



KONFERENCE OCELOVÉ KONSTRUKCE



Pořádáno pod záštitou prof. Ing. Jiřího Máci, CSc., děkana Fakulty stavební ČVUT v Praze, prof. Ing. Rostislava Drochytky, CSc. MBA, dr. h. c., děkana Fakulty VUT v Brně a prof. Ing. Roberta Čepa, Ph.D., děkana Fakulty strojní VŠB – Technické univerzity Ostrava

ELEKTRONICKÝ SBORNÍK

Hotel Termal Mušov, Pasohlávky, 21. 5. 2024

ODBORNÝ GARANT



HLAVNÍ PARTNEŘI

metrostav DIZ

metrostav TBR

ZÁŠTITA



POŘADATEL



MEDIÁLNÍ PARTNEŘI



OBSAH ELEKTRONICKÉHO SBORNÍKU

<u>Honba za zelenou ocelí – příležitost nebo hrozba?</u> <i>Filip Hájek</i>	3
<u>Pasivní požární ochrana oceli při požáru – typy, nové možnosti</u> <i>Jakub Šejna, Kamila Cábová, František Wald</i>	7
<u>Částečná ochrana oceli při požáru, tzv. COATBACK – možnost pro membránové působení</u> <i>Jakub Šejna, Patrik Dobrovolný, František Wald</i>	17
<u>Shrnutí normy EN 1993-1-14 pro navrhování s využitím MKP</u> <i>Michal Jandera, Aleš Chovanec</i>	27
<u>Nový přístup k návrhu ocelových přípojí s podporou umělé inteligence (AI)</u> <i>Šimon Racek</i>	37
<u>Inteligentní dusíko-methanolová vstřikovací tryska pro nauhličování a kalicí atmosféry</u> <i>Juda Čížkovský, Maximus Akuh, Tim Nitsch, Guido Plicht, Felix Steinbach</i>	46
<u>Roznos lokálního zatížení přes skladbu tepelné izolace na plochých střechách s trapézovými plechy</u> <i>Michal Strejček, Michal Jandera</i>	54
<u>Včasné varování při nebezpečí rezonance mostu</u> <i>Stanislav Vejvoda</i>	64
<u>Inzerce</u>	71

HONBA ZA ZELENOU OCELÍ – PŘÍLEŽITOST NEBO HROZBA?

Filip Hájek
Ocelářská unie a.s.
filip.hajek@ocelarskaunie.cz

Úvod

Zelená dohoda pro Evropu (*European Green Deal*, dále jen „EGD“) znamená pro ocelářské firmy v EU především potřebu zásadního a velmi rychlého přechodu na ekologickou výrobu. Pod hlavičkou jednotlivých cílů a oblastí EGD neustále vzniká velké množství nových a revidovaných legislativních nástrojů a požadavků, které budou významně – přímo i nepřímo – dopadat na celý průmysl, a to jak finančně, tak i administrativně. Evropští oceláři se sice zavázali k maximálnímu příspěvku k dosažení klimatické neutrality v roce 2050, nicméně k tomu potřebují zajistit podmínky, které často nejsou v jejich rukách. Mnohé z nich stále nejsou naplněny, zatímco požadavky a pravidla evropských předpisů jsou časově nekompromisní. Každé zdržení v zelené transformaci může pro firmy znamenat zvýšení nákladů a riziko ztráty konkurenceschopnosti. Ta však není stoprocentně zajištěna ani v případě, že firma do ekologizace investuje. Zelené ambice třetích zemí, resp. jejich reálné naplňování, je zatím nesrovnatelné a EU si stanovení cílů a cesty k jejich dosažení mnohdy sama komplikuje zbytečnými požadavky, které jsou nezřídka odtržené od reality. Průmysl tak volá po Evropské průmyslové dohodě (*European Industrial Deal*), která by stála po boku EGD, a která by zajistila potřebné podmínky pro jeho úspěšnou transformaci a navýšila jeho ochranu adekvátně s rostoucími environmentálními ambicemi.

Ocelářství (a těžký zpracovatelský průmysl obecně) bude v následujících letech a desetiletích čelit výzvám v souvislosti s několika cíli EGD. Jde především o 55% cíl snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030 (balíček legislativy „Fit For 55“), dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050, zajištění dodávek čisté, dostupné a bezpečné energie, přechod na cirkulární ekonomiku či „nulové“ znečištění životního prostředí bez toxických látek.

Jednoznačně největší výzvou pro oceláře bude dekarbonizace. Technologické možnosti, které by umožnily významné snížení produkce emisí CO₂ v odvětví, jsou stále velice omezené. Vysoké emise jsou však při rostoucích cenách emisních povolenek (dnes okolo 70-80 eur, předpoklad dlouhodobého růstu) pro firmy ekonomicky a konkurenčně neudržitelné, a tak je třeba urgentně hledat všemožné způsoby, jak dosáhnou jejich maximální redukce. S navýšenou klimatickou ambicí se totiž množství dostupných povolenek v evropském systému emisního obchodování (EU ETS) úměrně sníží a tím vzroste jejich cena. Současně dojde k úbytku bezplatné alokace povolenek, jakožto nástroje k ochraně globální konkurenceschopnosti evropských výrobců. Ten ale postupně nahradí nový systém uhlíkového zpoplatnění vybraných dovážených výrobků na hranicích EU (CBAM). Evropští výrobci tak postupně budou platit vysoké ceny za veškeré vypuštěné emise, zatímco CBAM má mnoho nedostatků, díky kterým nedokáže roli bezplatné alokace nahradit. Je v něm např. opomenuta ochrana exportu z EU a navíc zde existují možnosti obcházení ze strany dovozců a výrobců ze třetích zemí.

Několik evropských hutí při svých dekarbonizačních snahách přistupuje k revoluční změně v podobě přímé redukce vodíkem, a to i přesto, že je to do velké míry sázka na nejistotu – dostupnost vodíku a funkčnost technologie v průmyslovém měřítku je stále nejistá. Právě tento způsob výroby oceli je však v EU považován za spásný, resp. cílový. Aby k němu byla motivace, nově např. dochází v systému emisního obchodování k jeho postavení vedle klasické cesty výroby skrze vysoké pece a kyslíkové konvertory, která tak se svými nesrovnatelně vyššími emisemi dozajista ztrácí svou budoucnost. Vodíková výroba v Evropě ale nebude z objektivních důvodů dostupná a použitelná všude. Mnoho hutí přejde na výrobu ze šrotu v elektrických obloukových pecích, kdy emise jsou v porovnání s klasickou

cestou výroby z rud cca pětínové. U obou těchto hlavních výrobních cest však může odvětví narazit na velký problém, kterým je fyzická a cenová dostupnost elektrické energie.

Už dnes ocelářství spadá mezi energeticky nejnáročnější průmyslová odvětví. Jeho dekarbonizace bude, podobně jako u jiných sektorů, znamenat masívní elektrifikaci, ať už půjde o výrobu ze šrotu nebo výrobu za pomoci vodíku (zde může být spotřeba elektřiny takřka desetinásobná). Dostupnost dostatečného množství čisté elektřiny v konstantních objemech a za konkurenceschopnou cenu je tak zcela zásadním předpokladem úspěchu. EU má však stále nejdražší energie a situace zatím nesměruje k významně lepším zítřkům. Navíc se zbavuje významných energetických zdrojů, které hodlá nahradit ekologičtějšími. Budoucnost má tvořit zemní plyn, který byl ale uznán pouze jako přechodné palivo, dále udržitelná biopaliva, jaderná energie a zejména nespalovací obnovitelné zdroje energie (OZE), které bezpochyby čeká maximální finanční podpora a rozvoj. Konec uhlí je neodvratný a členské státy si pro něj určují roky v blízkém časovém horizontu. Trend závazků k postupnému odklonu od fosilních paliv se již šíří globálně, viz např. dohoda na loňské světové klimatické konferenci OSN. Otázkou je, zda však v Evropě najdeme za uhlí adekvátní náhradu, co se týče objemu vyrobené energie a možnosti konstantních dodávek v čase, zvláště pokud přihlídneme k předpokládané rostoucí spotřebě elektrické energie. Je zřejmé, že zvýšená poptávka jednotlivých ekonomických sektorů po čisté elektřině, povede k nelítostnému boji o tuto komoditu. Její dopředné zajištění je ve vlastním zájmu firem, ale také na něj tlačí samotná legislativa. Např. v revidované směrnici o OZE vznikly cíle povinného navyšování podílu OZE ve spotřebě energií v průmyslu, včetně např. cíle pro minimální podíl OZE na výrobě vodíku spotřebovaném v průmyslu. Zajištění a prokazování spotřeby energie z OZE často probíhá skrze záruky původu, EU však tlačí na využívání dlouhodobých smluv o nákupu čisté elektřiny (PPAs). Nové a extrémně ambiciózní cíle v oblasti úspor energie zase vedou ČR k úvahám o zavedení povinných úspor pro průmyslové podniky (dnes je vše založeno na dobrovolných dohodách). EU spatřuje energetickou, průmyslovou i dopravní budoucnost EU v „zeleném vodíku“. Činí tak potřebné legislativní i praktické kroky pro jeho výrobu, distribuci a spotřebu.

Směr a intenzitu dekarbonizace bude dozajista určovat i nastavení klimatického cíle pro rok 2040, které je nyní předmětem diskuse členských zemí. Pokud by prošel návrh Komise (90% cíl snížení emisí oproti roku 1990), znamenalo by to podle jejích propočtů nutnou dekarbonizaci průmyslu *de facto* o deset let dříve. To je z pohledu průmyslu nerealistické. Nejsou pro to naplněny potřebné předpoklady, navíc tento cíl předpokládá velmi rychlý a masívní rozvoj technologií geologického ukládání či využívání CO₂ (technologie CCS/U), které mají být právě pro obtížně dekarbonizovatelný průmysl významným řešením. Podobně jako u jiných evropských cílů a vizí, i zde je opomíjeno časové i finanční hledisko rozsáhlejší aplikace těchto technologií. Nejsou známa úložiště CO₂, není připravena infrastruktura, technologie jsou extrémně drahé.

Pod EGD se také nově se zavádí paralelní systém EU ETS 2, který zpoplatní emise ze spalování zejména fosilních paliv v silniční dopravě, ve vytápění budov, ale také v průmyslu (mimo emisí již pokrytých EU ETS). Poprvé dojde ke zpoplatnění v roce 2028 za emise roku 2027. Ačkoliv se povinnost vyřazování povolenek bude vztahovat na dodavatele paliv, bude to pro spotřebitele paliv znamenat další administrativní (vykazování je povinné již za letošní rok) i finanční zátěž (ověřování a zejména promítnutí nákladů za emise do ceny paliva).

Jak je uvedeno výše, mnohé evropské hutě se v rámci svých dekarbonizačních snah vydají cestou přechodu na elektrické obloukové pece. Kromě elektřiny tak bude třeba zajistit dostatečné množství ocelového šrotu. Ten se však z EU dlouhodobě a ve velkém vyváží (cca 20 mil. tun ročně, drtivá většina do Turecka). Ačkoliv EU o potřebě zajištění šrotu pro ocelářství dobře ví a měla možnost vývoz této strategické suroviny novou legislativou omezit, nestalo se tak. Šrot nakonec nebyl zařazen na seznam strategických surovin ani nebyla dostatečně posílena ochrana před jeho exportem z EU do zemí, které mají nesrovnatelné environmentální a sociální ambice a přístupy. Zajištění dostatku šrotu je tak jednou z dalších externích

podmínek dekarbonizace odvětví, která zatím nebyla naplněna, zatímco se tlak na ekologizaci průmyslu permanentně zvyšuje.

Dekarbonizace však není jedinou výzvou a požadavkem EGD směrem k průmyslu. Např. čerstvě revidovaná směrnice o průmyslových emisích povede k zavedení velmi přísných emisních (a nově i některých spotřebních) limitů pro jednotlivá zařízení v rámci jejich integrovaných povolení. Vyvolá se tak i tlak na technologické změny, zejména pokud se do revidovaného referenčního dokumentu o nejlepších dostupných technikách (tzv. BREF) pro výrobu železa a oceli, která je plánována na rok 2026, zařadí např. právě vodíková redukce. Na ocelářství pravděpodobně dopadnou i nově nastavené emisní limity (v rámci revidované Směrnice o kvalitě vnějšího ovzduší), které se pod hlavičkou EGD mají postupně dostat na úroveň limitů nepoškozujících lidské zdraví dle WHO. Stát může při překročení nových standardů kvality životního prostředí v dané oblasti přistoupit k omezení průmyslové činnosti. Rovněž bude docházet k intenzivnějšímu omezování a zavádění zákazů používání některých rizikových chemických látek.

EGD také posiluje trh s udržitelnými výrobky. Pro ocelové (a další) výrobky, resp. výrobové kategorie budou podle nového nařízení o ekodesignu udržitelných výrobků (ESPR) vytvořena tzv. kritéria udržitelnosti. Bez jejich splnění by výrobek neměl být vpuštěn na evropský trh, ať už je vyroben v EU nebo mimo ni. Pokud tedy budou tato kritéria nastavena správně, a za předpokladu, že je evropská výroba ekologičtější než ve třetích zemích, pro výrobce v EU to může být konkurenční příležitost. Rizikem je však nárůst administrativy. Další požadavkem ESPR totiž je, aby byl každý výrobek opatřen tzv. digitálním pasem produktu, který by měl podávat informace o celém životním cyklu daného výrobku a jeho vlivu na životní prostředí. Cílem je porovnatelnost dopadů produktu v tomto ohledu a lepší možnost článků odběratelského řetězce rozhodnout se pro ekologičtější produkt. Evropské firmy si tak budou muset obstarat obrovské množství informací, zejména od dodavatelů svých vstupů. To může být značně komplikované.

Oceláři v EU také čelí nepřímému tlaku na ekologizaci výroby prostřednictvím evropské taxonomie udržitelných investic, která určuje kvalitativní a kvantitativní kritéria u jednotlivých ekonomických činností (vč. výroby oceli). Při jejich splnění lze tyto činnosti oficiálně považovat za udržitelné, resp. zelené, a projekty tak mají významně větší šanci na získání finančních prostředků např. ze strany bank nebo z pohledu státní podpory. Zdá se však, že se podpora z evropských peněz stává – ve srovnání s poskytováním podpory v jiných částech světa – mnohdy hůře dosažitelnou, a to vzhledem k nepřebernému množství nastavených podmínek, které jsou často zcela zbytečné a brzdí tak realizaci nadějných projektů. Plnění taxonomních kritérií se promítne i do reportingových povinností v rámci moderního konceptu ESG (*environmental, social, governance*), který má odhalit přístup jednotlivých evropských firem zejména k životnímu prostředí a sociálním otázkám. Směrnice CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*), v tomto ohledu stanovuje povinný a pravidelný nefinanční reporting firem různých velikostí podle speciálních standardů. Půjde tedy o další významnou administrativní zátěž.

Závěr

Evropský průmysl, včetně ocelářství, zažije v souvislosti s EGD v následujících letech patrně nejtěžší zatěžkávací zkoušku ve své historii, která může skončit dobrým, ale i velice špatným výsledkem. Na dobrý výsledek máme teoreticky šanci zejména tehdy, pokud se svět urychleně vydá stejným směrem a se stejnou razancí při stanovování a plnění environmentálních cílů jako EU. Pak by mohly místní firmy, při splnění dalších podmínek, začít těžit ze svého dřívějšího pokroku a know-how. Do tohoto stavu je však daleko a je otázkou, zda současné přístupy EU se všemi jejími dopady inspirují i další globální hráče tak, jak si to přeje minimálně Evropská komise. V jejích očích a z pohledu mnohých evropských států je EGD viděna nejen jako přínos ke zlepšení životního prostředí, ale i jako prostředek k posílení

konkurenceschopnosti evropské ekonomiky. Přestože evropský průmysl uznal potřebu zeleného směřování EU, EGD je v jeho očích zatím rovnítkem rapidně zvýšených finančních a administrativních nákladů, systémem nekonečných a často nerealistických (technicky i časově) či zbytečných požadavků a podmínek, bez vidiny dostatečných snah a naplňování podobných cílů ve třetích zemích. Problémem jsou k tomu zejména vysoké ceny energií a nejistota zajištění jejich dodávek do budoucna. Zásadní komplikací je nedostatečná ochrana konkurenceschopnosti, jejíž míra nekoresponduje s ambicemi E, které permanentně narůstají. Neustálá tvorba nové a revidované legislativy a požadavků navíc spíše přispívá k nejistotě firem i investorů. V uplynulých letech došlo v EU k uzavření mnoha průmyslových podniků či k přesouvání výroby mimo její hranice. Bezpochyby k tomu přispěla i EGD, resp. způsob jejího uchopení.

EU si tak musí rozmyslet, zda bude vnímat ocelářství jako odvětví, které má šanci významně přispět k dekarbonizaci Evropy (jak pokračováním ekologizace výrobních postupů, tak i samotnou ocelí, která je součástí mnoha klimatických opatření) anebo jako odvětví, které v ní nemá místo a bude lepší se spolehnout na dovoz zpoza jejích hranic, se všemi ekonomickými, sociálními i ekologickými důsledky. V prvním případě, který je zatím Bruselem všude prezentován, je ale potřeba daleko více a velmi urychleně zapracovat na podmínkách, které konkurenceschopnost a setrvání místních ocelářů zajistí. Dvakrát dražší ocel se totiž bude ve světě prodávat velmi těžko, byť bude mít označení „zelená“.

PASIVNÍ POŽÁRNÍ OCHRANA OCELI PŘI POŽÁRU – TYPY, NOVÉ MOŽNOSTI

Ing. Jakub Šejna¹, doc. Ing. Kamila Cáblová, Ph.D.², prof. Ing. František Wald, CSc.³

¹ Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

² Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

³ Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

¹jakub.sejna@fsv.cvut.cz, ²kamila.cabova@fsv.cvut.cz, ³frantisek.wald@cvut.cz

Abstrakt

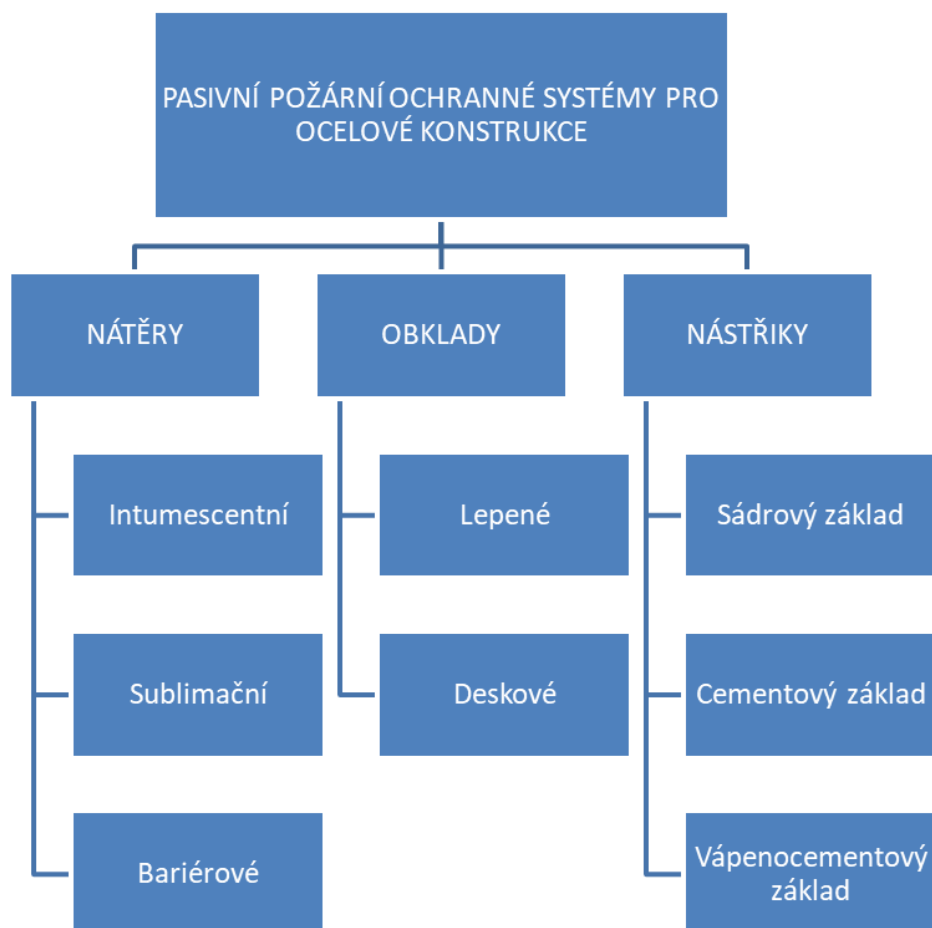
Pasivní požární ochrana ocelových konstrukcí umožňuje ekonomické zajištění bezpečnosti staveb v případě požáru. Příspěvek se zaměřuje na metody a materiály pro pasivní požární ochranu. Jsou představeny nové materiály pro pasivní ochranu v oblasti hybridních cementů. Jejich aplikace ve formě lehkých malt nabízí vyšší požární odolnost a ekologický návrh. Příspěvek se zaměřil na inovativní využití dřevěných obkladů jako vhodné alternativy k tradičním materiálům z hlediska udržitelnosti a požární bezpečnosti. Experimenty prezentované v článku potvrzují účinnost zpomalení přenosu tepla a zvýšení požární odolnosti ocelové konstrukce. Výsledky dokládají rozhodující pečlivý výběr a aplikaci pasivního systému v závislosti na specifickém prostředí a požadavcích na bezpečnost.

Úvod

V oblasti pasivní požární ochrany ocelových konstrukcí se využívá řada metod a materiálů. Nejběžnější metody zahrnují ochranu prvků konstrukce ochrannými nátěry, nástřiky nebo obkladů, viz obr.1. Pasivní požární ochraně ocelových konstrukcí se v poslední době věnuje řada prací. Například intumescentními nátěry se zabýval Lucherini [1], který udělal i komplexní shrnutí dané problematiky [2]. Otázkou reaktivních nátěrů je jejich životnost a obnovování, které bývá problematické. V průmyslovém prostředí, kde není kladen velký důraz na estetiku pasivní ochrany je přistupováno k volbě nástřiků, a to na bázi cementu, sádry a dalších pojiv. V současné době je kladen zvýšený nárok na ekologii návrhu a v případě požárních nástřiků je žádoucí využívání základ například tzv. hybridních cementů, který je z hlediska emisí CO₂ příznivější než běžný portlandský cement nebo sádra [3], [4]. Oblastí vývoje hybridních cementů pro požární nástřiků se zabývá například Šulc [5] a Šejna [6], kteří navazují na předchozí výzkumy [7], [8], [9].

Moderní technologie umožňují využití dřeva ve formě požárně pasivního řešení ochrany oceli pomocí obkladů ocelových konstrukcí. Dřevěné obklady mají zápornou uhlíkovou stopu, a mají minimální dopad na životní prostředí během svého životního cyklu [10], [11], [12]. Jednou z největších nevýhod dřeva z hlediska požární bezpečnosti staveb je jeho hořlavost. Dřevo může být snadno zapáleno, což může představovat nebezpečí pro bezpečnost osob v budově nebo způsobit škody na majetku.

V kontextu pasivních požárních ochrany je důležité zahrnout změnu hmotnosti během požáru, která se vyskytuje u materiálů, které se rozkládají, obsahují vodu nebo zvětšují svůj objem. Při výběru a aplikaci pasivní požární ochrany se konkrétní řešení volí na základě analýzy prostoru aplikace. Je důležité zohlednit agresivitu prostředí, vlhkost, možnost obnovování ochranných vrstev. Agresivní prostředí v oblasti pod obkladem, nátěrem či nástřikem může vést ke korozi chráněných prvků a tím snižovat jejich životnost. Proto je důležité chráněný prvek důkladně ošetřit protikorozním nátěrem před instalací ochranných vrstev. Stejný vliv agresivního prostředí ale může mít i negativní vliv na ochrannou vrstvu, kdy může dojít k poškození povrchu, rozložení desek, nebo selhání adheze ochranného nástřiku k povrchu. Je vhodné u obkladů například volit vícevrstvé varianty, u nátěrů a nástřiků se věnovat ochraně oceli proti agresivnímu prostředí. Níže rozšířená diskuse o využití ochranných vrstev využívající poznatky z výzkumu hybridních cementů nebo možnosti využití dřeva jako pasivní požární ochrany ukazuje nové možnosti při ochraně ocelových konstrukcí před požárem.



Obr. 1: Dělení požární pasivní ochrany ocelových konstrukcí

1 Hybridní cementy pro požární nástřiky

Možnost použití alternativních cementů a různých variant rozptýlené výztuže byla zkoumána ve výzkumu Jogla a kol. [13], [14], [15] kde bylo zkoumáno použití šamotového písku nebo jiných izolačních plniv pro vývoj žárobetonu. Faktory, které ovlivňují zpracovatelnost směsí, byly zkoumány z hlediska objemu vody potřebného k promíchání s použitými izolačními plnivými nebo cementy. Poznatky získané z postupných zkoušek vzorků z hlediska mechanických vlastností a požární odolnosti byly využity při návrhu ochranné vrstvy z hybridního alkalicky aktivovaného cementu s lehkým plnivem pro zvýšení požární odolnosti.

Předběžné výsledky [4] prokázaly vyšší odolnost lehčených malt vyrobených z alkalicky aktivovaného cementu ve srovnání s maltami vyrobenými z ekvivalentního sádrového pojiva nebo hlinitanových cementů. Pilotní zkoušky pro větší experiment byly provedeny na laboratorním hořáku [5] a následně i ve středně rozměrové peci [6]. Alkalicky aktivované cementy přinášejí výhodu v obecně nižším obsahu chemicky vázané vody v reakčních produktech, proto by vystavení požáru mělo být méně škodlivé než u běžných materiálů [16]. V tomto článku je testován hybridní cement nazvaný H-cement, který je složen z 20 % portlandského slínku, popílku a granulované vysokopecní strusky aktivované síranem sodným. Výroba H-cementu snižuje emise CO₂ o 80 % ve srovnání s výrobou OPC [9], [17].

Při vysokých teplotách vykazuje H-cement vlastnosti podobné keramice. Při zahřívání H-cementu na vysoké teploty dochází při teplotách nad 800 °C k přechodu tavicích fází krystalického hlinitokřemičitanu do keramické formy, takže nedochází k výraznému rozvoji trhlin. Konstrukce ochranné betonové vrstvy H-cementu nad ocelovým prvkem využívá výhody nízkého přestupu tepla. Tepelná vodivost H-cementové betonové vrstvy s použitím expandovaného perlitu jako plniva se pohybuje v rozmezí 0,1–0,3 W/(m·K) [4], pro ochranou

vrstvu prezentovanou v tomto článku o objemové hustotě 487 kg/m^3 byla určena tepelná vodivost $0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [6].

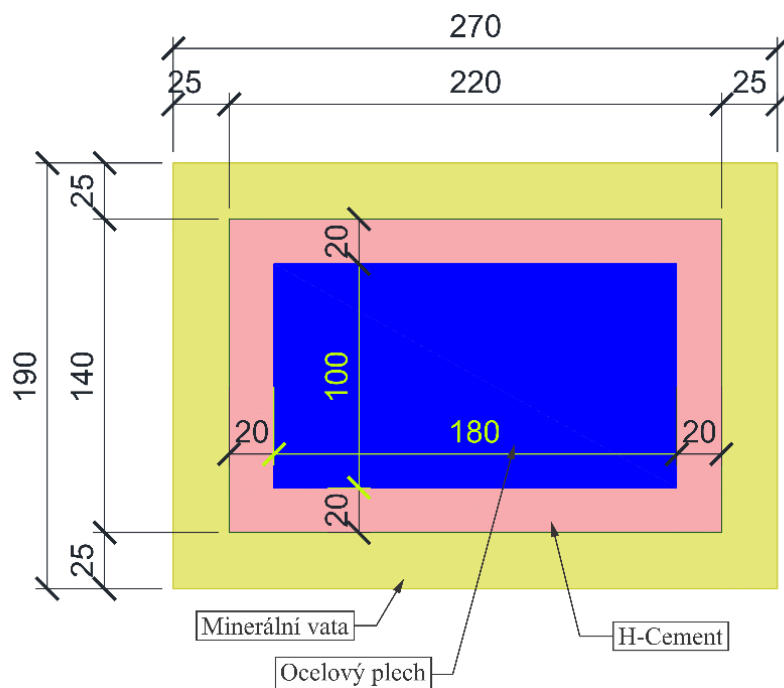
Z hlediska udržitelnosti budov a snižování emisí CO_2 se alkalicky aktivované cementy jeví jako vynikající možnost. Alkalicky aktivované cementy lze například vyrábět s využitím recyklovaného betonu. Hydratované hybridní cementy (H-cementy) mají specifické vlastnosti, které jiné cementové materiály postrádají. Předpokládá se, že H-cementy mají vysokou úroveň přilnavosti k očištěnému ocelovému povrchu, což znamená, že příprava podkladu pro stavbu může být stejná jako u nátěrů a nástřiků. Přilnavostí H-cementu se zabýval detailněji Šejna [18]. Mezi významné užité vlastnosti hybridního cementu patří pucolánová reakce popílku, latentní hydraulická reakce strusky a alkalická aktivace anorganického geopolymery. Nízké konečné ceny H-cementu je dosaženo použitím nízkého hmotnostního podílu portlandského slínku. H-cement také obsahuje nízké procento SiO_2 , CaO , SO_3 a Na_2O [9].

1.1 Vlastnosti a funkčnost pasivní ochrany z H-cementu

Receptura byla stanovena s poměrem vody a pojiva (w/b) 0,77 a bylo zvoleno plastifikátor Stachement 508. Zvýšení hodnot vodních součinitelů směsi je způsobeno použitím expandovaného perlitu jako porézního materiálu. Při citlivém míchání a při nalezení správné konzistence směsi, která zabránila rozdrčení expandovaného perlitu, bylo dosaženo objemové hmotnosti 587 kg/m^3 ve vlhkém stavu. Tato sypaná hustota za mokra byla podobná sypané hustotě průmyslové požární omítky.

Na základě zkušeností z předchozích zkoušek [15] bylo pro míchání cementové pasty použito míchacího stroje a požadované množství expandovaného perlitu bylo do pasty s vysokou citlivostí vmícháno ručně. Receptura lehké H-cementové malty s expandovaným perlitem je uvedena v [6].

Pro experiment a zjištění, zda vrstva H-cementu chráněná expandovaným perlitem může chránit ocelové konstrukce při zvýšených teplotách, byly vybrány vzorky ocelové desky o rozměrech $180 \times 100 \times 12 \text{ mm}$ chráněné vrstvou H-cementové malty; viz obr.2. Rozměry byly stanoveny na základě potřeby umístit čtyři vzorky do malé pece během jedné zkoušky. Případný olejový nátěr ocelového plechu byl odstraněn, nebyl opatřen adhezním můstkem naneseným barvou. Pro zvýšení přilnavosti ochranných vrstev k ocelovému plechu byl povrch pokryt pastou z H-cementu o tloušťce menší než 1 mm. Před vyplněním byla každá forma naolejována odbedňovací emulzí, přičemž byl kladen zvýšený důraz na zachování čistoty povrchu ocelových prvků pro ideální přilnavost ochranné vrstvy k ocelovému plechu. Pro účely požárního experimentu pak byly vzorky izolovány minerální vlnou, aby se prosadila 1D tepelná vodivost. Stav vzorku před experimentem a po experimentu, kdy bylo dosaženo v peci teplot přes 790°C je znázorněn na obr.3.

