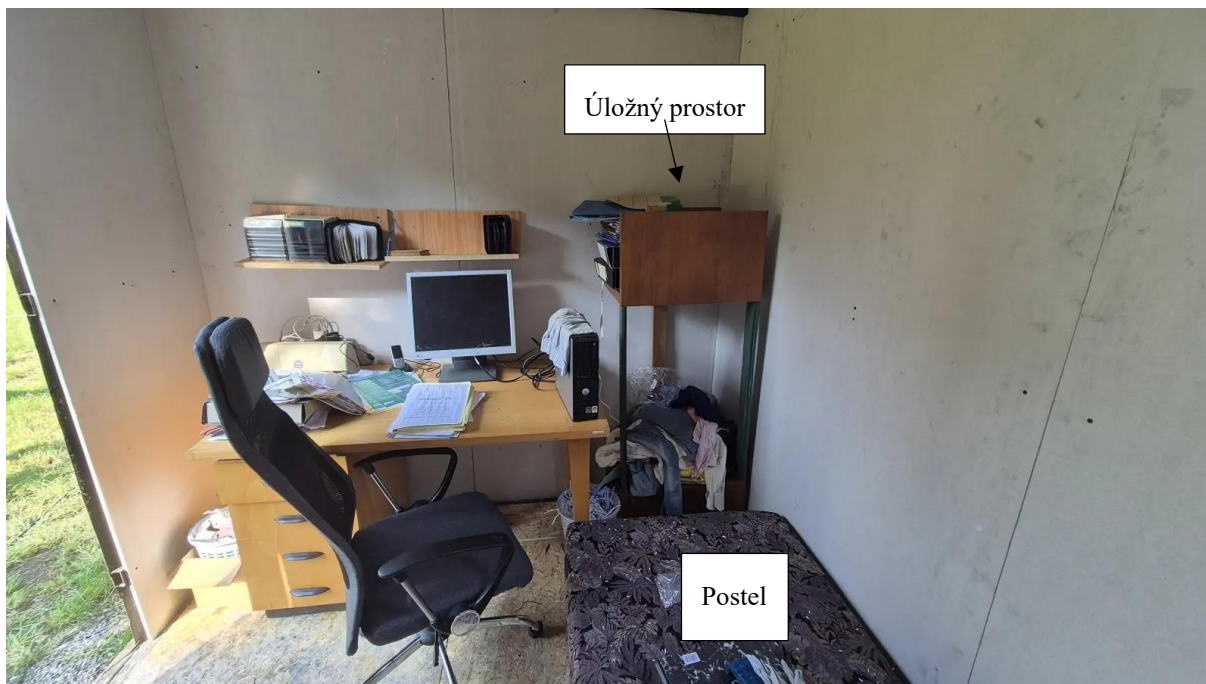
Tato zjištění potvrzují, že metoda měření hloubky kalcinace může sloužit jako účinný pomocný nástroj při určování místa nejdelsího a nejintenzivnějšího působení účinků požáru. Její využití v rámci ohledání požářiště může významně přispět ke zpřesnění lokalizace místa vzniku požáru a podpořit argumentaci vyšetřovatele požáru. Výsledky měření z obou požárních buněk jsou dále podrobně analyzovány v následující kapitole.

11.2 Buňka č. 1

Zkušební požární buňka byla uspořádána jako kancelářský prostor vybavený běžným zařízením – počítačem, tiskárnou, otevřeným úložným prostorem pro šanony a dalšími prvky kancelářského interiéru. Součástí vybavení byla rovněž postel, čímž byla simulována kombinace obytné a pracovní zóny.

Scénář požáru předpokládal vznik iniciace v prostoru mezi postelí a zmíněným úložným prostorem. Konkrétně se jednalo o požár způsobený technickou závadou přívodního prodlužovacího kabelu, který byl zapojen do zásuvky umístěné za postelí. Kabel vedl podél zadní strany úložného nábytku, kde dle scénáře došlo k jeho mechanickému poškození (skřípnutí), což vedlo k elektrickému zkratu a následnému vznícení okolního materiálu.

Požár se po iniciaci rozvíjel přibližně 11 minut, poté došlo k dosažení celkového vznícení (flashover). Následně byl požár uhašen jedním útočným proudem typu „C“. Rozložení vybavení místnosti na straně, kde došlo k iniciaci a následně k měření kalcinace jsou zobrazeny níže, viz Obrázek 11.4 a Obrázek 11.5.



Obrázek 11.4 Zobrazení místnosti před požárem



Obrázek 11.5 Fotografie zachycená cca jednu minutu po iniciaci

Ohledáním místa požáru bylo na základě zejména zhodnocení šíření požáru a stupně degradace zjištěno, že požár vznikl právě v prostoru mezi postelí a úložným prostorem. Jednalo se zejména o charakteristické znaky ohoření postele, která byla nejvíce degradovaná na straně přilehlé k úložnému prostoru a absence dřevěné konstrukce a všech hořlavých materiálů v úložném prostoru. Dále bylo zjištěno výrazně zvýšená degradace psacího stolu na straně přilehlé k úložnému prostoru. V prostoru iniciace došlo také k výrazné degradaci dřevěné podlahy. Dále došlo ke zhodnocení ohoření a vytvoření tzv. ohniskového kuželu na SDK stěnách. Jedná se o charakteristický znak šíření požáru, kdy požár

vytvoří „V“ vzor. V tomto případě byl tento vzor spatřován jak v samotném místě vzniku požáru, tak na druhé straně místnosti, kdy tento vzor byl vytvořen lehce hořlavým materiálem v tomto místě.



