

PARAMETRICKÁ STUDIE TEPLOTNÍHO POLE V BETONOVÝCH VOZOVKÁCH

TEMPERATURE FIELD IN CONCRETE PAVEMENT - A PARAMETRIC STUDY

JIŘÍ VRBA, ALEŠ FLORIAN

Príspevek sa zaoberá problémom modelovania teplotného namáhania cementobetonových vozovok. Je použitý priestorový 3D model vozovky vytvorený na bázi MKP. Průběh teplot v jednotlivých bodech desky, podkladu a podloží je řešen jako nestacionární vedení tepla. Model umožňuje pro zadaný v čase proměnný průběh teploty povrchu vozovky vyšetřit v konstrukci průběh teplotního pole v čase a následně zjistit i průběh napětí, deformací a přemístění v čase, a to v libovolném bodě konstrukce.

The parametric study of temperature field in concrete pavement is performed. The 3D computational model of pavement is based on Finite Element Method. The temperature distribution in individual pavement layers is analysed as non-stacionar process. Based on information about temperature of environment in time, the model gives the temperature distribution in any point of pavement layers in time first.

Úvod

Vozovky s cementobetonovou nosnou deskou jsou navrhovány pro vyšší úrovně zatížení. Jedním z problémů při jejich posouzení je vliv mechanického namáhání od teplotního pole, které u nich má nezanedbatelný vliv. Horní povrch vozovky je přímo ovlivňován slunečním zářením, teplotou okolního vzduchu a dalšími klimatickými vlivy, které jej střídavě zahřívají a ochlazují. Dolní povrch desky je udržován vlivem podloží a podkladní vrstvy ve stálejších teplotních podmínkách. Důsledkem je vznik teplotního pole, které je obecně proměnné v prostoru a čase. Druhotně dochází vlivem teplotního pole k deformaci desky a ke vzniku napětí. Při ustálených teplotních podmínkách je průběh teploty po výšce desky přibližně lineární. U tlustých desek, při náhlější změně teploty povrchu nebo v případě použití tepelně-izolační vrstvy jsou průběhy teplot složitější. V některých okamžicích dochází i k situaci, kdy teploty povrchů jsou sice stejné, ale střed desky je prohřátý. Při navrhování vozovek pomocí TP 77 [1] se vždy předpokládá lineární průběh teploty po výšce desky. Maximální hodnota teplotního rozdílu je dána vztahem, který závisí na průměrné roční teplotě a na tloušťce desky. Za tohoto předpokladu vzniká maximální napětí na horním nebo dolním povrchu desky. Při složitějším průběhu teplot tomu tak ovšem nemusí být.

Problémem analýzy vlivu teplotního pole se zabývá řada prací, viz např. [2, 3], a je také součástí dlouhodobé koncepční práce řešitelského kolektivu, který se zabývá modelováním a analýzou vozovok pozemních

komunikací [4-8]. Jejím hlavním cílem je postupně vyvinout kvalitní a výstižný výpočtový model pro betonové vozovky na bázi metody konečných prvků (MKP), který by respektoval objektivně existující fyzikální jevy ovlivňující jejich chování. Tento model by měl být schopen co nejlépe vystihnout reálné podmínky, včetně jejich náhodné proměnlivosti. Obdobnou problematikou se zabývají např. publikace [9-13].

Námětem příspěvku je vliv změny teploty okolního prostředí na teplotní pole v cementobetonové desce v čase a to při různé skladbě vozovky. Průběh teplot v jednotlivých bodech desky, podkladu a podloží je řešen jako nestacionární vedení tepla. Pro analýzu problému je použit program ANSYS založený na metodě konečných prvků.

Vliv teploty

Vlivu teploty je vystaven především horní povrch cementobetonové desky. Narazí-li tepelné záření na překážku (vozovku), část se ho odrazí zpět (pro černý povrch minimum), část projde skrz (prohřátí podloží) a část je pohlcena překážkou (prohřátí vozovky). Vznikající napětí od teplotního namáhání může způsobovat tahové trhliny a v dalším průběhu vznik sekundárních poruch. Množství tepla dopadající na vozovku nelze ovlivnit a také není možné výrazně snížit její teplotní roztažnost. Je ovšem případně možné optimalizovat skladbu vozovky tak, aby se při požadované únosnosti a životnosti snížilo její mechanické namáhání od vlivu teploty.

