

POŽÁRNÍ OCHRANA TUNELOVÉHO OSTĚNÍ

FIRE PROTECTION OF TUNNEL LININGS

LIBOR FLEISCHER

ABSTRAKT

Všechny podzemní stavby, kde se pohybují lidé, jsou složitými stavebními a technologickými díly. Nejen svým provedením, ale zejména následným provozem. Stejně jako objekty pozemního stavitelství i ty podzemní musí splňovat veškeré bezpečnostní podmínky. Mezi nejzákladnější požadavky patří zajištění stability objektu a požární bezpečnost. Podmínky pro bezpečnou evakuaci jsou dány v normativních požadavcích na tyto stavby. Jsou nedílnou součástí požárně bezpečnostního řešení stavby, které stanovuje zásady požární bezpečnosti každého konkrétního díla. Aby osoby měly možnost bezpečného úniku, musí stavební konstrukce vykazovat takovou požární odolnost, aby nedošlo k jejich porušení v příliš krátkém čase. Tady je zásadní rozdíl mezi požárem objektu stojícího na povrchu a požárem, který vznikne v podzemí. Při požáru pozemního objektu teplo vznikající hořením může volně unikat do okolí a objekt je ochlazován okolní atmosférou. Naopak při požáru v podzemí se teplo kumuluje uvnitř a stavba ukrytá v podzemí není tak účinně ochlazována, v podstatě se z tunelu stane pec. Samozřejmě záleží na zdroji hořlavých látek, ale jak ukázaly mnohé experimenty, stačí k těmto extrémním projevům běžné a na první pohled bezpečné materiály. Proto je důležité posoudit požární odolnost hlavní nosné konstrukce tunelu – ostění. Pro splnění navržených parametrů existuje několik způsobů a je na projektantovi, jaký systém požární ochrany ostění zvolí. Při návrhu by se měla zhodnotit veškerá rizika a zvážit i případné náklady na sanaci, či ekonomické dopady spojené s uzavřením podzemní dopravní tepny po dobu oprav.

ABSTRACT

All underground constructions with people moving inside are pieces of complex construction and technological work. It is so not only due to their execution but, in particular, due to the subsequent operation. As well as buildings, even underground constructions have to satisfy all safety conditions. Ensuring structural stability and fire safety belongs among the most basic requirements. Safe evacuation conditions are specified in standard requirements for these structures. They are an inseparable part of the fire design for the construction, which sets the principles of fire safety of each particular construction. Building structures have to exhibit fire safety preventing their damaging within a too short time so that persons are able to safely escape. Here is the basic difference between a fire in a building standing on the surface and a fire originating in the underground. In the case of a fire in a building on the surface, the heat generated by burning can freely escape to the surroundings and the structure is cooled down by the ambient atmosphere. On the contrary, in the case of a fire in the underground, heat is accumulated inside and the structure hidden in the underground is not cooled down so effectively and, in substance, the tunnel turns into a furnace. Of course, it depends on the source of flammable substances, but, as shown by numerous experiments, common and at first glance safe cargos suffice to these extreme manifestations. It is therefore important to assess the fire resistance of the main load-bearing tunnel structure, the lining. Several ways of meeting design parameters exist and it depends on designers which fire protection system they select. When a design is being carried out, all risks and potential costs of rehabilitation or economic consequences associated with closing the underground thoroughfare during repairs should be assessed.

ÚVOD

Dnešní doba je charakteristická volným pohybem osob a zboží. Zejména v Evropě v posledních desetiletích jsou patrné velké investice do dopravní infrastruktury. Tento trend se týká samozřejmě i všech rozvinutých částí světa. Se zahušťováním sítě komunikací přichází i potřeba budování podzemních dopravních staveb, a to buď z důvodu zkracování tras, nebo ukrytí dopravy pod povrch ve velkých městských aglomeracích za účelem zklidnění povrchové dopravy. Tento trend se nevyhýbá ani České republice a zejména jeden z největších projektů poslední doby – tunelový komplex Blanka – je toho důkazem.

Podzemní stavební díla jsou velmi náročné projekty nejen pro složitý způsob výstavby, ale také při jejich provozování. Jelikož se v dopravních tunelech pohybují lidé, jsou na tyto stavby kladeny přísné požadavky, mezi které spadá i požární bezpečnost. Tento článek se zabývá jen jednou částí požární problematiky, a to odolností ostění proti účinkům požárů spadající do pasivní oblasti požární odolnosti.

ZÁKLADNÍ NORMOVÉ POŽADAVKY

Základní požadavky pro projektování tunelů obsahují normy ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací a ČSN 73 7508 Železniční tunely.

INTRODUCTION

The present time is characterised by the free movement of people and goods. Large investments into transport infrastructure have been apparent in recent decades in particular in Europe. Of course, this trend relates to all developed parts of the world. A need for developing underground transportation structures comes with increasing the road network density, carried out either for the reason of reducing the lengths of routes or hiding transportation under the surface in large urban agglomerations with the aim of reducing surface traffic flow. This trend even does not avoid the Czech Republic. The Blanka complex of tunnels, one of the recent largest projects, is a proof of it.

Underground construction projects are very exacting not only because of complicated construction processes but also because of the complex operation. Since people move through traffic and transport tunnels, strict requirements are imposed on them, with fire resistance among them. This paper only deals with one part of fire protection problems, the resistance of a lining to the effects of fires, which falls into the passive area of fire resistance.

BASIC STANDARD REQUIREMENTS

Basic requirements for designing tunnels are contained in standards ČSN 73 7507 Design of Road Tunnels and ČSN 73 7508 Railway Tunnels.

Předmětem prvně jmenované normy je navrhování tunelů pozemních komunikací a variant jejich šířkového uspořádání, průjezdný prostor tunelu, jeho příčné uspořádání, směrové a výškové vedení komunikace v tunelu. Obsahuje konstrukční pokyny, bezpečnostní úpravy i zásady požární bezpečnosti. Norma platí pro projektování nově navrhovaných tunelů silnic, dálnic a místních komunikací. Pro projektování rekonstrukcí a nového technického vybavení stávajících tunelů platí ustanovení této normy v maximálně využitelném rozsahu. Norma neplatí pro tunely místních komunikací a tunely s městskou kolejovou hromadnou dopravou, pro samostatné tunely nemotoristických komunikací a pro tunely účelových komunikací. Norma také neplatí pro podjezdy a tunely do 100 m délky. Druhá výše uvedená norma platí pro projektování tunelů drážních pro kolejová vozidla do rychlosti 160 km/h.

Obě normy obsahují kapitoly zabývající se požární bezpečností a opírají se o základní normy požární bezpečnosti staveb: ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty, ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty, ČSN 73 0810 Požární bezpečnost – Společná ustanovení, ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou, ČSN 73 0875 Požární bezpečnost staveb – Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení, ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Kabelové rozvody.

Dopravní prostor tunelové trouby je podle ČSN 73 0875 taxativně zaříděn do pátého stupně požární bezpečnosti u krátkých tunelů (krátký tunel je tunel s délkou 100 až 500 m včetně), střední a dlouhé tunely pak do sedmého stupně požární odolnosti (střední tunel má délku 500 až 1000 m včetně, dlouhý tunel přes 1000 m). Což znamená, že tunelové ostění, pokud plní nosnou funkci, musí mít pro krátké tunely požární odolnost REI 120, pro střední a dlouhé tunely REI 180. Konstrukce a materiály použité na ostění musí být třídy reakce na oheň A1.

