

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ brno university of technology



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF MATERIAL ENGINEERING

STANOVOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ LEHKÝCH KOVŮ A JEJICH SLITIN A KOMPOZITŮ POMOCÍ PROTLAČOVACÍCH ZKOUŠEK NA MINIATURNÍCH DISCÍCH

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHT METALS AND ALLOYS AND COMPOSITES VIA SMALL PUNCH TEST

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISORS Bc. JIŘÍ LANGER

Ing. LIBOR VÁLKA, CSc. Ing. PETR DYMÁČEK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Langer

který/která studuje v magisterském studijním programu

obor: Materiálové inženýrství (3911T011)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovování mechanických vlastností lehkých kovů a jejich slitin a kompozitů pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích

v anglickém jazyce:

Determination of mechanical properties of light metals and alloys and composites via small punch test

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích (small punch test, SPT) jsou perspektivní metodou pro stanovování mechanických vlastností materiálu. Na její standardizaci pracuje v současné době ve světě několik skupin výzkumníků a inženýrů. Cílem diplomové práce je posoudit vhodnost SPT pro zkoušky a odhad materiálových parametrů Al, Mg a jejich slitin a kompozitů s krátkými vlákny.

Cíle diplomové práce:

 vypracovat rešerši o současném stavu využití SPT pro zkoušky materiálů z Al a Mg, jejich slitin a kompozitů s krátkými vlákny

- provést experimentální měření na Al a Mg, jejich slitinách a kompozitech za pokojové a zvýšené teploty (na pracovišti ÚFM AV ČR Brno):

a)provést zkoušky při konstantní rychlosti protlačování (SPT-CDR)

b)provést krátkodobé creepové zkoušky (SPT-CF)

vyhodnotit meze pevnosti a meze kluzu ze zkoušek SPT-CDR a rychlosti creepu a doby do lomu u zkoušek SPT-CF, porovnat výsledky s konvenčními zkouškami dostupnými v literatuře
pozorovat a vyhodnotit tvar trhliny na protržených vzorcích a příčného řezu vybraných vzorků

- popsat výhody a úskalí metody SPT pro zkoušky mechanických vlastností zkoumaných materiálů

Seznam odborné literatury:

[1] CWA 15627, Small Punch Test Method for Metallic Materials. Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, Documents of CEN WS21, Brusselles, 2007.

[2] G.E. Lucas: The development of small specimen mechanical test techniques, Journal of Nuclear Materials, Volume 117, July 1983, Pages 327-339

[3] S.D. Norris and J.D. Parker: Deformation processes during disc bend loading, Material Science and Technology Feb. 1996 Vol. 12 pp. 163-169

[4] K. Milička, F. Dobeš: Small punch testing of a magnesium alloy and its composite, Tenth European Conference on Composite Materials (ECCM-10), June 3-7, 2002, Brugge, Belgium [5] K. Milička, Z. Trojanová, F. Dobeš, P. Lukáč: Application of small punch tests in the determination of mechanical properties of magnesium alloys and composites, Euromat 2001, Rimini, paper 247

Vedoucí diplomové práce: Ing. Libor Válka, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc. Ředitel ústavu doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. Děkan

V2.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na určování mechanických charakteristik (meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti) lehkých slitin metodou protlačovací zkoušky na miniaturních discích. Pro experimenty byly vybrány slitiny na bázi hliníku (Al 2024, Al 6082 T6, Al 7020 a NASA 398), slitiny na bázi hořčíku (MgZnMn, AZ31, AZ61) a kompozitní materiály (AZ91 + 20 % saffilu a Al + Al₄C₃).

Teoretická část práce je zaměřena na rozbor metodiky přepočtů charakteristik, získaných z protlačovací zkoušky na charakteristiky konvenční. Experimentální část práce a diskuze je věnována zpracování experimentálních dat a kritickému rozboru oborů platnosti

a použitelnosti jednotlivých přepočtových vztahů, zejména s ohledem na použitý typ materiálu. V této části práce je rovněž diskutována problematika reprodukovatelnosti metody.

ABSTRACT

The aim of diploma thesis is estimate mechanical properties (yield strength, maximum strength and elongation) of light alloys by means of SPT.

For the experiments were selected aluminium alloys (Al 2024, Al 6082 T6, Al 7020 and NASA 398) magnesium alloys (MgZnMn, AZ31, AZ61) and composites (AZ91 + 20 % saffilu a Al + Al_4C_3).

Theoretical part of this thesis is focused on analysis of conversion formulas, which were made from SPT data and conventional testing. Experimental part is dedicated to evaluation

of experimental data and critical analysis validity of conversion formulas. In this part of thesis is discused the problematics of reproducibility methodology of SPT.

KLÍČOVÁ SLOVA

protlačovací zkouška na miniaturních discích, slitiny lehkých kovů, zkouška tahem, konstantní rychlost posuvu, tažnost materiálu, přepočtové vzorce

KEYWORDS

Small Punch Test, light alloys, tensile test, constant displacement rate, elongation of the material, conversion formulas

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LANGER, J. Stanovení mechanických vlastností lehkých kovů a jejich slitin a kompozitů pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 71 s. Vedoucí práce Ing. Libor Válka, CSc. a Ing. Petr Dymáček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího diplomové práce a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne

PODĚKOVÁNÍ

Diplomová práce vznikla s využitím zázemí Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. a za podpory projektu č. CZ.1.07/2.3.00/20.0214 "Rozvoj lidských zdrojů ve výzkumu fyzikálních a materiálových vlastností modelových, nově vyvíjených a inženýrsky aplikovaných materiálů", poskytnutého Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Poděkování patří i mým vedoucím, pánům Ing. Liboru Válkovi, CSc. a Ing. Petru Dymáčkovi Ph.D., za jejich cenné rady, ochotu a velkou porci trpělivosti, kterou prokázali při realizaci této diplomové práce.

Též bych rád poděkoval za zázemí, které mi bylo poskytnuto M^a Cristinou Rodríguez Gonzálezovou na katedře materiálových věd na Universidad de Oviedo, Gijon, Španělsko a mému tamějšímu mentorovi Tomásu Eduardo García Suárezovi za možnost seberealizace a rozšíření diplomové práce o další experimentální data.

V neposlední řadě velký dík patří paní Ing. Natálii Luptákové, Ph.D. za její připomínky a vyhotovení fraktografických snímků na REM na ÚFM AV ČR v Brně.

CÍLE PRÁCE

Cílem práce je posoudit vhodnost využití metody Small Punch Test (SPT) pro zkoušky a odhad materiálových parametrů Al, Mg a jejich slitin a kompozitů s krátkými vlákny.

V návaznosti na rešerši o současném stavu využití metody SPT při studiu vlastností uvedených typů materiálů provést experimentální měření na Al a Mg, jejich slitinách a kompozitech za pokojové a zvýšené teploty při konstantní rychlosti protlačování. Ze získaných experimentálních dat vyhodnotit meze pevnosti a meze kluzu a výsledky porovnat s hodnotami odpovídajících charakteristik zjištěných konvenčními zkouškami, primárně zkouškou tahem. Do experimentální části práce zahrnout pozorování a vyhodnocení tvarů trhlin na protržených vzorcích a příčných řezech porušenými zkušebními tělesy.

Popsat výhody a omezení metody SPT pro experimentální určení materiálových charakteristik výše uvedených typů materiálů.

OBSAH

ÚVOD	3
1 TEODETICK i \dot{c} is t	4
1. IEUKEIICKA CASI	
1.1. Nedestruktivní odběr materialu – odběr, priprava vzorku	4
1.1.1. Princip mechanickeno obrusovani [2]	
1.1.2. Princip elektrojiskroveno rezani $[2]$	
1.1.3. Priprava zkusebnino telesa	
1.2. Penetracni zkouska – princip a rozdeleni metody	
1.3. Popis zaznamu sila-průhyb při SPI	9
1.4. Stanoveni parametru ze zavislosti sila P – prunyb u	13
1.5. Porovnani SPT se zkouškou tanem	14
1.5.1. Stanoveni standardnich materialových charakteristik z vysledku SPT	
1.5.2. Přepočet na mez kluzu	15
1.5.3. Přepočet na mez pevnosti	15
1.5.4. Přepočet tažnosti materiálu	16
1.6. Vliv externích a interních faktorů na metodu SPT	17
1.6.1. Vliv velikosti a materiálu penetrační kuličky	
1.6.2. Vliv rychlosti zatěžování	
1.6.3. Vliv tloušťky zkušebního tělesa	19
1.6.4. Vliv úkosu hrany otvoru dolní matrice a průměru otvoru dolní matrice	20
1.6.5. Vliv drsnosti povrchu	20
1.6.6. Vliv okolního tlaku	21
1.6.7. Vliv zatížení od horní matrice při fixaci vzorku	21
1.7. Rozbor prací, zabývajících se SPT slitin lehkých kovů (Al, Mg)	22
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
2.1. Experimentální zařízení	
2.2. Počítačové simulace	
2.3. Experimentální materiál	
2.4. Příprava vzorků	37
2.5. Experimentální výsledky	37
2.5.1. SPT za pokojové teploty	
2.5.2. SPT za vyšších teplot	41
2.6. Přepočtové rovnice na mez kluzu a mez pevnosti	42
2.7. Přepočtové rovnice pro tažnost materiálu	50
3. DISKUZE	52
3.1. Porovnání přepočtových rovnic	
3.2. Výběr vhodných normalizačních členů	54
3.3. Reprodukovatelnost metody	55
3.4. Porovnání přepočtených napěťových charakteristik s charakteristikami určen	ými
experimentálně	57
4. ZÁVĚR	62
LITERATURA	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	67
SEZNAM OBRÁZKŮ	68
SEZNAM TABULEK	71
SEZNAM PŘÍLOH	72

ÚVOD

Při vývoji nových komponent je snahou co nejpřesněji stanovit dobu, po kterou komponenta správně vykonává svoji stanovenou funkci. Tato doba je nazývána provozní životnost součásti a během ní musí být daná součást provozuschopná.

Životnost součásti je závislá na mnoha faktorech, mezi které zahrnujeme chemické složení a strukturu použitého materiálu, výrobní proces, samotný tvar (geometrii) komponenty, prostředí a v neposlední řadě provozní podmínky. Při určité kombinaci těchto faktorů obdržíme komponentu o námi požadovaných vlastnostech [1].

Celá řada výše uvedených faktorů se však za provozu může měnit a ne vždy je životnost z toho důvodu dobře odhadnuta. Proto jsou často vyžadovány pravidelné kontroly a údržba, aby bylo možné předejít poruchám a haváriím, např. z důvodu degradace materiálu. Pro určení mechanických vlastností materiálu komponent jsou v současné době používány obvykle destruktivní zkoušky, které vyžadují velké množství materiálu pro provedení daných experimentů. Trendem je tuto spotřebu materiálu snížit, tedy co nejvíce minimalizovat velikost odebíraných vzorků. Pokud je komponenta uzpůsobena pro odběr vzorků, k odstávce zařízení obsahující danou součást nemusí dojít a vzorek se odebere přímo za provozu, čímž dojde ke snížení ztrát, které by vznikly z důvodu nečinnosti zařízení [1,2,3].

Od 80. let minulého století je ve vývoji nová metoda testování vzorků, nazvaná Small Punch Test (dále jen jako SPT). V české literatuře je uvedený název překládán jako protlačovací zkouška na miniaturních discích. Byla vyvinuta v USA a je často užívána v energetickém průmyslu pro stanovení úrovně radiačního zkřehnutí materiálů. Metodu SPT v oblasti mechanického chování materiálů následně rozvíjela řada odborníku z Japonska, Velké Británie, Holandska, Španělska a České republiky [1,2,4,5].

Dnes, díky počítačem řízené technice a přesným měřicím přístrojům, je možné díky SPT měřit celou řadu materiálových charakteristik, např. mez kluzu, mez pevnosti, creepové charakteristiky, lomovou houževnatost apod. [1,2].

Výhodou metody je velikost zkušebního tělesa, mnohdy nepřesahující plochu 10mm² a proto je vhodná pro stanovení mechanických vlastností materiálů v případech, kdy není k dispozici dostatečné množství materiálu pro výrobu klasických zkušebních těles (malé komponenty a součásti, tepelně ovlivněné oblasti svarů atd.) [1,2].

