



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OVĚŘENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ TAHOVÉ DEFORMACE PŘI HOPKINSONOVĚ TESTU

VERIFICATION OF THE EXPLOTATION POSSIBILITY OF TENSILE STRAIN DURING
THE HOPKINSON'S TEST

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. IVO DOHNAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2014

Abstrakt:

Dizertační práce pojednává o možnosti provádění dynamických tahových zkoušek. K tomuto účelu je využíváno zařízení Hopkinsonovy dělené tyče (dále jen SHPBT). Základní konstrukce zařízení je určena k provádění dynamických kompresních testů nejen na kovových materiálech, ale i na plastech a keramice. Dosaženými výsledky jsou závislost deformačního napětí na deformaci a rychlost deformace na deformaci. SHPBT je schopné testovat materiály za vyšších rychlostí deformace a to 10^2 až 10^3 s^{-1} .

Aby bylo možné provádět mechanické tahové zkoušky materiálu na SHPBT za vyšších rychlostí deformace, byl k tomuto účelu vyvinut speciální přípravek. Tento přípravek slouží k testování plochých vzorků o tloušťce 2 mm a byl uznán Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor s číslem 23703. Při testování tohoto přípravku byly použity vzorky vyrobené z korozivzdorné austenitické oceli dle ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm. V rámci řešení dizertační práce byla také provedena numerická simulace v programu ANSYS – LS Dyna, která ověřovala funkčnost navržené konstrukce tohoto přípravku.

Klíčová slova: Hopkinsonův kompresní test (SHPBT), ploché vzorky, dynamická tahová zkouška, korozivzdorná ocel 1.4301 (ČSN 41 7240), metoda konečných prvků.

Abstract:

The PhD thesis deals with the possibility of performing dynamic tensile tests. For this purpose, Split Hopkinson Pressure Bar Test (hereinafter SHPBT) is used. The basic construction of SHPBT device is designed to perform dynamic compression tests on materials (metals, plastics, and ceramics). The obtained results are deformation stress – strain and strain rate – strain dependences. SHPBT is capable of testing materials at high strain rates up to $10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$.

It was created a special device for dynamic tensile tests of materials at high strain rates. The created device uses the basic construction of SHPBT. The special device is used for testing flat specimens with 2 mm thickness. It was recognized by the Industrial Property Office of the Czech Republic as a utility model with number 23703. The specimens used for dynamic tensile testing were made of austenitic stainless steel (W.Nr. 1.4301) with 2 mm thickness. The verification of created device was carried out by numerical simulation. The numerical simulation was performed by ANSYS LS – Dyna software.

Key words: Split Hopkinson Pressure Bar Test (SHPBT) – Split Hopkinson Tensile Bar Test (SHTBT), flat specimens, dynamic tensile test, stainless steel 1.4301 (ČSN 41 7240), finite element method.

Bibliografická citace

DOHNAL, Ivo. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Brno, 2014. 75 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předkládanou dizertační práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího dizertační práce.

V Brně dne 11. 4. 2014

.....

podpis

Poděkování

Děkuji především svému školiteli panu prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. a dále pak také prof. Ing. Radku Samkovi, CSc., Ing. Miroslavu Šlaisovi, Ph.D. a Ing. Evě Peterkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování této dizertační práce.

OBSAH

Titulní list

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Úvod.....	9
1 Cíle dizertační práce	11
2 Současný stav poznání o zkouškách materiálů vysokými rychlostmi deformace ..	12
2.1 Rozdělení zkoušek materiálu podle rychlosti deformace	12
2.2 Materiálové modely používané v technologii tváření.....	13
2.3 Materiálové modely zohledňující rychlost deformace.....	14
3 Současný stav poznání tahových zkoušek prováděných na Hopkinsonově zařízení	17
4 Zkušební zařízení pro vysoké rychlosti deformace	21
4.1 Taylorův test - TAT.....	21
4.1.1 Vyhodnocení Taylorova testu	22
4.2 Hopkinsonova metoda dělených tyčí	24
4.2.1 Princip odvození veličin získaných z Hopkinsonova testu	26
5 Korozivzdorné oceli.....	29
5.1 Feritické oceli	32
5.2 Martenzitické oceli	32
5.3 Precipitačně vytvrditelné oceli	32
5.4 Austeniticko – feritické (duplexní) oceli	33
5.5 Austenitické oceli	33
6 Metoda konečných prvků	35
6.1 Implicitní algoritmus	36
6.2 Explicitní algoritmus	37
6.3 Porovnání explicitního a implicitního algoritmu	39
7 Simulační prostředí pro vysokorychlostní děje	40
7.1 Abaqus/Explicit	40
7.2 ANSYS LS DYNA	41
8 Experimentální část	43
8.1 Vstupní testy materiálu.....	43
8.2 Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení	46
8.3 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – válcové vzorky	50

8.4	Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – ploché vzorky	51
8.5	Numerická simulace tahového testu s úpravou pro ploché vzorky.....	53
8.6	Provedení experimentů s navrženou úpravou pro ploché vzorky.....	59
8.7	Vyhodnocení provedených experimentů	62
8.8	Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace	66
8.9	Další výsledky získané z provedených experimentů	70
9	Závěry	73
Použitá literatura		
Přehled článků autora		
Tvůrčí aktivity autora		
Seznam použitých symbolů a zkratk		
Seznam příloh		
Seznam obrázků		
Seznam tabulek		

ÚVOD

Dnešní doba je doprovázena rychlým rozvojem techniky. Hlavní důraz je proto kladen na snižování výrobních časů, z čehož plynou velké nároky na výkony produkčních strojů. Tyto aspekty s sebou přináší finanční úspory, které se následně promítají do konkurenceschopnosti subjektů v daném oboru. K rychlému rozvoji nedochází pouze v oblasti techniky, ale také v oblasti zabývající se materiály a jejich chováním. Aplikací moderních materiálů v mnoha odvětvích, např. automobilovém, kosmickém či leteckém průmyslu, ale i v lékařství je možné dosáhnout vyšší produktivity při stejné nebo nižší spotřebě energie.

Tváření vysokou rychlostí deformace nachází uplatnění ve výrobních technologiích, jako jsou vysokorychlostní tvářecí automaty, kde rychlost deformace je výrazným faktorem z hlediska výroby součástí. Z technologického pohledu je možno metody tváření za vysokých rychlostí deformace považovat za velmi perspektivní. V důsledku finanční náročnosti prostředků při úzce zaměřeném uplatnění je nutné prohloubit všeobecné povědomí o možnostech tohoto způsobu tváření a také navázat těsnější spolupráci výzkumných pracovišť s výrobní sférou.

Jednou ze základních veličin ve tváření je rychlost deformace. Obecnou platností je, že se zvyšující se rychlostí deformace také narůstá deformační odpor materiálu a dochází k poklesu tvárnosti materiálu. S narůstajícím deformačním odporem materiálu v závislosti na přetvoření se od určité rychlosti deformace významně projevuje i tzv. dynamická mez kluzu. Na součásti vyráběné tvářením tedy výrazně působí kinetická energie nástroje. Např. tvářecí automaty jsou schopny vyrábět součásti rychlostí i stovek kusů za minutu. Toto je také jeden z důvodů, proč jsou kladeny vysoké nároky na materiály nástrojů. Ty musí být zvoleny tak, aby při použití nedocházelo k jejich plastické deformaci. Z hlediska zatížení zde významnou roli hrají také setrvačné síly. K dosažení správné volby jak materiálu a geometrie nástroje, tak i materiálu polotovaru je vhodné využít počítačovou simulaci takového děje. Jedná se o rychlý a efektivní způsob řešení nastalého problému. Vytvořený model musí být nastaven tak, aby byly zachovány všechny podstatné parametry ovlivňující předmětný proces. Je nutné mít stále na paměti, že dynamický děj trvá řádově v desítkách mikrosekund. Tomu musí odpovídat vhodný simulační program, např. ANSYS LS DYNA nebo ABAQUS-Explicit.

Získané informace o chování materiálů za vysokých rychlostí deformace jsou nejvíce využívány pro vojenský a automobilní průmysl a je nutno si uvědomit, že dostupné informace zabývající se vysokou rychlostí deformace jsou v omezené míře. Zařízení pro stanovení mechanických vlastností materiálu za dynamických podmínek jsou známá, ale i tak je možné na nich provádět další úpravy. K tomu, aby bylo možné získané informace interpretovat, použít v praxi nebo na nich dále pracovat a rozšiřovat je, je zapotřebí širokých znalostí z oblasti matematiky, fyziky, nauky o materiálech a výpočetní techniky. Experimentální zařízení, na kterých jsou prováděny mechanické zkoušky za dynamických podmínek zatěžování, se nacházejí

i na Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně, Odboru technologie tváření kovů a plastů. Jedná se konkrétně o zařízení pro Taylorův test a Hopkinsonův test.

Hlavním cílem dizertační práce je navržení a ověření tahového přípravku, který bude sloužit k provádění dynamických tahových zkoušek plochých vzorků na Hopkinsonově zařízení. Pro ověření správnosti navržené úpravy bude také využito simulačního programu ANSYS LS DYNA, který je vhodný pro vysokorychlostní děje. Navržený tahový přípravek bude testován na vybrané korozivzdorné oceli.

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním přínosem dizertační práce je ověření navržené úpravy Hopkinsonova zařízení k provádění tahových zkoušek. Jako výchozí testovací materiál byla vybrána korozivzdorná chrom niklová austenitická ocel dle ČSN 41 7240 tloušťky 2 mm. Předmětný materiál bude podroben rázovému zatížení v tahu za určitých definovaných podmínek, tj. bude podroben zkouškám na Hopkinsonově zařízení.

Ověření experimentálně zjištěných výsledků mechanického chování zvolené oceli bude porovnáno s provedenou numerickou simulací. Toto ověření je důležité z hlediska vývoje metodiky vyhodnocování tahových zkoušek na tomto zařízení.

Cíle dizertační práce:

- Vývoj a ověření navrženého přípravku pro tahovou variantu při Hopkinsonově testu.
- Provedení a vyhodnocení fyzikálních experimentů na vybraném materiálu.
- Provedení numerické simulace tahového testu na Hopkinsonově zařízení.
- Porovnání a zhodnocení výsledků.

K dosažení cílů dizertační práce je třeba:

- Vyhodnocení fyzikálních experimentů a vyslovení příslušných závěrů.
- Porovnání výsledků experimentů s numerickou simulací.
- Výzkum a vývoj komponentu pro možnosti tahových zkoušek na Hopkinsonově testu.
- Zhodnocení vlivu navržené úpravy Hopkinsonova testu na celkový výsledek provedených experimentů.

Naplnění cílů dizertační práce představuje přínos v oblasti mechanického chování předmětné korozivzdorné austenitické oceli vystavené rázovému zatížení. Dalším přínosem je modernizace Hopkinsonova testu, která spočívá ve vývoji a ověření komponentu k provádění dynamických tahových zkoušek.

Poznámka autora:

Úpravy komponentu pro Hopkinsonův test, technické a finanční zabezpečení pro uvedené experimentální práce by nebylo možno provést bez podpory Interní grantové agentury VUT, tj. projektů FSI-S-11-26, FSI-S-12-5, FSI-J-12-1818, FSI-J-13-2041, ve kterých je autor této práce navrhovatelem nebo spoluřešitelem.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ O ZKOUŠKÁCH MATERIÁLŮ VYSOKÝMI RYCHLOSTMI DEFORMACE

V oboru jako technologie tváření jsou kladeny stále vyšší požadavky na přesnost výroby a na jakost povrchu při minimálních nákladech. K dosažení těchto požadavků je tedy nutné brát v úvahu vysoké nároky na nástroje a materiál vyráběné součástí. Mechanické vlastnosti materiálů jsou ve většině ověřovány za kvazistatických podmínek, tj. rychlost deformace nemá výrazný vliv na velikost deformačního napětí. Získané informace o chování materiálu za dynamických podmínek je potom možné využít například u vysokorychlostních tvářecích automatů (namáhání nástrojů) nebo bariérových (crash) testů automobilů. Právě toto je důvod, proč je testování materiálů při vyšších rychlostech deformace stále potřebnější. Získané informace o chování materiálu za vysokých rychlostech deformace je možné uplatnit i v numerických simulacích pro přesnější popis vstupního materiálového modelu.

Jako příklad zařízení, která testují materiál s vlivem rychlosti deformace, lze uvést metodu Hopkinsovy dělené tyče a Taylorův test. Tato zařízení jsou k dispozici na FSI VUT v Brně, Odboru tváření kovů a plastů, v laboratoři vysokých rychlostech deformace nebo také na AV ČR, Ústavu teoretické a aplikované mechaniky. Nejznámější evropskou institucí zabývající se touto problematikou je Joint Research Center (JRC), Ispra, v Itálii.

2.1 Rozdělení zkoušek materiálu podle rychlosti deformace

Podle Meyerse [1] lze mechanické zkoušky materiálu rozdělit dle rychlosti deformace, kterou je schopna daná testovací metoda dosáhnout. Testovací metody lze rozdělit na creepové a napětovou relaxaci, kvazistatické, nízko dynamické, vysoko dynamické a s dopadem za vysoké rychlosti. Dělení testovacích metod materiálu podle rychlosti deformace uvádí tabulka 1.

Z hlediska správného provedení numerické simulace dynamické zkoušky, která slouží jako ověření předmětného testu, je nutné mít správné vstupní údaje, které zabezpečí relevantní výstupní informace. Znalosti o mechanickém chování materiálu v určitém rozsahu hodnot rychlosti deformace jsou nutnou podmínkou pro další využití v praxi, jako je tomu například při simulování „crash“ testů automobilů nebo chování projektilu při nárazu na překážku nebo při penetraci překážkou.

Tabulka 1: Rozdělení testovacích metod podle rychlosti deformace [1]

Rychlost deformace [s ⁻¹]		Testovací metody	Dynamické podmínky		
	10 ⁵ - 10 ⁷	DOPAD ZA VYSOKÉ RYCHLOSTI	ŠÍŘENÍ RÁZOVÉ VLNY	SETRVAČNÉ SÍLY NELZE ZANEDBAT	
		Výbušniny			
		Kolmý dopad na desku			
		Pulsní laser			
	10 ³ - 10 ⁴	VYSOKO-DYNAMICKÉ	ŠÍŘENÍ PLASTICKÉ VLNY		
		Taylorův test			
		Hopkinsonův test			
		Expandující kroužek			
	10 ¹ - 10 ²	NÍZKO-DYNAMICKÉ	JE DŮLEŽITÁ		
		Vysokorychlostní hydraulické	MECHANICKÁ REZONANCE		
		nebo pneumatické stroje	VE VZORKU A STROJI		
	10 ⁻⁴ - 10 ⁰	KVAZISTATICKÉ	TESTY S KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ DEFORMACE		SETRVAČNÉ SÍLY LZE ZANEDBAT
		Hydraulické a servo-hydraulické			
		stroje			
	10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁵	CREEP A NAPĚŤOVÁ RELAXACE	VISKOPLASTICKÁ ODEZVA KOVU		
		Konvenční testovací stroje			
		Creepové testy			

2.2 Materiálové modely používané v technologii tváření

V technologii tváření lze použít celou řadu modelů popisujících závislost deformačního napětí na deformaci. Skutečnost je ale taková, že některé materiálové modely platí pouze za určitých podmínek. Je tedy možné materiálové modely rozdělit podle určitých kritérií, například podle materiálu (kov, dřevo, plast, keramika atd.) a podmínek (teplota, rychlost deformace), kterým budou vystaveny. Správnou volbou

materiálového modelu použitého v numerické simulaci, je možné ověřit danou technologii, případně ji i vhodně optimalizovat.

Technologie tváření nejčastěji rozděluje materiálové modely pro kvazistatické zatěžování a dynamické zatěžování. Přehled materiálových modelů pro kvazistatické zatěžování lze najít např. v [2]. Protože pro výsledky dizertační práce bude využíváno metody Hopkinsonovy dělené tyče, kde zkoumaný materiál je vystaven vlivu rychlosti deformace, jsou níže uvedeny nejběžnější materiálové modely zohledňující rychlost deformace.

2.3 Materiálové modely zohledňující rychlost deformace

Základním činitelem ovlivňujícím mechanické chování materiálu je rychlost deformace. Rychlost deformace vyjadřuje stupeň deformace za časovou jednotku [3].

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (1)$$

Nejznámější vztah zohledňující nejen vliv deformace, ale také rychlost deformace je Hollomon-Ludvikův vztah:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

kde n – exponent deformačního zpevnění [-],

m – exponent citlivosti na rychlost deformace [-].

Exponent n je závislý na teplotě, exponent m je závislý na tzv. homologické teplotě. Homologická teplota je podíl teploty, při které probíhá zkouška, k teplotě tavení daného materiálu. Homologická teplota je bezrozměrné číslo a může teoreticky nabývat hodnoty 1 [3]. Stanovení exponentu m je popsáno například v [3]. Stručný přehled exponentů „ n “ a „ m “ pro vybrané materiály uvádí tabulka 2.

Tabulka 2: Přehled hodnot „n“ a „m“ ocelí a jiných druhů materiálu [4]

Materiál	n [-]	m [-]
C – ocel neuklidněná	0,20 až 0,25	0,01až 0,015
C – ocel uklidněná	0,22 až 0,26	0,015
Ocel bez intersticiálních prvků	0,30	0,015
HSLA ocel	0,10 až 0,18	0,005 až 0,01
Korozivzdorná feritická ocel	0,16 až 0,23	0,01až 0,015
Korozivzdorná austenitická ocel	0,40 až 0,55	0,01 až 0,015
Měď	0,35 až 0,50	0,005
Mosaz 70 - 30	0,45 až 0,60	0 až 0,005
Zn slitiny	0,05 až 0,15	0,05 až 0,08
αTi slitiny	0,05	0,01 až 0,02

Pro podrobnější popis chování materiálu se využívají tzv. konstitutivní rovnice. Tyto rovnice obsahují experimentálně zjištěné parametry, které zohledňují nejen deformaci a rychlost deformace, ale také teplotu, případně i krystalovou strukturu materiálu, vliv dislokací atd.

Počet parametrů určuje schopnost, jak lze přesně vystihnout reálné chování materiálu. S počtem parametrů současně vzrůstá složitost jednotlivých rovnic. Podle Meyerse [1] lze použít několik možných konstitutivních rovnic (Zerilli-Armstrong, Johnson-Cook, Mechanical Treshold stress(MTS)).

Nejrozšířenější a nejpoužívanější je Johnson-Cookova parametrická rovnice (3). Pro její použití je nutné znát 5 experimentálně stanovených parametrů pro daný materiál.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot [1 - (T^*)^m] \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

kde T^* je stanoveno ze vztahu

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad [-] \quad (4)$$

σ_0 - mez kluzu [MPa]

B - modul zpevnění [MPa]

C - koeficient citlivosti na rychlost deformace [-]

n - exponent deformačního zpevnění [-]

m - teplotní koeficient odpevnění [-]

T_0 - teplota okolí [K]

T_m - teplota tavení [K]

$\dot{\varepsilon}_0$ - referenční rychlost deformace (většinou je rovna 1 s^{-1})

Hodnoty σ_0 , B, C, n, m jsou experimentálně stanovené parametry.

Jednotlivé parametry Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice (3) zahrnují vliv deformace, rychlosti deformace a teploty. Aby bylo možno použít rovnici (3), je nutné znát všech 5 parametrů. K tomuto je vhodné využít plnotextové databáze, jako jsou například EMERALD, Knovel, Science Direct, SpringerLink a další, kde je možno získat požadované parametry pro příslušný materiál. Uvedené databáze jsou běžně dostupné na síti FSI VUT v Brně.

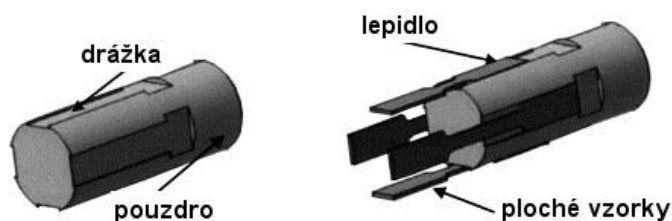
Druhý způsob získání pěti zmiňovaných parametrů je provedení praktického experimentu Hopkinsonovým nebo Taylorovým testem a jejich numerickou simulací. Určení spočívá v porovnání tvaru vzorku z fyzikálního experimentu a numerické simulace v programu ANSYS LS Dyna.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ TAHOVÝCH ZKOUŠEK PROVÁDĚNÝCH NA HOPKINSONOVĚ ZAŘÍZENÍ

Metoda Hopkinsonovy dělené tyče je primárně určena pro kompresní zkoušky materiálu, kde na vzorek působí rázové zatížení. Jak uvádí Weinong a Bo [5], Hopkinsonovo zařízení není využíváno jen ke kompresním testům. V současnosti je snahou vyvíjet možné úpravy tohoto zařízení pro zkoušení i jiných materiálů než jsou kovy. Weinong a Bo popisují možnosti testování křehkých materiálů (keramika, sklo), pěny, plastů, biologických tkání a dalších. Současně se také zabývají tím, jak využít rázového zatížení k testování na tah nebo krut. K tahovým nebo torsním zkouškám je tedy nutné vyvinout takový přípravek, který umožní tyto zkoušky provést [5][6].

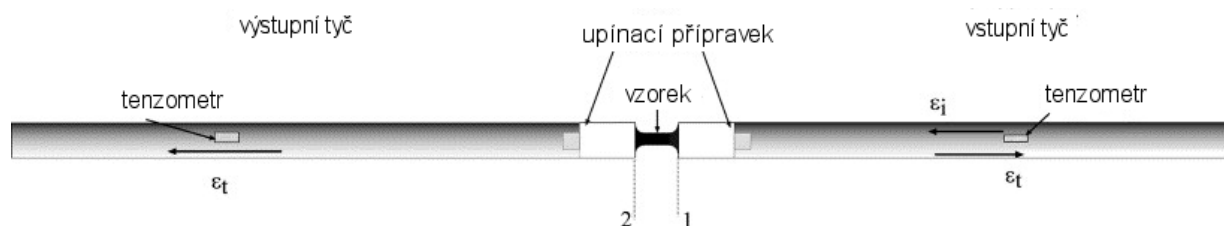
Cílem třetí kapitoly je poskytnout popis současného stavu možných variant úprav Hopkinsonova zařízení určených pro tahové zkoušky.

Haugou a Markiewicz [7] zkonstruovali jeden z možných způsobů upnutí plochých vzorků. Podstatou je dělené pouzdro (levá a pravá část), které je opatřeno čtyřmi drážkami určenými pro upnutí vzorků. Navržené pouzdro je opatřeno vnitřním závitem, který umožňuje připevnit daný přípravek na vstupní a výstupní tyč zařízení. Vzorky jsou upnuty do přípravku a zajištěny lepidlem. Jakmile jsou vzorky takto upevněny, je dále použita převlečná příruba, která je opatřena šrouby, jež slouží k vycentrování a zafixování vzorků na pouzdro. Schéma, které navrhli Haugou a Markiewicz [7], je na obr. 1.



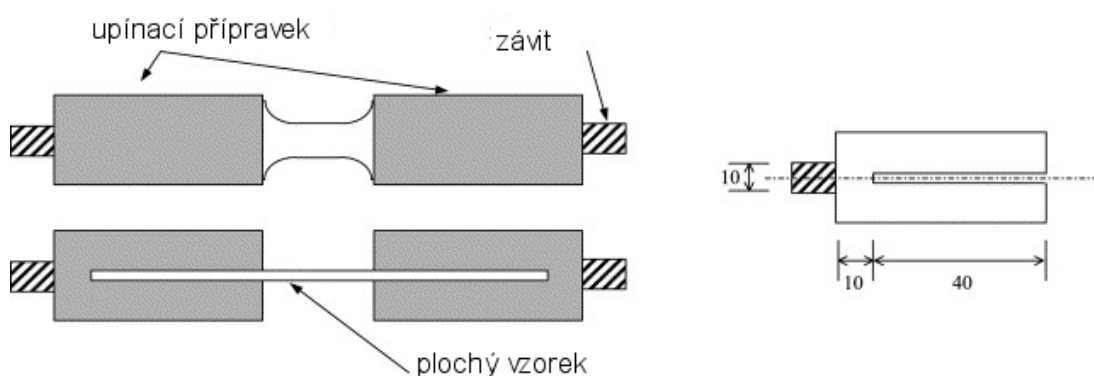
Obr. 1 Možný způsob upnutí vzorků [7]

Dalším možným způsobem se zabývali Góméz a Barbero [8]. Ti vytvořili přípravek k testování pouze jednoho vzorku, viz obr. 2. Zde je podstatou úprava, kde vzorek je upnutý do přípravku a zajištěn šroubem. Autoři v tomto případě neuvažují ještě s fixací vzorku lepidlem.

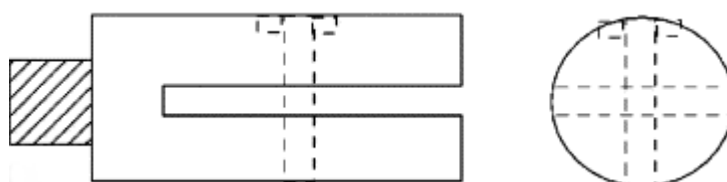


Obr. 2 Schéma zabudovaného přípravku na Hopkinsonově zařízení [8]

Upínací přípravek je i zde složen z levé a pravé části, které jsou upnuty do tyčí daného zařízení pomocí závitů. Autoři uvádí, že tímto testovali laminát do tloušťky 2 mm. Upnutí vzorku do navrženého přípravku detailně popisují obr. 3 a obr. 4.



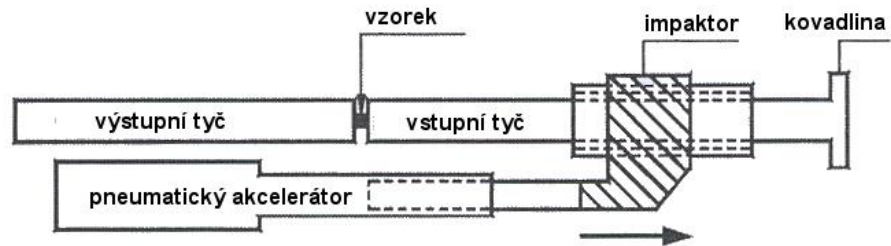
Obr. 3 Upínací přípravek dle Góméze a Barbera [8]



Obr. 4 Detail upnutí vzorku [8]

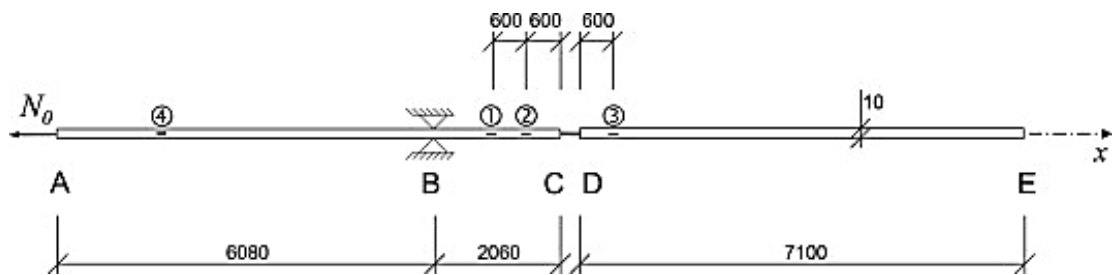
Tahové zkoušky prováděné na Hopkinsonově zařízení nespočívají pouze v navržení přípravků pro upnutí vzorku, ale také v úpravách celého zařízení, aby bylo možné vyvolat tahové nebo torsní zatížení vzorku.

Verleysen a Degrieck [9] se zabývali tím, jakým způsobem lze vyvolat tahové rázové zatížení. Principem zde je urychlování dutého impaktoru, který je nasunut na vstupní tyči. Pneumatický akcelerační systém uvede do pohybu impaktor, který vyvolá po dopadu na kovadlinu rázové tahové zatížení. Jak je patrné z obr. 5, kovadlina je součástí vstupní tyče. Autoři uvádí, že zařízení je možné testovat pouze pro válcové vzorky. Upnutí vzorku je realizováno vlepením vzorku do vstupní a výstupní tyče [9].

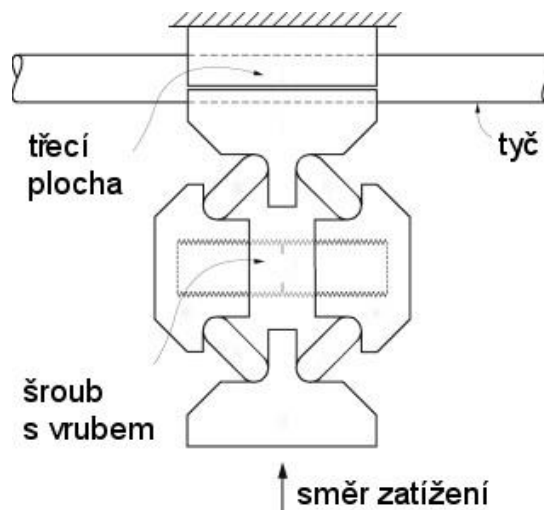


Obr. 5 Vyvození tahového zatížení na Hopkinsonově testu [9]

Pro případ, kdy není možné použít urychlovací zařízení k vyvolání rázového zatížení, existuje řešení, které navrhli Chen a Clausen [10], viz obr. 6 a obr. 7. Princip spočívá v zablokování axiálního pohybu vstupní tyče, na obr. 6 označeno písmenem B. Poté je na takto zablokovanou vstupní tyč vyvozeno tahové předpětí silou N_0 . Aby došlo k rázovému zatížení vzorku tahem, musí dojít k velmi rychlému uvolnění mechanismu, který blokuje vstupní tyč. Uvolnění tyče je provedeno tak, že při zatížení mechanismu dojde k porušení šroubu s vrubem, a to díky navržené konstrukci vyobrazené na obr. 7. Tímto způsobem je tedy možné nahradit impaktor, kterým je ve většině případů Hopkinsonovo zařízení vybaveno.