Pro optimalizaci teplotního režimu v desce je možné zvětšit množství odraženého tepla (např. barvou povrchu), což není příliš reálné, nebo snížit množství tepla odváděného do podloží, čehož lze docílit např. tepelně-izolační vrstvou. Tím se většina tepla spotřebuje na prohřátí desky a průběh teplotního pole se výrazně zrovnoměří. Důsledkem obecně může být výhodnější mechanické namáhání vozovky.

Vlastní vliv změny teploty na desku lze rozdělit na rovnoměrné prohřátí celé desky, teplotní rozdíl mezi horním a dolním povrchem desky a jiné vlivy (nelineární průběh teploty po výšce, částečné zastínění apod.). Na mechanické namáhání desky z prostého betonu má velký vliv především extrémní rozdíl teplot horního a dolního povrchu. V jeho důsledku dochází ke zvedání rohů či středu desky, což má negativní důsledky na její chování. Celkové oteplení nenamáhá díky použité technologii desku tak výrazně, neboť vozovky jsou rozřezávány na dostatečný počet dilatačních celků.

TEORETICKÉ ZÁKLADY

Problematiku časové závislosti mechanického namáhání konstrukce od teplotního pole lze za určitých předpokladů rozložit do dvou navazujících úloh. Nejprve je možné určit průběh teplotního pole v daných časových okamžicích v konstrukci jako funkci času a poté získané výsledky aplikovat jako zatížení ve statické analýze. Mezi hlavní předpoklady patří malé poměrné deformace a posuvy od vlivu teploty, což je za obvyklých podmínek splněno.

Mění-li se teplotní pole v prostoru a čase, hovoříme o neustáleném teplotním stavu, což můžeme zapsat ve tvaru:

$$t = f(x, y, z, \text{čas}). \quad (1)$$

Při změně teploty v závislosti na čase se vychází z Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla v tělese. Pro homogenní a isotropní těleso za podmínky, že měrná tepelná vodivost nezávisí na teplotě a směru toku tepla a že v tělese není tepelný zdroj, má Fourierova rovnice tvar:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

kde t – teplota [$^{\circ}\text{C}$], τ – čas [s], x, y, z – souřadnice [m], a – součinitel teplotní vodivosti [m^2s^{-1}].

Levá strana rovnice vyjadřuje změnu teploty v čase a pravá strana vyjadřuje místní změnu teploty v tělese. Při ustálených teplotních podmínkách je časová změna teploty nulová.

Analytické řešení parciálních diferenciálních rovnic je obecně obtížné a komplikované. Výsledky při řešení rovnice (2) je možné získat jen pro jednoduchá tělesa. Numerické řešení například pomocí metody konečných prvků je sice řešením přibližným, ale umožňuje řešit různé typy konstrukcí, okrajových podmínek apod. MKP vede po diskretizaci rovnice (2) k řešení soustavy závislých diferenciálních rovnic ve tvaru [14]:

$$[C] \{T\} + [K] \{T\} = \{0\}, \quad (3)$$

kde $[C]$ – matice tepelných kapacit, $[K]$ – matice tepelných vodivostí, $\{T\}$ – vektor teplot.

Ve statické analýze mají rovnice (3) známý tvar z MKP:

$$[K] \{u\} = \{F\}, \quad (4)$$

kde $[K]$ – matice tuhosti, $\{u\}$ – vektor zobecněných přemístění, $\{F\}$ – vektor zobecněných sil.

Vliv změny teploty je v tomto případě zahrnut ve fyzikálně-konstitutivních vztazích, které nabývají tvar:

$$\{\sigma\} = [D] (\{\epsilon\} - \{\epsilon^t\}), \quad (5)$$

kde $\{\epsilon^t\}$ – vektor poměrných deformací od teploty, $\{\epsilon\}$ – vektor poměrných deformací, $\{\sigma\}$ – vektor napětí, $[D]$ – matice tuhosti materiálu.