Metoda SPT není doposud normalizována. O první sjednocení zkoušky se pokusila Evropská komise pro standardizaci (*European Committee for Standardization - CEN*) se sídlem v Bruselu, která vydala v roce 2007 dokument Metodika zkoušení kovových materiálů pomocí protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (*Small Punch Test Method for Metallic Materials*) [6], ve kterém jsou doporučeny podmínky pro testování metodou SPT. Dokument obsahuje doporučení, týkající se geometrie zkušebních těles, experimentálního zařízení, podmínek zkoušení a metodiky vyhodnocování experimentálních dat.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Nedestruktivní odběr materiálu – odběr, příprava vzorku

Penetrační zkouška SPT je považována za nedestruktivní zkoušku, protože je odebíráno malé množství materiálu z komponenty, obvykle bez narušení její integrity [2,6]

Pro odběr materiálu z komponent je užíváno dvou principů:

- mechanické obrušování
- elektrojiskrové řezání

1.1.1. Princip mechanického obrušování [2]

Odběr vzorku je uskutečněn odbroušením části, u které chceme znát mechanické chování, pomocí rotujícího nástroje, viz obr. 1. Zařízení funguje na principu pákového mechanismu, jež je malou rychlostí posouváno do záběru. Je minimalizováno tepelné či deformační namáhaní odebíraného vzorku, odebíraný materiál je po dobu odběru chlazen vodou.



Obr. 1 Odběr vzorku na principu mechanického odbrušování [2]

1.1.2. Princip elektrojiskrového řezání [2]

Odběr materiálu je uskutečněn selektivním odtavováním malých částic materiálu. Ukázka jednoho z možných zařízení pro elektrojiskrové řezání je na obr. 2 [2].



Obr. 2 Odběr vzorku na principu elektrojiskrového řezání [2]

1.1.3. Příprava zkušebního tělesa

Z odebraného materiálu se připravují vzorky diskového či čtvercového tvaru. Aby nedošlo na povrchu zkušebního vzorku k větší deformaci, je zkušební těleso postupně zbroušeno na CEN [6] doporučenou tloušťku $h_0 = 0,500\pm0,005$ mm. U zkušebního tělesa je doporučeno tloušťku měřit v intervalech 90° po obvodu pro zajištění požadovaného rozměru.

1.2. Penetrační zkouška – princip a rozdělení metody

Základním principem SPT je průnik penetrátoru do zkušebního tělesa až do jeho porušení. Při zkoušce je zaznamenávána síla vyvolaná penetrátorem a průhyb zkušebního tělesa [2]. Z této závislosti jsou vyhodnoceny charakteristické veličiny, ze kterých se následně stanovují mechanické parametry známé z konvenčních zkoušek, např. mez pevnosti, mez kluzu, creepové charakteristiky, lomová houževnatost aj.[2]

Penetrační zkoušky je možné podle způsobů jejich provedení rozdělit do několika skupin [6].

Podle časové závislosti zkoušky lze SPT rozdělit na

- časově závislé konstantní zatížení (Constant Force, CF)
 - Zkouška probíhá za zvýšených teplot a může být použita inertní či jiná atmosféra. Zatížení působící na zkušební těleso je neměnné. Aby zkouška simulovala standardní creepovou zkoušku, je zátěž (velikost síly) přepočtena tak, aby bylo dosaženo stejného času do porušení jako v případě klasické creepové zkoušky. Vyhodnocuje se závislost průhyb – čas do porušení;

• časově nezávislé - konstantní rychlost posuvu (Constant Displacement Rate, CDR) Zkouška je analogií tahové zkoušky. Zkouška může probíhat jak při zvýšených, tak snížených teplotách. Vyhodnocuje se závislost síla – průhyb.

Podle způsobu upnutí vzorku rozeznáváme

- Bulge punch test vzorek je sevřen mezi horní a dolní matricí
- Punch drawing test zkušební těleso je volně položeno na dolní matrici

Podle teploty během zkoušení [6,7] hovoříme o

- SPT za nízkých (kryogenních) teplot;
- SPT za pokojových teplot;
- SPT za zvýšených teplot.

Podle typu razníku rozdělujeme SPT na

kuličkové penetrační testy (ball punch test), penetrátorem je kulička. Zkušební těleso je v průběhu zkoušky sevřeno mezi horní a dolní matrici. Kulička je z tvrzené oceli či keramiky, rychlost zatěžování je doporučena [6] v intervalu 0,2-2 mm/min. Poloměr kuličky by podle [6] měl být *r*=1 až 1,25 mm, tloušťka zkušebního tělesa 0,500 + 0,005 mm. Sražení hrany dolní matrice je doporučeno na 2 mm × 45°. Test je vhodný pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti. Schéma přípravku je na obr. 3.



Obr. 3 Zkušební přípravek pro ball punch test

 střihové penetrační testy (shear punch test), penetrátorem je kruhový razník. Zkušební těleso je v průběhu zkoušky sevřeno mezi horní a dolní opěrnou matrici. Na rozdíl od kuličkového testu je vzorek deformován v malé oblasti odpovídající oblasti vůle mezi razníkem a přítlačnou matricí. Obr. 4 zobrazuje teoretický průběh střihu zkušebního tělesa.



Obr. 4 Teoretický průběh deformace při smyku střihovém penetračním testu

• ohybové penetrační testy (disc bend test), penetrátorem je kuželový razník. Zkušební těleso tvaru disku nebo čtverce je volně položeno na opěrné matrici, viz obr 5. Test je vhodný pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti.



Obr. 5 Schéma ohybového penetračního testu

V předložené diplomové práci bude uvažován pouze "ball punch test", tj. kuličkový penetrační test v uspořádání schematicky znázorněném na obr. 6.



Obr. 6 Schéma zkoušecího zařízení SPT, upraveno podle [10] *r* - poloměr penetrační kuličky; *h*₀ - tloušťka vzorku; *R* - poloměr sražení spodní matrice; *d* - průměr otvoru horní matrice; *c* – vůle vymezená mezi kuličkou a spodní matricí; *D* - průměr otvoru dolní matrice; *d*₀ - počáteční průměr zkušebního vzorku

Jak je zřejmé z obr. 6, SPT spočívá v penetraci kuličky do zkušebního tělesa o velikosti jednotek milimetrů, viz obr. 7. Při zkoušce je zaznamenáván průběh závislosti síla-průhyb.



Obr. 7 Typické tvary a rozměry zkušebních těles pro SPT (a) kruhový, (b) čtvercový

1.3. Popis záznamu síla-průhyb při SPT

Typická závislost síly na průhybu zkušebního tělesa, se kterou se setkáváme při penetrační zkoušce, je uvedena na obr. 8.

Závislost síla-průhyb je rozdělena do šesti oblastí, přičemž jednotlivé úseky jsou ohraničeny inflexními body křivky [7].



Obr. 8 Závislost síla-průhyb pro tažné materiály při SPT při konstantní rychlosti průhybu (Constant Displacement Rate) a při pokojové teplotě, upraveno podle [8]

$P_{\rm y}$	[N]	síla na mezi kluzu,
$\dot{P_{\rm m}}$	[N]	síla na mezi pevnosti,
P_{f}	[N]	lomová síla, smluvně definovaná jako 80% $P_{\rm m}$ ($P_{\rm f} = 0.8 P_{\rm m}$)
um	[mm]	průhyb při maximálním zatížení <i>P</i> _m ,
u_{f}	[mm]	průhyb v okamžiku lomu.
E^{SP}	[J]	Celková lomová energie

Hodnoty průhybů u_m a u_f odpovídají hodnotám maximální síly P_m a lomové síly P_f .

Oblast I - oblast elastických deformací

Na zkušební těleso je vyvíjen bodový tlak od kuličky. Průběh zatěžování je lineární, vzorek vykazuje elastické chování a nedochází k plastické deformaci, viz obr. 9 [9].

V některých článcích, např. [10], je zmiňována oblast 0, kde dochází k zatlačení kuličky do materiálu.



Obr. 9 Simulace oblasti I pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,02 mm. Napětí je koncentrováno především ve středu vzorku [9]

Oblast II - oblast plastického ohybu

Zkušební těleso je ohýbáno a dochází k postupné plastické deformaci po celé jeho ploše, zatížené hemisférou kuličky. Proto je oblast označována jako plastický ohyb, viz obr. 10 [9]. Od okamžiku, kdy se tlakové napětí změní na membránové napětí, nastane zatěžování v tzv. membránovém režimu. Tento membránový režim je specifický pro oblast III [2].



Obr. 10 Simulace oblasti II pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,2 mm. Dochází k posuvu působiště max. napětí a plastickému ohybu [9]

Oblast III - oblast membrány

Tato oblast je výrazná u tvárných materiálů. V případě materiálů se štěpným mechanismem lomu je naopak nevýrazná. Oblast se vyznačuje deformačním zpevněním a nárůstem plochy vzorku v důsledku postupné penetrace kuličky. U křehkých materiálů je proto pozorována zřídka, protože k porušení zkušebního tělesa u nich dojde dříve, než se stačí projevit membránové chování [7], viz obr. 11.



Obr. 11 Simulace oblasti III pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,8 mm. Zkušební těleso vykazuje membránové chování [9]

Oblast IV - nestabilní plastická oblast

V oblasti IV dochází ke zmenšení tloušťky zkušebního materiálu a vzniká hrdlo [2], doprovázené postupným poklesem odporu materiálu vůči vnikání penetrátoru. Oblast IV končí v bodě $P_{\rm m}$ (maximum zátěžné síly), kdy dochází ke vzniku lokální plastické nestability a k iniciaci trhliny, viz obr. 12 [9].



Obr. 12 Simulace oblasti IV pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 1,5 mm. Viditelné výrazné smykové napětí soustředěné pod úhlem 45°. Vyšší napětí je taktéž pozorováno při styku dolní matrice se vzorkem – úkos hrany matrice hraje roli při určování výsledné maximální síly působící na vzorek [9]

Oblast V - oblast nestability

Začínají být okem viditelné trhliny, dochází k výraznému poklesu zátěžné síly. Povrch zkušebního tělesa nabývá tvaru "kloboučku", přičemž k lomu dochází po jeho obvodu nebo na jeho vrcholu [1,8].

Během protržení jsou pozorovány dva fenomény, viz obr. 13. Zkušební těleso je vlivem vnikání penetrátoru formováno do tvaru "čepičky" nebo do "hvězdičky", což je ovlivněno polohou největšího smykového napětí a houževnatostí materiálu. Pokud je vzorek málo tažný, tj. málo "prohnutý", soustřeďuje se smykové napětí na vrcholu kloboučku a vzniká trhlina tvaru "hvězdičky", charakteristická pro štěpný mechanismus porušení materiálu. Naopak při větších průhybech se smykové napětí soustředí do oblasti vzorku cca 45° od osy symetrie a dochází tak k šíření trhliny v tangenciálním směru, případně k oddělení materiálu vzorku ve tvaru "čepičky" [11].



Obr. 13 Rozdílný způsob šíření trhliny v závislosti na charakteru působení smykového napětí, upraveno podle [2]

Oblast VI - oblast výrazného poklesu zátěžné síly Materiál ztrácí soudržnost a schopnost odolávat vnějšímu zatížení [7].

1.4. Stanovení parametrů ze závislosti síla P – průhyb u

Pro určení charakteristických sil ze závislosti síla P - průhyb u je potřeba stanovit přechod mezi oblastí I a II, kde se nachází síla P_y . Tato síla je užívána pro výpočet meze kluzu R_e . Ze závislosti P-u je dále určována síla P_m , a to v okolí přechodu mezi oblastí IV a V. Tato síla je užívána pro přepočet na mez pevnosti R_m . Stanovit maximální sílu P_m je jednodušší, neboť leží přímo v daném inflexním bodě, viz obr. 8. Sílu na mezi kluzu P_y obvykle není možné určit jednoznačně, proto bylo navrhnuto několik postupů pro její stanovení. Nejčastěji jsou používány následující postupy pro stanovení síly na mezi kluzu.

 P_{y_Mao} : Mao a Takahashi [4] navrhli metodu dvou tangent. Spočívá v proložení lineárních částí závislosti *P-u* v oblastech I a II přímkou. V místě protnutí obou přímek lze na silové ose závislosti *P-u* určit hodnotu P_y .

 P_{y_CEN} : v návrhu CEN [6] je postup Mao a Takahashiho upraven. Hodnota síly P_y je stanovena z průmětu síly P_{y_Mao} do x-ové osy závislosti *P-u*. Síla P_y je stanovena z průsečíku průmětu s grafem závislosti *P-u*.