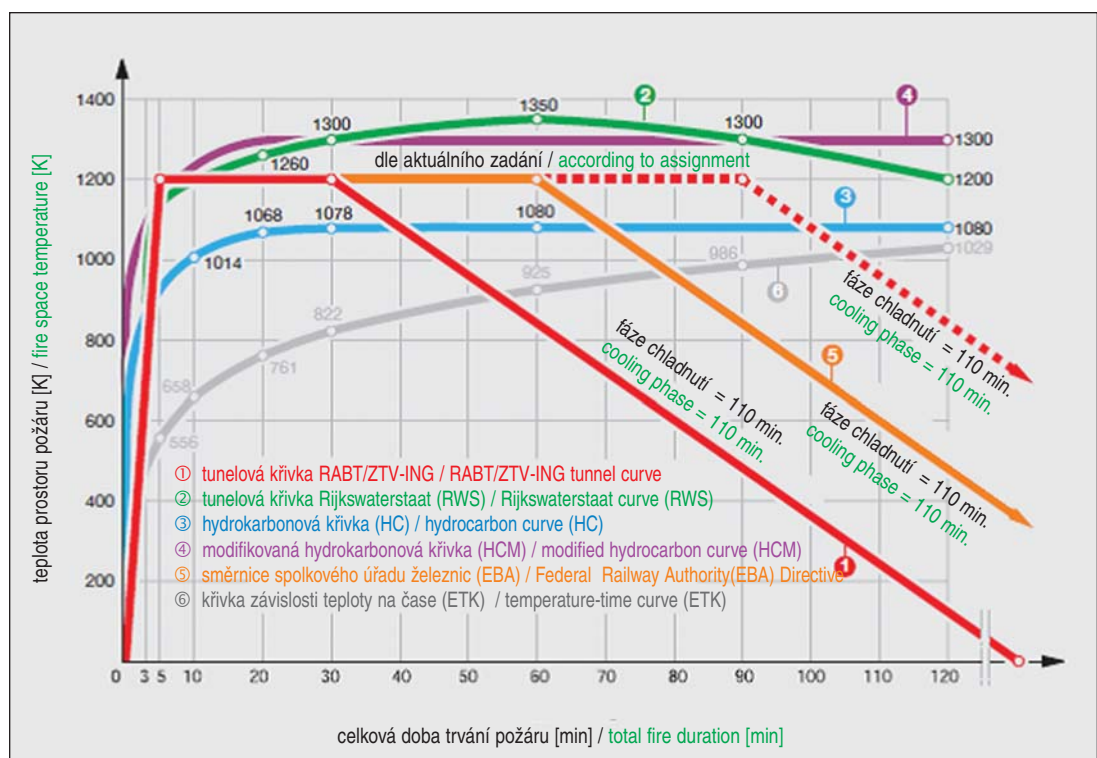
V České republice se v podzemních tunelových stavbách uvažuje teplotní scénář podle křivky ETK, což je normový požár v uzavřené místnosti. Ovšem v tomto směru neexistuje mezi jednotlivými zeměmi shoda a každá země se řídí svými požadavky a předpisy. Aplikovatelných křivek je několik a názory na průběh požáru v tunelu se mezi odborníky liší. Jednotlivé křivky jsou uvedeny na obr. 1.

Pokud porovnáme teploty u ETK křivky a nejpřísnější křivky RWS v třicáté minutě, je rozdíl teplot 478 °C. Jak prokázalo několik reálných testů (například Runehamar test, uskutečnil se v Norsku v roce 2003, pojednává o něm článek

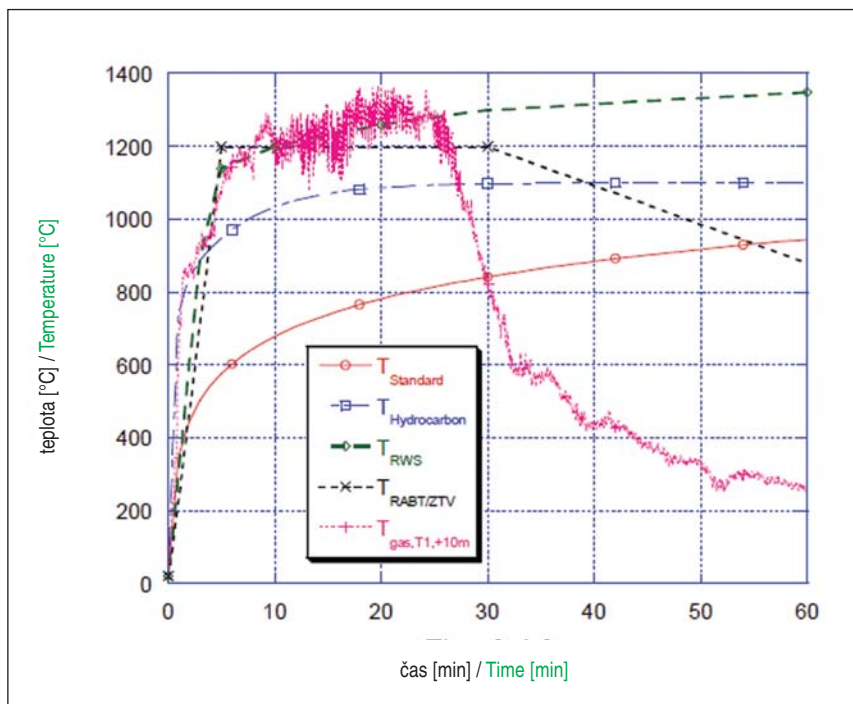
The subject of the former standard is designing road tunnels and the variants of the roadway width geometry, the tunnel clearance profile, the transverse arrangement of the clearance profile and the horizontal and vertical alignment of the road in a tunnel. The standard contains construction instructions, safety modifications and fire safety principles. It is applicable to designing newly proposed tunnels for roads, motorways and local roads. As far as designing for reconstruction and new technical equipment of existing tunnels is concerned, the provisions of this standard are applicable to the maximum usable extent. The standard is not applicable to tunnels on local roads and tunnels carrying urban track-bound mass transport, to independent tunnels on non-motoring roads and to tunnels on tertiary roads. In addition, the standard is not applicable to underpasses and tunnels with the length of up to 100m. The latter above-mentioned standard is applicable to designing railway tunnels for rail vehicles with the maximum velocity of 160km/h.

Both standards contain chapters dealing with fire safety. They are based on the following fundamental standards on the fire safety of buildings: ČSN 73 0802 Fire protection of buildings – Non-industrial buildings, ČSN 73 0804 Fire protection of buildings – Industrial buildings, ČSN 73 0810 Fire protection – General requirements, ČSN 73 0873 Fire protection of buildings – Equipment for fire-water supply, ČSN 73 0875 Fire protection of buildings – Setting specification for design of fire detection systems, ČSN 73 0848 Fire protection of buildings – Cable line.

Road space in a tunnel tube is exhaustively categorised by ČSN 73 08 7507 as the fire safety degree five for short tunnels (the short tunnel is a tunnel with the length of 100-500m, inclusively), whilst medium-length and long tunnels are categorised as fire resistance degree seven (the medium-length tunnel is 500 to 1000m long, inclusively; the long tunnel length exceeds 1000m). It means that the fire resistance class of a tunnel lining fulfilling a bearing function has to be REI 120 for short tunnels and REI 180 for medium-length and long tunnels. The fire



Obr. 1 Teplotní křivky požárních scénářů
 Fig. 1 Temperature curves of fire scenarios



Obr. 2 Průběh teplot plynů v porovnání s teplotními křivkami
Fig. 2 History of temperatures of gases compared with temperature curves

ve stejném čísle časopisu Tunel), kdy se nechaly hořet reálné, běžně se vyskytující náklady bez zvláštního rizika (dřevěné palety, plastové materiály), dosahované teploty překračovaly 1300 °C. Navíc se ukázalo, že nárůst teplot je mnohem rychlejší a již v páté minutě dosahovala teplota plynů přes 1200 °C. Průběh teplot plynů v porovnání s teplotními křivkami je vidět na grafu v obr. 2.

