

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Metodika testování materiálů skříní a karoserií drážních vozidel

Autoři: prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.⁾¹
prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.⁾¹
doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.⁾¹
Ing. Petr Hanus, Ph.D.⁾¹

⁾¹ Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera

Certifikovaná metodika je výstupem z řešení projektu TE01020038

„Centrum kompetence drážních vozidel“.

Obsah:

1. Úvod	2
2. Cíl metodiky	3
3. Pojmy, zkratky, použité přístroje a software	4
4. Popis metodiky.....	4
4.1 Postup testu.....	7
4.2 Výstupy testu.....	9
5. Novost postupů a zdůvodnění metodiky	10
6. Popis uplatnění certifikované metodiky	10
7. Ekonomické aspekty	11
8. Seznam použité literatury:.....	12
9. Seznam publikací, které předcházely metodice	13

1. Úvod

V rámci projektu Centra kompetence drážních vozidel (CKDV) je jednou ze stěžejních řešených otázek dynamická pevnost a crashová odolnost konstrukcí drážních vozidel. Zejména u skříní kolejových vozidel a karoserií trolejbusů má tato otázka zásadní význam (vzpomeňme např. střety tramvají se silničními vozidly a střety kolejových a silničních vozidel na přejezdech). V současné době se při návrhu konstrukcí kontroluje zmíněná crashová odolnost pomocí simulačních výpočtů. K tomu, aby tyto simulace měly použitelné – tedy kvalitní výsledky, je nezbytné dodat do těchto simulací relevantní dynamické materiálové charakteristiky, které je třeba zjistit při tzv. instrumentovaných dynamických tahových zkouškách, při rychlostech deformace, odpovídajících rychlostem při havarijních nárazech vozidel. V současné době se pro testování materiálových vzorků formou dynamických tahových zkoušek většinou používají kyvadlová rázová kladiva od renomovaných výrobců např. ZWIC/Roell (Německo), GALDABINI (Itálie), IBERTEST (Španělsko), INSTRON (USA) a dalších. Přitom je požadováno, aby uvedené dynamické tahové zkoušky byly prováděny s instrumentací, tzn. zkoušky se záznamem síly v průběhu destrukce materiálového vzorku ve smyslu normy EN ISO 26203. Bohužel u všech zmíněných zkušebních zařízení existují konstrukční řešení a metodiky zkoušky pouze pro instrumentované zkoušky vzorků kruhových průřezů, nikoliv průřezů plochých- tedy plechů, z nichž jsou stavěny skříně a karoserie drážních vozidel. Případy zařízení a metodik pro instrumentované zkoušky kruhových vzorků jsou popsány v patentových spisech DE 10241667, CN103234844 (řeší časový záznam napětí v dlouhé zkušební tyči po aplikovaném rázu), EP0027257 (řeší časový záznam síly ve zkušebním vzorku v průběhu rázu), CN101975700 (řeší způsob upevnění zkušebního vzorku při zkoušce v tahu) a CN103353425 (řeší tvar zkušebního vzorku pro zkoušku v tahu). Jsou také známa konstrukční řešení a metodiky na zkoušení plochých materiálových vzorku, ale bez instrumentace, jejichž příkladem jsou zařízení popsána ve spisech DE 102010037979, DE 102010037982, DE 3149986. Dosud není známa či nebyla publikována metodika a zařízení, které by umožňovalo provedení instrumentované zkoušky plochého vzorku na klasickém kyvadlovém rázovém kladivu typu „Charpyho kladiva“ od zmíněných renomovaných výrobců. Současný stav techniky a současná metodika testování nabízí na těchto zkušebních zařízeních pouze instrumentovanou zkoušku materiálových vzorků s kruhovým průřezem, provedení zkoušky plochých vzorků je prováděno bez instrumentace a provádí se u nich pouze záznam energie potřebné k přetržení vzorku.

Protože řešení dynamické pevnosti skříní a karoserií drážních vozidel v rámci projektu CKDV bylo podmíněno realizací dynamických tahových zkoušek s instrumentací plochých materiálových vzorků, bylo v rámci projektu vyvinuto a patentováno zkušební zařízení „Upínací kleština pro testování plochých materiálových vzorků na kyvadlovém kladivu“. Toto zařízení je zakomponováno do konstrukce klasického kyvadlového kladiva (od výrobce ZWICK/Roell) - vlastněného Dopravní fakultou Jana Pernera, Univerzity Pardubice ve Výukovém a výzkumném centru pro dopravu.