 $P_{y_h0/10}$, $P_{y_h0/100}$: tzv. offset metoda [1] vychází z klasické metodiky určení smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. Při stanovení síly je proložena lineární oblast záznamu přímkou a následně je určena rovnoběžka s posunutím o velikosti $h_0/10$ nebo $h_0/100$. Hodnota P_y je určena průsečíkem grafu závislosti P-u s danou rovnoběžkou.

 P_{y_INF} : Relativně nový postup, navržený Lacalem [12]. Síla P_y je určena v místě odchýlení přímky proložené lineární částí záznamu od křivky závislosti síla-průhyb, tedy v místě prvního inflexního bodu mezi oblastmi I a II.

Všechny výše uvedené způsoby určení síly P_y jsou schematicky znázorněny v obr. 14.



Obr. 14 Určení síly P_{y} , upraveno podle [1]

1.5. Porovnání SPT se zkouškou tahem

Na rozdíl od zkoušky tahem, kdy je vzorek zatěžován jednoosým tahovým namáháním, je vzorek při SPT namáhán (při penetraci kuličky do zkušebního vzorku) tlakem. Zkouška pomocí protlačování miniaturních vzorků se odlišuje od konvenční tahové zkoušky stavem napjatosti. Na rozdíl od jednoosé napjatosti při zkoušce tahem působí při SPT víceosá napjatost už od počátku zatěžování. Dále se projevuje tzv. plastický ohyb. Vzniká při dvouosé napjatosti, dochází k nárůstu deformačního zpevnění. V pozdějších stádiích zkoušky se objevuje případ napjatosti, která je označována jako membránová, viz obr. 15. Tento membránový režim je způsoben dominantní radiální deformací. Proto je potřeba při modelování využít jiného výpočtového postupu než u konvenční zkoušky. Problém je v tom, že tenký vzorek je roztahován hemisférou kuličky podobně jako v případě takzvaného "cup testu". Tahové napětí pro neaxiální zatížení popisuje Drucker-Pragerův model [10]. Byl doposud použit pouze pro feritické oceli (2.25Cr-1Mo a 1Cr-0,5Mo), ovšem mohl by být použitelný i pro určení neaxiálního zatížení na jiných materiálech [10].



Obr. 15 Ukázka membránového režimu, upraveno podle [6] h – okamžitá tloušťka vzorku; d_k – průměr plochy razníku, který je ve styku se vzorkem; u – okamžitý průhyb vzorku; r – poloměr razníku; h_0 – tloušťka vzorku; d_0 – počáteční průměr vzorku

1.5.1. Stanovení standardních materiálových charakteristik z výsledků SPT Z charakteristik určených pomocí SPT nelze přímo určit hodnoty meze kluzu, meze pevnosti či hodnoty tažnosti, jako je tomu v případě klasických zkoušek. Pro zjištění uvedených materiálových charakteristik se užívá přepočtových vztahů, založených na porovnání sil či průhybů (určených ze závislosti P-u) s napěťovými nebo deformačními charakteristikami, stanovených zkouškou tahem. Přepočet na mez kluzu, mez pevnosti či tažnosti se nejčastěji provádí určením regresních parametrů přímky, proložené souborem experimentálních dat [13]

$$Z = a \cdot \frac{Y}{X} + b \tag{1}$$

kde *a* a *b* jsou regresní parametry přímky získané ze závislosti Y/X na Z.

X v rov. (1) je porovnávací parametr, jehož účelem je zohlednit vliv geometrie zkušebního tělesa a zkušebního přípravku. Y je síla stanovená ze závislosti P-u.

Podíl parametrů *Y/X* představuje normalizační člen, který hraje významnou roli při volbě typu přepočtové rovnice.

Otázkou je, na jakém základě by měl být založen výběr materiálů pro určení přepočtové rovnice (1), tj. zda je výhodnější zahrnout do souboru dat materiály o podobném chemickém složení, materiály se stejnými lomovými mechanismy nebo pro výběr nalézt nějaké jiné kritérium.

1.5.2. Přepočet na mez kluzu

Aby bylo možné provést přepočet na mez kluzu R_e , je zapotřebí znát hodnotu síly P_y . Nejčastěji používané přístupy pro stanovení síly P_y , jsou shrnuty v kapitole 2.4.

Za porovnávací parametr X v rovnici (1) je dosazena tloušťka vzorku h_0^2 , za parametr Y síla P_y . Existuje více porovnávacích parametrů pro přepočet na mez kluzu, nejčastěji používané jsou uvedeny v tab. 1

$$R_e = \alpha_1 \cdot \frac{P_y}{h_0^2} + \alpha_2 \tag{2}$$

Tab. 1 Výběr porovnávacích parametrů pro určení R_e

Mao a Takahashi [4]	h_0^2
Purmenský a Matocha [1]	U U
Norris a Parker [5]	$2,19{h_0}^2$

1.5.3. Přepočet na mez pevnosti

Způsob stanovení síly P_m , potřebné pro výpočet meze pevnosti R_m , je na rozdíl od určení síly P_y jednoznačný (viz obr. 8). Stejně jako v předchozím případě ovšem existuje několik přístupů ke stanovení porovnávacího parametru, viz tab. 2.

Tab. 2 Výběr porovnávacích parametrů pro určení $R_{\rm m}$

Mao a Takahashi [4]	h_0^2 nebo h_0
Purmenský a Matocha [1]	$h_0 \cdot u_m$
Norris a Parker [5]	$h_0^2 (4,38r - 0.9c + 0.56)$
Sanders [13]	$-2\pi \cdot r^2 \cdot \cos\left[2\sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{u_m}{2r}}\right) - 1\right]$

Porovnávací člen autorů Norrise a Parkera [5] zahrnuje vliv vůle c, tloušťky vzorku h_0 a průměr razníku 2r (viz obr. 6).

Porovnávací člen od Sanderse [13] představuje plochu kuličky S_k , která je ve styku se zkušebním tělesem.

Ačkoliv je v literatuře nejčastěji používaným přepočtovým vztahem vztah [1, 4]

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{P_m}{h_0^2} + \beta_2, \qquad (3)$$

bylo zjištěno, že maximálnímu zatížení lépe vyhovuje výraz obsahující pouze parametr h_0 , nikoli h_0^2 [1], tedy

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{P_m}{h_0} + \beta_2. \tag{4}$$

Nejnovější poznatky [14] ukazují mnohem lepší výsledky s použitím parametru u_m , tj. průhybu při maximální síle

$$R_m = \beta_1 \cdot \frac{P_m}{h_0 \cdot u_m} + \beta_2. \tag{5}$$

V rovnicích (3)-(5) jsou β_1 a β_2 regresními parametry přímky a u_m je průhyb při maximální zátěžné síle. Zavedením parametru u_m se do výpočtu nepřímo zahrnuje vliv zmenšení tloušťky vzorku v průběhu SPT (ztenčení vzorku je tím větší, čím větší je u_m) [1].

1.5.4. Přepočet tažnosti materiálu

Pro stanovení tažnosti existují dva vztahy. Fleury a Ha [1] navrhli rovnici

$$A = \gamma \cdot u_m, \tag{6}$$

kde podle jejich výpočtů parametr úměrnosti nabývá hodnoty $\gamma = 7$.

Rodríguezová a spol. [15] navrhli normalizovaný vztah, ve kterém je zahrnutý i vliv tloušťky

$$A = \gamma' \cdot \frac{u_m}{h_0},\tag{7}$$

kde konstanta γ ' nabývá hodnoty 14, což při dosazení odpovídá vztahu (6), neboť doporučená tloušťka vzorku činí 0,5 mm.

1.6. Vliv externích a interních faktorů na metodu SPT

Na ukázku, jak markantní vliv při stanovování sil P_y a P_m má vliv geometrie a další faktory byly sestaveny simulace, jejichž výsledky jsou v grafické podobě uvedeny na obr. 16. Jde o simulaci vlivu různých kombinací několika externích faktorů.



Obr. 16 Ukázka vlivu externích faktorů na průběh SPT. Simulace pomocí MKP. R - rádius dolní matrice, r - poloměr kuličky, d_0 - průměr zkušebního tělesa, D - průměr otvoru dolní matrice, h_0 - tloušťka zkušebního tělesa, f - koeficient tření

1.6.1. Vliv velikosti a materiálu penetrační kuličky

Rozdílné tření v důsledku použití různých typů materiálu kuličky neprokázalo na zkušebním tělese z feritické oceli výrazné změny na záznamu P-u [16].

Naproti tomu velikost penetrační kuličky má na průběh zkoušky významný vliv. Výrazně ovlivňuje zejména velikost maximální síly. Hodnotu síly na mezi kluzu ovlivňuje méně, viz obr. 17.



Obr. 17 Vliv velikosti penetrační kuličky na průběh zkoušky. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al6082

1.6.2. Vliv rychlosti zatěžování

Změna rychlosti zatěžování má za následek změnu sklonu SPT křivky, obr. 18. Na hodnoty sil $P_{\rm m}$ a $P_{\rm y}$ nemá změna rychlosti výrazný vliv [16].

Podle [6] je doporučena rychlost zatěžování v intervalu 0,2÷2 mm (za podmínky CDR, tj. konstantní rychlosti posuvu).



Obr. 18 Vliv rychlosti zatížení na vzorek o tloušťce 250 ± 5 μm z oceli Eurofer'97, upraveno podle [16]

1.6.3. Vliv tloušťky zkušebního tělesa

Tloušťka zkušebního tělesa má výrazný vliv na průběh zkoušky a naměřené charakteristiky [16]. Obecně platí, že se zmenšující se tloušťkou klesá hodnota maximální síly P_y . Jako jeden z mála parametrů, tloušťka vzorku má vliv i na sílu P_y . Vliv tloušťky vzorku je znázorněn na obr. 19.



Obr. 19 Závislost zatížení-průhyb pro vzorky o průměru 3mm a různé tloušťce z oceli Eurofer'97, upraveno podle [16]

Bylo zjištěno, že při vhodné volbě normalizačního členu se v určitém rozpětí hodnot tloušťky po přepočtu na mez kluzu a mez pevnosti získané hodnoty výrazně neliší [1], viz obr. 20.



Obr. 20 Stanovení vhodného normalizačního členu v závislosti na tloušť ce zkušebního tělesa. Závislosti byly určeny MKP modelováním vzorků z oceli Eurofer'97, upraveno podle [1]

1.6.4. Vliv úkosu hrany otvoru dolní matrice a průměru otvoru dolní matrice

Průměr dolní matrice *D* stejně jako vůle mezi dolní matricí a kuličkou *c* (viz obr. 6) ovlivňuje průběh zatěžovací křivky v oblasti III a navyšuje maximální sílu P_m [2].

Změna velikosti úkosu hrany dolní matrice (její zaoblení) má rovněž vliv na průběh zkoušky. Čím větší je úkos (zaoblení), tím nižší je maximální síla P_m , viz obr. 21.



Obr. 21 Vliv velikosti zaoblení hrany dolní matrice na průběh zkoušky. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al 6082

1.6.5. Vliv drsnosti povrchu

Z výsledků uvedených v práci [13] je patrné (obr. 22), že v rozsahu drsnosti povrchu 0,450 μm až 3,011 μm je možné vliv drsnosti povrchu zkušebního tělesa zanedbat.



Obr. 22 Závislost síla-průhyb pro vzorky s odlišnou drsností povrchu z materiálu Al 3003-H14, upraveno podle [13]

1.6.6. Vliv okolního tlaku

V práci [16] bylo prokázáno, že tlak okolí nemá pozorovatelný vliv na průběh SPT. Porovnání měření za normálního tlaku s měřeními ve vakuu vykázalo pouze nepatrné rozdíly, viz obr. 23.



Obr. 23 Vzorek o průměru 3 mm a tloušťce 250 ± 5 μm z oceli Eurofer'97, zatěžovaný za různého tlaku okolí, upraveno podle [16]

1.6.7. Vliv zatížení od horní matrice při fixaci vzorku

Na univerzitě ve Španělsku byla provedena simulace, kdy se do vzorku o průměru 8 mm a tloušť ce 0,500 mm vtlačila horní matrice. Vzorek se mírně deformoval vlivem posuvu *l* horní matrice do vzorku. To vyvolalo zvýšení napětí a ovlivnilo tak průběh zkoušky, zejména v oblasti II a III.

Při malé hodnotě *l* bylo zaznamenáno zvýšení P_y a nepatrné ovlivnění P_m . Při větších hodnotách *l* bylo zaznamenáno snížení P_y a zvýšení síly P_m , viz obr. 24.