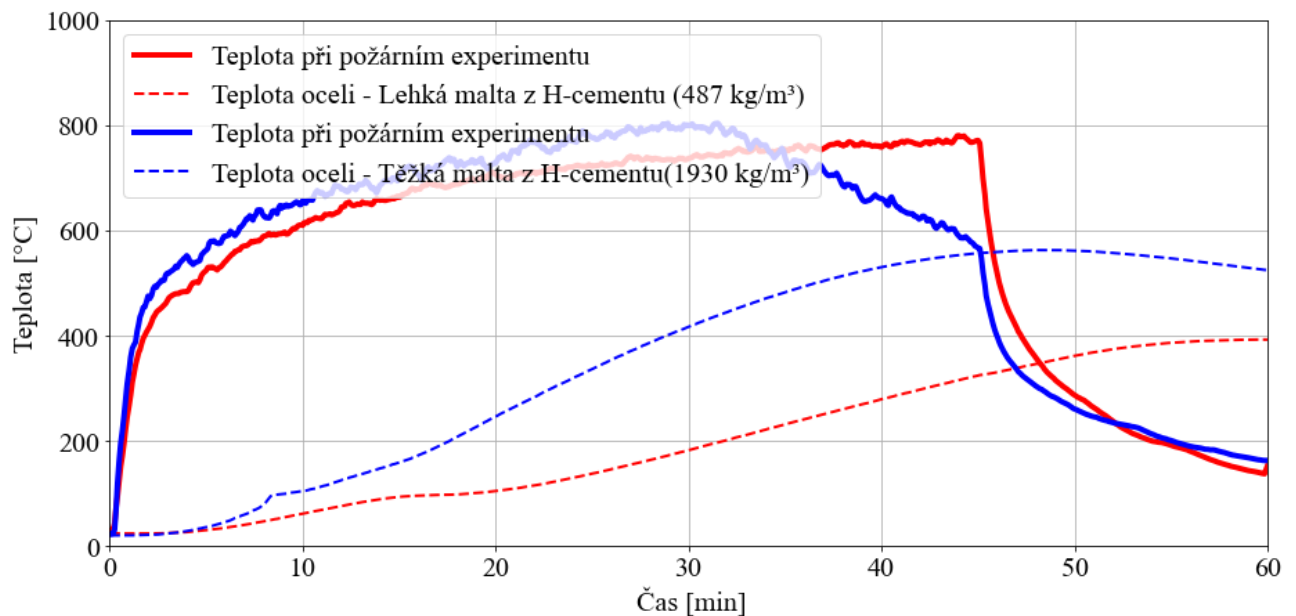


Obr. 2: Rozměry vzorku



Obr.3: Vzorek před experimentem (vlevo) a po experimentu se znatelným přechodem do keramické fáze (vpravo)

Experimenty navazovaly na výsledky a metody již provedených dílčích experimentů v malém měřítku [5], [6]. Zjištění týkající se možného využití pasivní ochrany byla shrnuta v úvodu. Experimenty trvaly 45 min pro zahřátí a 15 min pro ochlazení. Naměřené teploty při požárních experimentech jsou uvedeny na obr.4a jsou zároveň srovnány s funkčností ochranné vrstvy hutné malty z H-cementu.



Obr.4: Průběhy teplot při požárním experimentu a teploty chráněné oceli s pasivní ochranou vrstvou z H-cementu

2 Dřevěný obklad jako požární ochrana

Materiály na bázi dřeva zažívají v posledních desetiletích renesanci díky svým ekologickým výhodám a snaze o udržitelný rozvoj s nižšími energetickými nároky a menším znečištěním. Dřevo se při působení ohně chová mimořádně. Ohořelá část vytváří vrstvu, která izoluje pevné materiály pod ní a může poskytovat požární ochranu ocelovým prvkům s dřevěnými deskami nebo těžkým dřevem.

Nevýhodou tohoto řešení je přidání hořlavého materiálu do požárního úseku. Zároveň ale z pohledu norem českého požárního kodexu v případě použití hořlavého materiálu pro zvýšení požární odolnosti ocelových prvků je nutné klasifikovat celou konstrukci jako hořlavou. Je třeba požárně inženýrským přístupem prokázat, že z hlediska mechanického chování konstrukce nemá obklad výrazný vliv. Přidání hořlavého materiálu jako pasivní ochrany dále více komplikuje předvídání teploty v požárním úseku, protože protipožární materiál je sám o sobě doplňkovým zdrojem požáru. V současné době se hoření a zuhelnatění dřeva předpovídá pomocí normativních přístupů [19] které často používají konstantní rychlost zuhelnatění v čase, nebo lineárních a nelineárních rovnic, které zohledňují vlhkost nebo hustotu dřeva [20], přes pravděpodobnostní modely vývoje rychlosti zuhelnatění až po pokročilé numerické modely [21]. Konzervativní lineární analytický vztah (např. rychlost zuhelnatění dána EN 1995-1-2) při návrhu vychází z ohřevu standardní požární křivky. Přesněji lze vlastnosti konstrukcí s protipožární ochranou dřeva vyhodnotit pomocí počítačového modelování zahrnujícího několik oblastí výzkumu - tj. multifyzikálního modelování.

Izolační schopnost dřeva pro ocelové konstrukce vystavené požáru byla poprvé prokázána v roce 1974. Twilt a Witteveen [22] prokázali, že desky z jehličnatého dřeva o tloušťce 35 mm mohou zajistit požární odolnost po dobu 60 min pro ocelový profil se součinitelem průřezu A/V 100 m^{-1} . Použití dřeva jako alternativního protipožárního materiálu bylo nedávno popsáno v [23], [24]. Ocelové profily byly částečně nebo zcela zapouzdřeny do dřevěných prutů. Tepelné chování bylo analyzováno pomocí numerické simulace a požární odolnost byla vypočtena pomocí analytické metody. Výsledky studie ukázaly, že ochrana dřeva vedla k nerovnoměrným tepelným podmínkám v ocelových nosnících. Výsledky rovněž ukázaly, že ochrana dřeva výrazně oddálila selhání ocelových prvků při požáru. Podobný výzkum tepelného chování požáru vystavených ocelových profilů vložených do dřevěných prvků byl popsán v [25]. Tento výzkum byl založen na výsledcích několika zkoušek svařovaných I nebo T ocelových profilů vystavených požáru ze tří nebo čtyř stran. Na základě teplot z požárních zkoušek byl porovnán a ověřen model přenosu tepla zahrnující chování oceli i dřeva z hlediska rychlosti ohřevu a zuhelnatění. Výsledky potvrdily schopnost požární izolace dřeva použitého k ochraně

konstrukční oceli. Možnosti zvýšení požární odolnosti ocelových konstrukcí při použití masivního dřevěného obkladu nebo obkladu z OSB desek byly rovněž zkoumány v [26].

2.1 Ověření funkčnosti dřevěného obkladu jako pasivní vrstvy

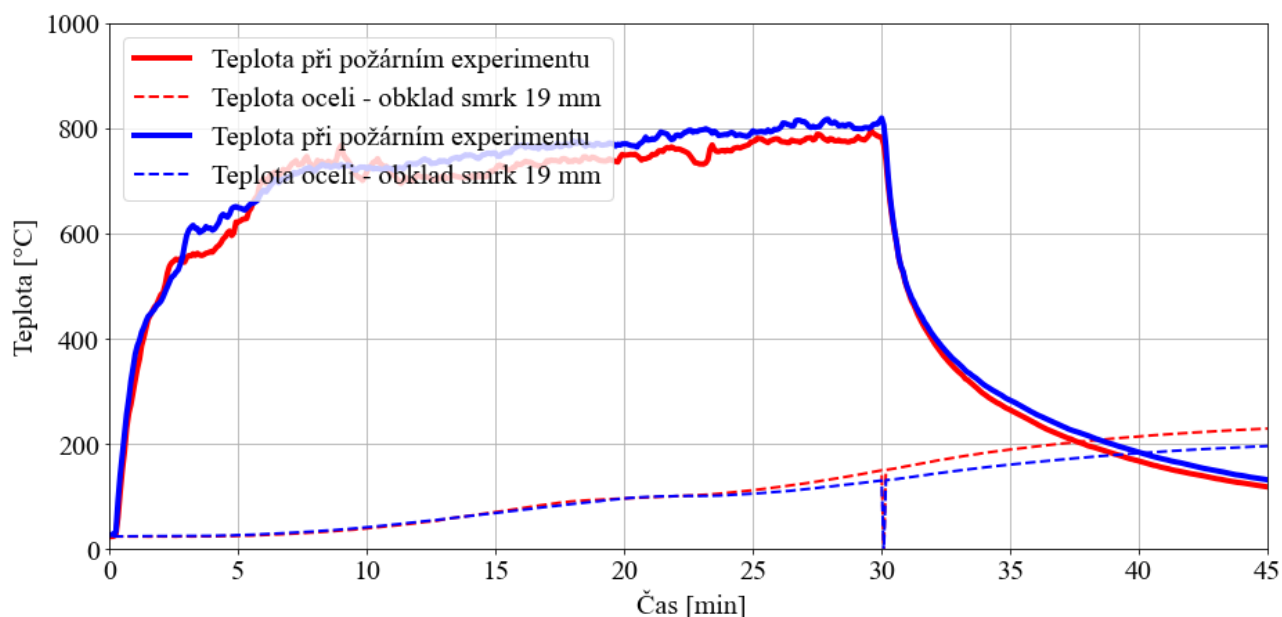
Proces zuhelnatění je přirozený proces hoření iniciovaný působením tepla (ohně) na dřevo, který vede k řadě chemických a fyzikálních přeměn. Při zahřívání dřevo nejprve prochází dehydratací, po níž následuje rozklad jeho přirozených složek, což vede ke vzniku inertních a hořlavých plynů, kapalného dehtu a anorganického popela. Obvykle tento proces rozkladu následuje po dehydrataci, i když je třeba poznamenat, že při vysokých rychlostech zahřívání nemusí být dehydratace úplná. Bylo však zjištěno, že pyrolýza probíhá rychleji u vysušených vzorků dřeva [27].

Vytvoření zuhelnatělé vrstvy na povrchu dřeva výrazně mění přenos tepla do vzorku dřeva a následně ovlivňuje jeho vlastnosti, zejména fyzikální vlastnosti, jako je hustota, tepelná vodivost, spojitost a soudržnost. Podle studií provedených se potvrzuje, že zuhelnatělá vrstva má vyšší obsah uhlíku než původní dřevo. V jejich experimentální analýze byl pozorován výrazný nárůst obsahu uhlíku, který se zvýšil o téměř 13 %, ze 47 % na 60 %. To odráží závislost obsahu uhlíku na zvyšující se teplotě vzorku. Experiment rovněž zkoumal obsah dusíku a kyslíku ve dřevě a odhalil výraznější snížení obsahu kyslíku ve srovnání s dusíkem. Současně s poklesem obsahu kyslíku mají buňky v mikrostruktuře dřeva tendenci se zmenšovat. Zpočátku se rozšiřují zrna, po nichž následuje zmenšení objemu buněk. Tato pozorování jsou v souladu s podobnými studiemi provedenými na jiných druzích dřeva.

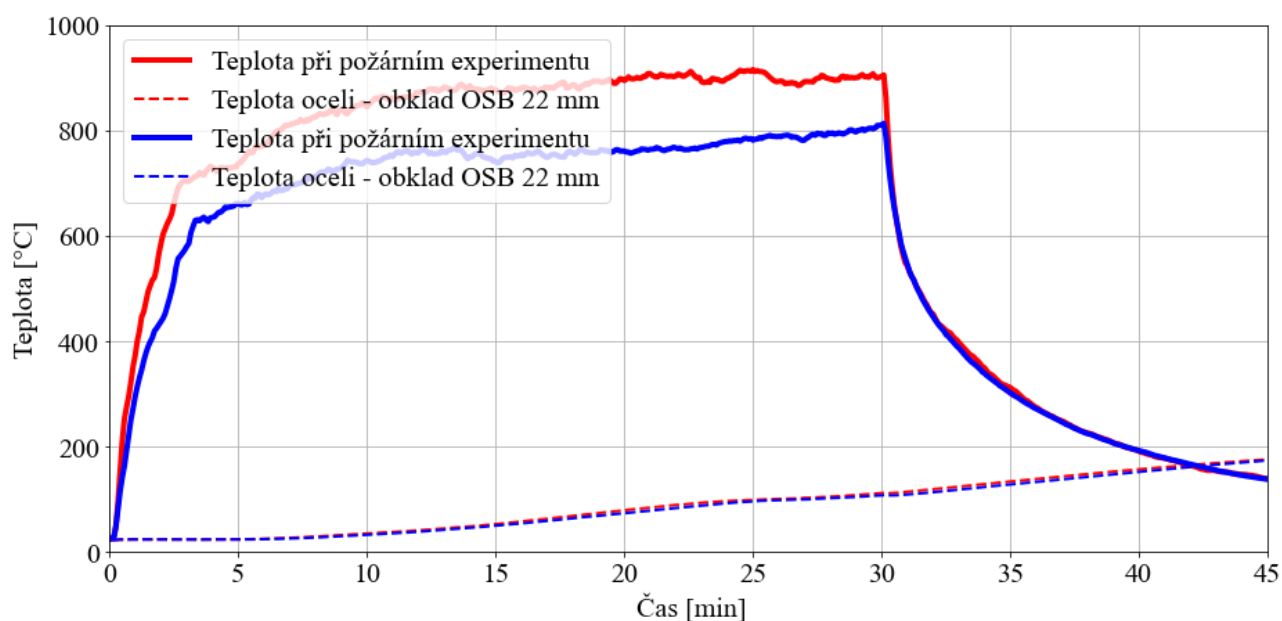
Hloubka zuhelnatění se určuje měřením vzdálenosti mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění, která se obvykle označuje jako izoterma 300 °C. Tuto hloubku lze vypočítat na základě délky působení ohně, což je rozhodující faktor pro určení pevnosti, protože zuhelnatělá vrstva má nulovou pevnost. Experimenty provedené [28] ukázaly, že hloubka zuhelnatění dřeva je větší ve vertikálním směru než v horizontálním směru zarovnaném s vlákny. Zároveň, že zuhelnatění není lineární v čase.

Pro ověření funkčnosti dřevěného obkladu jako pasivní požární ochranné vrstvy a vývoje rychlosti zuhelnatění dřevěného obkladu ocelových prvků byly připraveny experimenty ve středně rozměrové peci ve FireLab UCEEB na ČVUT v Praze. Zkušební pec byla shodná jako při experimentu s hybridním cementem, o velikosti 1200 × 800 × 1200 mm. Experimenty probíhaly po dobu 30 min. Vzorky následně chladly 15 min. Zkušební vzorky byly vyrobeny shodně s vzorky s H-cementem, jen byly chráněny dřevěným obkladem ze smrkového dřeva tloušťky 20 mm a OSB desky tloušťky 22 mm. Vzorky byly z bočních stran a pod stropem pece izolovány opět minerální vatou. Teploty byly měřeny plášťovými termočlánky na odvrácené straně ve středu ocelového plechu.

Ve zkušební peci byly pro každou zkoušku připraveny pod stropem čtyři vzorky. Po ukončení experimentu bylo uhašeno plamenné hoření povrchu vzorků. Průběhy teplot při experimentu a oceli jsou uvedeny na obr.5 a obr.6. Byly provedeny i navazující experimenty na velkorozměrové zkoušce s ocelovými nosníky SHS 100/6 chráněnými OSB obkladem [29], [30], aby byly ověřeny poznatky ze středně rozměrných experimentů [31].



Obr.5: Průběh teploty plynu a teploty ocelového prvku s ochranou vrstvou ze smrkového obkladu tloušťky 19 mm



Obr.6: Průběh teploty plynu a teploty ocelového prvku s ochranou vrstvou z OSB obkladu tloušťky 12 mm

Závěr

Byly provedeny experimenty s chováním požárně ochranné vrstvy s alkalicky aktivovaným cementem známým jako H-cement a obkladů z OSB a smrkového dřeva. Experimenty navazovaly na výsledky a metody již provedených dílčích experimentů v malém měřítku, při nichž byly zkoumány vlastnosti H-cementové malty, jako je přilnavost k ocelovým a betonovým povrchům, a použitelnost alkalicky aktivovaného cementu pro aplikace v požární ochraně. Z hlediska experimentů obkladem ze dřeva bylo zkoumán vývoj zuhelnatělé vrstvy a možnosti provedení obkladu s přenesením pro poznatků pro velkorozměrové experimenty. Zjištění týkající se možného využití pasivní ochrany byly shrnuty v článku v jednotlivých částech. Při

prováděných experimentech byly vzorky testovány v peci středního měřítka. Experimenty trvaly 45 min pro vrstvu z H-cementu, 30 min pro dřevěné vrstvy a 15 min pro ochlazení. Experimenty byly prováděny za účelem zjištění možné tepelné vodivosti ochranných vrstev z H-cementu.

Další práce v oblasti se zaměří se na chování pasivní ochranné vrstvy na velkorozměrových vzorcích, zejména namáhaných tlakem, aby se ochrana potvrdila a zabránilo se odtržení vrstvy od chráněného vzorku. Požární odolnost ocelového plechu s dřevěným obkladem tloušťky 20 mm se zvýší až o 20 min. Po vytvoření zuhelnatělé vrstvy o tloušťce asi 15 mm se rychlost zuhelnatění dřevěného opláštění výrazně zpomalí. Po 30 min experimentu při obkladu ze smrkového dřeva o tloušťce 20 mm nebo OSB 22 mm nepřesáhla teplota ocelových plechů 200 °C. Zuhelnatělá vrstva je křehká a pokud průběrná teplota obkladu překročí 800 °C odpadá. Na základě poznatků ze zkoušek v malé peci byly připraveny experimenty s ochranou ocelových prvků při velkorozměrových zkouškách na vodorovné peci a v Room Corner Test). Požární odolnost ocelového plechu s ochrannou vrstvou z H-cementu tloušťky 20 mm se zvýší až o 60 min.

Práce byly podpořeny grantem ČVUT SGS22/144/OHK1/3T/11 Bezpečnost a udržitelnost dřevěných a ocelových konstrukcí vystavených požáru (část dřevěných obkladů) a ČVUT SGS22/141/OHK1/3T/11 Progresivní přístupy k návrhu ocelových konstrukcí.

Použitá literatura

- [1] LUCHERINI, A., HIDALGO, J. P., TORERO, J. L., & MALUK, C. Numerical heat transfer model for swelling intumescent coatings during heating. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023, 184. ISSN 12900729. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2022.107922
- [2] LUCHERINI, A., & DE SILVA, D. Modelling intumescent coatings for the fire protection of structural systems: a review. In: *Journal of Structural Fire Engineering*. 2024. ISSN 2040-2317. doi:10.1108/JSFE-10-2023-0038
- [3] QU, B., MARTIN, A., PASTOR, J. Y., PALOMO, A., & FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Portland cement versus hybrid cement and geopolymers: performance at high temperatures. In: *14th International Congress on the Chemistry of Cement*. Beijing, 2015.
- [4] DAXNER, J. Use of hybrid cement in fire-resistant plasters. 2016, (882016), 1-8. doi:88 KHI/2016
- [5] ŠULC, S., ŠMILAUER, V., ŠEJNA, J., & WALD, F. FIRE PROTECTION OF STEEL ELEMENTS USING LIGHTWEIGHT HYBRID CEMENT MORTAR. In: *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2021, , pp. 104-108. ISSN 2336-5382. doi:10.14311/APP.2021.30.0104
- [6] ŠEJNA, J., ŠULC, S., ŠMILAUER, V., REITERMAN, P., & WALD, F. Application of hybrid cement in passive fire protection of steel structures. In: *Journal of Structural Fire Engineering*. 2023. ISSN 2040-2317. doi:10.1108/JSFE-01-2023-0007
- [7] PANIAS, D., BALOMENOS, E., & SAKKAS, K. The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. *Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes*. 2014, 423-461.
- [8] SUZUKI, M., SHAHIEN, M., SHINODA, K., & AKEDO, J. The Current Status of Environmental Barrier Coatings and Future Direction of Thermal Spray Process. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2022, 63(8), 1101-1111. ISSN 1345-9678. doi:10.2320/matertrans.MT-T2021003
- [9] MARTAUZ, P., JANOTKA, I., STRIGÁČ, J., & BAČUVČÍK, M. Fundamental properties of industrial hybrid cement: utilization in ready-mixed concretes and shrinkage-reducing applications. *Materiales de Construcción*. 2016, 2016(66322), 84.
- [10] DE ARAUJO, V. Timber construction as a multiple valuable sustainable alternative: main characteristics, challenge remarks and affirmative actions. *International Journal of Construction Management*. 2023, 23(8), 1334-1343. ISSN 1562-3599. doi:10.1080/15623599.2021.1969742
- [11] CUADRADO, J., ZUBIZARRETA, M., PELAZ, B., & MARCOS, I. Methodology to assess the environmental sustainability of timber structures. *Construction and Building Materials*. 2015, 86, 149-158. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.109

- [12] ZUBIZARRETA, M., CUADRADO, J., ORBE, A., & GARCÍA, H. Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study. *Environmental Impact Assessment Review*. 2019, 78. ISSN 01959255. doi:10.1016/j.eiar.2019.106286
- [13] JOGL, M., REITERMAN, P., HOLČAPEK, O., & KONVALINKA, P. Influence of metakaolin addition on fracture properties of refractory concretes reinforced with basalt fibres. *Cement Wapno Beton*. 2016, 2016(213), 140-148. ISSN 1425-8129.
- [14] JOGL, M., REITERMAN, P., HOLČAPEK, O., KOŤÁTKOVÁ, J., & KONVALINKA, P. Residual Properties of Fiber-Reinforced Refractory Composites with a Fireclay Filler. *Acta Polytechnica*. 2016, 56(1), 27-32. ISSN 1805-2363. doi:10.14311/APP.2016.56.0027
- [15] JOGL, M., REITERMAN, P., HOLČAPEK, O., KOŤÁTKOVÁ, J. Proposal of Fire Resistant Composites with Application of Lightweight Aggregate Liaver. *Advanced Materials Research*. 2014, 1054, 43-47. ISSN 1662-8985. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.43
- [16] SHI, C., KRIVENKO, P. V., ROY, D. M. Alkali-activated cements and concretes. New York, 2006. ISBN 978-041-5700-047.
- [17] HLAVÁČEK, P., ŠMILAUER, V., ŠKVÁRA, F., KOPECKÝ, L., ŠULC, R. Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015, 35(2), 703-709. ISSN 09552219. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.024
- [18] ŠEJNA, J., ŠULC, S., WALD, F. Fire Protection of Steel and Concrete Structures by Alkali-Activated Cement – Adhesion and Fire Experiment. In: *Architecture and Sustainable Development 22*. Prague: FCE CTU, 2022, s. 123-132. ISBN 978-80-01-07071-0.
- [19] CACHIM, P. B., FRANSSEN, J.-M. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. In: *Fire and Materials*. 2009, s. 129-143. ISSN 0308-0501. doi:10.1002/fam.985
- [20] HOPKIN, D. J., EL-RIMAWI, J., SILBERSCHMIDT, V., LENNON, T. An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires: Comparison of the Eurocode 5 parametric charring approach and advanced calculation models. *Construction and Building Materials*. 2011, 25(5), 2584-2595. ISSN 09500618. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.002
- [21] PEČENKO, R., HOZJAN, T. A novel approach to determine charring of wood in natural fire implemented in a coupled heat-mass-pyrolysis model. *Holzforschung*. 2021, 75(2), 148-158. ISSN 1437-434X. doi:10.1515/hf-2020-0081
- [22] TWILT, L., WITTEVEEN, J. The fire resistance of wood-clad steel columns. *Fire Prevention Science and Technology*. 1974, 1974(19), 14-20.
- [23] BÉREYZIAT, A., AUDEBERT, M., DURIF, S., BOUCHAÏR, A., SI LARBI, A., DHIMA, D. Fire Protection of Steel Beams by Timber: Thermomechanical Analysis. In: . Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 397-403. ISBN 978-3-030-41234-0. doi:10.1007/978-3-030-41235-7_58
- [24] BÉREYZIAT, A., AUDEBERT, M., DURIF, S., BOUCHAÏR, A., SI LARBI, A., DHIMA, D. Fire Tests on Steel–Timber Composite Beams. *Fire Technology*. 2024, s. 20. ISSN 0015-2684. doi:10.1007/s10694-023-01536-y
- [25] CACHIM, P. B., FRANSSEN, J.-M. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *Fire and Materials*. 2009, 33(3), 129-143. ISSN 03080501. doi:10.1002/fam.985
- [26] MIKKOLA, E. Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science*. 1991, 3, 547-556. ISSN 18174299. doi:10.3801/IAFSS.FSS.3-547
- [27] ŠEJNA, J., BLESÁK, L. Požární odolnost dřevěných konstrukcí. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2022. ISBN 978-80-01-07012-3.
- [28] THI, V. D., KHELIFA, M., OUDJENE, M., EL GANAOU, M., ROGAUME, Y. Finite element analysis of heat transfer through timber elements exposed to fire. In: *Engineering Structures*. 2017, s. 11-21. ISSN 01410296. doi:10.1016/j.engstruct.2017.04.014
- [29] ŠULC, S., ŠEJNA, J., ŠMILAUER, V., WALD, F. Steel elements with timber fire protection - experiment and numerical analysis. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022, 34. ISSN 2336-5382. doi:10.14311/APP.2022.34.0116
- [30] ŠEJNA, J., ŠULC, S., CÁBOVÁ, K., WALD, F. Mechanical Analysis of Steel Beam protected by OSB. In: .

[31] ŠEJNA, J. Small Furnace Experiments for Wood Burning Pyrolysis Models. Civil Engineering Research Journal. 2021, 12(3). ISSN 25758950. doi:10.19080/CERJ.2021.12.555838

ČÁSTEČNÁ OCHRANA OCELI PŘI POŽÁRU, TZV. COATBACK – MOŽNOST PRO MEMBRÁNOVÉ PŮSOBENÍ

Ing. Jakub Šejna¹, Ing. Patrik Dobrovolný², prof. Ing. František Wald, CSc.³

¹ Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

² Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

³ Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební ČVUT v Praze

¹jakub.sejna@fsv.cvut.cz, ²patrikdobro@seznam.cz, ³frantisek.wald@cvut.cz

Abstrakt

Príspevek je zaměřen na částečnou požární ochranu ocelových konstrukcí. Experimenty byly připraveny na UCEEB ČVUT. Zahrnovaly zkoušky čtyř ocelových vzorků při zahřívání podle nominální normové teplotní křivky. Při návrhu požární ochrany je třeba zohlednit více faktorů, průřez ocelového prvku, tloušťku ochrany a podmínky vystavení během požáru. Príspevek potvrzuje, že dobře navržený systém částečné požární ochrany může významně zvýšit požární bezpečnost ocelových konstrukcí i při částečné požární ochraně, např. při návrhu částečně požárně chráněného stropu, jehož požární odolnost je dána kombinací nosníkového, deskového a membránového chování ocelobetonového stropu vystaveného skutečnému požáru.

Príspevek byl připraven na laskavé oslovení pořadatelů konference. Hlavní poznatky prezentované byly publikovány v [1], [2] a [3]. Práce přináší širší souvislosti a podrobně jednotlivé získané poznatky.

Úvod

Pro pasivní požární ochranu ocelových konstrukcí se používají různé metody, včetně ochranných nátěrů, nástřiků a obkladů. Často stačí chránit pouze hlavní konstrukční prvky, jako jsou sloupy a primární nosníky, například nosnou konstrukci střechy, ale konstrukci střešního pláště nikoliv. Několik studií, na které se odkazuje v [4], se zabývalo částečnou požární ochranou. Je zapotřebí komplexnější pohled na tuto oblast. Většina výzkumů se zaměřuje na intumescentní nátěry a jejich účinnost při zamezení přestupu tepla, což je jev, který je dobře pochopen pomocí existujících matematických a analytických metod [5], [6], [7]. Přenos tepla v pevných látkách probíhá především vedením, přičemž doba požární odolnosti konstrukce je ovlivněna poměrem exponované plochy k ploše průřezu prvku [8].

Historicky k metodám požární ochrany patří bariérové nátěry používané již od starověku. Tyto nátěry, často na bázi anorganických materiálů, tvoří ochrannou vrstvu, která brání šíření tepla dále do konstrukce. Moderní požární ochrana využívá především intumescentní nebo pěnové nátěry, které se při vysokých teplotách rozpínají a vytvářejí ochrannou pěnovou bariéru [9].

Inovativní výzkumy [10], [11] se zabývají ochranou exponovaných konstrukčních prvků ve scénářích ohrožených požárem a ukazuje na pokračující pokrok ve strategiích požární ochrany.

V minulosti se běžně používaly stříkané nátěry obsahující až 75 % azbestu. Nástřiky mají oproti nátěrům mnoho výhod, například prodlouženou požární odolnost až na 240 min, ale mají také značné nevýhody. Jednou z významných nevýhod je jejich nerovný povrch, který je méně vzhledný než nátěr a jehož vyhlazení je nákladné. Navíc se nesrovnalosti v podkladu mohou projevit až po letech od aplikace.

Nástřiky vyžadují silnou vrstvu, obvykle 20 až 40 mm, což konstrukci značně zatěžuje. Při správné aplikaci ve vhodném prostředí však tyto nástřiky pomaleji stárnou a zachovávají si své vlastnosti po dlouhou dobu. Účinnost nástřiků závisí do značné míry na přesné přípravě a aplikaci. Zásadní je dodržení přesných poměrů surovin, dodržení specifických metod míchání a zajištění správné konzistence směsi. Špatně namíchané směsi mohou mít za následek nedostatečnou přilnavost, pevnost, konzistenci a tvrdost. Nadměrné použití některých přísad, jako je cement, může vést ke zhoršení izolačních vlastností a vzniku mikrotrhlin. Tyto trhliny

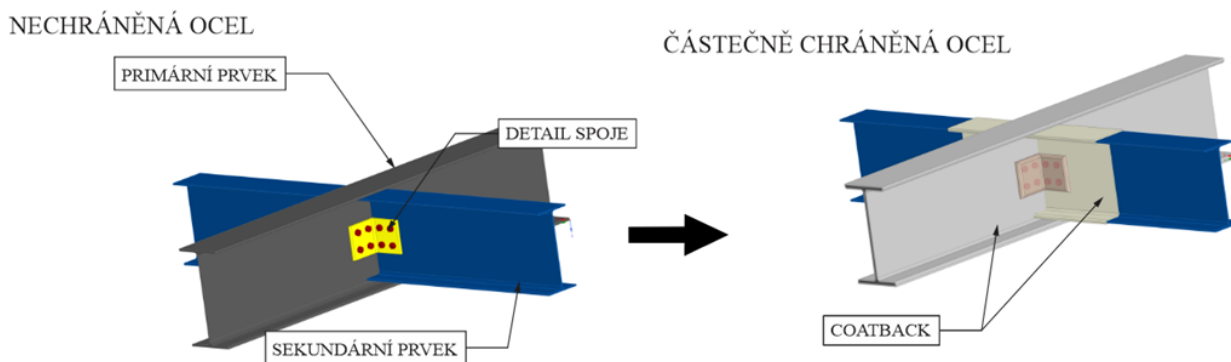
se mohou časem rozšiřovat a potenciálně způsobit selhání značných částí ochranné vrstvy [12], [13].

1 Částečně požárně chráněné konstrukce

Částečná ochrana ocelových konstrukcí je efektivní metoda zaměřená na zvýšení požární bezpečnosti budov, která se nezabývá ochranou všech konstrukčních prvků, ale soustředí se pouze na hlavní komponenty, a tím například umožní membránovému působení trapézových plechů při požáru. Normy českého požárního kodexu při běžném návrhu nepředpokládají membránové chování konstrukcí a je nutné použít tzv. požárně inženýrský přístup. Tento přístup je obzvláště užitečný z hlediska ekonomické efektivnosti a minimalizace zásahu do estetiky a funkčnosti budovy. Ochrana aplikuje na hlavní nosné prvky, jako jsou sloupy a průvlaky, které jsou zásadní pro udržení stability konstrukce v případě požáru.

Mezi oblíbené metody částečné ochrany patří použití intumescentních nátěrů, které se při zahřátí expandují a vytvářejí izolační vrstvu, obkládání ochrannými deskami nebo aplikace stříkaných izolací. Tyto techniky nejenže efektivně zpomalují přenos tepla do zbytku konstrukce, ale také umožňují zachovat estetický vzhled konstrukce bez nutnosti masivních a nákladných úprav [1].