Obrázek 11.6 Pohled na opačnou stranu místnosti (mimo ohnisko), kde došlo k vypálení charakteristického znaku „V“

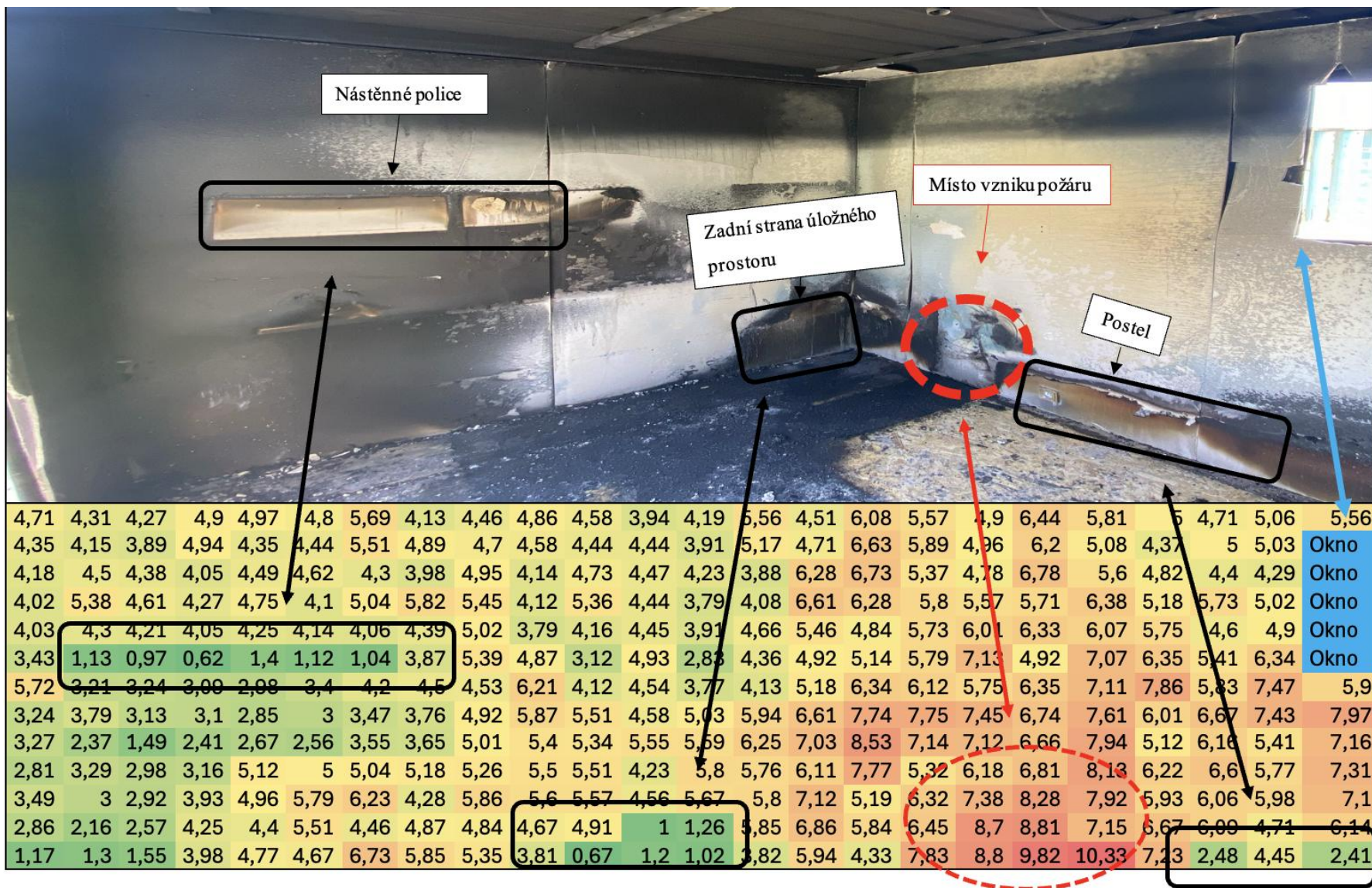
Po ohledání a vynesení vnitřního ohořelého vybavení se stanovila plocha měření kalcinace a následně se provedlo samotné měření pomocí kalcinometru. Měření probíhalo standardně v bodech vyobrazených pomocí laseru v průsečíku horizontální a vertikální linie, viz níže Obrázek 11.8. Operátor musí měřit tzv. z boku, aby nezakrýval zobrazení měřicí mřížky. V tomto případě došlo k měření na ploše, kde se nacházelo dostatek stínících prvků, které „ochránili“ SDK před požárem a hloubka kalcinace zde byla minimální. Výše zmíněné nám následně pomohlo pro vyjádření výsledků. Ohledáním bylo zjištěno, že místo vzniku požáru se nachází mezi postelí a úložným prostorem, a právě v tomto prostoru byla naměřena nejvyšší hloubka kalcinace, kdy z tohoto prostoru docházelo k dalšímu šíření požáru. Kalcinace zde vytvořila tzv. ohniskový kuželový příznak. Jedná se o specifický typ vzoru na svislém povrchu (například na stěně nebo nábytku), který má tvar písmene V nebo kužele, jehož špička často (ale ne vždy!) ukazuje na místo vzniku požáru. V tomto případě se tak stalo naměřením hloubky kalcinace a částečně vizuálním zhodnocením. Místo s nejvyšší naměřenou hloubkou bylo zároveň jediné místo, kde se u podlahy nacházela tak vysoká kalcinace.



Obrázek 11.7 Operátor provádí měření kalcinometrem. Je postaven tak, aby nestínil zobrazení mřížky pomocí laseru



Obrázek 11.8 Měření pomocí kalcinometru na zobrazeném laserovém rastru



Obrázek 11.9 Celkový pohled na naměřené výsledky ve srovnání s měřenou SDK stěnou

11.3 Buňka č. 2

Ohledání a samotné měření kalcinace v této buňce probíhalo obdobně jako u buňky č. 1. Místo vzniku požáru se nacházelo mezi SDK stěnou a křeslem, kde se nacházela zásuvka, ve které mělo dojít k přechodovému odporu a následně k požáru. Jednalo se o buňku vybavenou jako kuchyň.