Obr. 24 Vliv vtlačení horní matrice do vzorku. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al 6082. Parametr *l* představuje velikost zapuštění (vtlačení) horní matrice do vzorku

1.7. Rozbor prací, zabývajících se SPT slitin lehkých kovů (Al, Mg)

V práci [13] se autor zabývá porovnáním vlastností hliníkových slitin (Al 1100, Al 3003, Al 2024, Al 2618 a Al 7075). Ze souboru experimentálních dat pro uvedené slitiny byla určena přepočtová rovnice pro mez pevnosti.

Výsledná závislost meze pevnosti na hodnotě maximální síly $P_{\rm m}$ je uvedena na obr. 25.



Obr. 25 Graf závislosti maximální síly P_m z SPT a meze pevnosti, zjištěné zkouškou tahem, upraveno podle [13]

Regresní přímka z obr. 25 má tvar

$$\sigma_m = 1,145 \cdot P_m - 13,28. \tag{8}$$

Autor práce [13] označil regresní parametr přímky 1,145 v rov. (8) jako materiálovou charakteristiku vztaženou k pevnosti meziatomových sil specifických pro hliník. Autor taktéž předpokládá, že pro různé skupiny materiálů (o stejném složení matrice) existuje rozdílný parametr β_1 pro přepočet na mez pevnosti.

To vysvětluje rozdílnost parametrů β_i , které byly stanoveny na ocelích. Jako první byl tento parametr β_i navrhnut Mao a Takahashim [4].

Další autorův návrh přepočtové rovnice zahrnuje přepočtový parametr $X=S_k$ [13]. Normalizační člen je v přepočtovém vztahu poté chápán jako působící napětí v místě kontaktu kuličky se vzorkem, jak je možné vidět na obr. 26.



Obr. 26 Stanovení přepočtové rovnice pro mez pevnosti, upraveno podle [13] osa x - napětí P_m/S_k ; osa y – σ_m mez pevnosti naměřená tahovou zkouškou

Kontaktní plochu kuličky lze určit pomocí vztahu

$$S_{k} = -2\pi \cdot r^{2} \cdot \cos\left[2\sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{u_{m}}{2r}}\right) - 1\right],\tag{9}$$

kde $u_{\rm m}$ je průhyb při maximální síle a r je poloměr penetrační kuličky.

Výsledná rovnice z obr. 26 ve tvaru

$$\sigma_m = 3.18 \cdot \frac{P_m}{S_k} - 1.29 \tag{10}$$

je podle autora práce [13] ekvivalentní vztahu, který Mao a Takahashi [4] určili pro ocele a lépe vyhovuje pro přepočet materiálových charakteristik v případě hliníkových slitin. Ve stejné práci, tj. [13] je uveden rozbor vlivu vodíku na mechanické vlastnosti studovaných slitin. Obr. 27 obsahuje porovnání zatěžovacích křivek síla P – průhyb u pro navodíkovaný a nenavodíkovaný vzorek.



Obr. 27 Závislost síla-průhyb SPT pro vzorek *d*₀=3mm a) materiál Al 3003-H14 , b) materiál Al 2618-T61 (oba s vodíkem a bez vodíku) [13]

Na křivkách SPT je znázorněn rozptyl hodnot z jednotlivých měření více zkušebních vzorků. Výsledky jsou souhrnně uvedeny v tab. 3.

	5 5	1	LJ	
	Rozdíl mezi vzorky, které	Oblast pod	Průměrná max síla	Průhyb při maximální
Matariál	byly nebb nebyly ovnvneny	кнукой	max. sna	шалтпатт
Material	vodíkem	SPT		síle
	[%]	[J]	[N]	[mm]
Al 3003-H14	8,52	0,078	170,69 + 2,77	0,63
Al 2618-T61	11,73	0,0095	328,92 + 1,39	0,45

Tab. 3 Výsledky z SPT testů při navodíkování [13]

Autor konstatuje, že nebyla pozorována výraznější změna v lomovém chování. Pomocí fraktografické analýzy nebyla rozpoznána přítomnost vodíku, průběh SPT nebyl ovlivněn vodíkovou křehkostí [13].

Jiné práce jsou věnovány rozboru lomového chování slitiny Al 2024, zpracované technologií ECAP [17, 18]. Uvedené studie jsou zajímavé tím, že k přepočtu mechanických parametrů nepoužívají přepočtovou rovnici stanovenou z regresní analýzy experimentálních dat, ale určují vztah na základě modelování MKP a matematického modelu, založeného na obr. 28.



Obr. 28 Napěťové a geometrické poměry na styku penetrátoru a vzorku při uvažování vlivu smykového napětí [17]

Autoři předpokládají anizotropní chování materiálu, a proto při stanovení přepočtové rovnice pro mez pevnosti uvažují směr L a T. Srovnávají hodnoty z tahové zkoušky s hodnotami stanovenými pomocí přepočtové rovnice

$$\sigma_m = 0.13 \left(\frac{P_m}{h_0^2}\right) - 0.32 \tag{11}$$

od Maoa a Takahashiho [4] a s hodnotami, stanovenými pomocí rovnice

$$\sigma_{y} = \frac{P_{m} + 49.2}{2.35 \cdot 10^{-6}} \tag{12}$$

kterou navrhli autoři pomocí MKP [17]. Výsledky srovnání jsou uvedeny v tab. 4.

Rovnici (12) stanovili autoři pomocí simulace [17]. Při simulaci byla předpokládaná ideální elasticko-plastická deformace. Oblast za mezí kluzu vykazovala konstantní průběh napětí. Mez kluzu a mez pevnosti nabývaly stejných hodnot, proto byla pro přepočet na mez kluzu využita síla $P_{\rm m}$ [17].

	Tahová zkouška	Small Pu	Inch Test
	směr L	směr L	
	naměřená hodnota	rov. (11)	rov. (12)
$\sigma_{ m Y}$	462	208	-
$\sigma_{\rm m}$	514	- 508	30

Tab. 4 Srovnání hodnot z tahové zkoušky s přepočítanými hodnotami podle rov. (11) a (12)

Protože se hodnoty stanovené podle rov. (11) a (12) výrazně liší od reálných hodnot meze kluzu a meze pevnosti, byly navrženy modifikované vztahy, postihující vliv smykového napětí, viz obr. 28.

$$\sigma_{m,L} = \frac{P_m}{0,555(\ln r_m - 0.693) \cdot \left[5 \cdot r_m - \left(r_m^L \cdot \frac{r_m^T}{r_m}\right)\right] \cdot \cos\left[45 - \sin^{-1}\left(\frac{r_m}{1,45}\right)\right]}$$
(13)

$$\sigma_{m,T} = \frac{P_m}{2,22 \cdot r_m \cdot (\ln r_m - 0.693) \cdot \cos\left[45 - \sin^{-1}\left(\frac{r_m}{1.45}\right)\right]}$$
(14)

Ve výše uvedených rovnicích parametr r_m představuje rameno smykové síly (obr. 28 b). Pro jeho obdržení musela být pozastavena zkouška v oblasti maximální síly P_m , (obr. 29 a obr. 30), vzorek byl rozříznut na 2 identické poloviny (obr. 31) a následně byla změřena pomocí mikroskopu vzdálenost působiště smykového napětí od osy vzorku (viz obr. 28 b).



Obr. 29 Křivka SPT pro ECAP Al 2024 ve směru L; REM, upraveno podle [17] #1 - přerušeno v blízkém okolí síly *P*_m



Obr. 30 Křivka SPT pro ECAP Al 2024 ve směru T; REM, upraveno podle [17] #3 - přerušeno v blízkém okolí síly *P*_m



Obr. 31 Ukázka působení smykového napětí na vzorek Al 2024 ve směru L [17]

Porovnání hodnot materiálových charakteristik, zjištěných klasickou tahovou zkouškou s hodnotami, které byly získány prostřednictvím vztahů (13) a (14) na základě výsledků SPT jsou uvedeny v tab. 5.

	Tahová zkouška	Small Punch Test
	Jednoosá napjatost směr L	Přepočtené napětí směr L
σ_{m} [MPa]	488	464

Tab. 5 Porovnání hodnot z tahové zkoušky s hodnotami určenými ze vztahů (13) a (14)
upraveno podle [17]

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část práce byly použity slitiny hliníku (Al 2024, Al 6082, Al 7020, Al SiMg1, NASA 398), slitiny hořčíku (slitina MgZnMn, AZ61, AZ91) a kompozitní materiály (AZ91 + 20 %, saffilu, Al + 4 % Al_4C_3).

Experimenty byly prováděny na dvou pracovištích, v Ústavu fyziky materiálů AV ČR Brno a na Universidad de Oviedo, Gijon, Španělsko na odlišných zkušebních strojích, avšak za stejných podmínek zkoušení (vnějších). Jedním z důvodů bylo ověření reprodukovatelnosti metody a stanovení podmínek, za jakých bude reprodukovatelnost SPT zajištěna.

Základní mechanické charakteristiky (zkoušky tahem) byly provedeny v laboratořích Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně.

Experimenty probíhaly v podmínkách konstantní rychlosti posuvu razníku (CDR), kdy byl vzorek upnut mezi horní a dolní matricí (bulge punch test). Zkoušení probíhalo při pokojových a v případě slitiny Al 2024 i zvýšených teplotách.

Zkoušky při zvýšených teplotách byly prováděny pouze na pracovišti ÚFM AV ČR, Brno. Hodnoty charakteristik, plynoucí z penetračních zkoušek byly porovnány s hodnotami odpovídajících charakteristik, zjištěných zkouškou tahem při stejných teplotách.

Zkouška tahem byla provedena pro všechny slitiny a kompozit AZ91 + 20 % saffilu a jejich zatěžovací křivky jsou uvedeny v Příloze, části D. Mez pevnosti a mez kluzu kompozitu Al + A_4C_3 byla převzata z článku [19] a [20].

2.1. Experimentální zařízení

Pracoviště Universidad de Oviedo, Španělsko

Zkouška byla provedena na zkušebním stroji schopném vyvolat sílu 5 kN. Schéma použitého přípravku je uvedeno na obr. 33.



Obr. 33 Schéma přípravku SPT, Španělsko. Upraveno podle [1]
Průhyb byl v tomto případě měřen pomocí COD extenzometru firmy MTS systém (model 632.030-30), upnutého mezi dolní matrici a pouzdro.

V přípravku, viz obr. 33, byla umístěna keramická kulička z Al₂O₃ (Friali® F99,7) o průměru 2,5 mm. Vzorek byl zatěžován rychlostí 0,25 mm/min a hodnoty byly snímány s frekvencí 15 Hz při garantované zátěži 4,5 kN. Měření probíhalo za pokojové teploty. Pro zmírnění tření byl použit olej v ploše styku razníku s kuličkou. Na vzorek mazivo aplikováno nebylo.

Pracoviště ÚFM AV ČR, Brno

Zkoušky byly provedeny na upraveném creepovém zkušebním stroji. Zatížení bylo manuálně regulovatelné pomocí externího závaží. Krokový motor, sloužící pro ovládání závaží byl řízen softwarově. Průhyb byl měřen pomocí indukčního snímače W2K firmy Hottinger-Baldwin připojeného mezi horní a dolní zatěžovací tyč. K zesílení signálu byl použit měřící zesilovač MVD 2555, viz obr. 32 a).

V přípravku, viz obr. 32 b), byla umístěna keramická kulička z Al₂O₃ (Frialit® F99,7) o průměru 2,5 mm. Vzorek byl zatěžován rychlostí 0,25 mm/min, hodnoty z indukčního snímače byly snímány s frekvencí 2 Hz. Teplota zkoušky byla 20 °C. Na vzorek ani na přípravek nebylo aplikováno mazivo.



Obr. 32 a) Schéma zkušebního stroje pro měření SPT v ÚFM AV ČR, Brno. Upraveno podle [8]; b) Schéma přípravku

2.2. Počítačové simulace

Simulace byly prováděny v programu Abaqus verze 6.12-1.

Přípravek (dolní a horní matrice) společně se zatěžovací kuličkou byly namodelovány jako tuhá tělesa. Pro všechny simulace byl zkušebním vzorkem disk o průměru 8 mm. Jako výchozí byly použity následující parametry: tloušťka zkušebního tělesa 0,5 mm, průměr kuličky 2,5 mm, zaoblení hrany dolní matrice 0,2 mm, velikost průchodu (otvoru) dolní matrice 4 mm, Poissonův poměr pro hliník 0,33, koeficient tření 0,6. Modul pružnosti byl volen tak, aby odpovídal konkrétnímu použitému materiálu. Model poškození materiálu nebyl do simulace zahrnut.