Obr. 6 Úprava k vyvození tahové síly dle Chena a Clausena [10]



Obr. 7 Mechanismus sloužící k vyvození rázové tahové síly [10]

Další možné způsoby úpravy aparatury pro tento test publikovali autoři Weinong a Bo [5] nebo Gerlach a Kettenbeil [11] a další.

Vývoj tahových zkoušek na předmětném zařízení probíhá také v Laboratoři rychlých deformací na FSI VUT v Brně. Úprava Hopkinsonova zařízení spočívá v testování plochých vzorků, které jsou namáhány rázovým tahovým zatížením. Takto je možno porovnávat statické a dynamické zatěžování.

Vzorky vyrobené z plechu s různou orientací vláken, vzhledem k dynamickému rázovému zatížení, lze využít k posouzení vlivu rychlosti deformace na anizotropii plechu. Pokud je známa orientace vzorku vzhledem ke směru válcování, lze snadno vypočítat hodnotu středního součinitele plastické anizotropie r_s . Při kvazistatických podmínkách vysoká hodnota r_s poskytuje optimální hlubokotažnost plechu. Rovnice (5) a (6) užívané za kvazistatických podmínek lze také využít při dynamickém zatěžování vzorku.

Hodnoty r_α a r_s se vypočítají následovně [4] :

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{b_k l_k}{s_0 l_0}} [-] \quad (5)$$

$$r_s = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} [-] \quad (6)$$



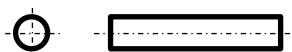
Obr. 8 Orientace odběru vzorků pro stanovení součinitele plastické anizotropie r_α [4]

4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO VYSOKÉ RYCHLOSTI DEFORMACE

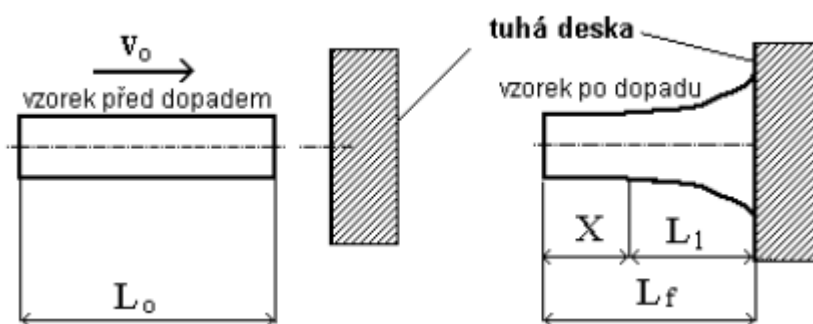
Metody zkoušení materiálů za dynamických podmínek, se kterými je možné se v současné době setkat, jsou Taylorův test a Hopkinsonův test. Obě tyto metody jsou primárně určeny ke kompresnímu namáhání testovaného materiálu. Pomocí těchto testů je možné získat průběhy křivek napětí, deformace nebo rychlosti deformace nebo také jen číselnou hodnotu maximálního dynamického napětí působícího na vzorek [13][14][15]. Podrobné principy a metodiky vyhodnocení testů jsou podrobně popsány níže.

4.1 Taylorův test - TAT

Zařízení pro Taylorův test (dále jen TAT) je používáno pro zkoušení materiálů za vysokých rychlostí deformace. Lze zde dosáhnout rychlosti deformace až 10^4 s^{-1} . Podstatou TAT je urychlení válcového vzorku a nastřelení na tuhou překážku – kovadlinu, např. měrnou tyč. Rozměry zkušební vzorku jsou: délka 25 mm a průměr 5 mm. Vzorek je umístěn do polystyrenového nosiče a s ním je posléze urychlen (vystřelen) expandujícím tlakem vzduchu směrem k dopadišti. Skutečná velikost vzorku, která je používána při TAT, je na obr. 9. Po provedení TAT jsou měřeny charakteristické rozměry vzorku, viz obr. 10.



Obr. 9 Skutečná velikost vzorku M 1:1 – TAT



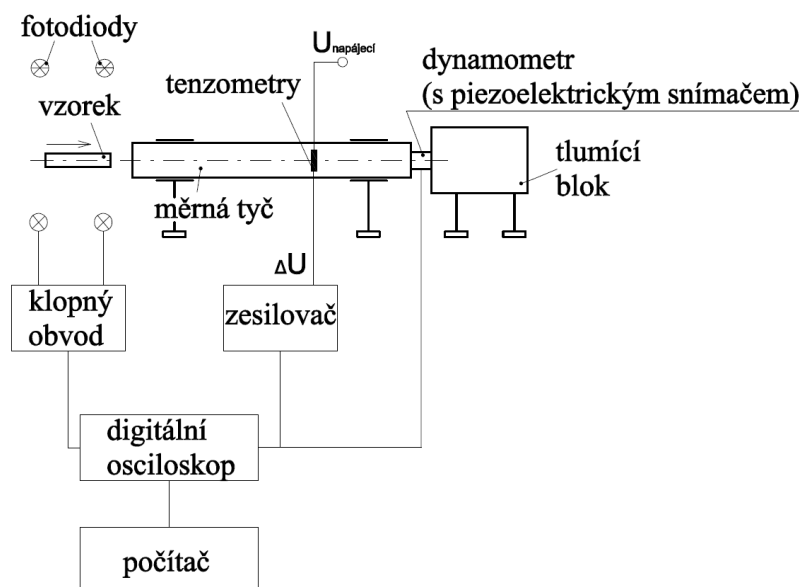
Obr. 10 Tvar vzorku před a po dopadu na tuhou desku – kovadlinu [16]

Před tím než vzorek dopadne na měrnou tyč, dochází k oddělení vzorku z nosiče. Měrná tyč, která je používána při TAT, je vyrobena z vysokopevnostní oceli (např. „maraging“ ocel – martenziticky vytvrditelná ocel), zajišťující její elastické chování. Jakákoliv plastická deformace měrné tyče je nepřijatelná [16], [17].

Dopad vzorku na měrnou tyč způsobí kompresní elastický puls, jenž je následně snímán tenzometry, které jsou nalepeny na měrné tyči. Tenzometry jsou zapojeny do plného Wheatstonova mostu. Výstupní napětí ΔU je přivedeno do zesilovače a následně do digitálního paměťového osciloskopu. Další zpracování obdržených dat se již provádí na počítači. Samotné měření probíhá tak, že proletí-li vzorek těsně

před dopadem mezi dvěma fotodiodami, dojde k aktivaci měření pomocí klopného obvodu [16], [17].

Pro obdržení záznamu z TAT je možné také využít dynamometr, např. piezoelektrický snímač. Využití dynamometru usnadní vyhodnocení z hlediska času. Tento princip vyhodnocení je založen na rovnováze sil. Z dynamometru je možno téměř ihned určit deformační odpor materiálu vzorku. Celé schéma tohoto zařízení je na obr. 11.



Obr. 11 Schéma zařízení pro Taylorův test

4.1.1 Vyhodnocení Taylorova testu

Při použití dynamometru je časová náročnost vyhodnocení výrazně redukována. Dynamometr má svou vlastní řídicí jednotku, ze které lze snadno zjistit průběh síly v závislosti na čase a určit maximální sílu, kterou vyvolal vzorek dopadem na tuhou podložku.

V případě použití tenzometrů, vyhodnocení spočívá v dalším zpracování hodnoty změny napětí ΔU v měřící větvi Wheatstonova mostu následovně:

$$\varepsilon_{\text{mer}} = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot \frac{2}{K} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{1 + \mu} \quad [-] \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_{\text{mer}} \quad [-] \quad (8)$$

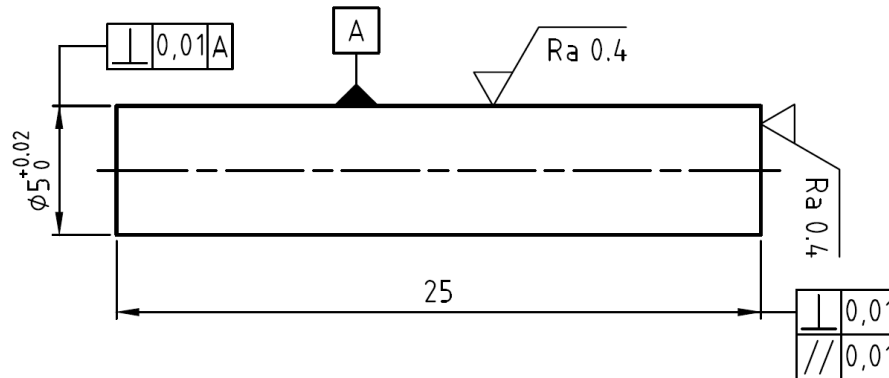
$$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

a z dynamické rovnováhy sil plyne deformační odpor vyjádřený rovnicí (10).

$$F_1 = F_d$$

$$\sigma_1 \cdot S_{tyc} = \sigma_d \cdot S_{vzorku} \quad [N] \quad (10)$$

kde ΔU - přírůstek měřicího napětí [V], U_N - napájecí napětí [V], K - k-faktor tenzometru [-], z - zesílení [-], μ - Poissonovo číslo [-], ϵ_{mer} - měřená elastická deformace [-], ϵ_1 - skutečná elastická deformace tyče [-], E - modul pružnosti v tahu [MPa], S_{tyc} - průřez měrné tyče [mm²], S_{vzorku} - průřez vzorku [mm²], σ_d - deformační napětí ve vzorku [MPa], σ_1 - napětí v tyči [MPa].



Obr. 12 Geometrie zkušební vzorku pro Taylorův test

Pomocí TAT lze snadno určit deformační odpor materiálu z výsledné geometrie vzorku po dopadu, viz obr. 10. Aby bylo možné zajistit co nejlepší kontakt vzorku při dopadu na tuhou podložku, musí být vzorek vyroben v určité přesnosti. Geometrické a rozměrové výrobní tolerance jsou na obr. 12. Dále je možné určit pomocí počítačové simulace TAT experimentálně stanovené parametry Johnson-Cookovy rovnice, a to pomocí vhodného simulačního softwaru (např. ANSYS LS DYNA, ABAQUS-Explicit) [3]. Porovnání experimentu s numerickou simulací spočívá v konečných rozměrech vzorku z experimentu a numerické simulace.

Například podle [1][3] je možné z geometrie vzorku po dopadu a dopadové rychlosti stanovit dynamickou mez kluzu s využitím rovnic různých autorů.

Jako příklady určení dynamických mezí kluzu lze uvést:

- Původní rovnici dle Taylora [13]

$$\sigma_{dy} = (v_0^2 + v_0 \cdot c_{pl}) \frac{\rho \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \ln \frac{L_0}{X}} \quad (11)$$

- Aproximovaný odhad dynamické meze kluzu – Hutchings, Ó-Brien [14]

$$\sigma'_{dy} = \rho \cdot v_0^2 \frac{10^{-6} \cdot (L_0 - X)}{2 \cdot (L_0 - L_f) \ln \frac{L_0}{X}} \quad (12)$$

pro malé rychlosti rázu, kdy $\frac{L_f}{L_0} \approx 1$

$$\sigma_{dy} = 2 \cdot \sigma'_{dy} \left(\frac{1}{1 - \frac{X}{L_0}} - \frac{1}{\ln \frac{L_0}{X}} \right) \quad (13)$$

- Dynamická mez kluzu dle Wilkinse a Guinina [1], [15]

$$\sigma_{dy} = -\rho \cdot v_0^2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{2 \cdot \ln \frac{L_0}{X}} \quad (14)$$

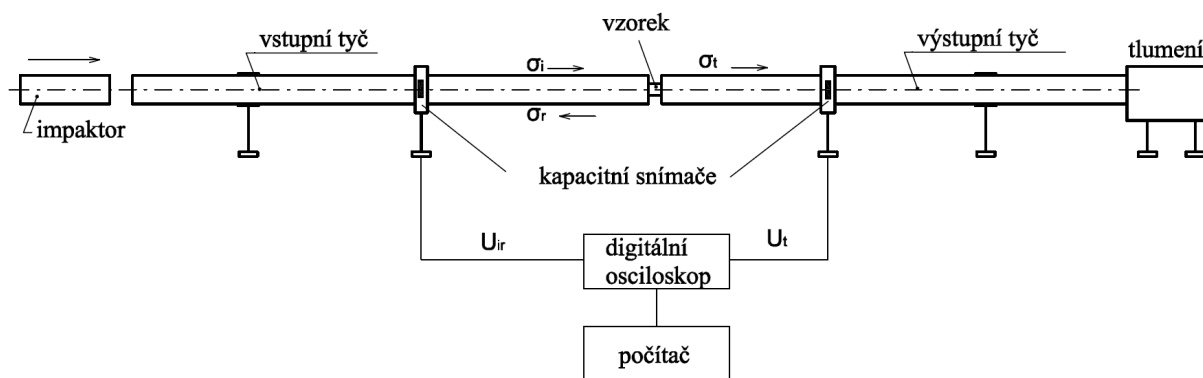
kde v_0 – dopadová rychlost vzorku [m/s], c_{pl} – rychlost plastické vlny [m/s], ρ – hustota materiálu [kg/m³], L_0 – počáteční délka vzorku [m], X – nedeformovaná část vzorku [m], L_f – konečná délka vzorku [m].

4.2 Hopkinsonova metoda dělených tyčí

Hopkinsonův test se v současnosti využívá ke stanovení dynamických mechanických charakteristik ocelí, slitin hliníku, mědi, titanu a dalších technických kovových i nekovových materiálů (především plastů). Tyto zkoušky se mohou provádět i za zvýšených teplot, např. do 500 °C [16].

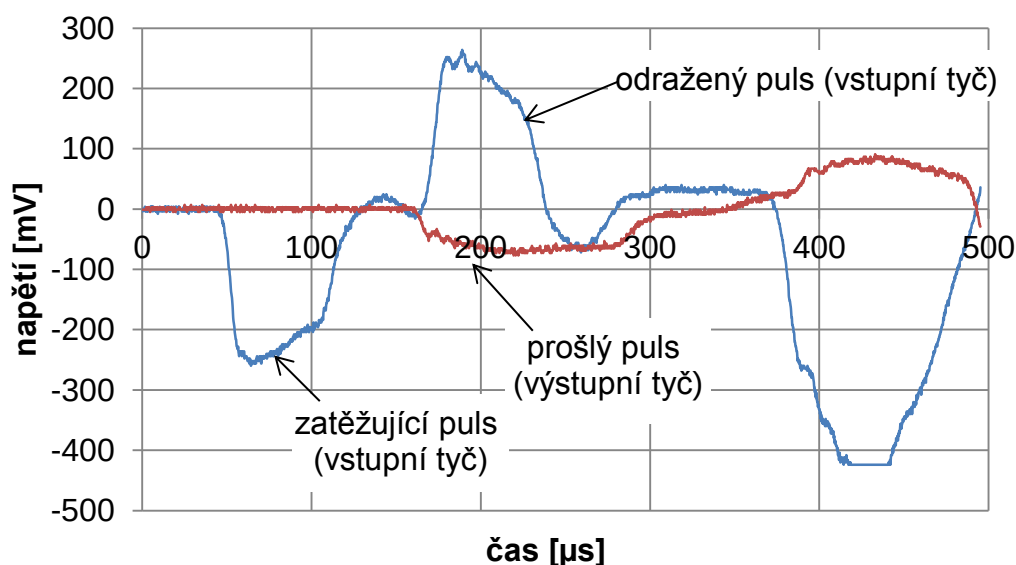
Standardním Hopkinsonovým kompresním testem jsou zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu při kompresním rázovém stlačení. Zařízení je tvořeno vstupní a výstupní tyčí, mezi nimiž je umístěn vzorek. Urychlený impaktor dopadá na vstupní tyč a předává jí svou kinetickou energii. Část kinetické energie impaktoru je spotřebována na plastickou deformaci vzorku a zbytek přechází do výstupní tyče, která je na konci opřena o pružný blok. Zařízení, které je na obr. 13, je jednoúčelové a lze na něm provádět pouze tlakové zkoušky. Aby bylo možné provádět na tomto zařízení jiné než jen tlakové zkoušky, musí být toto zařízení vhodným způsobem modifikováno.

Vstupní - zatěžující a výstupní tyč mají průměr 15 mm a délku 800 mm a na každé z nich je nasunut válcový kapacitní snímač. Tyče jsou vyrobeny z vysokopevnostní oceli VascoMax 350 (maraging ocel). Impaktor je vyroben ze stejné oceli jako tyče. Je možno použít impaktory různých délek (50, 100, 150, 200 a 300 mm), průměr impaktoru je 19 mm. Schéma tohoto zařízení je na obr. 13.

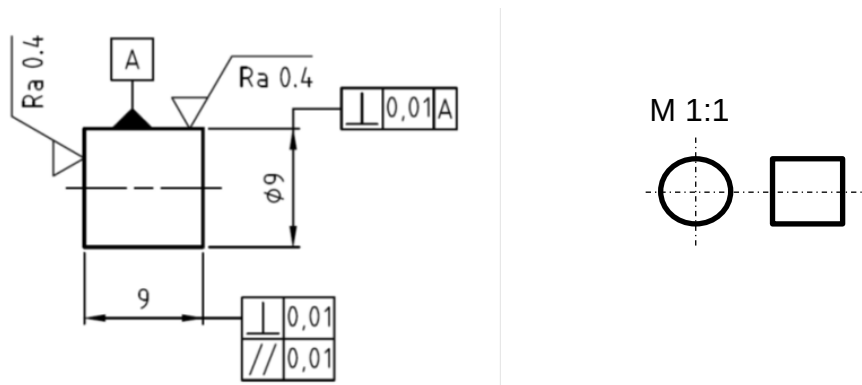


Obr. 13 Schéma zařízení pro Hopkinsonův test

Dynamické mechanické vlastnosti se určují z Hopkinsonova testu z elastických pulsů, které jsou snímány dvěma kapacitními snímači. Každá měřící tyč je opatřena jedním válcovým kapacitním snímačem. Vyhodnocovaný ráz, který zaznamenává první kapacitní snímač (zatěžující puls), je vyvolán impaktorem při dopadu na čelo vstupní tyče. Impaktor je vystřelen pneumatickým kanónem, jenž je součástí zařízení pro Hopkinsonův test. Zatěžující puls vyvolaný impaktorem na vstupní tyči se dále šíří až do rozhraní vstupní tyč – vzorek. Používaná geometrie vzorku pro tento test je na obr. 15. Na tomto rozhraní se část zatěžujícího pulsu odrazí zpět (odražený puls) a část prochází dál (prošlý puls) na rozhraní vzorku do výstupní tyče. Každý z pulsů je zaznamenán kapacitními snímači a přenesen do paměťového osciloskopu. Příklad záznamu z paměťového osciloskopu je na obr. 14. Poté následuje zpracování matematickou filtrací a vyhodnocování programem SCOPE na PC. Při Hopkinsonově kompresním testu je předpoklad jednodimenzionálního šíření elastických vln v materiálu tyčí se stejnou mechanickou impedancí [12]. Vyhodnocením testu dostáváme křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci a rychlosti deformace na deformaci pro předmětný materiál a jeho rychlost zatěžování [16].



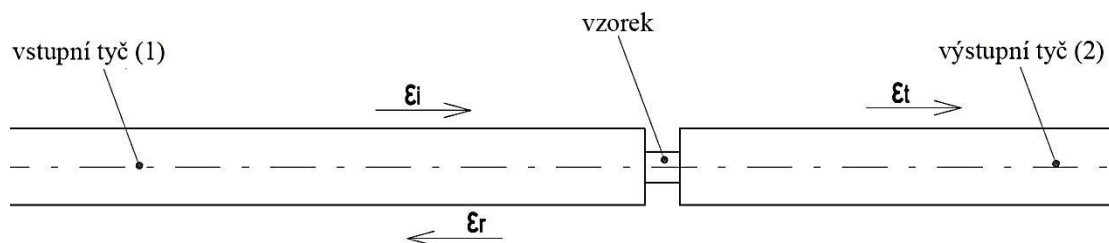
Obr. 14 Typický záznam z Hopkinsonova testu



Obr. 15 Geometrie zkušební vzorku pro rázový (tlakový) Hopkinsonův test (vlevo) a v měřítku 1:1 (vpravo)

4.2.1 Princip odvození veličin získaných z Hopkinsonova testu

Princip testu je podrobněji popsán v úvodní části kapitoly 4.2. Základním předpokladem pro vyhodnocení testu je jednoosý stav napjatosti v tyči a vzorku, který je vyvolán dopadem impaktoru na čelo vstupní tyče. Dopadem impaktoru dojde nejen k vyvolání napěťového pulsu, ale také k axiálnímu posuvu celé soustavy (vstupní tyč, vzorek, výstupní tyč). Z těchto dvou jevů vyvolaných impaktorem lze určit rychlost pohybu vstupní a výstupní tyče, které udávají rovnice (15) a (16). Rozdílem rychlosti vstupní a výstupní tyče je možné určit rychlost deformace vzorku v čase, viz rovnice (17). Integrací rychlosti deformace lze tedy snadno vypočítat průběh deformace vzorku v daném časovém okamžiku.



Obr. 16 Schéma pro odvození rychlosti deformace a deformace u SHPBT

Při výpočtu se vychází z následujících vztahů [12][5]:

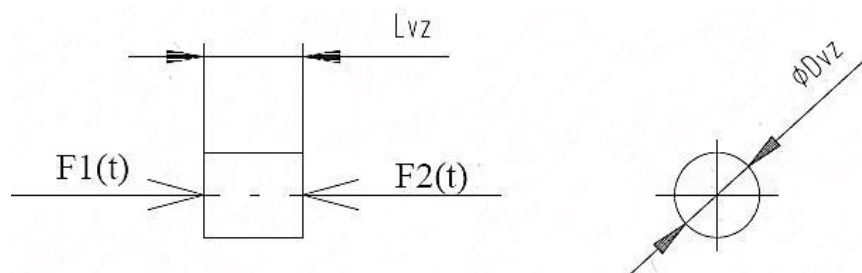
$$V_{\text{vstupní tyč (1)}} = C_0 \varepsilon_i - C_0 \varepsilon_r \quad [\text{m/s}] \quad (15)$$

$$V_{\text{výstupní tyč (2)}} = C_0 \varepsilon_t \quad [\text{m/s}] \quad (16)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_{\text{vstupní tyč (1)}} - V_{\text{výstupní tyč (2)}}}{L_{\text{vz}}} = \frac{C_0}{L_{\text{vz}}} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad [\text{s}^{-1}] \quad (17)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_{vz}} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad [-] \quad (18)$$

Průměrná velikost deformačního napětí vzorku vychází z aritmetického průměru sil od vstupní a výstupní tyče, tedy pomocí zachycených signálů, ze kterých je možné stanovit poměrnou deformaci tyčí, a také z geometrie tyčí a vzorku lze určit velikost průměrného deformačního napětí, které udává rovnice (23).



Obr. 17 Schéma pro odvození deformačního napětí vzorku u SHPBT

$$F_1(t) = E[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \frac{\pi D_{tyč}^2}{4} \quad [N] \quad (19)$$

$$F_2(t) = E\varepsilon_t(t) \frac{\pi D_{tyč}^2}{4} \quad [N] \quad (20)$$

$$F_{vz}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad [N] \quad (21)$$

$$\sigma = \frac{F_{vz}(t)}{\frac{\pi D_{vz}^2}{4}} \quad [MPa] \quad (22)$$

$$\sigma(t) = \frac{ES_{tyč}}{2S_{vz}} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad [MPa] \quad (23)$$

kde v je rychlost tyčí v podélném směru [m/s], E - modul pružnosti v tahu materiálu tyče [MPa], $S_{tyč}$ - plocha příčného průřezu tyče [mm²], S_{vz} - plocha příčného průřezu vzorku [mm²], $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_t(t)$ jsou axiální poměrné deformace tyče u zatěžujícího, odraženého a prošlého pulsu v závislosti na čase [-], C_0 je rychlost šíření elastické vlny (rychlost zvuku v měřicích tyčích) [m/s], L_{vz} délka (šířka) vzorku [m], F_{vz} - síla působící na vzorek [N], σ - deformační napětí vzorku [MPa], ε - deformace vzorku [-], $\dot{\varepsilon}$ - rychlost deformace vzorku [s⁻¹], D_{vz} - průměr vzorku [mm].

V případě, že se vzorek deformuje symetricky (tj. je zachován válcový tvar vzorku), potom součet poměrných deformací vstupní tyče se rovná poměrné deformaci výstupní tyče, tj. $\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$. Tento předpoklad lze použít při malých plastických deformacích do přibližně $\varepsilon \approx 0,1$ vzorku [5] [12]. Za těchto podmínek lze použít následující zjednodušené vztahy:

$$\sigma(t) = \frac{ES_{\text{tyče}}}{S_{\text{vz}}} \varepsilon_t(t) \quad [\text{MPa}] \quad (24)$$

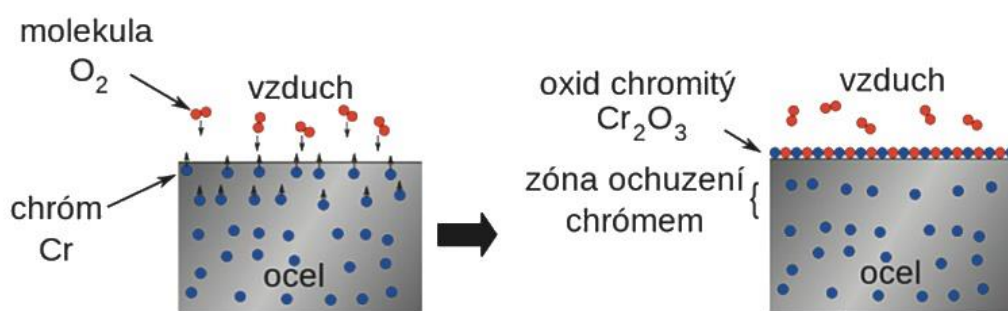
$$\varepsilon(t) = \frac{-2C_0}{L_{\text{vz}}} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad [-] \quad (25)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2C_0}{L_{\text{vz}}} \varepsilon_r(t) \quad [\text{s}^{-1}] \quad (26)$$

5 KOROZIVZDORNÉ OCELI

Korozivzdorná ocel je vžitý název pro všechny oceli, které jsou více či méně (částečně) odolné proti oxidaci, tj. nepodléhají korozi. U těchto typů ocelí není nutné aplikovat speciální povrchové úpravy. Na povrchu oceli se vytváří tzv. pasivační vrstva Cr_2O_3 , která se neustále obnovuje. Oceli jsou odolné proti oxidaci díky legujícím prvkům, jako jsou hlavně chrom, nikl a molybden [18].

Pojem korozivzdornost je definován jako odolnost proti korozi za normálních podmínek (při pokojové teplotě). Oxidační (korozní) odolnost je důsledkem pasivačního filmu na povrchu těchto ocelí. Jestliže se tento ochranný film na povrchu oceli dostane do takového prostředí (např. slaná voda, spojení různých materiálů), které tuto vrstvu narušuje, pak ocel ztrácí korozivzdornost. Základním prvkem korozivzdorných ocelí je chrom. Je-li v oceli obsaženo určité množství chromu, ocel je schopná pasivace. Pasivace oceli znamená, že v matici (v tuhém roztoku) je rozpuštěno více jak 12% Cr. Jestliže je chrom v korozivzdorné oceli obsažen ve formě karbidů, nikoliv v matici, tak se na povrchu nevytvoří pasivační vrstva, a tudíž ocel není korozivzdorná [19][20].



Obr. 18 Vznik pasivační vrstvy [21]

Korozivzdorné oceli jsou charakteristické nízkým obsahem uhlíku. Kromě korozivzdorných martenzitických ocelí, kde obsah uhlíku může dosahovat až 1,2 %, nepřekračuje obsah uhlíku 0,08 %. Vyšší difuzní rychlost uhlíku než chromu může při vzniku karbidů chromu vést ke vzniku heterogenit. Tyto karbidy pak mohou ovlivňovat chemickou homogenitu korozivzdorné oceli. To znamená, že místa ochuzená o chrom v důsledku vzniku karbidů, mají nižší odolnost proti korozi. Karbidy chromu jsou příčinou vzniku mezikrystalové koroze materiálu [19].