U každého nově navrhovaného tunelu je nutná analýza případných rizik. Na základě této analýzy a následně požárně bezpečnostního řešení stanovuje projektant podrobné požadavky na zajištění požární bezpečnosti stavby. V minulých letech se odehrálo několik vážných požárů v dopravních tunelech. Tyto události vedly k diskusi o úrovni zabezpečení podzemních staveb a snaze zvýšit bezpečnost všeobecně. Při porovnání úmrtí doprovázejících havárie spojené s požáry v tunelech a na běžných komunikacích hovoří statistiky jasně. Tunely jsou bezpečnější než otevřené komunikace. Jenže kolik kilometrů je otevřených komunikací a kolik kilometrů je tunelů?

Podzemní stavby mají velmi rozdílná specifika oproti stavbám na povrchu:

- evakuace osob – je možná jen směrem ven k portálu tunelu, druhým tubusem nebo únikovou štolou, z tunelu nejde vyběhnout ze dveří, vyskočit oknem, slézt po žebříku nebo odletět ve vrtulníku;
- větrání – odvod kouře a tepla – velké objemy, specifika tlakových poměrů v tubusech tunelů;
- kolaps stavebních konstrukcí – porušení únosnosti ostění může vést k závalům, zaplavení, zejména u mělce založených podzemních staveb nacházejících se v městských aglomeracích a pod vodními plochami;
- zásah jednotek integrovaného záchranného systému, zejména jednotek HZS;
- omezení fungování infrastruktury po dobu sanace poškozené stavby;
- technologické vybavení sloužící pro běžný provoz a zejména pak při krizových situacích.

reaction class A1 is prescribed for structures and materials used for the lining.

In the Czech Republic, the ETK curve is assumed for the temperature scenario for underground tunnel structures, which is a standard fire in a closed room. However, no consensus exists in this respect among individual countries and each country follows its own requirements and regulations. There are several applicable curves available and opinions on the course of a tunnel fire among professionals differ. They are presented in Fig. 1.

If we compare temperatures at the ETK curve and the most stringent RWS curve in the thirtieth minute, the difference amounts to 478°C. As proved by several realistic tests (for example the Runehamar test conducted in Norway in 2003, which is discussed in the same issue of TUNEL journal), where temperatures reached by burning realistic commonly occurring cargos without any special risk (wooden pallets, plastic materials) exceeded 1300°C. In addition, it turned out that the temperature increase rate is much faster and the temperature of gases exceeded 1200°C as early as the fifth minute. The history of the temperatures of gases in comparison with temperature curves is presented in Fig. 2.

An analysis of potential risks is necessary for each newly designed tunnel. Detailed requirements for ensuring the fire safety of a structure is set by the designer on the basis of this analysis and the subsequent fire design. Several serious fires happened in traffic tunnels during the recent years. These events led to discussions about the level of fire safety of underground structures and the effort to improve the safety in general. When death tolls accompanying incidents associated with fires in tunnels and on common roads are compared, statistics speak clearly. Tunnels are safer than open roads. However, how many kilometres of open roads exist and how many kilometres of tunnels exist?

The specifics of underground structures significantly differ from at-grade buildings:

- evacuation of persons – it is possible only in the direction toward the tunnel portal, through the other tunnel tube or through an escape gallery. It is not possible to run away from a tunnel through a door, jump out a window, climb down a ladder or fly away by a helicopter;
- ventilation – removing smoke and heat – large volumes, specifics of pressure conditions in tunnel tubes;
- a collapse of building structures – bearing failure of a lining may lead to collapses or inundation, mainly in shallowly founded underground structures located within urban agglomerations and under water areas;
- intervention of the Integrated Rescue System units, in particular the Fire Rescue Service;
- restricted functioning of the infrastructure during the course of the damaged structure rehabilitation;
- tunnel equipment serving during common operation and, in particular, during crisis situations.

PROPERTIES OF CONCRETE AND VARIANTS OF ITS PROTECTION

Concrete itself is an excellent material and is certainly most suitable for the construction of underground structures. On the

VLASTNOSTI BETONU A VARIANTY JEHO OCHRANY

Beton sám o sobě je výborný materiál a pro stavbu podzemních staveb určitě nejvhodnější. Z hlediska požární odolnosti má však své limity. Je možné zabezpečit vlastní odolnost pouhým betonem. Je to otázka zejména tloušťky krytí ocelové výztuže a celkové tloušťky železobetonové konstrukce. Při zahřátí betonu nad 100 °C dochází k několika reakcím. Fyzikálně, částečně také chemicky vázaná voda se v betonu uvolňuje a uniká ven. Expanzní faktor voda : vodní pára je 1:1700. Což způsobuje odprýskávání kusů betonu do velkých hloubek a dochází tak k oslabování nosné výztuže a rychlejší ztrátě nosnosti. Tento jev je o to intenzivnější, čím je beton kvalitnější, hutnější a tedy méně propustný pro unikání vodní páry. Odprýskaný beton je patrný na obr. 3, kde je zachycen vzorek betonového dílce ze standardního betonu s výztuží. Na obr. 4 je zaznamenán stav betonu po reálném požáru.

Rozhodující je také rychlost nárůstu teploty, kdy se ještě výrazněji projevují rozdíly v uvažovaných teplotních scénářích oproti křivce ETK a například RWS. Dalším projevem je teplotní degradace betonu. Tato degradace je nevratná a znamená vždy rozsáhlé sanační práce do velkých hloubek poškozeného betonu. Pro beton jsou zásadní teploty nad 300 °C a doba působení těchto teplot. Při teplotě 100–200 °C dochází ke ztrátě fyzikálně vázané vody a k enormnímu zvýšení vnitřního tlaku vyvolaného expanzí vodní páry. Současně dochází k rozkladu sádry. Kolem teploty 300–350 °C začíná prskat křemičité kamenivo. Při teplotě 400 °C se rozkládá Portlandit. Kolem teploty 500 °C dochází ke změnám z krystalové fáze z β na α . Při teplotě 700 °C nastává rozklad uhličitánu vápenatého. Jedná se o silnou endotermickou reakci, která je doprovázena uvolňováním oxidu uhličitého, 800 °C znamená začátek vzniku keramických vazeb. Při teplotě 1100–1200 °C se tvoří Wollastonit. Teplota 1300 °C znamená celkový rozklad betonu a tavení některých složek. Shrnutí těchto skutečností může být jednoduše interpretováno tak, že konstrukční beton při teplotě 500 °C má pouze 50 % únosnost a při teplotě 800 °C již jen 10 % únosnost. A velmi podobně s únosností je na tom ocel. Na obr. 5 je znázorněn graf ztráty pevnosti betonu a oceli v závislosti na rostoucí teplotě.