Ačkoli částečná ochrana nabízí mnoho výhod, jako jsou snížené náklady a zachování designu, přináší i určitá omezení. Některé části konstrukce mohou zůstat více zranitelné v případě požáru, což vyžaduje pečlivé posouzení a plánování, které prvky je třeba chránit, možné provedení částečné ochrany přípoje stropnice na průvlak je znázorněn na obr. 1.



Obr.1: Provedení částečné požární ochrany na přípoji sekundárního prvku na primární

Implementace částečné ochrany vyžaduje detailní analýzu a porozumění chování konstrukcí při požáru. To zahrnuje hodnocení rizik, stanovení požárních scénářů, určení návrhového požáru a použití pokročilých inženýrských softwarů pro modelování chování konstrukce za vysokých teplot [14], [15]. Díky tomuto přístupu je možné přesně určit, které části konstrukce potřebují ochranu a jakým způsobem ji aplikovat, aby bylo dosaženo požadované úrovně bezpečnosti při současném dodržení rozpočtových omezení.

Částečná ochrana tedy nabízí vyvážené řešení pro zajištění požární bezpečnosti ocelových konstrukcí, které lze přizpůsobit specifickým potřebám každého projektu. Když je správně navržena a implementována, může výrazně zlepšit odolnost konstrukce proti požáru, zatímco zároveň minimalizuje finanční a estetické dopady na celkový design budovy.

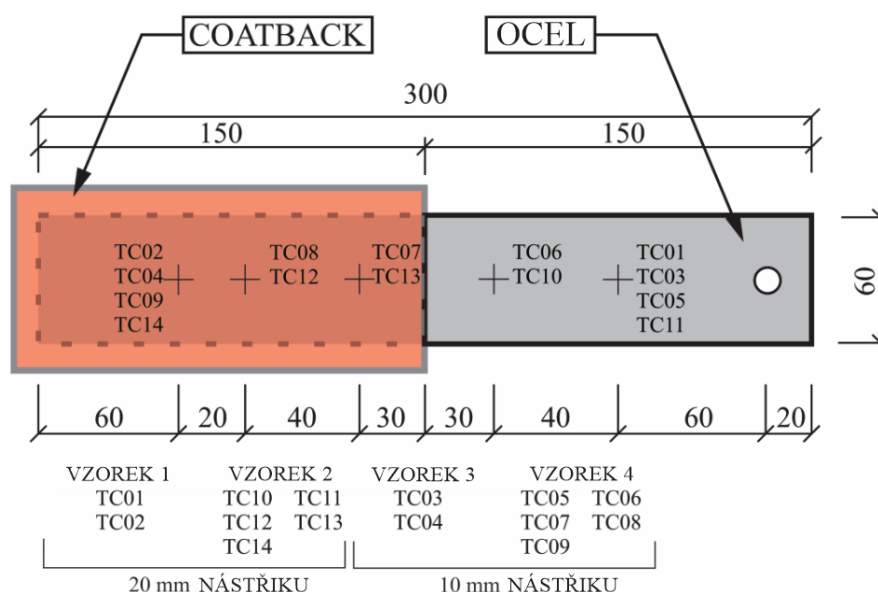
1.1 Otázky částečné požární ochrany

Hlavním kritériem pro výběr chráněných prvků je jejich význam pro celkovou stabilitu konstrukce. Jak již bylo zmíněno, typicky jsou chráněny primární nosné prvky. Naopak, sekundární prvky, jako stropnice, střešní trapézové plechy nebo obvodové stěnové panely mohou být chráněny méně nebo vůbec, což závisí na specifické situaci a požadavcích na bezpečnost. Pro příklad lze uvést stropní konstrukci s železobetonovou deskou a ocelovými

stropnicemi. Při požárním návrhu by bylo možné uvažovat membránové působení stropní železobetonové desky, ale pokud by byly ocelové stropnice plně chráněny před účinky požáru, bylo membránovému působení stropní desky bráněno. V tomto případě při správném návrhu stropní desky a zohlednění vzniklé membrány mohla být při požáru zvýšena únosnost celé konstrukce. Je nutné podotknout, že při požární situaci dochází k redukci návrhového zatížení. Pokud by bylo povoleno membránové působení konstrukce, došlo by postupně k větším deformacím vnitřních konstrukcí a tím spíše po selhání konstrukce došlo ke zhroucení dovnitř. Z pohledu zasahujících hasičů by se jednalo o bezpečnější stav, kdy nedochází k jejich ohrožení. Pro doplnění je nutné zmínit, že v tomto případě by hasiči prováděli požární zásah z vnějšku budovy, a to s ohledem, že uvnitř budovy by se nenacházeli ohrožení lidé a zásah by byl velmi složitý (např. skladovací haly při plně rozvinutém požáru). Projekty částečné ochrany musí splňovat platné stavební a požární normy, které specifikují, jaké prvky a jakým způsobem musí být chráněny. Tyto normy a regulace se mohou lišit v závislosti na typu objektu. Je důležité, aby byl každý projekt posuzován individuálně, s ohledem na specifické rizikové faktory a požadavky na bezpečnost. Ideálně za využití požárně inženýrského přístupu [14].

1.2 Požární experiment

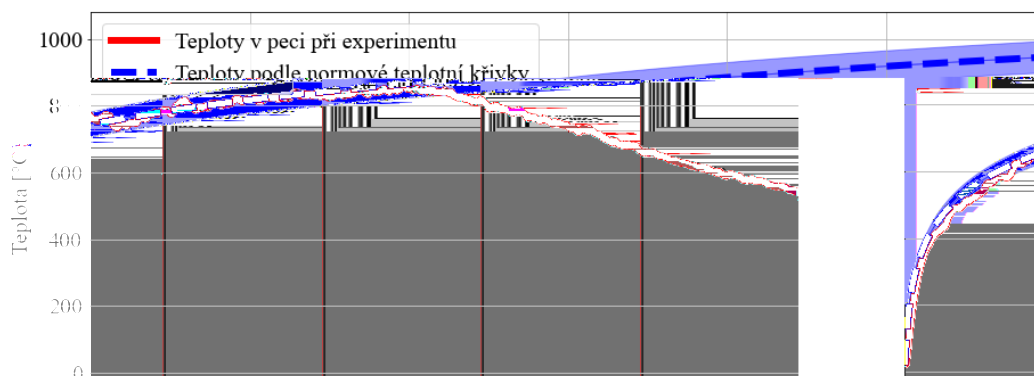
Cílem experimentu připraveného na UCEEB ČVUT bylo ověřit numerický model prostřednictvím řízeného testování čtyř vzorků oceli. Každý vzorek měl rozměry 300 × 60 × 8 mm a byl podroben standardní teplotní křivce po dobu 60 min ve středně rozměrové peci. Před zahájením zkoušky byl každý vzorek připraven nanesením požárního nátěru na tři strany včetně přední strany. Dva ze vzorků, vzorek 3 a 4, byly opatřeny nátěrem o tloušťce 10 mm, zatímco další dva, vzorek 1 a 2, měly silnější nátěr o tloušťce 20 mm. Tato variabilita tloušťky nátěru měla za cíl vyhodnotit použitelnost technologie protipožární ochrany a vliv různých tlouštěk na výsledné ochranné vlastnosti, schéma vzorků je uvedeno na obr. 2.



Obr.2: Geometrie vzorku

Pro sledování teplotních změn během experimentu byly na chráněné i nechráněné části každého vzorku instalovány termočlánky (MTC10 /1×K T2 / P1,5 / N3000 / K-MM). Po přípravné fázi byly vzorky ponechány zrát při 20 °C po dobu 28 dnů, aby byla zajištěna zralost ochranných vrstev. Požární zkouška trvala 60 min. Po 35 min však došlo k nepředvídanému snížení výkonu hořáku v důsledku poklesu tlaku v plynové lahvi, což mírně změnilo podmínky zkoušky. Po uplynutí plánované doby trvání zkoušky byl hořák vypnut, ale záznam dat

pokračoval dalších 15 min, aby bylo možné sledovat chování vzorků při chlazení, průběh teplot je znázorněn na obr. 3.



Obr.3: Teplota podle standardní teplotní křivky požáru a teploty pece při experimentu

Po skončení experimentu byl pečlivě zdokumentován stav vzorků před zkouškou i po ní, jak je znázorněno na obr. 4-6. Tato vizuální dokumentace spolu s naměřenými daty poskytla ucelený přehled o chování požárního nástřiku a strukturální integritě vzorků při dlouhodobém vystavení vysokým teplotám. Tento experiment nejenže přispěl cennými údaji pro validaci numerického modelu, ale také poukázal na kritické provozní aspekty, jako je spolehlivost dodávky paliva během zkoušek požární odolnosti při vysokých nárocích [1].



Obr.4: Vzorky před požárním experimentem

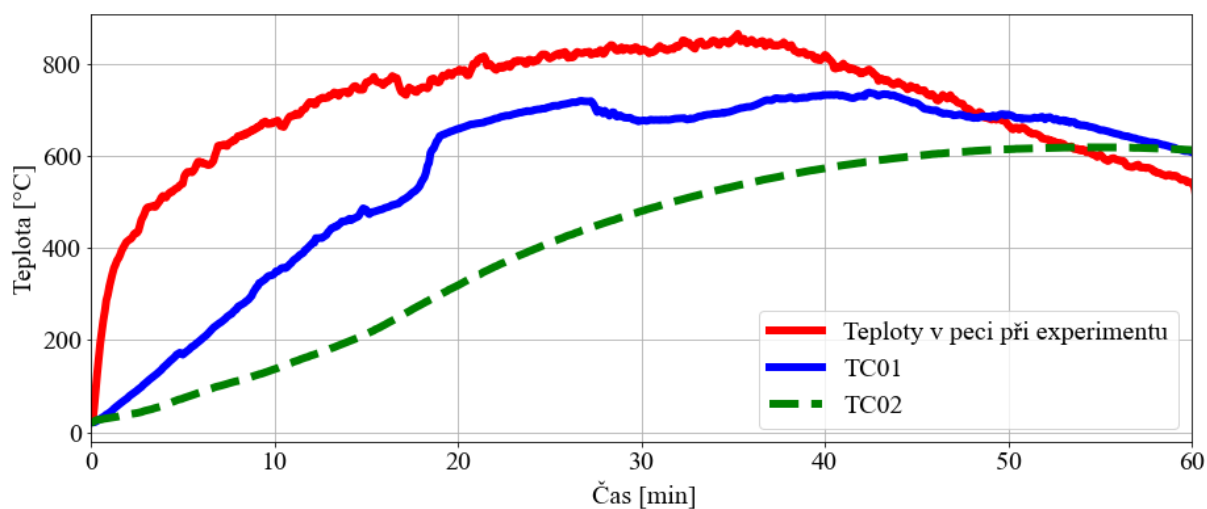


Obr. 5: Vzorky po požárním experimentu, u jednoho došlo k odpadnutí ochranné vrstvy

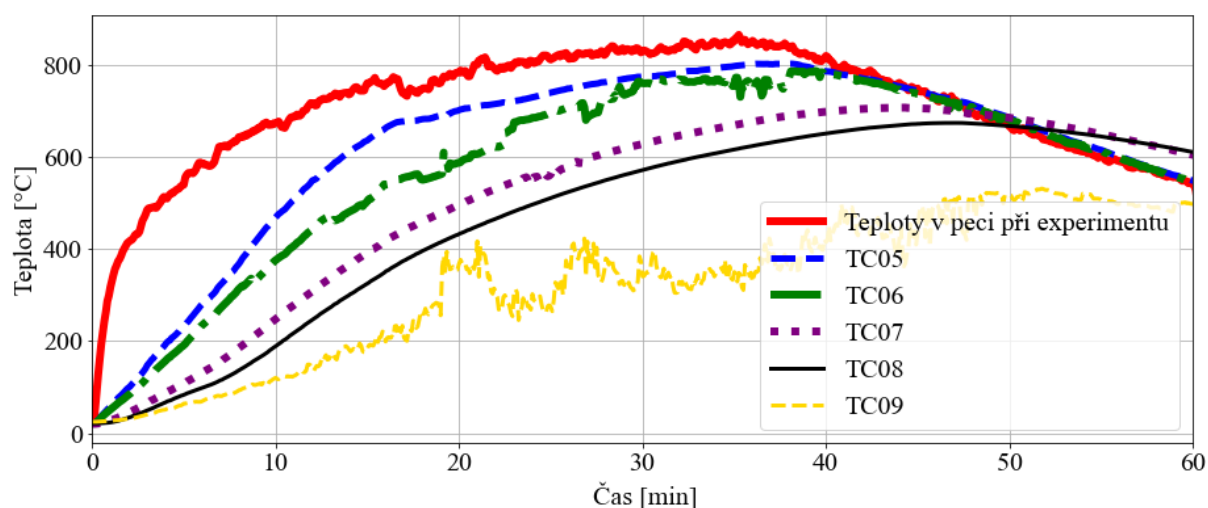


Obr.6: Odpadlá ochranná vrstva po požárním experimentu

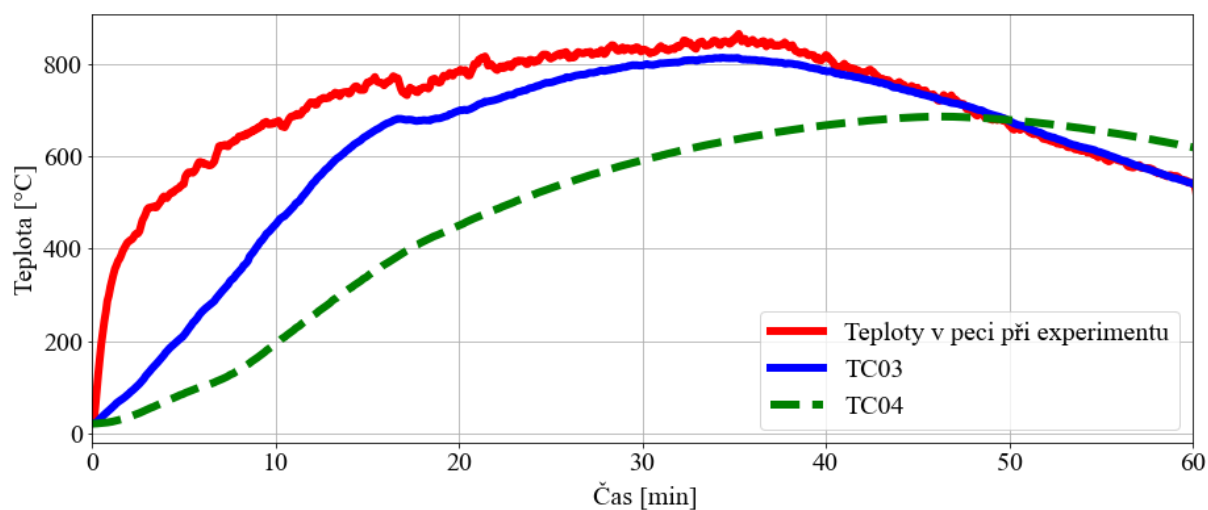
Během zkoušky vykazovaly termočlánky č. 9 a č. 13 velké rozdíly v naměřených teplotách, takže jejich hodnoty nebyly použity pro ověření numerického modelu. Při porovnání všech výsledků vykazovaly vzorky se stejnou tloušťkou ochrany podobné naměřené hodnoty. Vzorky s různou tloušťkou ochrany vykazovaly rozdíly teplot až 100 °C na chráněné části. Naměřené teploty jsou uvedeny na obr. 7-10.



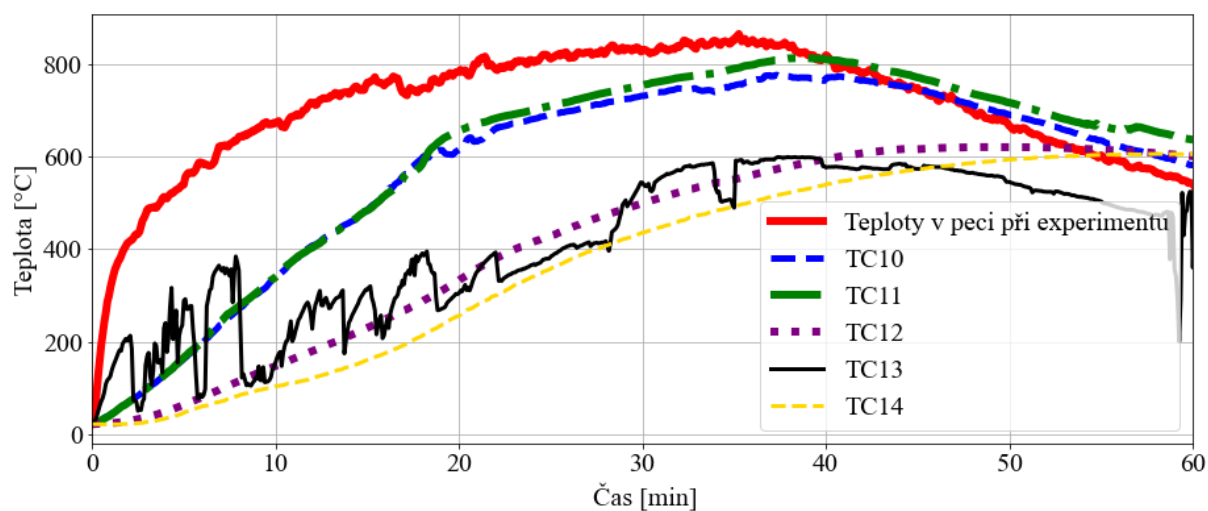
Obr.7: Vzorek 1 - Teploty oceli při požárním experimentu



Obr.8: Vzorek 2 - Teploty oceli při požárním experimentu



Obr.9: Vzorek 3 - teploty oceli při požárním experimentu



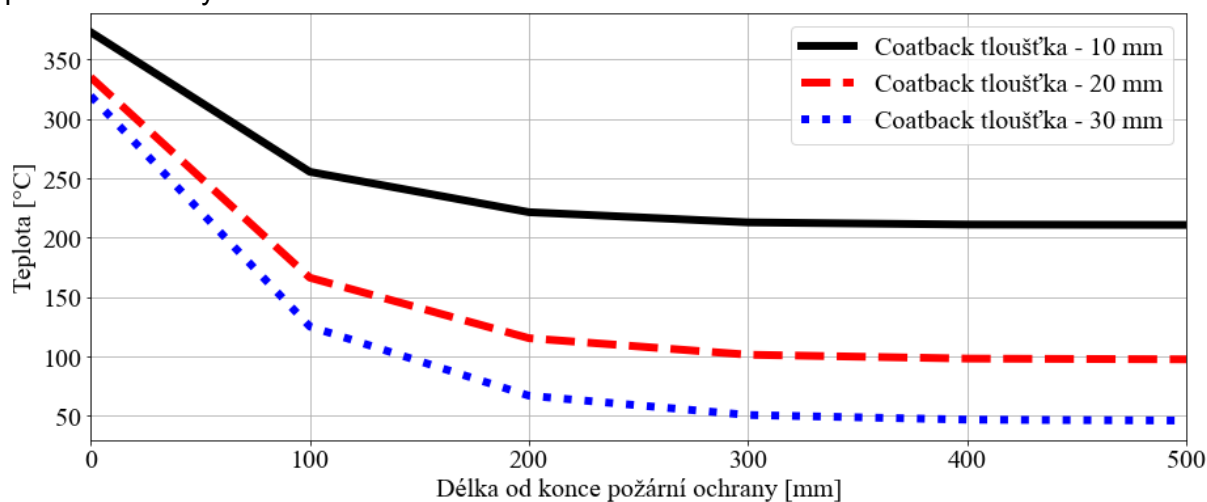
Obr.10: Vzorek 4 - Teploty oceli při požárním experimentu

1.3 Délka částečné požární ochrany

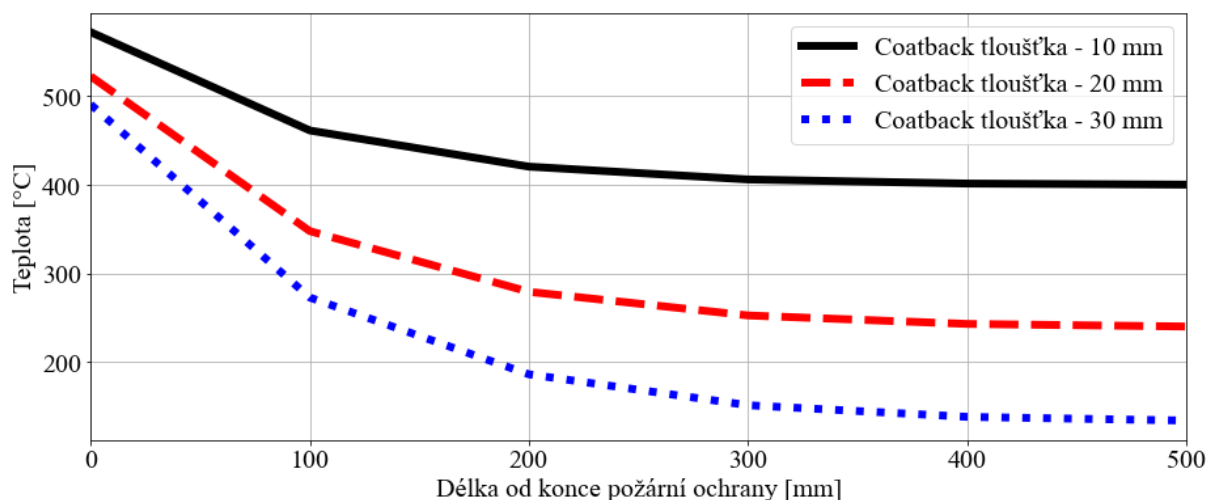
Cílem případové studie [1] bylo stanovit potřebnou délku pro částečnou požární ochranu ocelových konstrukcí porovnáním analytických přístupů s numerickým řešením. Zpočátku byla v rámci analytického přístupu testována obecně přijímaná délka požární ochrany 500 mm [16] pro stanovení minimální požadované délky, která zajistí, že průměrná teplota v místě připojení ocelového prvku nepřekročí 500 °C po dobu odolnosti 120 min. Následně byly pomocí numerického modelu simulovány různé délky protipožární ochrany na nosníku a sledovány změny teploty podél nosníku, aby bylo možné vyhodnotit přesnost analytického modelu.

Analytický model založený na předpokladech publikovaných v [16] a numerické simulace využívaly vstupní parametry oceli z EN 1993-1-2 a počáteční teplotní podmínky 20 °C. Teplota při požáru byla vypočtena podle normové teplotní křivky. Při simulacích byly testovány délky požární ochrany od 100 mm do 700 mm s použitím různých tloušťek nástřiku podle rozměrových tabulek pro PROMASPRAY® P300 a PROMASPRAY® F250 [17], které odpovídají délce požární odolnosti 120 min pro profil IPE 400. Výsledky jsou představeny v [1]. Kromě těchto simulací byly provedeny dvě komplexní studie, které měly dále ověřit požadovanou délku částečné požární ochrany. První studie zkoumala vliv různých tloušťek protipožární ochrany na dynamiku teplot s použitím profilu nosníku IPE 220 a sloupu HEB 300 s délkou ochrany 500 mm. Obr. 11 až 13 znázorňují vývoj teploty podél ocelového profilu za různých podmínek tloušťky a délky ochrany během požární zkoušky trvající 120 min.

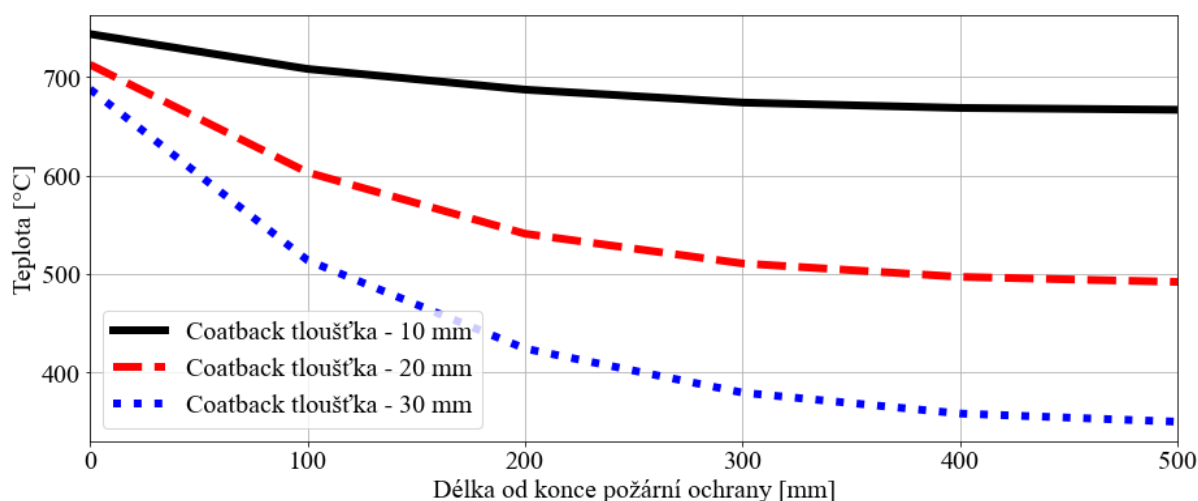
Druhá studie posuzovala účinnost ochranné vrstvy o délce 500 mm a tloušťce 30 mm na různých průřezích IPE vystavených požáru ze tří stran. Studie zdůraznily, že při navrhování požární ochrany je důležité brát v úvahu nejen průřez, ale také tloušťku ochranné vrstvy a orientaci konstrukce vzhledem k působení požáru. Simulace naznačily, že větší chráněné prvky mohou při požáru předávat více tepla do míst napojení, což ovlivňuje požadovanou délku požární ochrany.



Obr.11: Ohřátí nosníku pod požární ochranou od jejího konce (vlevo) do líce (vpravo) za 15 min při změně tloušťky požární ochrany $d = 10; 20$ a 30 mm a její délce 500 mm, materiálové vlastnosti ochrany [1], nosník IPE 220, sloup HEB 300.



Obr.12: Ohřátí nosníku pod požární ochranou od jejího konce (vlevo) do líce sloupu (vpravo) za 30 min při změně tloušťky požární ochrany d_p a její délce 500 mm, materiálové vlastnosti ochrany [1], nosník IPE 220, sloup HEB 300.



Obr.13: Ohřátí nosníku pod požární ochranou od jejího konce (vlevo) do líce sloupu (vpravo) za 60 min při změně tloušťky d_p požární ochrany a její délce 500 mm, materiálové vlastnosti ochrany [1], nosník IPE 220, sloup HEB 300.

Závěr

Byly shrnuty možnosti pasivní požární ochrany ocelových konstrukcí, zejména částečné ochrany. Byla zkoumána rychlost ochlazování ocelového prvků pod požární ochranou. Potvrdilo se, že rychlost je vysoká, což je způsobeno vedením tepla ocelí a rychlostí vývoje teploty během požáru.

Byly připraveny experimenty k ověření vedení tepla při částečné požární ochraně. Čtyři ocelové vzorky částečně chráněné nástřikem byly vystaveny požáru po dobu 60 min. Dva vzorky měly tloušťku ochrany 10 mm a dva vzorky měly tloušťku ochrany 20 mm. Průběh teploty plynu v experimentální peci odpovídal se nominální normové křivce do 35 min.

Byly připraveny numerické a analytické studie teploty nosníku. Empirické a analytické vzorce pro teplotu ocelových prutů při částečné požární ochraně byly shrnuty, validovány a ověřeny pomocí numerického modelu [1]. Studie prověřila citlivost na tloušťku a délku částečné ochrany pro různé profily s různým součinitelem průřezu. Analytická studie se zaměřila na

v praxi nejčastěji doporučovanou empirickou délku částečné ochrany ocelových prutů 500 mm. Byly porovnány výsledné průměrné teploty ocelových prvků. Práce byly podpořeny grantem ČVUT SGS22/144/OHK1/3T/11 Bezpečnost a udržitelnost dřevěných a ocelových konstrukcí vystavených požáru (část dřevěných obkladů) a ČVUT SGS22/141/OHK1/3T/11 Progresivní přístupy k návrhu ocelových konstrukcí.

Literatura

- [1] ŠEJNA J., DOBROVOLNÝ P., WALD F. The partial fire protection of steel members: a comparative study. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2023. ISSN 2040-2317. doi:10.1108/JSFE-01-2023-0001
- [2] ŠEJNA J., DOBROVOLNÝ P., WALD F. Částečná požární ochrana ocelových konstrukcí – část 1: Shrnutí teoretických poznatků. *TZB info* [online]. 2024 [cit. 2024-04-30]. <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/26548-castecna-pozarni-ochrana-ocelovych-konstrukci-cast-1-shrnuti-teoretickych-poznatku>
- [3] ŠEJNA J., DOBROVOLNÝ P., WALD F. Částečná požární ochrana ocelových konstrukcí – část 2: Experimenty, numerické modely a srovnání. *TZB info* [online]. 2024 [cit. 2024-04-30]. <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/26605-castecna-pozarni-ochrana-ocelovych-konstrukci-cast-2-experimenty-numericke-modely-a-srovnani>
- [4] FERREIRA F. A., CLARET A. M., SANTOLIN A. A simplified method for assessing the temperature distribution in partially protected steel sections. *Revista Escola de Minas*. 2007, 60(4), 645-655.
- [5] ZAHARIA R., VULCU C., VASSART O., GERNAY T., FRANSSSEN J.M. Numerical analysis of partially fire protected composite slabs. 2013, 14(1), 21-39. ISSN 1229-9367. doi:10.12989/scs.2013.14.1.021
- [6] DAI X., WANG Y., BAILEY C. A Simple Method to Predict Temperatures in Steel Joints with Partial Intumescent Coating Fire Protection. *Fire Technology*. 2010, 46(1), 19-35. ISSN 0015-2684. doi:10.1007/s10694-009-0095-7
- [7] IMRAN M., LIEW M. S., NASIF M. S. et al. Thermal and Mechanical Response of Partially Protected Steel I-Beam under Fire. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 203. ISSN 2261-236X. doi:10.1051/mateconf/201820306009
- [8] WANG Y. C., BURGESS I., WALD F. Performance-based fire engineering of structures. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-0-415-55733-7.
- [9] JO H. M., KIM D. H., LEE S. H., LEE J. Y. Multi-layer barrier coating technology using nano-fibrillated cellulose and a hydrophobic coating agent. *BioResources*. 2022, 17(4), 6222-6233. ISSN 19302126. doi:10.15376/biores.17.4.6222-6233
- [10] ASTERIS P. G., MARAVEAS C., CHOUNTALAS A.T., SOPHIANOPOULOS D. S., ALAM N. Fire resistance prediction of slim-floor asymmetric steel beams using single hidden layer ANN models that employ multiple activation functions. *Steel and Composite Structures*. 2022, 44(6). doi:10.12989/scs.2022.44.6.769
- [11] ALAM N., MARAVEAS C., TSAVDARIDIS K. D., NADJAI A. Performance of Ultra Shallow Floor Beams (USFB) exposed to standard and natural fires. *Journal of Building Engineering*. 2021, 38. ISSN 23527102. doi:10.1016/j.job.2021.102192
- [12] DAI X., QIAN J., QIN J., YUE Y., ZHAO Y., JIA X. Preparation and Properties of Magnesium Phosphate Cement-Based Fire Retardant Coating for Steel. *Materials*. 2022, 15(12). ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma15124134
- [13] JAYA KUMAR G., KIRAN T., ANAND N., AL-JABRI K. Influence of fire-resistant coating on the physical characteristics and residual mechanical properties of E350 steel section exposed to elevated temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2022. ISSN 2040-2317. doi:10.1108/JSFE-02-2022-0008
- [14] CÁBOVÁ K. Ověřování modelů v požární bezpečnosti. V Praze: České vysoké učení technické, ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně, Vysokou školou báňskou - Technickou univerzitou Ostrava a Technickým ústavem požární ochrany, 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.

[15] BUCHANAN A. H., ABU A. K. Structural design for fire safety. Second edition. Chichester: West Sussex, 2017. ISBN 978-047-0972-892.