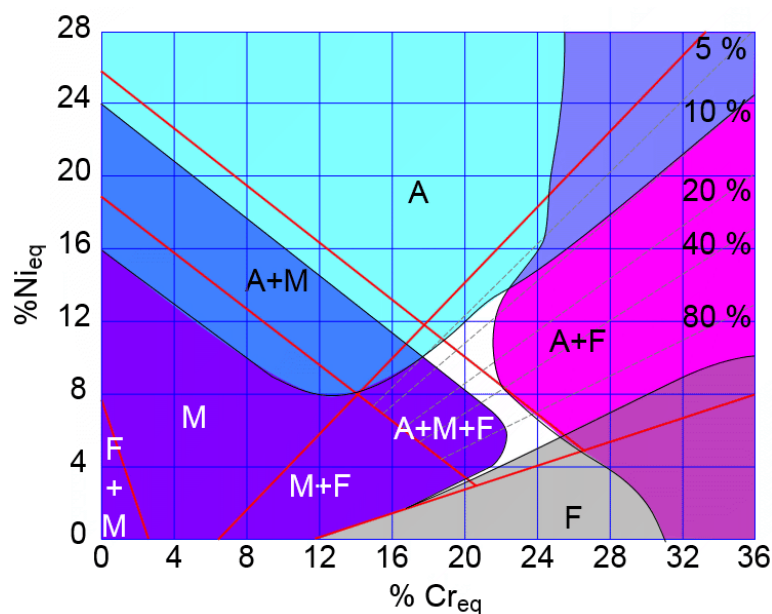
Snížit riziko mezikrystalové koroze spočívá ve snížení obsahu uhlíku nebo v legování takovými prvky, jako jsou titan, niob, tantal, které mají vyšší afinitu k uhlíku než k chromu. Tento proces legování se u korozivzdorných ocelí nazývá stabilizace. Vychází se z obecně platné rovnice, že $\% \text{Ti} = 5 \times \% \text{C}$. Tento předpis udává, kolik titanu je nutno přidat do oceli podle obsaženého uhlíku. Vyjádření se opírá o stechiometrické hodnoty jednotlivých prvků (uhlík = 12 g/mol, titan = 48 g/mol). Titan se též částečně váže i na dusík [19], [22]. Stručný přehled fyzikálních vlastností korozivzdorných ocelí uvádí tabulka 3.

Základní rozdělení korozivzdorných ocelí udává norma ČSN 10088-1 [23].
Korozivzdorné oceli je možno dle [23] klasifikovat podle:

1. užitných vlastností na:
 - odolnost proti korozi
 - žáruvzdornost
 - žárupevnost
2. mikrostruktury na:
 - feritické
 - martenzitické
 - precipitačně vytvrditelné
 - austenitické
 - austeniticko-feritické
3. vybraných legujících prvků na:
 - chrom + nikl
 - molybden
 - mangan
 - nízký uhlík
 - dusík
 - stabilizace
 - síra

Tabulka 3: Přehled fyzikálních vlastností korozivzdorných ocelí [22]

Vlastnost	Austenitická ocel	Feritická ocel	Martenzitická ocel	Precipitačně vytvrditelná ocel
Hustota [g/cm^3]	7,8 – 8,0	7,8	7,8	7,8
Střední koeficient tepelné roztažnosti (v oblasti 0 až 500°C) [$10^{-6}\text{m/m}^\circ\text{C}$]	17,0 – 19,2	11,2 – 12,1	11,6 – 12,1	11,9
Modul pružnosti v tahu [GPa]	193 – 200	200	200	200
Tepelná vodivost při 100°C [W/mK]	18,7 – 22,8	24,4 – 26,3	28,7	21,8 – 23,0
Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]	460 – 500	460 – 500	420 – 460	420 – 460
Elektrický odpor [$10^{-3}\Omega\text{m}$]	69 – 102	59 – 67	55 – 72	77 – 102
Oblast tavení [$^\circ\text{C}$]	1400 – 1450	1480 – 1530	1480 – 1530	1400 – 1440



Obr. 19 Schaefflerův diagram [24]

Výslednou strukturu korozivzdorné oceli je možné stanovit pomocí Schaefflerova diagramu, obr. 19. Souřadný systém zde tvoří tzv. ekvivalenty chromu a niklu,

které se vypočítají dle níže uvedených vztahů vyjadřujících součet procentuálního zastoupení jednotlivých prvků v dané oceli.

Ekvivalent chromu % $Cr_e = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb$

Ekvivalent niklu % $Ni_e = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn$

5.1 Feritické oceli

Feritické oceli jsou charakteristické obsahem 0,08 % uhlíku a do 30 % chromu. Tuhnutím feritické oceli z taveniny vzniká chromový ferit. Ten má za následek, že maximální rozpustnost uhlíku v chromovém feritu klesne na 0,01 %. Při vyšších koncentracích je uhlík vyloučen ve formě karbidů. Takto vyloučené karbidy mohou způsobovat křehnutí. Feritické oceli s obsahem uhlíku víc jak 0,01 %, jsou za pokojové teploty křehké a používají se jako žáruvzdorné. Korozivzdorné feritické oceli jsou magnetické a nekalitelné [19][25].

5.2 Martenzitické oceli

Jsou charakteristické obsahem uhlíku do 1 % a chromu do 18 %. Vysoký obsah uhlíku ve srovnání s ostatními druhy korozivzdorných ocelí dává možnost tepelného zpracování těchto ocelí (kalení + popouštění). Tyto oceli jsou korozivzdorné i po tepelném zpracování. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku úměrně roste obsah chromu z důvodu korozivzdornosti. Martenzitické oceli jsou feromagnetické a v omezené míře svařitelné (obsah uhlíku do 0,2 %). Nejběžněji používané martenzitické korozivzdorné oceli obsahují do 13 % chromu a do 0,25 % uhlíku. Používají se na konstrukce vodních strojů, v potravinářském průmyslu a zdravotní technice [19][25].

5.3 Precipitačně vytvrditelné oceli

Základní vlastností těchto ocelí je dosažení požadovaných mechanických vlastností tzv. vytvrzováním. Na rozdíl od martenzitických ocelí lze u precipitačně vytvrditelných ocelí provádět vytvrzování již na obrobeném dílci. Vytvrzování je proces, kdy je proveden ohřev na 400 až 500 °C. Nárůst pevnosti je vyvolán vznikem intermetalických fází, jako jsou například Ni_3Ti , Ni_3Cu nebo Ni_3Al . To je výhoda oproti martenzitickým ocelím, které je třeba tepelně zpracovat, aby bylo dosaženo jejich mechanických vlastností [19][25].

Precipitačně vytvrditelné oceli [25] lze rozdělit na:

- Martenzitické – nejprve je provedeno tepelné zpracování (vznik martenzitické struktury) a následné vytvrzení intermetalických fází. Mez pevnosti může dosahovat 1300 až 1500 MPa.

- Austenitické - obsahují precipitačně vytvrditelné prvky Ti, Al, V. Ohřevem na teplotu okolo 500 °C se tvoří intermetalické fáze, které způsobují zvýšení pevnosti oceli. Tepelné zpracování se neprovádí.

5.4 Austeniticko – feritické (duplexní) oceli

Takto se označují oceli, v nichž je obsah feritické struktury za normální teploty v rozmezí 40 až 60 %, zbytek je austenit. Někdy je také možné se setkat s názvem duplexní nebo dvoufázové oceli. Nejsou kalitelné a oproti austenitickým ocelím mají vyšší pevnost. Obsah uhlíku nepřesahuje 0,03 %. Dále obsahují 21 až 28 % chromu a 3,5 až 8 % niklu. Vlivem značného podílu feritu, podobně jako feritické oceli, křehnou při delším setrvání v oblastech kritických teplot (350 až 550 °C). Dobře odolávají mořské vodě a prostředí obsahující chloridové ionty. Vyznačují se také dobrou odolností proti koroznímu praskání, mezikrystalové, bodové a štěrbinové korozi [19][25].

5.5 Austenitické oceli

Korozivzdorné austenitické oceli mají velmi dobrou korozní odolnost, jsou nemagnetické s velmi vysokou hodnotou vrubové houževnatosti i při nízkých teplotách. Tyto oceli mohou dosáhnout vysokého zpevnění, jak při deformaci za studena, tak precipitačním zpevněním tuhého roztoku. Jsou obtížně obrobitelné. Mají nízkou mez kluzu, min. 215 MPa, mez pevnosti 500 – 700 MPa [26] [27] [28].

Charakteristický pro tuto skupinu ocelí je obsah chromu 18 až 20 % a niklu 8 až 11 %, obsah uhlíku do 0,08 %. V austenitické korozivzdorné oceli je rozpustnost uhlíku 0,03 %. Jestliže obsah uhlíku je vyšší, jak hodnota 0,03 %, je nutné provést u těchto ocelí rozpouštěcí žíhání. Nejčastější způsob rozpouštěcího žíhání se provádí ohřevem na teplotu cca 1050 °C a následuje rychlé ochlazení. Tímto se zabrání precipitaci karbidů chromu a dosáhne se austenitické struktury [22] [26].

Nejznámější ocelí této skupiny je ocel dle ČSN 41 7240. Má sklon ke zpevňování při tažení za studena a také při třískovém obrábění. Zpevňování vzniká přeměnou austenitu na deformační martenzit. Důsledkem tohoto jevu je zvýšení pevnosti, snížení tažnosti a ocel se stává částečně feromagnetická. Deformační nebo zbytkový martenzit, který se nachází v této oceli, lze odstranit žíháním. Tyto transformační změny nemají vliv na korozivzdornost [29]. Základní mechanické vlastnosti a chemické složení uvádí tabulka 4 a tabulka 5.

Tabulka 4: Chemické složení oceli dle ČSN 41 7240 (X5CrNi18-8, 1.4301) [28]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]
max. 0,08	max. 1,00	max. 2,00	max. 0,045	max. 0,03	17 až 20	8,0 až 10,5

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti oceli dle ČSN 41 7240 (X5CrNi18-8, 1.4301) [28]

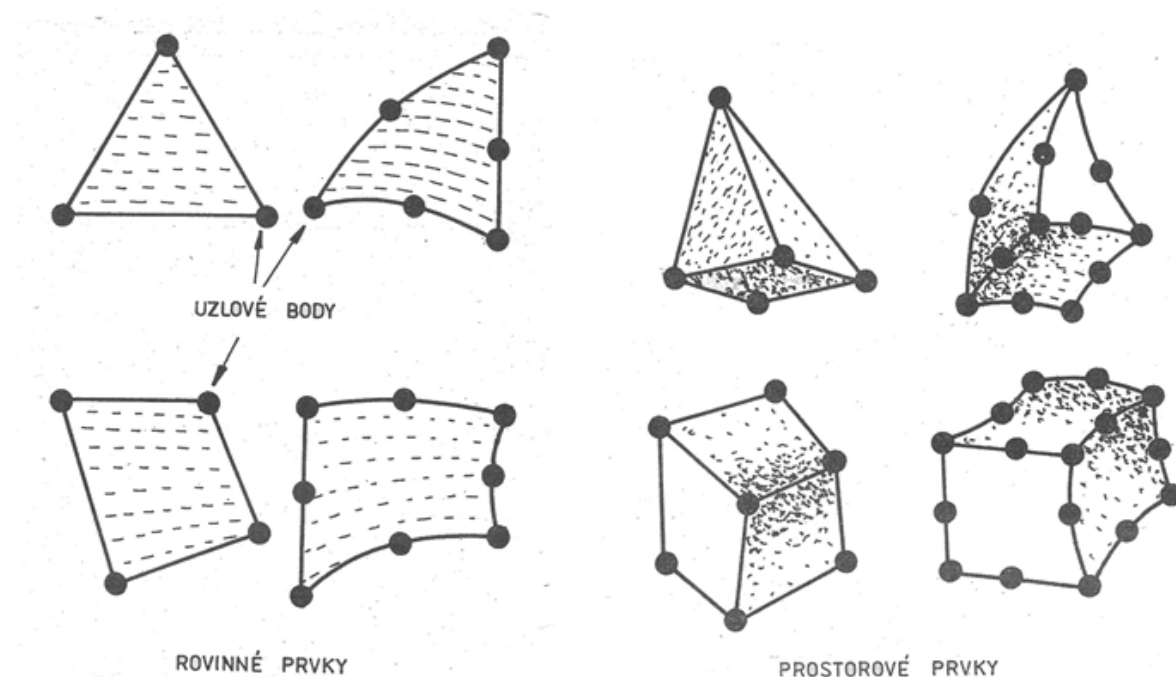
R _e [MPa]	R _m [MPa]	E [GPa]	A ₈₀ [%]
min. 215	500 až 700	193 až 200	min. 45

6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Základním principem metody konečných prvků (dále jen MKP) je rozložení tělesa nebo soustavy těles na menší části (prvky – odtud název MKP). Prvky, které mohou být použity v MKP výpočtech, uvádí obr. 20. Těmto prvkům je následně nadefinováno jejich chování z hlediska typu úlohy, o kterou se jedná (proudění tekutin, pevnostní analýza, vedení tepla atd.). Opětovným složením prvků se získá výsledná soustava rovnic, která popisuje chování dané soustavy. Dalším krokem řešení je aplikování počátečních a okrajových podmínek. Z takto nadefinované soustavy se získají primární neznámé veličiny. V případě deformační varianty MKP (úloha, která je řešena v dizertační práci) jsou primární neznámou veličinou deformační posuvy. Po určení hodnot deformačních posuvů je následně možné vypočítat např. síly, napětí, přetvoření, popřípadě další potřebné veličiny [30].

Každému prvku jsou přiřazeny materiálové a fyzikální vlastnosti, proto se dělení tělesa (soustavy těles) provádí z jednoduchých prvků, aby se dosáhlo co nejjednoduššího matematického popisu (výpočty polynomů nízkých stupňů). Z fyzikálního hlediska je každému geometrickému bodu soustavy přiřazena hodnota dané veličiny, která popisuje rozložení dané veličiny v okolí tohoto bodu [31].

MKP je numerická metoda, která slouží k řešení parciálních diferenciálních nebo integrálních rovnic. Při řešení parciálních rovnic se používá implicitní nebo explicitní algoritmus. Používaný název implicitní, explicitní je vztažen ke způsobu časové integrace pohybové rovnice. Používaný algoritmus řešení je volen podle typu řešené úlohy (rychlé dynamické děje, rázové zatížení, stacionární úlohy). Tomu také odpovídají simulační programy (objemové tváření, plošné tváření, crash testy automobilů apod.), které využívají těchto algoritmů.



Obr. 20 Typy rovinných a prostorových prvků v MKP [32]

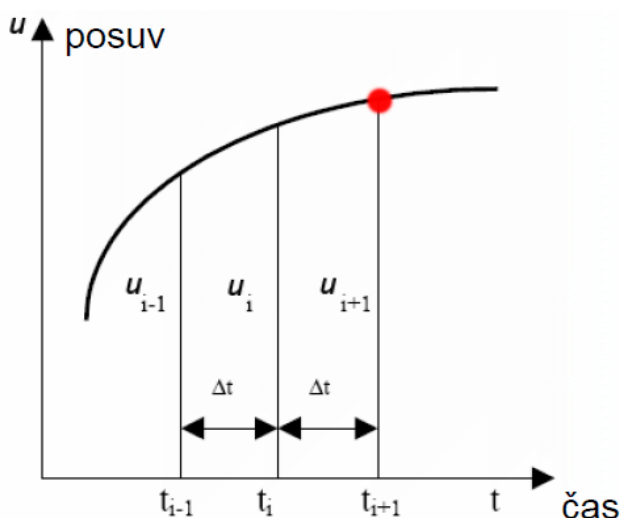
Při řešení dynamické úlohy jsou hledané veličiny posuvy. Posuvy jsou nezávislé neznámé a jsou funkcí času. Při řešení základní rovnice se vychází z rovnice (27)

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = F(t) \quad (27)$$

kde M – matice hmotnosti,
 C – matice tlumení,
 K – matice tuhosti,
 F – vektor zatížení,
 U – vektor neznámých posuvů.

Ve většině případů řešených úloh se neuvažuje vliv tlumení. Nejčastěji se matice tlumení C formuluje jako proporcionálně úměrná maticím M a K . Matice M a K jsou přesně odvozeny ze základních informací o použitém materiálu (hustota, modul pružnosti, Poissonovo číslo). Odvození matice tlumení C je problematické, protože na tlumení má vliv zvolený materiál, konstrukce (tření, spojovací materiál atd.) a prostředí, ve kterém se soustava nachází [30], [33].

6.1 Implicitní algoritmus



Obr. 21 Princip vysvětlení implicitního algoritmu [34]

U implicitního algoritmu platí předpoklad, že jsou známy výsledky řešení v časovém okamžiku t_i a úkolem je určit všechny neznámé v okamžiku t_{i+1} . Základní princip implicitního algoritmu je na obr. 21. Časový krok je tedy $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Uvažujeme řešení nestacionárního dynamického problému bez tlumení, tj. v rovnici (27) je zanedbána matice tuhosti. Potom výsledná základní pohybová matice má tvar

$$M \cdot \ddot{U}_{i+1} + K \cdot U_{i+1} = F_{i+1} \quad (28)$$

Při řešení implicitního algoritmu je rovnice (28) řešena **metodou dopředných diferencí**. Snahou metody dopředných diferencí je získat v rovnici (28) jedinou

neznámou, a tou je U_{i+1} , tj. vyjádřit si složku rychlostí, viz rovnice (29), a odtud zrychlení $\ddot{U}_{i+1}$, viz rovnice (30), pomocí posuvů U_{i+1} .

$$\dot{U}_{i+1} = \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta t} \quad (29)$$

$$\ddot{U}_{i+1} = \frac{\dot{U}_{i+1} - \dot{U}_i}{\Delta t} = \frac{\frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta t} - \frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (30)$$

Úpravou lze potom vyjádřit rovnici (28) pro soustavu neznámých posuvů v čase t_{i+1} následovně

$$\left(K + \frac{M}{\Delta t^2}\right) U_{i+1} = F_{i+1} + \frac{M(2U_i - U_{i-1})}{\Delta t^2} \quad (31)$$

kde levá strana rovnice (31) je dynamická matice tuhosti a pravá strana je dynamická matice zatížení. Rovnici (31) lze zjednodušeně zapsat jako

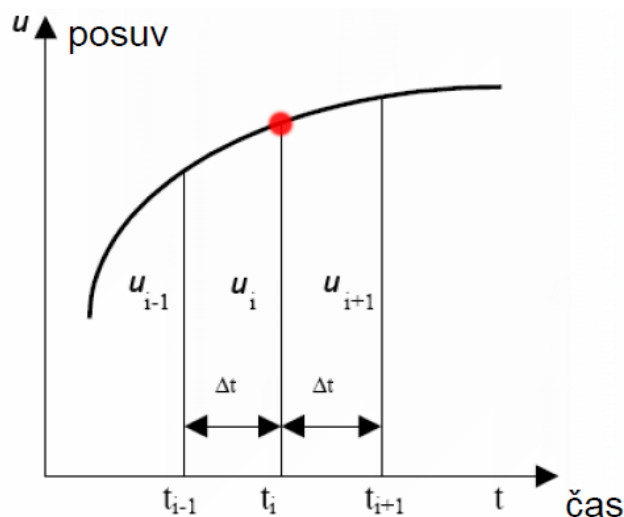
$$\hat{K} \cdot U_{i+1} = \hat{F} \quad (32)$$

Implicitního algoritmus je používán na takové úlohy, kde je možné aplikovat dlouhé časové kroky. Implicitní algoritmus je nepodmíněně stabilní, a tudíž výsledky nekontrolovaně nerostou nad všechny meze při volbě dlouhého časového kroku. Nestabilita výpočtu se může projevit jako zhroucení výpočtu už na začátku [34].

6.2 Explicitní algoritmus

Explicitním algoritmem je řešena stejná pohybová rovnice (27) resp. rovnice (28). Řešení spočívá v použití jiné numerické metody oproti té, která byla použita u implicitního algoritmu. Zde je využíváno **metody centrálních diferencí**. I zde platí předpoklad, že jsou známa řešení v časovém okamžiku t_i , a cílem je určení všech neznámých v okamžiku t_{i+1} . Potom výchozí pohybová rovnice je ve tvaru

$$M \cdot \ddot{U}_i + K \cdot U_i = F_i \quad (33)$$



Obr. 22 Princip vysvětlení explicitního algoritmu [34]

Postup je obdobný jako u metody dopředných diferencí. Snahou obou metod je vyjádření neznámé v časovém kroku t_{i+1} . Metodou centrální difference jsou obdobně vyjádřeny složky rychlostí (34) a zrychlení (35).

$$\dot{U}_i = \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{2\Delta t} \quad (34)$$

$$\ddot{U}_{i+1} = \frac{\dot{U}_{i+\frac{1}{2}} - \dot{U}_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{\frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta t} - \frac{U_i - U_{i-1}}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (35)$$

Po úpravách a dosazeních jednotlivých složek do rovnice (33) je možné vyjádřit pohybovou rovnici ve tvaru

$$\left(\frac{M}{\Delta t^2}\right) U_{i+1} = F_i \pm K \cdot U_i + \frac{M(2U_i - U_{i-1})}{\Delta t^2} \quad (36)$$

Řešení explicitního algoritmu je podmíněně stabilní, tj. nutnost dodržet dostatečně malou délku časového kroku tak, aby platilo $\Delta t < \Delta t_{\text{krit}}$. Označení Δt_{krit} je délka časového kroku, která závisí na hustotě sítě, rychlosti zvuku v daném prostředí [30][34].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (37)$$

$$\Delta t_{\text{krit}} = \frac{L}{c} \quad [\text{s}] \quad (38)$$

Kde c [m/s] – rychlosti zvuku v daném prostředí,
 E [Pa] – modul pružnosti v tahu,
 ρ [kg/m³] – hustota materiálu,
 Δt_{krit} [s] – kritický časový krok
 L [m] – velikost nejmenšího prvku sítě.

Kritický časový krok Δt_{krit} je interpretován jako čas, za který projde napěťová vlna nejmenším prvkem sítě. Oproti implicitní metodě zde vychází délka kroku řádově 10^{-5} až 10^{-7} s. To je důvod, proč je explicitní algoritmus využíván pro velmi rychlé dynamické děje [30][34].

6.3 Porovnání explicitního a implicitního algoritmu

Při srovnání výše uvedených algoritmů bylo zjištěno, že explicitní algoritmus se uplatňuje tam, kde jsou řešeny velmi rychlé dynamické děje na topologicky složitých prostorových sítích. A to je důvod, proč se explicitní algoritmus metody konečných prvků využívá pro simulaci chování konstrukcí při rázech, crash testech automobilů, explozích, průstřelech nebo technologických operacích, jako je protahování, válcování za studena [30].

Tabulka 6: Porovnání explicitního a implicitního algoritmu [34]

	Explicitní	Implicitní
Vhodné pro	Rychlé dynamické děje se výrazně nelineárním chováním.	Statické úlohy s mírnějšími nelinearitami.
Charakter programu	Jednoduchý kód, vše ve vnitřní paměti.	Komplikovanější program, komunikace s vnější pamětí
Časový krok	Malý	Větší (100x, 1000x)
Inverze matic	Ne	Ano
Rovnovážné iterace v rámci kroku	Ne	Ano
Požadavky na paměť	Malé	Velké

7 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ DĚJE

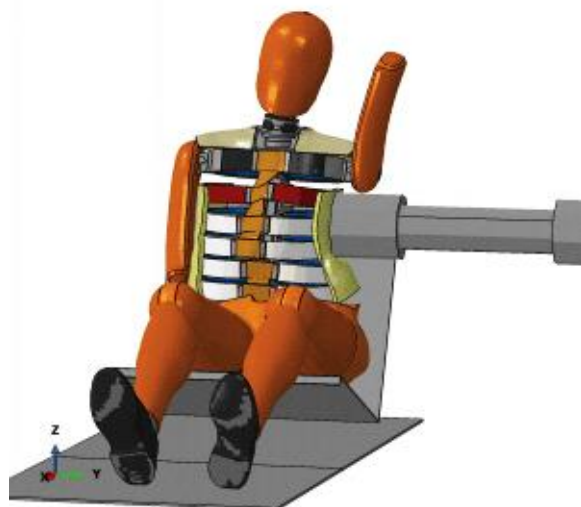
Simulační programy používané v dnešní době využívají metodu konečných prvků, která je založena na rozdělení dané součásti do množiny samostatných podoblastí. Prvky používané v numerických simulacích se liší ve vhodnosti použití pro daný simulační proces. Běžné simulační programy užívané ve tváření (Marc, Forge, FormFEM atd.) nejsou vhodné pro simulaci vysokorychlostních dějů. Je to dáno tím, že v simulaci není uvažován vliv setrvačnosti a rychlosti deformace. Jako nejpoužívanější programy pro vysokorychlostní děje jsou v současnosti ANSYS LS DYNA, Abaqus/Explicit. Jako další programy, se kterými je možné se setkat, jsou Pam-Crash a Pam-Shock.

Předkládaná práce je v následujících kapitolách blíže zaměřena na popis programů ABAQUS/Explicit a ANSYS LS DYNA. Popis těchto dvou programů byl vybrán z důvodu jejich nejčastějšího užití pro simulaci rychlých dynamických dějů.

7.1 Abaqus/Explicit

V názvu ABAQUS je zahrnuta celá řada produktů od společnosti Simulia. Všechny produkty jsou určeny pro řešení úloh na principu MKP, viz obr. 23. Součástí programu ABAQUS jsou například moduly ABAQUS/CAE, ABAQUS/STANDARD, ABAQUS/EXPLICIT a další doplňky. Pomocí těchto modulů lze pokrýt celou řadu průmyslových aplikací (zatížení vozidel, dynamické vibrace, nelineární statika, tepelná analýza)[35][36].

Modul Abaqus/Explicit slouží k výpočtům rázových a dynamických úloh. Jak z názvu vyplývá, řešič tohoto programu využívá explicitní algoritmus, který byl popsán v kapitole 6.2. Explicitní řešič se také používá pro rozsáhlé modely, které mají velký počet elementů a pro nelineární úlohy s velkým počtem kontaktů [35] [37].

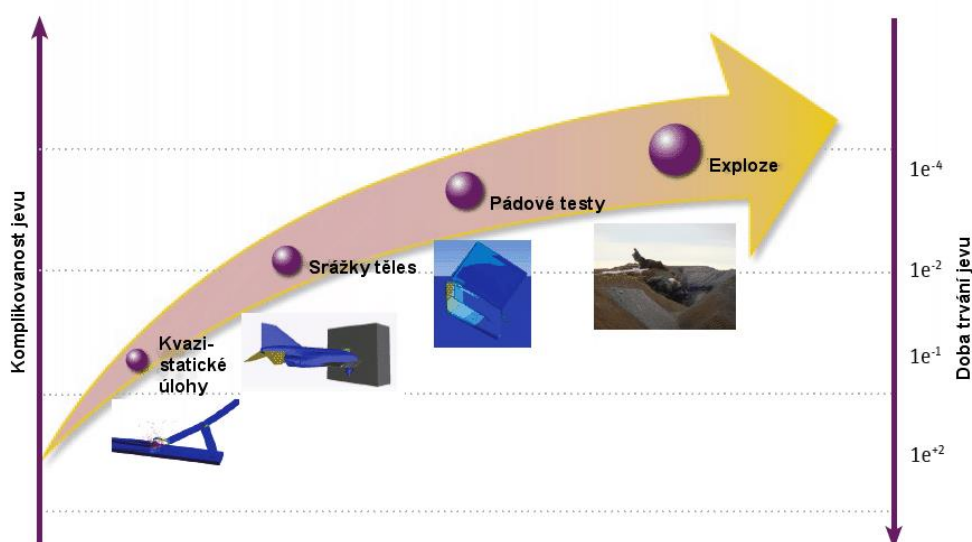


Obr. 23 Model cestujícího při výpočtu bočního nárazu vozidla [38]

Simulace v tomto programu je nastavena pomocí klíčových slov, které definují funkci simulace. Prostředí ABAQUS umožňuje uživateli snadno ovládat tvorbu sítě, určit typ prvku, který v simulaci používá. Jako výhodu lze považovat to, že si uživatel může nastavit velmi detailní model pro popis různých druhů chování. Nevýhodou je nutnost jistých znalostí týkajících se simulačních programů, tj. numerické metody v MKP, pružnost a pevnost, nelineární mechanika atd. [37].

7.2 ANSYS LS DYNA

Program ANSYS je nelineární, multifyzikální simulační prostředí, kde je možno simulovat strukturální nebo termodynamickou analýzu, proudění tekutin, elektrostatické a elektromagnetické pole i akustické analýzy. ANSYS od počátku svého vývoje patří mezi špičku v oboru využívající metod konečných prvků. Tento program je hojně využíván v oborech jako energetika, strojírenství, automobilový průmysl a jiné [39].