Obrázek 11.10 Pohled do buňky s naznačeným místem vzniku požáru. Z tohoto pohledu za křeslem umístěným v levém horním rohu místnosti.

Ohledáním došli začínající vyšetřovatelé požáru do prostoru samotného křesla, které bylo požárem zcela zničeno. V tomto případě byly znaky na požářišti takové, že k iniciaci mohlo dojít od technické závady na zásuvce, a stejně tak pomocí nedbalostního jednání osoby, která mohla iniciovat požár například pomocí nedopalku od cigarety. Níže na obrázku lze vidět pohled na místo vzniku požáru cca jednu minutu po iniciaci.



Obrázek 11.11 Pohled na místo vzniku požáru cca jednu minutu po iniciaci

Po standardním ohledání došlo k vyklizení ohořelého vybavení a bylo přistoupeno k samotnému měření kalcinace. V tomto případě došlo k ohraničení měřené plochy zeleným sprejem jinak byla plocha měření obdobná jako v buňce číslo 1. Měření kalcinace ukázalo nejhlubší kalcinaci v okolí zapálené zásuvky. Jednalo se zároveň o jediné místo u podlahy s naměřenou nejhlubší kalcinací a lze i na toto poukázat, jako na ohniskový kužel. Z tohoto místa se pak podle měření kalcinace požár dál šířil směrem na křeslo a ventilační cestou k otevřenému oknu. Pod oknem se nacházela lednice, která byla účinky požáru stejně jako křeslo kompletně degradovaná. Lednice zároveň částečně „ochránila“ SDK desku a hloubka zde byla naměřená výrazně menší. Zároveň kalcinace prokázala, že se požár nerozšířil právě od zmíněné lednice.



5,64	3,96	4,43	1,43	0,97	3,48	5,76	4,6	5,77	5,35	4,81	5,77	5,1	5,47	6,42	5,35	6,87	6,36	5,51	5,8	6,11	4,23	4,26
3,97	4,07	3,58	0,94	0,57	2,96	5,48	5,02	5,1	4,78	6,2	5,77	5,33	5,93	7,12	4,82	5,93	5,72	5,71	4,74	5,36	5,1	1,48
4,07	3,65	3,48	1,18	0,55	3,19	6,02	5,09	5,48	5,41	5,34	5,39	5,91	6,14	6,01	5,06	5,8	5,16	5,22	4,7	6,44	5,52	0,77
3,57	4,24	3,65	0,81	0,59	2,65	5,68	4,98	5,43	4,99	5,92	5,66	6,06	6,25	7,03	5,02	5,73	6,16	5,76	5,52	5,69	5,98	0,72
3,66	3,82	3,07	3,44	3,57	3,98	4,79	6,18	6,81	5,53	5,79	5,79	6,16	6,59	6,43	5,6	6,03	5,24	6,18	6,08	5,98	5,83	2,01
4,12	3,86	3,46	3,85	5,57	4,32	4,89	4,98	5,81	5,83	6,69	6,37	5,99	6,2	7,26	5,7	6,75	6,28	5,74	6,22	6,4	5,36	5,97
4,08	3,79	3,8	4,73	5,39	4,57	5,99	5,93	5,98	6,47	6,86	6,37	6,81	6,8	6,69	6,01	7,01	6,38	6,23	5,66	6,59	5,53	6
5,89	3,83	4,67	4,07	4,48	4,36	5,33	6,61	5,05	6,68	6,71	6,74	7,82	7,24	7,84	6,3	7,26	5,92	6,13	5,61	6,72	6,32	6,31
4,3	2,79	2,93	4,01	3,81	2,34	3,25	4,86	5,42	5,46	6,72	6,76	7,16	7,25	8,56	6,84	6,12	5,93	4,58	5,96	7,54	4,99	6,23
3,54	2,47	2,86	4,1	2,23	2,23	3,45	5,05	4,13	4,78	6,5	6,5	7,61	7,18	7,11	5,63	6,42	5,13	5,68	5,7	5,9	4,58	5,44
3,34	2,35	1,95	2,19	2,64	3,04	3,85	3,08	2,39	2,17	3,14	6,43	7,17	7,69	8,08	7,68	7,38	6,6	6,52	6,07	5,97	4,69	4,14
3,34	2,27	3,59	3,75	4,55	2,74	3,26	3,72	2,17	1,51	1,98	4,15	8,64	7,24	7,93	7,41	7,24	6,35	6,71	6,21	6,18	4,32	4,78
3,11	3,05	2,09	4,51	4,03	4,19	5,11	4,38	2,7	1,28	2,19	3,17	7,09	7,95	9,15	9,52	9,87	8,2	6,66	6,22	6,07	4,46	4,46

Obrázek 11.12 Celkový pohled na naměřené výsledky ve srovnání s měřenou SDK stěnou

12 CalciTrace

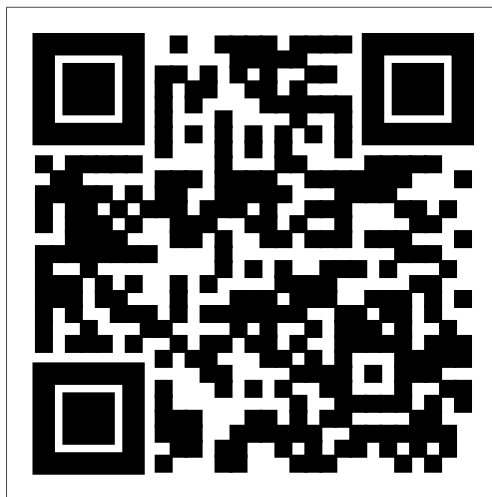
Jedná se o „značku“, která byla vytvořena pro zadávání výsledků z oblasti SDK desek a samotné kalcinace. CalciTrace má poskytnout celkovou podporu vyšetřovatelů požáru s ohledem na problematiku stanovení stop na tepelně namáhaných SDK konstrukcích. Jednat se bude o popis komerčně prodávaných desek a jejich rozdíly. Možné stavební konstrukce, se kterými se můžeme setkat na místě požáru. Popis tepelně namáhaných SDK desek a vyjádření degradace vizuálním zhodnocením. V neposlední řadě stanovení nové metodiky a technického prostředku pro měření hloubky kalcinace v SDK desce. Informace budou zprostředkovány pomocí webové stránky, která online může poskytnout informace všem vyšetřovatelům požáru. Zatím byla spuštěna pilotní verze, kde se objevují základní informace.