MODEL VOZOVKY

Model vozovky je vytvořen jako prostorový 3D model. Je modelována nosná vrstva, případná izolační vrstva,

podkladní vrstva a podloží. Jsou použity prostorové 3D konečné prvky, které mají v systému ANSYS označení BRICK70 a BRICK45 [15]. Prvek BRICK70 je prvek určený pro teplotní analýzy. Jedná se o osmiuzlový prvek s jedním stupněm volnosti (teplota) v každém uzlu. Prvek BRICK45 je určený pro statické a dynamické analýzy. Jedná se o osmiuzlový prvek se třemi stupni volnosti (u_x, u_y, u_z) v každém uzlu. Obě zmíněné analýzy využívají stejnou geometrii modelu. Model umožňuje pro zadaný v čase proměnný průběh teploty povrchu vozovky vyšetřit teplotní pole ve vozovce v čase a následně i průběh napětí, deformací a přetvoření v čase a to v libovolném bodě konstrukce. Model je parametrický, aby bylo možné libovolně modifikovat rozměry, skladbu i fyzikálně-mechanické vlastnosti dílčích materiálů v analyzované vozovce.

PARAMETRICKÁ STUDIE

Ve vzorové parametrické studii je analyzován vliv změny teploty okolí na teplotní pole cementobetonové desky v čase, a to ve vozovce s různou tloušťkou betonové desky a s případnou tepelnou izolací. Sledoval se vliv výše uvedených parametrů na průběh teploty na dolním povrchu betonové desky a na rozdíl teplot horního a dolního povrchu desky v čase. Vlastní výpočet byl proveden pro pět variant skladby vozovky:

1. tlustá deska,
2. normální deska,
3. tenká deska bez izolace,
4. tenká deska s izolací,
5. tenká deska s velmi dobrou izolací.

Materiál	Veličina	Symbol	Hodnota
Beton	tepelná vodivost	k	1,2 W/mK
	měrné teplo	c	800 J/kgK
	modul pružnosti	E	25 GPa
	Poissonův součinitel	m	0,2
	objemová hmotnost	r	2200 kg/m ³
	součinitel tepl. roztažnosti	a	1,2 · 10 ⁻⁵
Podloží	tepelná vodivost	k	2 W/mK
	měrné teplo	c	840 J/kgK
	modul pružnosti	E	30 MPa
	Poissonův součinitel	m	0,4
	objemová hmotnost	r	2000 kg/m ³
	součinitel tepl. roztažnosti	a	1,2 · 10 ⁻⁵
Izolace	tepelná vodivost, var. 4.	k	0,8 W/mK
	tepelná vodivost, var. 5.	k	0,1 W/mK
	měrné teplo	c	800 J/kgK
	modul pružnosti	E	30 MPa
	Poissonův součinitel	m	0,4
	objemová hmotnost	r	600 kg/m ³

Mechanické a tepelně-technické vlastnosti materiálů jednotlivých vrstev vozovky použitých v dílčích variantách jsou uvedeny tab. 1. Protože průběh teplot v čase získaný experimentálním měřením na vozovce nebyl k dispozici, byl použit průběh teploty upravený z teploty vzduchu naměřené ve třech letních dnech hydro-meteorologickou stanicí VUT FAST. Průběh je vždy

Tab. 1. Vstupní parametry

Tab. 1. Input parameters

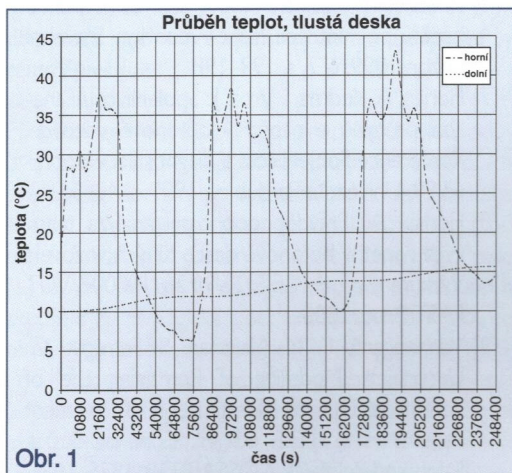
uveden v jednotlivých obrázcích jako teplota horního povrchu desky. Na základě znalosti třídního průběhu teplot a za předpokladu konstantní teploty v hloubce 2 m byl poté určen průběh teplot v celé vozovce. Pro výpočet byl použit časový krok 60 min.