2.3. Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byly zvoleny slitiny na bázi hliníku (Al 2024, Al 6082 T6, Al 7020, AlSiMg1, NASA 398), na bázi hořčíku (slitina MgZnMn, AZ31, AZ61) a kompozitní materiály (AZ91 + 20 % saffilu, Al + 4 % Al₄C₃).

Slitina Al 2024

Tab. 6 Chemické složení Al 2024 [hm %]

	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Ni	Mg	Al
Al 2024	0,09	0,23	4,70	0,71	0,01	0,04	0,03	0,00	1,69	zbytek



Obr. 34: Struktura Al 2024, vlevo směr T, vpravo směr L; zvětšeno 200×

Precipitačně vytvrzená slitina Al 2024 je lehce tvářitelná a proto se pro zlepšení mechanických vlastností zjemňuje zrno pomocí intenzivní plastické deformace, např. ECAP nebo umělým stárnutím při tepelném zpracování T4 či T6. Má vysokou pevnost a lomovou houževnatost. Slitina má špatnou korozní odolnost.

Slitina je v praxi používána v leteckém průmyslu pro palubní vybavení a konstrukce trupů letounů či pro konstrukční díly jako jsou spojky, ozubená kola, písty, spojovací materiál, kostry elektronických zařízení apod. [21].

Slitina Al 6082 T6

	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg	Al			
Al 6082	1,01	0,17	0,067	0,66	0,16	0,03	0,032	1,69	zbytek			

Tab. 7 Chemické složení Al 6082 T6 [hm %]



Obr. 35 Struktura Al 6082 T6, vlevo směr, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Slitina Al 6082 patří do skupiny Al-Mg-Si materiálů, která může být tepelně upravována Má výborné chemické vlastnosti (korozní odolnost), dobrou svařitelnost a pevnost. Ve své třídě 6000 dokonce nejvyšší pevnost. Využívá se v leteckém, strojírenském, chemickém a potravinářském průmyslu, v dopravní technice, pro vysoce namáhané aplikace, např. mostní konstrukce [22]. Slitina Al 6082 je obvykle dodávána ve formě plechů, desek, tyčí či tažených trubek.

Slitina Al 7020

	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Ca	Sn	Mg	Al
Al 7020	0,12	0,28	0,02	0,30	0,16	4,20	0,04	0,001	0,02	1,36	zbytek



Obr. 36 Struktura Al 7020, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Slitina Al 7020 patří do skupiny materiálů Al-Zn-Mg, která má široké uplatnění při svařování, např. mostní nosníky, železniční dopravní systémy, tlakové kryogenní nádoby, obrněná vozidla, části motorů, rámy jízdních kol apod. Slitina podléhá přirozenému stárnutí. Slitina má schopnost zotavit se do původního chemického stavu v oblastech svarových spojů [23].

	Tab. 9 Chemické složení AlSiMg1 [hm %]											
	Si	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Pb	Ca	Mg	Al		
AlSiMg1	0,98	0,24	0,43	0,01	0,12	0,01	0,01	0,002	0,81	zbytek		





Obr. 37 Struktura AlSiMg1, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Slitina AlSiMg má dobrou korozní odolnost, je proto vhodná pro konstrukce pracující např. v přímořských oblastech. Je vhodná pro méně namáhané konstrukce, např. žebříky, karoserie apod.

Slitina	NASA	398

	Tab. 10 Chemické složení NASA 398 [hm %]											
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Pb	Ca	Ti	Ni	Mg	Al
NASA 398	13,35 ^{a.}	0,42 ^{b.}	5,50 ^{c.}	0,16	0,01	0,13	0,01	0,001	0,19	0,83	0,63	zbytek
^{a.} 12,6 -	14,1											

^{c.} 5,3 - 5,8



Obr. 38 Struktura NASA 398, vlevo zvětšeno 50×, vpravo zvětšeno 500×, směr L

Slitina NASA 398 patří do skupiny materiálů Al-Si. Materiály z této skupiny pokrývají až 85 % produkce hliníkových odlitků vyráběných pro automobilový průmysl. Nejsou vhodné pro vysokoteplotní aplikace, kdy klesá únavová životnost a také pevnost. Slitiny tohoto typy se proto používají jen do teploty přibližně 230 °C.

Slitina NASA 398 při větším obsahu Si vykazuje (při zachování vysoké úrovně kvality) rozměrovou stálost, nízkou tepelnou tažnost, tvrdost povrchu a vysokou odolnost proti opotřebení. Díky těmto vlastnostem může být použita jako materiál pro písty dieselových či benzínových motorů, vzduchem chlazených motorů, kompresorů, kdy je požadována vysoká tvrdost materiálu současně se zachováním vysokých pevnostních a únavových charakteristik [24].

Slitina MgZnMn

Tab. 11 Chemické složení MgZnMn [hm %]

	Zn	Mn	Sn	Fe	Al	Mg
slitina MgZnMn	2,9000	0,0550	0,0100	0,0040	0,0000	zbytek



Obr. 39 Struktura MgZnMn, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Slitiny na bázi Mg-Zn byly jedny z prvních, které se daly vytvrzovat. Díky vazbě Mg-Zn má tato slitina velký potenciál pro zlepšení mechanických vlastností při tepelném zpracování. Mangan zlepšuje tepelnou odolnost, neboť modifikuje zrno a nahrazuje tak aditiva Zr, které je dražší [25]. Největší předností slitin je jejich nízká specifická hmotnost, výborná obrobitelnost a velmi dobrá schopnost tlumit vibrace. Naopak jejich nedostatky spočívají v nižší pevnosti, nákladnější výrobě, malé tvárnosti za nižších teplot a v obtížnějším zpracování oproti slitinám na bázi hliníku. Hořčík jako samotný prvek je totiž velmi reaktivní s kyslíkem za vyšších teplot [26].

Slitina AZ31

	Tab. 12 Chemické složení AZ31 [hm %]										
	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Zr	Mg				
AZ31	2,86	1,07	0,35	0,005	0,004	0,01	zbytek				



Obr. 40 Struktura AZ31, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Slitina AZ31 je značena podle ASM, kdy A představuje zastoupení hliníku (3%) a Z představuje zastoupení zinku (1%). AZ31 má malou pevnost a nízkou specifickou hmotnost, lze ji odlévat i tvářet [27]. Pro zlepšení mechanických vlastností se přidává do slitiny Zr [28]. Kvůli výhodnému poměru hmotnosti a pevnosti je slitina hojně užívána v průmyslu pro konstrukční prvky např. v letadlech či automobilech (kostra pro airbag, části potahů, skříně motorů, páky řízení, konzoly atd.). Slitiny jsou použitelné do 150 °C [27].

Slitina AZ61

Tab. 13 Chemické složení AZ61 [hm %]									
	Al	Zn	Cu	Mn	Si	Fe	Mg		
AZ61	6,10	0,61	0,00	0,27	0,00	0,004	zbytek		



Obr. 41 Struktura AZ61, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×

Z označení slitiny vyplývá, že zastoupení hliníku ve slitině je 6 %, zastoupení zinku 1 %. Při rostoucím obsahu hliníku roste pevnost a sklon ke korozi pod napětím. Zinek ve slitině zvyšuje tvárnost a může být nahrazen kombinací stříbra a kadmia (navýšení pevnosti až na 430 MPa). Hořčíkové slitiny jsou pro svou nízkou hmotnost a malou pevnost používány v nenáročných konstrukcích, např. tělech fotografických přístrojů, mobilních telefonů apod. Vytvrzení jako způsob zlepšení pevnostních vlastností vede ke zhoršení tvárnosti [27].

Kompozit AZ91 + 20 % saffilu

Matrice	Al	Zn	Mn	Mg
AZ91	9,00	1	0,30	zbytek

Tab. 14 Chemické složení matrice AZ91	[hm %].	Převzato	z [29]
---------------------------------------	---------	----------	--------

Tab.	15	Složení	vláken	[%	zastoupení].	Převzato	z [29]
------	----	---------	--------	----	--------------	----------	-----	-----

vlákna	Al ₂ O ₃	SiO ₂
	97	3

Vlákna mají průměr 3 µm a průměrnou délku 150 µm [29].



Obr. 42 Struktura kompozitu AZ91 + 20 % saffilu [29]

Rozsáhlý vývoj kompozitů s matricí na bázi hořčíku je jednou z hlavních inovací při výrobě lehkých materiálů s požadovanými pevnostními charakteristikami. Výztuž, tvořená krátkými keramickými vlákny v některých případech reagovala se samotnou matricí a tím narušila soudržnost celého kompozitu. V poslední době se proto užívá méně reaktivních vláken, např. na bázi Al₂O₃. Uvedené skupiny kompozitů jsou uvažovány pro vysokoteplotní aplikace [29].

<u>Kompozit Al + 4 % Al₄C₃</u> Kompozit je tvořen matricí z čistého hliníku a částicemi Al₄C₃ (objemový podíl částic 4 %) [30].



Obr. 43 Struktura kompozitu Al + 4 % Al₄C₃ [30]

2.4. Příprava vzorků

Polotovary pro výrobu zkušebních těles byly soustružené tyče o průměru 8 mm. Disky byly elektrojiskrově nařezány na tablety o tloušťce 1,2 mm. Zkušební tělesa z materiálu AZ31 a zkušební tělesa z materiálu AZ91 + 20 % saffilu byla pořízena ze vzorků pro zkoušku tahem. Nahrubo nařezaná zkušební tělesa byla postupně zbroušena rovnoměrně po obou stranách na tloušťku 0,5 \pm 0,005 mm brusnými papíry o zrnitosti 400, 800, 1200, 1400.

Vzorky určené pro mikrostrukturní analýzu byly zality v dentakrylu a následně vybroušeny na metalografické brusce, osazené kotoučem s nanesenou diamantovou pastou. Při leštění byla použita emulze OPS.

Vzorky pro příčné řezy porušených zkušebních těles byly zality Technovitem 2000LC, což je zalévací hmota vytvrditelná ultrafialovým světlem. Pro vlastní vytvrzení bylo použito zařízení Heraeus (Technotray® CU). Výhodou použité zalévací hmoty a technologie vytvrzení je, že v procesu vytvrzování nedochází k deformaci vzorku. Příčné řezy byly provedeny na pile Leco VC-50.

2.5. Experimentální výsledky

Na obr. 44 je uveden příklad závislosti síla P - průhyb u, získané ze SPT kompozitu Al + Al₄C₃. Obdobné záznamy byly získány pro všechny experimentální materiály. V grafu jsou vyznačeny charakteristické veličiny, odečtené ze zmíněné závislosti (P_m , u_m ,

 P_{y} ...).



Obr. 44 Ukázka zatěžovací křivky kompozitu Al + Al₄C₃ s vyznačenými charakteristickými veličinami Charakteristické síly ($P_{\rm m}$, $P_{\rm y_h0/10}$, $P_{\rm y_Mao}$, $P_{\rm y_INF}$) byly upraveny pomocí porovnávacího parametru X podle Mao a spol. a Purmenského a spol., viz tab. 1 a 2.

Od křivky SPT byla odečtena tuhost zkušebního stroje s cílem vliv tuhosti soustavy eliminovat nebo alespoň minimalizovat. Tuhost zkušebního stroje ovlivňuje průběh SPT a mění skutečnou velikost maximální síly P_m a síly na mezi kluzu P_y . Tento vliv byl předpokládán, neboť k podobným zkreslením hodnot dochází i při tahové zkoušce. Proto bylo provedeno experimentální měření tuhosti zkušebního stroje. Měření tuhosti bylo realizováno pomocí penetrace keramické kuličky o r= 2,5 mm do tvrdokovu. Ze získané závislosti síla-posuv byl stanoven regresní polynom a ten použit ke korekci tuhosti zkušebního stroje.