[16] YASSERI S. F. Coat-Back Length: In Passive Fire Protection of Offshore Installations. 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 2. ASMEDC, 2002, 621-627. ISBN 0-7918-3612-6. doi:10.1115/OMAE2002-28537

[17] BREUNESE A. A Simple Method for Calculation of Coat Back Lengths. PROMAT. 2019, 2019, 1-9.

SHRnutí NORMY EN 1993-1-14 PRO NAVRHOVÁNÍ S VYUŽITÍM MKP

prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.¹, Ing. Aleš Chovanec²

¹Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

²Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

¹michal.jandera@fsv.cvut.cz, ²ales.chovanec@cvut.cz

Abstrakt

Metoda konečných prvků (MKP) se stále více prosazuje v praxi k samotnému stanovení únosnosti ocelových konstrukcí, nikoliv pouze k výpočtu vnitřních sil. Norma EN 1993-1-14, vyvíjená v rámci CEN/TC 250/SC 3, má za cíl poskytnout komplexní pravidla pro použití MKP a dalších numerických metod v návrhu ocelových konstrukcí. Tato norma bude obsahovat pravidla pro modelování konstrukčních prvků, materiálů, zavedení imperfekcí a kritéria mezních stavů. Bude také poskytovat doporučení pro výběr softwaru a dokumentaci. Norma se je připravována pro analýzu únosnosti, použitelnosti a únavy. Přínos bude mít zejména tzv. numerický návrhový výpočet. Buď s nutností dalšího posouzení, nebo stanovující únosnost přímo. Pro takové postupy, dosud neexistuje v normách jednoznačná podpora, nejsou dosud uvedena doporučení pro verifikaci a validaci modelu, a vyjádření nejistoty modelu pro spolehlivost návrhu. Tento výpočet je v článku ilustrován příkladem trapézového plechu.

1. Vývoj nové části Eurokódu 3 pro navrhování s využitím MKP

Navrhování pomocí metody konečných prvků se v praxi využívá stále častěji. Vizí CEN/TC 250/SC 3 bylo vyvinout nový komplexní dokument založený na stávajících ustanoveních, která jsou v současné době obsažena v různých částech Eurokódu 3 (např. EN 1993-1-5 příloha C, EN 1993-1-6), a s rozšířením tam, kde to bylo nutné pro komplexní pokrytí všech oblastí navrhování nosných ocelových konstrukcí. První hrubý obsah normy, ještě před samotným rozhodnutím o vytvoření samostatné části v Eurokódu 3, byl vytvořen pracovní skupinou členů nominovaných z jednotlivých pracovních skupin, tj. ostatních částí normy pro ocelové konstrukce. Snahou tedy již od začátku bylo, aby norma obsahovala informace pro všechny typy ocelových konstrukcí a druhy chování. Zároveň takto mohly být dílčí části harmonizovány ve vztahu k EN 1993-1-14.

1.1. Obsah normy

V rámci tvorby Referenční skupiny se připravují dva dokumenty: (i) samotná část EN 1993-1-14 a (ii) technická zpráva (Technical report). Cílem nové části normy je poskytnout pravidla pro použití analýzy metodou konečných prvků a dalších numerických metod pro ověřování mezních stavů únosnosti, mezních stavů použitelnosti a únavy. Souběžně s tím bude publikována doprovodná technická zpráva poskytující základní informace, upřesnění a dovysvětlení všech pravidel normy, tj. typů analýz, materiálového a geometrického modelování, validace a verifikace modelu a spolehlivosti návrhu. Součástí budou i příklady dobré praxe a příklady pro validaci a verifikaci numerických modelů. Předpokládá se, že norma bude sloužit projektantům pro navrhování pomocí analýzy konečných prvků v každodenní inženýrské praxi.

Obsahem EN 1993-1-14 budou pravidla pro:

a) modelování konstrukčních prvků a okrajových podmínek,

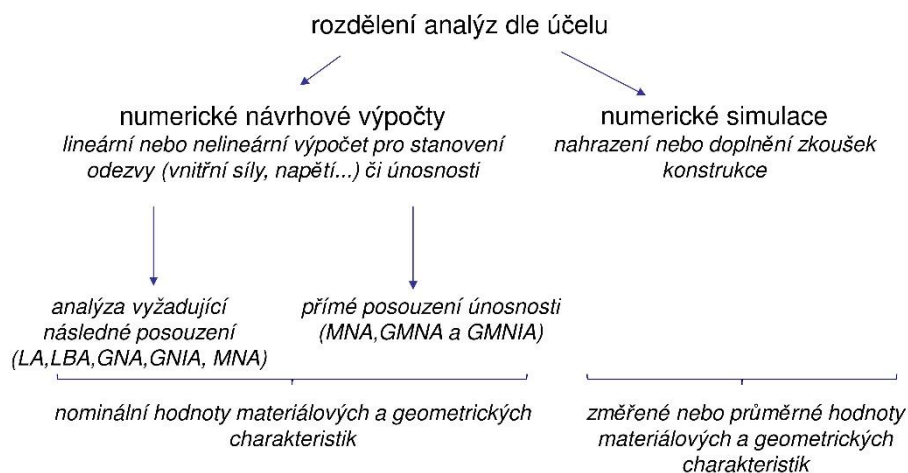
- b) zavedení imperfekcí (geometrické imperfekce a reziduální pnutí),
- c) modelování materiálů,
- d) modelování zatížení,
- e) typy analýz,
- f) validaci a verifikaci MKP modelů,
- g) zavedení kritérií mezního stavu,
- h) harmonizaci kritérií mezního stavu a zvolené úrovně modelování a typu analýzy,
- i) dílčí součinitele, které se mají použít,
- j) výběr softwaru a dokumentace.

Pravidla nové normy zohledňují možná návrhová kritéria:

- a) plastické porušení,
- b) pevnostní porušení,
- c) stabilita,
- d) únava,
- e) mezní stav použitelnosti.

1.2. Účel modelu

EN 1993-1-14 má za cíl poskytnout obecná návrhová doporučení pro širokou škálu numerických modelů používaných v každodenní konstrukční praxi a pro účely vývoje konstrukčních prvků, návrhových postupů apod. Existují různé úrovně modelování a typy analýz. Norma pravidla návrhu rozděluje do dvou větví na základě účelu analýzy: numerický návrhový výpočet a numerická simulace. Obrázek 1 ukazuje obecný přehled tohoto rozdělení.



Obrázek 1: Rozdělení analýz normou EN 1993-1-14

Numerické návrhové výpočty pokrývají praktické návrhové případy. Ty lze rozdělit do dalších dvou skupin. Na analýzy vyžadující následné posouzení a přímé posouzení či stanovení únosnosti. V rámci první podskupiny se numerický model používá k výpočtu odezvy konstrukce (např. vnitřní síly, deformace, součinitele kritického zatížení, napětí atd.), které jsou následně použity v analytických návrhových postupech pro posudek. V tomto případě není únosnost zkoumané konstrukce přímo stanovena numerickým modelem. Z numerického modelu jsou převzaty pouze návrhové parametry pro další zpracování. V rámci této skupiny

se běžně používají následující typy analýz: LA (lineární analýza), LBA (lineární stabilitní analýza), GNA (geometricky nelineární analýza), GNIA (geometricky nelineární analýza s imperfekcemi), MNA (materiálově nelineární analýza).

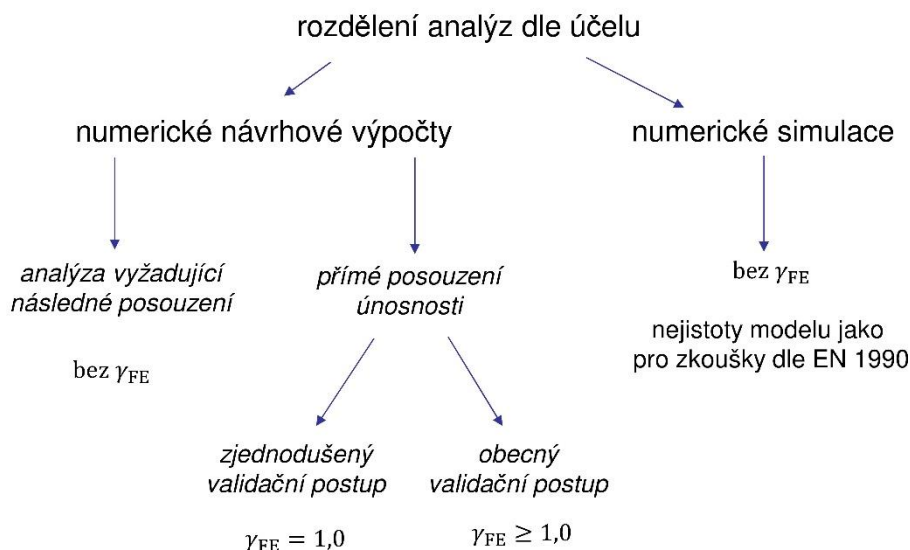
Druhou dílčí skupinou je přímé posouzení únosnosti. V této skupině je únosnost konstrukce přímým výsledkem numerické simulace, tj. nejsou nutné žádné další analytické výpočty. V důsledku toho musí být vždy použita materiálově nelineární analýza - MNA, GMNA nebo GMNIA. Volba analýzy se řídí tím, zda imperfekce a účinky druhého řádu mají vliv na nelineární chování a únosnost konstrukce. Tyto typy analýz nejsou dosud tak široce používány v každodenní projektové praxi. Jejich zavedení do EN 1993-1-14 tak umožní další využití pokročilých numerických modelů projektanty v praxi. Druhá větev, numerická simulace, umožňuje doplnění zkoušek konstrukce a validaci modelu.

Návrh a modelování pro posouzení únavy je mimo výše popsané schematické rozdělení; obecně ale návrh na únavu patří k analýze vyžadující následné posouzení. Některá pravidla (např. pravidla tvorby vhodné sítě, validace a verifikace, studie citlivosti, vyhodnocení koncentrace napětí, součinitel modelu) neplatí pro numerické modely sloužící k posouzení únavy, pro které se používá lineární analýza (LA). EN 1993-1-14 tedy poskytuje podrobná návrhová pravidla pro přístupy k návrhu únavy založené na numerických modelech (např. metoda extrapolovaného jmenovitého napětí (hot-spot stress) a metoda efektivního vrubového napětí (the notch stress)), stejně jako vytváření numerického modelu, síť konečných prvků a extrapolace napětí. Všechna pravidla týkající se posouzení únavy jsou uvedena v EN 1993-1-9. S touto EN 1993-1-14 harmonizována.

1.3. Spolehlivost stanovení únosnosti numerickým modelem

Návrhová ustanovení EN 1993-1-14 nemění úroveň spolehlivosti konstrukcí. Spolehlivost konstrukcí navržených metodami návrhu založenými na numerických modelech tedy musí být stejná jako spolehlivost vyžadovaná EN 1990 a všemi ostatními částmi EN 1993. Návrhová pravidla uvedená v EN 1993-1-14 nemění zavedené součinitele spolehlivosti ani neupravují hodnoty dílčích součinitelů předepsaných různými částmi EN 1993 pro různé typy konstrukcí a způsoby porušení.

Pro případy, kdy je únosnost stanovena analýzou přímo a nejistoty modelování nejsou pokryty jiným způsobem (např. křivkami vzpěrnosti, analytickými postupy posouzení nebo přímo statistickým vyhodnocením) musí být nejistoty numerického modelu navíc zohledněny součinitelem modelu (model factor γ_{FE}). Tento součinitel pokrývá nejistoty numerického modelu a typu provedené analýzy. Nenahrazuje však použití jakýchkoli jiných dílčích součinitelů spolehlivosti uvedených v EN 1993 (všechny části). Použití součinitele modelu je také spojeno s účelem analýzy, jak je shrnuto na obrázku 2.



Obrázek 2: Použití součinitele modelu γ_{FE}

Pokud je numerický model použit pro numerické návrhové výpočty s přímým posouzením únosnosti, nejistoty numerického modelu by měly být vyhodnoceny na základě kombinace dílčích součinitelů podle EN 1993 (všechny části) a modelového součinitele γ_{FE} . Tomu je věnována Příloha A normy, která uvádí pravidla pro použití obecného validačního postupu (založený na statistickém vyhodnocení) a zjednodušeného validačního postupu (pro známé způsoby porušení založený zejména na spolehlivé validaci numerického modelu na experimentech apod.).

Pokud se numerický model použije pro numerické simulace a provede se statistické vyhodnocení podle EN 1990 pro stanovení únosností založených na zkoušce (tj. skutečný součinitel spolehlivosti), neměl by se použít součinitel modelu (γ_{FE}). S nejistotou návrhu numerickou simulací se zachází stejně jako s výsledky zkoušek podle EN 1990.

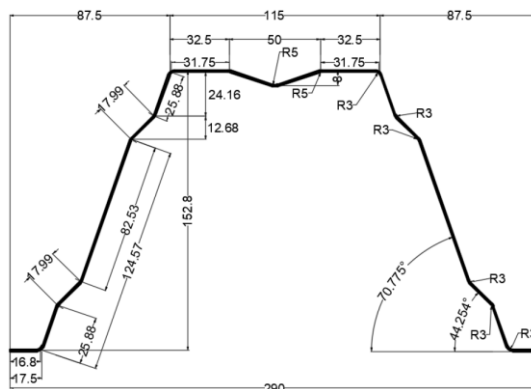
2. Příklad – trapézový profil

Pro představu návrhu s využitím MKP je uveden příklad numerického modelu ocelového trapézového plechu jednoduše podepřeného a rovnoměrně zatíženého. Jedná se o trapézový profil o výšce 153 mm s výztuhami stojiny i pásnice, zde posouzený pro rozpětí 9 m. Rozhodujícím způsobem porušení je únosnost v ohybu. Mezní stav použitelnosti (průhyb) není posouzen. Model je vytvořen v MKP programu Abaqus [3]. Využívá geometricky a materiálově nelineární analýzy (GMNIA) a výsledek (návrhová únosnost) je mj. porovnán se standardním návrhovým postupem podle EN 1993-1-3 [2].

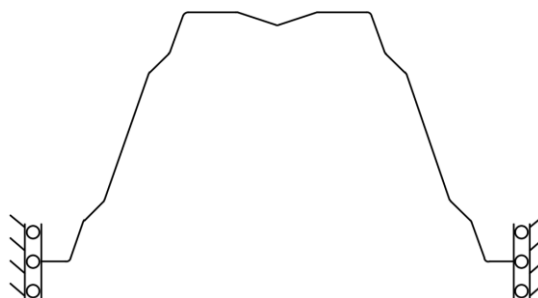
2.1. Popis řešeného případu

V tomto příkladu je použit profil trapézového plechu TR 153/290/0,75, jehož průřez je znázorněn na obrázku 3. Horní pásnice obsahuje jednu vnitřní výztuhu v podélném směru a každá stojina má dvě vnitřní výztuhy. Statické schéma je uvažováno jako prostě podepřený nosník o rozpětí 9 000 mm, plech je z oceli S320 GD+Z275. Tloušťka 0,75 mm zahrnuje pozinkování o celkové tloušťce 0,04 mm, tloušťka ocelového jádra je tedy 0,71 mm. Šířka krajních podpěr je v tomto případě 40 mm. Rovnoměrně rozložené zatížení působí na horní pásnici. Je modelováno pouze jedno žebro a příslušné okrajové podmínky (viz obr. 4) podél

jeho délky odpovídají chování rovnoměrně plošně zatíženému plechu s řadou vln. Okrajové podmínky představují osu symetrie uprostřed dolní pásnice. GMNIA analýza obsahuje vybraný nelineární materiálový model a příslušné tvary imperfekcí uvažované příslušnými vlastními tvary vybočení.



Obrázek 3: Průřez ocelového trapézového plechu tvářeného za studena TR 153/290/0,75 [4]



Obrázek 4: Okrajové podmínky použité na spodních pásnicích

2.2. Popis numerického modelu

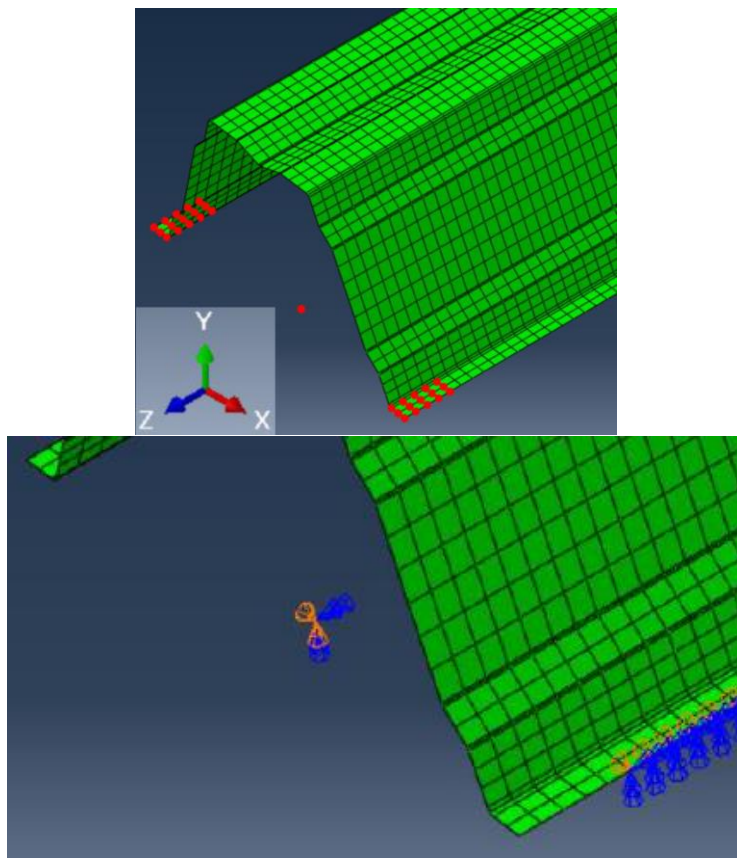
Pro vytvoření MKP modelu byl použit software Abaqus 6.14 [3]. Příčný řez je modelován se 72 uzly s uvažováním geometrie na obr. 3. Každý roh se skládá ze 3 uzlů. Používá se prvek typu "S4R", jedná se o 4-uzlový lineární prvek s redukovanou integrací. Sít' je znázorněna na obrázku 5. Model je vytvořen prvky přibližně o rozměrech 10 x 10 mm. Výpočet byl proveden metodou Newton-Rapshon. Analýza je geometricky (velké deformace) a materiálově nelineární.

2.3. Podepření a zatížení

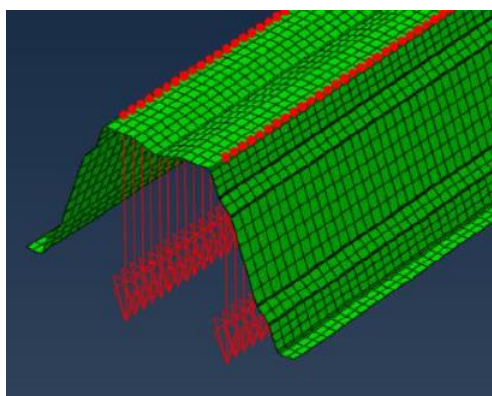
Podpory byly modelovány s využitím "referenčních uzlů", které v tomto případě správně reprezentují kloubovou podporu. Další podrobnosti lze vidět na obr. 5. Referenční uzel je svázán stejnými okrajovými podmínkami (natočení) s červené uzly na spodních pásnicích (tedy po celé šířce podpory. Další možností by bylo vytvořit například ocelový blok pod plechem reprezentující podporu a poté jej pomocí "kontaktních prvků" svázat se zbytkem modelu. Referenční uzly jsou podepřené v souladu s podmínkami podpor prostě uloženého nosníku, tj. pevný a posuvný kloub, a volné natočení kolem globální osy x (kolmá na osy vlny).

Trapézový plech je zatížen rovnoměrným spojitým zatížením. Zatížení působící v numerickém modelu bylo přepočítáno na uzly v rozích horní pásnice, viz obr. 6.

Hlavním cílem je stanovit návrhovou únosnost průřezu trapézového plechu. V tomto případě bylo působící zatížení odpovídající plošnému zatížení $f = 20 \text{ kN/m}^2$ a únosnost profilu je pak násobitelem (přírůstkem) tohoto zvoleného zatížení f .



Obrázek 5: Zadané osy, zadání okrajových podmínek (kloubové podepření) [4]

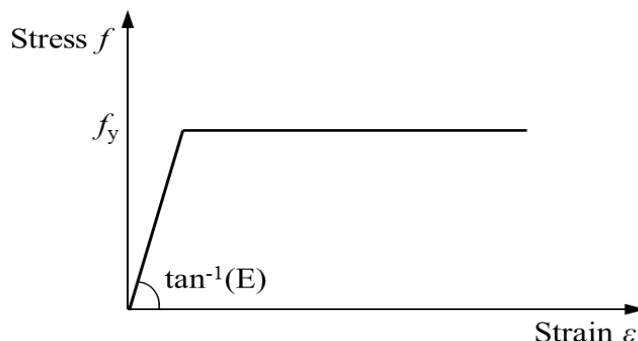


Obrázek 6: Zatížení působící na horní pásnici [4]

2.4. Materiálový model

Norma prEN 1993-1-14 [1] nabízí několik možností zavedení materiálových modelů používaných pro ocelové profily tvarované za studena. Lze použít Ramberg-Osgoodova nelineárního materiálového modelu, multi(čtyř)-lineárního materiálového modelu nebo jednoduššího bilineárního pružně-plastického modelu či bilineárního materiálového modelu se zpevněním (vhodným pro lepší stabilitu numerického výpočtu). V tomto výpočtu byl zaveden

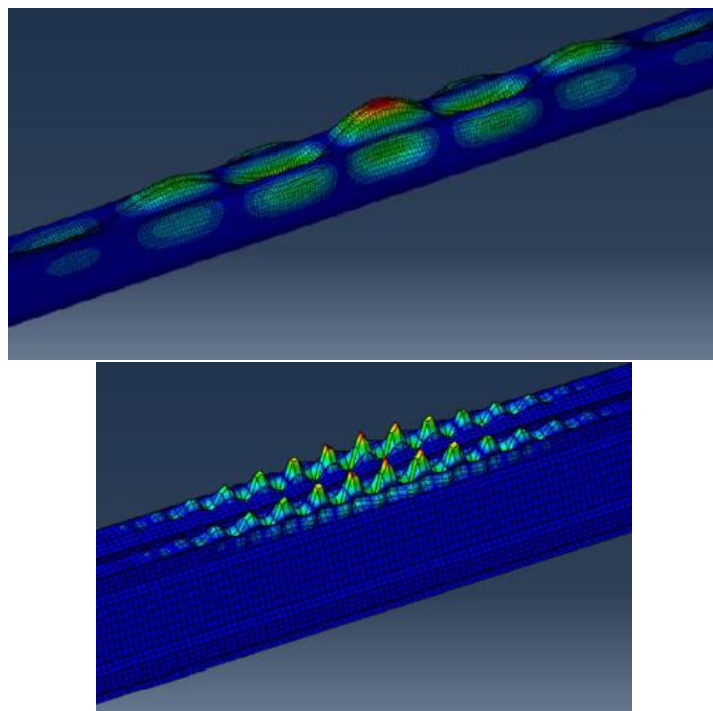
jednoduchý bilineární elastoplastický materiálový model bez zpevnění (obr. 5.1 a) z [1]). Pro ocel S320 GD+Z jsou uvažovány tyto parametry: $f_y = 320$ MPa, $f_u = 390$ MPa, $E = 210\,000$ MPa. Použitý materiálový model je znázorněn na obr. 7. Při použití materiálového modelu se zpevněním (obr. 5.3 z [1]) by rozdíl v únosnosti byl menší než 1 %.



Obrázek 7: Použitý materiálový model [4]

2.5. Geometrické imperfekce

Pro imperfekce a jejich kombinace byly použity příslušné tvary vybočení ze stabilitní analýzy s hodnotou amplitudy uvedenou v [1]. V tomto případě se doporučuje kombinovat dva tvary imperfekcí důležité pro rozhodující způsob porušení – únosnost profilu v ohybu uprostřed pole. Hlavní tvar imperfekce představuje distorzní vybočení výztuhy horní pásnice a tlačných částí stojin. Doprovodná imperfekce představuje lokální boulení stěn mezi výztuhami v tlačené oblasti plechu. Velikost amplitudy imperfekce pro lokální boulení je uvažována $b/200$ podle [1], kde b představuje šířku stěny pásnice. U pásnic s mezilehlými výztuhami trapézového plechu lze podle *Technické zprávy CEN/TR 1993-1-141* použít ekvivalentní velikost amplitudy imperfekce distorzního vybočení rovnou $b/300$, kde b je šířka pásnice s výztuhou. Šířka celé horní pásnice je 115 mm (viz obr. 3), amplituda imperfekce je tedy $115/300 = 0,383$ mm. Pro imperfekci lokálního boulení je to šířka ploché části pásnice – vzdálenost mezi okrajem vnitřní výztuhy a poloměrem rohu - 32,5 mm. Doprovodná amplituda (lokální imperfekce boulení) je proto uvažována velikostí $32,5/200 = 0,16$ mm. Tvary imperfekcí použité v modelu jsou znázorněny na obr. 7.



Obrázek 8: Tvary imperfekcí (vlastní tvary) pro distorzní (vlevo) a lokální (pravý) vybočení [4].

2.6. Verifikace modelu

V rámci verifikace modelu byla provedena studie citlivosti sítě a citlivost na zavedenou geometrickou imperfekci.

MKP model byl vytvořen s rozměry konečných prvků přibližně 10 x 10 mm. Pro srovnání byl vytvořen model s jemnější sítí, přibližně 5 x 5 mm. Rozdíly v únosnostech byly menší než 1 %. Z toho vyplývá, že síť konečných prvků 10 x 10 mm poskytuje dostatečně přesné výsledky.

Tabulka 1: Studie citlivosti sítě

síť MKP [mm]	čas výpočtu [s]	velikost souboru výsledků [MB]	únosnost [kN/m ²]
10 x 10	570	190	1,531
5 x 5	1980	710	1,533

Studie citlivosti modelu na zavedenou geometrickou imperfekci byla provedena následujícím způsobem. Výpočet byl proveden nejprve bez imperfekcí a poté pouze s hlavní imperfekcí (distorzní vybočení). Model bez imperfekcí vede dle očekávání k nejvyšší únosnosti (nadhodnocuje únosnost o cca 10 %). Pokud se použije hlavní (distorzní vybočení) tvar imperfekce bez imperfekce pro lokální boulení, je stanovená únosnost stále o cca 2 % vyšší. Kombinace obou imperfekcí vede dle očekávání na nejvyšší únosnost.

Tabulka 2: Studie citlivosti na zavedené imperfekce

uvažovaná geometrická imperfekce:	únosnost [kN/m ²]:
bez imperfekcí	1,61
tvár pro distrozní vybočení	1,57
tvár pro distrozní vybočení + lokální boulení	1,53

2.7. Porovnání návrhu s využitím MKP a zkoušek

Únosnost stanovená modelem je porovnána s únosností stanovenou výpočtem podle EN 1993-1-3 [2]. Dle tohoto výpočtu je momentová únosnost $M_{c,Rd} = 11,73$ kNm (při uvažování $\gamma_M = 1,0$). Rovněž by měla být posouzena únosnost na příčné zatížení $R_{w,Rd}$, nicméně to by rozhodovalo pouze při malém rozpětí, takže v tomto případě není rozhodující. Pokud bychom z momentové únosnosti chtěli vyjádřit plošné zatížení pro dosažení únosnosti, lze ho vypočítat jednoduše jako $f = 8 M_{c,Rd} / L^2 = 1,16$ kN/m². Únosnost získaná MKP modelem pomocí analýzy GMNIA je 1,53 kN/m². Porovnání hodnoty (max. plošné zatížení) vede k očekávanému výsledku. Eurokód pro ocelové profily tvarované za studena [2] poskytuje konzervativnější výsledky, MKP model podle EN 1993-1-14 [1] vede na vyšší mezní zatížení.

Nicméně, tento výsledek je bezpečný. MKP modelem stanovená únosnost 1,53 kN/m² (při zohlednění $\gamma_M = 1,0$ a $\gamma_{FE} = 1,0$) je stále o něco nižší než únosnost stanovená s využitím zkoušek [5], která je 1,62 kN/m².

Závěr

Norma EN 1993-1-14 poskytne komplexní pravidla pro využití metody konečných prvků (MKP) v návrhu ocelových konstrukcí, čímž podpoří pokročilé numerické modelování v inženýrské praxi. Obsahuje pravidla pro modelování konstrukčních prvků, materiálů, zavedení imperfekcí a kritéria mezních stavů, jakož i doporučení pro výběr softwaru a dokumentaci. Nová norma umožní projektantům přesnější a efektivnější návrhy konstrukcí, přičemž zajistí jejich spolehlivost podle stávajících evropských standardů. Příklad analýzy trapézového profilu demonstruje praktické využití MKP, ukazující, že tato metoda může poskytnout přesnější výsledky než tradiční analytické postupy. Zavedení normy umožní širší a bezpečnější využití pokročilých numerických metod v každodenní praxi.

V současné době ještě probíhá zapracování připomínek získaných v rámci CEN Enquiry přičemž finální hlasování proběhne ještě v letošním roce.

prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Ing. Aleš Chovanec

Použitá literatura

- [1] prEN 1993-1-14: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis, 2021.
- [2] prEN 1993-1-3: 2021 Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules of cold-formed members and sheeting
- [3] Simulia Abaqus 6.14 Documentation. Dassault Systèmes, 2014

- [4] CHOVANEC, A. Návrh trapézového plechu. Diplomová práce, Praha: ČVUT v Praze, 2022 <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/99824>
- [5] ArcelorMittal Construction - Technický list profilu TR 153/290.
https://construction.arcelormittal.com/myspace/medias/sys_master/amc-media/amc-media/h9e/h40/8955636482078/Technical-data-sheet-TR-153-hu.pdf

NOVÝ PŘÍSTUP K NÁVRHU OCELOVÝCH PŘÍPOJŮ S PODPOROU UMĚLÉ INTELIGENCE (AI)

Ing. Šimon Racek
Allplan Slovensko s.r.o.
sracek@allplan.com

ABSTRAKT

V příspěvku představíme softwarový nástroj SDS2 na návrh ocelových konstrukcí. S technologií umělé inteligence (Narrow AI) přináší revoluci v procesech navrhování ocelových přípojí. SDS2 umožňuje konstruktérům a výrobcům dosáhnout bezprecedentní úrovně v efektivnosti a přesnosti jejich pracovních postupů.

1. ÚVOD

V neustále se vyvíjejícím stavebním průmyslu pokroky v technologiích významně formují způsob, jakým přistupujeme k návrhu, výrobě a montáži stavebních konstrukcí. Jednou z průlomových inovací, která vyvolala zejména v posledních letech revoluci, je použití umělé inteligence (AI). Ve spojení s výkonnými softwarovými nástroji dochází ke strojovému učení softwaru, zvýšení přesnosti návrhu a zlepšení časové efektivity v procesech navrhování. Je tedy možné využít umělé inteligence i při návrhu ocelových konstrukcí?