Obrázek 12.1 logo CalciTrace

Vzhledem k rostoucí popularitě sádrokartonových desek v České republice, díky jejich snadné výrobě a zpracovatelnosti, lze očekávat nárůst počtu požárů, při nichž bude tato metoda využitelná. V současnosti dochází k expanzi využívání SDK stěn, přičemž trend směřuje také k rostoucímu používání dřevěných stavebních konstrukcí, které vyžadují dodatečnou protipožární ochranu. Jedním z nejjednodušších a nejefektivnějších způsobů, jak této požární ochraně vyhovět, je právě použití protipožárního sádrokartonu, což může výrazně přispět k prevenci a ochraně stavebních objektů.

Tato práce tak poskytuje nový nástroj pro analýzu stop na místě požárů, který by mohl být v budoucnu běžně implementován při vyšetřování příčin požárů, zvláště v případech, kdy jsou použity sádrokartonové materiály ve stavebních konstrukcích.



Obrázek 12.2 QR kód odkazující na webovou stránku

13 Laboratorní testování SDK desek

V rámci zjištění chování SDK desek během měření a zjištění jeho struktury po požáru, bylo provedeno testování celkem 5 druhů SDK desek o tloušťce 12,5 mm. Z každého druhu byly nařezány celkem tři testovací desky, kdy na jedné proběhlo testování bez tepelného namáhání a dvě po tepelném namáhání. Tepelné namáhání bylo vytvořeno pomocí sálavého tepla z pece.

Po dobu 15 minut byl vzorek vystaven sálavému teplu o teplotě cca 842 °C. Testování mělo za cíl zjistit odpor SDK desky při vpichu tři různých hrotů a zjistit sílu, která neprojde nepoškozenou částí SDK desky a ideálně se zastaví na přechodu poškozené vrstvy na nepoškozenou (kalcinační linie). Testování probíhalo na elektromechanickém trhačím stroji, který s nainstalovanou měřicí penetrační jehlou s hrotem pronikla posuvem 1 mm/s skrz vrchní vrstvou papíru, sádrovou výplň a zastavila se za spodní vrstvou papíru.



Obrázek 13.1 Elektromechanický trhačím stroj

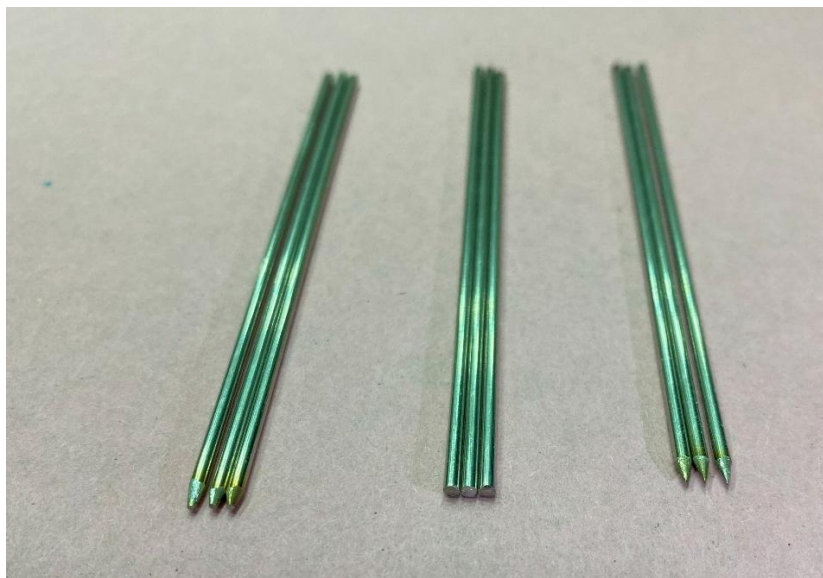
Nyní se podívám na stručný popis výsledků, které budou představeny následně v samostatné práci.

Byly otestovány komerčně dostupné SDK desky prodávající se v České republice. V rámci experimentální části byly podrobeny mechanickému testování různé typy běžně dostupných SDK desek, které jsou komerčně distribuovány na českém trhu. Konkrétně šlo o následující typy:

- standardní bílá sádrokartonová deska (GKB),
- zelená impregnovaná deska určená do vlhkého prostředí (GKI),
- modrá tzv. „diamantová“ deska se zvýšenou pevností a akustickými vlastnostmi (GKF Diamant),
- červená protipožární deska (GKF),
- sádrovláknitá deska.

Testování bylo zaměřeno na mechanickou odolnost těchto materiálů při aplikaci bodového zatížení pomocí zkušebních hrotů. Během zkoušky došlo u všech typů sádrokartonových desek (GKB, GKI, GKF, GKF Diamant) k průniku hrotu skrz materiál bez většího odporu, přičemž nedošlo k poškození samotného hrotu.