Obr. 24 Možnosti využití ANSYS LS-DYNA [40]

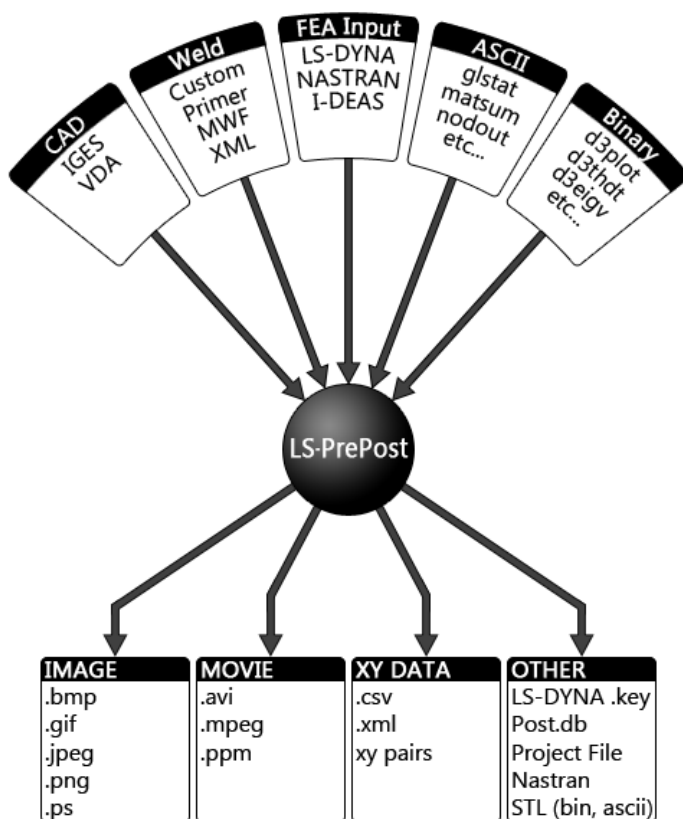
Pro vysokorychlostní děje je využíváno nástavby programu LS DYNA. Program LS DYNA je primárně určen pro simulování silně nelineárních fyzikálních dějů, při nichž je dosahováno velkých deformací materiálu ve velmi krátkém časovém okamžiku (řádově mikrosekundy). Jako příklady lze uvést z oblasti automobilové techniky simulace airbagů a „crash“ testy.

Vzhledem k zadání dizertační práce a dostupných testovacích zařízení budou simulace Hopkinsonova testu z výše uvedených důvodů prováděny právě v prostředí LS DYNA.

K zpracování obdržených dat ze simulace je využito taktéž klasického prostředí ANSYS nebo lze využít program LS-PrePost. Jako postprocesor je schopen vykreslit tvarové nebo napěťové charakteristiky do různých typů souborů. Jako příklad lze uvést získaný soubor s příponou „.cvs“, se kterým lze pak pracovat

v běžně dostupném programu MS EXCEL. Dále je schopen exportovat data do textových souborů (přípona „txt“) atd. Program LS-PrePost je součástí instalačního balíčku ANSYS nebo ho lze běžně stáhnout z webových stránek výrobce.

LS-PrePost lze využít také pro přípravu dat před vlastní simulací, tj. jako preprocessor. Typy souborů, se kterými lze pracovat, nebo které je možno vytvořit v tomto programu, jsou na obr. 25. Z hlediska uživatelského prostředí, tj. zadávání potřebných vstupních údajů, není moc používán. Je to z důvodu méně intuitivního uživatelského prostředí například oproti programu ANSYS Workbench.



Obr. 25 Možnosti použití programu LS-PrePost [41]

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V návaznosti na níže popsané experimenty jsou zde pro lepší orientaci opětovně uvedeny cíle dizertační práce:

- Vývoj a ověření navrženého přípravku pro tahovou variantu při Hopkinsonově testu.
- Provedení a vyhodnocení fyzikálních experimentů na vybraném materiálu.
- Provedení numerické simulace tahového testu na Hopkinsonově zařízení.
- Porovnání a zhodnocení výsledků.

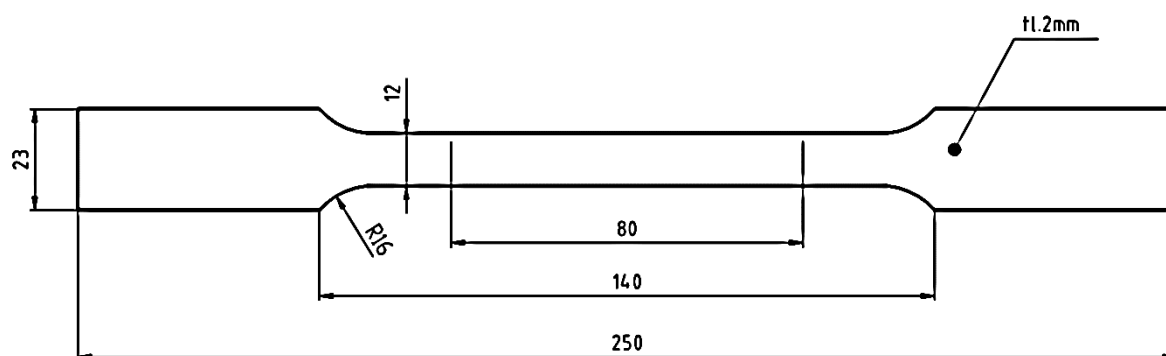
V současné době má Odbor technologie tváření kovů a plastů na ÚST FSI VUT v Brně k dispozici měřicí zařízení pro testování materiálů, na něž výrazně působí rychlost deformace. Jsou to Hopkinsonův test pro dynamické kompresní a tahové zkoušky (SHP(T)BT – Split Hopkinson Pressure or Tensile Bar Test) a Taylorův test (TAT – Taylor Anvil Test). Přípravek navržený v rámci řešení dizertační práce a vybraná ocel, byly testovány na výše uvedeném Hopkinsonově zařízení.

Předmětný materiál (ocel dle ČSN 41 7240) byl vybrán na základě spolupráce při řešení standardního projektu FSI-11-26. Tento projekt se zabýval vývojem a konstrukcí teplosměnných solárních panelů vyrobených z výše uvedeného materiálu.

8.1 Vstupní testy materiálu

Podle uvedeného rozdělení korozivzdorných ocelí v kapitole 5, byla vybrána jako testovací materiál korozivzdorná austenitická chrom niklová ocel dle ČSN 41 7240 (AISI 304, 1.4301, X5CrNi18-8) [18]. Používá se k výrobě běžných produktů pro gastronomická zařízení, externí architekturu, vnější konstrukce atd. Použití této oceli lze až do teploty 450 °C [29].

K popsání správného materiálového modelu oceli dle ČSN 41 7240, který je zadáván do numerické simulace, bylo nutné provést vstupní tahové zkoušky za kvazistatických podmínek. Zkoušky byly provedeny na trhačím stroji ZD40. Tento stroj má vestavěný inkrementální délkový snímač polohy příčnicku a snímač síly. Vyhodnocení testu bylo prováděno pomocí programu M-test, verze 1.7. Program automaticky vyhodnocuje průběh síly v závislosti na posuvu příčnicku. Z takto zaznamenaných průběhů lze určit křivky deformačního napětí na deformaci, viz obr. 27. Z provedených kvazistatických tahových zkoušek byly zjištěny hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti pro zvolený materiál. Uvedené výsledky uvádí tabulka 7.

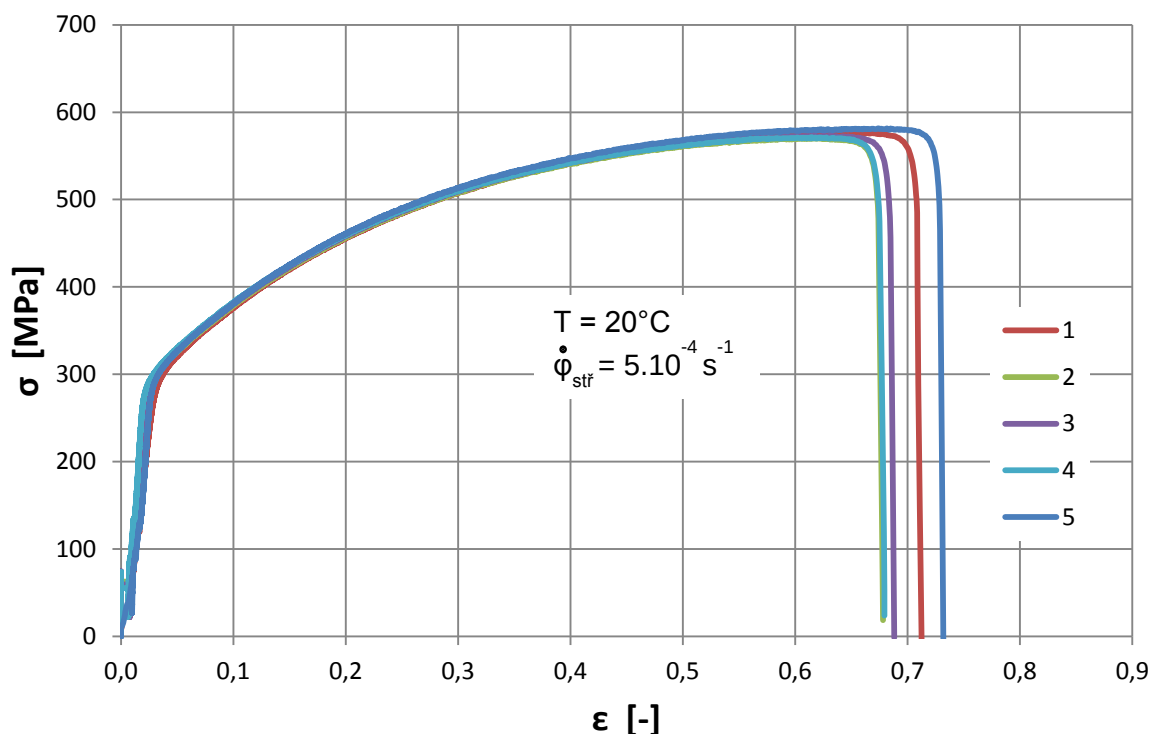


Obr. 26 Rozměry vzorku pro statickou zkoušku

Tabulka 7: Výsledky statických tahových zkoušek oceli dle ČSN 41 7240

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	L_0 [mm]	L_u [mm]	A_{80} [%]	V_t [mm/min]	V_{t1} [MPa/s]
1	302,41	587,40	80	118	47,50	3,12	7,97
2	297,03	575,15	80	118	47,50	2,38	7,87
3	302,19	588,02	80	118	47,50	2,31	7,95
4	299,98	581,33	80	118	47,50	2,04	7,81
5	299,68	581,44	80	119	48,75	2,23	7,82
průměr	300,23	582,67	80	118,20	47,75	2,42	7,88

Po provedení transformace grafu závislosti napětí – deformace do logaritmických souřadnic, byla určena i hodnota exponentu deformačního zpevnění $n = 0,48$.



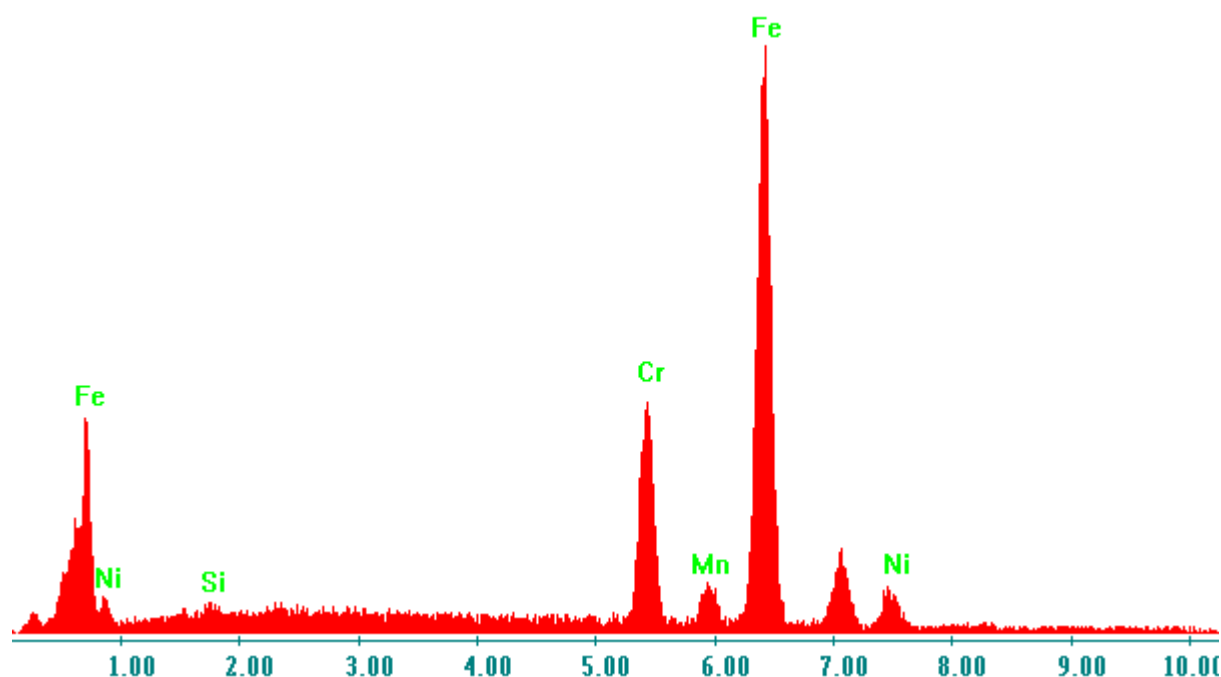
Obr. 27 Graf závislosti smluvního napětí na deformaci pro materiál ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm

U zvoleného materiálu bylo dále ověřeno jeho chemické složení pomocí energiově disperzní spektroskopie (dále jen EDS) provedené na rastrovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 detektorem EDX v laboratoři Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně, odboru strukturní a fázové analýzy. Výsledné chemické složení dané oceli, které uvádí tabulka 8, bylo stanoveno na základě pěti měření. Důvodem je, že EDS analýzou lze určit chemické složení pouze z velmi malé oblasti.

Tabulka 8: Výsledky EDS analýzy oceli dle ČSN 41 7240

Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
0,66	17,42	1,45	71,94	8,53

Výsledky chemického složení a mechanického chování byly porovnávány se všeobecně platnými hodnotami, které udávají tabulka 4 a tabulka 5. Obr. 28 udává grafický přehled prvků, které jsou charakteristické pro tuto ocel. Chybí zde uhlík, typický prvek uváděný u korozivzdorných ocelí. Jeho absence je dána z důvodu přesnosti EDS analýzy. Přesnost EDS analýzy je řádově v desetinách procent, a tudíž procento obsahu uhlíku nelze přesně stanovit.



Obr. 28 EDS analýza použitého oceli dle ČSN 41 7240

8.2 Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení

Dříve než byl navržen a vyroben přípravek pro tahové zkoušky pomocí Hopkinsonova zařízení, bylo nutné ověřit správnou činnost tohoto zařízení. Pro ověřovací experimenty byla použita hliníková slitina AA 5083, pro kterou se v dané době prováděly jiné experimenty, a byla právě k dispozici. Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení spočívalo v provedení dynamického kompresního testu a jeho srovnání s numerickou simulací. Hlavním cílem bylo ověřit, zda kapacitní snímače používané na tomto zařízení pracují správně.

Jak již bylo naznačeno výše, hliníková slitina AA 5083 byla vybrána na základě již předešlých testů, ale hlavně proto, že tato slitina byla jako hlavní testovací materiál v juniorském projektu s označením FSI-J-12-1818, kde autor této dizertační práce byl současně navrhovatelem tohoto projektu. Výše zmíněný juniorský projekt se zabýval ověřením Hopkinsonova kompresního testu numerickou simulací, ale také i ověřením válcových kapacitních snímačů použitých na Hopkinsonově zařízení, které se nachází na FSI VUT v Brně. Juniorský projekt byl úspěšně obhájen a výsledky byly publikovány na mezinárodní konferenci METAL 2013 [43].

Ověření správné funkčnosti zařízení bylo provedeno na základě porovnání výsledků získaných z experimentů a výsledků získaných počítačovou simulací.

Porovnávány byly:

a) Charakteristické rozměry vzorku (průměr a délka) po deformaci.

Zjištěné výsledky uvádí tabulka 9. Odchylka skutečných rozměrů od rozměrů získaných simulací nepřesahuje 5 %, což ze statistického hlediska je chyba zanedbatelná a lze říci, že v tomto směru zařízení pracuje správně.

b) Průběhy získaných křivek deformačního napětí vzorku na deformaci, které jsou uvedeny na obr. 29 až obr. 32.

Experimentální křivky závislosti napětí na deformaci byly stanoveny standardní metodikou vyhodnocování Hopkinsonova testu, která je popsána v kapitole 4.2. Křivka získaná ze simulace byla stanovena na základě vyhodnocení časové změny tvaru vzorku. V případě odladění skoků u experimentálních křivek, vzniklých v důsledku okolních negativních vlivů - křivka označená jako "experiment filtration", je patrné, že křivky se sobě blíží. To dokazuje shodu experimentu s počítačovou simulací, a tudíž lze konstatovat, že dané zařízení pracuje správně.

Rozdílné hodnoty konečných (dosažených) deformací zobrazených na obr. 29 až obr. 32 jsou způsobeny rozdílnou dobou trvání odraženého a prošlého pulsu. Neboť, jak již bylo řečeno výše, křivka závislosti napětí na deformaci získaná pomocí numerické simulace je stanovena z časové změny tvaru vzorku. U experimentů tohle postihnout nelze, proto odražený a prošlý puls nemá na vyhodnocení prostřednictvím numerické simulace žádný vliv.

Vzorky o průměru 9 mm a délce 9 mm použité při testech jsou na obr. 15. Dále pro vyhodnocení tohoto Hopkinsonova testu byla použita standardní metodika SHPB testu.

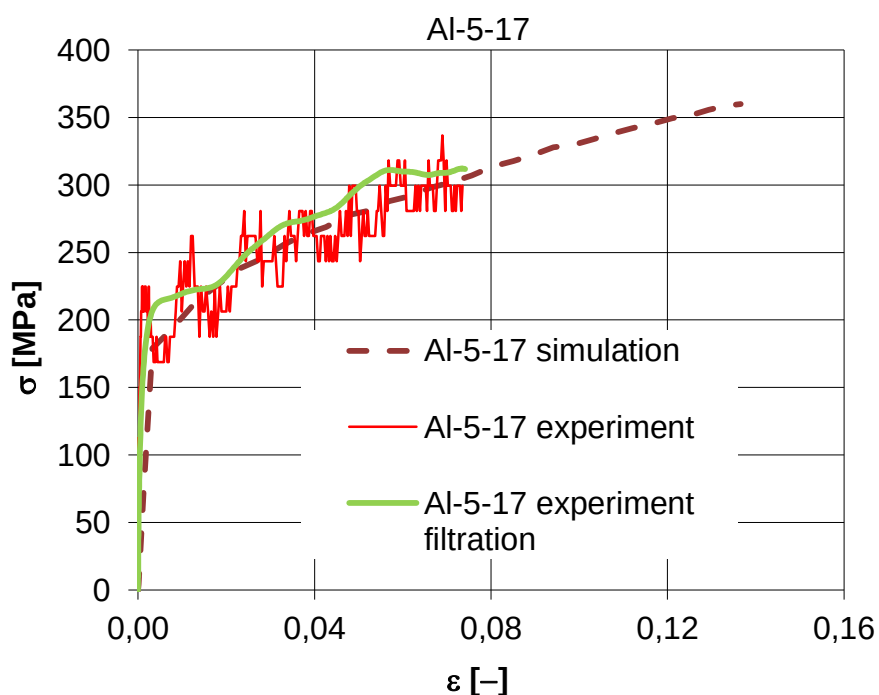
Pro numerickou simulaci byl použit program ANSYS LS DYNA. Je to program, který patří k nejpoužívanějším nástrojům pro dynamické rázové děje (nárazy, průstřely atd.). Pro popis chování předmětného materiálu v numerické simulaci byla použita Johnson-Cookova konstitutivní rovnice (3). Parametry této rovnice pro slitinu AA 5083 udává tabulka 10. Parametry Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice byly použity z [42].

Tabulka 9: Srovnání experimentu a simulace pro slitinu AA 5083 [43]

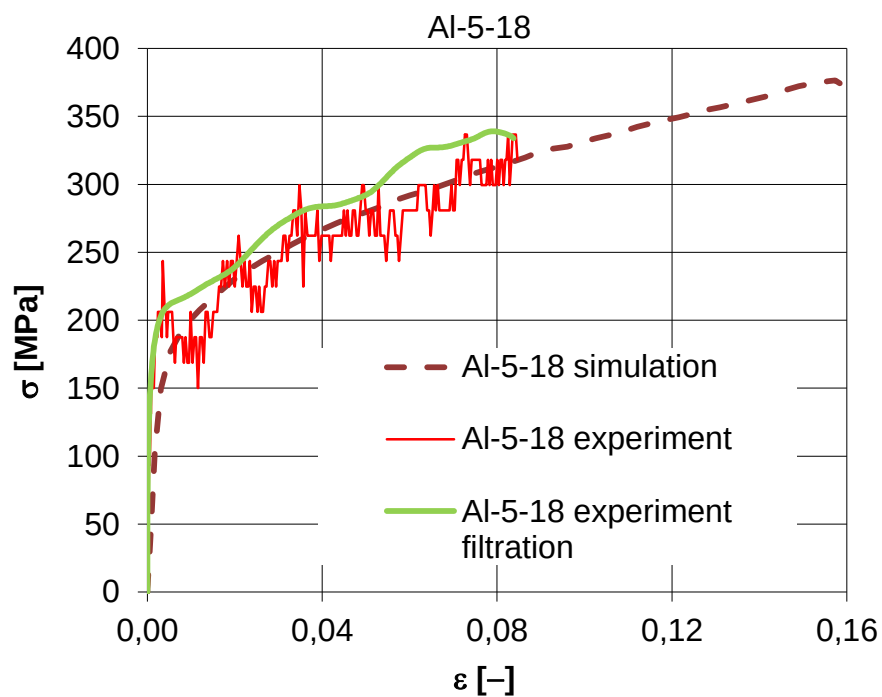
vzorky slitiny AA 5083		Al-5-17	Al-5-18	Al-5-19	Al-5-20
dopadová rychlost impaktoru [m/s]		22,96	26,21	28,20	29,30
konečná délka [mm]	experiment	8,03	7,73	7,58	7,45
	simulace	7,81	7,61	7,48	7,42
	chyba [%]	2,74	1,55	1,32	0,40
konečný průměr [mm]	experiment	9,57	9,83	9,84	9,92
	simulace	9,62	9,78	9,87	9,91
	chyba [%]	0,52	-0,51	0,30	-0,10

Tabulka 10: Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro slitinu AA 5083 [42]

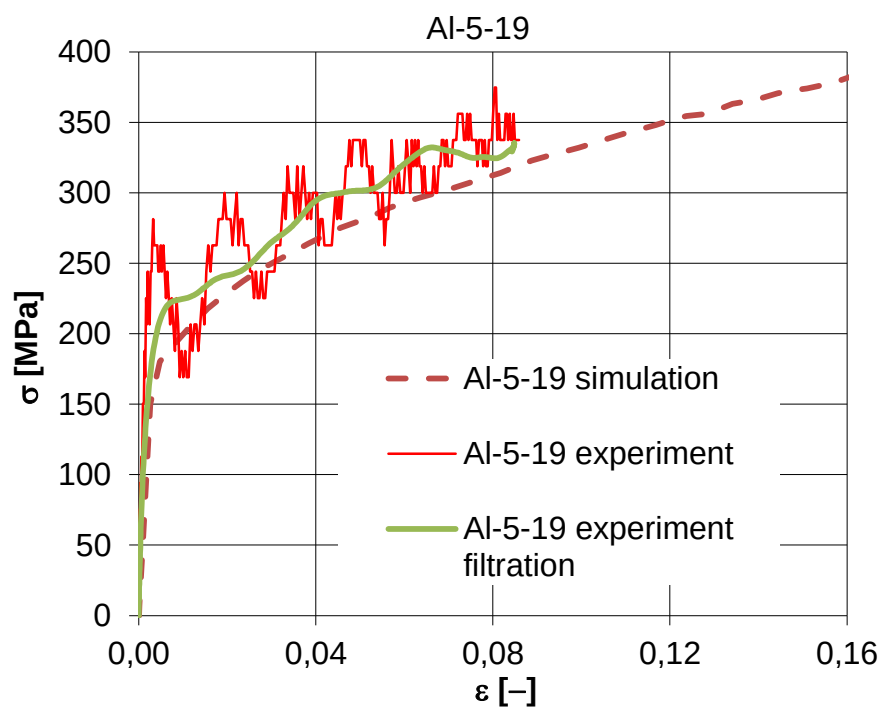
	σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]
AA 5083	167	596	0,001	0,551	0,859



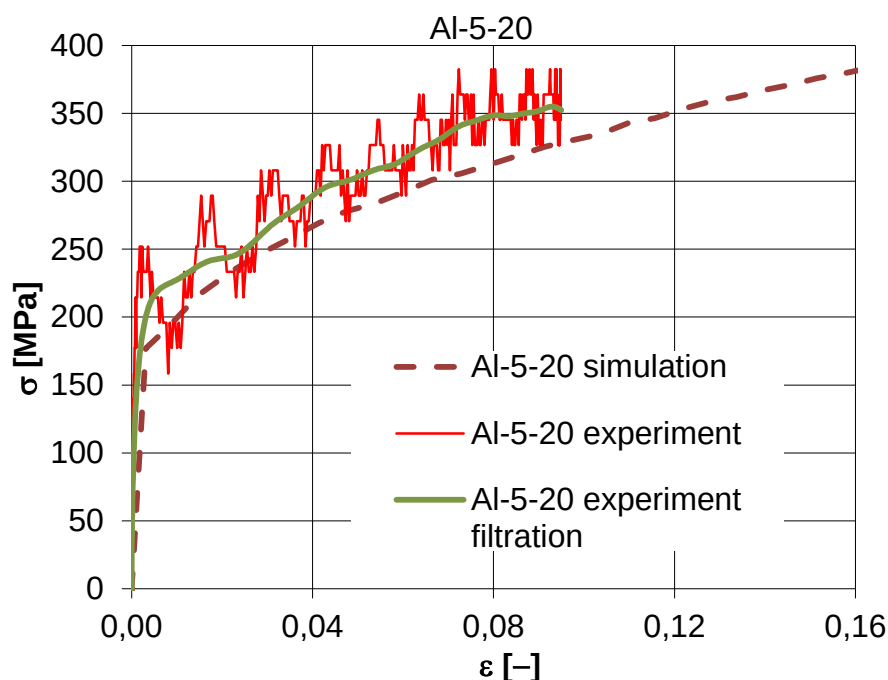
Obr. 29 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-17 [43]



Obr. 30 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-18 [43]



Obr. 31 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-19 [43]



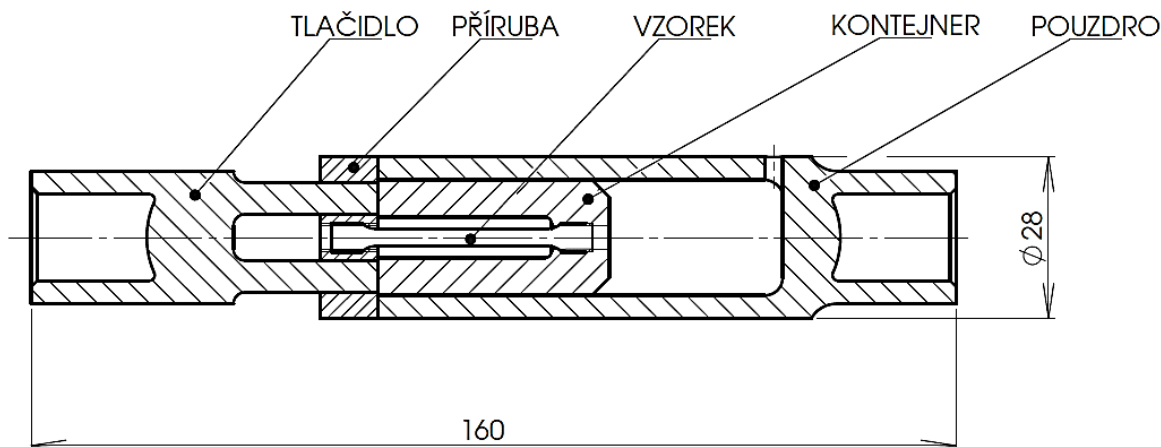
Obr. 32 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-20 [43]

8.3 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – válcové vzorky

Jak již bylo řečeno, standardním Hopkinsonovým testem jsou zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu při kompresním rázovém zatížení. Od roku 2007 probíhá na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně vývoj přípravku, který by se dal na daném zařízení (Hopkinsonově zařízení) využít pro dynamické tahové zkoušky.

Úprava Hopkinsonova zařízení si kladla za úkol navrhnout takové technické řešení, které by podstatně rozšířilo možnosti stávajícího stavu a kromě zjišťování mechanických vlastností materiálu v tlaku by se dané zařízení dalo využívat i pro zjišťování chování materiálu v tahu při rázovém zatížení.

Technické řešení navrženého přípravku, viz obr. 33, je tvořeno trubkovým pouzdrem, které má na jednom konci odnímatelnou přírubu. Odnímatelná příruba je opatřena otvory určenými pro průchod prstů tlačidla nebo upravené vstupní tyče. Příruba je opatřena konstrukční úpravou k upevnění jednoho konce vzorku. K upnutí druhého konce vzorku slouží válcový kontejner, který je suvně uložený v pouzdře. Druhý konec pouzdra je upravený k připojení na konec výstupní tyče. Příruba a kontejner jsou opatřeny otvory s vnitřním závitem, do kterých je vzorek upnut. Tato konstrukce slouží pouze k dynamickému testování válcových vzorků. Navržená úprava byla v roce 2010 přijata Úřadem průmyslového vlastnictví jako užitný vzor č. 21472 [44]. Schéma navrženého přípravku – užitého vzoru je na obr. 33.