Vzhledem k poměrně náročné specifikaci zmíněného zařízení Upínací kleštiny bylo nezbytné pro jeho aplikaci u kyvadlového kladiva vypracovat speciální metodiku pro realizaci testů. Metodika je popsána v dalších částech tohoto podkladu, vychází bezprostředně ze zmíněného patentu Upínací kleštiny a při jejím využití je možné realizovat na kyvadlovém kladivu ZWICK/Roell dynamické tahové testy plochých vzorků materiálů v rozsahu deformační rychlosti $\dot{\epsilon} = 100 - 1000 [s^{-1}]$. Metodika zahrnuje kromě dále popsaného vlastního provedení testu tyto standardní kroky: přípravu vzorků testovaného materiálu, způsob upevnění zkušebních vzorků do upínací kleštiny, způsob montáže upínací kleštiny do kyvadlového kladiva ZWICK/Roell, nastavení kyvadla do výchozí polohy a jejího „odstartování“ tak, aby bylo při testu dosaženo: požadované rychlosti deformace zkoušeného materiálu, proveden záznam síly v čase, respektive záznam síly v závislosti na deformaci testovaného plochého materiálového vzorku.

Autorům metodiky není známo, že by obdobná metodika již někde existovala.

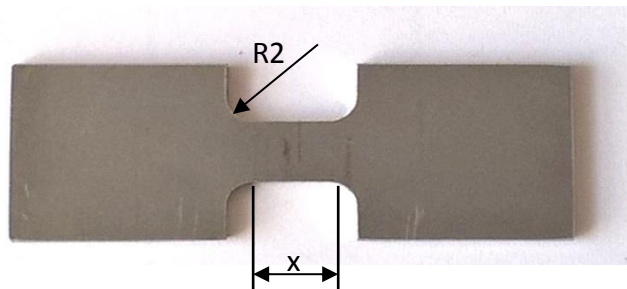
2. Cíl metodiky

Cílem dále popsané metodiky je umožnit realizaci instrumentovaných dynamických tahových testů plochých vzorků materiálů konstrukcí skříní a karoserií drážních vozidel na klasickém kyvadlovém kladivu typu „Charpyho kladiva“ (v dané případě od firmy ZWICK/Roell). Metodika vychází z požadavků konstruktérské praxe, která vyžaduje použití relevantních dynamických materiálových charakteristik v pevnostních výpočtech a Multybody simulacích tak, aby nově navrhovaná a vyráběná vozidla vyhovovala při crashových situacích, tj. aby pevnost a deformační vlastnosti skříní a karoserií byly takové, že v co největší míře zajistí bezpečnost cestujících, řidičů a strojvedoucích při haváriích.

3. Pojmy, zkratky, použité přístroje a software

Pojmy a zkratky: jsou vysvětleny v textu metodiky, základní pojmy jsou následující:

- **Instrumentovaná dynamická tahová zkouška materiálu:** je zkouška, při které je proveden záznam síly potřebné k přetržení materiálového vzorku v čase, respektive v závislosti na probíhající deformaci testovaného vzorku v průběhu jeho zatížení.
- **Deformační rychlost $\dot{\epsilon}$ [s^{-1}] při dynamické tahové zkoušce:** je poměr rychlosti deformace materiálového vzorku k deformační délce x vzorku –viz **OBR. 1**.



OBR. 1 - Materiálový vzorek do Upínací kleštiny

Použitá zařízení, přístroje a software:

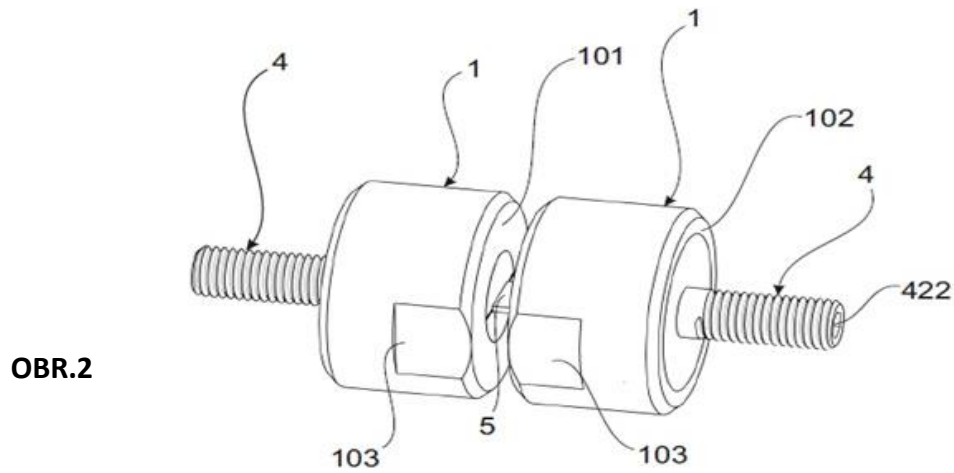
- Kyvadlové rázové kladivo firmy ZWICK/Roell typu RKP 450.
- Upínací kleština pro testování plochých materiálových vzorků na kyvadlovém kladivu, patent č. 306850.
- Měřicí převodník se vzorkovací frekvencí 2 MHz -typ ZWICK/Roell.
- Řídící systém firmy ZWICK/Roell k ovládání kyvadlového kladiva.
- Měřicí systém k záznamu měřených veličin firmy ZWICK/Roell.
- Měřicí počítač DELL (typ Latitude, Intel® Core(TM)i7-3740QM CPU, 2,7 GHz, RAM 8 GB).
- Měřicí software firmy ZWICK/Roell.