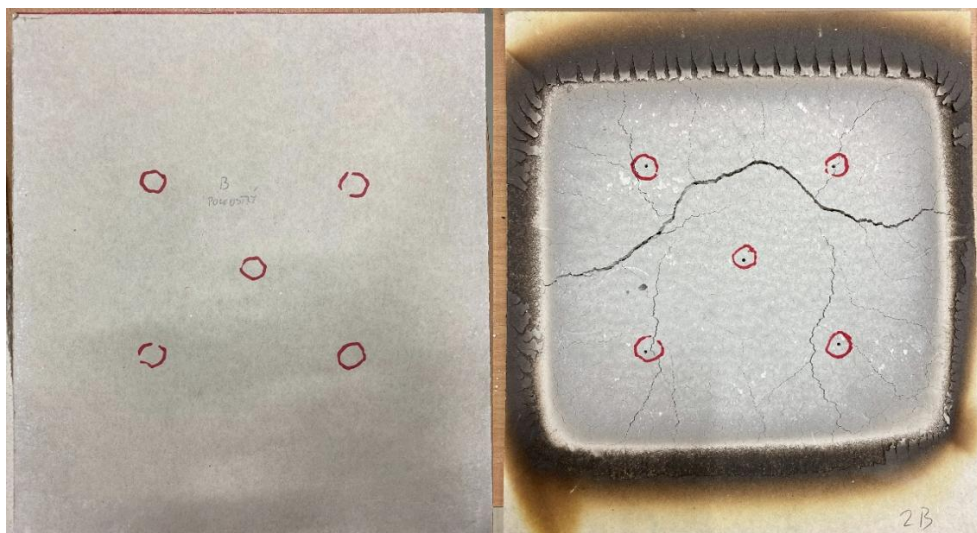
Výrazně odlišné výsledky byly zaznamenány u sádrovláknité desky. V tomto případě sice došlo k částečnému proniknutí hrotu, avšak materiál vykázal výrazně vyšší mechanický odpor, který vedl až k zalomení některých hrotů během testu. Tento výsledek poukazuje na podstatně vyšší pevnostní charakteristiky sádrovláknité desky ve srovnání s klasickými sádrokartonovými materiály.



Obrázek 13.2 Použité hroty: zleva poloostří hrot, tupý hrot, a nakonec ostrý hrot

Testování různých typů hrotů bylo provedeno z důvodu toho, že byl zkoumaný hrot, který bude mít nejmenší odpor při průniku SDK deskou. Z tohoto testování vyšlo to, že nejmenší odpor měl tzv. tupý hrot. Navzdory tomu, že teoreticky měl ostrý a poloostří hrot snadněji proniknout z důvodu toho, že měly snadněji rozřázat cestu skrz kalcinovanou část SDK desky.

Nyní si představíme samotné testovací vzorky. Byly nařezány desky o stejném rozměru a došlo k proměření v naznačených bodech, které byly pokaždé ve stejných vzdálenostech, viz Obrázek 13.3. Dále byl proveden vpich pomocí elektromechanické trhačky, kdy byly všechny tři hroty otestovány na všech vzorcích SDK desek jak tepelně namáhaných, tak tepelně nenamáhaných. Do podkladní desky pod SDK desku byl korunkový vrtákem vyvrtán otvor zaručující volný průchod jehly s hrotem a také z důvodu toho, aby se nehromadila stlačená sádra na podkladní desce a nezkreslovala výsledky, viz níže Obrázek 13.4.



Obrázek 13.3 Vyznačené body na tepelně nenamáhaném a tepelně namáhaném vzorku standardního bílého sádrokartonu



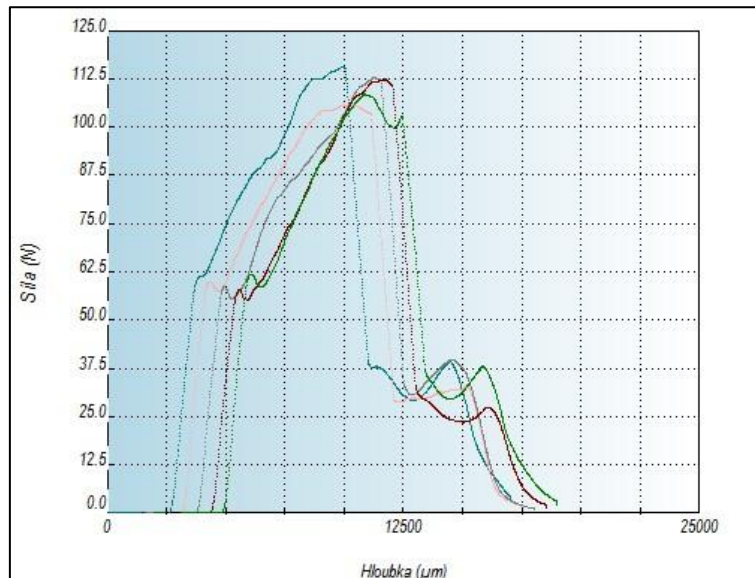
Obrázek 13.4 Bližší pohled na hrot nainstalovaný na elektromechanické trhačce

Při srovnání tepelně nenamáhané sádrokartonové desky s deskou, která byla vystavena zvýšené teplotě, bylo zjištěno výrazné snížení mechanického odporu v celém jejím průřezu. I přesto, že podle měření a pozorování kalcinační linie nebyla deska plně kalcinována, došlo zřejmě ke změnám struktury v celém profilu materiálu.