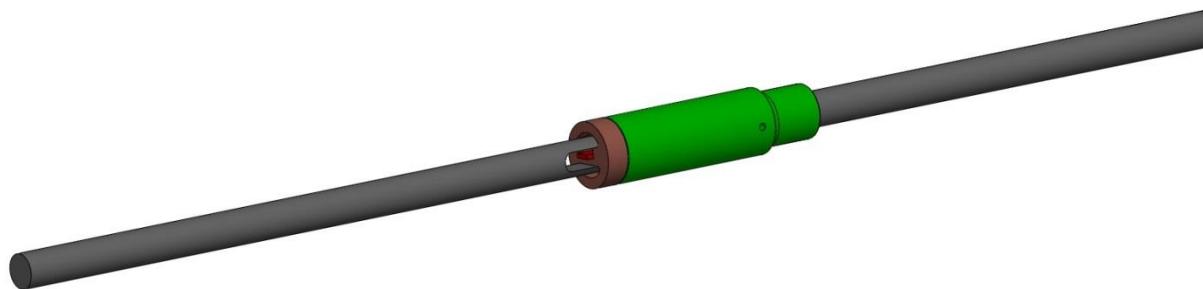
Obr. 33 Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu pro válcové vzorky [44]

8.4 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – ploché vzorky

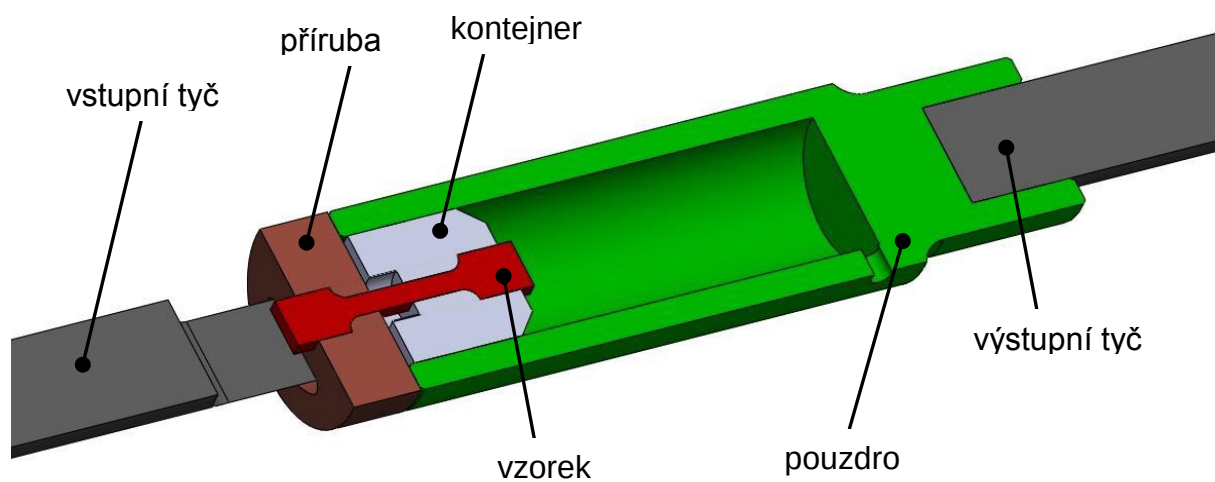
Nevýhodou předcházející úpravy přípravku na obr. 33 je, že v něm lze testovat pouze vzorky kruhového průřezu opatřených na koncích závitem. Další nevýhodou je technická a finanční náročnost výroby válcových vzorků. Postup výroby válcových vzorků popisuje například Lino [45]. Cílem bylo tedy navrhnout přípravek, který by rozšířil možnost testování i na ploché vzorky.

Navržený přípravek určený k dynamickému testování plochých vzorků, viz obr. 35 a obr. 36, vychází z předešlé koncepce, tj. užitého vzoru č. 21472. Podstata navrženého přípravku spočívá v tom, že v přírubě a v kontejneru je vytvořený obdélníkový průchod, který slouží ke vložení vzorku do přípravku. Dno průchodu leží od společné osy příruby a kontejneru ve vzdálenosti rovné polovině tloušťky vzorku. K přenesení tahového namáhání vzorku slouží symetrická vybrání, která jsou na kontejneru a přírubě, a slouží k uložení konců vzorku [46].

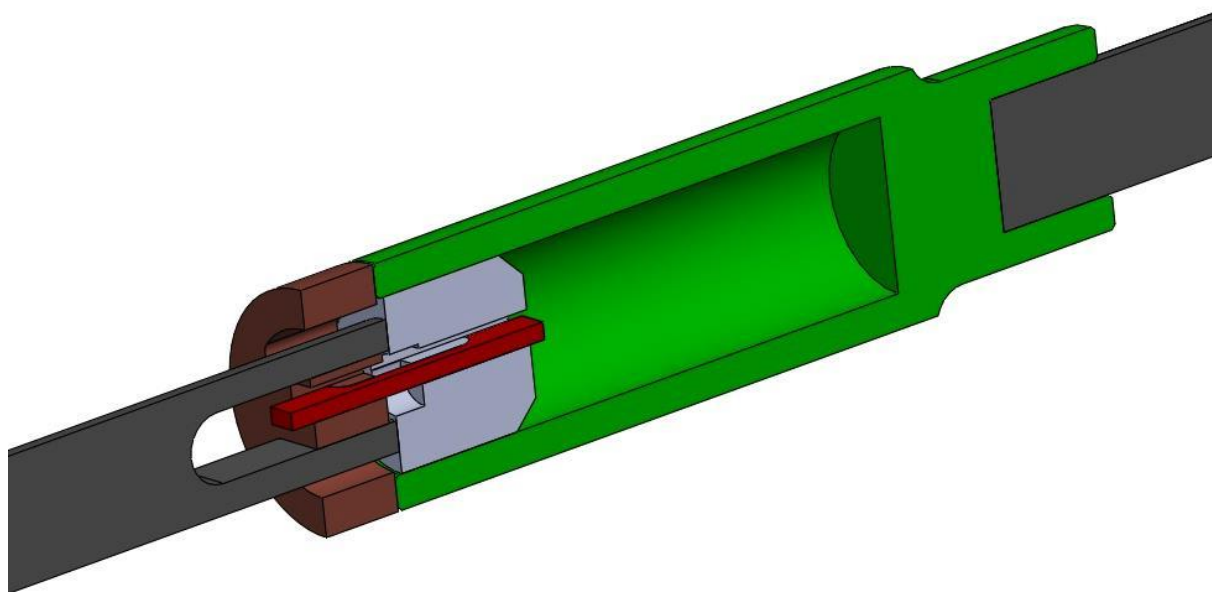
Úprava tahového přípravku navrženého pro ploché vzorky byla přijata Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor č. 23703 [46]. Navržený přípravek je vyroben z oceli dle ČSN 41 3240 a zušlechtěn na tvrdost 52 HRC. Materiálový list udává příloha č. 3.



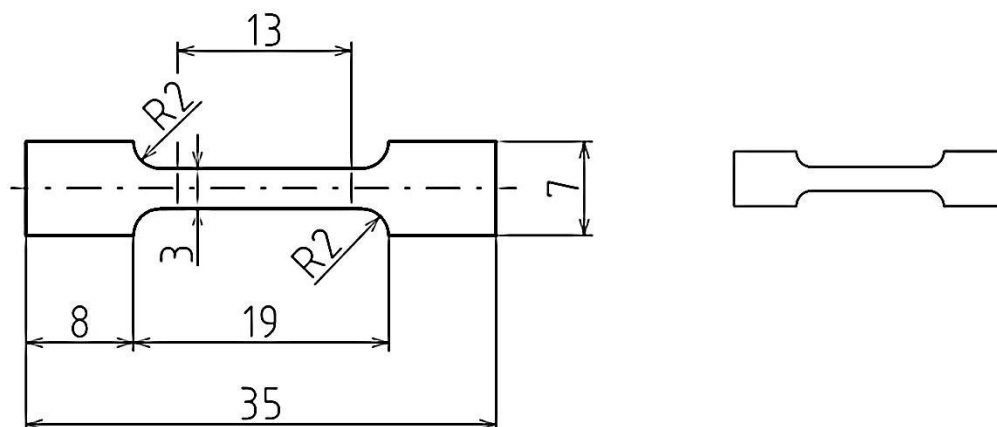
Obr. 34 Upevnění přípravku mezi vstupní a výstupní tyčí



Obr. 35 Detail upnutí plochého vzorku v přípravku



Obr. 36 Osový řez sestaveného přípravku pootočený o 90°



Obr. 37 Náčrtek vzorku pro Hopkinsonův tahový test (vlevo) a v měřítku 1:1 (vpravo)

Takto navržený přípravek k testování plochých vzorků byl ověřován numerickou simulací a prováděnými experimenty. Jako testovaný materiál vzorků pro ověření funkčnosti přípravku byla zvolena korozivzdorná chrom niklová austenitická ocel dle ČSN 41 7240. Vzorky byly vyrobeny z plechu tloušťky 2 mm. Navržený tvar vzorku vychází z podobnosti z klasické (statické) tahové zkoušky. Rozměry plochého vzorku byly stanoveny z předchozí zkušenosti se vzorky válcovými, tzn bylo nutné uvažovat s navrženou konstrukční úpravou Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky. Výroba vzorků byla provedena pomocí laseru, který se nachází na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Laserové řezání bylo zvoleno z důvodu snadné dostupnosti a ceny pro autora předkládané práce. I když autor této práce byl navrhovatel dvou juniorských projektů VUT, tak náklady spojené s jiným druhem výroby těchto vzorků by přesáhly finanční prostředky těchto projektů.

Předmětný materiál byl zvolen z důvodů snadné cenové dostupnosti a také proto, že autor práce se aktivně podílel na řešení projektu FSI-11-26 zabývajícím se tímto materiálem.

8.5 Numerická simulace tahového testu s úpravou pro ploché vzorky

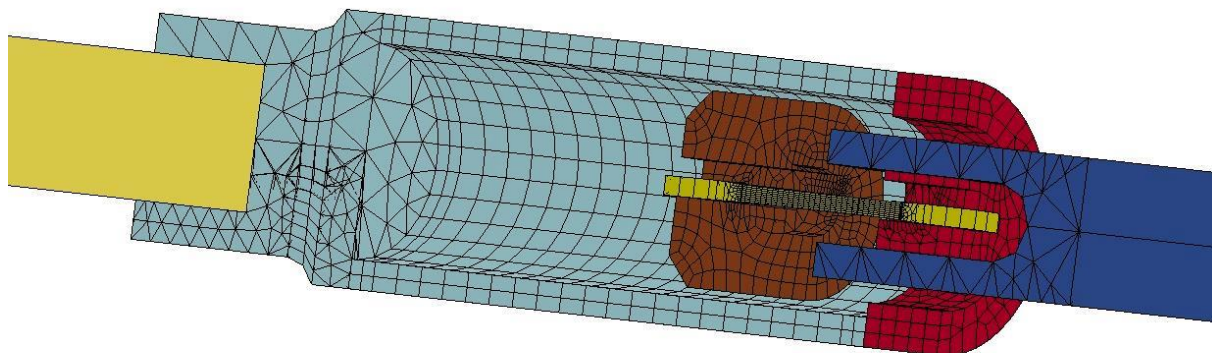
Hlavním cílem numerické simulace tahového přípravku pro testování plochých vzorků bylo nezávislé porovnání s výsledky získanými standardní metodikou Hopkinsonova testu.

Pro numerickou simulaci byla použita školní verze programu ANSYS 14.0, kterou lze bezplatně stáhnout na fakultních stránkách VUT v Brně. Instalační soubor programu ANSYS 14.0 obsahuje různé moduly, které je možné používat při výpočtech statických nebo dynamických úloh, simulace proudění tekutin, přestup tepla. Využití lze také najít v simulaci elektrických obvodů a jejich veličin a v mnoha dalších aplikacích. Jedinou nevýhodou této školní licence je, že využívá pouze jedno jádro procesoru, tj. nelze využít dostupný výkon vícejádrového procesoru počítače a tím snížit výpočtový čas úlohy.

Aby bylo možné provést numerickou simulaci, bylo nutné nejprve vytvořit geometrický model celé sestavy. K vytvoření modelu sestavy byl použit

program SolidWorks 2011 a výsledkem jsou obr. 34, obr. 35 a obr. 36. Dalším krokem bylo uložení sestavy do příslušného datového formátu, tj. formát souboru s příponou „IGS“, se kterým lze dále pracovat nejen v programu ANSYS. Postup numerické simulace navrženého přípravku sestával ze tří etap.

V první etapě byl využit program s názvem ANSYS Workbench, kde bylo využito modulu Explicit Dynamic (LS-DYNA Export). Jak z názvu vyplývá, tento modul je používán k simulaci rychlých dynamických dějů využívajících explicitní způsob řešení. Zde je proveden tzv. precessing, jehož cílem je provést všechny potřebné kroky, aby bylo možné provést výpočet. V této etapě byly přiřazeny materiálové modely všem dílům sestavy. Dále bylo provedeno vytvoření („meshování“) konečnoprvkové sítě celé sestavy, nastavení počátečních a okrajových podmínek nutných pro výpočet. Takto nastavený model určený pro výpočet je na obr. 38. Po dokončení první etapy byl vygenerován textový soubor s příponou „k“, který je pak použit ve druhé etapě řešení.



Obr. 38 Osový řez přípravku zobrazený v prostředí LS PrePost

Všechny součásti sestavy byly nadefinovány jako dokonale tuhé (rigid), kromě vzorku, který byl definován jako pružný (flexible). Pro dokonale tuhé součásti tedy stačí pouze definovat modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo a hustotu materiálu, tedy hodnoty, které udává tabulka 11.

Tabulka 11 : Fyzikální vlastnosti navrženého přípravku včetně tyčí a impaktoru

	E [MPa]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
ČSN 41 3240	$2,12 \cdot 10^5$	0,3	7800

Materiálový model vzorku byl nadefinován pomocí Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice (3). Podrobně je tato rovnice popsána v kapitole 2.3. Parametry této rovnice byly stanoveny pomocí numerické simulace. V simulaci byly porovnávány konečné rozměry vzorků po provedení fyzikálního experimentu s rozměry získanými z numerické simulace. Porovnávány rozměry byly: konečná délka vzorku, konečná

tloušťka vzorku a šířka v měrné části vzorku. Takto získaný materiálový model pak mohl být použit k nadefinování materiálových vlastností vzorku.

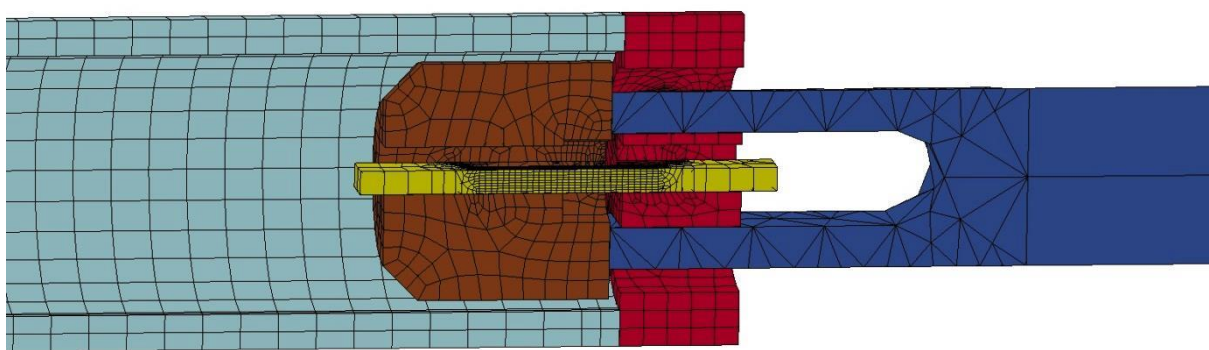
Získané parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240 udává tabulka 12.

Tabulka 12 : Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240

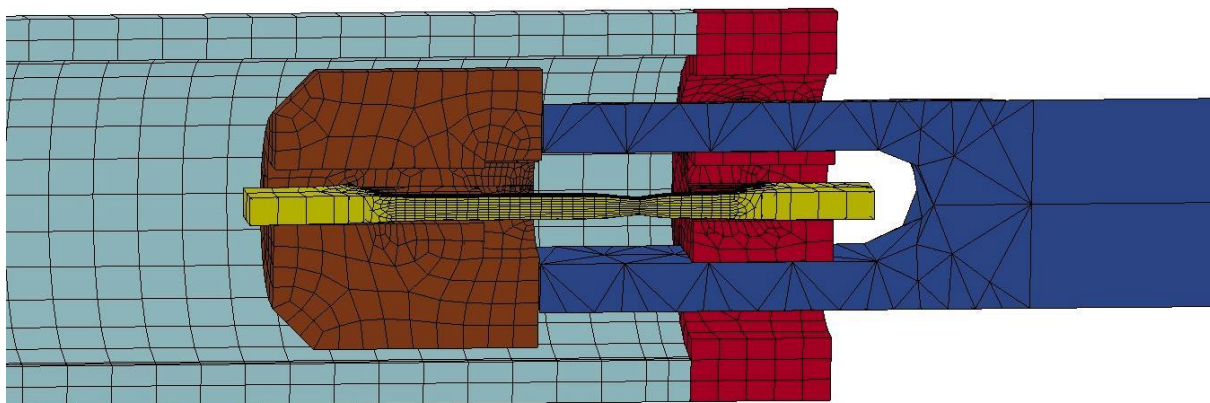
	σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]	E [MPa]	μ [-]
ČSN 41 7240	302	1100	0,07	0,488	0,95	$1,93 \cdot 10^5$	0,3

Ve druhé etapě řešení, tzv. processingu, je využíváno souboru s příponou „k“. Tento soubor obsahuje všechny informace nutné k výpočtu zapsané v textovém souboru. Zde je využíváno programu s názvem LS-DYNA Solver, který pracuje s výše uvedeným textovým souborem. Výsledkem druhé etapy je výpočet (zpracování) textového souboru s příponou „k“. Po dokončení výpočtu jsou získané výsledky zpracovány ve třetí etapě.

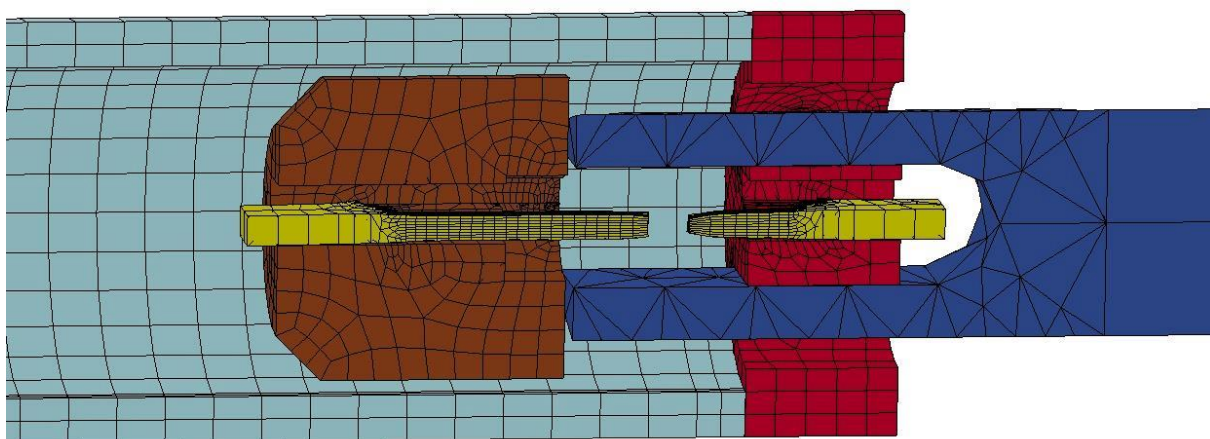
Třetí etapa, tzv. postprocessing, spočívá v zobrazení a analýze získaných výsledků například způsobem, který je na obr. 39 až obr. 45. K tomuto účelu byl použit program LS-PrePost. Tento program je také součástí instalačního souboru ANSYS 14.0 nebo je ho možné bezplatně stáhnout z webových stránek (<http://www.lstc.com>), pokud chce uživatel pracovat s aktuální verzí tohoto programu. Pomocí tohoto programu lze například zobrazit průběh vznikající deformace na vzorku během experimentu. Tento proces je stručně znázorněn na obr. 39 až obr. 41. Na obrázcích je vyobrazeno, jak dochází na vzorku k homogenní plastické deformaci vzorku až do meze pevnosti materiálu, tj. po tvorbu krčku.



Obr. 39 Osový řez tahovým přípravkem v počátečním stavu



Obr. 40 Osový řez tahovým přípravkem během experimentu

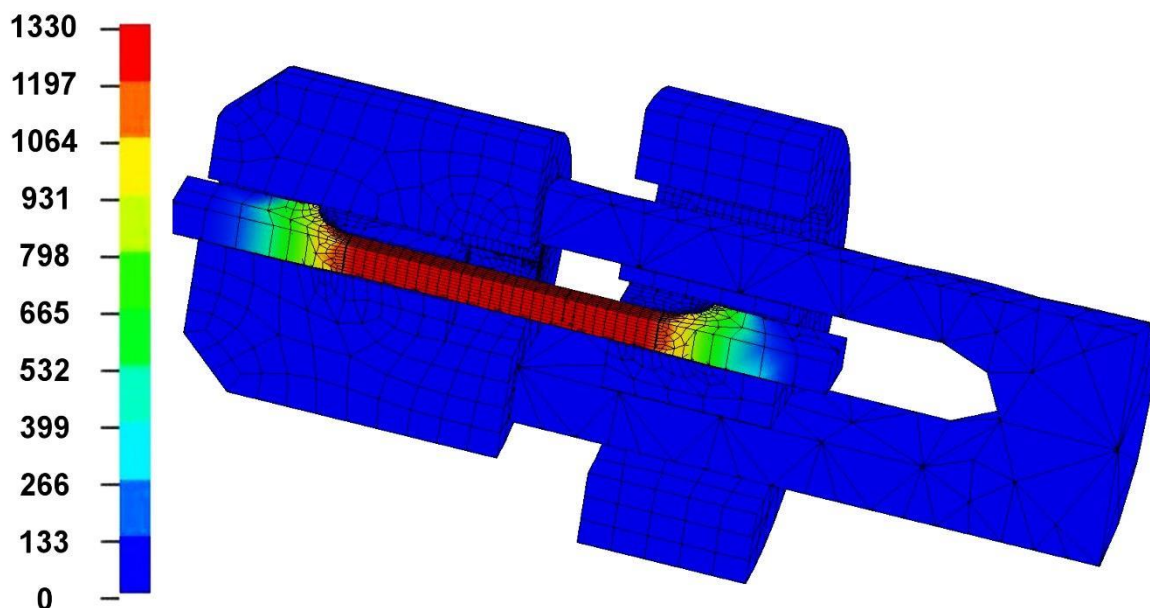


Obr. 41 Osový řez tahovým přípravkem po skončení zatěžování

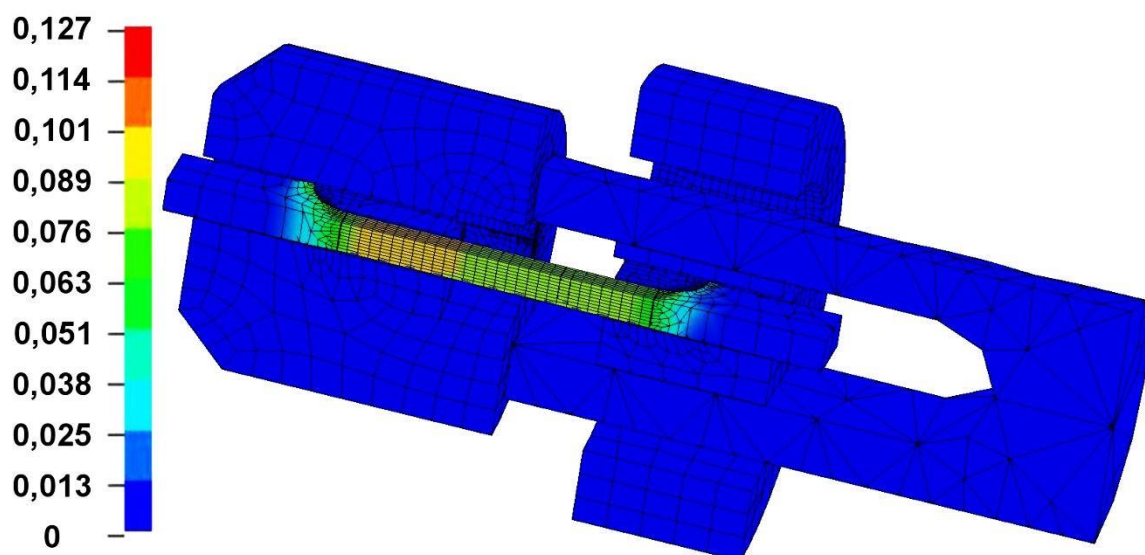
Pokud je nutné zjišťovat okamžik, kdy dochází u vzorku k přetržení, je nezbytné mít správně nastaven model porušení materiálu. V tomto případě byl model porušení nastaven podle Johnson-Cookova kritéria. Je nutné rozlišovat Johnson-Cookovu konstitutivní rovnici a kritérium porušení. Toto kritérium uvádí například Buchar [47].

Při vyhodnocení Hopkinsonova testu je zaznamenáván pouze počáteční rozvoj plastické deformace materiálu vzorku, tzn., že jsou zaznamenány (změřeny) počáteční napěťové pulsy, odpovídající úvodní části rozvoje křivky napětí deformace, viz obr. 46. Proto vyhodnocení výsledků z numerické simulace bylo zaměřeno na tento počáteční rozvoj.

Na obr. 42 a obr. 43 je zachyceno skutečné efektivní napětí a efektivní plastická deformace vzorku právě v okamžiku průchodu napěťového pulsu. V tomto okamžiku dochází ke konečnému dosednutí vzorku mezi přírubou a kontejnerem.

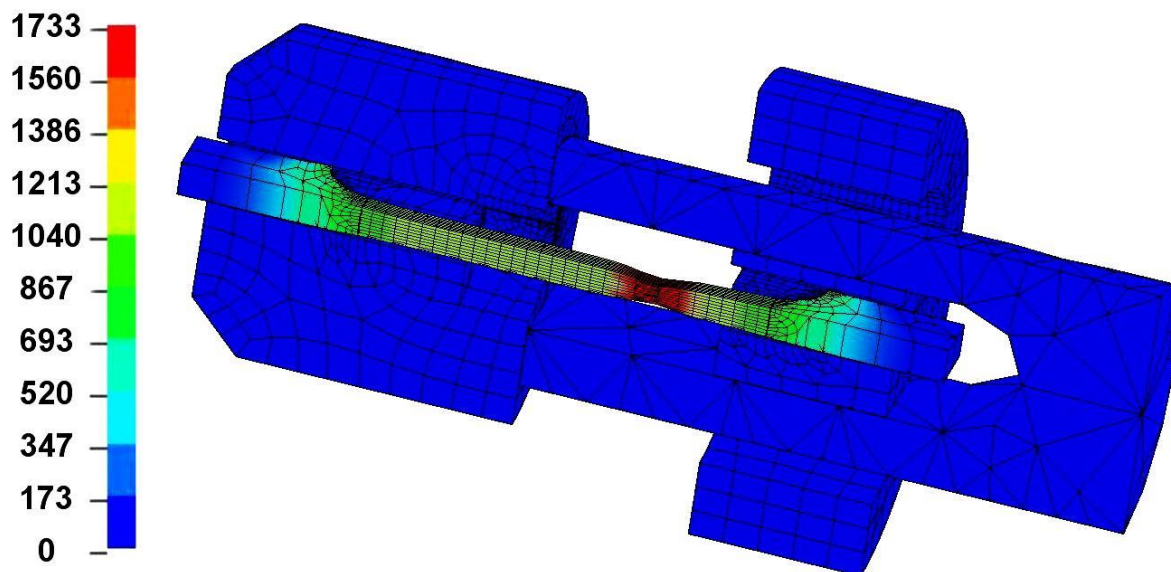


Obr. 42 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

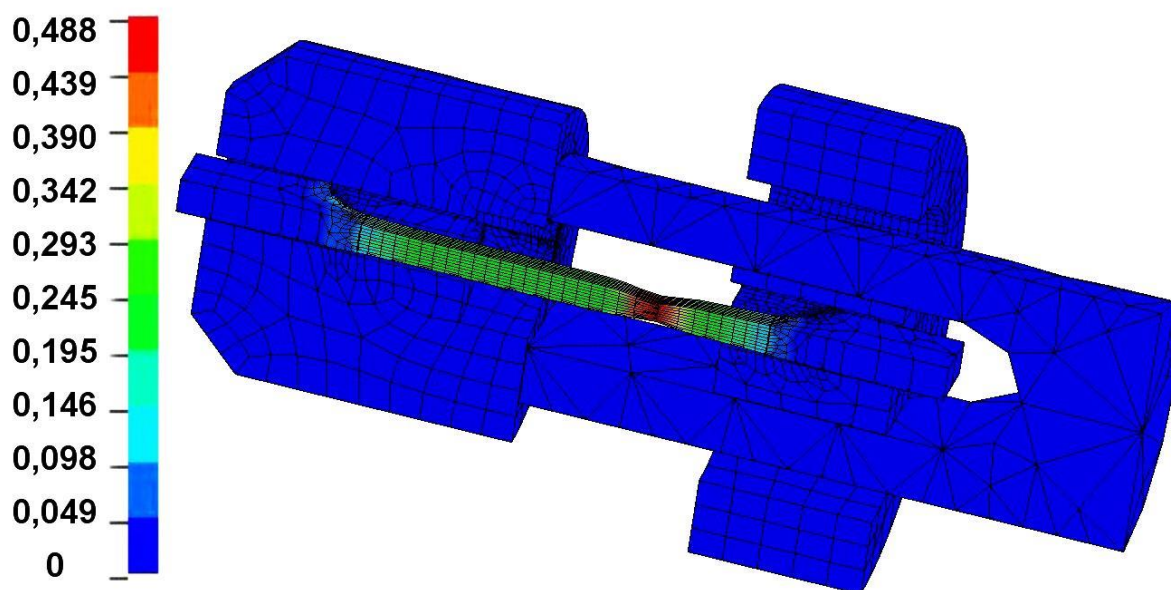


Obr. 43 Skutečná efektivní plastická deformace po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

Rozložení skutečného efektivního napětí a skutečné efektivní deformace v okamžiku vzniku krčku je zobrazeno na obr. 44 a obr. 45.