Záleží vždy na konkrétní skladbě betonové směsi, na stáří betonu, na vlhkosti betonu, ale u běžných stavebních betonů



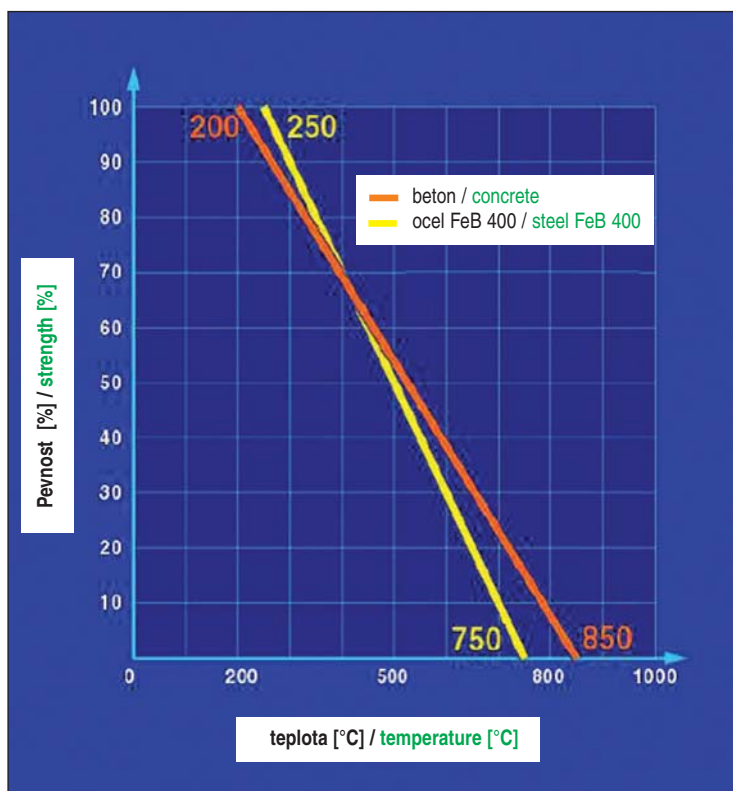
Obr. 3 Ukázka odprýskaného betonu až po ocelovou výztuž
Fig. 3 Demonstration of concrete flaked off up to steel reinforcement

other hand, it has got its limitations from the aspect of fire resistance. It is mainly the matter of the concrete cover of steel reinforcement and the total thickness of the reinforced concrete structure. When concrete is heated over 100°C, several reactions take place. Water physically and partly even chemically bound in concrete releases and escapes out. The water : steam expansion factor is 1:1700. This phenomenon causes spalling off of the concrete surface up to great depths resulting into reducing the strength of bearing reinforcement and more rapid loss of the load-bearing capacity. This phenomenon is the more intense the higher the quality and density of concrete (the less permeable for escaping steam). Examples of flaked off concrete surfaces are presented in Fig. 3, where a sample of a concrete lining segment made of standard concrete containing steel reinforcement is exhibited. The condition of concrete after a real fire is recorded in Fig. 4.

The increase in the temperature, where the differences in the assumed temperature development scenarios in comparison with the ETK curve and, for example, the RWS curve manifest themselves even more noticeably, is also crucial. The thermal degradation of concrete is another manifestation. This degradation is irreversible and always means the extensive rehabilitation of the damaged concrete reaching to large depths. Temperatures over 300°C and the duration of the action of these temperatures are crucial for concrete. Physically bound water is lost and the internal pressure induced by the expansion enormously increases at temperatures ranging from 100 to 200°C. At the same time gypsum starts to decompose. Around the temperature of 300-350°C siliceous aggregates begin to crack. Portlandite decomposes at 400°C. Around the temperature around 500°C, crystalline phase β starts to convert into phase α . At the temperature of 700°C, calcium carbonate begins to decompose. It is a strong endothermic reaction, which is accompanied by releasing carbon dioxide; 800°C means the beginning of the origination of ceramic bonding. Wollastonite develops at the temperature of 1100–1200°C. The temperature of 1300°C means the overall decomposition of concrete and melting of some components. Summing these facts up can be simply interpreted as the fact that structural concrete at the temperature of 500°C has only 50% bearing capacity, whilst the capacity is only 10% at the temperature of 800°C. The strength of steel behaves very similarly. A chart of the loss of strength of concrete and steel depending on growing temperatures is presented in Fig. 5.



Obr. 4 Oprýskání betonu až na nosnou výztuž
Fig. 4 Concrete suffering spalling up to the depth of the bearing reinforcement



Obr. 5 Závislost pevnosti betonu a oceli na teplotě

Fig. 5 Dependence of the strengths of concrete and steel on temperature

půjde o velmi podobný průběh. Existují samozřejmě i speciální žárobetony, ty ale nejsou vhodné jako konstrukční beton pro stavební konstrukce.

Kromě složení betonové směsi má na celkovou odolnost vliv i tvar ostění. Jako nejvhodnější tvar se jeví klasická zakřivená klenba. Naopak ostění skládající se ze svislých stěn a vodorovného stropu odolává tepelnému zatížení daleko obtížněji. Takovému ostění se nejde často vyhnout ani u tunelů s klasickou klenbou, kde u rozsáhlejších a složitějších děl se v podzemí nacházejí například odbočky, z důvodů šířky vozovky se v takových částech volí vodorovná nosná konstrukce. Na základě mnoha testů prováděných akreditovanou zkušebnou Efectis na modelech tunelových tubusů pravoúhlého tvaru se ukázalo, že kromě standardních projevů betonu dochází vlivem kumulace napětí v rozích na styku stěna – strop k selhání konstrukce, kdy vznikají trhliny na celou tloušťku ostění. Tento typ ostění se používá nejčastěji u mělkých hloubených tunelových staveb v městských aglomeracích, kde na povrchu stojí budovy nebo tam jsou povrchové komunikace. Destrukce ostění pak může způsobit zával a poškození povrchové infrastruktury.

Varianty ochrany betonového ostění

a) Krytí výztuže betonem

Chování betonu při vysokých teplotách již bylo popsáno. Přesto jednou z variant, jak zajistit požární odolnost konstrukce, je zejména návrh krytí betonu odpovídající požadované požární odolnosti. Tato praxe je běžná v pozemním stavitelství. Betonové krytí ocelové výztuže nabízí požární ochranu po určitou dobu, vyšší betonové krytí prodlužuje tuto dobu až do doby dosažení kritických teplot na výztuži. V zásadě může zvýšené krytí betonem prodloužit čas do nástupu kritického odprýskávání. Má to však své hranice. Zkušenosti z požárů a výsledky zkoušek s modelovými požáry ukazují dokonce tvorbu trhlin s odprýskáním do hloubek

It always depends of the particular composition of concrete mix, the concrete age and the concrete moisture, but the course will be very similar in the cases of common structural concrete types. Of course, special high temperature resisting concrete types for building structures exist, but they are not suitable as structural concrete for common building structures.

Apart from the composition of concrete mix, even the lining geometry affects the overall resistance. A classical curved vault appears to be the most suitable geometry. On the contrary, a lining consisting of vertical walls and a horizontal ceiling resists thermal loads with much more difficulty. Such a lining type cannot be often avoided even in tunnels with a classical vault, where, for example, branches are located in the underground in more extensive and more complicated structures, where, with respect to the roadway width, horizontal bearing structures are selected for such parts. It turned out on the basis of numerous tests conducted on models of rectangular geometry tunnel tubes by Efectis, an accredited testing laboratory, that, apart from standard manifestations of concrete, the structure fails at corners at the wall – roof interface due to the accumulation of stress and cracks develop throughout the lining thickness. This lining type is used most frequently in shallow cut-and-cover tunnel structures in urban agglomerations, where buildings stand on the surface or where there are at-grade roads. In such the case the destruction of the lining may cause a collapse and damage to the surface infrastructure.

Concrete lining protection variants

a) Covering steel reinforcement with concrete

The behaviour of concrete at high temperatures has already been described. Despite this fact one of the variants how to ensure fire resistance of a structure lies in the concrete cover corresponding to the fire resistance required. This practice is common in building. Covering steel reinforcement with concrete offers fire protection for a certain time; thicker concrete covers extend this time until the critical temperatures are reached on the reinforcement surface. Basically, the increased thickness of concrete cover may extend the time to the onset of critical spalling. Of course, it has got its limits. However, experience from fires and results of tests with model fires show the development of cracks up to the depths exceeding 40mm. A concrete structure damaged by fire requires expensive and long-running repair measures.