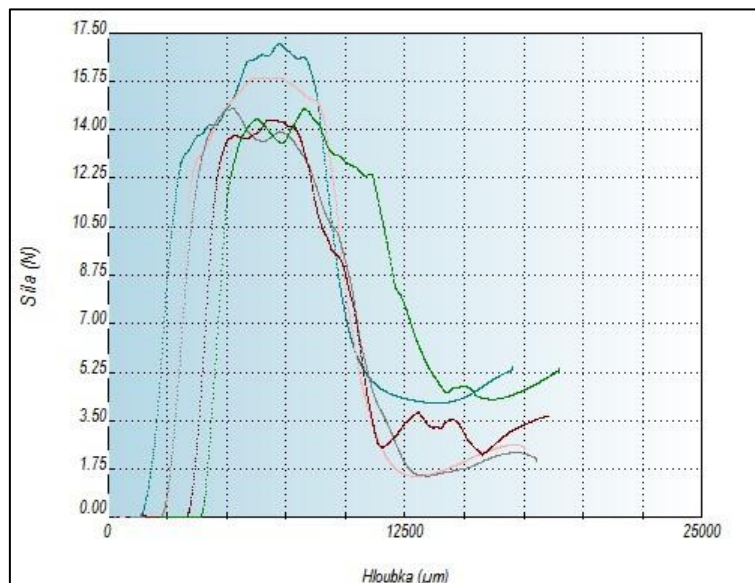
Je pravděpodobné, že došlo k částečné dehydrataci sádry, a to nejen v povrchové vrstvě, ale i ve zbytku průřezu. Tato strukturální změna vedla ke ztrátě pevnosti a soudržnosti materiálu.

V grafech zatížení se to projevilo jako výrazně nižší pik síly – tedy k průniku hrotu došlo při podstatně menším zatížení než u desky, která nebyla tepelně ovlivněna. Tepelně namáhaná deska tedy kladla menší odpor a snáze došlo k jejímu proražení, i když nebyla plně kalcinována. V této práci bude prezentováno testování bílého tepelně nenamáhaného a tepelně namáhaného sádrokartonu tupým hrotem.

V grafu na Obrázek 13.5 lze vidět výsledky naměřené na 5 tepelně nenamáhaných vzorcích. Z výsledků je patrný pík = nejvyšší naměřená síla potřebná k průniku SDK deskou okolo 112,5 N. Zatímco v grafu na Obrázek 13.6 lze vidět výsledky naměřené na 5 tepelně namáhaných vzorcích, kde pík je okolo hodnoty 15 N.



Obrázek 13.5 Graf ukazuje výsledky naměřené na tepelně nenamáhaném vzorku bílé SDK desky



Obrázek 13.6 Graf ukazuje výsledky naměřené na tepelně namáhaném vzorku bílé SDK desky

V diplomové práci bude proveden studentkou VŠB-TUO detailní rozbor naměřených výsledků, který se bude věnovat stanovení vhodné jehly a hrotu pro přístroj na měření hloubky kalcinace (kalcinometr). Testování dále poukázalo na nutnost samotného výzkumu pro sádrovláknité desky, které mají výrazně odlišné chování a strukturu než SDK deska.

13.1 Typy testovaných SDK desek a jejich vlastnosti

Standardní bílá sádrokartonová deska (GKB)

Určení

Jedná se o základní typ sádrokartonové desky, určený pro použití v interiéru, zejména v suchých prostorech (relativní vlhkost do 65 %). Používá se nejčastěji na nenosné příčky, podhledy a obklady stěn v bytové i občanské výstavbě.

Složení a struktura

Deska se skládá z jádra tvořeného přírodním nebo syntetickým dihydrátovým síranem vápenatým ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) – tedy sádrou, a vnějších vrstev z recyklovaného kartonu. Neobsahuje žádné speciální příměsi, jádro není impregnované ani vyztužené.

Chování při požáru

Deska je klasifikována jako nehořlavá (třída reakce na oheň A2-s1, d0 dle EN 13501-1), přičemž při zahřívání dochází k postupné dehydrataci sádry a uvolňování krystalické vody, což zpomaluje nárůst teploty v jádru. Nicméně nemá zesílenou protipožární odolnost – je určena pouze pro základní požární požadavky.

Zelená impregnovaná deska do vlhkého prostředí (GKI)

Určení

Používá se do prostor s přechodně zvýšenou vlhkostí, jako jsou koupelny, sprchy, kuchyně nebo prádelny. Není vhodná pro trvale mokré prostory.

Složení a struktura

Jádro desky je stejné jako u GKB, ale je upraveno hydrofobními přísadami (nejčastěji silikony nebo vosky), které snižují nasákavost. Také kartonový obal je impregnován proti vlhkosti. Tato kombinace snižuje riziko poškození vlhkostí.

Chování při požáru

Tepelné vlastnosti odpovídají základní desce GKB. Deska si zachovává nehořlavost, avšak neobsahuje složky, které by aktivně zvyšovaly požární odolnost.

Modrá deska „Diamant“ (např. Knauf Diamant DFH2IR)

Určení

Tato deska je určena pro víceúčelové použití v náročnějších podmínkách. Spojuje zvýšenou pevnost, vyšší požární odolnost, částečnou akustickou izolaci a také vlhkostní odolnost. Často se využívá v dřevostavbách, školách, nemocnicích nebo průmyslových provozech.

Složení a struktura

Deska má zhuštěné sádrové jádro s příměsemi pro zvýšení mechanické pevnosti, hydrofobní úpravou (H2), a je vyztužena vlákny a příměsemi, které zvyšují tvrdost a odolnost proti nárazu. Kartonový obal je také zesílený. Typové označení DFH2IR značí desku s vyšší požární odolností (D), zvýšenou pevností jádra (F), hydrofobností (H2), odolností proti nárazu (I) a zvýšenou únosností (R).

Chování při požáru

Deska má vysokou odolnost vůči teplotám. Při požáru dochází k postupné dehydrataci, přičemž zvýšený obsah minerálních vláken a přísad stabilizuje strukturu i za vysokých teplot. Typická klasifikace: A2-s1, d0.

Červená protipožární deska (GKF)

Určení

Určena pro konstrukce, kde je požadována zvýšená požární odolnost. Používá se zejména jako opláštění nosných i nenosných konstrukcí, šachet, podhledů či instalačních předstěn v prostorech s přísnějšími požárními požadavky.

Složení a struktura

Deska má zesílené sádrové jádro s příměsí minerálních vláken (skelná, případně vermikulit či perlit), které zajišťují vyšší soudržnost při působení tepla. Kartonový povrch je standardní, případně zesílený. U některých verzí je kladen důraz i na akustické vlastnosti.