Obr. 44 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s



Obr. 45 Skutečná efektivní plastická deformace v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

Správnost výpočtu v rámci simulace daného procesu dokumentuje porovnání obr. 45 a obr. 52, kde na obr. 52 je zachycen skutečný testovaný vzorek po přetržení.

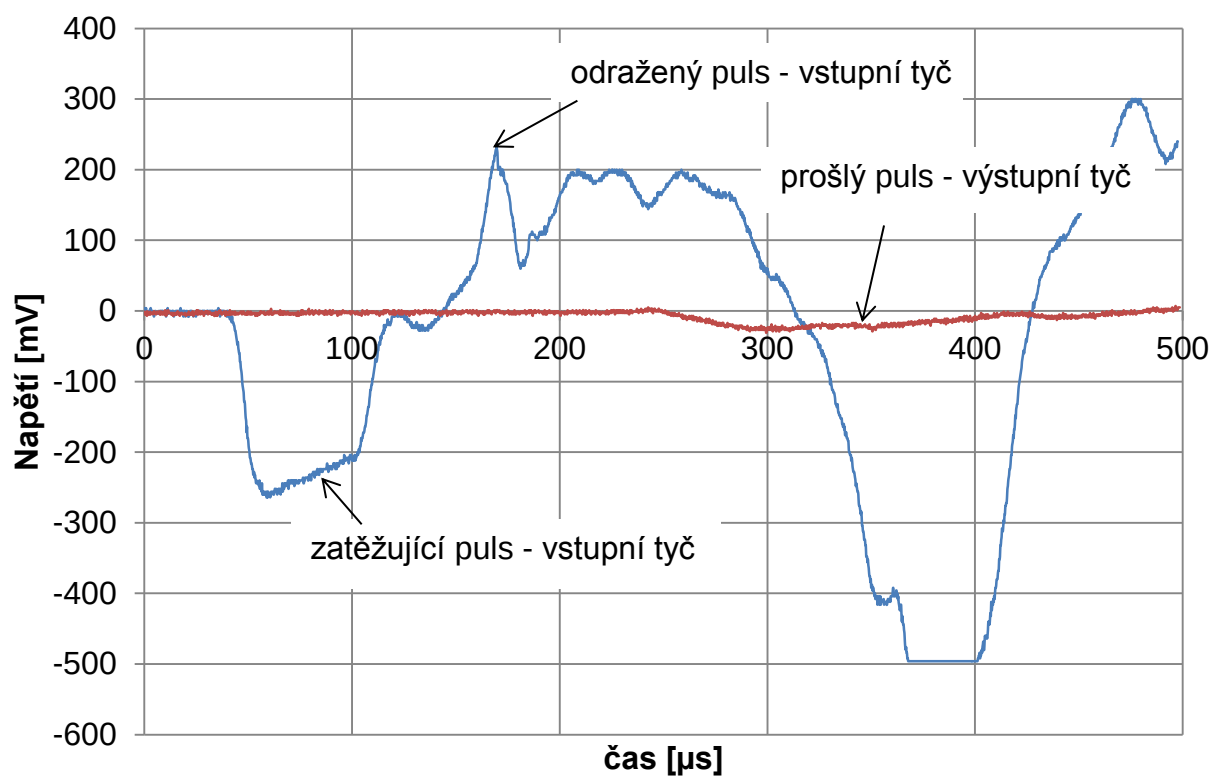
8.6 Provedení experimentů s navrženou úpravou pro ploché vzorky

Při provádění tahových zkoušek byl použit impaktor o délce 150 mm. Tahový přípravek byl testován v rozmezí dopadových rychlostí impaktoru od 14 do 24 m/s. Provedenými experimenty bylo zjištěno, že hraniční dopadové rychlosti impaktoru při testování předmětné oceli dle ČSN 41 7240 a tloušťky 2 mm jsou mezi 20 a 21 m/s. Při vyšších dopadových rychlostech impaktoru docházelo k nadměrnému opotřebení příruby a vstupní tyče, neboť přebytkovou rázovou energii po přetržení vzorku nelze utlumit. Proto testování navrženého přípravku probíhalo v rozmezí těchto hraničních hodnot.

Cílem experimentů bylo otestovat navržený tahový přípravek při dopadové rychlosti impaktoru 20 m/s, čemuž přibližně odpovídá doba plnění vzdušníku asi 20 s.

Na výsledky prováděných experimentů měly vliv různé faktory, jako jsou netěsnost vzdušníku během plnění, čas spouštění a zastavení plnění, tření mezi povrchem impaktoru a vodící lištou, časová prodleva mezi koncem plnění a urychlením impaktoru. Důsledkem působení těchto faktorů bylo obtížné dodržet stejnou hodnotu požadované dopadové rychlosti při každém experimentu. Z toho tedy vyplývá, že každý provedený experiment je ze statistického hlediska neopakovatelný.

V některých případech byl záznam nekvalitní (např. šumy z elektrické sítě, disperze), či dokonce nebyl získán vůbec. V tabulce 13, která udává podmínky zatěžování při prováděných experimentech, jsou šedě vyznačeny zkoušky, u nichž byl získán kvalitní záznam vhodný pro další vyhodnocování. Pro ucelení představy je na obr. 46 vyobrazen příklad kvalitního záznamu získaného z provedeného experimentu, který je možno dále zpracovávat.



Obr. 46 Záznam z tahové zkoušky vzorku TAH 07-2 při dopadové rychlosti
impaktoru 20,22 m/s

Tabulka 13: Podmínky zatížení vzorků

Označení vzorku	Podmínky zatěžování			Poznámka	Krček ANO/NE
	čas plnění	čas průletu impaktoru	rychlost impaktoru		
	t_p [s]	t_v [us]	v [m/s]		
TAH 01-2	20	1016	14,76	přetržen + záznam neuložen	ANO
TAH 02-2	25	993	15,11	přetržen + bez záznamu	ANO
TAH 03-2	25	995	15,08	přetržen + záznam	ANO
TAH 04-2	30	642	23,36	přetržen + špatný záznam	ANO
TAH 05-2	15	826	18,16	nepřetržen + záznam	NE
TAH 06-2	20	742	20,22	přetržen + záznam + šum	ANO
TAH 07-2	20	742	20,22	přetržen + záznam	ANO
TAH 08-2	25	691	21,71	přetržen + záznam + šum + použito pro výbrus	-
TAH 09-2	15	829	18,09	nepřetržen + špatný záznam	NE
TAH 10-2	25	696	21,55	přetržen + záznam	ANO
TAH 11-2	15	818	18,34	nepřetržen + bez záznamu	NE
TAH 12-2	20	759	19,76	nepřetržen + špatný záznam	NE
TAH 13-2	25	692	21,68	přetržen + špatný záznam	ANO
TAH 14-2	20	735	20,41	nepřetržen + špatný záznam	ANO
TAH 15-2	20	-	-	nepřetržen + bez záznamu	ANO
TAH 16-2	20	731	20,52	nepřetržen + záznam	NE
TAH 17-2	20	731	20,52	přetržen + záznam	ANO
TAH 18-2	20	732	20,49	nepřetržen + záznam	NE
TAH 19-2	25	679	22,09	přetržen + špatný záznam	ANO
TAH 20-2	20	729	20,58	přetržen + bez záznamu	ANO

8.7 Vyhodnocení provedených experimentů

V této kapitole jsou uvedeny výsledky experimentů, které byly provedeny podle základního principu vyhodnocování Hopkinsonova testu, který je popsán v kapitole 4.2. Na základě provedených experimentů byly získány závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci a rychlosti deformace na deformaci, viz obr. 48, obr. 49. Celkem bylo provedeno 20 zkoušek za použití navrženého tahového přípravku a vzorků z oceli dle ČSN 41 7240. Jelikož dizertační práce se zabývá ověřením a možnostmi dynamických tahových zkoušek prováděných na Hopkinsonově zařízení, bylo nutné zvolit optimální parametry nastavení testu. Hlavními parametry nastavení byly dopadová rychlost impaktoru a velikost impaktoru. Použitý impaktor byl 150 mm dlouhý o průměru 19 mm.

Jak bylo zdůvodněno v předchozí kapitole, testy byly prováděny při rychlosti impaktoru okolo 20 m/s. Nutno poznamenat, že tyto počáteční podmínky byly nastaveny i v numerické simulaci.

Na základě uskutečněných experimentů byla provedena dvě základní vyhodnocení.

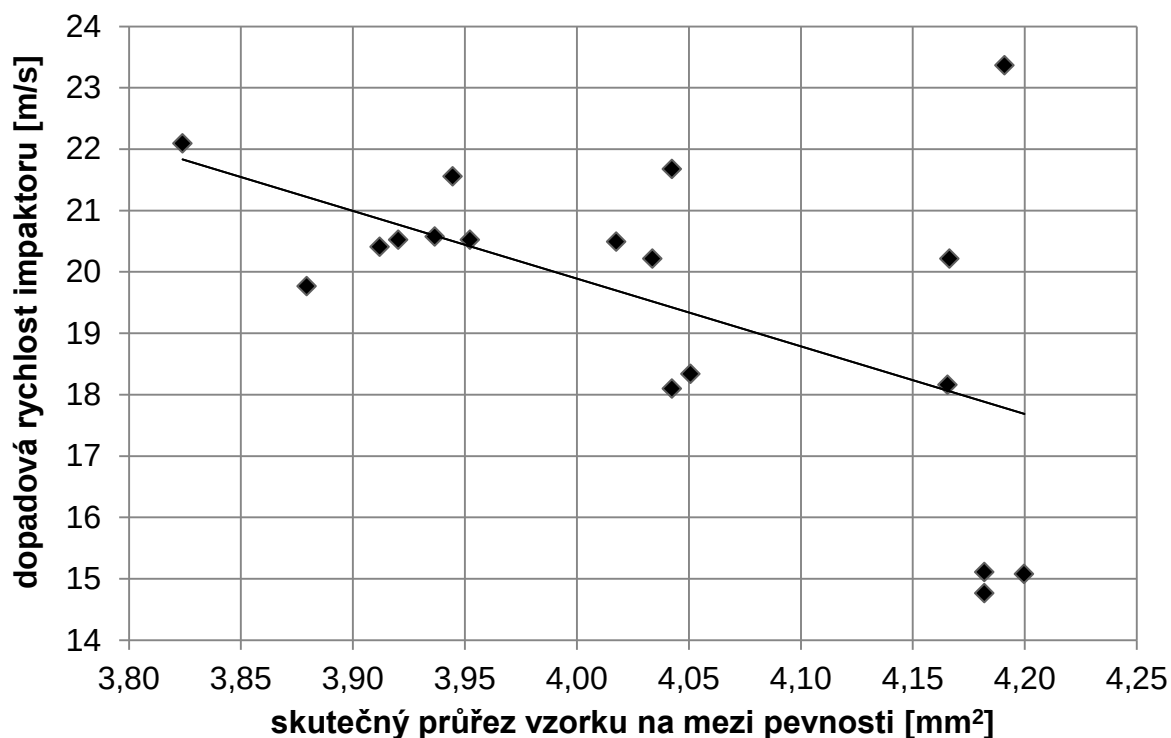
V prvním případě byla zkoumána závislost velikosti dopadové rychlosti impaktoru na geometrii vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Podmínkou bylo proměřit konečnou měrnou délku vzorku a jeho průřez (šířku a tloušťku), a to v blízkosti počátku krčku (pokud krček nastal) či v libovolném místě měrné délky (pokud krček nenastal). Jako mez pevnosti byla brána hodnota, která byla získána z numerické simulace. Mez pevnosti předmětného materiálu byla stanovená z numerické simulace proto, že lze z ní stanovit celý průběh deformačního napětí v čase. Z experimentu tuto hodnotu meze pevnosti stanovit nebylo možné, protože na rozdíl od simulace experiment je schopen zachytit pouze počáteční rozvoj deformačního napětí.

Naměřené hodnoty geometrie vzorku a dopadové rychlosti impaktoru byly zpracovány do tabulky 14, dle které byl následně vytvořen graf závislosti dopadové rychlosti impaktoru na skutečném průřezu vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Graf dané závislosti je v této práci prezentován jako obr. 47. Na základě tohoto měření a následně i grafu na obr. 47 lze konstatovat, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru klesá skutečný průřez vzorku na mezi pevnosti. Jisté odchylky od tohoto tvrzení jsou způsobeny náhodnými vlivy, které ovlivňují Hopkinsonův test a které již byly dříve zmíněny.

Druhé vyhodnocení experimentů spočívalo ve stanovení maximální síly, respektive napětí dosaženého během experimentu. Tuto hodnotu ovšem nelze stanovit bez kvalitního záznamu závislosti změny elektrického napětí kapacitního snímače na čase (příklad na obr. 46). Proto bylo nutné z celkem 20 zkoušek vybrat pouze ty, jejichž záznam byl vhodný k dalšímu zpracování, viz tabulka 13. Hodnota maximální síly/napětí stanovená experimentálně byla posléze porovnávána s toutéž hodnotou získanou simulací. Toto vyhodnocení je uvedeno a okomentováno níže, v kapitole 8.8.

Tabulka 14: Konečné rozměry vzorků po provedení experimentů

Označení vzorku	dopadová rychlost impaktoru v [m/s]	Krček ANO/NE	délka měrné části l_1 [mm]	tl. měrné části t_1 [mm]	šířka měrné části b_1 [mm]	tl. krčku $t_{krč}$ [mm]	šířka krčku $b_{krč}$ [mm]	délka krčku $l_{krč}$ [mm]	průřez vzorku [mm ²]
TAH 01-2	14,76	ANO	21,40	1,64	2,55	1,31	1,84	2,50	4,18
TAH 02-2	15,11	ANO	21,50	1,64	2,55	1,20	1,84	3,51	4,18
TAH 03-2	15,08	ANO	21,05	1,66	2,53	1,15	1,86	3,60	4,20
TAH 04-2	23,36	ANO	21,10	1,65	2,54	1,35	1,90	3,77	4,19
TAH 05-2	18,16	NE	18,10	1,64	2,54	-	-	-	4,17
TAH 06-2	20,22	ANO	21,60	1,62	2,49	1,25	1,83	3,69	4,03
TAH 07-2	20,22	ANO	21,50	1,68	2,48	1,30	1,91	3,07	4,17
TAH 08-2	21,71	-	-	-	-	-	-	-	-
TAH 09-2	18,09	NE	18,65	1,65	2,45	-	-	-	4,04
TAH 10-2	21,55	ANO	21,70	1,63	2,42	1,35	1,88	3,31	3,94
TAH 11-2	18,34	NE	18,61	1,64	2,47	-	-	-	4,05
TAH 12-2	19,76	NE	19,43	1,63	2,38	-	-	-	3,88
TAH 13-2	21,68	ANO	21,40	1,65	2,45	1,27	1,86	3,90	4,04
TAH 14-2	20,41	ANO	21,50	1,63	2,40	1,37	2,03	2,41	3,91
TAH 15-2	-	ANO	21,64	1,61	2,45	1,44	2,17	1,84	3,94
TAH 16-2	20,52	NE	19,48	1,64	2,41	-	-	-	3,95
TAH 17-2	20,52	ANO	21,53	1,62	2,42	1,40	1,92	3,68	3,92
TAH 18-2	20,49	NE	19,81	1,62	2,48	-	-	-	4,02
TAH 19-2	22,09	ANO	22,69	1,60	2,39	1,30	1,88	3,44	3,82
TAH 20-2	20,58	ANO	22,34	1,62	2,43	1,41	1,75	3,33	3,94

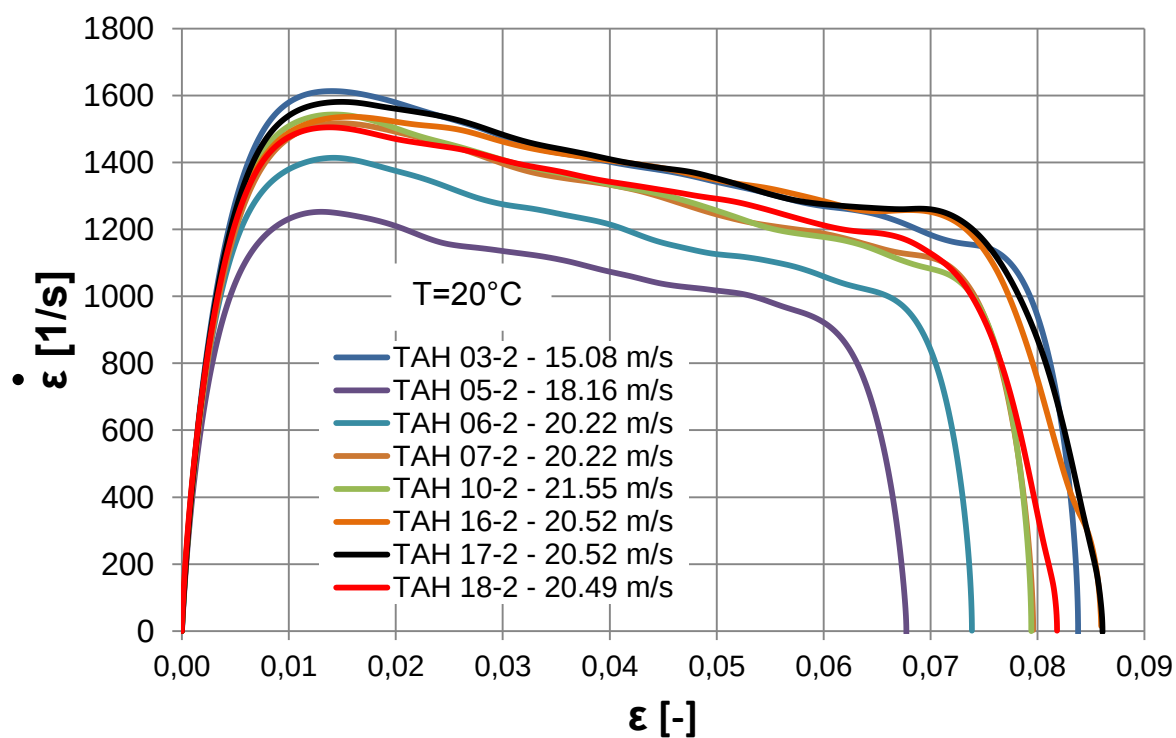


Obr. 47 Závislost skutečného průřezu vzorku na dopadové rychlosti impaktoru

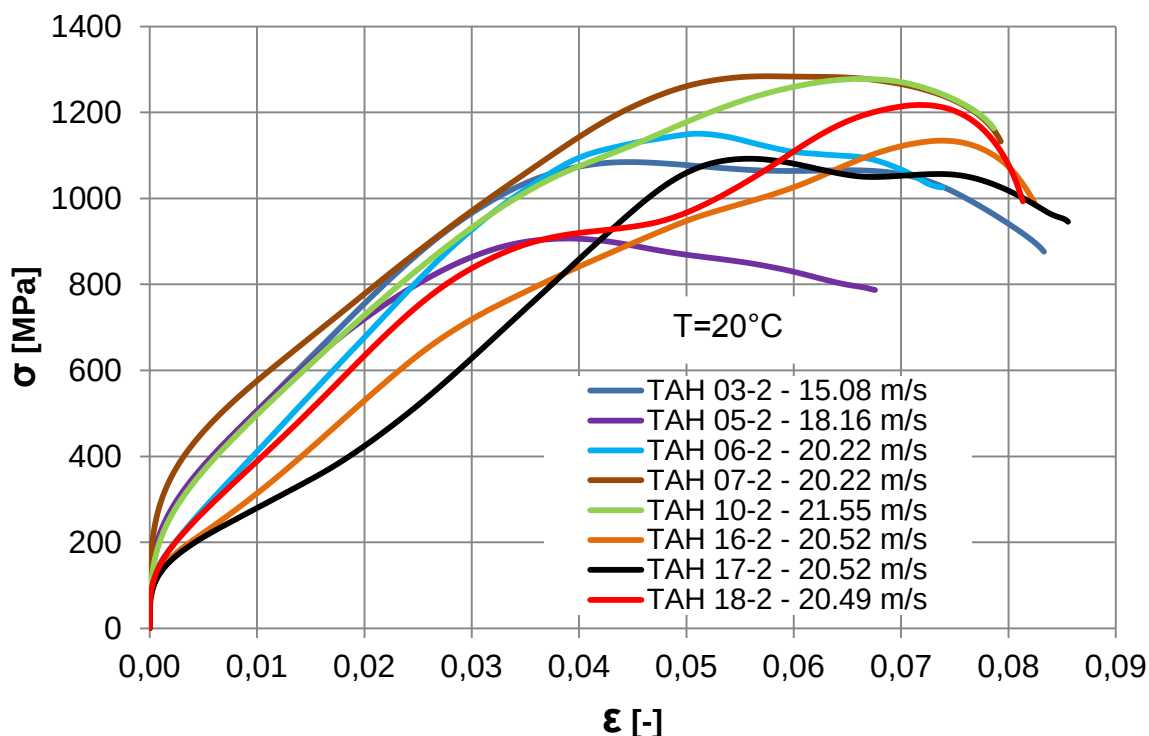
Z tabulky 13 byly vybrány vzorky s odpovídající kvalitou záznamu. Pro tyto vzorky byla vytvořena tabulka 15, která je rozšířena o hodnotu maximální tahové síly působící na jednotlivé vzorky. Její hodnota byla stanovena pomocí rovnice (21) uvedené v kapitole 4.2.1. Z těchto vybraných záznamů byly vyhodnoceny křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci vzorku a také křivky závislosti rychlosti deformace na deformaci vzorku. K jejich tvorbě byla použita standardní metodika vyhodnocení pro Hopkinsonův test. Vykreslení těchto křivek je znázorněno na obr. 48 a obr. 49. Průběhy křivek dokumentují, že se zvyšující se rychlostí deformace narůstá deformační odpor materiálu.

Tabulka 15: Vybrané vzorky s odpovídající kvalitou záznamu pro vyhodnocení

označení vzorku	TAH 03-2	TAH 05-2	TAH 06-2	TAH 07-2	TAH 10-2	TAH 16-2	TAH 17-2	TAH 18-2
dopadová rychlost [m/s]	15,08	18,16	20,22	20,22	21,55	20,52	20,52	20,49
Maximální síla – záznam osciloskop [N]	6504	5454	6900	7704	7668	6804	6552	7302



Obr. 48 Graf závislosti rychlosti deformace na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240



Obr. 49 Graf závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240

8.8 Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace

Cílem provedených experimentů a numerické simulace bylo zhodnocení funkčnosti navrženého tahového přípravku. Zhodnocení funkčnosti bylo provedeno na základě porovnání skutečných deformačních napětí z experimentu a numerické simulace. Jelikož testováním na Hopkinsonově zařízení je možné získat pouze počáteční rozvoj plastické deformace testovaného materiálu, muselo být porovnání výsledků rozděleno do více etap.

V první etapě byly změřeny konečné rozměry vzorků, tj. měrná délka, tloušťka, šířka atd. Na základě těchto hodnot mohl být posléze správně nadefinován materiálový model vzorku. Pro materiálový model vzorku byla zvolena Johnson-Cookova konstitutivní rovnice (3). K správnému určení konstant předmětné rovnice bylo prováděno porovnání konečných rozměrů vzorků z experimentu a simulace. Výsledek porovnávání konečných rozměrů vzorků z experimentu s numerickou simulací vedl ke stanovení materiálového modelu vzorku, který udává tabulka 12. Na základě těchto získaných hodnot je pak snadné určit chování vzorku po celou dobu trvání experimentu.

Druhá etapa spočívala v určení maximálního skutečného deformačního napětí získaného na základě provedení experimentu a numerické simulace. Velikost maximálního skutečného deformačního napětí je možné z experimentu v konečném důsledku zjistit, ale je to zkomplikované tím, že se jedná o velmi rychlý proces

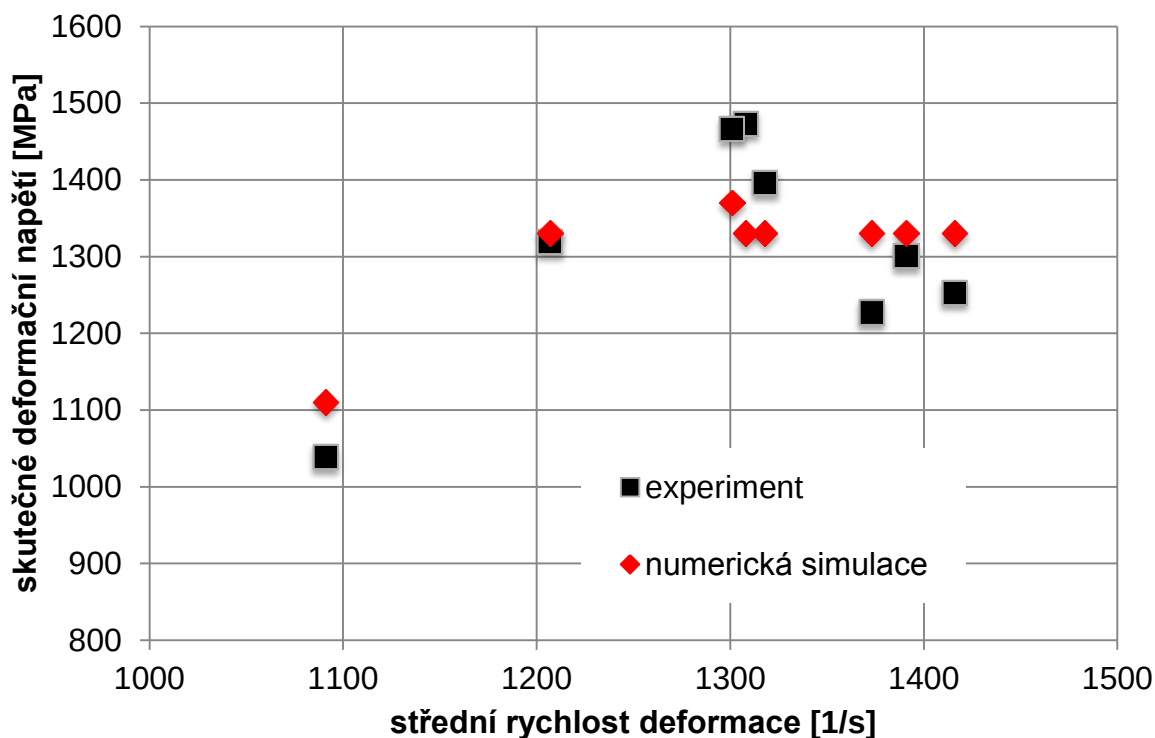
zatěžování (cca 100 mikrosec) a navržený přípravek neumožňuje pozorovat vzorek během experimentu. Nebylo proto možné v průběhu zkoušky získávat průběžné informace o změnách rozměrů vzorku, nutných pro výpočet velikosti skutečného napětí.

Co ale bylo možné zachytit, byl průběh síly při počátečním rozvoji deformace. Jelikož z první etapy je známé chování vzorku během experimentu (numerická simulace), bylo tedy možné určit skutečný průřez vzorku v okamžiku působení maximální síly při počátku zatěžování. Z těchto hodnot pak bylo možné stanovit hodnoty maximálního skutečného napětí, ale jedná se o napětí na počátku zatěžování vzorku. Toto porovnání skutečných napětí získaných z experimentu a z numerické simulace na vybraných vzorcích zobrazuje tabulka 16 a je vyobrazeno na obr. 50. Maximální relativní chyba experimentu od numerické simulace je do 10 %. Tato hodnota je v inženýrských výpočtech brána za ještě přijatelnou. Výsledkem tedy je, že navržený přípravek pro tahové zkoušky plochých vzorků je funkční a jeho výsledky jsou použitelné.

Je nutné ale zmínit fakt, že numerická simulace nemůže postihnout všechny vlivy, které jsou při reálném experimentu. Jak zde již bylo několikrát zmíněno, jako materiálový model vzorku byla vybrána Johnson-Cookova konstitutivní rovnice. Ta zahrnuje vlivy deformace, rychlosti deformace a teploty. Nezahrnuje ale vliv struktury vzorku během výrazného působení rychlosti deformace. Obecně platí, že ocel dle ČSN 41 7240 je náchylná na transformační změnu austenitu na martenzit, která je vyvolána deformací vzorku.