4. Popis metodiky

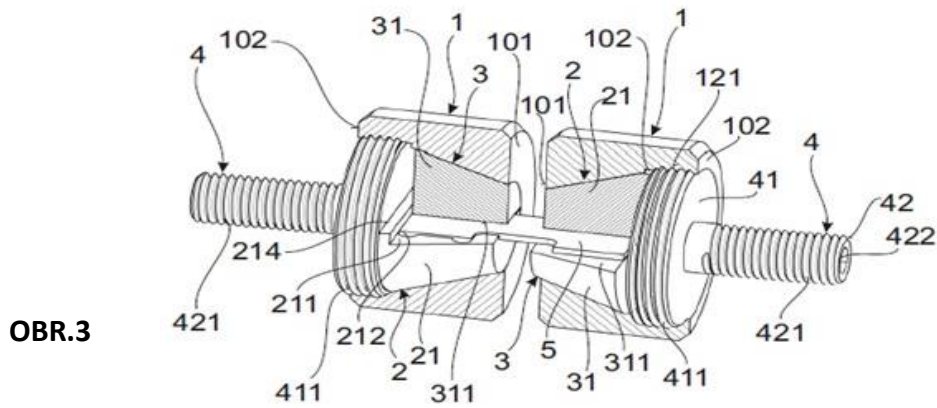
Metodika se zabývá realizací instrumentované dynamické tahové zkoušky plochých materiálových vzorků na standardním kyvadlovém rázovém kladivu typu „Charpyho kladiva“ - v daném případě od firmy ZWICK/Roell, do kterého je zabudováno výše zmiňované zařízení Upínací kleštiny. Toto zařízení, které tvoří dominantní prvek předkládané metodiky, rozšiřuje možnosti testování plochých materiálů skříní a karoserií drážních vozidel

při rychlostech deformace, odpovídajících crashovým situacím v provozu drážních vozidel. Upínací kleština - schematické zobrazení viz **OBR. 2,3,4** je v základním provedení symetrická součást tvořena dvěma shodnými upínacími maticemi 1, dvojicemi upínacích úložných čelistí 2, upínacích svěrných čelistí 3 a stahovacích šroubů 4. Každá upínací matice 1 je opatřena vnitřní dutinou 11 vytvořenou ve směru podélné osy ve tvaru komolého kužele, jehož menší horní základna se nachází v oblasti vnitřního čela 101 upínací matice 1 a který v oblasti větší spodní základny přechází ve válcovou komoru 12 vyústěnou na vnějším čele 102 upínací matice 1 a vybavenou vnitřním závitem 121. Upínací matice 1 jsou přitom při sestavení upínací kleštiny uloženy ve směru podélné osy zrcadlově proti sobě vnitřními čely 101 a na povrchu jsou opatřeny montážními ploškami 103. Upínací úložné čelisti 2 jsou tvořeny nosným tělesem 21 ve tvaru komolého půlkužele, jehož kuželovitost odpovídá kuželovitosti vnitřní dutiny 11 upínací matice 1 a jehož rovinná středová styková plocha 211 je opatřena plochým v podstatě obdélníkovým vybráním 212 pro uložení zkušební vzorku 5. Vybrání 212 je opatřeno výřezem 213 směřovaným k menší horní základně nosného tělesa 21 a umožňujícím výstup střední části zkušební vzorku 5 vně úložné čelisti 2. Těleso 21 je v oblasti větší spodní základny opatřeno opěrnou stěnou 214 vystupující nad úroveň stykové plochy 211 a sloužící pro správné polohování přikládané svěrné čelisti 3. Svěrná čelist 3 je tvořena přitlačným tělesem 31 ve tvaru komolého půlkužele, jehož kuželovitost odpovídá kuželovitosti vnitřní dutiny 11 upínací matice 1 a jehož délka rovinné středové přitlačné plochy 311 je shodná se středovou stykovou plochou 211 nosného tělesa 21. Stahovací šroub 4 sestává z hlavy 41 a dříku 42, kde hlava 41 je opatřena prvním vnějším závitem 411, který svými parametry odpovídá vnitřnímu závitu 121 válcové komory 12 upínací matice 1, a dřík 42 je opatřen druhým vnějším závitem 421 umožňujícím vmontování upínací kleštiny do neznázorněného upínacího mechanismu kyvadlového kladiva. Čelo dříku 42 je opatřeno šestihranným otvorem 422 pro montážní imbusový klíč, kterým se smontovaná kleština s uloženým zkušebním vzorkem 5 utahuje předepsaným momentem 15 Nm před instalací do mechanismu kyvadlového kladiva. Před vložením upínací kleštiny do upínacího mechanismu kyvadlového kladiva se zkušební vzorek 5 vloží mezi úložné čelisti 2 a svěrné čelisti 3. Takto sestavená skupina se vloží volně do upínací matice 1 a zajistí se stahovacím šroubem 4 utahovacím momentem 15Nm. Následně se druhý (z upínací matice 1 vyčnívající) konec zkušební vzorku 5 prostrčí otvorem druhé upínací matice 1, do které byly předtím vloženy příslušné čelisti 2 a 3. Zkušební vzorek 5 se usadí v čelistech 2 a 3 druhé upínací matice 1 a zajistí se stahovacím šroubem 4 utahovacím momentem 15Nm. Vnější závit 421 stahovacích šroubů 4 pak slouží ke vmontování celé upínací