Chování při požáru

Při vystavení zvýšené teploty a plamenů dochází ke klasické dehydrataci jádra, ale díky přísadám si deska zachovává soudržnost delší dobu a zpomaluje přenos tepla do dalších vrstev konstrukce. Desky dosahují klasifikace A2-s1, d0 a v sestavách umožňují požární odolnost až EI 90 a vyšší.

Sádrovláknitá deska (např. Fermacell, Firepanel A1)

Určení

Používá se ve stavebních systémech se zvýšenými požadavky na mechanickou pevnost, požární odolnost a akustický komfort. Je vhodná i do vlhkého prostředí a pro obklady stěn, podlah i stropů v občanské, bytové i průmyslové výstavbě.

Složení a struktura

Deska je tvořena homogenní směsí přírodní sádry a celulózových vláken z recyklovaného papíru, lisovanou za vysokého tlaku a teploty. Neobsahuje kartonový obal – má jednodušší strukturu v celém objemu. Přísady zajišťují požadované vlastnosti, jako je odolnost proti ohni a vlhkosti.

Chování při požáru

Díky jednodušší struktuře a absenci kartonu má vynikající požární vlastnosti. Deska je klasifikována jako A1 (nehořlavá) a je schopna zajišťovat požární odolnost až 120 minut v jednovrstvých systémech. V konstrukcích obkládajících ocelové nosníky nebo sloupy lze dosáhnout požární odolnosti až 240 minut. Materiál se při zahřátí chová stabilně, nedochází ke stratifikaci vrstev ani odlupování.

14 Testování zcela nedestruktivní metody pro zjištění hloubky kalcinace

Doposud vyvíjená metoda stanovení hloubky kalcinace v jisté míře „poškodí“ požárem zatíženou SDK desku minimální formou. Z důvodu vývoje zcela nedestruktivní metody proběhlo testování pomocí termografické inspekce tepelně zatížené SDK desky. Testování proběhlo v gesci výzkumného centra Západočeské univerzity v Plzni. K tomuto testování došlo ve spolupráci s VP HZS PLK, kteří na toto testování přizvali i autora této práce VP HZS MSK. Metoda spočívala v tom, že zahřáli požárem zasaženou SDK stěnu a následně toto místo proměřili pomocí termokamery. Touto čistě nedestruktivní metodou bylo zjištěno, že bylo možné indikovat pouze povrchové a mírně podpovrchové projevy změn SDK stěny. Dle vyjádření výzkumného centra je tato metoda pro měření kalcinace za účelem stanovení nejhlubšího místa kalcinace nevhodná. Dále z hlediska potřebného vybavení a obsluhy je jednoznačně jednodušší, dostupnější a uživatelsky přívětivější použití vyvíjeného kalcinometru.



Obrázek 14.1 Příklad přístroje pro termografickou inspekci tepelně zatíženého sádrokartonu

15 Závěrečné shrnutí

Vyšetřovatel požárů nikdy neurčuje místo vzniku požáru pouze podle jednoho charakteristického ukazatele, ale využívá metodu eliminace a kombinace různých znaků a dostupných prostředků. Využití hloubky kalcinace SDK desek poskytuje cenné informace pro odhad možného rozvoje požáru a zároveň stanovení samotného místa vzniku požáru. Tato metoda, která umožňuje rekonstruovat šíření požáru, bude využita jako doprovodná technika při vyšetřování požárů, přičemž primární pozornost bude stále věnována stávajícím osvědčeným metodám pro stanovení místa vzniku požáru. Výsledkem měření jsou relativní či empirické hodnoty naměřené v určitém bodě na časové ose.

Vzhledem k rostoucí popularitě sádrokartonových desek v České republice, díky jejich snadné výrobě a zpracovatelnosti, lze očekávat nárůst počtu požárů, při nichž bude tato metoda využitelná. V současnosti dochází k expanzi využívání SDK stěn, přičemž trend směřuje také k rostoucímu používání dřevěných stavebních konstrukcí, které vyžadují dodatečnou protipožární ochranu. Jedním z nejjednodušších a nejefektivnějších způsobů, jak této požární ochraně vyhovět, je právě použití protipožárního sádrokartonu, což může výrazně přispět k prevenci a ochraně stavebních objektů.

Tato práce poskytuje nástroj pro analýzu požárů, který by mohl být v budoucnu běžně implementován při vyšetřování příčin požárů, zvláště v případech, kdy jsou použity sádrokartonové materiály ve stavebních konstrukcích.

Dále se práce zaměřuje na hloubkovou analýzu termomechanického chování SDK desky v podmínkách požáru, se zvláštním důrazem na strukturní změny probíhající při vystavení zvýšeným teplotám. Při tepelném působení dochází k dehydrataci materiálu SDK desky a současně se spouští proces kalcinace. S rostoucí teplotou a délkou expozice se prohlubuje rozsah kalcinace, což lze využít pro zpětnou analýzu průběhu požáru.

Správné vyhodnocení hloubky kalcinace poskytuje cenné informace pro vyšetřování požárů, jelikož umožňuje rekonstrukci šíření požáru a přibližné určení místa jeho vzniku. V rámci této práce byl vyvinut kalcinometr spolu s metodikou měření, která byla prezentována na odborné konferenci požární ochrany a také na specializačním kurzu pro vyšetřovatele požárů, kde byla kladně přijata díky své srozumitelnosti a praktické využitelnosti.

Po prezentaci přístroje byl projeven zájem o jeho zavedení do praxe, což potvrzuje jeho potenciální přínos pro analýzu požárů.

Cílem této práce byl návrh a vývoj nového technického prostředku, označovaného jako kalcinometr, a vytvoření metodiky jeho použití. V průběhu práce probíhá analýza a vyhodnocování poznatků získaných testováním aktuálního prototypu, se zaměřením na stanovení optimální metody značení měřicích bodů a formulaci související metodiky.