2. SOUČASNÝ STAV NÁVRHU NOSNÝCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

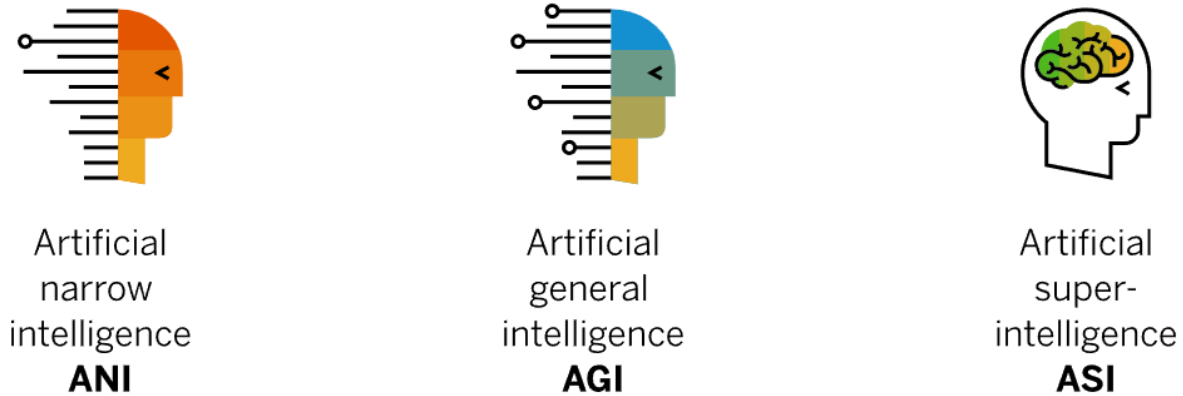
Způsob návrhu nosných konstrukcí je charakterizován kombinací standardizovaných postupů, pokročilých výpočetních a modelovacích nástrojů se stále větším důrazem na spolupráci a inovaci. Přehled klíčových aspektů, které formují momentální situaci, je uveden v následujících bodech:

1. Technické normy a standardizované postupy
2. Podpora CAD BIM softwarů
3. Analytické výpočetní nástroje s metodou konečných prvků
4. Parametrické modelování a optimalizace
5. Detekce kolizi
6. Spolupráce na projektu, koordinace a sdílení informací

Významnými aspekty, které se postupně dostávají do popředí a začínají hrát rozhodující roli i při navrhování nosných stavebních konstrukcí, jsou nově vznikající technologie v podobě umělé inteligence (AI), strojového učení a generativního designu. Jedním z hlavních důvodů, proč k tomu dochází, je fakt, že algoritmy umělé inteligence dokážou pomoci při automatizaci opakujících se úkolů, optimalizaci návrhů a poskytování postřehů založených na analýze údajů.

3. ÚZKÁ UMĚLÁ INTELIGENCE (NAI)

Umělá inteligence (AI) je v dnešní době jednou z nejrychleji rostoucích oblastí technologického rozvoje. V současnosti však i ty nejsložitější modely umělé inteligence využívají pouze „úzkou umělou inteligenci“ (Narrow Artificial Intelligence), která je nejzákladnější ze tří typů umělé inteligence [1].



Obr. 1 Druhy umělé inteligence [1]

NAI je druh AI, který je také známý jako „slabá“ AI. Přestože úkoly úzké umělé inteligence mohou být řízeny vysoce komplexními algoritmy a neuronovými sítěmi, přesto jsou jednotné a orientované na řešení jednoho vymezeného úkolu. NAI je kategorizována jako slabá ne proto, že jí chybí rozsah a moc, ale proto, že nedisponuje lidskými složkami, které přisuzujeme skutečné inteligenci [1].

4. SDS2 A „NARROW AI“

Na trhu je momentálně rozmanité množství softwarových řešení, která nabízejí víceméně velmi podobné, ale hlavně tradiční nástroje pro modelování a návrh detailů ocelových konstrukcí. Cestu k inovacím si v této sféře razí softwarové řešení SDS2 od Allplan, které využívá úzkou umělou inteligenci v návrhu ocelových přípojí. Schopnosti úzké umělé inteligence v rámci SDS2 umožňují automatizovat a optimalizovat proces modelování a návrhu přípojí následujícími způsoby:

- Optimalizuje materiály použité pro ocelové spoje a přípoje v projektu
- Optimalizuje přípoje na základě preferencí výrobního závodu
- Automatizuje tvorbu přípojí přímo ve 3D modelu
- Generuje přípoje, které jsou sestavitelné přímo ve výrobním závodě
- Generuje přípoje, které jsou sestavitelné v rámci montáže na stavbě

Tento přístup se odlišuje od konkurenčních softwarových řešení prioritně tím, že aktivně napomáhá inženýrům a konstruktérům s řešením návrhu ocelového přípoje a to v průběhu vytváření konstrukčního modelu ocelové konstrukce v modelovém prostředí SDS2. Automatický návrh přípojí využívá nastavení projektu, které informují „AI“ o tom, jak se očekává, že software zautomatizuje návrh přípoje v modelu.

AUTOMATIZOVANÝ NÁVRH PŘÍPOJŮ VE SPOJENÍ S UMĚLOU INTELIGENCÍ

SDS2 kombinuje následující segmenty údajů pro vytváření modelů s automatickými přípoji, které jsou zahrnují výpočty pro ověření jejich návrhu:

- *Specifikace projektu*
 - Informace týkající se konkrétního projektu, které se definují v nastavení projektu a kterým podléhá automatizace při vytváření modelu
- *Výrobní specifikace*
 - Informace týkající se preferencí a specifikací výrobního závodu, které se definují v nastavení projektu a kterým podléhá automatizace při vytváření modelu

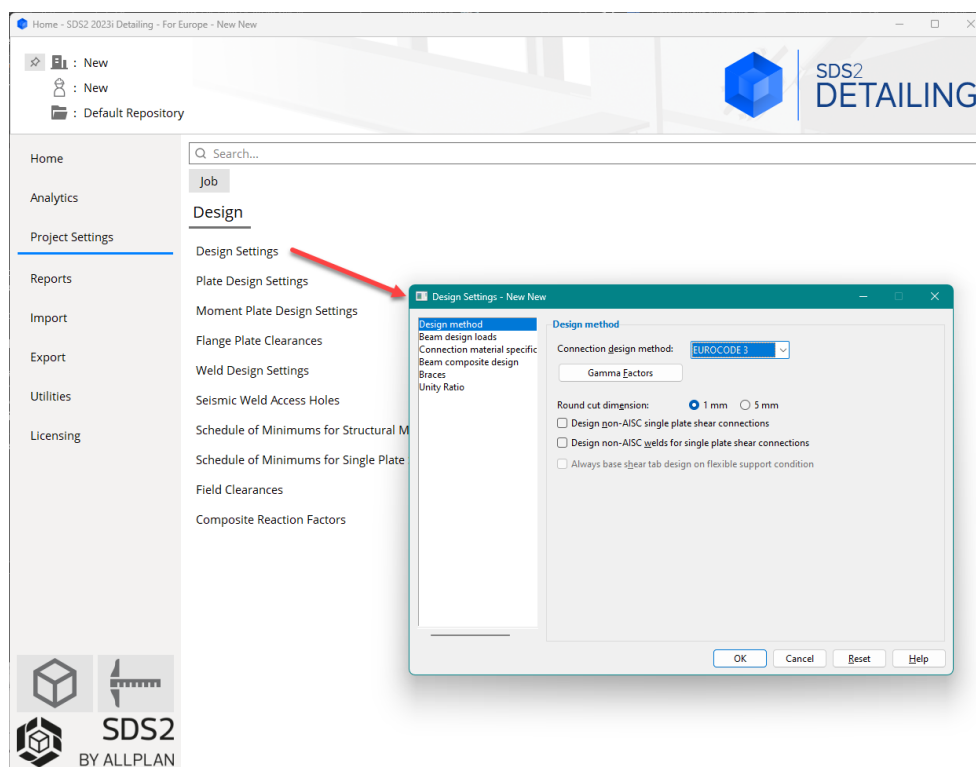
- **Zatížení**
 - Požadavky na koncové zatížení prvku pro každý konec ocelových nosníků a ztužidel, které určují návrh přípojí tak, aby se zajistila bezpečná a stabilní konstrukce
- **Ocelové profily**
 - Tvar, velikost, délka a hmotnost ocelových dílců, které mají své vlastní tolerance a vliv na návrh přípojí
- **Spojování ve styčnicích**
 - Podmínky, ve kterých se ocel spojuje, což ovlivňuje výrobu a montáž

Abychom pochopili, jak se informace z těchto oblastí navzájem kombinují a vedou k propojenému modelu, uvedu několik příkladů nastavení pro každý segment údajů a vysvětlím jak se „trénuje“ úzká umělá inteligence, aby konečným výsledkem byl automatizovaný návrh a model ocelového přípoje.

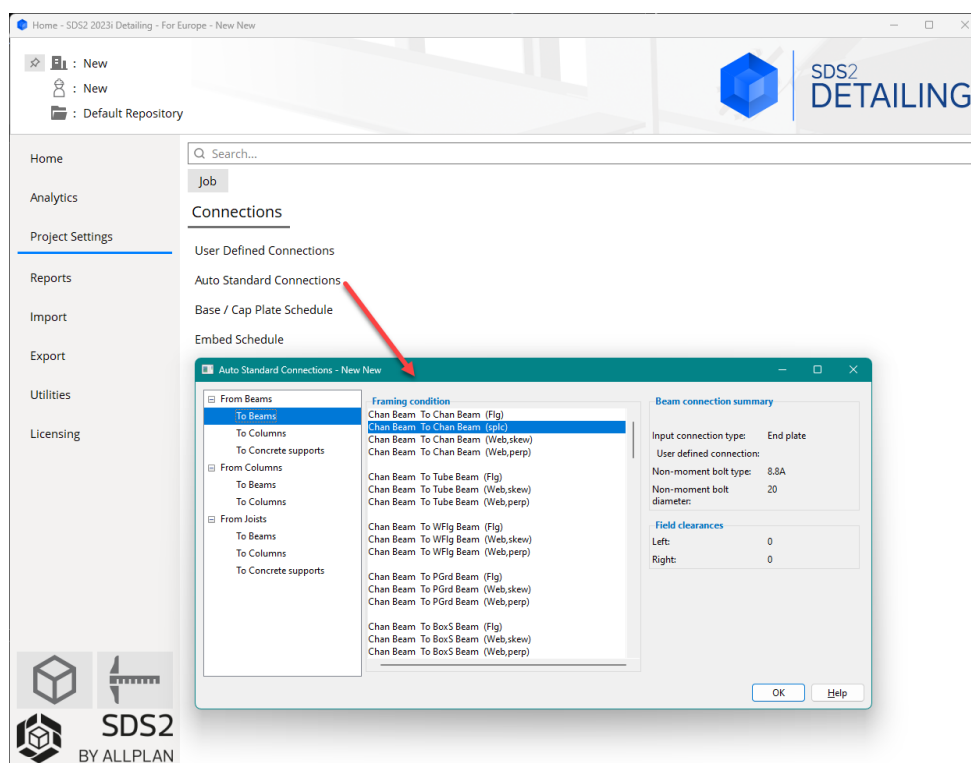
4.1. Specifikace projektu

Část specifikace pro projekt („Job“) definuje základní vstupy, kterým se automaticky přizpůsobuje nástroj pro modelování a návrh přípojí.

- preferovaná návrhová metoda na základě technické normy (Eurokód 3)
- upřednostňované typy automatizovaných standardizovaných přípojí ve styčnicích ocelové konstrukce (např. čelní deska)
- nastavení pro spojovací materiál



Obr. 2 Projektová nastavení pro návrhovou metodu přípojí

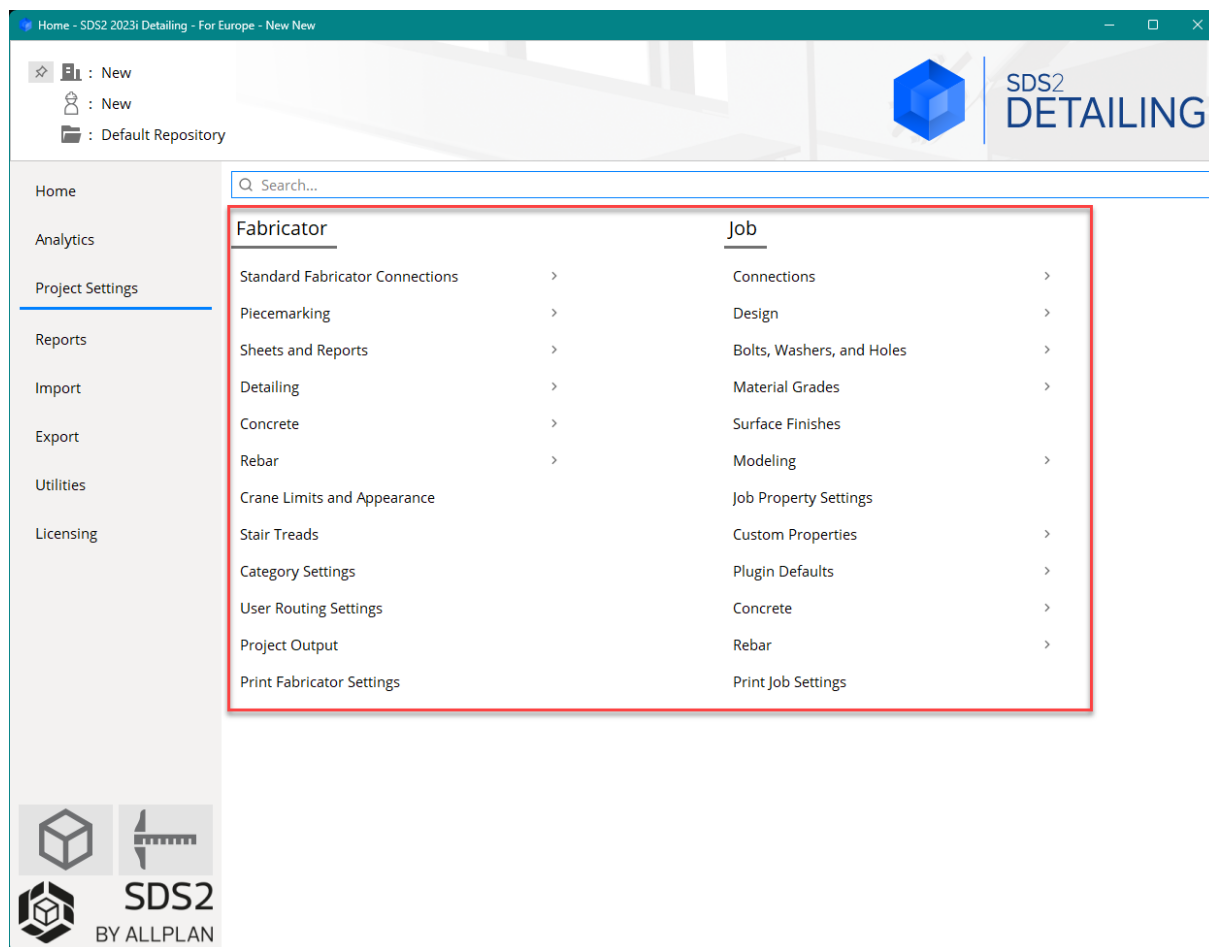


Obr. 3 Projektová nastavení pro automatizované standardizované připoje

4.2. Výrobní specifikace

Každý výrobní závod disponuje jinou kombinací zařízení, vybavení a naskladněných materiálů, které pomáhají jejich procesům maximalizovat efektivitu a snižovat odpadní množství. Automatické přizpůsobení modelu ocelové konstrukce těmto výrobním specifikacím zjednodušuje proces výroby. Jednoduché úpravy, jako je například předdefinovaný výběr ocelových desek s ohledem na minimalizaci odchylek v jejich tloušťkách, mohou vést k minimalizaci plýtvání materiálem na projektu. Takové specifikace a úpravy jsou automaticky zohledněny v případě návrhu přípojí řízeného umělou inteligencí SDS2. Zároveň se minimalizuje riziko plýtvání a snižuje chybovost návrhu jako tomu častokrát bývá v případě manuálního a pracného zadávání těchto informací pro každý přípoj samostatně.

Výsledkem je tedy šťihlejší a agilnější výrobní proces, který dodává ocelové výrobky nejvyšší kvality za kratší dobu, čímž se maximalizuje produktivita a ziskovost výrobců.



Obr. 4 Přehled nastavení pro projekt (Job) a výrobu (Fabricator)

4.3. Zatížení a ocelové profily

Všeobecný přístup k modelování ocelové konstrukce a návrhu přípojů můžeme zjednodušeně shrnout v následujících bodech:

1. 3D model ocelové konstrukce
2. MKP analýza
3. Návrh a modelování ocelového přípoje
4. Posouzení ocelového přípoje

V případě, že ocelový přípoj nevyhovuje, tak je nutné přípoj upravit a opětovně posoudit. SDS2 přistupuje k tomuto problému jako k součásti v procesu modelování. Pokud uživatel disponuje údaji o koncových vnitřních silách ocelového prvku, tak tyto hodnoty mohou být zadány jako vstupy v nastaveních daného prvku. Následně při automatickém vytváření přípoje jsou tyto hodnoty zohledněny a přípoj je navržen tak, aby přenesl dané zatížení.

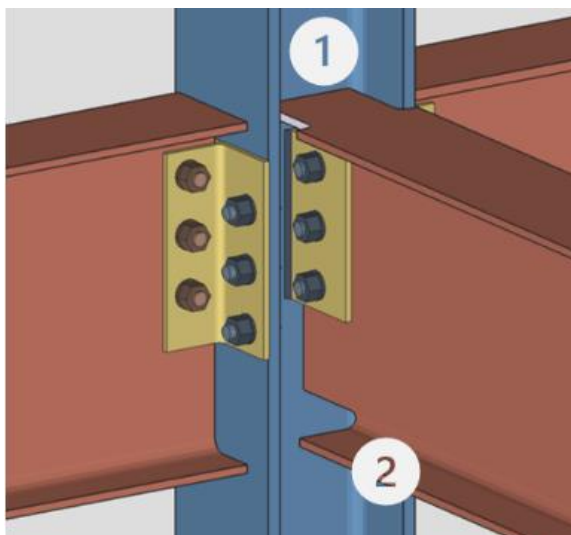
Obr. 5 Vstupní hodnoty pro koncové síly a typ profilu ocelového prvku

Pokud koncové síly ocelových prvků nejsou uživatelem definovány, tak SDS2 umožňuje použití univerzálního konstrukčního zatížení, které je definováno ve specifikacích projektu a bude použito při návrhu přípojí.

4.4. Spojování ve styčnicích

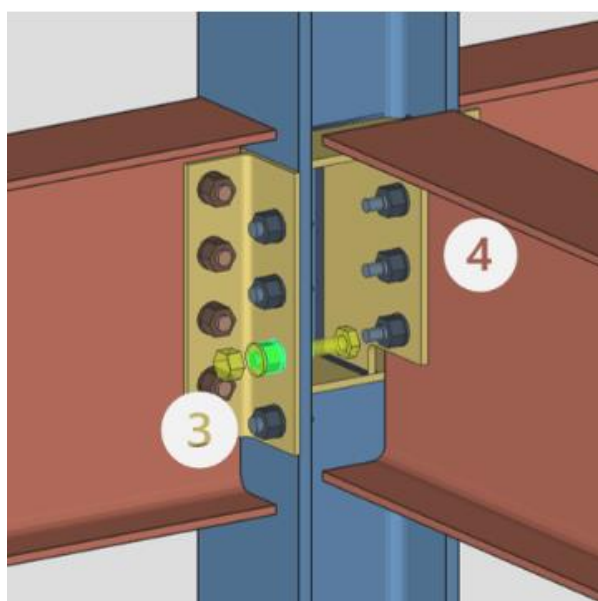
Poslední komponentou, která pomáhá řídit úzkou AI při návrhu přípojí, je způsob, jakým software analyzuje spojování ve styčnicích. SDS2 dokáže vyhodnotit, zda nosník spolu se sloupem vytváří rámovou konstrukci, zohledňuje tvar a typ připojovaných ocelových profilů, na jaké ploše se spojují, jaké jsou potřebné světlé vzdálenosti pro montáž a jak každý přípoj mezi sebou interaguje v daném uzlu. SDS2 automaticky rozpozná v době zadávání vstupů, zda jsou potřebné geometrické úpravy prvků a minimální odstupy specifické pro zvolený druh montáže a přizpůsobí je tak, aby se zabránilo kolizím a ne jen k jejich detekci.

1. Automatické ořezávání pásnic
 - přípoj nosníku ke stěně sloupu malého profilu
2. Automatické ozuby pro montážní postupy na stavbě
 - ozub dolní pásnice nosníku, který zajišťuje, aby se nosník osadil na místo pomocí jeřábu bez kolize s deskou přípoje



Obr. 6 Automatické kontroly a úpravy uvedené v bodech 1 a 2

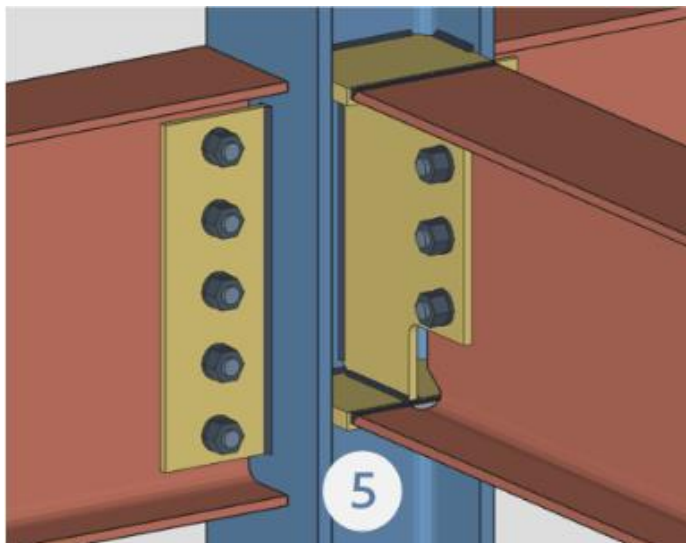
3. Odstupy pro utahování šroubů
 - software automaticky kontroluje odstupy a zabráňuje přípojem, které by mohly vést ke kolizím,
 - SDS2 disponuje funkcí "kontrola šroubů" pro přípoje se stísněnou manipulací při montáži a slouží jako manuální kontrola
4. Odstupy pro rázový utahovák
 - některé nástroje vyžadují minimální odstup pro bezpečné utažení šroubů
 - takové zohlednění je součástí úzké AI a v situacích, kdy se daný přípoj nedá smontovat – SDS2 navrhne přípoj s dostatečnými odstupy v rámci eliminování nákladných chyb na stavbě a prací navíc



Obr. 7 Automatické kontroly a úpravy uvedené v bodech 3 a 4

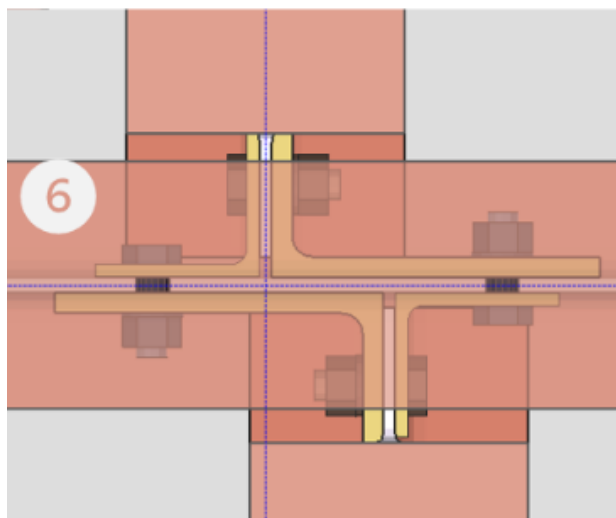
5. Kontroly spojování ve styčnicku
 - tyto všeobecné kontroly zabezpečují, aby přípoje vedle sebe nekolidovaly, ať už se jedná o ocelový prvek, šrouby nebo svary

- úzká umělá inteligence SDS2 vždy navrhne a použije alternativní připojení v případě, že první přípoj je nevyhovující



Obr. 8 Automatická kontrola a úprava uvedená v bodě 5

6. Sdílené nebo protichůdné přípoje
 - v případě sdílených a protichůdných připojení bude SDS2 hledat možnosti pro úsporu materiálu s návrhem přípoje se sdílením otvorů pro šrouby, resp. jeho úpravou podle potřeby

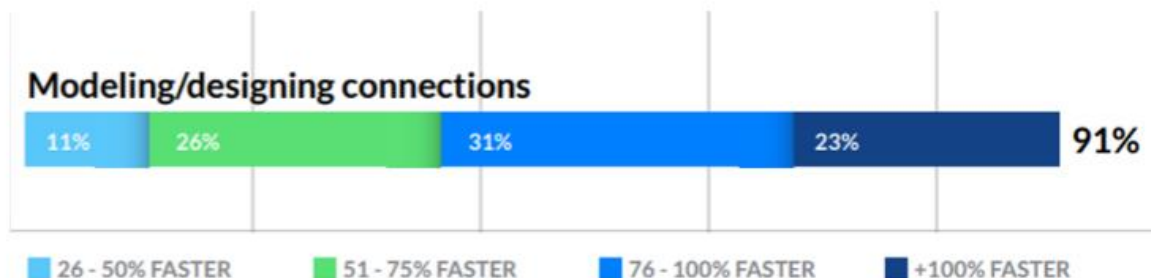


Obr. 9 Automatická kontrola a úprava uvedená v bodě 6

5. VÝHLED DO BUDOUCNOSTI A DOPAD AUTOMATIZACE NA PRODUKTIVITU PRÁCE

Dnes už s jistotou dokážeme prohlásit, že neustálý pokrok v technologii umělé inteligence a ve vývoji softwarových řešení vytváří prakticky neomezené možnosti pro zlepšení pracovních

postupů a optimalizace návrhů stavebních nosných konstrukcí. V nedávném průzkumu mezi uživateli SDS2 respondenti potvrdili zvýšení v jejich produktivitě a efektivitě práce, a to v důsledku využití automatizovaného návrhu a modelování ocelových přípojí. Všichni respondenti průzkumu uvedli alespoň určité zvýšení produktivity připisované této automatizaci.



Obr. 10 Výsledek průzkumu o zvýšení produktivity práce s využitím automatizace návrhu ocelových přípojí v SDS2

Z uvedeného vyplývá, že automatizace má sloužit jako jednoznačné řešení pro často se opakující a časově náročné úkoly, se kterými se inženýři a konstruktéři potýkají na denní bázi. Automatizace ve spojení s umělou inteligencí dokáže s určitostí zajistit, aby se jednotlivé procesy návrhu a výroby stavebních konstrukcí staly přesnější, efektivnější a ekonomičtější.

LITERATURA

- [1] SAP(n.d.). Čo je to umelá inteligencia?[online]. Dostupné na internetu: <https://www.sap.com/sk/products/artificial-intelligence/what-is-artificial-intelligence.html>
- [2] SDS2.com(2024). Dostupné na internetu: <https://sds2.com/>

Ing. Šimon Racek (*1992)

Absolvent stavební fakulty STU v Bratislavě.

Působí jako produktový specialista ve společnosti Allplan Slovensko s.r.o.

INTELIGENTNÍ DUSÍKO-METHANOLOVÁ VSTŘIKOVACÍ TRYSKA PRO NAUHLIČOVÁNÍ A KALICÍ ATMOSFÉRY

PŘÍPADOVÁ STUDIE

Za Air Products:

Juda Čížkovský, Aplikační specialista Air Products pro CZ, SK, HU

cizkovj@airproducts.com

Maximus Akuh, Tim Nitsch a Guido Plicht

Za Steinbach GmbH & Co KG:

Felix Steinbach, Technologie kalení

Wuppertal, Německo

f.steinbach@haertetechnik-steinbach.de

Abstrakt:

Inovativní vstříkovací tryska Smart Lance se používá na mnoha pracovištích k automatickému vyhodnocování tvorby atmosféry. Pro dosažení optimálních výsledků je instalována v kombinaci s dalšími prvky z řady Air Products Smart Technology (APST), které zajišťují monitorování a vizualizaci procesů včetně dokumentace a řízení případné preventivní údržby. Při testování v reálných aplikacích byly zjištěny její následující vlastnosti: zajišťuje spolehlivý zdroj ochranné atmosféry s minimálním tolerančním rozmezím jejího složení, zvyšuje produktivitu díky menšímu počtu cyklů vypalování a kratším dobám zpracování vsázky, snižuje počet zmetkovitostí, snižuje náklady na atmosféru, dokumentuje atmosféru a procesní parametry v souladu s normami CQI-9, indikuje provádění preventivní údržby během plánovaných odstávek a snižuje časové ztráty na odstraňování závad při poruchách pece.

V procesu tepelného zpracování uhlíkových ocelí se používá přizpůsobených pecních atmosfér pro dosažení požadovaných cílových vlastností materiálu. Existují dva hlavní důvody pro použití řízené atmosféry. Může to být požadavek na reaktivní atmosféru. Nebo to může být požadavek na ochrannou atmosféru, nebo její na rovnovážný stav se složkou v povrchu zpracovávané vsázky.

Tato studie se zabývá atmosférami obsahujícími uhlík pro tepelné zpracování uhlíkových ocelí, které mohou být vyrobeny pomocí generátorů endoplynu, nebo přímým vstřikováním dusíku a methanolu.

Generátory endoplynu vyrábějící atmosféru ze zemního plynu se široce používají při tepelném zpracování, jako je naucehčování, kalení a žíhání součástí z uhlíkové oceli. V dnešním světě je stále více v centru pozornosti udržitelnost a ekologie provozu. Z tohoto pohledu generátory zatěžují životní prostředí emisemi, které se v budoucnu mohou ještě zvýšit v důsledku výroby umělého zemního plynu. Kromě toho generátory endoplynu musí mít v režimu zálohy další generátor na provozní teplotě, čímž se zbytečně spotřebovává energie, která se přímo nepodílí na výrobě.

Tyto a další faktory vedou společnosti zabývající se tepelným zpracováním k hledání jiného řešení. Osvědčenou alternativou je již dlouhou dobu známé použití dusíku a methanolu k výrobě potřebné směsi oxidu uhelnatého (CO), vodíku (H₂) a dusíku (N₂).

Společnost Air Products vyvinula novou dusíko-methanolovou trysku, která dosahuje takřka ideálního štěpení methanolu na CO a H₂ prostřednictvím optimální atomizace methanolu v komoře pece a současně zajišťuje spolehlivý proces s vyšším výkonem a sníženým počtem zmetků.

Následující studie ilustruje výhody dosažené při praktickém provozu komorové pece ve společnosti Härtetechnik Steinbach GmbH & Co. KG ve Wuppertalu v Německu.

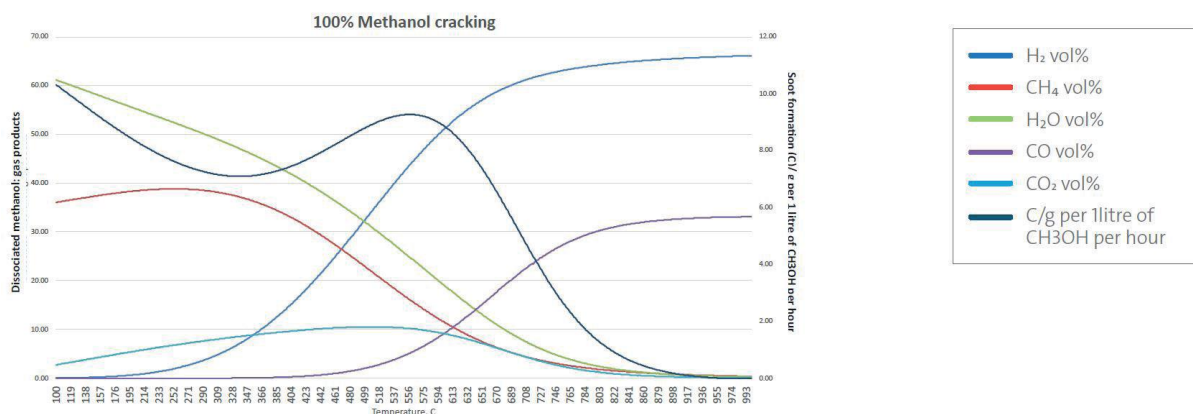
1. DUSÍKO-METHANOLOVÝ PROCES

Použití dusíku a methanolu při tepelném zpracování na zajištění ochranné atmosféry při neutrálním žhání, kalení nebo nauhličování je dobře známé. Atmosféra vytvořená na bázi methanolu je jednoduchou a praktickou alternativou k atmosféře z generátoru endoplynu a při použití má vysokou míru flexibility s možností přesného řízení.

Dusík a methanol se skladují na místě v nádržích. Alternativně lze dusík vyrábět v areálu provozovny. Obě média mohou být odebírána podle potřeby konkrétního složení atmosféry v peci. To umožňuje přesně řídit obsah CO v atmosféře a snížit tak emise CO₂. Pokud v průběhu procesu není potřeba reaktivní nebo ochranná atmosféra, tryska se jednoduše vypne. Nespotřebovává se žádná energie, na rozdíl od generátoru endoplynu, který je třeba udržovat v pohotovostním režimu.