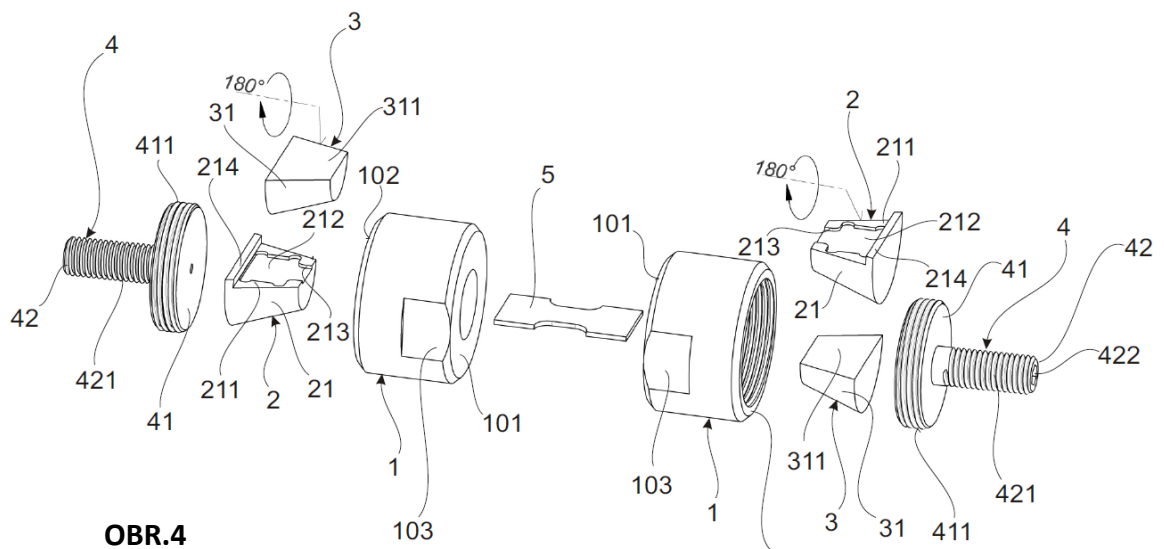
kleštiny do upínacího mechanismu kyvadlového kladiva. Demontáž kleštiny má inverzní postup vzhledem k montáži.



OBR.2



OBR.3



OBR.4

OBR.2, 3, 4 – Schematické zobrazení Upínací kleštiny s plochým materiálovým vzorkem