VÝSLEDKY

Tlustá deska

Tloušťka betonové desky byla uvažována 40 cm, tepelná izolace uvažována nebyla. Výsledky jsou uvedeny na obr. 1. Teplota na spodním povrchu desky se podle předpokladů v závislosti na čase příliš nemění, čímž vznikají velké rozdíly teplot mezi horním a dolním povrchem. Průměrný rozdíl teplot je 9,9 °C, jeho maximum je až 29 °C, směrodatná odchylka 10,9 °C.

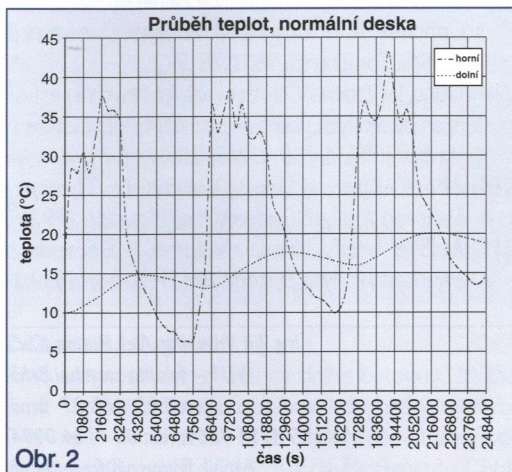
Důsledkem velké tloušťky desky také je, že průběh teploty po výšce desky není v každém časovém okamžiku lineární. Prakticky to znamená, že extrémní napětí nemusejí vznikat jen na povrchu desky.



Obr. 1

Normální deska

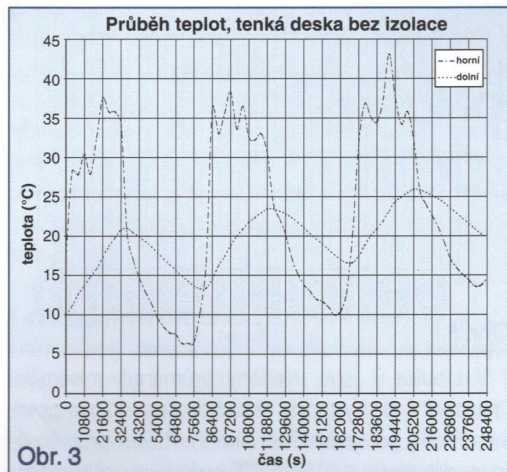
Tloušťka betonové desky byla uvažována hodnotou 20 cm, tepelná izolace opět nebyla použita. Výsledky jsou uvedeny na obr. 2. Teplota na spodním povrchu desky mírně kolísá. Průměrný rozdíl teplot 6,8 °C je nižší než u tlusté desky. Maximální rozdíl teplot klesl na 25 °C, zároveň však klesl minimální rozdíl na -7,4 °C. Směrodatná odchylka rozdílů teplot se mění jen nepatrně.



Obr. 2

Tenká deska bez izolace

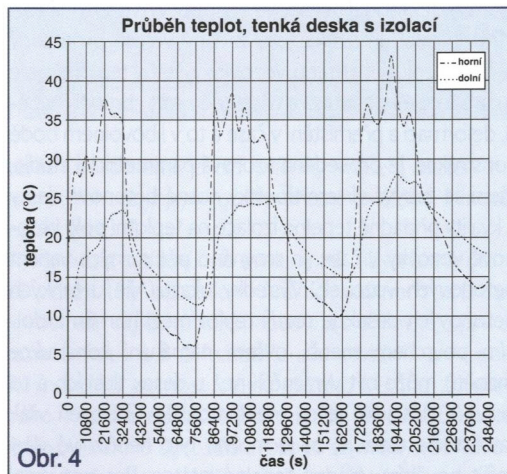
Tloušťka betonové desky byla v této variantě uvažována spíše teoretickou hodnotou 8 cm, tepelná izolace není přítomna. Výsledky jsou uvedeny na obr. 3. Teplota na spodním povrchu se mění ve sledovaných dnech v rozsahu 10–25 °C. Největší rozdíly teplot vznikají v ranních a dopoledních hodinách, kdy se horní povrch velmi rychle ohřívá. Přestože snížení tloušťky má pozitivní vliv na snížení rozdílu teploty mezi povrchy, může znamenat výrazné zvýšení teplotního namáhání v důsledku nižší tloušťky desky. Průměrný rozdíl teplot je 3,2 °C.