2.5.1. SPT za pokojové teploty

Hodnoty v tabulkách 16 a 17 představují aritmetický průměr a směrodatnou odchylku, vždy minimálně ze čtyř měření.

rub. 10 Charaktenistiky SFT (OTM TV CR, BIIIO)																				
slitina h_0		$\frac{P_{y_{-}}}{p_{-}}$	$\frac{h_0}{h_0^2}$	10	\underline{P}_{y}	$\frac{h_{2}^{2}}{h_{2}^{2}}$	INF	<u>P</u>	$\frac{v_{-N}}{h_{0}^{2}}$		-	$\frac{P_m}{h_o^2}$		$\frac{1}{V}$	$\frac{D}{m}$		$\frac{1}{u}$	$\frac{P_m}{\cdot k}$		
	r 1			-0	2-1		••0	27		0	2.		, 0	2.		0	-	•• m	, .	20 21
	[mm]		[N/	mm	-]	[ľ	N/m	m-]	[ľ	v/m	m ⁻]	[N	/mn	1-]	[N/	mm	IJ	[N/	mm	[]
Al 2024	0,502 ±	0,002	786	±	48	355	±	109	487	±	64	2258	±	84	1133	±	40	1393	±	85
Al 7020	0,503 ±	0,000	595	±	23	206	±	34	256	±	19	1822	±	26	916	±	13	970	±	30
Al 6082 T6	0,500 ±	0,001	531	±	53	209	±	26	295	±	49	2085	±	170	1043	±	83	1146	±	46
AlSiMg1	0,502 ±	0,001	240	±	16	167	±	17	185	±	17	1816	±	18	912	±	10	558	±	9
NASA 398	0,501 ±	0,002		±			±			±		508	±	12	254	±	7	1118	±	117
MgZnMn	0,502 ±	0,001		±			±			±		915	±	192	460	±	96		±	
AZ31	0,502 ±	0,001	125	±	2	77	±	2	74	±	7	1268	±	103	636	±	50	686	±	55
AZ61	0,502 ±	0,001	336	±	17	181	±	22	210	±	10	1133	±	24	569	±	11	719	±	25
AZ91 + saf.	0,502 ±	0,001	587	±	33	454	±	63	467	±	54	719	±	19	361	±	9	1194	±	81
$Al+Al_4C_3$	0,500 ±	0,000	387	±	8	205	±	13	338	±	8	2160	±	94	1080	±	47	660	±	25

Tab. 16 Charakteristiky SPT (ÚFM AV ČR, Brno)

slitina	h_0	$\frac{P_{y_{-}h_{0}/10}}{h_{0}^{2}}$	$\frac{P_{y_INF}}{h_0^2}$	$\frac{P_{y_Mao}}{h_0^2}$	$\frac{P_m}{h_0^2}$	$rac{P_m}{h_0}$	$\frac{P_m}{u_m \cdot h_0}$
	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm]	[N/mm ²]
Al 2024	$0,501 \pm 0,003$ 0.501 ± 0.002	840 ± 16	383 ± 19 310 ± 45	443 ± 16	2161 ± 82	1082 ± 39	1426 ± 169 1060 ± 13
Al 6082 T6	$0,501 \pm 0,002$ $0,503 \pm 0,001$	636 ± 27	319 ± 43 299 ± 12	390 ± 30 377 ± 9	1817 ± 40 2296 ± 158	910 ± 24 1154 ± 79	1000 ± 13 1130 ± 58
AlSiMg1	$0,503 \pm 0,001$	343 ± 10	163 ± 16	305 ± 3	1836 ± 42	923 ± 20	546 ± 10
NASA 398	$0,501 \pm 0,002$	±	±	±	619 ± 9	310 ± 5	$1360 \ \pm \ 140$
MgZnMn	$0,501 \pm 0,001$	280 ± 16	123 ± 20	133 ± 20	853 ± 81	428 ± 40	536 ± 79
AZ31	$0,502 \pm 0,002$	201 ± 12	91 ± 49	161 ± 14	$1180 \ \pm \ 165$	592 ± 84	564 ± 38
AZ61	$0,501 \pm 0,002$	363 ± 17	189 ± 10	224 ± 16	1128 ± 22	566 ± 11	724 ± 16
AZ91 + saf.	0,500 ± 0,002	539 ± 45	245 ± 25	304 ± 33	811 ± 25	405 ± 13	1128 ± 38
$Al + Al_4C_3$	±	±	±	±	±	±	±

Tab. 17 Charakteristiky SPT (Universidad de Oviedo, Gijon, Španělsko)

Z důvodů nedostatku experimentálního materiálu nebyl ve Španělsku zpracován kompozit $Al + Al_4C_3$, a proto nebyly stanoveny charakteristiky z tohoto pracoviště.

V některých případech bylo prokázáno, že vzorek je předdeformovaný. Tento jev byl způsoben náhlým posuvem penetrátoru do vzorku díky neopatrné manuální manipulaci s předzatížením zkušebního stroje. Po vyhodnocení naměřených dat byl tento jev vyhodnocen jako předdeformace vzorku takového stupně, že již došlo k plastické deformaci a deformačnímu zpevnění materiálu zkušebního tělesa. Zpevnění materiálu se projevilo vyšší hodnotou $P_{\rm v}$ a $u_{\rm m}$.

Experimentální údaje z předdeformovaných vzorků nebyly zahrnuty do výpočtů, neboť bylo prokázáno (z většího souboru dat, který obsahoval předdeformavané i nepoškozené záznamy *P-u*), že zkreslují výsledky tím, že navyšují sílu P_y na mezi kluzu a snižují hodnotu průhybu při maximální síle u_m , viz obr. 45.

U slitiny MgZnMn nebyly stanoveny síly P_y a u_m pro vzorky z pracoviště v ČR, neboť disky byly ve všech případech předdeformovány.



Obr. 45 Příklad závislosti síla-průhyb pro předdeformovaný vzorek Al60_06 v porovnání se záznamy nepředdeformovaných zkušebních těles Al60_04 (ÚFM AV ČR) a Al60_08 (Universidad de Oviedo Španělsko)

Při porovnávání experimentálních dat ze slitiny NASA 398, získaných na jednotlivých pracovištích, byl pozorován viditelný nárůst maximální síly $P_{\rm m}$ (obr. 46).



Obr. 46 Změny v charakteru zatěžovacích křivek, naměřených na různých pracovištích – doposud neobjasněná příčina nárůstu max. síly *P*_m, slitina NASA 398

Tento jev byl zpočátku interpretován jako možné vystárnutí materiálu, protože u ostatních slitin se tak výrazná změna v hodnotách sil P_m neprojevila. Časová prodleva mezi jednotlivými měřeními činila 5 měsíců. Precipitace ale nebyla prokázána a experimentální data byla zahrnuta do výpočtů.

Slitina NASA 398 nevykazovala výrazné deformační zpevnění, které je typické pro oblasti II a III. Při porovnání příčných řezů vzorků ze slitiny NASA 398 a např. AlSiMg (obr. 47) není pozorováno u slitiny NASA 398 výrazné zmenšení tloušťky vzorku. V důsledku toho je přechod mezi oblastí I a II nevýrazný a bylo proto velmi obtížné vyhodnotit sílu na mezi kluzu P_y .

Mez kluzu $Rp_{0,2}$ nebylo možné vyhodnotit ani v případě klasických zkoušek tahem, kdy k porušení zkušebního tělesa došlo před dosažením meze kluzu, viz tahová zkouška příloha D8.



Obr. 47 Vlevo příčný řez vzorkem SPN398_3 po zkoušce SPT, slitina NASA 398, zvětšeno 25×. Vpravo příčný řez vzorkem AlSi_02 po zkoušce SPT, slitina AlSiMg1, zvětšeno 25×

2.5.2. SPT za vyšších teplot

Experimenty za zvýšených teplot byly z důvodu nedostatku experimentálního materiálu provedeny pouze pro slitinu Al 2024 (pouze v případě této slitiny bylo dostatek experimentálního materiálu i pro výrobu zkušebních těles pro klasickou zkoušku tahem za zvýšených teplot). Měření metodou SPT a klasickou zkouškou tahem byla realizována za teplot (150, 200, 250, 300 °C). Výsledky experimentů při pokojové a zvýšených teplotách jsou uvedeny v tab. 18.

		N		Zkouška tahem				
T [°C]	$\frac{P_{y_{_}h_{0}/10}}{h_{0}^{2}}$	$\frac{P_{y_INF}}{h_0^2}$	$\frac{P_{y_Mao}}{h_0^2}$	$\frac{P_m}{h_0^2}$	$\frac{P_m}{h_0}$	$\frac{P_m}{u_m \cdot h_0}$	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]
	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$		
20	786,00	355,00	487,00	2258,00	1133,00	1393,00	459,00	311,00
150	666,66	253,01	274,81	2518,06	1256,51	1252,88	400,00	291,00
200	718,87	329,32	373,67	2216,86	1106,21	983,30	358,00	265,00
250	665,51	484,12	549,20	1646,80	826,69	589,23	264,00	252,00
300	216,95	27,78	66,73	1103,16	553,78	366,19	147,00	141,00

Tab. 18 Vyhodnocení SPT slitiny Al 2024 za vyšších teplot

2.6. Přepočtové rovnice na mez kluzu a mez pevnosti

Pro posouzení použitelnosti přepočtových rovnic na mez kluzu a mez pevnosti byla použita všechna vyhodnocená (platná) experimentální data z obou pracovišť, viz tab. 16 a tab. 17. Užitím experimentálních dat z obou pracovišť byl do přepočtových rovnic zahrnut rovněž vliv tuhosti zkušebních strojů a zároveň vliv přítlaku horní matrice na vzorek.

Pro přepočtové rovnice (15) – (20) byla regresní přímka v závislosti síla-průhyb umístěna do počátku souřadné soustavy (regresní parametr b = 0), neboť při R_m , $R_e = 0$ MPa by měla být i velikost síly P_y nulová.

Pro přepočtové rovnice (21) – (23) nebyla regresní přímka v závislosti síla-průhyb umístěna do počátku souřadné soustavy. Hodnota regresního parametru $b \neq 0$. Vzorce (21) – (23) byly porovnány v tab. 23 s přepočtovými vzorci, které taktéž mají $b \neq 0$.

Pro výběr nejvhodnějšího normalizačního členu bylo zapotřebí stanovit koeficienty determinace R^2 jednotlivých závislostí, viz tab. 19. Koeficienty determinace R^2 byly stanoveny z přepočtových rovnic pro různé kombinace normalizačních členů a pro regresní parametr b = 0. Umístění rovnice do počátku soustavy bylo zvoleno z důvodu malého množství různých typů materiálu. Soubor dat, kterým je prokládána regresní přímka obsahuje pouze 8 druhů slitin a 2 typy kompozitů. Proto bylo navrhnuto držet se fyzikálního předpokladu, kdy při působení nulové síly na vzorek musí výsledné napětí R_m , $R_e = 0$ MPa.

K porovnání byly vybrány tyto normalizační členy:

pro přepočet na mez kluzu: $P_{y_h0/10}/h_0^2$, P_{y_lNF}/h_0^2 , P_{y_lMao}/h_0^2 pro přepočet na mez pevnosti: P_m/h_0^2 , P_m/h_0 , $P_m/(h_0^2 \cdot u_m)$

	determinace										
	$\frac{P_{y_h_0/10}}{h^2}$	$\frac{P_{y_{INF}}}{h^2}$	$\frac{P_{y_Mao}}{h^2}$	$\frac{P_m}{h_c^2}$	$\frac{P_m}{h}$	$\frac{P_m}{\mu \cdot h}$					
	$[\text{N/mm}^2]$	$[\text{N/mm}^2]$	$[\text{N/mm}^2]$	$[N/mm^2]$	$[\text{N/mm}^2]$	$[N/mm^2]$					
\mathbf{R}^2	<mark>0,657</mark>	0,261	0,434	<mark>0,457</mark>	0,455	0,019					

Tab. 19 Posouzení normalizačních členů na základě jejich koeficientu

Na základě výše uvedené analýzy se jako nejvhodnější jeví normalizační člen $P_{y_h0/10}/h_0^2$ pro stanovení meze kluzu a P_m/h_0^2 pro stanovení meze pevnosti.

Do výpočtů, jejichž výsledky jsou graficky znázorněny na obr. 48 až 56 byly zahrnuty všechny experimenty provedené za pokojové teploty.