The fire in the Eurotunnel in 1996 led to serious damages to the tunnel lining along the length of 500m. Concrete flaked off up to the depth of two thirds of the lining thickness. The repair of the damaged section took 6 months and claimed ca 55 million Euros. The damage and losses incurred due to the suspension of the tunnel operation climbed to 300 million Euros.

b) Concrete with the content of polypropylene fibres

One of the ways how to restrict concrete flaking lies in creating sufficient space in concrete for the expansion of the steam originating during the course of heating the concrete. To this end, adding of polypropylene fibres to concrete mix started. It is currently the most common method of increasing the fire resistance of concrete tunnel linings. The method takes advantage of the low melting temperature of the fibres, fluctuating about 160°C. After the fibres are melted, a network of free canals develops in the concrete layer, allowing steam to escape to the surface. In this way the pressure is reduced and massive

vyšších než 40 mm. Požárem poškozená betonová konstrukce vyžaduje drahá a dlouhou dobu trvající sanační opatření.

Požár v Eurotunelu v roce 1996 vedl k vážnému poškození ostění tunelu v délce 500 m. Došlo k odprýskání betonu do hloubky dvou třetin síly ostění. Oprava poškozeného úseku trvala 6 měsíců a vyžádala si cca 56 milionů eur. Škoda a finanční ztráty za neprovozování tunelu po dobu oprav se tehdy vyšplhaly na částku 300 milionů eur.

b) Beton s obsahem polypropylenových vláken

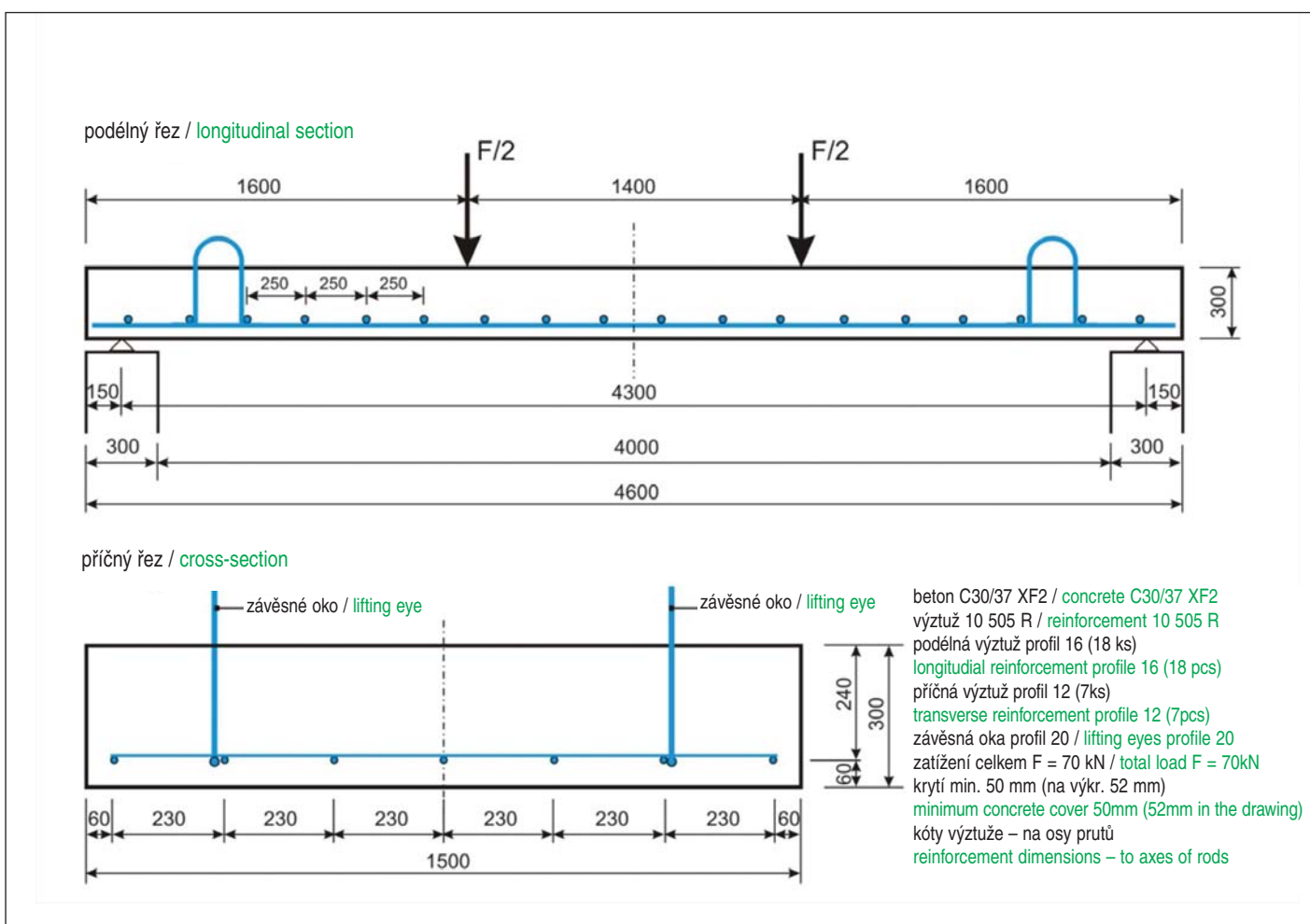
Jednou z cest, jak omezit odprýskávání betonu, je vytvořit v něm dostatečný prostor k expanzi vodní páry, vznikající při zahřátí betonu. Za tímto účelem se začala do betonu přidávat polypropylenová vlákna. V dnešní době se jedná o nejběžnější metodu ke zvýšení požární odolnosti betonových ostění tunelů. Využívá se nízké teploty tání těchto vláken, která se pohybuje kolem hodnoty 160 °C. Po jejich roztavení se vytvoří v betonové vrstvě síť volných kanálků, jimiž může k povrchu unikat vodní pára, čímž se sníží tlak a nedochází k masivnímu odprýskávání. Pro správnou funkci je důležité pravidelné rozptýlení vláken v betonu. Tato technologie prodlouží zachování celistvosti betonové konstrukce, nedokáže však ochránit vlastní beton před účinky vysokých teplot, které způsobují jeho rozpad. I když se může po požáru povrch betonu jevit v pořádku, jeho vlastnosti budou změněny a měl by být posouzen rozsah sanace.

V roce 2009 až 2010 probíhaly ve zkušebně PAVUS a. s. ve Veselí nad Lužnicí zkoušky vodorovného tunelového ostění.

flaking does not take place. Regular dispersion of fibres in concrete is important for proper functioning. This technology extends maintaining the integrity of the concrete structure, but it is not able to protect the concrete against the effects of high temperatures causing its decomposition. Even if the concrete surface may appear to be in order, its properties will be changed and the extent of rehabilitation should be assessed.

In 2009 to 2010, tests were conducted on the horizontal tunnel lining at PAVUS a. s. testing laboratory in Veselí nad Lužnicí. The tests were organised within the framework of the CIDETAS Exploration Centre at the Czech Technical University, under the auspices of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic, project No. 1M0579. The purpose of the tests was to verify linings loaded during a fire according to the hydrocarbon curve. Two samples with the dimensions of 4600x1500x300mm, produced from C30/37 grade concrete, containing polypropylene fibres (reinforcing steel grade 10 505 R, seven longitudinal rods \varnothing 16mm, minimum concrete cover 50mm; transverse rods \varnothing 12mm, spaced at 250mm) were always tested. The samples were loaded by 70kN. The drawing is in Fig. 6. The required fire resistance was R 180 and the values of the deflection limit and deflection rate limit were adopted as criteria for reaching the limit states. The value of the deflection limit $D = L^2/400d = 154.1\text{mm}$ and the deflection rate limit $dD/dt = 6.85\text{mm/min}$ were prescribed.