Obr. 3

Tenká deska s izolací

Tloušťka betonové desky byla v této variantě uvažována hodnotou 8 cm. Tepelná izolace byla zvolena tloušťky 3 cm a ne příliš kvalitní, viz tab. 1. Výsledky jsou uvedeny na obr. 4. Teplota na spodním povrchu se mění mnohem rychleji, neboť se snížilo množství tepla odvedeného do podloží, a pohybuje se ve sledovaných dnech v rozsahu 10 až 28 °C. Největší rozdíly teplot vznikají opět v ranních a dopoledních hodinách. Průměrný rozdíl teplot klesl na 3 °C a jeho směrodatná odchylka na 7,7 °C.



Obr. 4

Tenká deska s velmi dobrou izolací

Tloušťka betonové desky byla v této variantě uvažována hodnotou 8 cm. Tepelná izolace byla záměrně zvolena kvalitnější, než by bylo asi možné reálně provádět, viz tab. 1. Výsledky jsou uvedeny na obr. 5. Teplota na

Obr. 3 Průběh teplot, tenká deska bez izolace

Fig. 3 Temperature distribution, thin concrete slab without isolation

Obr. 1 Průběh teplot, tlustá deska

Fig. 1 Temperature distribution, thick concrete slab

Obr. 4 Průběh teplot, tenká deska s izolací

Fig. 4 Temperature distribution, thin concrete slab with standard isolation

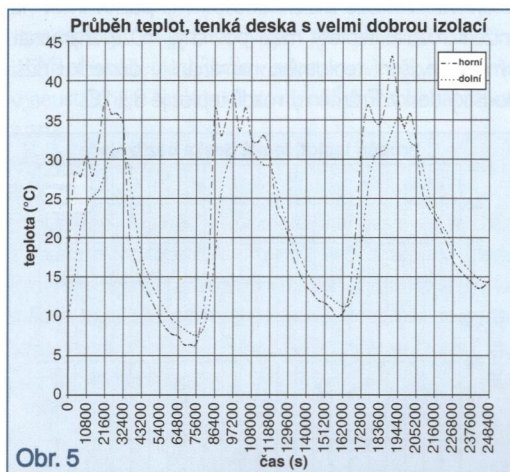
Obr. 2 Průběh teplot, normální deska

Fig. 2 Temperature distribution, standard concrete slab

spodním povrchu se mění velmi podobně jako na povrchu horním. Průměrný rozdíl teplot je pouze 1,7 °C. Největší rozdíly teplot zůstávají opět v ranních a dopoledních hodinách, ale v průběhu dne jsou minimální. Extrémní teplotní rozdíl trvá velmi krátkou dobu a tím je možné i očekávat, že extrém v napětí trvá kratce, což snižuje pravděpodobnost vzniku poruchy vozovky.

Obr. 5 Průběh teplot, tenká deska s velmi dobrou izolací

Fig. 5 Temperature distribution, thin concrete slab with high quality insulation



V tabulce 2 jsou uvedeny průměrné, maximální a minimální rozdíly teplot mezi horním a dolním povrchem desky pro jednotlivé varianty. Pokles průměrného rozdílu teplot s nižší tloušťkou desky a s přítomností tepelné izolace je zřejmý.

Tab. 2 Rozdíly teplot mezi povrchy desky pro jednotlivé varianty vozovky

	Tlustá	Normální	Tenká bez izolace	Tenká s izolací	Tenká s dobrou izolací
Průměr	9,88	6,78	3,23	3,05	11,74
Max.	29,03	25,21	21,68	19,40	18,88
Min.	-5,50	-7,48	-8,69	-5,99	-7,94