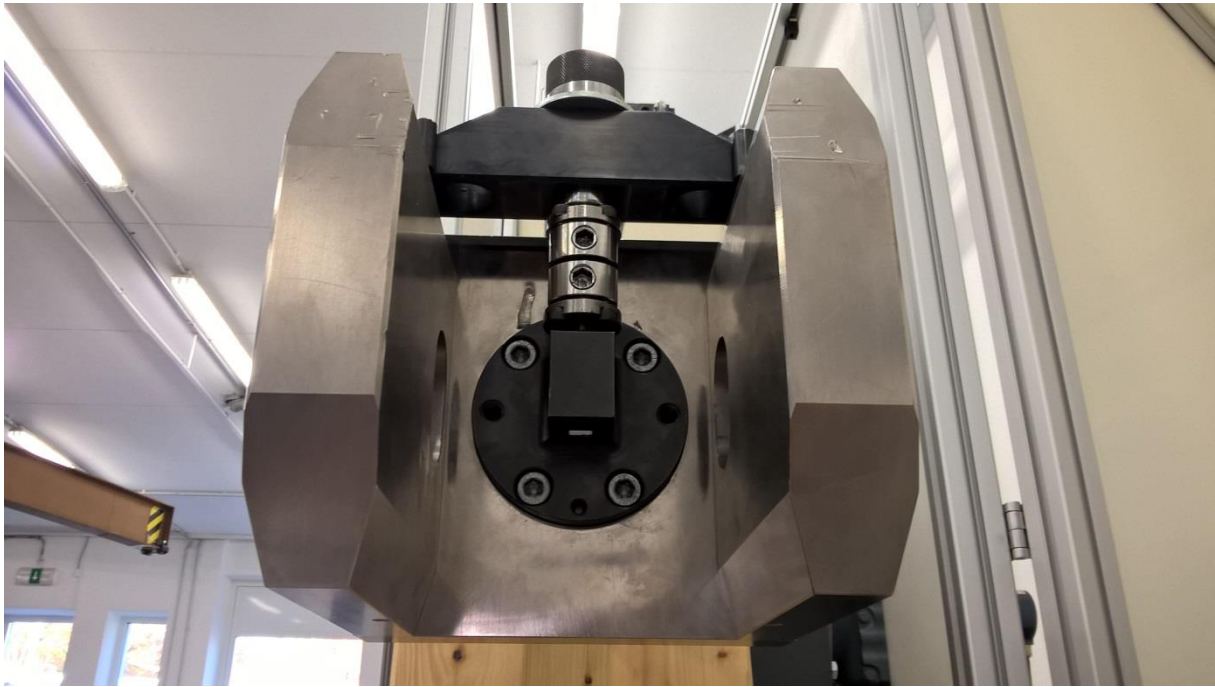
4.1 Postup testu

Provedení testu obsahuje následující kroky:

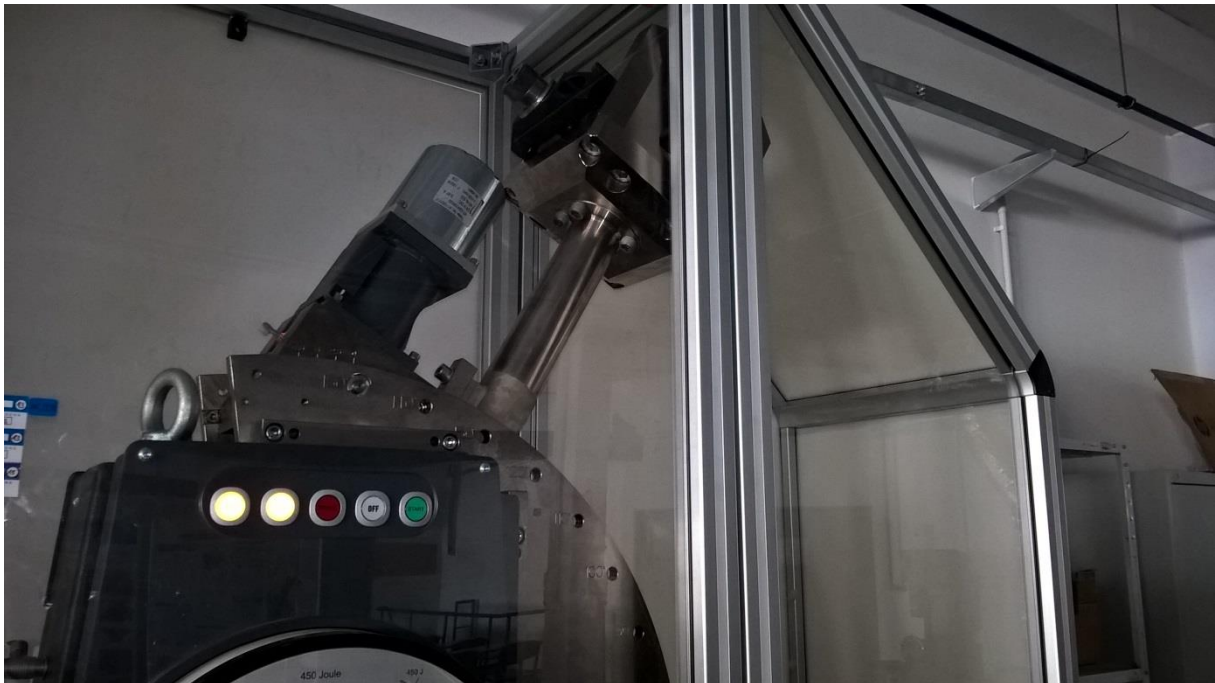
- a) Plochý materiálový vzorek **5** - viz **OBR. 2,3,4**, který může mít deformační zónu x (zúžení ve střední části) v rozmezí 5 – 10 mm, vsadíme do Upínací kleštiny a tu zkompletujeme při dodržení utahovacího momentu 15 Nm závitů **411**.
- b) Upínací kleštinu s vloženým materiálovým vzorkem připevníme pomocí šroubu **4** - závitů **421** utahovacím momentem 4 Nm do upevňovacího mechanismu nárazové hlavice kyvadlového kladiva – viz **OBR. 5**.
- c) Kyvadlo kladiva nastavíme do výchozí polohy - viz **OBR. 6** (možnost nastavení 0 – 150° od vertikální roviny) tak, abychom při daném jednotlivém testu obdrželi v okamžiku nárazu kladiva na opěry (a tedy počátek trhání materiálového vzorku) požadovanou deformační rychlost trhání vzorku.