Teoreticky může být složení atmosféry generované štěpením methanolu při teplotách vyšších než 800 °C srovnatelné se složením z generátorů endoplynu v závislosti na reakci štěpení:

$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2 \cdot \text{H}_2$ s vedlejšími produkty CO₂ a H₂O (Graf 1)

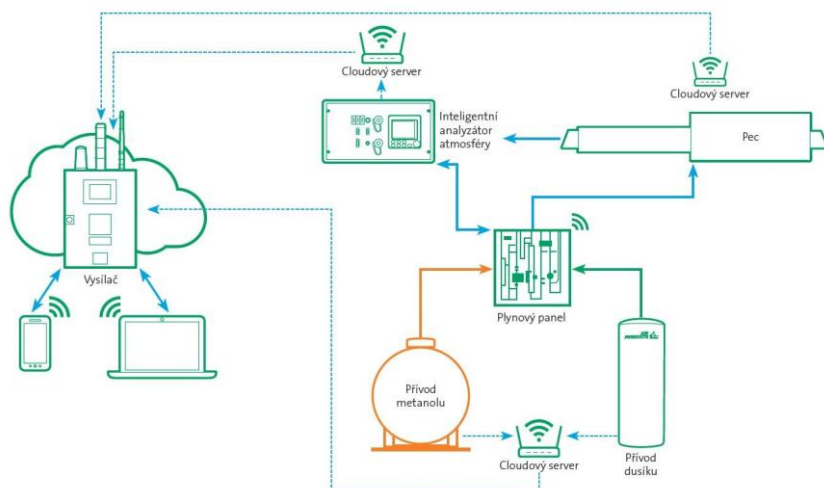


Graf 1: Simulace štěpení methanolu v softwaru FactSage

V praxi se však dosahuje optimálního složení pouze pokud je vstřikování methanolu do pece realizováno v takové míře, aby docházelo ke štěpení methanolu z kapalně fáze přímo za vysoké teploty pece. Schéma 1 znázorňuje variace složení methanolu při štěpení za různých teplot ze simulace v programu FactSage. Pomalý ohřev methanolu s odpařováním při teplotách nad 400 °C vede k vysokému obsahu sazí.

Při teplotách nad 850 °C se většina plynu štěpí na požadovaný oxid uhelnatý a vodík. Vedlejší nežádoucí produkty, jako např. CH₄, H₂O, CO₂ a saze vznikají jen ve velmi malém množství.

Vývojový tým společnosti Air Products s dlouholetými zkušenostmi v oblasti zpracování kovů si stanovil úkol optimalizovat vstřikování dusíku a methanolu a vyvinul inteligentní trysku, která umožňuje přesné řízení atmosféry a k tomu má několik dalších vyšších funkcí. Schéma zapojení systému při kompletní instalaci včetně řízení atmosféry je znázorněno na obr. 1.



Obr.1 Instalace dusíko-methanolové trysky

2. Inovativní inteligentní dusíko-methanolová tryska (Smat Nitrogen-Methanol Lance) a systém „Air Products Smart Technology“ (APST)

Na základě praktických aplikací v průmyslu a provedených optimalizací byly pro dosažení požadovaného štěpení methanolu identifikovány následující klíčové body:

- Pokud methanol kape přes trysku na kovovou desku v peci, způsobuje to jeho pomalé odpařování a vede k vyššímu obsahu sazí, CO_2 , H_2O a CH_4 . V generované atmosféře je vyšší obsah H_2O a dochází k vyšší spotřebě nahličujícího plynu. Tím se zvyšuje koncentrace CH_4 , což má za následek ještě vyšší tvorbu sazí.
- Je třeba zabránit pomalému zahřívání (odpařování) a štěpení methanolu při nízké teplotě uvnitř trysky. Vytváří se saze, které mohou ucpat trysku a také vzniká zvýšený obsah CO_2 a H_2O .
- V peci musí být vytvořeno homogenní rozložení jemného methanolového aerosolu (mikrometrová velikost částic), což poskytuje velkou plochu povrchu, aby se dosáhlo maximálního štěpení na CO a H_2 , čímž se sníží tvorba nežádoucích vedlejších produktů jako je CO_2 a H_2O . Vytváření aerosolu znamená, že methanol musí vstoupit do atmosféry pece ještě v kapalném skupenství.
- V případě zděné pece nesmí být methanol rozstříkván na zdivo. Způsobilo by to pomalé odpařování s tvorbou CO_2 a H_2O a sazí.
- Sledování teploty a tlaku obou médií v trysce může v reálném čase poskytnout informace o jejím stavu. Tímto způsobem lze správně nastavit parametry trysky a odhalit případné zhoršení jejího stavu v peci dříve, než dojde k tvorbě nekvalitní atmosféry nebo selhání systému.

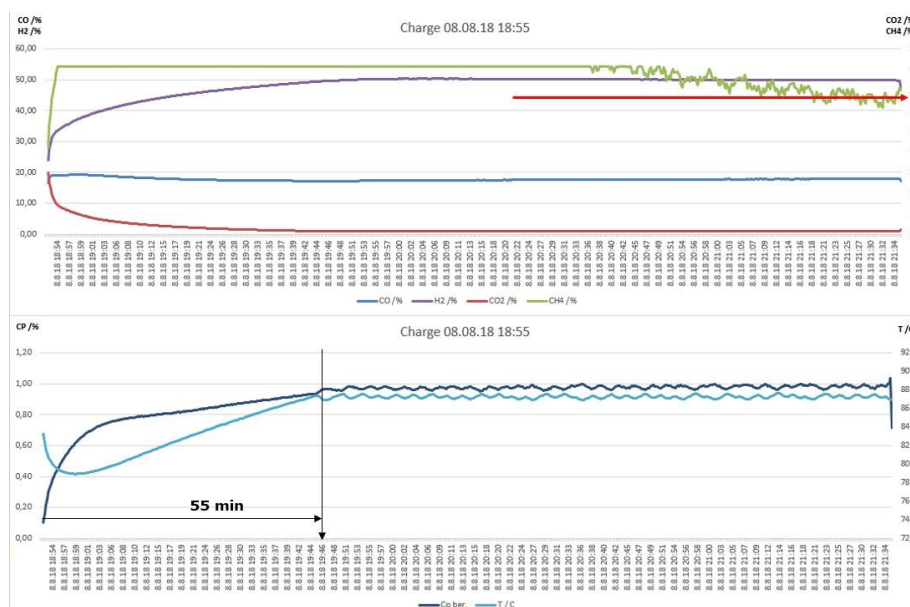
Tyto požadavky pro dosažení optimálního výkonu byly zohledněny při vývoji nové inteligentní trysky. Výsledky a výhody dosažené s inteligentními tryskami ve srovnání se stávajícími konvenčními tryskami jsou uvedeny níže.

3 INTELIGENTNÍ TRYSKA VE SROVNÁNÍ S BĚŽNOU DUSÍKO-METHANOLOVOU TRYSKOU

3.1 ÚVOD

Před instalací nové dusíko-methanolové trysky bylo provedeno dlouhodobé měření, které zaznamenalo stávající parametry atmosférické co největšího počtu různých tepelně zpracovávaných šarží. Údaje získané z takové analýzy atmosféry v peci tvoří základ pro následné porovnání s provozem inteligentní trysky a zviditelňuje přímé rozdíly a jejich krátkodobé přínosy. Dlouhodobé přínosy, jako je prodloužení cyklů vypalování nebo snížení počtu zmetků díky preventivní údržbě, se pak dají zjistit z porovnání delších časových úseků provozu.

Následující studie byla provedena na komorové peci vybavené konvenční dusíko-methanolovou tryskou instalovanou v blízkosti dmychadla, která vypouští methanol na ventilátor. Pro pozdější srovnání byly zaznamenány profily různých atmosfér při nauhličování a kalení. Příklad měření šarže ukazuje graf 2.



Graf 2: Příklad vsázkové analýzy s konvenční tryskou

Na výše uvedeném diagramu byla vsázka tepelně zpracována při teplotě 870 °C, která byla udržována 1 hodinu a 46 minut. Stabilizace atmosféry v peci trvala 55 minut. To je doba, za jakou atmosféra dosáhla požadované hodnoty uhlíkového potenciálu (C_P), který byl v tomto případě nastaven na 1,0 %. Na rychlost stabilizace C_P mají vliv různé parametry, např. teplota, rychlost vstupu oxidačních médií a složení atmosféry, které závisí na kvalitě štěpení methanolu. Jak již bylo vysvětleno, nekvalitní štěpení má za následek vyšší množství H_2O a CO_2 , které je třeba redukovat přidáním většího množství nauhličujícího plynu (zemního plynu nebo propanu), což zase může vést k větší tvorbě sazí. Prodlužuje se také doba potřebná na stabilizaci atmosféry v peci. Doba stabilizace atmosféry, zejména pokud je delší než doba ohřevu vsázky, lze považovat za neproduktivní čas náročný na zdroje. Zkrácení této doby snižuje výrobní náklady a výrazně zvyšuje produktivitu. Za zmínku stojí také to, že povrch vsázky a teplota procesu také ovlivňují složení atmosféry.

O tom, že se po dosažení C_P v atmosféře pece nachází příznivý stav požadovaných plynů svědčí nízký obsah zbytkového CH_4 . To také naznačuje dobré štěpení methanolu a dobře nastavené přidávání nauhličujícího plynu k regulaci nastaveného bodu C_P v peci. Není tedy

nutné přidávat nadměrné množství nahličujícího plynu ke kompenzaci vnějších vlivů (jako je CO_2 , H_2O nebo vnikání vzduchu).

3.2 INSTALACE INTELIGENTNÍ DUSÍKO-METHANOLOVÉ TRYSKY SMART LANCE

Po analýze pecní atmosféry vytvořené pomocí konvenční methanolové trysky byla na stejné peci použita inteligentní tryska Air Products.

Inteligentní tryska se skládá ze dvou částí:

- samotné methanolové a dusíkové vstřikovací trysky, obvykle instalované přes střechu pece (obr. 2a),
- komunikační jednotky a zařízení pro sběr dat (obr. 2b).



Obr. 2a Tryska Smart Lance, Obr. 2b Komunikační jednotka

Obě součásti spolu komunikují prostřednictvím Wi-Fi. Komunikační jednotka shromažďuje v reálném čase údaje o tlaku a teplotě methanolu a dusíku proudící přes trysku do pece. Zpracovává a poskytuje okamžitou zpětnou vazbu o stavu trysky a prostřednictvím zeleného, žlutého a červeného světla stav signalizuje na komunikační jednotce. Data jsou nahrávána do cloudového serveru k dalšímu zpracování, pro vizualizaci a archivaci. Okamžitá zpětná vazba je následující:

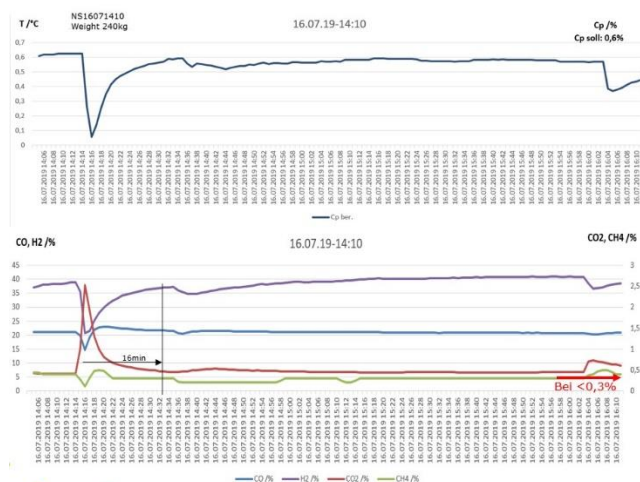
- Zelená kontrolka: vstřikování funguje správně.
- Žlutá kontrolka: atmosféra je stále optimální, ale je potřeba provést kontrolu systému (např. kontrolu trysky a přívodu média). Pokud není zřejmý žádný problém s přívodem médií, je vhodné provést preventivní údržbu a kontrolu trysky při prvním zastavení výroby.
- Červená kontrolka znamená, že buď teplota nebo tlak, methanolu nebo dusíku je mimo požadovaný rozsah. Aby nedošlo k neplánovanému zastavení výroby, je třeba co nejdříve zkontrolovat přívod média a trysku.

Náročnost instalace inteligentní trysky do pece je srovnatelná s konvenčními tryskami. Po instalaci trysky do komory pece se nastaví komunikační jednotka a po spárování s tryskou prostřednictvím sítě WLAN je pec připravena k provozu.

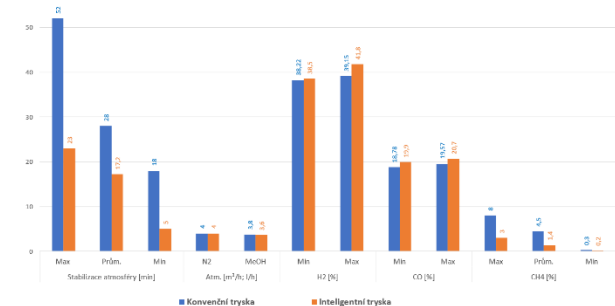
V rámci studie byly pomocí analyzátoru plynů měřeny také hladiny CO , CO_2 , H_2 a CH_4 . Nastavení průtoku médií bylo stejné jako u běžné trysky. Po dosažení teploty $750\text{ }^\circ\text{C}$ se složení atmosféry poměrně rychle ustálilo a po celou dobu měření bylo na stálých hodnotách. Koncentrace CO a H_2 byla stabilní a vyšší než u konvenční trysky se stejnými průtoky N_2 a CH_3OH . Po získání standardních hodnot 20 % CO a 40 % H_2 byl průtok methanolu o něco snížen, což mělo první pozitivní vliv na snížení nákladů.

Na grafu 3 jsou uvedeny výsledky tepelného zpracování 240kilogramové vsázky žíhané při teplotě 870 °C po dobu 40 minut. Stabilizace atmosféry trvala pouhých 16 minut, což výrazně přispělo ke zvýšení produktivity.

Srovnání výkonnosti obou trysek je shrnuto v grafu 4. V obou případech byla provedena měření při běžné výrobě se smíšenými šaržemi. Celkem bylo analyzováno 32 vsázek pro konvenční trysku a 28 vsázek pro inteligentní trysku.



Graf 3: Příklad vsázkové analýzy s inteligentní tryskou



Graf 4: Přímé srovnání konvenční a inteligentní trysky

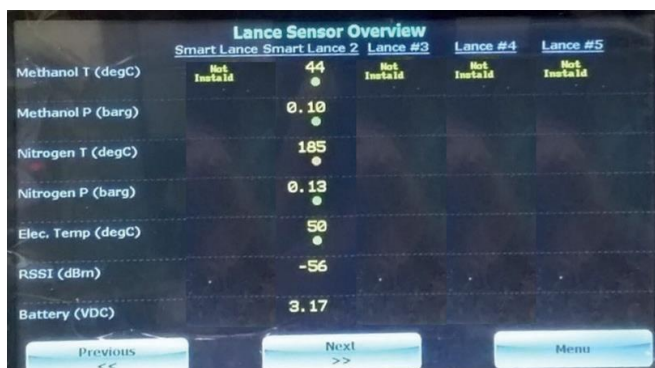
3.3 VÝHODY DOSAŽENÉ TRYSKOU SMART LANCE

Štěpení methanolu, jak je uvedeno v grafu výše, bylo u inteligentní trysky výrazně lepší, což potvrzuje její vysokou účinnost. V souhrnu bylo dosaženo následujících výhod:

- Vyšší koncentrace požadovaných složek CO a H₂ v pecní atmosféře při stejných průtocích methanolu a dusíku.
- Nižší koncentrace nežádoucích složek H₂O, CO₂ a CH₄.
- Pro dosažení stejného složení atmosféry jako při použití konvenční trysky bylo možné snížit průtok methanolu, čímž byly dosaženy jeho úspory.
- Díky vylepšenému štěpení došlo ke zkrácení času stabilizace atmosféry, což vedlo ke zvýšení produktivity.
- To bylo doprovázeno snížením množství zemního plynu použitého k dosažení uhlíkového potenciálu.

■ A vzhledem k nižšímu obsahu CH_4 v atmosféře se snížilo množství sazí v peci, čímž se snížil počet cyklů vypalování, což rovněž vedlo ke zvýšení produktivity.

Stav inteligentní trysky v reálném čase si můžete prohlédnout na komunikační jednotce prostřednictvím alarmových zpráv a na displeji, který zobrazuje teplotu a tlak obou médií v trysce v reálném čase (obr. 3). Teplota methanolu v tomto příkladu je $44\text{ }^{\circ}\text{C}$, což znamená, že je stále v kapalném stavu. Tlak je 0,1 baru, což naznačuje, že nedochází k ucpávání trysky. Nárůst tlaku by znamenal možné ucpání trysky a vyžadoval by pozornost obsluhy. Za dobu pozorování více než rok v běžné praxi tryska vykazovala stabilní provozní parametry.



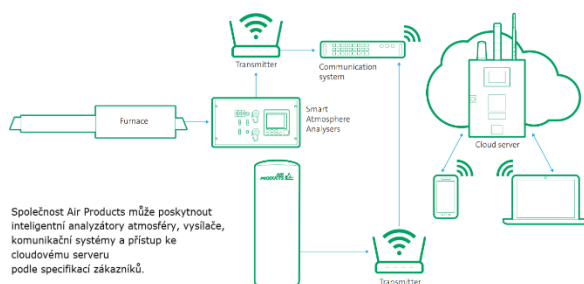
Obr. 3: Snímek obrazovky stavu trysky SMART LANCE

3.4 INTELIGENTNÍ MONITOROVACÍ SYSTEM (APST)

Kromě inteligentních trysek firma Härtetechnik Steinbach využívá také systém APST, díky kterému zvyšuje produktivitu a snižuje náklady. Jedná se o cloudový systém pro sledování a vizualizaci procesních dat, jak je znázorněno na obr. 4 a grafu 5.

Hlavní výhody systému:

- Vizualizace a dokumentace parametrů procesu a volitelně i atmosféry s podporou normy CQI-9.
- Provádí se historické srovnání trendů, které vyhodnocují provozní parametry a umožňují optimalizaci procesu.
- Online dálkové sledování důležitých procesních dat umožňuje přístup z jakéhokoli počítače nebo telefonu s připojením k internetu.
- Upozorňování prostřednictvím e-mailu nebo SMS.
- Záznam dlouhodobých trendů pro sledování kritických ukazatelů výkonnosti s prezentací anomálií.



Obr. 4 - Schéma zapojení APST



Graf 5 – On-line vizualizace APST dat

4. SHRnutí

Inovativní inteligentní tryska v kombinaci se systémem APST společnosti Air Products se již v běžné výrobní praxi používá k dosažení optimálních výsledků atmosféry, monitorování a vizualizaci procesů včetně dokumentace a hlášení případné preventivní údržby.

Z provozu v reálných aplikacích ve společnosti Härtetechnik Steinbach byly zaznamenány následující výhody:

- zajištění spolehlivého přívodu ochranné atmosféry v úzkém tolerančním rozsahu,
- zvýšení produktivity díky menšímu počtu vypalovacích cyklů a zkrácení doby náběhu pece,
- snížení zmetkovitosti,
- snížení nákladů na atmosféru,
- dokumentace atmosféry a procesních parametrů v souladu s normami CQI-9,
- indikace pro provádění preventivní údržby během plánovaných odstávek, čímž se snižují časové ztráty.

ROZNOS LOKÁLNÍHO ZATÍŽENÍ PŘES SKLADBU TEPELNÉ IZOLACE NA PLOCHÝCH STŘECHÁCH S TRAPÉZOVÝMI PLECHY

Ing. Michal Strejček, Ph.D.¹, prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.²

¹ Kovové profily, s.r.o. (za AsoTra)

² Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze

¹ strejcek@kovprof.cz, ² michal.jandera@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Instalování fotovoltaických elektráren na konstrukce plochých střech, kde nosným prvkem opláštění jsou trapézové plechy, je široce diskutované téma především z pohledu statického návrhu. Konstrukce pod fotovoltaickými panely totiž významně mění charakter uvažovaného zatížení z plošného na lokální, což projektant trapézových plechů musí v návrhu uvážit. Při posuzování působení lokálního zatížení lze s výhodou uplatnit distribuci zatížení mezi sousedícími vlnami profilu, dokázanou několika experimentálními studiemi. Předkládaný článek se zabývá možností zahrnutí vlivu střešního souvrství, jehož tuhost může přispět k celkovému roznosu zatížení. Tato úvaha byla prověřena v experimentální studii na několika typech souvrství, které jsou používány v dnešní praxi.

1 Úvod

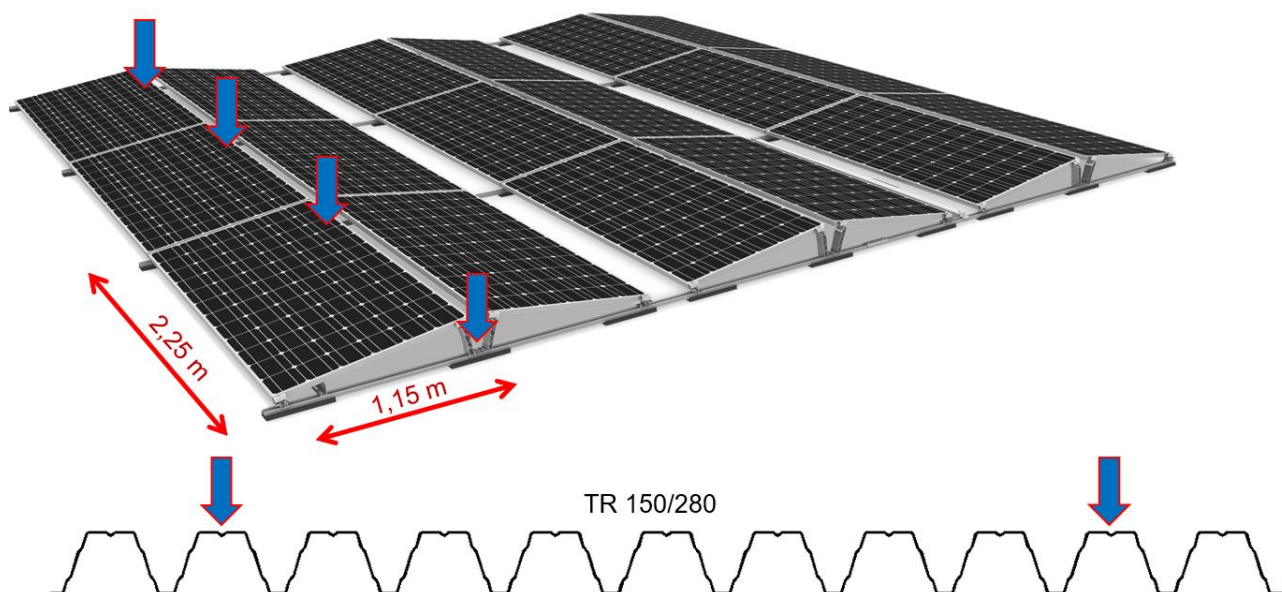
Trapézový profil je často používán jako nosný prvek opláštění plochých střech průmyslových i občanských budov. Svým tvarem je předurčen pro přenášení především plošných zatížení. Na působení osamělých břemen je z hlediska globální i lokální statické únosnosti velmi citlivý. Požadavky na umístění ojedinělých břemen v ploše střechy lze řešit lokálním zvýšením dimenze profilu, případně vyztužením vlny výztuhou z ohýbaného ocelového plechu ve smyslu ČSN EN 1090-4 [1] či ČSN EN 1993-1-3 [2]. Pokud na střešní plášť působí více břemen, je nezbytné posoudit únosnost trapézových plechů detailněji, a to z důvodů bezpečnostních i ekonomických.

Případem početných lokálních břemen v pravidelném rastru na velké ploše střechy jsou fotovoltaické elektrárny (dále FVE), viz obr. 1.



Obrázek 1 – Fotovoltaická elektrárna na ploché střeše (Logistické centrum LIDL Buštěhrad)

Systémy podpůrných konstrukcí FVE jsou často řešeny skloněnými rámy z hliníkových profilů, na které jsou montovány fotovoltaické panely (dále FV panel). Na obr. 2 je zobrazen nejběžněji užívaný tzv. gravitační systém, který umožňuje výhodnou instalaci bez penetrace hydroizolace. Systém musí odolat také účinkům větru, a proto je nutné jej stabilizovat balastem – běžně betonovými bloky, které zvyšují celkové zatížení střechy. Rámy jsou podloženy speciálními lokálními podložkami z materiálu EPDM, přičemž jejich půdorysné rozmístění je v pravidelném rastru určeném zpravidla velikostí FV panelu cca 1,15 x 2,25 m. Přes kontaktní plochu podložek je zatížení z FV panelu dále distribuováno do střešního pláště. FV panely zakrývají velkou část střešního pláště, čímž veškerá plošná zatížení na panelech spočívající (vlastní hmotnost FVE, sníh a vítr) přetvářejí na pravidelnou síť lokálních břemen. Z celkového rovnoměrného zatížení, které působí na střešní plášť, může být takto transformována jeho převážná část, a to 60 % i více. Na příčném řezu při spodním okraji obr. 2 je zobrazena reálná situace rozmístění podložek – břemen nad trapézovým profilem typu s označením TR 150/280 (150 mm výška vlny / 280 mm skladebná šířka vlny), kdy delší rozměr FV panelu je orientován ve směru kolmém na vlny profilu. Většina z celkového rovnoměrného zatížení je tak koncentrována nad každou 8. vlnou. I za předpokladu částečného spolupůsobení vln profilu je zřejmá značná nerovnoměrnost zatížení, kterou je v návrhu nezbytné zohlednit preciznějšími postupy výpočtu.



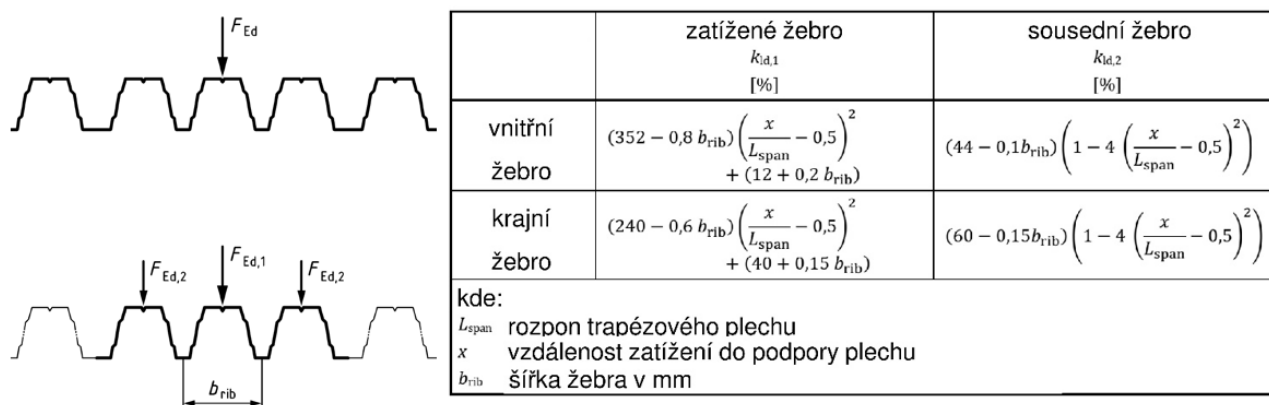
Obrázek 2 – Gravitační podpůrný systém pro FV panely a umístění nad trapézovým profilem TR 150/280

2 Příčný roznos lokálního zatížení v trapézovém profilu

Z dostupné literatury plyne, že při působení lokálního zatížení dochází k částečné distribuci mezi sousedními vlnami trapézového profilu [3,5]. Současně platná norma ČSN EN 1993-1-3 [2] pro posuzování tenkostěnných konstrukcí neposkytuje projektantům pro využití v praxi jakýkoliv návod na vyčíslení této distribuce. Jedinými možnými způsoby, jak distribuci výpočetně stanovit, jsou tak připravovaný eurokód nové generace pro tenkostěnné konstrukce prEN 1993-1-3 [4] nebo některá z již provedených experimentálních studií [5].

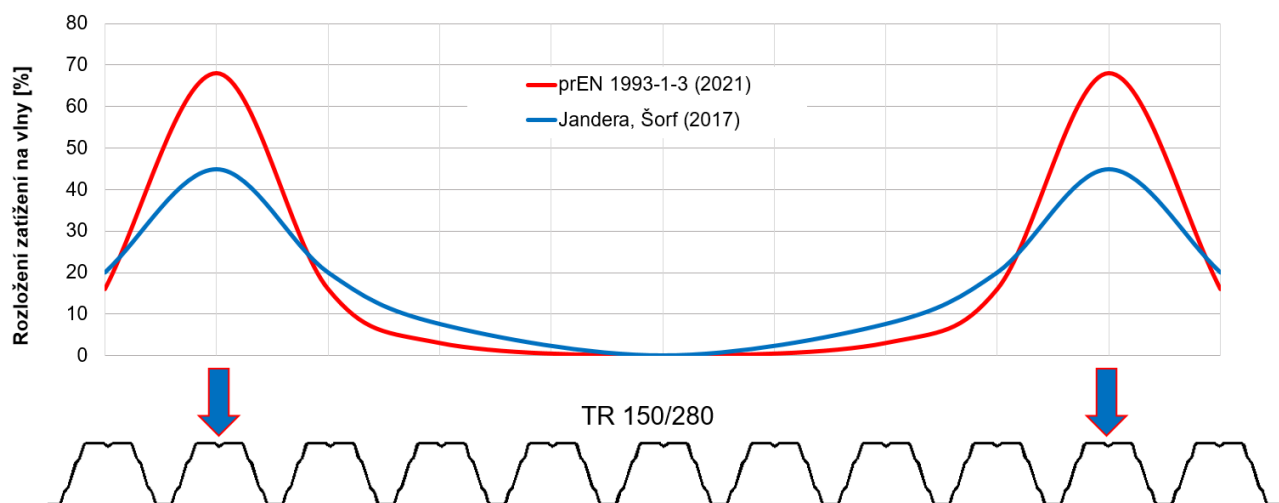
Zmíněný připravovaný Eurokód uvažuje s roznosem do prvních sousedících vln na obě strany od přímo zatížené vlny, viz obr. 3. Zavádí pojem „zatížené žebro“ a „sousední žebro“. Výsledné přetížení každého z žeber (dále v textu je využíván zavedený výraz vlna) je vyjádřeno v procentech z původního aplikovaného zatížení a je dáno skladebnou šířkou vlny a umístěním břemene vůči bližší podpoře. Pro řešený případ s profilem TR 150/280 a břemenem

uprostřed rozpětí mezi dvěma podporami činí výsledný roznos 68 % pro zatíženou vlnu a 16 % pro vlny sousedící.



Obrázek 3 – Distribuce lokálního zatížení mezi žebry (vlnami) dle prEN 1993-1-3 [4]

Výsledné rozložení zatížení mezi dvěma břemeny řešeného příkladu z obr. 2 je graficky znázorněno na obr. 4. Červená křivka popisuje rozložení podle prEN 1993-1-3, zatímco modrá křivka uvádí přesnější výsledek z experimentů konaných v rámci diplomové práce na Katedře ocelových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze (Šorf, Jandera) [5]. Experimenty provedené na prostém nosníku o rozpětí 7,0 m s trapézovým profilem TR 153/290 a tl. plechu 0,75 mm dokazují, že na roznosu zatížení se částečně podílí také další vlny než bezprostředně sousedící k vlně zatížené. U zatížené vlny tak lze uvažovat s výrazně nižším zatížením. Konzervativní výsledky podle prEN 1993-1-3 zřejmě plynou z obecnosti teorie, která umožňuje bezpečné vyjádření roznosu pro jakýkoliv trapézový profil, tloušťku plechu i statické schéma.