The good effectiveness of the fibres manifested itself during the course of the test; no significant scaling appeared. On the other hand, deformations grew relatively rapidly; sample DI did



Obr. 6 Schéma modelu stropní desky

Fig. 6 Diagram of the model of a roof deck



Obr. 7 Vzorek po zkoušce s viditelnou velikostí deformace
Fig. 7 A sample after testing, showing a visible magnitude of deformation

Testy byly organizovány v rámci Výzkumného centra CIDE-TAS při ČVUT za podpory MŠMT ČR, projekt č. 1M0579. Předmětem testů bylo ověřit chování ostění se zatížením při požáru, probíhajícího podle hydrokarbonové křivky. Testovaly se vždy 2 vzorky o rozměrech 4600x1500x300 mm vyrobené z betonu třídy C30/37 XF2 s obsahem polypropylenových vláken (ocel výztuže 10 505 R, podélná v sedmi kusech Ø 16 mm minimální krytí 50 mm, příčná výztuž Ø 12 mm po 250 mm). Zatížení vzorků bylo 70 kN. Výkres konstrukce je na obr. 6. Požadovaná požární odolnost byla R 180 a kritérii dosažení mezních stavů byly hodnoty mezního průhybu a mezní rychlost průhybu. Pro dané vzorky byla hodnota mezního průhybu $D = L^2/400d = 154,1 \text{ mm}$ a mezní rychlost průhybu $dD/dt = 6,85 \text{ mm/min}$.

V průběhu zkoušky se projevila dobrá účinnost vláken, nedocházelo k velkému odprýskávání betonu. Na druhou stranu deformace rostly poměrně rychle, vzorek D1 nevyhověl na mezní velikost deformace a vzorek D2 jen těsně. Výsledky jsou patrné z grafu na obr. 9. Dalším zjištěním po odebrání vzorků bylo, že beton byl tepelně degradován a jeho struktura poškozena do velkých hloubek. Objevily se také trhliny do více než 2/3 tloušťky vzorku, které jsou patrné na obr. 7 a 8.

Zkouška ukázala, že polypropylenová vlákna omezila odprýskávání betonu, což umožnilo výrazně prodloužit odolnost zkušebních vzorků. Ukázalo se ale také, že beton má limitní izolační schopnosti pro ochranu ocelové výztuže, pokud je použito namáhání podle hydrokarbonové křivky. Důkazem jsou velikosti deformací. Vlákna také nezabrání teplem degradaci betonu do velkých hloubek.

c) Protipožární omítky

Další z variant ochrany betonového ostění je použití speciálních protipožárních omítek. Mají velkou výhodu, že jejich aplikace je možná na jakýkoliv zakřivený povrch. Jeví se jako dobrý materiál pro sanace. Nevýhodou naopak je problematická přídržnost k podkladům, na které jsou aplikovány. U nových betonů na povrchu zůstávají zbytky přípravků usnadňující odbedňování. Lze je běžně smýt vodou a doporučuje se oplach studenou tlakovou vodou při minimálním tlaku 200 barů. To platí, pokud bednění je odstraněno po úplném vytvrdnutí betonu. Pokud se z důvodů zvýšení produktivity a v souladu s technologickým předpisem provádí odbedňování dříve, používají se k zabránění rychlého vysychání povrchu ochranné přípravky, které mohou vsáknout do betonu do hloubky 1–2 mm. V tomto případě oplach tlakovou

not satisfy the criterion for the deformation value limit and sample D2 passed only narrowly. The results are obvious from graph in Fig. 9. Another findings made after taking the samples were that the concrete was thermally degraded and its structure was damaged to great depth. Even cracks reaching deeper than 2/3 of the sample thickness appeared. They are shown in Figures 7 and 8.

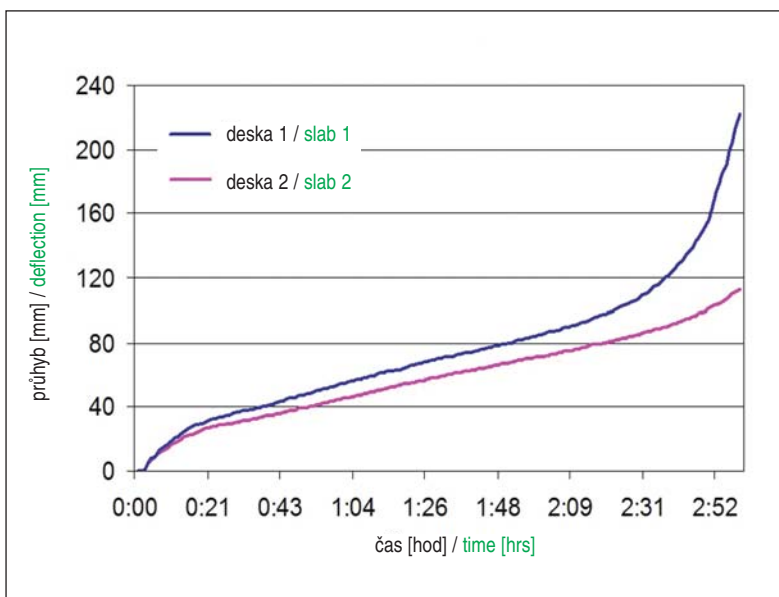
The test proved that polypropylene fibres restricted concrete spalling, which fact allowed for significant extension of the duration of the resistance of the test samples. However, it in addition turned out that the concrete has got limit insulation properties regarding the protection of steel reinforcement if the stressing according to the hydrocarbon curve is applied. The magnitude of deformations is a proof of it. In addition, the fibres do not prevent thermal degradation of concrete to great depths.

c) Fire-protective plastering

Another variant of the protection of concrete linings is the application of special fire-protective mortars. The great advantage of them is the fact that their application is possible to any curved surface. They appear to be a good material for repairs. Conversely, the problematic bond to the substrate to which they are applied is their disadvantage. In the cases of new surfaces, remains of concrete form release agents stick to the surface. Usually they can be washed off with water; rinsing with cool high-pressure water under the minimum pressure of 200bar is recommended. This applies if the formwork is struck after concrete completely hardens. If stripping is carried out sooner for the reason of increasing productivity and in compliance with a technological regulation, protective agents preventing quick drying of the surface are applied, which can soak into concrete up to the depth of 1-2mm. In this case rinsing with 200bar high-pressure water is not sufficient and it is necessary to use ultra-high-pressure washing with the application of the water pressure of 700bar. Perfect cleaning of the substrate is absolutely necessary in the cases of the reconstruction of older structures. It is possible to use special detergents removing all sediments from the concrete surface. Concrete linings of longer operated tunnels is usually strongly contaminated with dirt and emissions produced by passing vehicles. Rinsing with 700bar high-pressure water is also recommended, depending on the lining surface condition. An inseparable part is the creation of an adhesion bridge prior the application of the plastering. It will allow for perfect bonding of the plaster with the concrete substrate. The



Obr. 8 Detail velikostí trhlín
Fig. 8 A detail of the magnitude of cracks



Obr. 9 Deformace desky v závislosti na čase

Fig. 9 Deformation of a slab in dependence on time

vodou 200 barů nestačí a musí být použito ultra vysokotlaké omytí, kdy se používá tlaku vody 700 barů. U rekonstrukcí starších staveb je bezpodmínečné perfektní očištění podkladu. Je možno použít speciální detergenty, které odstraní z povrchu betonu veškeré usazeniny. Betonové ostění u déle provozovaných tunelů bývá silně kontaminováno nečistotami a emisemi od projíždějících vozidel. Podle stavu povrchu ostění se doporučuje provést rovněž oplach takovou vodou 700 barů. Nedílnou součástí před aplikací omítkoviny je vytvoření adhezivního můstku, který umožní perfektní spojení malty s betonovým podkladem. Použití výztužné sítě kotvené do ostění tunelu není nutné a záleží na předpisu konkrétního výrobce. Pokud však musí být použita, doporučuje se výhradně nerezová. U starých ostění se doporučuje provést zkoušku přilnavosti vhodným zařízením, například odtrhávací zkoušečkou PosiTest®.