Tím je kyvadlové rázové kladivo připraveno k provedení testu.

- d) Manuálním odstartováním testu je kyvadlo uvedeno gravitační silou do pohybu. Od tohoto okamžiku je prováděn pomocí měřicího software instrumentovaný záznam síly v čase, respektive síly v závislosti na deformaci trhaného plochého materiálového vzorku.
- e) Po nárazu nárazové hlavice kyvadla na opěry dojde k přetržení vzorku, data dle ad d) jsou uložena na pevném disku měřicího počítače a z polohy překývnutí kyvadla po přetržení vzorku do bodu zvratu je automaticky vypočítána a uložena informace o spotřebované energii na přetržení vzorku.
- f) V průběhu celého kroku ad e) je On-line měřena se vzorkovací frekvencí 2 MHz síla F potřebná k přetržení zkušební vzorku a zaznamenáván průběh deformace Δl v průběhu destrukce zkušební vzorku. Tím je zkouška ukončena a v měřicím počítači je možno Of-line prověřit veškeré hodnoty získané v průběhu testu.



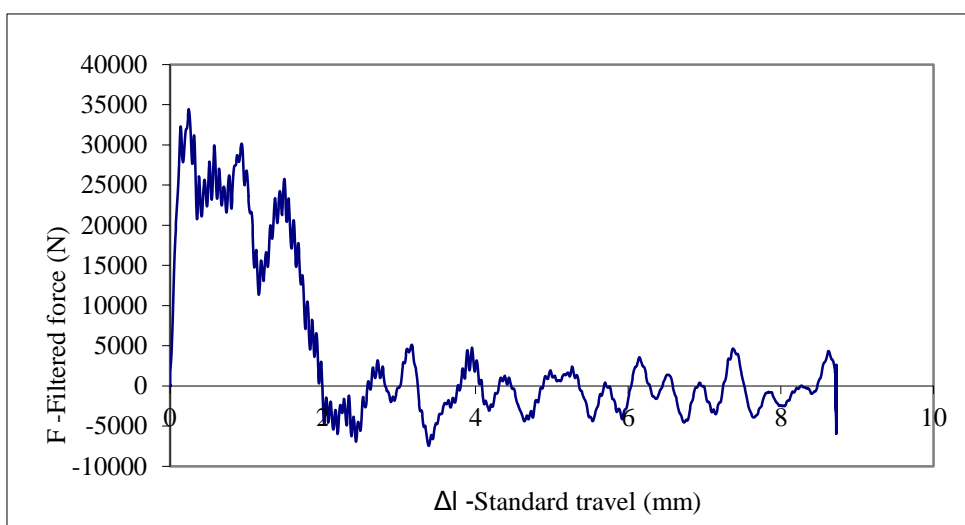
OBR. 5 – Nárazová hlavice kyvadlového kladiva s namontovanou Upínací kleštinou



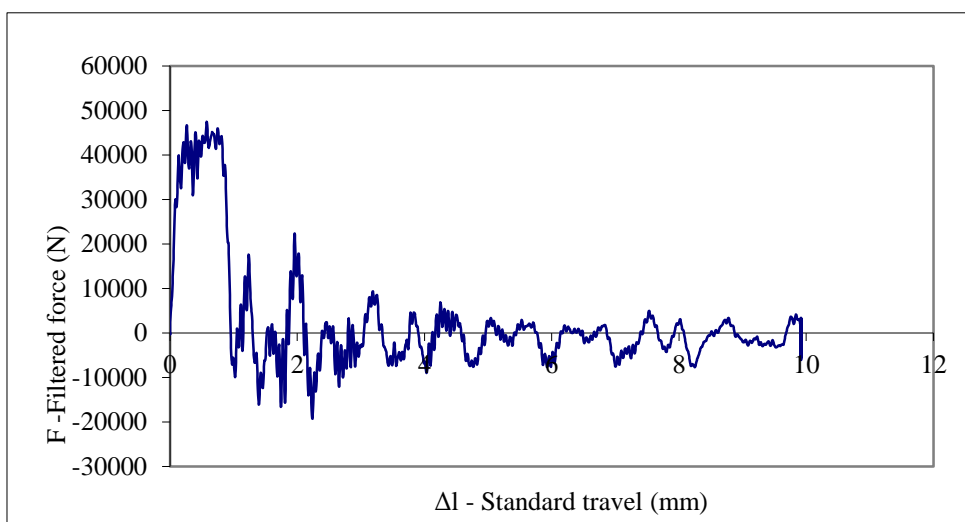
OBR. 6 – Kyvadlo kladiva ve výchozí poloze před odstartováním testu