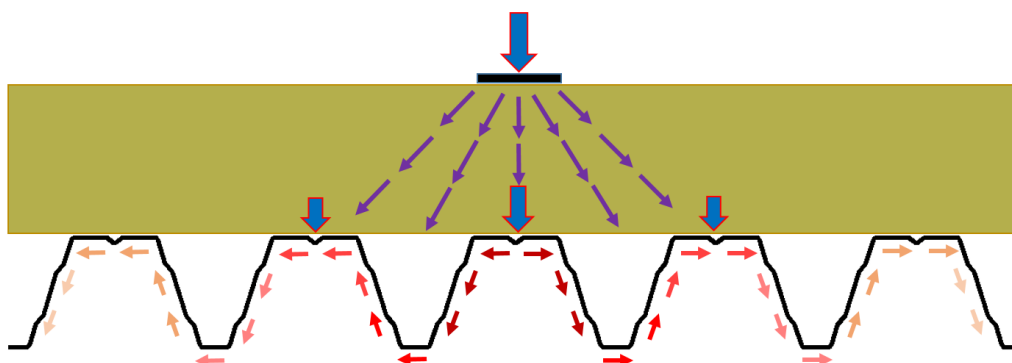


Obrázek 4 – Průběh distribuce lokálního zatížení mezi břemeny dle prEN 1993-1-3 [4] a dle experimentů [5]

3 Příčný roznos ovlivněný skladbou střešního souvrství

U tepelně izolovaných plochých střech, kde lokální břemena od FVE nepůsobí přímo na trapézovém plechu, ale na střešní souvrství (tzv. gravitační podpůrné systémy FVE), může být výsledný roznos zatížení mezi vlnami profilu ovlivněn. Ohybová tuhost desek tepelné izolace i celková tloušťka souvrství, která kvůli zvyšujícím se tepelně-technickým požadavkům

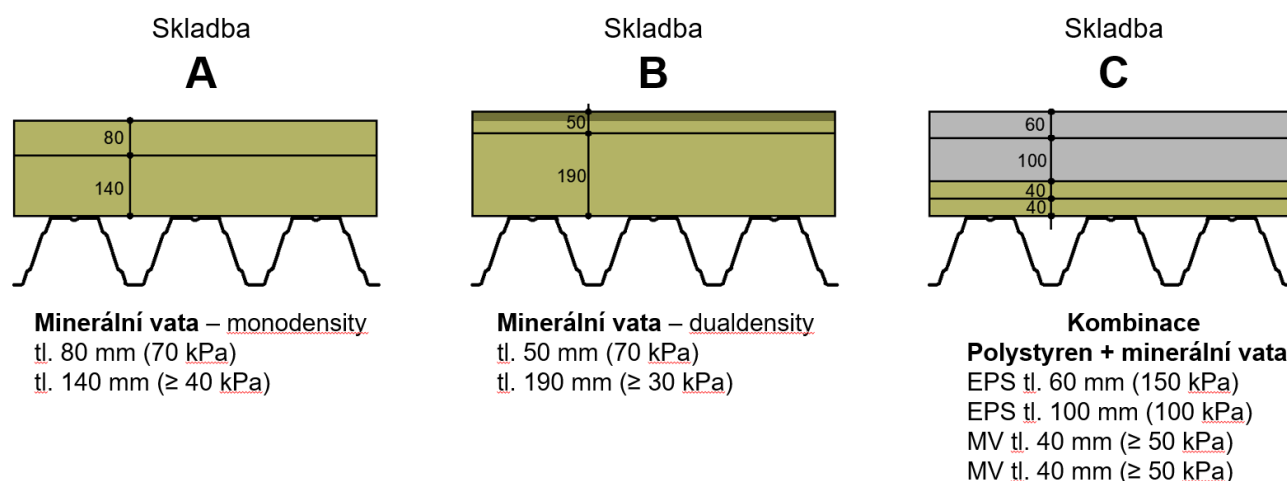
v poslední dekádě neustále roste, může původní lokální zatížení rozložit na několik sousedních vln profilu. Uvážením tohoto rozložení současně s distribucí v trapézovém profilu může být dosaženo celkově příznivějšího výsledku, viz obr. 5. Za účelem zjištění skutečného vlivu tepelné izolace byla provedena experimentální studie.



Obrázek 5 – Předpokládaný vliv vrstev tepelné izolace na celkový roznos zatížení v trapézovém profilu

3.1 Druhy skladeb tepelných izolací

Předmětem experimentů byly celkem 3 druhy souvrství, které jsou v současnosti realizovány u běžných plochých střech, viz obr. 6. Skladba A je složena ze dvou desek z minerální vaty s jednovrstvou charakteristikou objemové hmotnosti, tzv. monodensity. Celková tloušťka souvrství činí 220 mm. Skladba B, s celkovou tloušťkou o 20 mm větší, je složena také ze dvou desek z minerální vaty, ale horní část souvrství je tvořena deskou s dvouvrstvou charakteristikou objemové hmotnosti, tzv. dualdensity. Tato velmi tuhá deska se vyznačuje zhuštěním vláken při horním povrchu desky, za účelem zvýšení odolnosti proti mechanickému zatížení a odolnost vůči bodovému zatížení. Skladba C je kombinovaná ze dvou tenkých desek z minerální vaty a dvou desek z pěnového polystyrenu. Celková tloušťka souvrství činí 240 mm.

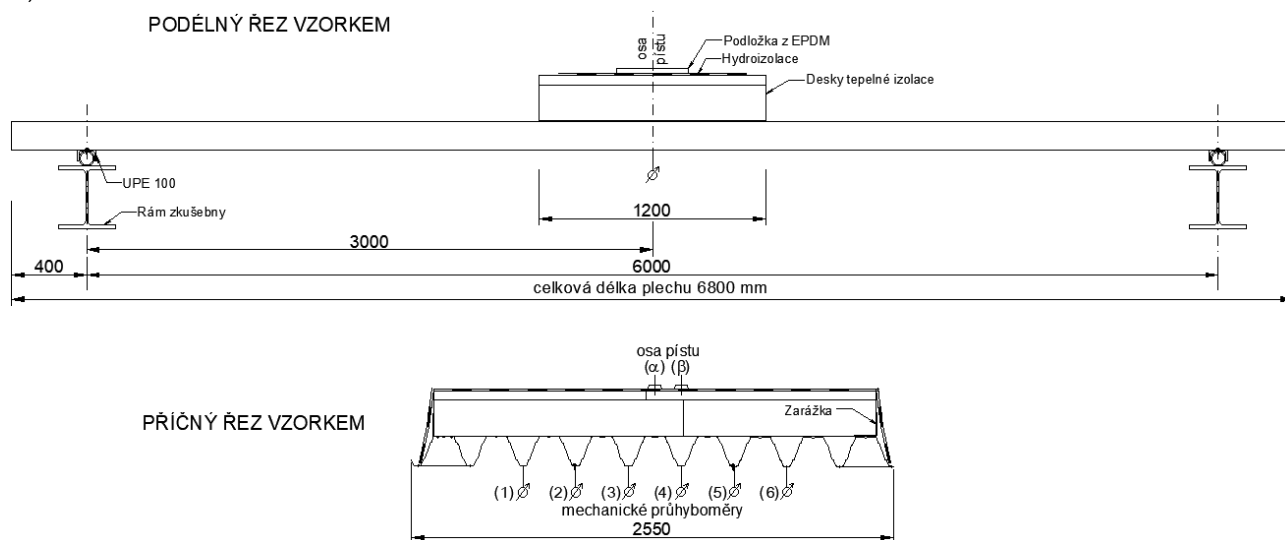


Obrázek 6 – Prověřované skladby střešního souvrství

3.2 Zkušební vzorek

Zkušební vzorek o půdorysných rozměrech 6,8 x 2,55 m byl složen ze tří tabulí trapézového profilu TR 150/280 (nominální tloušťka plechu 0,75 mm), tedy celkem z 9 vln, viz obr. 7. Plechy

byly uloženy na podporách z ocelových profilů UPE 100 na rozpětí 6,0 m ve statickém schématu prostý nosník. Profily UPE byly doplněné ze spodní strany silnostěnnými trubkami za účelem vytvoření kloubové podpory a tím volného otáčení vzorku. Kotvení plechů k podporám bylo řešeno standartním způsobem, tj. samovrtným šroubem do oceli Ø 5,5 mm s těsnící podložkou Ø 16 mm, a to v počtu 1 šroub v každé vlně a na každé podpoře. Tabule plechu byly vzájemně spojeny v podélných zámcích samovrtnými šrouby Ø 4,5 mm v rozteči 0,5 m.



Obrázek 7 – Zkušební vzorek

Záměrem experimentů bylo ověřit roznos zatížení ve směru kolmém na vlny trapézového profilu. Tepelná izolace proto byla kladena pouze uprostřed vzorku v šíři výrobního rozměru desek tepelné izolace 1200 mm. Delší rozměr desek (2000 mm) byl vždy orientován ve směru kolmém na vlny trapézového profilu. Vlákná uvnitř desek minerální izolace tak byla orientována ve směru rovnoběžném s vlnami profilu, tedy v poloze méně příznivé pro roznos zatížení ve zkoumaném směru. Skladba tepelné izolace byla zakryta pásem hydroizolace z měkčeného PVC tloušťky 1,8 mm. Desky tepelné izolace i pás hydroizolace byly zajištěny proti posuvu při zatěžování zarážkami a svěrkami u krajních vln zkušební vzorku. Standartní kotvení hydroizolace pomocí teleskopických kotev nebylo realizováno.

3.3 Varianty zkušebních vzorků

Provedeno bylo celkem 18 testů pro 3 druhy souvrství a 2 polohy zatížení vůči vlnám trapézového profilu. V poloze zatížení s označením α bylo lokální břemeno aplikováno přesně uprostřed horní pásnice profilu a v poloze β bylo posunuto do osy spodní pásnice profilu, tj. do prostoru mezi dvěma horními pásnicemi, viz obr. 7. Z porovnání výsledků plyne, že poloha zatížení má zanedbatelný vliv na výsledný roznos zatížení. V dalším textu jsou pro přehlednost hodnoceny pouze výsledky jedné polohy zatížení, a to ve variantě α .

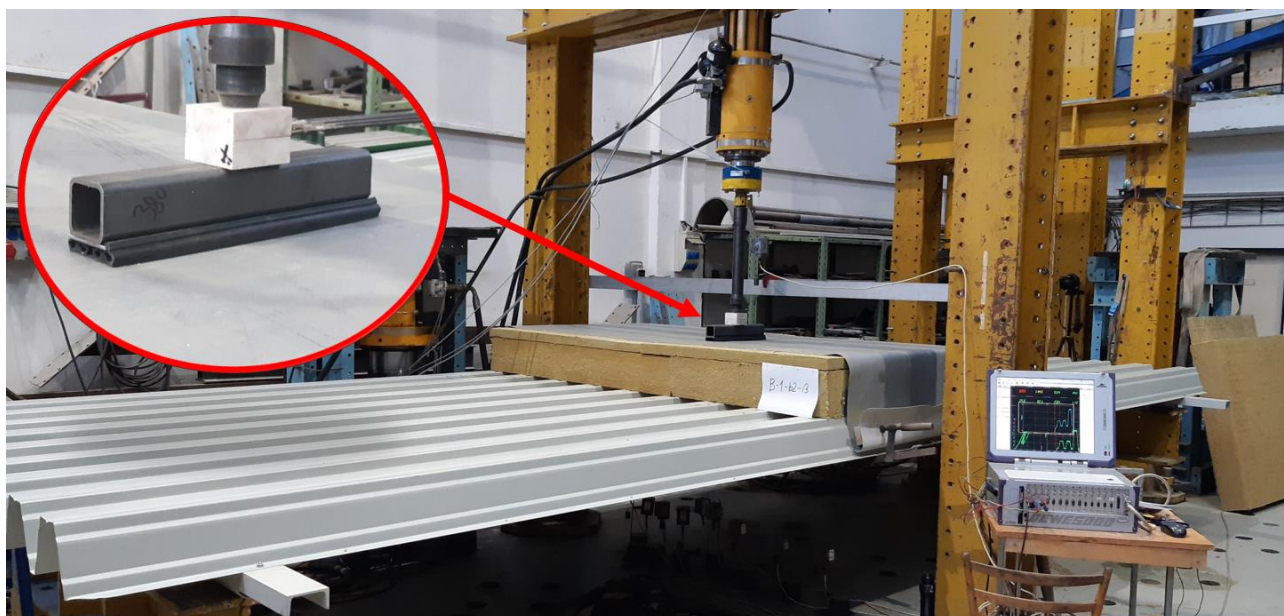
U každého druhu souvrství byla prověřena varianta beze spár (tedy průběžné desky tepelné izolace přes celou šířku vzorku) a varianty se spárami v různých modifikacích přesahů desek. Zatímco varianta beze spár představuje pro příčný roznos zatížení nejvýhodnější uspořádání, varianty se spárami jsou naopak nejméně příznivým uspořádáním, na které byla zaměřena pozornost. Minimální přesah desek dvou vrstev tepelné izolace byl určen doporučením výrobců tepelných izolací, které činí 200 mm. U dalších variant vzorků byl přesah postupně zvětšován za účelem zjištění minimální vzdálenosti přesahu vedoucí k dosažení srovnatelného roznosu zatížení jako pro nejvýhodnější variantu beze spár.

Studie byla doplněna o další dva testy zcela bez tepelné izolace, které jsou nezbytné pro závěrečné stanovení vlivu souvrství nad trapézovým plechem.

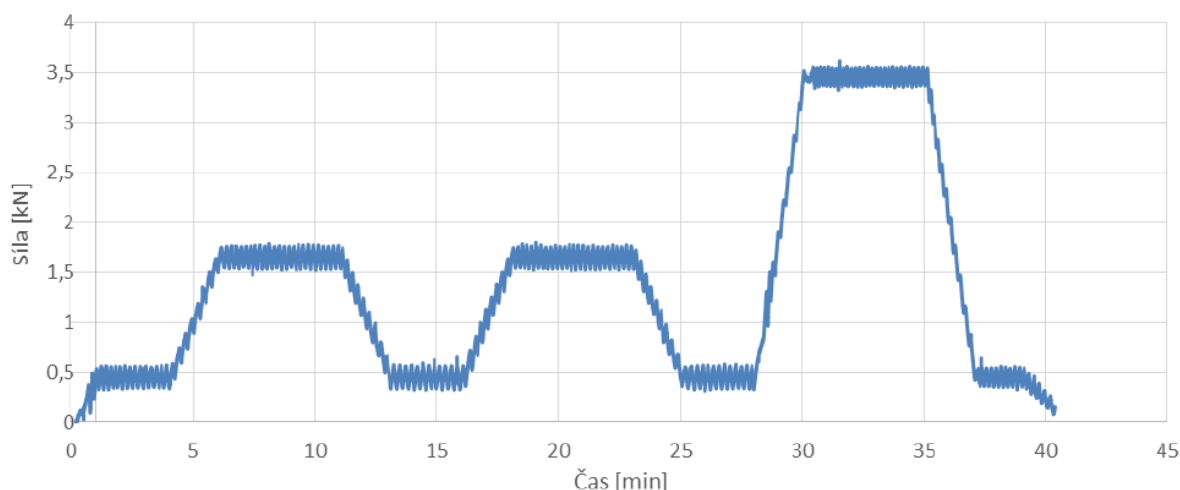
3.4 Zatěžování

Zatížení bylo aplikováno hydraulickým válcem přes speciální botku tvořenou úpalkem ocelového profilu jáckl 60/60/5 a typizovanou podložku podpůrného systému K2 z materiálu EPDM, viz obr. 8. Půdorysný rozměr podložky činil 75 x 380 mm, přičemž delší rozměr botky byl orientován rovnoběžně s vlnami trapézového profilu.

Zatížení bylo aplikováno postupně v krocích ve třech úrovních, viz obr. 9. První úroveň (0,5 kN) představovala orientační hodnotu charakteristického zatížení od vlastní tíhy FV panelu a jeho podpůrné konstrukce. Další dvě úrovně simulovaly přibližně přetížení včetně sněhu pro I. sněhovou oblast (1,7 kN) a III. sněhovou oblast (3,5 kN) ve smyslu ČSN EN 1991-1-3. V každém kroku bylo zatížení, po dosažení předepsané hodnoty, udržováno konstantní po dobu 5 minut. Rychlost zatěžování i odtěžování mezi úrovněmi zatížení byla stanovena na 2 minuty. Celkové trvání zatěžování jednoho vzorku činilo přibližně 40 minut.



Obrázek 8 – Zkušební vzorek a detail botky



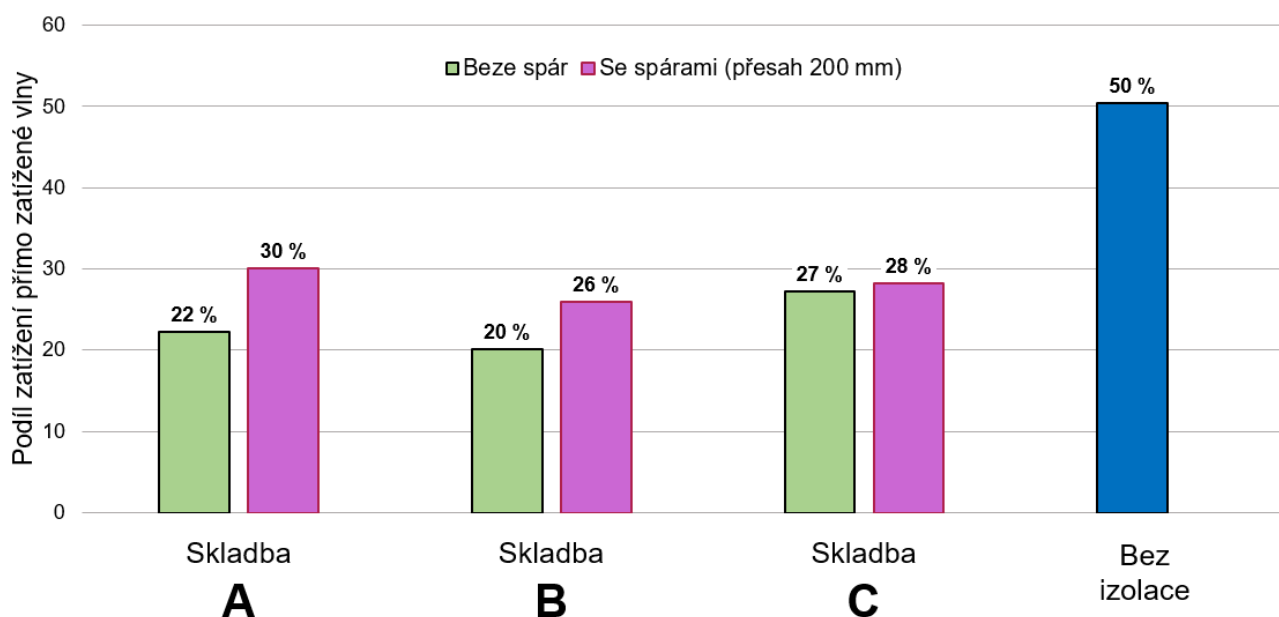
Obrázek 9 – Zatěžovací schéma

3.5 Vyhodnocení

Vzájemné spolupůsobení vln profilu bylo odvozeno na základě principu porovnávání průhybů jednotlivých vln při zatěžování. Deformace byly měřeny a zaznamenávány pomocí potenciometrických snímačů, připevněných k plechu pomocí magnetu, viz obr. 7. Sledováno bylo 6 vln v místě spodní pásnice profilu přesně uprostřed rozponu zkušební vzorku. Celkové zatížení bylo následně výpočtně rozděleno do všech měřených vln s označením „zatížená“, „sousední“ a „krajní“ vlna.

Hodnoty sledovaných parametrů zaznamenávala ústředna s frekvencí 10 Hz. Ve výsledných datech měření je patrné relativně vysoké kolísání síly a průhybu trapézového plechu v měřených bodech, viz obr. 9. Tento jev byl způsoben vysokou odezvou konstrukčního dílce na působící zatížení. Pro řešení tohoto problému byla aplikována metoda klouzavého průměru dat pro 100 čtení, což znamená, že jsou průměrovány hodnoty s časovým rozptylem 10 sekund. Metoda klouzavého průměru pomáhá eliminovat náhlé a krátkodobé fluktuace v měřených datech, čímž vytváří stabilnější a přesnější výsledek. Volba délky období pro klouzavý průměr (v tomto případě 100 hodnot) závisí na potřebách konkrétního experimentu a žádaném stupni vyhlazení dat.

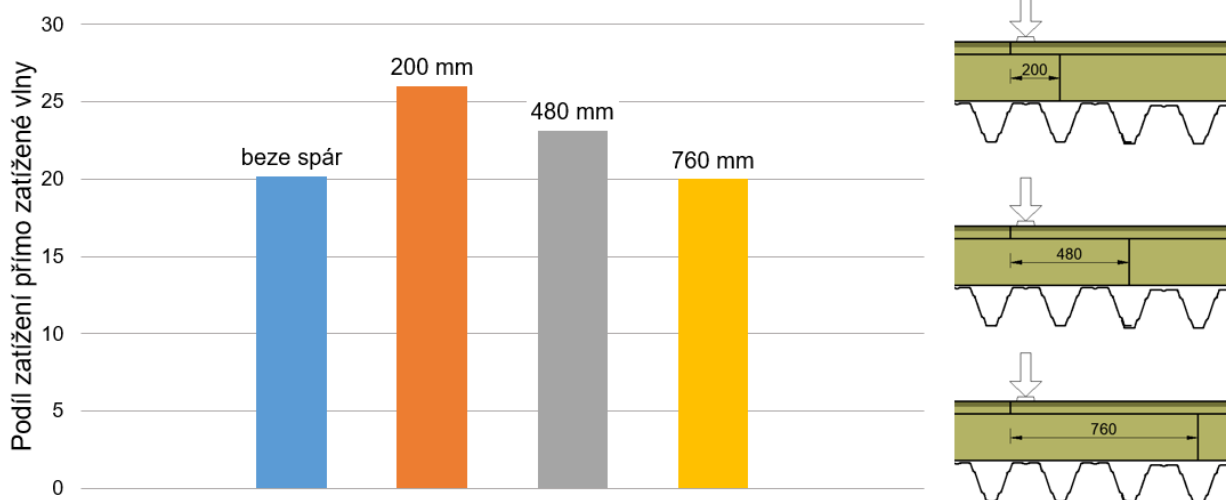
Pro statický návrh trapézového profilu je rozhodující hodnota podílu zatížení neseného přímo zatíženou vlnou. Podílem je míněna část z působícího lokálního zatížení, které činí 100 %. Na obr. 10 jsou porovnané podíly zatížení všech druhů souvrství v limitních případech, tj. varianty beze spár (zelená) a varianty se spárami s min. přesahem desek 200 mm (fialová), s podílem pro samostatný trapézový profil bez tepelné izolace (modrá).



Obrázek 10 – Vliv tepelné izolace na výsledný podíl zatížení přímo zatížené vlny

Vliv tepelné izolace na celkový roznos zatížení je zřejmý. V nejneprůmyslnějším případě (skladba A, fialový sloupec) činí pokles podílu zatížení přímo zatížené vlny 20 % oproti variantě bez tepelné izolace (modrý sloupec). Rozdíl mezi jednotlivými druhy souvrství je v řádu jednotek procent a lze jej považovat za nepodstatný. Příznivější výsledek u skladby B může být ovlivněn, mimo jiné, také celkově větší tloušťkou souvrství o 20 mm oproti skladbě A. Vliv přesahu je zřetelnější u skladby s minerální vatou. U kombinované skladby je minimální. Blíže je vliv délky přesahu dokumentován pro skladbu B na obr. 11. Porovnány jsou délky přesahů

200 mm (oranžově), 480 mm (šedivě) a 760 mm (žlutě), přičemž lze konstatovat, že při přesahu 760 mm nabývá hodnota roznosu zatížení své maximální hodnoty. U kombinované skladby je maximálního roznosu docíleno při přesahu 480 mm. Hodnotu roznosu lze považovat za konstantní, tedy nezávislou na výši působícího zatížení.

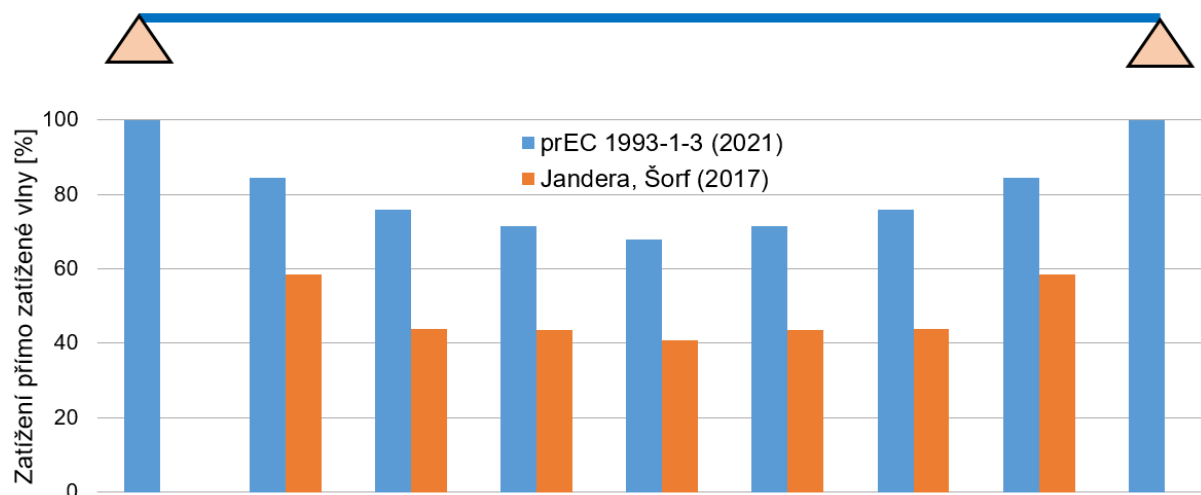


Obrázek 11 – Vliv délky přesahu pro skladbu B

4 Závěr a doporučení AsoTra

Studie prokázala nezanedbatelný vliv tepelné izolace při roznosu lokálního zatížení. Nezbytné je však zmínit jistá omezení, která mají být zvažena při využití v praxi:

1) Z výsledků předchozích experimentů i zmíněné přípravy druhé generace Eurokódu prEN 1993-1-3 plyne, že výsledný roznos zatížení v trapézovém profilu, mimo jiné, závisí na poloze zatížení vůči podporám, resp. na ohybové čáře konkrétního statického schématu, viz obr. 12. Obecně platí, že při zkracující se vzdálenosti břemene od podpory roste podíl zatížení přímo zatížené vlny. U řešeného prostého nosníku byl roznos prověřován v místě maximální deformace, tedy v místě, kde je roznos zatížení největší. Hodnoty pro různé polohy zatížení nebo pro jiná statická schémata prověřeny nebyly. Nelze proto objektivně doložit, že snížení podílu zatížení přes tepelnou izolaci bude vždy alespoň 20 %.



Obrázek 12 – Roznos zatížení pro různé polohy břemene na prostém nosníku (pro přímo zatíženou vlnu)

2) Výsledky studie nezohledňují vliv změny mechanických vlastností tepelné izolace z hlediska dlouhodobého zatížení, stárnutí, působení vysokých teplot, vlhkosti a případně kombinace všech těchto faktorů. Jejich hodnocením se zabývají některé experimentální studie či normové předpisy týkající se návrhu sendvičových panelů. Degradaci smykové pevnosti či modulu ve smyku, jakožto rozhodující parametry pro distribuci zatížení v tepelně-izolačním jádru panelu, popisuje norma ČSN EN 14509 ed.2 v příloze A.3.6 [6]. Pro případy, kdy nejsou k dispozici přesnější údaje experimentů, norma doporučuje redukovat smykovou pevnost v čase, uvedenou v příslušném grafu A.7. Například pro zatížení působící 1000 hodin má být krátkodobá pevnost redukována o 45 %.

Studiem mechanických vlastností v čase při působení zvýšených teplot (65-75°C) a při nízkých (< 15 %) i zvýšených (> 95 %) relativních vlhkostech se zabývá studie „Model for effect of ageing“, uskutečněná v rámci evropského projektu EASIE [7]. Výsledkem je potvrzení degradace modulu ve smyku i pevnosti ve smyku u tepelné izolace z minerálních vláken řádově o desítky procent v prvních dvou týdnech zatížení. U tepelné izolace z EPS se degradace neprojevila.

3) V neposlední řadě nelze opomenout možnou degradaci mechanických vlastností povrchu tepelné izolace způsobenou větším pohybem osob a materiálů v souvislosti s instalací FVE.

Z výše uvedených nejistot plyne nutnost dalšího podrobnějšího zkoumání a zpřesnění předkládaných výsledků experimentů. Asociace AsoTra proto doporučuje přednostně využívat podpurné systémy FVE, které roznáší zatížení do více vln trapézového profilu (např. příčné lišty apod.). V případě podpurných systémů, generujících lokální zatížení, doporučujeme prozatím v praktických výpočtech zohlednit roznos zatížení min. 50 % podílem pro přímo zatíženou vlnu, a to obecně pro jakoukoliv polohu břemene od podpory i druh souvrství. Je třeba poznamenat, že i při zohlednění tohoto roznosu může být zatížení přenášeno konstrukcí FVE silně koncentrováno (v případě popsaném na obrázku 2 je zvýšeno příslušné původně uvažované plošné zatížení pro přímo zatíženou vlnou 4x, což je výrazně lepší výsledek než bez uvážení zde popsaného roznosu, ale stále se jedná o významné lokální přetížení, které musí být zohledněno).

Ing. Michal Strejček, Ph.D. (za AsoTra)
prof. Ing. Michal Jandera, Ph.D.

Literatura

- [1] **ČSN EN 1090-4:** Provádění ocelových a hliníkových konstrukcí – Část 4: Technické požadavky na ocelové za studena tvarované prvky a konstrukce pro použití ve střeších, stropích, podlahách a stěnách
- [2] **ČSN EN 1993-1-3:** Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplňující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily
- [3] **Germund Johansson:** Single Load on Trapezoidal Sheet, 1986
- [4] **prEN 1993-1-3:2021:** Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting
- [5] **Šorf M., Jandera M.:** Lokálně a liniově zatížené trapézové plechy, Diplomová práce, 2017
- [6] **ČSN EN 14590 ed. 2:** Samonosné izolační sendvičové panely s povrchovými plechy – Průmyslově vyráběné výrobky – Specifikace
- [7] **Metzger A., Käpplein S., Misiek T., Hassinen P., Mononen J., Kurpiela A., Lange J., Kochenbach J.** - REPORT No.: D4.2/2 – Model for effect of ageing, 2011, EASIE

VČASNÉ VAROVÁNÍ PŘI NEBEZPEČÍ REZONANCE MOSTU

prof. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc.

Vítkovice Testing Center

Anotace. Měření zrychlení při kmitání mostu vzorkováním 400 Hz prokazují, že zřícení mostu přes Lochkovské údolí vlivem rezonance při běžném provozu nehrozí. Avšak v minulosti, před zavedením povelu zrušit krok vojákům pochodujičím po mostě, došlo ke zřícení některých mostů. Podobné nebezpečí by mohlo nastat, pokud by se po mostě pohybovala dostatečně dlouhá kolona vozidel o vhodné hmotnosti, rychlosti a rozestupech. V příspěvku je prezentován systém, který by měl možnost zřícení mostu vlivem rezonance včas zjistit.

1. Úvod

Měření na mostě přes Lochkovské údolí na dálničním obchvatu Prahy probíhá doposud od zahájení jeho výstavby v roce 2009 s 1,5 letou přestávkou v letech 2015 a 2016. Od roku 2016 nejsou zapojeny tenzometry umístěné na bočních stěnách montážních svarů lamelových pásnic. Nyní jsou měřena data pomocí tenzometrů umístěných na podélném nosném a těsnicím koutovém svaru 16 mm, spojujícím dvě na sobě položené lamelové pásnice. Data jsou také měřena dvěma tříosými akcelerometry, šesti posunoměry, měřícími posuny ve třech směrech na obou koncích mostu oproti krajním oporám, teploty jsou měřeny dvěma čidly. Všechna čidla jsou umístěna uvnitř komory mostu. Data jsou měřena ústřednou EMS DV 803 vzorkováním 6,25 Hz. Denní soubor změřených dat je hned po půlnoci zaslán na server ŘSD ČR v Praze a tam rozříděn do datových souborů pomocí řídicího SW ALERT a následně vyhodnocených SW POKOF 10-8. Podrobněji jsou data, krátkodobě změřená akcelerometry po dobu cca 15 minut vzorkováním 400 Hz, vyhodnocena mimo server rychlou Fourierovou transformací (Fast Fourier transform, zkratkou FFT). Vzorkování je přepínáno na dálku. Vždy byl o toto měření dat požádán tvůrce měřicí ústředny Ing. Miroslav Pohl.