U omítek bývá problematická výsledná kvalita povrchu, která nemusí vyhovovat požadavkům na pohledové vlastnosti ostění. Pouhým nástřikem nelze dosáhnout hladkého povrchu. Je možné zahlazení, které se však provádí ručně, což zvyšuje pracnost a prodlužuje dobu aplikace.



Obr. 10 Poškození betonu požárem

Fig. 10 Damage to concrete by a fire

application of a reinforcing mesh anchored into the tunnel lining is not necessary and depends on the manufacturer's specifications. But if it has to be used, we recommend exclusively stainless steel. In the cases of old linings it is recommended that a bonding test is conducted using proper equipment, for example PosiTest® tester.

As far as the plaster is concerned, the resultant quality, which does not have to meet requirements for visual properties of the lining, is often problematic. It is impossible to achieve a smooth surface only by spray application. Smoothing the surface is possible, but it is carried out by hand. It increases labouriousness and extends the duration of the application.

A typical and worldwide used representative of fire-protective plastering material is Cafco FENDOLITE® MII, which is based on Portland cement and vermiculite.

d) Cladding with fire-protective slabs

Cladding linings with slabs belongs among the most effective methods of protecting the linings. It is not at all a new technology. The first documentable application was in England, in the town of Darford, in 1963.

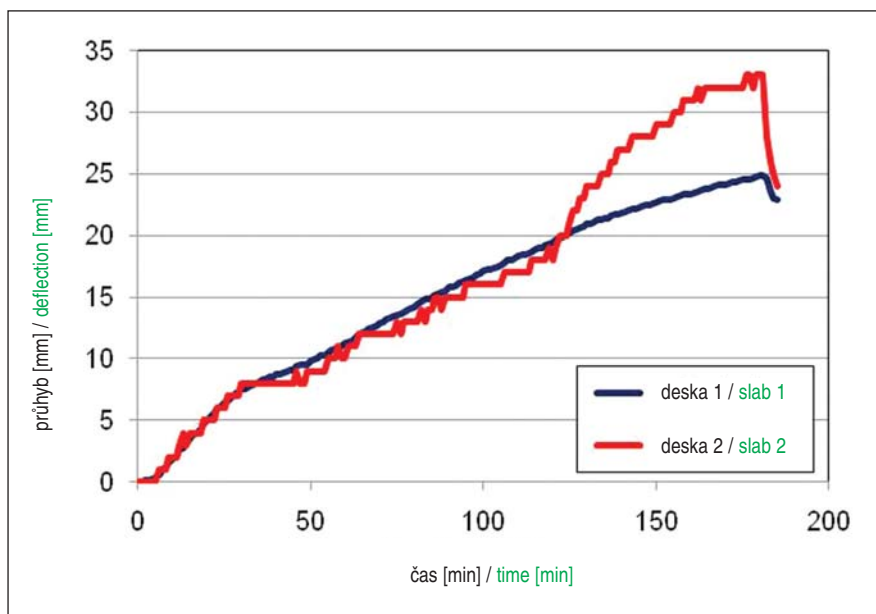
The advantage of cladding with slabs is that it fulfils several functions. The first and most basic of them is fire protection – securing the bearing capacity and stability of tunnel linings. The cladding can be designed for the effects of the most stringent temperature scenarios so that temperatures in concrete and steel reinforcement do not exceed the critical limit. In addition, the cladding works as a filter against aggressive substances, such as chlorides from road salt or exhaust emissions, thus reducing the corrosion of concrete reinforcement. In addition, cladding can act as a safety umbrella in leaking tunnels, such as that in Hamburg, where the cladding in tunnels under water areas ensures flowing of seeping water down to the lining footings, where water is diverted through a pipeline to storage tanks to be pumped outside the tunnel from them.

A great advantage in the case of a tunnel fire lies in the quick replacement of damaged slabs. Of course, the lining is checked, but experience from real fires shows that the lining is not at all damaged or the damage is miniscule in comparison with the other systems of protecting linings against the effects of fires. The fire in one of Hamburg tunnels which happened in 2011 can be used as a proof. Fortunately, it was not a big fire and nobody



Obr. 11 Stav ostění po 180 minutách – minimální deformace

Fig. 11 Lining condition after 180 minutes – minimum deformation



Obr. 12 Průběh deformace na vzorcích ostění s obklady

Fig. 12 Development of deformation on lining samples with cladding

Typickým a celosvětově používaným představitelem protipožární omítkoviny je materiál Caeco FENDOLITE® MII, jeho základem je portlandský cement a vermikulit.

d) Obklady protipožárními deskami

Obklady ostění deskami patří k nejúčinnějším způsobům ochrany ostění a nejedná se vůbec o novou technologii. První doložitelná aplikace byla v Anglii ve městě Darford v roce 1963. Výhodou deskových obkladů je, že plní více funkcí. Tou první a nejzákladnější je požární ochrana – zajištění únosnosti a stability tunelového ostění. Obklad může být navržen na účinky nejpřísnějších teplotních scénářů tak, aby teploty v betonu a ocelové výztuži nepřekročily kritickou mez. Obklad dále funguje jako filtr proti agresivním látkám, jako jsou chloridy z posypových solí nebo emise výfukových plynů, čímž je omezena koroze ocelové výztuže. Dále může obklad sloužit jako pojistný deštník u prosakujících tunelů, jako je to ve městě Hamburk, kde obklad v tunelech pod vodními plochami zajišťuje stékání prosakující vody k patám ostění, kde je voda odvedena potrubím do záchytných jímek a odtud čerpána mimo tunel.

V případě požáru v tunelu je velkou výhodou rychlá výměna poškozených desek. Je samozřejmé, že se provede i kontrola ostění, ale zkušenosti z reálných požárů ukazují, že ostění není poškozeno vůbec nebo jen v nepatrném rozsahu v porovnání s ostatními způsoby zajištění ostění proti účinkům požáru. Důkazem může být požár právě v jednom z hamburských tunelů, ke kterému došlo v roce 2011. Naštěstí se nejednalo o velký požár a nikdo nepřišel o život. Oheň vznikl v motorovém prostoru taháče návěsů a bylo velké štěstí, že se nerozšířil na vlastní náklad, 20 tun kukuřice. Stropní část tunelu včetně přesahu na svislé stěny byla tvořena obkladem z desek 2 x PROMATECT®-H 12 mm. I když se jednalo o malý požár, byla poškozena první vrstva deskového obkladu, ale vlastní ostění zůstalo nepoškozené. Oprava byla velice rychlá a sestávala z výměny několika desek, což se děje suchou cestou bez mokřých procesů. Naproti tomu zbývající část svislého ostění bez obkladu byla zřetelně poškozena odprýskáním vrstvy betonu, jak je vidět na obr. 10.