Tabulka 16: Zjištěné hodnoty pro vybrané vzorky

název vzorku	dopadová rychlost impaktoru [m/s]	skutečné napětí z experimentu [MPa]	skutečné napětí z numerické simulace [MPa]	max. skutečné napětí na mezi pevnosti – numerická simulace [MPa]	střední rychlost deformace - experiment [1/s]
TAH 03 - 2	15,08	1227	1330	1580	1373
TAH 05 - 2	18,16	1039	1110	1605	1091
TAH 06 - 2	20,22	1319	1330	1710	1207
TAH 07 - 2	20,22	1473	1330	1710	1308
TAH 10 - 2	21,55	1466	1370	1742	1301
TAH 16 - 2	20,52	1301	1330	1710	1391
TAH 17 - 2	20,52	1253	1330	1710	1416
TAH 18 - 2	20,49	1396	1330	1710	1318



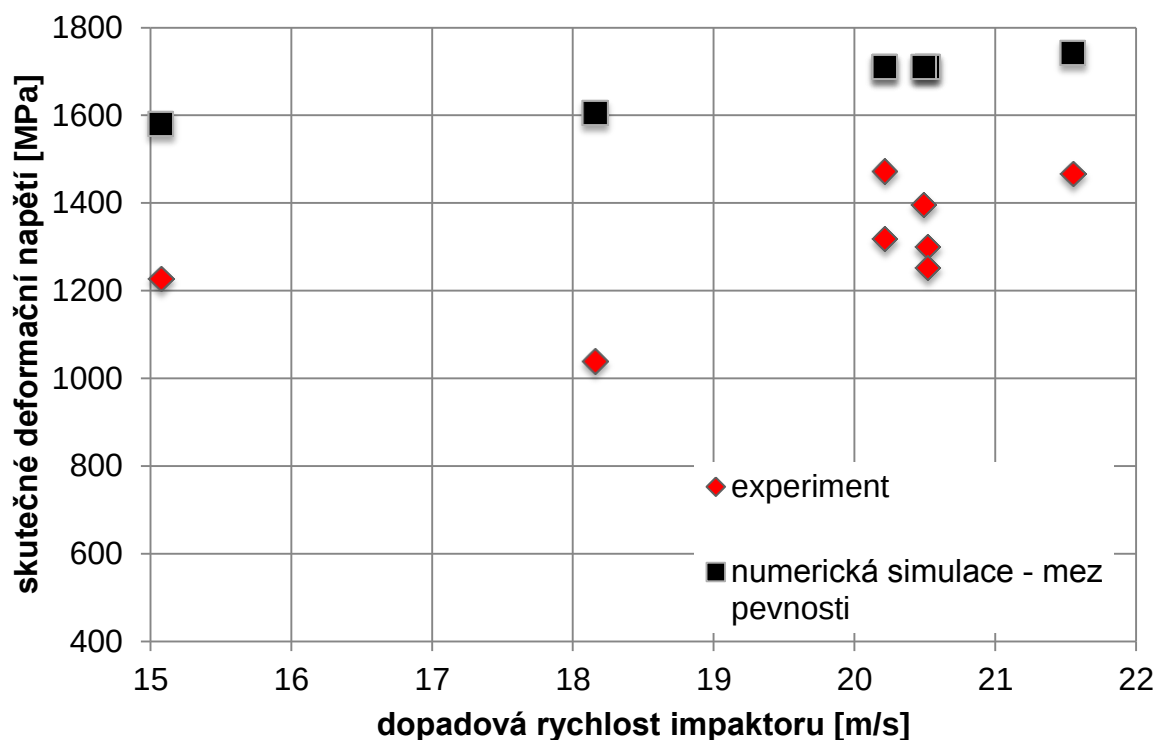
Obr. 50 Závislost střední rychlosti deformace na skutečném deformačním napětí

Třetí etapa byla zaměřena na získání maximálních hodnot skutečného deformačního napětí (meze pevnosti) vzorku. Aby bylo možné určit tyto maximální hodnoty skutečného napětí (mez pevnosti), muselo být použito jen numerické simulace. Jak zde již bylo několikrát zmíněno, tak po obdržení pulsů z experimentu lze získat pouze počáteční rozvoj plastické deformace, nikoliv celý průběh. Je to dáno rozdílnou dobou trvání jednotlivých pulsů, viz obr. 46. Při správném určení materiálového modelu vzorku, viz tabulka 12, bylo tedy možné stanovit maximální hodnoty skutečného deformačního napětí pro kteroukoliv dopadovou rychlost impaktoru. Tyto maximální hodnoty skutečného deformačního napětí, které udává tabulka 16, odpovídají mezi pevnosti oceli dle ČSN 41 7240 pro jednotlivé dopadové rychlosti impaktoru. Hodnoty skutečného napětí na mezi pevnosti jsou vyobrazeny na obr. 51. Současně jsou na tomto obrázku zaznamenány hodnoty získané z experimentu, tj. jaké maximální hodnoty bylo možné určit z experimentu. Protože při tomto porovnání výsledků bylo snahou využívat co nejvíce informací z experimentů, byla závislost skutečného deformačního napětí vynesena na dopadové rychlosti impaktoru. Je to proto, že dopadová rychlost impaktoru při provedení experimentu a numerické simulaci je přesně určena a také přímo souvisí s rychlostí deformace vzorku. Střední rychlost deformace pro tento okamžik (max. napětí – napětí na mezi pevnosti) není možné z experimentu přesně stanovit z důvodů, které jsou popsány výše a jsou také vyobrazeny na obr. 46.

Pro srovnání byly také provedeny statické tahové zkoušky. Bylo zjištěno, že skutečné napětí na mezi pevnosti pro ocel dle ČSN 41 7240 je 935 MPa.

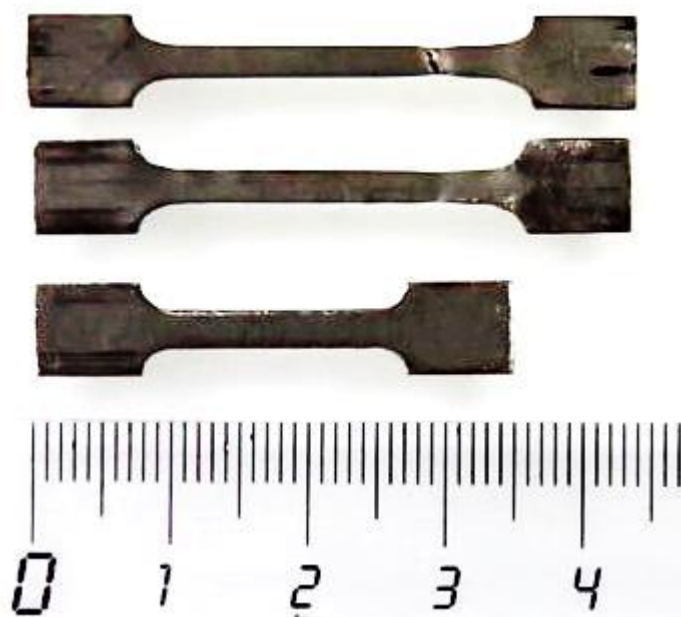
Tato hodnota byla stanovena obecně známým přepočtem smluvního na skutečné napětí vzorku, který uvádí například Petruželka [2].

Z výsledků, které jsou na obr. 51, tedy plyne, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru deformační napětí materiálu vzorku mírně narůstá. Je tedy možné tvrdit, že dopadová rychlost impaktoru a s tím související i rychlost deformace mají vliv na mechanické chování předmětného materiálu.



Obr. 51 Závislost dopadové rychlosti impaktoru na skutečném deformačním napětí materiálu vzorku

Čtvrtá etapa byla zaměřena na porovnání ostatních veličin získaných z tahové zkoušky, tj. tažnosti a kontrakce. Pro stanovení těchto hodnot bylo využito počátečních a konečných rozměrů vzorků, získaných z experimentů provedených za různých hodnot dopadové rychlosti impaktoru. Porovnání počáteční a konečné délky vzorku je na obr. 52. Pro kontrolu bylo provedeno ověření konečných délek vzorků získaných z experimentů a z numerické simulace. Výsledky udává tabulka 17. Lze tedy konstatovat, že relativní chyba výsledků experimentů a numerické simulace nepřesahuje 5 %. Jak již bylo zmíněno výše, relativní chyba pohybující se kolem 5 % je pro inženýrskou praxi přijatelný výsledek. Porovnání konečných délek vzorků je tedy další ověření, že stanovený materiálový model vzorku, tj. parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240, je správný. Metodika stanovení tažnosti a kontrakce včetně získaných výsledků je podrobně uvedena v následující kapitole 8.9.



Obr. 52 Srovnání vzorků před a po provedení dynamického tahového testu.

Tabulka 17: Porovnání celkových délek vzorků z experimentu a numerické simulace

označení vzorku		TAH 03-2	TAH 05-2	TAH 06-2	TAH 07-2	TAH 10-2	TAH 16-2	TAH 17-2	TAH 18-2
Konečná délka vzorku [mm]	Experiment	43,00	42,80	43,60	43,50	43,70	42,90	43,50	43,70
	Simulace	44,97	44,65	44,97	44,97	43,82	44,97	44,97	44,97
	Rel. chyba [%]	4,38	4,14	3,04	3,27	0,27	4,60	3,27	2,82

8.9 Další výsledky získané z provedených experimentů

V tomto případě byly dále z experimentů vyhodnocovány další charakteristiky týkající se tahové zkoušky, tj. tažnost a kontrakce. Při tomto vyhodnocení byly nejprve vzorky rozděleny podle toho, zda na nich během experimentu vznikl či nevznikl „krček“. Rozdělení vzorků podle uvedeného kritéria udává tabulka 18. Po té bylo provedeno na těchto vzorcích stanovení tažnosti a kontrakce podle vztahů, které uvádí například Petruželka [2]. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v téže tabulce 18.

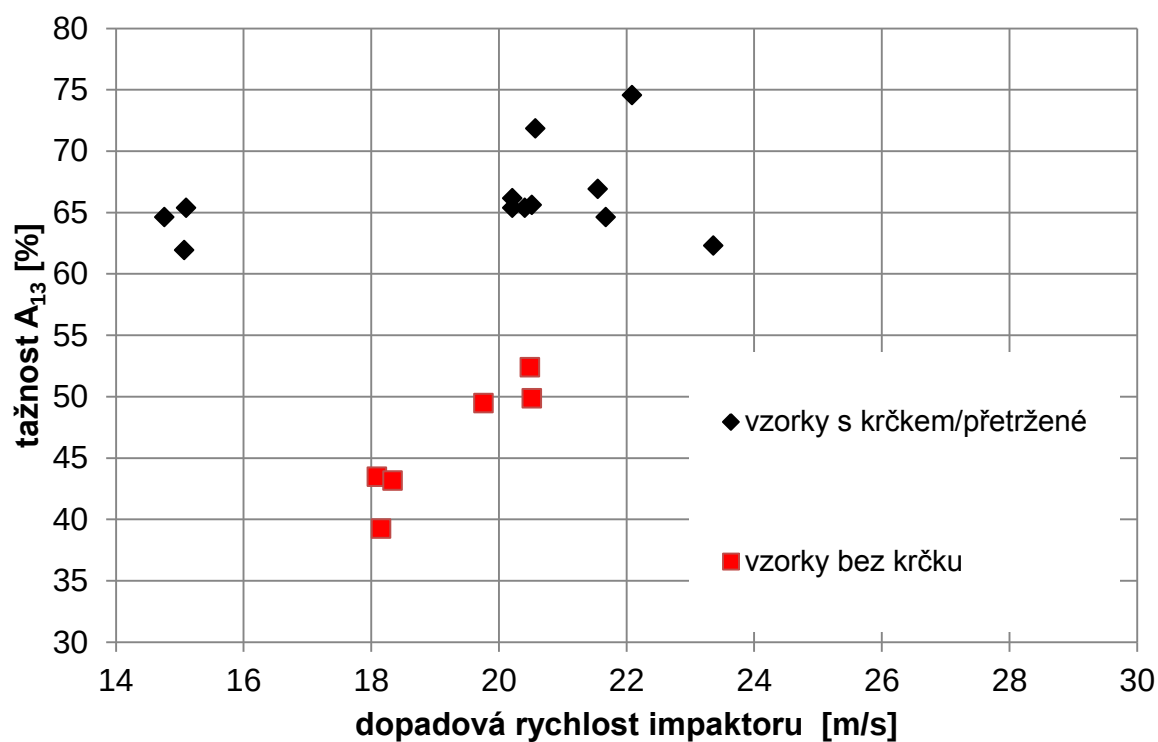
Na základě tohoto rozdělení bylo uskutečněno grafické srovnání tažností a kontrakce v závislosti na dopadové rychlosti impaktoru, viz obr. 53 a obr. 54. Při stanovení tažnosti se vycházelo ze základní měrné délky vzorku 13 mm. Kontrakce byla stanovena ze základního průřezu měrné části vzorku, tj. tloušťky 2 mm a šířky 3 mm. Základní měrná délka a geometrie vzorku jsou na obr. 37.

Z provedených vyhodnocení tažnosti a kontrakce nelze jednoznačně stanovit, zda stanovené hodnoty pro materiál dle ČSN 41 7240 jsou ovlivněny dopadovou rychlostí impaktoru, potažmo rychlostí deformace. Je tedy možné se z daných

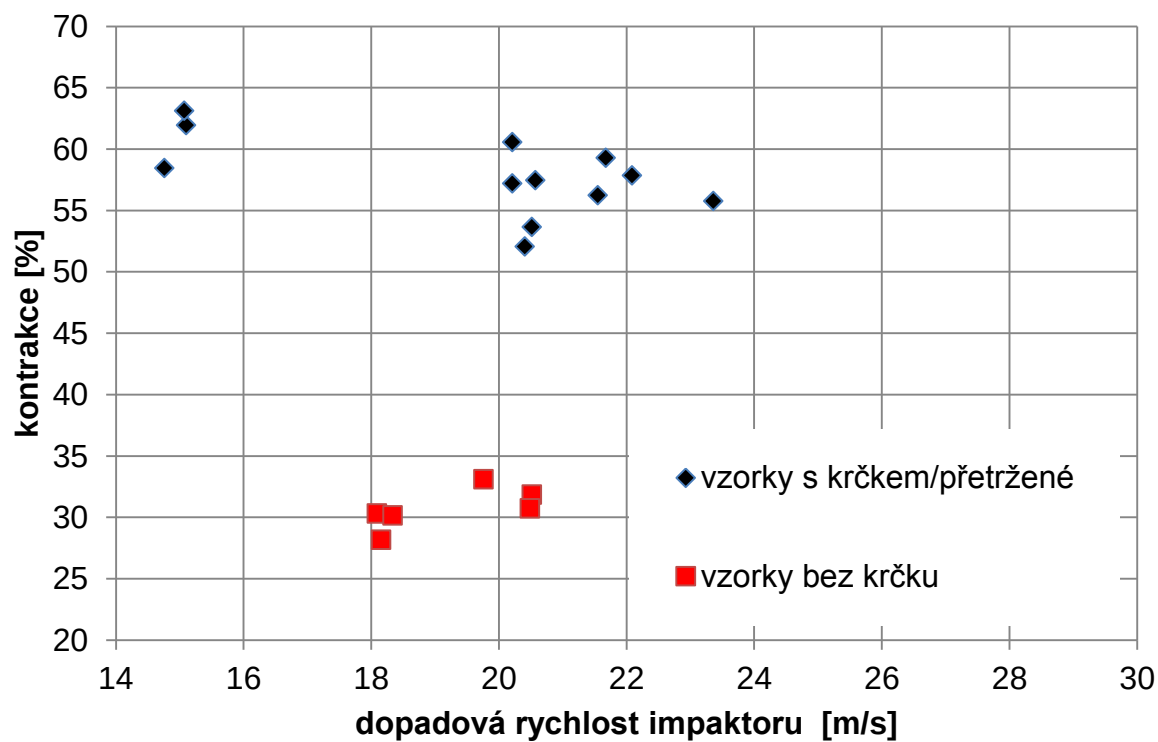
hodnot domnívat, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru se zvyšuje i tažnost. Aby bylo možné jednoznačně vyslovit jasný závěr, jaký má vliv dopadová rychlost na tyto hodnoty, muselo by být provedeno více experimentů, které by pokryly větší rozsah dopadových rychlostí impaktoru, než je tomu zde. Toto tvrzení je možné doložit obr. 53 a obr. 54, kde je jasně patrné, že dopadová rychlost impaktoru byla nejčastěji okolo 15 m/s a poté nejvíce okolo 21 m/s. Zde je nutné připomenout, že tyto hodnoty dopadových rychlostí byly zvoleny z důvodů ověření navrženého tahového přípravku pro Hopkinsonovo zařízení, nikoliv k určování vlivu dopadové rychlosti impaktoru na tažnost a kontrakci oceli dle ČSN 41 7240.

Tabulka 18: Vyhodnocení tažnosti a kontrakce

Označení vzorku	dopadová rychlost impaktoru [m/s]	Krček ANO/NE	Konečná délka [mm]	tažnost A_{13} [%]	kontrakce Z [%]
Tah 01-2	14,76	ANO	21,40	64,62	58,44
Tah 02-2	15,11	ANO	21,50	65,38	61,93
Tah 03-2	15,08	ANO	21,05	61,92	63,12
Tah 04-2	23,36	ANO	21,10	62,31	55,78
Tah 05-2	18,16	NE	18,10	39,23	28,18
Tah 06-2	20,22	ANO	21,60	66,15	60,56
TAH 07-2	20,22	ANO	21,50	65,38	57,19
TAH 08-2	21,71	-	-	-	-
TAH 09-2	18,09	NE	18,65	43,46	30,30
TAH 10-2	21,55	ANO	21,70	66,92	56,24
TAH 11-2	18,34	NE	18,61	43,15	30,16
TAH 12-2	19,76	NE	19,43	49,46	33,11
TAH 13-2	21,68	ANO	21,40	64,62	59,27
TAH 14-2	20,41	ANO	21,50	65,38	52,05
TAH 15-2	-	ANO	21,64	66,46	46,12
TAH 16-2	20,52	NE	19,48	49,85	31,86
TAH 17-2	20,52	ANO	21,53	65,62	53,66
TAH 18-2	20,49	NE	19,81	52,38	30,73
TAH 19-2	22,09	ANO	22,69	74,54	57,86
TAH 20-2	20,58	ANO	22,34	71,85	57,46



Obr. 53 Graf závislosti tažnosti na dopadové rychlosti impaktoru



Obr. 54 Graf závislosti kontrakce na dopadové rychlosti impaktoru

9 ZÁVĚRY

Již v roce 2010 bylo na FSI VUT v Brně vyvinuto zařízení, kterým bylo možné provádět tahové zkoušky válcových vzorků. Protože výroba válcových vzorků, určených pro tyto účely, byla finančně náročná, bylo snahou navrhnout a ověřit možnou úpravu Hopkinsonova zařízení k provádění tahových zkoušek s jinými než válcovými vzorky.

Cílem dizertační práce bylo navržení a ověření přípravku, který slouží k provádění tahových zkoušek na Hopkinsonově zařízení, kde je zkušební vzorek vyroben z plechu. Pro návrh tvaru vzorku se vycházelo z podobnosti klasické (statické) tahové zkoušky. Rozměry plochého vzorku byly stanoveny na základě předchozí zkušenosti se vzorky válcovými, tj. bylo nutné uvažovat s navrženou konstrukční úpravou Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky. Navržený přípravek lze používat pro takové materiály, u kterých protažení vzorku ve směru podélné osy nepřesáhne 10 mm.

K ověření funkčnosti dané úpravy byla vybrána korozivzdorná austenitická, chrom niklová ocel dle ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm. Předmětný materiál byl vybrán na základě spolupráce na řešení standardního projektu FSI-11-26. Projekt se zabýval konstrukcí teplosměnných solárních panelů.

V rámci řešení dizertační práce byly na nově navrženém přípravku provedeny tahové zkoušky celkem 20 plochých vzorků. Vzorky byly vyrobeny laserovým řezáním na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Při testování byl použit impaktor délky 150 mm (ozn. I 150B). Testování probíhalo při různých dopadových rychlostech impaktoru v rozsahu od 14 do 24 m/s. Bylo zjištěno, že maximální dopadová rychlost impaktoru při použití výše zmíněného materiálu je okolo 21 m/s. Jakmile impaktor přesáhl tuto hraniční rychlost, docházelo k nadměrnému opotřebení navrženého přípravku a z části i zatěžující tyče. Důvodem je, že zbývající rázovou energii, která nebyla spotřebována k deformaci vzorku, nelze jiným způsobem utlumit. Testování bylo proto převážně zaměřeno na dopadovou rychlost impaktoru pohybující se kolem hodnoty 20 m/s. Přesná hodnota dopadové rychlosti nemůže být dodržena u všech experimentů stejná, a to z důvodů vlivu vnější a vnitřní balistiky impaktoru, a dále také netěsnosti vzdušníku během plnění, doby spouštění a zastavení plnění, tření mezi povrchem impaktoru a vodící lištou, časové prodlevy mezi koncem plnění a urychlením impaktoru.

U všech přetvořených vzorků byly následně změřeny hlavní rozměry (celková délka vzorku, konečná délka měrné části, konečná tloušťka a šířka vzorku). Na základě těchto rozměrů byly následně stanoveny parametry jako konečný průřez vzorku, geometrie „krčku“ na vzorku, tažnost a kontrakce.

Hodnota konečného průřezu vzorku byla využita k nastavení správného materiálového modelu v numerické simulaci, tj. konstitutivní Johnson-Cookovy

rovnice. Nalezení správných parametrů spočívalo v porovnávání konečné geometrie vzorku získané z experimentu s geometrií získanou z numerické simulace.

Konečný průřez a délka sloužily ke stanovení tažnosti a kontrakce. Z výsledných hodnot tažnosti a kontrakce prozatím nelze vytvořit jasný závěr, zda a jak velikost dopadové rychlosti ovlivňuje tažnost materiálu. K tomu by bylo potřebné provést více zkoušek s větší škálou hodnot dopadových rychlostí. Prozatím, z dosud obdržených výsledků, je možné vytvořit předběžnou hypotézu, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru se zvyšuje i tažnost materiálu. Ale jak bylo řečeno výše, toto tvrzení je nutné ověřit rozsáhlejšími experimenty.

Jedním z hlavních cílů práce bylo ověřit správnou funkčnost navrženého tahového přípravku. Ověření bylo založeno na porovnání výsledků skutečných (fyzikálních) experimentů s výsledky získanými simulací. Pro ověřování byla použita hodnota maximálního skutečného deformačního napětí po průchodu napěťového rázu. Z experimentální části byly pro vyhodnocování brány pouze ty křivky, které se vyznačovaly kvalitním záznamem tahové zkoušky. Z celkem 20 zkoušek tomu odpovídalo pouze 8. Numerická simulace byla prováděna pomocí školní verze programu ANSYS 14.0 (modul ANSYS LS – DYNA). Maximální hodnoty skutečného deformačního napětí získané z experimentů a hodnoty získané z numerické simulace se víceméně shodovaly. Relativní chyba obdržených výsledků nepřesahovala 10 %, což svědčí o správné funkci přípravku a experimentální výsledky je tedy možné využívat v praktických úlohách.

U vybraných 8 vzorků byla také vypočtena hodnota maximální tahové síly. Na základě těchto hodnot a s využitím standardní metodiky vyhodnocování pro Hopkinsonův test byly vytvořeny křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci vzorku a také křivky závislosti rychlosti deformace na deformaci vzorku. Průběhy křivek ukázaly, že se zvyšující se rychlostí deformace narůstá deformační odpor materiálu.

Dále byla zkoumána závislost velikosti dopadové rychlosti impaktoru na geometrii vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Jako mez pevnosti byla brána hodnota, která byla získána z numerické simulace. Na základě prozkoumání naměřených hodnot geometrie vzorku a dopadové rychlosti impaktoru bylo zjištěno, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru klesá skutečný průřez vzorku na mezi pevnosti

Za hlavní přínos této dizertační práce považuji vyvinutí a ověření tahového přípravku sloužícího k testování plochých vzorků na Hopkinsonově zařízení. Na základě porovnání provedených experimentů a výsledků numerické simulace lze konstatovat, že navržený přípravek funguje správně a získané výsledky tak lze uplatnit i v praxi. Podmínkou ovšem je získání čistého záznamu z osciloskopu. A dále je zde nutné vycházet z faktu, že pomocí Hopkinsonova testu je možné zachytit pouze počáteční rozvoj plastické deformace materiálu vzorku.

Přípravek pro testování plochých vzorků, navržený v rámci řešení předkládané dizertační práce, byl v roce 2012 uznán Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor č. 23703. Uvedený užitný vzor je zdokumentován v příloze č. 2.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MEYERS. Marc A, *Dynamic behavior of materials*. New York: John Wiley & Sons. 1994, 668 s. ISBN 0-471-58262-x.
- [2] PETRUŽEKA, Jiří, *Teorie tváření : 1D plasticita*, [online], [cit. 2013-03-26], s. 1-21, Dostupný z WWW:
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzeka/TTV/61DPlasticitaTT.pdf>>.
- [3] FOREJT, Milan, Jan KREJČÍ a Jaroslav BUCHAR, *Teorie a technologie tváření vysokými deformačními rychlostmi a energiemi: Vybrané statě z tváření*, Brno, 1994, 69 s.
- [4] *Www.345.vsb.cz* [online], 2002 [cit. 2013-03-15], TVAŘITELNOST PŘI PLOŠNÉM TVÁŘENÍ, Dostupné z WWW:
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzeka/TNMTV/5TvPlosna.pdf>>.
- [5] CHEN, Weinong W, *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*. New York: Springer, c2011, ix, 388 s. Mechanical engineering series. ISBN 978-1-4419-7981-0.
- [6] ZHANG, B.-P., C. DING, B. LIU, T. JIAO, H. LIN a S.-H. ZHOU. Dynamic Tensile Behavior of 93wt.% Tungsten Alloy and its Fractal Features of Fracture. *Le Journal de Physique IV*. 1997, vol. 07, C3, C3-409-C3-414. DOI: 10.1051/jp4:1997371. Dostupné z:
<http://www.edpsciences.org/10.1051/jp4:1997371>
- [7] HAUGOU, G., E., MARKIEWICZ a J. FABIS. On the use of the non direct tensile loading on a classical split Hopkinson bar apparatus dedicated to sheet metal specimen characterisation, *International Journal of Impact Engineering*, 2006, roč. 32, č. 5, s. 778-798, ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.015, Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X05001107>
- [8] GOMEZDEL RIO, T, Christian KETTENBEIL a Nik PETRINIC, Dynamic tensile behaviour at low temperature of CFRP using a split Hopkinson pressure bar, *Composites Science and Technology* [online], 2005, roč. 65, č. 1, s. 61-71 [cit. 2013-03-25], ISSN 02663538, DOI: 10.1016/j.compscitech.2004.06.004, Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353804001617>
- [9] VERLEYSSEN, P., J, DEGRIECK, T, VERSTRAETE a J, SLYCKEN, Influence of Specimen Geometry on Split Hopkinson Tensile Bar Tests on Sheet Materials. *Experimental Mechanics*. 2008, roč. 48, č. 5, s. 587-598, ISSN 0014-4851, DOI: 10.1007/s11340-008-9149-x. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11340-008-9149-x>

- [10] CHEN, Y., A.H. CLAUSEN, O.S. HOPPERSTAD a M, LANGSETH, Application of a split-Hopkinson tension bar in a mutual assessment of experimental tests and numerical predictions. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, roč. 38, č. 10, s. 824-836, ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X11000790>
- [11] GERLACH, Robert, Christian KETTENBEIL a Nik PETRINIC, A new split Hopkinson tensile bar design, *International Journal of Impact Engineering* [online], 2012, roč. 50, s. 63-67 [cit. 2013-03-25], ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.08.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X1200156X>
- [12] KAISER, Michael Adam, Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, [online], 1998 s. 94, Dostupný z WWW: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-41998-18465/unrestricted/ETD.pdf>
- [13] TAYLOR, G, The Use of Flat-Ended Projectiles for Determining Dynamic Yield Stress. I, Theoretical Considerations. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948-09-02, roč. 194, č. 1038, s. 289-299, ISSN 1364-5021, DOI: 10.1098/rspa.1948.0081, Dostupné z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1948.0081>
- [14] HUTCHINGS. I,M, a T,J, O'BRIEN, Normal impact of metal projectiles against a rigid target at low velocities. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1981, roč. 23, č. 5, s. 255-261, ISSN 00207403, DOI: 10.1016/0020-7403(81)90029-1, Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020740381900291>
- [15] CLINE, C, F, a J, E, REAUGH, DYNAMIC YIELD STRENGTH OF A PALLADIUM ALLOY METALLIC GLASS. *Le Journal de Physique IV*, 1991, roč. 01, C3, C3-139-C3-146, ISSN 1155-4339, DOI: 10.1051/jp4:1991318, Dostupné z: <http://www.edpsciences.org/10.1051/jp4:1991318>
- [16] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK, Experimentální metody: sylabus. In: *Studijní opory* [online], 2003 [cit. 2013-03-13], Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [17] ŠLAIS. M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠVEC, P, Měření rázové síly při TAT, *Kovárenství*, 2012, roč. 2012, č. 44, s. 73-76, ISSN: 1213- 9289.
- [18] Nerezová ocel: praktická příručka, *ASTRALPOOL* [online], 2012 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: www.astralpool.cz/podpora/Abynereznekorodovala.pdf