4.2 Výstupy testu

Výstupy testů podle uvedené metodiky jsou On-line časové záznam síly F a deformace Δl v průběhu destrukce zkoušených plochých materiálových vzorků. Dále jsou uvedeny dva typické příklady záznamů síly v závislosti na deformaci pro různé materiály: jedná se o záznamy, které jsou názorným příkladem tzv. instrumentované zkoušky podle předkládané metodiky. V grafickém zobrazení jsou patrné jednotlivé fáze průběhu destrukce trhaných vzorku: okamžik nárazu, deformace vzorku, nárůst až do maximální síly (odpovídající dynamické pevnosti materiálu), deformační oblast až do přetržení vzorku, okamžik finálního přetržení vzorku – viz **OBR. 7, 8**.



OBR. 7 - Ukázka záznamu síly v závislosti na deformaci vzorku (materiál s vyšší plasticitou)



OBR. 8 - Ukázka záznamu síly v závislosti na deformaci vzorku (materiál s nižší plasticitou)

5. Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Na světě neexistuje zkušební zařízení standardního kyvadlového typu (jako je např. kyvadlové rázové kladivo od firmy ZWIC/Roell) a tedy ani metodika zkoušky, která by umožňovala instrumentované dynamické tahové testy plochých materiálových vzorků (plechů) používaných ve stavbě skříní a karoserií drážních vozidel. To dokládá celosvětová patentová rešerše – viz literatura č.1 a udělení patentu „Upínací kleština pro testování plochých materiálových vzorků na kyvadlovém kladivu“ – viz literatura č. 2. Vzhledem k tomu, že se jedná o nové zařízení, mající svoji originální specifikaci vyžadující speciální postup ovládání při realizaci zkoušky, bylo nezbytné sestavit předkládanou metodiku. Její novost spočívá zejména v tom, že dává možnost instrumentovaného dynamického testování plochých materiálových vzorků na klasických kyvadlových rázových kladivech od renomovaných výrobců (např. od firmy ZWICK/Roell) v rozsahu deformačních rychlostí $\dot{\epsilon} = 500 - 1000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. To je záležitost, která přesahuje současný stav techniky. Zjištění reálné dynamické pevnosti materiálu v závislosti na rychlosti deformace je podmínkou správné volby materiálu pro stavbu vozidel. Výstupy zkoušky dle této nové metodiky mohou posloužit konstruktérům drážních vozidel k tomu, aby navrhovali a stavěli z pohledu crashových - havarijních situací, které se v provozu nezhřídka vyskytují, bezpečnější vozidla s vyšší odolností proti nárazům.

6. Popis uplatnění certifikované metodiky

Předkládaná metodika je předurčena pro zjišťování dynamických materiálových charakteristik materiálů používaných při stavbě drážních vozidel (případně i ostatních dopravních prostředků). Aktuálně se konstruktéři v ČR i v zahraničí zabývají otázkou crashové odolnosti zejména skříní a karoserií vozidel. Vývojoví pracovníci výrobců i oborových výzkumných organizací se snaží pevnostními výpočty a Multybody simulacemi optimalizovat konstrukce vozidel tak, aby při minimalizaci hmotnosti zabezpečovaly požadovanou odolnost v podmínkách zatěžování odpovídajících havarijním situacím. Pokud ale nebudou mít k dispozici relevantní dynamické materiálové charakteristiky, mine se jejich úsilí účinkem. Uplatnění této metodiky spočívá právě v této oblasti, kdy experimentálně získané výsledky v podobě záznamů z provedených instrumentovaných dynamických tahových testů plochých materiálových vzorků mohou posunout kvalitu výpočtů a simulací

do vyšší spolehlivosti. Nová metodika přinese pokrok v dané problematice a její výsledky (výsledky zkoušek podle této metodiky) ve svém důsledku povedou ke zvýšení bezpečnosti provozu drážních vozidel.

Významnou oblastí pro uplatnění předložené metodiky bude také možnost kontrolovat kvalitu materiálů dodávaných výrobcům vozidel od subdodavatelů. V současnosti je databáze dodavatelů materiálů pro konstrukce drážních vozidel velice široká. Nežádka se stává, že udávané klasické mechanické parametry (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, kontrakce) jsou podle norem v pořádku, ale nejsou známy údaje o dynamickém chování materiálu. Provedení testů podle předkládané metodiky může tuto mezeru vyplnit a odhalit případné nedostatky a třeba i nevhodnost záměru použít takový materiál např. pro stavbu skříně nebo karoserie drážního vozidla. Stále se vyskytující četné provozní poruchy konstrukcí drážních vozidel ukazují, že metodika a jejich výsledky najdou v procesu návrhu a ve stavbě vozidel své uplatnění.

7. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty lze posuzovat ze dvou hledisek:

- a) Výdaje - vlastní náklady na provedení testů dle předkládané metodiky jsou naznačeny v *Tab 1*

Položka	Věcná náplň položky	Kalkulace v tis (Kč)
1	Náklady na přípravu zkušebních vzorků (30 ks)	15
2	Osobní náklady na přípravu a realizaci testů (2 lidé 2 dny)	32
3	Osobní náklady na zpracování výsledků testů (2 lidé 2 dny)	32
4	Náklady na energie a krytí opotřebení zkušebního zařízení	25
5	<u>Celkem</u>	104
6	Finanční rezerva 10% na řešení mimořádných okolností	10
7	Celkové předpokládané náklady testů sady 30 vzorků	114

Tab 1- Kalkulace nákladů provedení zkoušky dle předkládané metodiky

- b) Konkrétní úspory při zavedení metodiky lze předpokládat v těchto oblastech:
- a. Významná úspora bude spočívat v tom, že tato metodika testů svými výsledky přispěje k lepšímu poznání dynamických vlastností materiálů používaných pro stavbu drážních vozidel. Tím bude otevřena možnost přesnějšího odhadu technické životnosti a provozní spolehlivosti konstrukcí drážních vozidel. To ve svém důsledku povede k významnému snížení nákladů na údržbu, opravy a vlastní provoz vozidel.
 - b. Díky uplatnění relevantních dynamických charakteristik, získaných touto metodikou, dojde ke zkvalitnění pevnostních výpočtů a Multybody simulací. Tím může dojít ke snížení rozsahu experimentů – např. redukci prováděných crashových zkoušek. Pro názornost jedna crashová zkouška čela lehké stavby kolejového vozidla stojí cca.....2300 tis Kč
 - c. Snížení nákladů na provádění provozních zkoušek, např. jedna jízdní pevnostní zkouška kolejového vozidla dle ČSN EN 12 663-2 stojí cca..... 600 tis Kč
 - d. Snížení nákladů na provádění dalších statických a dynamických zkoušek na dynamickém zkušebním stavu. Pevnostní únavová zkouška konstrukčního uzlu skříně kolejového vozidla (např. rohového dveřního nebo okenního prvků) stojí cca.....400 tis Kč.

8. Seznam použité literatury:

1. Patentová kancelář SOUKUP Petr, registrační č. 115: Rešerše RP 360/15, Olomouc, červenec 2014
2. SCHMIDOVÁ Eva, HANUS Petr, CULEK Bohumil,,: Patent „Upínací kleština pro testování plochých materiálových vzorků na kyvadlovém kladivu““ č. 306850, Úřad průmyslového vlastnictví Praha, červen 2017
3. HANUS Petr: Hodnocení vlivu strukturní heterogenity na pevnost svarových spojů vysokopevnostních ocelí, disertační práce, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2016

4. ČSN EN 12 663-1: Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel, část 1. Lokomotivy a osobní vozy, říjen 2010
5. ČSN EN 12 663-2: Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel, část 2. Nákladní vozy, říjen 2010
6. ČSN EN ISO 26203-1: Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace-část 1: Systémy typu pružné tyče, červenec 2010
7. ČSN EN ISO 26203-2: Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace-část 2: Servohydraulické a další zkušební systémy, únor 2012

9. Seznam publikací, které předcházely metodice

1. SCHMIDOVÁ Eva, CULEK Bohumil, HOJKA Přemysl: The Strain-Rate Sensitivity of Martensitic high Strength Steel, Metal 2017 Brno
2. SCHMIDOVÁ Eva, BOZKURT Fatih, SCHMID Michal, CULEK Bohumil: Local elastic-plastic response of welding joints of DOMEX700MS steel, Metal 2016 Brno
3. HANUS Petr: Hodnocení vlivu strukturní heterogenity na pevnost svarových spojů vysokopevnostních ocelí, disertační práce, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2016
4. CULEK Bohumil, CULEK Bohumil ml., SCHMIDOVÁ Eva: Zkušební zařízení pro dynamické tahové testy materiálů kolejových vozidel, 22. mezinárodní konference „Súčasnú problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2015, Žilina, Slovensko
5. SCHMIDOVÁ Eva, CULEK Bohumil, HANUS Petr: Dynamic fracture behavior of the martensitic high strength steel after spot welding, 32nd Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 2015, Starý Smokovec, Slovensko
6. SCHMIDOVA Eva, CULEK Bohumil, KAYA Utku: Effect of Rolling Contact Fatigue on the Elastic-Plastic Response of Hadfield steel, Metal 2015, Brno
7. SCHMIDOVÁ Eva, CULEK Bohumil: Study of Specific Parameters Determining the Fracture Resistance of Autobody Welded Joints, VI. mezinárodní vědecká konference s podtitulem „Principy udržitelné dopravy“ 2015, Pardubice