Stejně jako vzorky s polypropylenovými vlákny bylo v rámci projektu Výzkumného centra CIDETAS také testováno ostění

lost the life. The fire originated in the motor space of a truck-tractor and it was great luck that it did not spread to the cargo itself (20 tonnes of ray). The tunnel roof part including overlaps to vertical walls was formed by cladding with 2 x PROMATECT®-H 12mm slabs. Even though it was a small fire, the first layer of the cladding slabs was damaged, but the lining itself remained undamaged. The repair was very quick. It consisted of replacing several slabs. This work was carried out using a dry way, without wet processes. By contrast, the remaining part of the vertical lining without the cladding was significantly damaged by spalling of a concrete layer, see Fig. 10.

The lining clad in PROMATECT®-T, 25 mm slabs (see Fig. 11) as well as the samples containing polypropylene fibres were tested within the framework of the CIDETAS Research Centre. In contrast to the samples containing fibres, the samples with the cladding behaved significantly better. The maximum deformation of sample D1 was only

25mm, which is 4.8 times better result than the deformation when fibres were used. In the case of sample No. 2 a part of the cladding fell off at the end of the test course, but the deformation amounted to 33mm even at this sample, which was 3.6 times better in comparison with the use of fibres. The condition of the lining after 180 minutes is documented in Fig. 11; the deformations are very small. The results are shown in the graph in Fig. 12. Both samples satisfied requirements by a sufficient margin. The cause of falling a part of the cladding off could lie in the fact that the samples were produced including the cladding in Prague and were subsequently transported to the testing laboratory. This is not a standard procedure. Samples should be produced and assembled in the testing laboratory. Nevertheless, despite this fact, the results with the cladding were unambiguously best.

In practice, the slabs are installed either by placing them into the mould and subsequent placing of reinforcement and concrete or by attaching them additionally on the completed lining after stripping the formwork. The two ways are shown in Figures 13 and 14.

The application of cladding with slab-type materials offers even other advantages. For example, PROMATECT®-H 2 calcium silicate slab has got 5 times better insulation properties than



Obr. 13 Ukládání obkladových desek do bednění
Fig. 13 Placement of cladding slabs into moulds

s obkladem z desek PROMATECT®-T 25 mm (obr. 11). Oproti vzorkům s vlákny se vzorky s obkladem chovaly výrazně lépe. U vzorku D1 byla maximální deformace jen 25 mm, což je 4,8krát lepší výsledek než u vláken. U vzorku č. 2 došlo ke konci průběhu testu k odpadnutí části obkladu a i u tohoto vzorku činila deformace 33 mm, tj. 3,6krát lepší hodnota oproti vláknům. Stav ostění po 180 minutách je zachycen na obr. 11, deformace jsou velmi malé. Výsledky jsou znázorněny v grafu na obr. 12. Oba vzorky tak s rezervou vyhověly. Příčinou odpadnutí části obkladu mohla být skutečnost, že vzorky byly vyráběny v Praze včetně obkladu a pak následně transportovány do zkušebny, což není standardní postup. Vzorky by se měly vyrábět a montovat ve zkušebně. Ale i přes tuto skutečnost byly výsledky s obkladem jednoznačně nejlepší.

V praxi se pak desky montují buď uložením do bednění s následnou montáží výztuže a betonáží, nebo dodatečným obkladem na hotové, odbedněné ostění. Oba způsoby jsou patrné z obr. 13 a 14.

Použití obkladů z deskových materiálů má i další výhody. Například kalciumsilikátová deska PROMATECT®-H 2,5krát lépe izoluje než beton. Takže například deska silná 20 mm nahradí 50 mm betonu, čehož by se dalo využít ke zmenšení celkové tloušťky betonového ostění a současně využít tyto desky pro ochranu betonu při požáru.

SHRNUTÍ

Nutnou součástí každého projektu podzemní stavby je podrobná analýza všech rizik. Na základě této analýzy se projektant rozhoduje, jak se s těmito okolnostmi vyrovná. Proto velmi důležitou součástí projektové dokumentace každého podzemního díla je požární bezpečnostní řešení stavby, které stanovuje podmínky požární bezpečnosti ve všech ohledech a důsledcích. Dnešní doba našťastí přináší celou řadu materiálových a konstrukčních možností. Ať už se projektant rozhodne pro jakoukoliv výše uvedenou ochranu ostění tunelu, musí si být jistý, že v případě mimořádné události bude možná včasná evakuace osob, nedojde ke kolapsu konstrukce a bude umožněn zásah jednotek HZS.

Důležitým a sledovaným faktorem je ekonomičnost každého stavebního díla. Kromě vlastních nákladů na výstavbu je potřeba zohlednit také budoucí náklady na údržbu, opravy a rekonstrukce pro případné prodloužení životnosti. Kromě těchto aspektů je nutné také zvážit případné náklady spojené s dobou neprovozování tunelu při rozsáhlé opravě a vliv této skutečnosti na okolní infrastrukturu. U tunelů situovaných mělce nebo v nestabilních horninách také rizika spojená s případným závalem a propadem terénu v místě ztráty únosnosti tunelového ostění.

Tento příspěvek se věnoval jen malé části pasivní požární bezpečnosti podzemních staveb se zaměřením na požární odolnost tunelového ostění. Problematika požární bezpečnosti v těchto stavbách je samozřejmě daleko obsáhlejší. Každá podzemní stavba je složité inženýrské dílo a je jistě přáním všech, aby takových děl přibývalo. Protože zejména dopravou přetížená města potřebují dobudovat dopravní infrastrukturu, která všem usnadní rychlejší a svobodnější pohyb.

Ing. LIBOR FLEISCHER, fleischer@promatpraha.cz,
Promat s.r.o.

Recenzovali / Reviewed: prof. Ing. Jan Vitek, CSc.,
prof. Ing. František Wald, CSc.



Obr. 14 Dodatečný obklad požárně ochrannými deskami
Fig. 14 Additional cladding with fire protection slabs

concrete. So, for example, a 20cm thick slab substitutes 50cm of concrete. This fact could be taken advantage of for reducing the concrete lining thickness and, at the same time, these slabs could be used for the protection during the course of a fire.

RESUME

A part necessary in each underground construction design is a detailed analysis of all risks. The designer decides on the way he or she will cope with these conditions on the basis of this analysis. For that reason the fire design determining fire safety conditions in all respects and consequences is a very important part of the design for each underground construction. Fortunately, the present time brings a range of material and structural options. Whichever of the above-mentioned tunnel lining protection systems is selected, the designer has to be certain that the timely evacuation of persons will be possible, a collapse of the structure will not take place and the intervention of the Fire Rescue Service units will be allowed for.

Economy of any construction working is an important and observed factor. It is necessary to take into account not only the cost of construction but also the future costs of maintenance, repairs and reconstruction required for contingent extension of the life length. Apart from the above-mentioned aspects it is even necessary to consider potential costs associated with the duration of the suspension of operation in the case of an extensive repair and the impact of this fact on the infrastructure in the surroundings. Regarding tunnels at shallow depths or in instable ground, there are additional risks associated with a contingent collapse and sinking of the ground surface in the location of the loss of the bearing capacity of the tunnel lining.

This paper was dedicated to an only small part of passive fire safety of underground structures with the focus on the fire resistance of tunnel linings. Of course, the issue of fire safety in these structures is much more extensive. Each underground structure is a piece of complex engineering work. It is certainly the wish of all people that the number of such workings increases. The reason is the fact that mainly the cities overburdened by traffic need to finish the development of transportation infrastructure, which will facilitate faster and freer movement for everybody.

Ing. LIBOR FLEISCHER, fleischer@promatpraha.cz,
Promat s.r.o.