Výsledkem tohoto výzkumu je komplexní sada nástrojů, která bude integrována do přenosného kufříku obsahujícího kalcinometr a doplňkové vybavení pro značení měřicích bodů. Hlavním cílem je zajištění snadné použitelnosti a možnosti okamžité interpretace výsledků přímo na místě požáru.

Kalcinometr sice mírně narušuje povrch sádrokartonové stěny, avšak s ohledem na běžnou praxi, kdy jsou požárem poškozené stěny nahrazovány novými, nemá tato vlastnost negativní dopad na jeho praktickou využitelnost.

Vývoj probíhá ve spolupráci s průmyslovým partnerem, přičemž na základě vytvořeného prototypu a navržené metodiky vznikne finální produkt.

Seznam literatury

- [1] FILIPI, Bohdan. *Nauka o materiálu*. Ostrava: SPBI, 2003. ISBN 80-86634-11-6.
- [2] SHEPEL, Sergey V., Karim GHAZI WAKILI a Erich HUGI. Investigation of heat transfer in gypsumplasterboard exposed to fire for three nominal fire scenarios. *JournalofFireSciences*. 16. Dostupné z: doi:0.1177/0734904111433265
- [3] *Guide for Fire and Explosion Investigations*. USA: National Fire Protection Association (NFPA), 2021.
- [4] Stanislav KOPECKÝ, Jaroslav ŘEPIK a Jakub Škoda ŠKODA. *Měření hloubky kalcinace a praktického provedení* [online]. 2020, 2020 (Časopis 112 ROČNÍK XVI ČÍSLO 9/2017), 5 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xvi-cislo-9-2017.aspx?q=Y2hudW09Mw%3D%3D>
- [5] FRANGI, Andrea, Vanessa SCHLEIFER, Fontana MARIO a Hugli ERICH. Experimental and NumericalAnalysisofGypsumPlasterboards in Fire. *Fire Technology* 46. 2010, 20. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s10694-009-0097-5>
- [6] KEERTHAN, Poologanathan a Mahen MAHENDRAN. Numericalstudiesofgypsumplasterboardpanelsunder standard fireconditions. *Firesafetyjournal*. Accepted 11 June 2012, **2012**, 15. Dostupné z: doi:FireSafetyJournal 53 (2012) 105–119
- [7] NATIONAL ASSOCIATION OF FIRE INVESTIGATORS, INTERNATIONAL, Christopher L. MEALY a Daniel T. GOTTUK. Proceedingsofthe 5th International Symposium on FireInvestigation Science and Technology: A STUDY OF CALCINATION OF GYPSUM WALLBOARD. *ISFI 2012*. 3610 Commerce Drive, Suite 817 Baltimore, MD 21227 410-737-8677, 2012.
- [8] WOLFE, Andrew J, Daniel T. GOTTUK a HUGHES ASSOCIATES INC. ANALYSIS AND APPLICATION OF CALCINATION DEPTH PROBING TOOL AND TECHNIQUE. *ISFI 2014 International Symposium on FireInvestigation Science and Technology*. 2014, 11.
- [9] ANDRLÍK, Milan. *POSUZOVÁNÍ POŽÁREM NAMÁHANÝCH KONSTRUKCÍ*. Diplomová práce. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE - Fakulta stavební - Katedra konstrukcí pozemních staveb, 2023.
- [10] HARDING, Mary-Jane, Karl HARRISON a Icove DAVID. Applyingarchaeology to fireinvestigationtechniques: A review. *Forensic Science International*. Accepted 30 October 2022, 6. Dostupné z: doi:Forensic Science International 341 (2022) 111511
- [11] *FIRE SCENE INVESTIGATION*. 14. Dostupné z: doi:<https://maiiif.org/wp-content/uploads/2017/08/Guide-for-Conducting-Marine-Fire-Investigations-Chapter-4.pdf>
- [12] GHAZI WAKILI, K., E. HUGI a L. WULLSCHLEGER AND TH. FRANK. GypsumBoard in Fire – Modeling and ExperimentalValidation. *EmpaSwissFederalLaboratoriesforMaterialsTesting and Research CH-8600 Duebendorf, Switzerland*. **Received June 23, 2006**, 16. Dostupné z: doi:10.1177/0734904107072883
- [13] BAUX, C., Y. MÉLINGE, C. LANOS a R. JAUBERTHIE. EnhancedGypsumPanelsforFireProtection. *JournalofMaterials in Civil Engineering*. 01 March 2017.n. 1., **January 2008**, 30. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:1(71)

- [14] GORBETT, Gregory E, Brian J MEACHAM, Christopher B WOOD a Nicholas A DEMBSEY. Use of damage in fire investigation: a review of fire patterns analysis, research and future direction. *Fire Science Reviews*. 2015, 35. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-015-0008-4
- [15] CHU NGUONG a NGU. *Calcination of Gypsum Plasterboard under Fire Exposure: Fire Engineering Research Report 04/6*. May 2004. Dissertation. Department of Civil Engineering University of Canterbury. Vedoucí práce Associate Professor Andy Buchanan and Hans Gerlich.
- [16] T. CRAFT, B. ISGOR a J. R. MEHAFFEY. Predicting the thermal response of gypsum boards subjected to a constant heat flux. *FIRE AND MATERIALS* [online]. Ottawa: Wiley InterScience, Published online 17 March 2008, **2008** [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: doi:10.1002/fam.971
- [17] BWALYA, A. C.; SULTAN, M. A.; THOMAS, J. R. Impact of board orientation on the fire performance of regular gypsum board walls. *Fire and Materials [Proceedings]*, pp. 1-10, 2007-01-31 [online]. National Research Council of Canada Ottawa, Canada [cit. 2023-02-13].