Certifikované společnosti po dokončení stavby mostu přes Lochkovské údolí změřily frekvence vlastních tvarů kmitů. Obdržené výsledky se shodovaly, Tab. 1, [1].

Tabulka 1. Porovnání výsledků měření akreditovaných zkušebních laboratoří

$f_{(i)}$ [Hz]	AZL č. 1048 OL 132 a OL 181		AZL č. 1228	Popis tvaru kmitání
	1. měření DZZ	2. měření DZZ	Měření PP	
$f_{(1)}$	0,82	0,82	P:0,81; L:0,81	1. tvar vodorovného příčného kmitání
$f_{(2)}$	-	-	-	2. tvar vodorovného příčného kmitání
$f_{(3)}$	1,18	1,17	P:1,17; L:1,17	1. tvar svislého ohybového kmitání
$f_{(4)}$	-	1,35	P:1,38; L:1,39	1. tvar vodorovného podélného kmitání
$f_{(5)}$	1,45	1,45	P:1,46; L:1,46	2. tvar svislého ohybového kmitání
$f_{(6)}$	1,67	1,67	P:1,67; L:1,67	3. tvar svislého ohybového kmitání
$f_{(7)}$	1,92	1,93	P:1,96; L:1,92	4. tvar svislého ohybového kmitání
$f_{(8)}$	2,05	2,10	-	1. tvar kroutivého kmitání
$f_{(9)}$	2,26	2,26	-	2. tvar kroutivého kmitání
$f_{(10)}$	-	-	P:2,28; L:2,28	5. tvar svislého ohybového kmitání
$f_{(11)}$	2,39	2,40	-	3. tvar kroutivého kmitání
$f_{(12)}$	2,47	2,49	-	4. tvar kroutivého kmitání
$f_{(13)}$	2,77	2,84	-	5. tvar kroutivého kmitání
$f_{(14)}$	3,20	3,21	P:2,53; L:3,25	6. tvar svislého ohybového kmitání

Poznámka k Tabulce 1: L – měřenou levé straně (vnější oblouk) mostu; P – měřeno na pravé straně (vnitřní oblouk) mostu.

Pomocí nově budovaného SW KMITANI bylo vyhodnoceno krátkodobé měření 30 minut se vzorkováním 400 Hz. Změřený soubor byl rozdělen na 10 tříminutových úseků. Toto měření sloužilo k ověření metodiky a funkce SW KMITANI. Bylo také ověřováno, zda za běžného

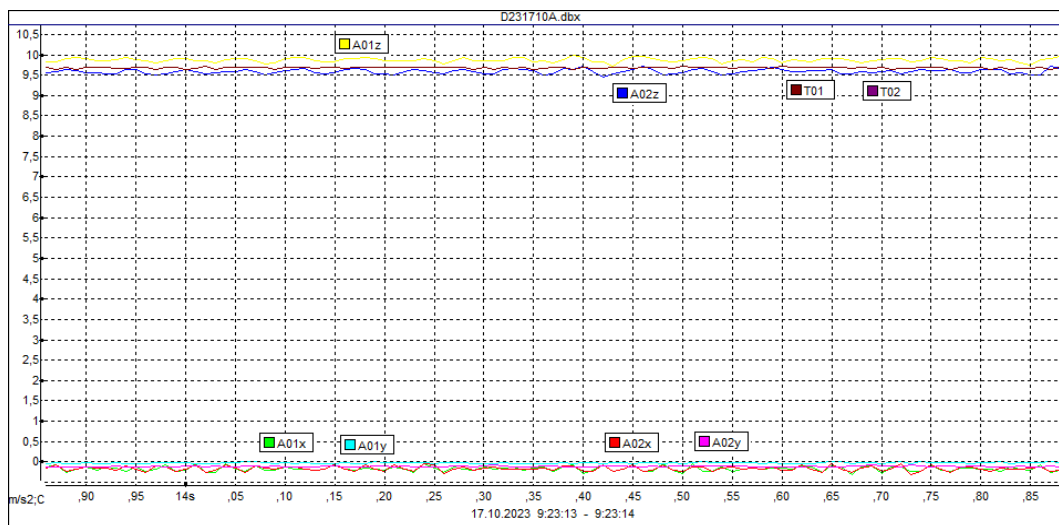
provozu na mostě dochází k rezonancím krátkodobě a zda jsou pro most neškodná. Pokud by se však po mostě pohybovala dostatečně dlouhá kolona přibližně stejných vozidel o vhodné rychlosti, hmotnosti a rozestupech, mohla by do mostu vnést takovou energii, že by se rozkmital a rezonoval např. s prvním vlastním tvarem kmitu. Potom by bylo třeba co nejrychleji informovat jedoucí kolonu, aby zastavila, nebo zpomalila, dokud se most neuklidní. Pro předávání takovéto informace má ŘSD ČR vyvinut informační systém.

2. Metodika vyhodnocení

Během kmitání mostu se mění poloha jednotlivých bodů nosných průřezů jednotlivých polí mostu oproti pevným podpěrám (pilířům). Pokud je kmitání pomalé, jsou pro takováto měření použitelná čidla, propojená potrubním systémem, kterým se přelévá voda. Pomocí tenzometrů je měřena měnící se hmotnost čidel naplněných vodou. Tato čidla jsou vhodná pro měření zatížení budov, například měnícím se nerovnoměrným rozložením padajícím sněhem. Pro měření změny polohy nosného průřezu mostu při jeho rychlém kmitání by byla nevhodná, voda by nestačila na velkou vzdálenost včas přetékat, a měření by bylo nepřesné.

Vhodným typem čidel, která lze pro daný případ použít, jsou akcelerometry, schopné měřit zrychlení se vzorkováním o vysokém počtu kmitů. V daném případě předpokládáme použití vzorkování 400 Hz. Rozkmit nosného prvku mostu se při rezonanci s vlastním tvarem kmitu rychle zvětšuje během doby kmitu. S tím souvisí také růst rychlosti kmitu. Z měření po dohotovení mostu známe dobu vlastních tvarů kmitů. Pomocí akcelerometrů měříme zrychlení během kmitu.

Na Obr. 1 je vykreslen krátký úsek měření akcelerometry při vzorkování 400 Hz za běžného provozu na mostě, [2]. Je zřejmé, že i při malých rozkmitech nosné konstrukce mostu dochází k rozkmitu zrychlení měřeného akcelerometry, zejména ve svislém směru mostu z. V podélném směru x a vodorovném příčném směru y jsou rozkmity zrychlení menší.



Obr. 1. Data zaznamenaná akcelerometry A01x, A01y, A01z, A02x, A02y a A02z vzorkováním 400 Hz dne 17.10. 2023 od 9:23:13 do 9:23:14 hodin.

Při rezonanci dochází k rychlému růstu rozkmitu, je třeba mít o tom informaci včas, Proto předpokládáme, že vyhodnocena musí být data změřená během 3 minut. To vyžaduje použití samostatné měřicí ústředny EMS DV 803, která by každé 3 minuty zaslala data na server ŘSD ČR, tam byla ihned vyhodnocena a v případě nebezpečí vzniku rezonance byla jedoucí kolona ihned informována, co má učinit, zda zastavit, nebo zpomalit, než se most uklidní. Po skončení nebezpečí rezonance musí být kolona na tuto skutečnost opět upozorněna. Během jedné jízdy kolony se nebezpečí rezonance může opakovat.

Jistě by bylo možné pomocí metody konečných prvků vymodelovat jedoucí kolonu včetně mostu a řešit jakou hmotností jednotlivých vozidel, jejich rychlostí a rozestupy by byla vnášela

do mostu taková energie, že by způsobila rezonanci mostu. Bylo by to mohutné a časově náročné dílo. Proto jsme se raději zaměřili na analýzu odezvy mostu na energii vnášenou kolonou vozidel jedoucích po mostě.

Energie vnášená do konstrukce mostu po něm jdoucí kolonou se mění v čase, což způsobuje kmitání nosných částí mostu. Při jejich kmitání se kinetická energie kmitajících částí mostu mění v potenciální. Známe dobu Δt daného tvaru vlastního kmitu a akcelerometrem změřený rozkmit (změnu) zrychlení Δa během kmitu, Obr. 1. Lze tedy napsat rovnost změny kinetické energie ΔE_k se změnou potenciální energie ΔE_p během daného kmitu.

Kinetické energie během kmitu je dána vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Potenciální energie během kmitu je dána vztahem:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Pomocí akcelerometrů měříme zrychlení a . Souvislost mezi zrychlením a a rychlostí v je dána vztahem:

$$v = a \cdot t \quad (3)$$

Ve vztazích (1) až (3) značí: m – kmitající hmota mostu; a [m/s²] – měřené zrychlení; v [m/s] – rychlost kmitání; h [m] = rozkmit daného kmitu; $g = 9,80665$ [m/s²] – zemská tíže; Δt [s] = $1/f_{(i)}$ – doba daného vlastního tvaru kmitu, vypočtená z frekvence $f_{(i)}$ daného vlastního tvaru kmitu, Tab.1.

Z rovnosti změny kinetické energie ΔE_k se změnou potenciální energie ΔE_p lze po vyloučení hmoty m odvodit závislost mezi rozkmitem Δh a rozkmitem rychlosti Δv během daného kmitu. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že zrychlení a a rychlost v se v předpokládaných rozmezích kmitu mění lineárně v závislosti na čase. Potom lze napsat:

$$\Delta h = \frac{(\Delta a \cdot \Delta t)^2}{2g} \quad (4)$$

Změna zrychlení během kmitu, jehož doba Δt je dána dobou daného tvaru vlastního kmitu, s nímž může nastat rezonance, je patrná z Obr. 1. Za předpokladu lineární závislosti lze napsat:

$$\Delta a = |a_h - a_n| \quad (5)$$

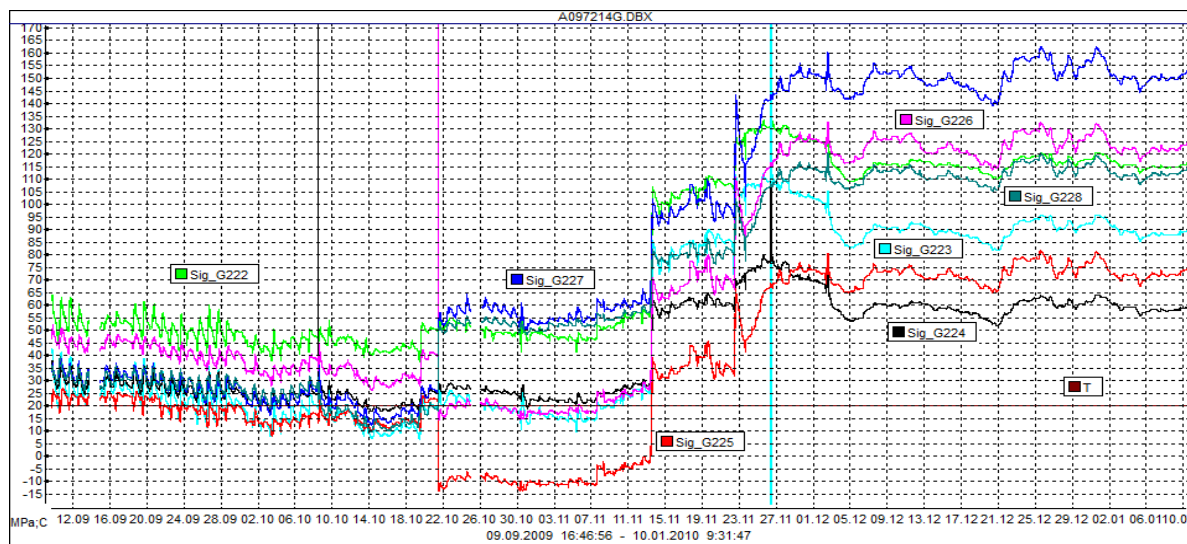
kde a_h je změřená horní hodnota cyklu zrychlení a a_n jeho dolní hodnota. Pro nalezení horní a dolní úvrati cyklu zrychlení trvajících po dobu Δt daného vlastního tvaru kmitu lze použít metodu stékání deště, běžně používanou pro nalezení vrcholů hysterezních smyček při posuzování poškození materiálu únavou při cyklické zatěžování.

Na základě výše popsané metodiky byl vyhotoven SW KMITANI, založený na podmínce rovnosti změny kinetické energie se změnou potenciální energií během daného kmitu nosné konstrukce mostu. Doba Δt vlastního tvaru kmitu je dána, takže má-li rezonující tvar kmitu vykonat delší rozkmit Δh , musí růst jeho rozkmit zrychlení Δa , který lze měřit. Systém vyhodnocení a varování lze nainstalovat na server ŘSD ČR. Problémem bylo stanovení mezní přípustné hodnoty rozkmitu při rezonanci s daným vlastním tvarem kmitu.

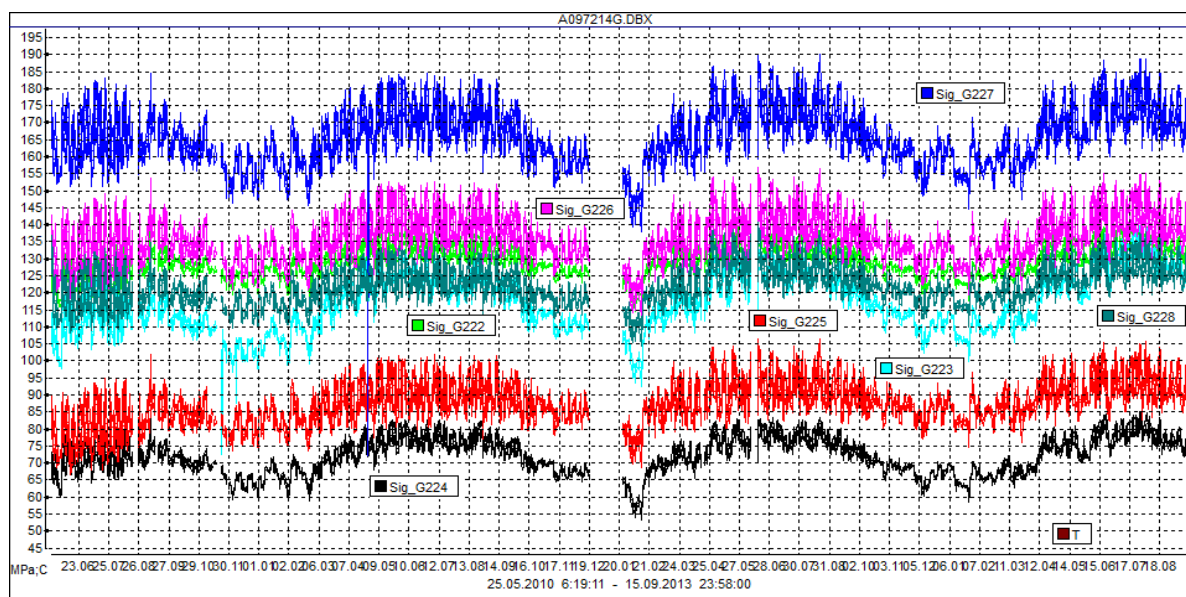
3. Mezní hodnota přípustného rozkmitu za rezonance

Snaha stanovit hodnotu přípustného rozkmitu za rezonance pomocí metody konečných prvků reálné konstrukce mostu se ukázala jako časově náročná. Původní výpočtový model mostu nebyl dostupný. Dostupný není ani podrobný výpočtový modul použitý ve zprávě [2], řešený v rámci našeho projektu. K dispozici byl podklad [3] poskytující přehled navýšení jednotlivých polí mostu při jeho výstavbě, jednalo se až o desítky mm. Byl použit pro sestavení zjednodušeného výpočtového modelu spojitého nosníku o pěti polích s proměnnou tuhostí průřezu, sloužícího pro orientační výpočet napětí v nosných prvcích komory. Vypočtená napětí

byla porovnána s napětími změřenými na bočních stěnách nosných svarů lamelových pásnic. Příklad z období montáže mostu a provozu je na Obr 2 a 3. Z uvedených podkladů, které byly k dispozici, však nebylo možné udělat jednoznačné, dostatečně bezpečné závěry o přípustné velikosti průhybu polí mostu před vznikem rezonance.



Obr. 2. Napětí σ_z [MPa] v oblasti svaru 7214 v podélném směru mostu od počátku montáže.



Obr.3. Napětí σ_z [MPa] v oblasti svaru 7214 v podélném směru za provozu mostu.

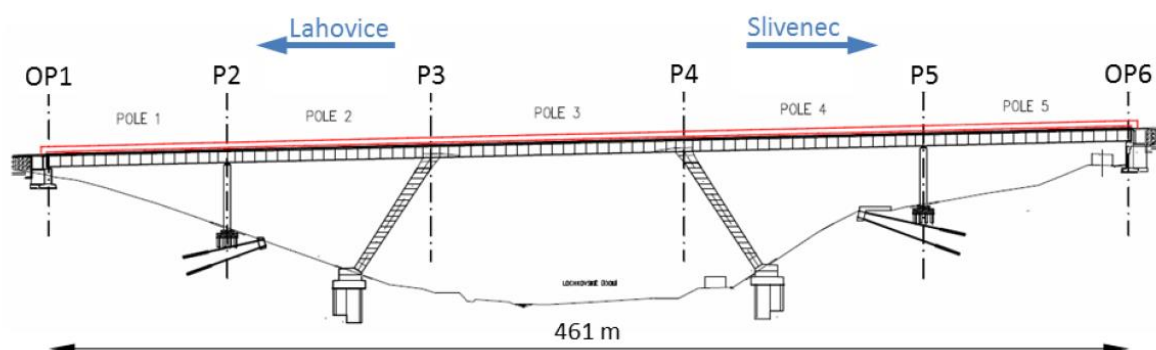
Z výše diskutovaných důvodů bylo přistoupeno k využití závislosti rychlosti růstu rozkmitu kmitu Δh na růstu změny zrychlení Δa při rezonanci za $\Delta t = \text{konst.}$ u daného vlastního tvaru kmitu. Ze vztahu (4) plyne, že pro konstantní dobu Δt daného tvaru vlastního kmitu a konstantní zemskou tíží g , je závislost Δh na Δa kvadratická. To znamená, pokud se například připustí růst změřené změny zrychlení Δa 3 krát, potom rozkmit Δh oproti běžnému provozu vroste 9 krát; pokud se připustí růst Δa 4 krát, vzroste Δh 16 krát. Pro výchozí nastavení varování o nebezpečí možné rezonance, lze považovat za přípustné nastavit nejprve přípustný růst Δa 3 krát oproti současnému běžnému provozu na mostě. Tento problém bude nadále řešen.

4. Měřicí systém

Po analýze dostupných podkladů považujeme za vhodné nainstalovat měřicí systém doprostřed 4. pole o délce 93,85 m, tedy druhého od vstupu do komory mostu ze strany Slovínec (Praha). Délka jednotlivých polí mostu je 70,0; 79,85; 99,30; 93,85; 80,50 m, Obr. 4.

Měřicí ústředna ESM DV 803 by byla umístěna ve středu rozpětí 4. pole o délce 93,85 m. Byly by do ní zapojeny 4 tříosé akcelerometry typu ADXL 325 s označením A01x, A01y, A01z, A02x, A02y, A02z, A03x, A03y, A03z, A04x, A04y, A04z a dvě teplotní čidla typu ADT 589. Index x označuje podélný vodorovný směr mostu; index y označuje příčný vodorovný směr mostu a index z svislý směr.

V polovině rozpětí 4. pole umístit: tříosý akcelerometr A01x, A01y, A01z do středu dna komory vedle měřicí ústředny; akcelerometr A02x, A02y, A02z umístit na dno komory u její stěny na vnější straně zaoblení; akcelerometr A03x, A03y, A03z umístit na dno komory u její stěny na vnitřní straně zaoblení. Tříosý akcelerometr A04x, A04y, A04z umístit do středu dna komory nad pilířem mezi 4. a 5. polem. Čidlo pro měření teploty TP1 umístit u akcelerometru A02x, A02y, A02z a TP2 u akcelerometru A03x, A03y, A03z.



Obr. 4. Schéma mostu přes Lochkovské údolí, označení polí a podpěr.

Data změřená akcelerometry a čidla pro měření teploty budou každé 3 minuty zasílána na server ŘSD ČR v Praze a tam vyhodnocena SW KMITANI.

Data změřená tříosým akcelerometrem A01x, A01y, A01z slouží pro výpočet rozkmitů vtažujících se k 1. až 6. vlastnímu tvaru kmitu ve svislém směru z; k 1. vlastnímu tvaru kmitu ve vodorovném podélném směru x; k prvnímu vlastnímu tvaru kmitání ve vodorovném příčném směru y.

Data změřená dvěma tříosými akcelerometry A02x, A02y, A02z, A03x, A03y, A03z slouží pro výpočet rozkmitů vztahujících se k 1. až k 5. vlastnímu tvaru krouživého kmitání, které by mohlo nastat, pokud by kolona vozidel jela pouze v jednom směru a ve druhém směru by nebyl žádný provoz, nebo minimální.

Data změřená tříosým akcelerometrem A04x, A04y, A04z umístěným na pevné opěře P5 slouží k orientačnímu zjištění její úrovně tuhosti ve všech třech směrech x, y, z.

Obě teplotní čidla TP1 a TP2 poskytují informaci o teplotě uvnitř komory v době měření.

5. Příklad vyhodnocení

Jako vstupní data jsou zadány doby vlastních tvarů kmitání uvedené v Tab. 2. Pro zatřídění kmitů vyvozených provozem na mostě je doba Δt vlastních tvarů kmitu zvětšena o přídavek $0,01$ s. Přípustný rozkmit zrychlení a_p je vzat jako 3 násobek rozkmitu zrychlení, vyvozeného běžným provozem na mostě. V průběhu ročního experimentálního provozu systému budou tyto hodnoty zpřesňovány. Předběžný přípustný rozkmit Δa_d pro případ rezonance je uveden v Tab. 2. Za nejnebezpečnější lze považovat rezonanci při 1. tvaru vlastního kmitání ve svislém směru z a 1. tvaru kroucení, pokud by se kolona vozidel pohybovala pouze v jednom směru a ve druhém směru by byl provoz minimální, nebo zcela zastaven.

Tabulka 2. Vybraná vstupní data pro SW KMITANI

Vlastní tvary kmitání	[Hz]	Δt [s]	Δa_p [m/s ²]
1. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	1,175	0,851	2,97
2. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	1,45	0,690	2,34
3. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	1,67	0,599	2,70
4. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	1,925	0,519	2,88
5. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	2,28	0,439	2,07
6. tvar svislého ohybového kmitání, směr z	3,205	0,312	2,07
1. tvar vodorovného podélného kmitání, směr x	1,35	0,740	0,36
1. tvar vodorovného příčného kmitání, směr y	0,82	1,220	0,36
1. tvar kroutivého kmitání	2,075	0,482	0,40
2. tvar kroutivého kmitání	2,26	0,442	0,35
3. tvar kroutivého kmitání	2,395	0,418	0,30
4. tvar kroutivého kmitání	2,48	0,403	0,25
5. tvar kroutivého kmitání	2,805	0,357	0,20

V Tab. 3 jsou uvedeny výsledky hodnocení pro kmitání související s 1. až 6. vlastním tvarem kmitu ve svislém směru z. V Tab. 4 jsou uvedeny doby setrvání rezonancí s uvedenými tvary kmitů. Hodnoty Δa a Δt jsou maximální z hodnot zařazených k danému vlastnímu tvaru kmitu. Byla použita data změřená za běžného provozu na mostě vzorkováním 400Hz.

Tabulka 3. Výsledky uprostřed rozpětí pole, řádek pro jeden vlastní tvar kmitu

a_h [m/s ²]	a_n [m/s ²]	Δa [m/s ²]	Δt [s]	TP1 a	TP2 [°C]	Δh [mm]
1,019E+01	0,986E+01	0,330E+00	0,86200E+00	9,6	9,6	4,126
1,021E+01	0,995E+01	0,260E-01	0,67000E+00	9,6	9,6	1,547
1,022E+01	0,992E+01	0,300E-01	0,60800E+00	9,6	9,6	1,696
1,020E+01	0,988E+01	0,320E-01	0,53800E+00	9,6	9,6	1,511
1,017E+01	0,994E+01	0,230E+00	0,45800E+00	9,5	9,5	0,566
1,019E+01	0,996E+01	0,230E+00	0,33000E-01	9,6	9,6	0,294

Tabulka 4. Doba rezonance kmitání na vlastních tvarech uprostřed rozpětí pole

1. tvar [s]	2. tvar [s]	3. tvar [s]	4. tvar [s]	5. tvar [s]	6. tvar [s]	t celkem [s]	vrcholy [-]
0,851	0,690	2,994	6,770	7,024	10,312	174,45,0	5835,0

Ze 174,45 [s] tříminutového měření a po vypuštění mezilehlých hodnot měření mezi vrcholy, náleží 0,851 [s] do blízkosti 1. tvaru vlastního kmitu ve svislém směru z. Rozkmit zrychlení $\Delta a = 0,330$ [m/s²] vyvodí uprostřed rozpětí 2. pole rozkmit $\Delta h = 4,126$ [mm]. Bylo také prokázáno, že vlivem změny provozních podmínek za běžného provozu na mostě se také měnily výsledky hodnocení z jednotlivých tříminutových časových úseků. Uvedený rozkmit $\Delta h = 4,126$ mm byl největší z rozkmitů změřených za 10 minut vzorkováním 400 Hz.

V případě, že by rozkmit zrychlení Δa převyšoval přípustnou hodnotu Δa_p , potom by se ve shodě s praxí ŘSD ČR na panelu nad dálnicí objevila značka STOP při nařízeném zastavení, nebo značka dovolené rychlosti 30 km při zpomalení jízdy. Po uklidnění kmitání mostu by byly tyto informace odstraněny.

6. Závěry

Cílem bylo vyhotovení měřicího systému, který by na základě dat změřených akcelerometry s dostatečnou bezpečností včas informoval o nebezpečí vzniku rezonance s prvními tvary vlastních kmitů nosné konstrukce mostu. Jsme si vědomi, že v průběhu kmitu se zrychlení a rychlost mění nelineárně. Přesto byly vzaty průměrné hodnoty kinetické a potenciální energie. Nemuselo tak být použito diferenciální řešení a hledána integrační konstanty. Tato nepřesnost je vyvážena přijetím dostatečně nízké velikosti rozkmitu nosné konstrukce mostu jako přípustné, a to také v porovnání s deformacemi nosné konstrukce mostu při jeho vyrovnávání při montáži a také s doposud změřeným napětím za montáže

mostu a za běžného provozu na mostě. Podle dosavadních měření napětí by také napětí v nosné konstrukci při dosažení uváděného přípustného rozkmitu vzrostlo pouze v elastické oblasti.

Stanovení nízké přípustné hodnoty rozkmitu při vzniku rezonance poskytne dostatečnou dobu k informaci koloně vozidel jedoucích po mostě, aby včas zastavila. Z dosavadních zkušeností s přenosem dat z měřicí ústředny EMS DV 803 na mostě, na server ŘSD ČR v Praze lze říci, že během tří minut lze stihnout přenesení dat na server ŘSD ČR, pomocí SW KMITANI je zpracovat a zaslat zprávu na panel nad dálnicí. Po plánovaném ročním ověřování systému je možné tuto dobu modifikovat, včetně zkrácení.

Literatura

- [1] Vejvoda, S.: Ocelobetonový most přes Lochkovské údolí. Vyhodnocení měření od montáže v dubnu 2009 do října 2015. Zpráva VÚAM a.s., arch. č. V3333/20.
- [2] Vejvoda, S.: Provádění a vyhodnocování měření napětí ve svarech konstrukce mostu přes Lochkovské údolí, podpůrná konzultační a servisní činnost. Vyhodnocení měření za 2. pololetí roku 2023. Závěrečná zpráva úkolu. Zpráva VÚAM a.s., arch. č. V3346/24.
- [3] Svoboda, P.: Dokument LP-202-1301-20-300-8-3.pdf, obdrženy emailem dne 05.01.2024 v 11:39.



VAŠE CAD/BIM/AEC ŘEŠENÍ OD NÁVRHU PO VÝSTAVBU

Produktivnější, otevřenější a pokročilejší pracovní postupy:

Allplan 2024 posouvá produktivitu na novou úroveň. Nyní budete díky výkonným a automatizovaným návrhovým nástrojům, integrovaným cloudovým procesům a pokročilým pracovním BIM postupům schopni dokončit pracovní úkoly tak rychle jako nikdy předtím. To vám dává svobodu a možnost investovat více času do navrhování skvělé architektury, projektování efektivní dopravní infrastruktury nebo snadnějšího návrhu zařízení staveniště.

- > **Železobetonové monolitické a prefabrikované konstrukce**
- > **Ocelové konstrukce**
- > **Infrastrukturní stavby – od přehrad a přístavů až po silnice, tunely a mosty**
- > **Propojení na programy pro statickou analýzu**
- > **Pozemní stavitelství a TZB**
- > **Architektura a interiéry**
- > **Zařízení staveniště a plánování výstavby**

SCIA
ENGINEER



SDS2
BY ALLPLAN



Budoucnost je v ocelových konstrukcích

Ocel vstoupila bezpochybně i do 21. století jako jeden z nejvýznamnějších a nejvšestranněji použitelných stavebních materiálů. Ocel je vyráběna a používána ve své široké výrobní a jakostní škále. Je to právě neobyčejná a trvalá inovativní schopnost oceli v podobě jejího nevyčerpatelného bohatství, potenciálu vývoje výrobků, technologií a také komerční obslužnosti, která umožňuje nejen si své pozice jednoho z nejzákladnějších materiálů udržet, ale i prosazovat stále nové sféry využitelnosti. O vlastní využití tohoto potenciálu by se měla zasadit i Česká asociace ocelových konstrukcí a také se o to intenzivně a na různých úrovních snaží.

www.caok.cz



KONECRANES

2000 KG

Jeřábové systémy KBK Konecranes

Špičkové uživatelské možnosti

Systémy KBK splňují náročné požadavky pracovních stanic a výrobních linek, které manipulují s materiálem o hmotnosti až 2 000 kg. Díky vysoce kvalitním součástem vytvářejí KBK systémy bezpečné a ergonomické provozní prostředí s plynulým pojezdem jeřábu a minimálním hlukem.

Modulární zdvihací zařízení KBK nabízí širokou paletu konfigurací: od základních pracovních stanic až po vysoce specializované instalace. Jeřábový systém je flexibilní a lze ho snadno přizpůsobit měnícím se procesům a individuálním výrobním požadavkům.

www.konecranes.cz



Víme, jak stavět

Metrostav DIZ a Metrostav TBR jsou moderní, progresivní stavební společnosti s vysokými etickými standardy. Zákazníci oceňují profesionalitu a férový přístup kvalifikovaných zaměstnanců, stejně jako důraz na inovace a sledování oborových trendů v mnoha segmentech stavební výroby. Ohleduplný vztah k životnímu prostředí a občanské společnosti je nedílnou součástí firemní kultury obou společností.

metrostav DIZ

metrostav TBR

Název: XXVI. konference Ocelové konstrukce 2024 – Sborník příspěvků

Zpracoval: kolektiv autorů

Vydal: SEKURKON s.r.o.

Vyšlo: květen 2024

ISBN: 978-80-86604-92-3

Publikace neprošla obsahovou ani jazykovou úpravou.

Za věcnou správnost, písemnou a grafickou úroveň příspěvků odpovídají autoři.