Pro zjednodušení jsou ve zmíněných obrázcích pro jednotlivé materiály použity následující zkratky:

NASA 398	slitina NASA 398
Mg	slitina MgZnMn
AZ31	slitina AZ31
kompozit AZ91	kompozit AZ91 + 20 % saffilu
AlSiMg	slitina AlSiMg1
AZ61	slitina AZ61
Al 6082	slitina Al 6082 T6
Al 2024	slitina Al 2024
Al 7020	slitin Al 7020
kompozit Al	kompozit Al + 4 % Al ₄ C ₃

Do srovnání byly zahrnuty následující přepočtové rovnice pro mez kluzu s $\alpha_1 = 0$ (viz obr. 54 až 56):

$$R_{p0,2} = 0,477 \frac{P_{y_{-}h_{0}/10}}{h_{0}^{2}}$$
(15)

$$R_{p0,2} = 0.762 \frac{P_{y_-mao}}{h_0^2} \tag{16}$$

$$R_{p0,2} = 0.960 \frac{P_{y_{-}INF}}{h_0^2} \tag{17}$$







V dolní oblasti grafů na obr. 48 až 50 jsou zastoupeny materiály se štěpným (NASA 398) a smíšeným mechanismem lomu (MgZnMn, AZ31 a kompozit AZ91 + 20 % saffilu). V horní oblasti grafu leží slitiny s tvárným mechanismem porušení, tj. Al 6082, Al 7020, Al 2024, viz obr. B1 až B18 v Příloze, části B.

Do porovnání přepočtových rovnic pro mez pevnosti s $\beta_1 = 0$ (viz obr. 51 až 53) byly zahrnuty následující rovnice:

$$R_m = 0.195 \frac{P_m}{h_0^2} \tag{18}$$

$$R_m = 0.390 \frac{P_m}{h_0}$$
(19)

$$R_m = 0.302 \frac{P_m}{u_m h_0}$$
(20)









Obr. 53 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $\frac{P_m}{u_m \cdot h_0}$

Obdobně jako v případě určení meze pevnosti jsou v dolní oblasti grafu zastoupeny materiály se štěpným a smíšeným mechanismem lomu, v horní oblasti materiály vykazující tvárný mechanismus porušení, viz Příloha, část B.

Přepočtové rovnice pro mez pevnosti s regresním parametrem $\beta_1 \neq 0$, zahrnuté do porovnání, jsou (viz obr 54 až 56):

$$R_m = 0.154 \frac{P_m}{h_0^2} + 71.10 \tag{21}$$

$$R_m = 0,307 \frac{P_m}{h_0} + 71,62 \tag{22}$$

$$R_m = 0,160 \frac{P_m}{u_m \cdot h_0} + 147,1 \tag{23}$$



Obr. 54 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $\frac{P_m}{h_0^2}$ s nenulovým parametrem *b*



Obr. 55 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $\frac{P_m}{h_0}$ s nenulovým parametrem b



Obr. 56 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $\frac{P_m}{u_m \cdot h_0}$ s nenulovým parametrem b

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly 3, měření metodou SPT za zvýšených teplot bylo realizováno pouze u slitiny Al 2024. Regresní parametr je opět volen b = 0. Výsledné přepočtové rovnice pro mez kluzu a mez pevnosti nabývají tvarů

$$R_{p0,2} = 0.402 \frac{P_{y_{-}h_0/10}}{h_0^2}$$
(24)

$$R_m = 0.345 \frac{P_m}{h_0 \cdot u_m} \tag{25}$$

Výsledky přepočtu na mez kluzu jsou ve formě grafu uvedeny na obr. 57, přepočtu na mez pevnosti potom na obr. 58. Koeficient determinace pro $P_{y_{\text{INF}}}/h_0^2$ a $P_{y_{\text{mao}}}/h_0^2$ vyšel záporný pro nedostatek experimentálních dat.



Obr. 57 Přepočtové rovnice meze kluzu pro Al 2024 za vyšších teplot



Obr. 58 Přepočtové rovnice meze pevnosti pro Al 2024 za vyšších teplot

Tab. 20 Přepočet tažnosti

slitina	$\frac{\gamma \cdot u_m}{h_0}$	$\gamma \cdot u_m$	zkouška tahem	Rozdíl
	[%]	[%]	[%]	[%]
Al 2024	10,792	10,805	16,20	32,60
Al 7020	12,004	12,023	15,80	24,02
Al 6082 T6	14,299	14,373	16,33	12,44
AlSiMg1	11,818	11,877	25,30	53,29
NASA 398	3,211	3,217	0,08	97,51
MgZnMn	11,268	11,300	1,40	84,69
AZ31	14,613	14,660	10,62	34,15
AZ61	10,919	10,945	17,90	39,00
AZ91 + saffil	5,036	5,034	1,20	76,17
$Al + 4 \% Al_4C_3$	23,179	23,179	5,00	78,43

2.7. Přepočtové rovnice pro tažnost materiálu

Pro přepočet tažnosti byly použity vztahy (6) a (7), ve kterých konstanta úměrnosti $\gamma = 7$ a $\gamma' = 14$.

Při výpočtu tažnosti bylo pro přepočet použito aritmetických průměrů průhybů u_m daných slitin a aritmetických průměrů hodnot tlouštěk daných slitin (viz tab. 16).

Výsledky přepočtů jsou spolu s hodnotami tažnosti zjištěnými pomocí zkoušky tahem uvedeny v tab. 20. Protože tažnosti určené z rov. (6) a (7) jsou téměř totožné, je odchylka vztažena k průměru hodnot tažností, vypočtených z uvedených dvou rovnic.

U kompozitu Al nebyla provedena zkouška tahem, hodnoty tažnosti byly převzaty z článku [19].

3. DISKUZE

3.1. Porovnání přepočtových rovnic

Pro porovnání byly použity rovnice (15) až (23), experimentálně určené autorem diplomové práce. Do porovnání byly zahrnuty další rovnice, převzaté z literatury. Jedná se konkrétně o vztahy (8), (10), (11) a (26) až (29):

- rovnice přepočtu na mez kluzu podle García a Rodriguezová (dále jen GaR) [1]

$$R_{p_{0,2}} = 0,346 \frac{P_{y_{-}h_{0}/10}}{h_{0}^{2}}$$
(26)

- rovnicí pro přepočet meze kluzu podle Lacaleho [12]

$$R_{p_{0,2}} = 5,98 \cdot P_{y_{-}INF} \tag{27}$$

- rovnice pro stanovení meze kluzu podle Maoa a Takahashiho (dále jen MaT) [4]

$$R_{p0,2} = 0,360 \frac{P_{y_-Mao}}{h_0^2}$$
(28)

- rovnice stanovení meze pevnosti podle GaR [1]

$$R_m = 0,277 \frac{P_m}{h_0 \cdot u_m}$$
(29)

Při porovnávání bylo důležité, aby byly porovnávány regresní parametry *a* pro rovnice se stejným přepočtovým členem, neboť tento člen výrazně ovlivňuje sklon regresní přímky. Pro sestavení rovnic (15) až (23) byl použit soubor dat obsahující hliníkové a hořčíkové slitiny. Pro vytvoření rovnic (26) a (29) podle GaR byl použit soubor obsahující oceli a slitinu Al 2024. Sandersovy rov. (8) a (10) jsou vytvořeny ze souboru dat obsahující pouze slitiny hliníku. MaT sestavili přepočtové rovnice (11) a (28) pomocí souboru dat pouze z ocelí a Lacale pro svou přepočtovou rovnici (27) užil souboru dat zahrnující oceli a jednu slitinu hliníku, viz obr 59.



Obr. 59 Schéma souborů dat pro vytvoření přepočtových rovnic

Nejprve byly porovnány přepočtové rovnice pro mez kluzu, viz tab. 21, ve které α_1 a α_2 jsou regresní parametry přímky.

Autoři rovnic	stanovení $R_{p0,2}, \alpha_2 = 0$						
	α_1	normal. člen	α_2				
García a Rodríguezová (26)	0,346	$P_{\rm y_h0/10}/{h_0}^2$	+0,000				
Lacale (27)	5,980	$P_{\rm y_INF}$	+0,000				
Mao a Takahashi (28)	0,360	$P_{\rm y_mao}/{h_0}^2$	+0,000				
Rovnice (15)	0,477	$P_{\rm y_h0/10}/{h_0}^2$	+0,000				
Rovnice (16)	0,762	$P_{\rm y_mao}/{h_0}^2$	+0,000				
Rovnice (17)	0,960	$P_{\rm y_INF}/{h_0}^2$	+0,000				

Tab. 21 Porovnání přepočtových rovnic na mez kluzu

Při porovnání rovnic (26) a (15) je parametr α_1 v případě rovnice (15) větší. Stejně tak je tomu při porovnání rovnic (28) a (16), parametr α_1 v rov. (16) je opět výrazně větší. Změna sklonu regresní přímky (nárůst parametru α_1) je pravděpodobně způsobena skladbou souboru dat, tj. rozšířením souboru o slitiny, porušené štěpným a smíšeným lomem, kdy materiál nevykazuje výrazné plastické chování. Směrnice regresní přímky je posunuta k vyšším hodnotám.

V případě Lacaleho (27) je rozdíl způsoben nepřítomností porovnávacího parametru v jím použité rovnici.

Dále byly porovnány přepočtové rovnice pro mez pevnosti s parametrem $\beta_2 = 0$, viz tab. 22, kde β_1 a β_2 jsou regresní parametry přímky.

	stanovení $R_{\rm m}$, $\beta_2 = 0$					
Autori rovnic	β_1	norm. člen	β_2			
García a Rodríguezová (29)	0,277	$P_{\rm m}/(u_{\rm m}\cdot h_0)$	+0,000			
Rovnice (18)	0,195	$P_{\rm m}/{h_0}^2$	+0,000			
Rovnice (19)	0,390	$P_{\rm m}/h_0$	+0,000			
Rovnice (20)	0,302	$P_{\rm m}/(u_{\rm m}\cdot h_0)$	+0,000			

Tab. 22 Porovnání přepočtových rovnic na mez pevnosti

Stejný trend nárůstu regresního parametru nastává při porovnání rovnice podle GaR (29) s rovnicí (20). Nárůst regresního parametru β_1 v případě rovnice (20) je opět způsoben souborem dat, obsahujícím slitiny se štěpným a smíšeným typem lomu.

souborem dat, obsahujícím slitiny se štěpným a smíšeným typem lomu. Pro svou nízkou hodnotu R^2 je však rovnice (20) nevhodná pro přepočet hliníkových a hořčíkových slitin. Nejlepší hodnotu R^2 pro slitiny hořčíku a hliníku vykazuje rovnice (18).

V tab. 23 jsou výsledky porovnání rovnic na přepočet meze kluzu, tentokrát s nenulovým regresním parametrem $\beta_2 \neq 0$.

Autoři rovnio	stanovení $R_{\rm m}$, $\beta_2 \neq 0$						
Auton tovnic	β_1	norm. člen	β_2				
Sanders (8)	1,145	$P_{\rm m}$	- 13,28				
Sanders (10)	3,181	$P_{ m m}/S_{ m k}$	- 1,294				
Mao a Takahashi (11)	0,130	${P}_{ m m}/h_0$	+ 0,320				
Rovnice (21)	0,154	$P_{\rm m}/{h_0}^2$	+71,100				
Rovnice (22)	0,307	$P_{ m m}/h_0$	+ 71,620				
Rovnice (23)	0,160	$P_{\rm m}/(u_{\rm m}\cdot h_0)$	+ 147,100				

Tab. 23 Porovnání přepočtových rovnic na mez pevnosti

V případě stejného porovnávacího členu u rovnic (11) a (22) lze vidět až dvojnásobný nárůst směrnice β_1 pro rovnici (22), což jen potvrzuje předešlá tvrzení.

U rovnice (10) podle Sanderse narůstá β_1 díky normalizačnímu členu P_m/S_k na hodnotu 3,181. Bez užití porovnávacího parametru, tj. bez zahrnutí externích vlivů, je v rov. (8) regresní parametr $\beta_1 = 1,145$, což je 2,67× méně než regresní parametr v rov. (10). To potvrzuje, že i porovnávací parametr (ne jen normalizační člen) výrazně ovlivňuje parametr *a*.

Při přepočtu meze pevnosti byla pozorována větší shoda s přepočtovou rovnicí (11), která byla určena pro soubor dat tvořený pouze z ocelí než s přepočtovými rovnicemi (8) a (10), vypočtenými pro soubor dat obsahující pouze hliníkové slitiny. Může se jednat o nevhodné zvolení porovnávacího parametru.

Parametry rovnic α , β a normalizační člen se mohou lišit také kvůli rozdílným tuhostem zkušebních strojů, příp. jiných parametrů při zkoušení. Aby bylo možné rovnice mezi sebou porovnávat, měl by být určen nejvhodnější normalizační člen pro přepočtové rovnice.