Tab. 2 Temperature difference between both sides of concrete slab

ZAVĚR

Příspěvek se zabývá problémem modelování teplotního namáhání cementobetonových vozovek. Je použit prostorový 3D model betonové vozovky vytvořený na bázi MKP. Model umožňuje pro zadaný v čase proměnný průběh teploty povrchu vozovky vyšetřit teplotní pole v čase v celé konstrukci a následně zjistit i průběh napětí, deformací a přemístění v čase a to v libovolném bodě konstrukce. Je provedena vzorová parametrická studie, která se zabývá vlivem tloušťky nosné betonové desky a kvality případné tepelné izolace na teplotní pole betonové vozovky v čase. Je srovnáno pět různých variant betonových vozovek. Výsledky ukazují, že u tenkých betonových desk je rozdíl teplot mezi horním a dolním povrchem menší, ovšem namáhání konstrukce (napětí) může být výraznější než u desk tlustých a to právě v důsledku jejich menší tloušťky. Zároveň však tato studie ukazuje, že je možné tyto nepříznivé vlivy snížit použitím vhodné tepelné izolace. Pro potvrzení vhodnosti nebo nevhodnosti přidání tepelně-izolační vrstvy je ovšem zapotřebí se zabývat nejen stavem napjatosti v konstrukci či důsledky přítomnosti této vrstvy na mechanické vlastnosti celé vozovky, ale také otázkou technologie výstavby.

Práce, jejíž výsledky jsou publikovány v tomto příspěvku, vznikla v rámci výzkumného záměru CEZ J22/98:261100007, VUT FAST Brno.

Literatura

- [1] TP 77 – Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 1995.
- [2] Poliaček, I., Gschwendt, I., Vašková Z.: Zosilňovanie cementobetónových vozoviek. Inžinierske stavby, 1996, č. 6, s. 244–248.
- [3] Čelko, J., Gavulová, A.: Teplotný režim vozovky s výkonnou tepelnoizolačnou vrstvou. Inžinierske stavby, 1997, č. 9–10, s. 334–336.
- [4] Florian, A.: Spolehlivostní analýza tuhé vozovky – svíslá posunutí. Stavební obzor, 1999, č. 3, s. 70–76.
- [5] Florian, A.: Spolehlivostní analýza napětí v betonové desce tuhých vozovek. Inžinierske stavby, 1999, č. 4, s. 128–134.
- [6] Florian, A.: Spolehlivostní analýza průběhu napětí po tloušťce tuhé vozovky. Stavební obzor, 1999, č. 7, s. 193–198.
- [7] Florian, A., Kudma, J., Vrba, J.: Spolehlivostní analýza průhybů a napětí v betonové vozovce. Konference Spolehlivost a diagnostika v dopravě 99, Univerzita Pardubice, 1999, s. 48–53.
- [8] Florian, A.: Pravděpodobnostní analýza tahových napětí v betonové desce tuhých vozovek. Výzkumný záměr CEZ J22/98:261100007, VUT FAST Brno, 2000.
- [9] Vennalaganti, K. M., Nazarian, S., Ferregut, C.: Uncertainty Modelling of Remaining Life of Pavements Due to Misestimation of Pavement Parameters in NDT. 6th Int. Conf. on Struct. Safety and Reliability ICOSSAR'93, s. 1825–1831.
- [10] Makovička, D.: Analýza skladby vozovky nad halou Hlavního nádraží v Praze. Stavební obzor, 1995, č. 1, s. 11–14.
- [11] Szydło, A.: Sensitivity of Structural Deflections in Pavements to the Change in Moduli of its Layers. Slovak J. of Civil Eng., 1995, č. 1, s. 29–32.
- [12] Yoichi, Abe – Shoichi, Kameta – Ryoichi, Sato – Yoshitaka, Hachiya: An Numerical Investigation on Stresses at Joint Interface Between Overlay Concrete and Existing Pavement Concrete. PIARC Conference 96, s. 78–91.
- [13] Ďuraj, J., Tóthová, D.: Interakcia letištných a cestných doskových prvkov s podloží. Inžinierske stavby, 1997, č. 7–8, s. 265–269.
- [14] ANSYS User's Manual, Volume IV Theory. Swanson Analysis Systems, Inc., Houston 1992.
- [15] ANSYS User's Manual, Volume III Elements. Swanson Analysis Systems, Inc., Houston 1992.

Ing. Jiří Vrba, Ing. Aleš Florian, CSc.

VUT – fakulta stavební Brno

Veveří 95, 662 37 Brno

tel.: 05 4114 7369, fax: 05 4124 0994

e-mail: florian.a@fce.vutbr.cz