- [19] PTÁČEK, Luděk, A KOLEKTIV, *Nauka o materiálu II*, 2, opr, a rozš, vyd, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3,
- [20] NĚMEC, Josef, *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí*, 2. vyd, Praha: SNTL, 1975, 168 s. 04-215-75.
- [21] Použití korozivzdorných ocelí pro konstrukce a konstrukční prvky, *KONSTRUKCE: ODBORNÝ ČASOPIS PRO STAVEBNICTVÍ A STROJÍRENSTVÍ* [online], 2013 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pouziti-korozivzdornych-oceli-pro-konstrukce-a-konstrukcni-prvky/>
- [22] HRIVŇÁK, Ivan, *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*, 1, vyd, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladatelstve STU, 2009, 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
- [23] ČSN 10088-1, *Korozivzdorné oceli (přehled korozivzdorných ocelí)*, Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005,
- [24] Schaefflerův diagram, *WIKIMEDIA COMMONS* [online], 2014 [cit. 2014-01-22], Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7f/Diagramme_schaeffler_text_zoom.svg
- [25] Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí, *Bohdan Bolzano* [online], 2004 [cit. 2014-01-22], Dostupné z: http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/zaruvzdorne_oceli/korozivzdorne/charakteristikaskupin/
- [26] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ, *Konstrukční oceli*, Brno: CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-858-6795-8.
- [27] RYŠ, Přemysl et al, *Nauka o materiálu: Železo a jeho slitiny*, 2, zcela přepracované a rozšířené vydání. Praha: Academia, 1975, 544 s. ISBN 509-21-857.
- [28] MatWeb: MATERIAL PROPERTY DATA, *304 Stainless Steel* [online], 2013 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>
- [29] NEREZOVÁ OCEL 1,4301, *INOX, spol, s r, o, - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL* [online], 2013 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/index.php?act=a&cat=4&art=16>

- [30] MKP a MHP - Matematika pro inženýry 21. století, FUSEK, Martin a Radim HALAMA, *MKP a MHP: Matematika pro inženýry 21. století* [online], Ostrava, 2011 [cit. 2014-01-16], Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf
- [31] KOLÁŘ, Vladimír; NĚMEC, Ivan; KANICKÝ, Viktor, *FEM : Principy a praxe metody konečných prvků*, První vydání, Praha : Computer Press. 1997, 401 s. ISBN 80-7226-021-9,
- [32] KRATOCHVÍL, Ctirad; ONDRÁČEK, Emanuel, *Mechanika těles : Počítače a MKP*, První vydání, Praha : SNTL, 1986, 83 s. ISBN 05-001-87.
- [33] Ústav mechaniky těles. PETRUŠKA, Jindřich, *FSI VUT v Brně* [online], Brno, 2002 [cit. 2014-01-16], Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/PocitacoveMetodyII/PocitacovaMechanikaII.pdf>
- [34] MKP v dynamice III, MICHAL, Vaverka a Vrbka MARTIN, *Výpočtové nadstavby pro CAD* [online], 2011 [cit. 2014-01-16], Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZVN/prednaska7_zvn.pdf
- [35] ABAQUS. *Applus IDIADA* [online], 2009 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: <http://www0w.idiada.cz/abaqus.html>
- [36] Abaqus Unified FEA: Complete solutions for realistic simulation, *DASSAULT SYSTEMES* [online], 2013 [cit. 2014-01-21], Dostupné z: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/overview/>
- [37] Závěrečné práce VUT, ZVĚŘINA, Martin, *Výpočtová simulace procesu třískového obrábění: Diplomová práce* [online], 2010 [cit. 2014-01-20], Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25461
- [38] Dassault Systèmes Announces Abaqus Side Impact Crash Dummy for Realistic Simulation, *Business Wire* [online], 2014 [cit. 2014-01-21], Dostupné z: http://www.businesswire.com/news/home/20110413006473/en#.Ut4_cRBNxaQ
- [39] LS-DYNA, *LS-DYNA Keyword user's manual* [online], 2003 [cit. 2013-03-21], Dostupné z: http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/trent001/manuals/ls-dyna_970_manual_k.pdf

- [40] ANSYS LS-DYNA, *Explicit Dynamics* [online], 2011 [cit. 2013-03-21], Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-explicit-dynamics-brochure-14.0.pdf>
- [41] LS-PrePost: Online documentation, *General Overview* [online], 2012 [cit. 2013-03-21], Dostupné z: <http://www.lstc.com/lsp/cont/overview.shtml>
- [42] CLAUSEN. Arild H., Tore BÅRVIK, Odd S. HOPPERSTAD a Ahmed BENALLAL. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality. *Materials Science and Engineering: A*. 2004. roč. 364. 1-2. s. 260-272. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.027. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509303007032>
- [43] DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M, CAPACITANCE DETECTORS USED FOR SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TEST (SHPBT) AND THEIR COMPARISON WITH NUMERIC SIMULATION SHPBT, In *METAL 2013*, 2013, s. 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0,
- [44] UŽITNÝ VZOR Č. 21472. *Úřad průmyslového vlastnictví ČR* [online]. 2014 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0021/uv021472.pdf>
- [45] IINO, Y.; ŠVEJCAR, J.; DLOUHÝ, I.; FOREJT, M. Effect of Strain Rate 10^{-4} to 10^3 s^{-1} on Room Temperature Tensile Properties and Notch Plastic Zone of Type 304 Stainless Steel. In *ECF17-Multilevel Approache to Fracture of Materials. Components and Structures*. Brno: VUTUM Brno, 2008. s. 773-779. ISBN: 9781617823190.
- [46] UŽITNÝ VZOR Č. 23703. *Úřad průmyslového vlastnictví ČR* [online]. 2014 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0023/uv023703.pdf>
- [47] BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. *Terminální balistika*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 340, [8] p. ISBN 80-200-1222-2.

PŘEHLED ČLÁNKŮ AUTORA

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; MRŇA, L. Hopkinson Tensile Tests of Flat Specimens. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, roč. 3, č. 9, s, 560-565, ISSN: 2159- 5275.

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M. CAPACITANCE DETECTORS USED FOR SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TEST (SHPBT) AND THEIR COMPARISON WITH NUMERIC SIMULATION SHPBT. In *METAL 2013*, 2013, s, 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0.

MRŇA, L.; KOPECKÝ, L.; NĚMEČEK, T.; MIKMEKOVÁ, Š.; DOHNAL, I. LASER WELDING OF DOMEX STEEL AND HETEROGENOUS WELD WITH DC01. In *METAL 2013*, 2013, s, 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0.

ŠLAIS, M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠVEC, P. Měření rázové síly při TAT, *Kovárenství*, 2012, roč. 2012, č, 44, s, 73-76, ISSN: 1213- 9289.

ŠLAIS, M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M. Determination of Johnson- Cook equation parameters. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2012, roč. 2012, č. 3, s. 125-132, ISSN: 1335- 1532.

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; MRŇA, L. Hopkinson tensile tests of flat specimen. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*, MM průmyslové spektrum. Brno: BUT- FMI Institute of Manufacturing Technology, 2011, s. 79-83, ISBN: 978-80-214-4267- 2.

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; SAMEK, R. Tensile tests of flat bars at high strain rate. *Acta Mechanica Slovaca*, 2011, roč. 2011, č. 3, s. 46-50, ISSN: 1335- 2393.

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; SAMEK, R. Dynamické tahové zkoušky plochých tyčí Hopkinsonovým testem. *Kovárenství*, 2011, roč. 2011, č. 40, s. 50-52, ISSN: 1213- 9289.

TVŮRČÍ AKTIVITY AUTORA

Funkční vzorky:

DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠLAIS, M.: SHTBT-2011- 3; *Modifikace zařízení pro dynamické tahové zkoušky plochých vzorků - Hopkinsonův test*. VUT v Brně, ÚST, odbor tváření kovů a plastů, laboratoř B1/ 411. (funkční vzorek)

MRŇA, L.; LIDMILA, Z.; ŘIHÁČEK, J.; DOHNAL, I.; KUBÍČEK, J.; PODANÝ, K.: Solhar01; *Harmonikový solární absorbér*. C/ 206. (funkční vzorek)

Patenty:

DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; VUT v Brně: *Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu*. 23703, užitný vzor. (2012)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Název
A_{80}	%	tažnost
B	MPa	modul zpevnění
C	-	koeficient citlivosti na rychlost deformace
c	m/s	rychlost zvuku v daném prostředí
C	N.s/m	matice tlumení
c_{pl}	m/s	rychlost plastické vlny
Cr_{eq}	%	ekvivalent chromu
E	MPa	modul pružnosti v tahu
F	N	vektor zatížení
K	-	k-faktor tenzometru
K	MPa	konstanta materiálu (Hollomon-Ludvik)
K	N/m	matice tuhosti
L	m	velikost nejmenšího prvku sítě
L_0	m	počáteční délka vzorku
L_f	m	konečná délka vzorku
L_u	m	konečná délka vzorku
m	-	exponent citlivosti na rychlost deformace
m	-	teplotní koeficient odpevnění
M	kg	matice hmotnosti
n	-	exponent deformačního zpevnění
Ni_{eq}	%	ekvivalent niklu
R_m	MPa	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
r_s	-	střední součinitel plastické anizotropie
S_{tyc}	mm ²	průřez tyče
S_{vz}	mm ²	průřez vzorku
T_0	K	teplota okolí
T_m	K	teplota tavení
U	m	vektor neznámých posuvů

Symbol	Jednotka	Název
U_N	V	napájecí napětí
v_0	m/s	dopadová rychlost vzorku
v_0	m/s	rychlost tyče v podélném směru
X	m	nedeformovaná část vzorku
Z	-	zesílení
Δt_{krit}	s	kritický časový krok
ΔU	V	přírůstek měřicího napětí
$\dot{\varphi} \quad \dot{\varepsilon}$	s^{-1}	rychlost deformace
$\dot{\varepsilon}_0$	s^{-1}	referenční rychlost deformace
ε	-	poměrná deformace
ε_1	-	skutečná elastická deformace tyče
ε_{mer}	-	měřená elastická deformace
ε_i	-	axiální deformace tyče u zatěžujícího pulsu
ε_r	-	axiální deformace tyče u odraženého pulsu
ε_t	-	axiální deformace tyče u prošlého pulsu
μ	-	Poissonovo číslo
ρ	kg/m^3	hustota materiálu
σ_0	MPa	mez kluzu
σ_1	MPa	napětí v tyči
σ_d	MPa	deformační napětí ve vzorku
σ_{dy}	MPa	dynamická mez kluzu
φ	-	logaritmická deformace

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Atest materiálu ČSN 41 7240 podle výrobce

Příloha č. 2 Užitný vzor č. 23703

Příloha č. 3 Materiálový list navrženého přípravku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Možný způsob upnutí vzorků	17
Obr. 2 Schéma zabudovaného přípravku na Hopkinsonově zařízení	18
Obr. 3 Upínací přípravek dle Gómeze a Barbera	18
Obr. 4 Detail upnutí vzorku	18
Obr. 5 Vyvození tahového zatížení na Hopkinsonově testu	19
Obr. 6 Úprava k vyvození tahové síly dle Chena a Clausena	19
Obr. 7 Mechanismus sloužící k vyvození rázové tahové síly	19
Obr. 8 Orientace odběru vzorků pro stanovení součinitele plastické anizotropie r_α ..	20
Obr. 9 Skutečná velikost vzorku M 1:1 – TAT	21
Obr. 10 Tvar vzorku před a po dopadu na tuhou desku – kovadlinu	21
Obr. 11 Schéma zařízení pro Taylorův test	22
Obr. 12 Geometrie zkušebního vzorku pro Taylorův test	23
Obr. 13 Schéma zařízení pro Hopkinsonův test	25
Obr. 14 Typický záznam z Hopkinsonova testu	25
Obr. 15 Geometrie zkušebního vzorku pro rázový (tlakový) Hopkinsonův test (vlevo) a v měřítku 1:1 (vpravo)	26
Obr. 16 Schéma pro odvození rychlosti deformace a deformace u SHPBT	26
Obr. 17 Schéma pro odvození deformačního napětí vzorku u SHPBT	27
Obr. 18 Vznik pasivační vrstvy	29
Obr. 19 Schaefflerův diagram	31
Obr. 20 Typy rovinných a prostorových prvků v MKP	35
Obr. 21 Princip vysvětlení implicitního algoritmu	36
Obr. 22 Princip vysvětlení explicitního algoritmu	38
Obr. 23 Model cestujícího při výpočtu bočního nárazu vozidla	40
Obr. 24 Možnosti využití ANSYS LS-DYNA	41
Obr. 25 Možnosti použití programu LS-PrePost	42
Obr. 26 Rozměry vzorku pro statickou zkoušku	44
Obr. 27 Graf závislosti smluvního napětí na deformaci pro materiál ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm	45
Obr. 28 EDS analýza použitého oceli dle ČSN 41 7240	46
Obr. 29 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-17	48
Obr. 30 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-18	49
Obr. 31 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-19	49

Obr. 32 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-20	50
Obr. 33 Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu pro válcové vzorky....	51
Obr. 34 Upevnění přípravku mezi vstupní a výstupní tyčí	51
Obr. 35 Detail upnutí plochého vzorku v přípravku	52
Obr. 36 Osový řez sestaveného přípravku pootočený o 90°	52
Obr. 37 Náčrtek vzorku pro Hopkinsonův tahový test (vlevo) a v měřítku 1:1 (vpravo)	53
Obr. 38 Osový řez přípravku zobrazený v prostředí LS PrePost.....	54
Obr. 39 Osový řez tahovým přípravkem v počátečním stavu	55
Obr. 40 Osový řez tahovým přípravkem během experimentu	56
Obr. 41 Osový řez tahovým přípravkem po skončení zatěžování	56
Obr. 42 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s	57
Obr. 43 Skutečná efektivní plastická deformace po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s.....	57
Obr. 44 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s	58
Obr. 45 Skutečná efektivní plastická deformace v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s.....	58
Obr. 46 Záznam z tahové zkoušky vzorku TAH 07-2 při dopadové rychlosti impaktoru 20,22 m/s.....	60
Obr. 47 Závislost skutečného průřezu vzorku na dopadové rychlosti impaktoru.....	64
Obr. 48 Graf závislosti rychlosti deformace na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240 ..	65
Obr. 49 Graf závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240	66
Obr. 50 Závislost střední rychlosti deformace na skutečném deformačním napětí ...	68
Obr. 51 Závislost dopadové rychlosti impaktoru na skutečném deformačním napětí materiálu vzorku	69
Obr. 52 Srovnání vzorků před a po provedení dynamického tahového testu.....	70
Obr. 53 Graf závislosti tažnosti na dopadové rychlosti impaktoru	72
Obr. 54 Graf závislosti kontrakce na dopadové rychlosti impaktoru.....	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Rozdělení testovacích metod podle rychlosti deformace	13
Tabulka 2: Přehled hodnot „ n “ a „ m “ ocelí a jiných druhů materiálu	15
Tabulka 3: Přehled fyzikálních vlastností korozivzdorných ocelí	31
Tabulka 4: Chemické složení oceli dle ČSN 41 7240 (X5CrNi18-8, 1.4301)	34
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti oceli dle ČSN 41 7240 (X5CrNi18-8, 1.4301).....	34
Tabulka 6: Porovnání explicitního a implicitního algoritmu.....	39
Tabulka 7: Výsledky statických tahových zkoušek oceli dle ČSN 41 7240	44
Tabulka 8: Výsledky EDS analýzy oceli dle ČSN 41 7240	45
Tabulka 9: Srovnání experimentu a simulace pro slitinu AA 5083	48
Tabulka 10: Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro slitinu AA 5083.....	48
Tabulka 11 : Fyzikální vlastnosti navrženého přípravku včetně tyčí a impaktoru	54
Tabulka 12 : Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240.....	55
Tabulka 13: Podmínky zatížení vzorků	61
Tabulka 14: Konečné rozměry vzorků po provedení experimentů	63
Tabulka 15: Vybrané vzorky s odpovídající kvalitou záznamu pro vyhodnocení.....	65
Tabulka 16: Zjištěné hodnoty pro vybrané vzorky	67
Tabulka 17: Porovnání celkových délek vzorků z experimentu a numerické simulace	70
Tabulka 18: Vyhodnocení tažnosti a kontrakce.....	71

[illegible]

UŽITNÝ VZOR

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSL OVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2012 - 25582**
(22) Přihlášeno: **06.02.2012**
(47) Zapsáno: **19.04.2012**

(11) Číslo dokumentu:

23703

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:
G01N 3/08 (2006.01)
G01N 3/28 (2006.01)

(73) Majitel:
Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ
(72) Původce:
Dohnal Ivo Ing., Příbyslavice, CZ
Forejt Milan Prof. Ing. CSc., Brno, CZ
Štais Miroslav Ing., Šlapanice, CZ
(74) Zástupce:
Ing. Libor Markes, Grohova 54/145, Brno, 60200

(54) Název užitečného vzoru:
Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu

CZ 23703 U1

Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahuOblast techniky

Technické řešení se týká přípravku k dynamickému testování materiálu v tahu na zařízení k provádění Hopkinsonova kompresního testu.

5 Dosavadní stav techniky

Standardním Hopkinsonovým kompresním testem se zjišťují dynamické vlastnosti materiálu při rázovém stlačení. Zařízení k provádění testu je tvořeno vstupní - zatěžující tyčí a výstupní - přenosovou tyčí, mezi nimiž je umístěn zkušební vzorek v podobě válečku. Impaktor - zatěžující projektil dopadá na zatěžující tyč a předává jí svou kinetickou energii. Část předané energie je spotřebována na plastickou deformaci zkušební vzorku a část přechází do výstupní tyče, která je na konci opřena o pružný blok. Známá stávající zařízení tohoto druhu jsou jednoúčelová, lze na nich provádět pouze tlakové zkoušení.

Z užitného vzoru CZ 21742 je znám přípravek, který umožňuje provádět na zařízení dynamické testování materiálu v tahu. Je tvořen trubkovitým pouzdrem, které má na jednom konci uspořádanou odnímatelnou přírubu, jež má otvory pro průchod vidlice na konci zatěžující tyče a prostředky k upevnění jednoho konce vzorku, a dále je tvořen trubkovitým kontejnerem suvně uloženým v pouzdru, který má na jednom konci prostředky k upevnění druhého konce vzorku, přičemž druhý konec pouzdra je upraven k připojení k začátku výstupní tyče. Nevýhodou tohoto přípravku, tak jak je prezentován v příkladech provedení, je, že v něm lze testovat pouze vzorky o kruhovém průřezu. Neumožňuje testovat běžné ploché vzorky, jejichž tělo má na koncích rozšířené hlavy určené k upnutí vzorku.

Technické řešení si klade za úkol navrhnout přípravek, který by rozšířil možnost testování i na vzorky o obdélníkovém nebo čtvercovém průřezu.

Podstata technického řešení

25 Uvedený úkol řeší přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu na zařízení k provádění Hopkinsonova kompresního testu tvořený trubkovitým pouzdrem, které má na jednom konci uspořádanou odnímatelnou přírubu, jež má otvory pro průchod dvou prstů vidlice vyčnívající z konce zatěžující tyče a prostředky k upevnění jednoho konce vzorku, a dále je tvořen trubkovitým kontejnerem suvně uloženým v pouzdru, který má na jednom konci prostředky k upevnění druhého konce vzorku, přičemž druhý konec pouzdra je upraven k připojení k začátku výstupní tyče. Podstata přípravku spočívá v tom, že v přírubě a v kontejneru je vytvořen průchod o obdélníkovém průřezu ke vložení vzorku, dno průchodu leží od společné osy příruby a kontejneru ve vzdálenosti v podstatě rovné polovině tloušťky vzorku, přičemž ve dně jsou na obou koncích provedena symetrická vybrání k uložení hlav a těla vzorku.

35 Objasnění obrázků na výkrese

Technické řešení bude dále objasněno pomocí výkresu, na němž obr. 1 představuje schematicky zařízení k provádění Hopkinsonova testu s připojeným přípravkem. Na obr. 2 je svislý osový řez příkladným provedením přípravku - detail A podle obr. 1, na obr. 3 je vodorovný řez přípravkem podle obr. 2 s vloženým vzorkem a na obr. 4 je ve zvětšeném měřítku vodorovný řez B-B podle obr. 2 přírubou a kontejnerem s vyjmutým vzorkem, jehož obrysy jsou naznačeny čárkovanou čarou.

Příklady provedení technického řešení

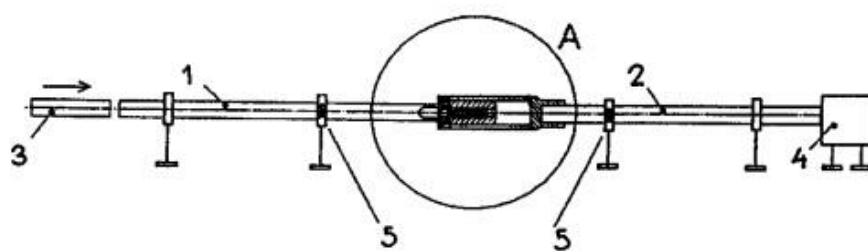
Zařízení k provádění Hopkinsonova kompresního testu je tvořeno zatěžující tyčí 1 a výstupní tyčí 2, mezi něž se ve stávajícím zařízení umísťuje vzorek materiálu určený ke stlačení. Zdrojem kinetické energie je impaktor 3, který narazí na zatěžující tyč 1 a svou energii jejím prostřednictvím předá vzorku a výstupní tyči 2 opírající se o pružný blok 4. Napětí v obou tyčích 1, 2 monitorují kapacitní snímače 5. V provedení podle obr. 2 je mezi tyče 1, 2 namísto vzorku určeného ke stlačení vložen přípravek tvořený trubkovitým pouzdrem 6 nasunutým svojí objímkou na začátek výstupní tyče 2, na jehož konci je uspořádána odnímatelná příruba 7, jež má otvory pro průchod dvou prstů vidlice 8 vyčnívající ze zatěžující tyče 1. Přípravek je dále tvořen trubkovitým kontejnerem 9 vzorku 10. Kontejner 9 je suvně uložen v pouzdru 6. V přírubě 7 a v kontejneru 9 je vytvořen průchod 11 o obdélníkovém průřezu ke vložení vzorku 10. Dno 12 průchodu 11 leží od společné osy o příruby 7 a kontejneru 9 ve vzdálenosti v podstatě rovné polovině tloušťky t vzorku 10, přičemž ve dně 12 jsou na obou koncích provedena symetrická vybrání 13 o hloubce t k uložení hlav a těla vzorku 10.

Impaktor 3, který je urychlen v pneumatickém kanónu, dopadá rychlostí změřenou průletem mezi dvěma fotodiodami na zatěžující tyč 1. Tou se šíří tlakový napěťový pulz rychlostí zvuku v kovu a je zaznamenán kapacitním snímačem 5. Na rozhraní zkušebního vzorku se část napěťového pulzu odráží zpět a část se přenesla na kontejner 9, ve kterém je ukotven jeden konec zkušebního vzorku 10. Druhý konec vzorku 10 je ukotven v přírubě 7. Tahové napětí zkušebního vzorku 10 se přírubou 7 přenáší jako tlak na pouzdro 6 a výstupní tyč 2. Zbylá část, nyní již opět tlakového napěťového pulzu prochází do výstupní tyče 2 a je zaznamenána druhým kapacitním snímačem 5.

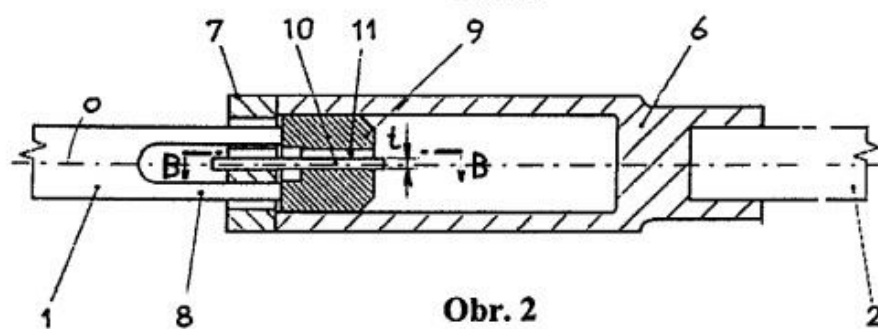
Navržený přípravek umožňuje rychlé a nákladově nenáročné rozšíření funkce upraveného zařízení k provádění Hopkinsonova kompresního testu. Na zařízení vybaveném popsáním přípravkem tak lze provádět dynamické tahové testy plochých vzorků s možností snímání a přesnějšího vyhodnocování napěťových pulzů.

NÁROKY NA OCHRANU

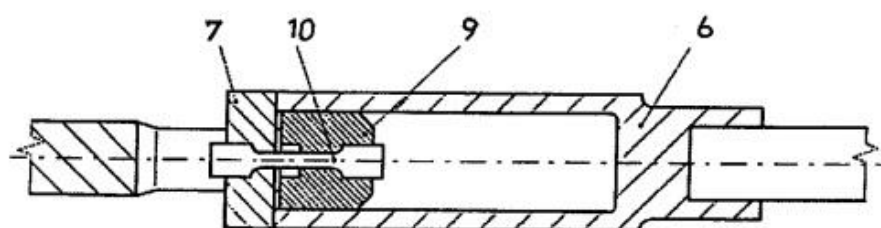
1. Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu na zařízení k provádění Hopkinsonova kompresního testu tvořený trubkovitým pouzdrem, které má na jednom konci uspořádání odnímatelnou přírubu, jež má otvory pro průchod dvou prstů vidlice vyčnívající z konce zatěžující tyče a prostředky k upevnění jednoho konce vzorku, a dále je tvořen trubkovitým kontejnerem suvně uloženým v pouzdru, který má na jednom konci prostředky k upevnění druhého konce vzorku, přičemž druhý konec pouzdra je upraven k připojení na začátek výstupní tyče, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že v přírubě (7) a v kontejneru (9) je vytvořen průchod (11) o obdélníkovém průřezu ke vložení vzorku (10), dno (12) průchodu (11) leží od společné osy (o) příruby (7) a kontejneru (9) ve vzdálenosti v podstatě rovné polovině tloušťky (t) vzorku (10), přičemž ve dně (12) jsou na obou koncích provedena symetrická vybrání (13) k uložení hlav a těla vzorku (10), jejichž hloubka se v podstatě rovná tloušťce (t) vzorku (10).



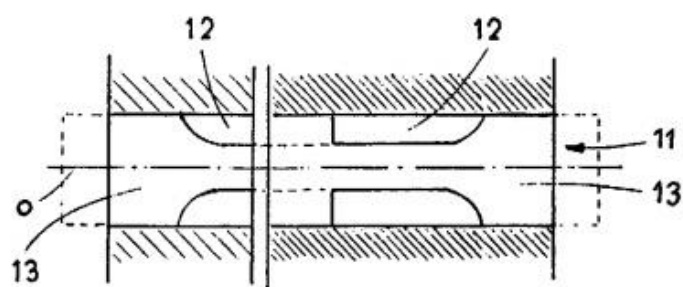
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4

Konec dokumentu

Příloha č. 3 Materiálový list navrženého přípravku



TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY

Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004

Strana: 1 z 1

Dodavatel: TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.
Třinec - Staré Město, Průmyslová 1000, PSČ 739 70

IČO: 18050646

Číslo zakázky a položky: 3300060099 / 000010		Číslo objednávky: 364547/1		Číslo atestu: 2007/07/000441				
Název výrobku Rozměr	Délka	Tolerance	Dod. stav	DTP Značka oceli Norma	TP/TDP Kód zk. Rozměrová norma			
Typce kruhové 82 - 99 70	3-6		30	4016 13240 ČSN 413240	ČSN 420220.65 200 ČSN 42 5510/1-A.11			
Č. vagonu-auta	Ložní list	Tavba	Kruhy/Ks	Svazky	Hmotnost			
2154-5543360-1	3907002391	T28284	0	2	3.872			
Celkem:					3.872			
Chemická analýza taveniny (%)								
Tavba	Hmotnost	C	MN	SI	P	S	CU	CR
T28284	3872	0.38	1.19	1.20	0.012	0.007	0.03	0.06
BO-ingot		NI	AL_sol	MO	TI	ZR		
		0.02	0.029	0.007	0.0049	0.002		
Mechanické a další zkoušky								
Pevnost v tahu: Tavba St.Vz. M.kluzu(MPa) M.pevn.(MPa) Taž05(%) Taž10(%) Kontr(%)								
T28284 .60 769 872 22,4 63,9								
761 879 22,0 60,6								
Zkoušeno na zušlechťených vzorcích o průměru 10 mm.								
Tvrdość podle Brinella: TAVBA ST.ZK.VZ: STUPEŇ TVRDOSTI								
T28284 .30 178 - 179								
Zkouška razení v ohybu při 20°C:								
TAVBA ST.ZK.VZ. TYP VRUBU NÁRAZ. PRÁCE (J) VRUB. HODĚ. (J/CM2)								
T28284 .60 U 71,4 142,7								
U 74,9 149,7								
U 70,0 140,0								
OCEL JE VAKUOVANÁ								
Rozsah uvedených údajů odpovídá předpisu zakázky. Dodaný materiál odpovídá předpisu zakázky Dodržena radioizotopická aktivita taveb. vzorku - max. 100 BQ/KG.								
 Miroslav Ručka independent authorized agent unabhängiger berater/Verreter/ nezávislý oprávněný zástupce								

Odesílatel: TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., 739 70 Třinec
Potvrdil: Ručka Miroslav
Funkce: vedoucí TJU

TJU - uvolňování a atesty dne: 02.07.2007
Datum: 03.07.2007