3.2. Výběr vhodných normalizačních členů

Pro vyhodnocení normalizačních členů byl použit (stejně jako v článku [1]) postup, kdy na základě koeficientu determinace R^2 byl zvolen nejvhodnější normalizační člen.

1401 2 1 510 114										
$R^{2}[-]$	$\left rac{P_{y_{-}h_{0}/10}}{h_{0}^{2}} ight $	$\frac{P_{y_INF}}{h_0^2}$	$\frac{P_{y_Mao}}{h_0^2}$	$\frac{P_m}{h_0^2}$	$\frac{P_m}{h_0}$	$\frac{P_m}{u_m \cdot h_0}$				
GaR [1] oceli + hliník. slitina	<mark>0,922</mark>		0,772	0,456	0,422	<mark>0,940</mark>				
Pouze hliník. slitiny				<mark>0,394</mark>	0,391	0,155				
Pouze hliník. slitiny bez NASA 398	<mark>0,646</mark>	0,314	0,183	0,110	0,106	<mark>0,686</mark>				
Hořčík. slitiny s NASA 398				<mark>0,090</mark>	0,089	-0,87				
Pouze hořčík. slitiny	0,671	<mark>0,823</mark>	0,682	0,123	0,123	<mark>0,430</mark>				

Tab. 24 Srovnání koeficientu determinace normalizačních členů

Pro určení nejvhodnějšího normalizačního členu byl do porovnání v tab. 24 přidán i soubor dat podle GaR, tvořený ocelemi a slitinou hliníku (pouze tvárné materiály).

Z předchozích úvah (kapitola 4.1) plyne, že odlišný soubor dat ovlivňuje výslednou regresní přímku. Aby bylo srovnání normalizačních členů reprezentativní, byl vytvořen soubor dat, který obsahuje pouze hliníkové slitiny (Al 2024, Al 6082, Al 7020, AlSiMg1 a NASA 398) a soubor dat, obsahující pouze hořčíkové slitiny (MgZnMn, AZ31 a AZ61), viz tab. 24.

Protože slitina NASA 398 během určování normalizačních členů vykazovala na hliníkovou slitinu nestandardní chování (nevykazovala výraznou plastickou deformaci), byly vytvořeny dva nové sobory dat. Ze souboru dat "Pouze hliníkové slitiny" odebráním slitiny NASA 398 vznikl soubor dat "Pouze hliníkové slitiny bez NASA 398" a přidáním slitiny NASA 398 do souboru dat "Pouze hořčíkové slitiny" vznikl soubor "Hořčík. slitiny s NASA 398".

V případě srovnání normalizačních členů pro určení meze kluzu nebyla vyhodnocena kolonka "Pouze hliníkové slitiny" a "Hořčíkové slitiny s NASA", neboť u slitiny NASA 398 bylo velmi obtížné tyto členy stanovit.

Normalizační člen $P_{\rm m}/(h_0 \cdot u_{\rm m})$ v případě souboru dat obsahující hořčíkové slitiny a slitinu NASA 398 vychází záporně k vůli nedostatečnému množství experimentálních dat. Díky tomu, že soubor dat ze článku [1] obsahuje jen tažné materiály, shodnost vlastností

je lepší a tedy i předpoklad dosažení lepších výsledků pro koeficient determinace R^2 .

Aby byl vhodně zvolen normalizační člen přepočtové rovnice na mez pevnosti, bylo třeba napřed vyhodnotit lomové chování materiálu. Pokud soubor experimentálních materiálů vykazoval výraznou plasticitu, bylo žádoucí použít člen $P_{\rm m}/(h_0 \cdot u_{\rm m})$.

Naproti tomu, pokud materiály obsažené v souboru experimentálních dat nevykazovaly výraznou plasticitu, bylo vhodnější použít normalizační člen P_m/h_0^2 . Příkladem vhodné volby normalizačního členu může být jeho volba např. u slitiny NASA 398. Tato slitina nevykazovala prakticky žádnou plasticitu, a proto není vhodné použít normalizační člen, obsahující průhyb u_m při maximální síle.

Při přepočtu na mez kluzu se pro slitiny hliníku nejvíce osvědčil člen $P_{y=h0/10}$. Při určení meze kluzu hořčíkových slitin pak síla $P_{y=INF}$, protože hořčíkové slitiny nevykazují výrazné membránové chování a v místě přechodu oblasti I do oblasti II SPT křivky je zaznamenán menší rozptyl hodnot.

3.3. Reprodukovatelnost metody

Reprodukovatelnost metody byla porovnávána pouze na datech, naměřených na pracovištích ve Španělsku a v České republice, kdy byly dodrženy stejné podmínky zkoušení. Podmínky zkoušení jsou uvedeny v kap. 3.1. Odlišné byly pouze tuhosti zkušebních strojů, případně zatížení od horní matrice (díky odlišné konstrukci přípravků).

Na obr. 60 a obr. 61 jsou vyobrazeny normalizační člený P_m/h_0^2 a $P_{y_h0/10}/h_0^2$ vykazující nejmenší hodnoty koef. determinantu R^2 (viz tab. 19). Celkový souhrn rozdílů hodnot mezi jednotlivými pracovišti je uveden v tab. 25. Při jejím zpracování byla použita rovnice

$$H = 100 - \left[\frac{Min(P_{SPA}; P_{CR})}{Max(P_{SPA}; P_{CR})} \cdot 100\right],$$
(32)

kde *H* představuje rozdíl hodnot normalizačních členů mezi jednotlivými pracovišti, P_{SPA} průměrnou hodnotu dané síly naměřené na pracovišti ve Španělsku a P_{CR} průměrnou hodnotu dané síly naměřené v ČR. Z hodnot *H* pro jednotlivé normalizační členy byl vypočten celkový průměr.

	$P_{v h_0/10}$	P_{v} , NE	$P_{y Mao}$	P_m	P_m	P_{m}
slitina	$\frac{-\frac{y-n_0}{10}}{h_0^2}$	$\frac{-\frac{y-n}{2}}{h_0^2}$	$\frac{h_0^2}{h_0^2}$	$\frac{m}{h_0}$	$\frac{m}{h_0^2}$	$\overline{u_m\cdot h_0}$
Al 2024	6	7	9	2	4	4
Al 7020	13	35	34	9	0	1
Al 6082 T6	17	30	22	1	9	10
AlSiMg1	30	2	39	2	1	1
NASA 398				18	18	18
AZ31	38	16	54	18	7	7
AZ61	7	4	6	1	0	1
AZ91 + saffil	8	46	35	6	11	11
Průměrný rozdíl normalizační členů						
průměrně:	17	20	29	7	6	7

Tab. 25 ÚFM AV ČR vs Universidad de Oviedo Španělsko Rozdíl hodnot normalizačních členů mezi pracovišti [%]



Obr. 60 Porovnání normalizačního členu $P_{\rm m}/h_0^2$ na jednotlivých pracovištích.



Obr. 61 Porovnání normalizačního členu $P_{y_{h0/10}}/h_0^2$ na jednotlivých pracovištích.

Nejlépe vyhovujícím normalizačním členem pro přepočet meze kluzu (tj. takovým, který vykazuje nejmenší rozptyl při vyhodnocení dat mezi jednotlivými pracovišti) je $P_{y_{-}h0/10}/h_0^2$. Rozdílnost hodnot H v jeho případě nabyla průměrné hodnoty 17 %.

U normalizačních členů pro přepočet na mez pevnosti vykazoval nejmenší rozdíl hodnot *H* normalizační člen $P_{\rm m}/h_0^2$. Rozdíl hodnot *H* v tomto případě byl průměrně 6 %. Normalizační člen $P_{\rm m}/(h_0 \cdot u_{\rm m})$ vykazoval rozdíl o 1 % větší.

Normalizační členy $P_{y_h0/10}/h_0^2$ a P_m/h_0^2 vykazují nejmenší rozptyl hodnot při určování na různých zkušebních strojích a jsou proto nejlépe vhodné pro použití do přepočtových rovnic.

3.4. Porovnání přepočtených napěťových charakteristik s charakteristikami určenými experimentálně

Na obr. 62 a obr. 63 je uvedeno porovnání hodnot stanovených ze zkoušky tahem s hodnotami získanými z přepočtových rovnic. Souhrn rozdílů meze kluzu a meze pevnosti, je uveden pro mez kluzu v tab. 26 a pro mez pevnosti v tab. 27.

Při výpočtu rozdílů napěťových charakteristik bylo použito obdobné výpočtové operace jako v kap. 4.3

$$H' = 100 - \left[\frac{Min(R_{tah}; R_{rov.})}{Max(R_{tah}; R_{rov.})} \cdot 100\right],$$
(33)

kde H' představuje rozdíl napěťových charakteristik určených zkouškou tahem (R_{tah}) a vypočtených pomocí přepočtové rovnice ($R_{rov.}$).

Pro přepočet na mez pevnosti a mez kluzu byl použit soubor dat obsahující alespoň jednu slitinu hliníku.



Obr. 62 Porovnání hodnot meze pevnosti určené z tahové zkoušky a vypočítaných pomocí přepočtových rovnic

U rovnice podle Sanderse (10) hodnota meze kluzu v případech slitin AlSiMg, MgZnMn a kompozitů Al a AZ91 vyšla záporná a proto byla v dalších úvahách brána jako $R_{p0,2} = 0$ MPa. V případě materiálu Al 7020 dosahovala mez pevnosti hodnot 200 % její hodnoty určené pomocí zkoušky tahem.

Sandersova rov. (10), která obsahuje porovnávací parametr S_k (velikost kontaktní plochy kuličky), není zřejmě univerzální pro všechny typy materiálů a její použití jako porovnávacího parametru nelze doporučit.



Obr. 63 Porovnání hodnot mezí kluzu určených z tahové zkoušky a vypočítaných pomocí přepočtových rovnic

Tab. 26 Porovnání rozdílu hodnot H' mezi hodnotou meze kluzu ze zkoušky	tahem
a přepočtenou hodnotou meze kluzu	

	mez kluzu				
slitina	rov. (15)	rov. (16)	rov. (17)	rov. (26)	
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Al 2024	22	8	15	37	
Al 7020	9	17	14	50	
Al 6082 T6	5	10	10	39	
AlSiMg1	29	50	26	33	
NASA 398	-	-	-	-	
MgZnMn	33	12	24	10	
AZ31	22	39	14	60	
AZ61	29	30	26	62	
$Al + Al_4C_3$	11	1	2	19	
AZ91 + saffil	36	11	32	74	
	průměrný rozdíl				
	22	20	18	43	

	mez pevnosti					
slitina	rov. (18)	rov. (19)	rov. (20)	rov. (8)	rov. (10)	rov. (28)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Al 2024	8	8	6	24	56	14
Al 7020	26	25	33	6	75	38
Al 6082 T6	19	20	5	45	48	13
AlSiMg1	50	51	7	66	-	15
NASA 398	27	27	60	1	69	56
MgZnMn	35	35	33	53	-	27
AZ31	25	26	1	47	22	9
AZ61	33	33	34	5	46	39
$Al + Al_4C_3$	32	32	32	6	-	26
AZ91 + saffil	17	17	61	16	-	64
	průměrný rozdíl					
	27	27	27	27	53	30

Tab. 27 Porovnání rozdílu hodnot H' mezi hodnotou meze pevnosti ze zkoušky tahem a přepočtenou hodnotou meze pevnosti

Pro stanovení meze kluzu a meze pevnosti byla použita data ze Španělska (viz tab. 17), protože vykazují menší rozptyl hodnot než měření z ČR. Pro výpočet kompozitu Al byla použita data z ČR, viz tab. 16. Referenční hodnotou byla mez kluzu a mez pevnosti stanovená pomocí tahové zkoušky.

V případě rovnice podle Sanderse (10) nebyly hodnoty, které vycházely záporně, porovnány s daty ze zkoušky tahem.

Hodnoty při přepočtu meze kluzu se nejméně liší při užití rovnice (17). Vykazují průměrný rozdíl 18 % a maximální rozptyl 32 % pro kompozit AZ91.

Při přepočtu meze pevnosti je nejmenší rozdíl v případě rovnic (8), (18), (19) a (20). Průměrně vykazují rozdíl 27 %. Zajímavé je, že rovnice (28), určená podle GaR výhradně pro ocele vychází s rozdílem 30 %, což je jen o 3 % méně než pro rovnice stanovené ze slitin na bázi Al a Mg.

Z výše uvedených skutečností plyne, že hodnoty získané pomocí přepočtové metody jsou pouze orientační a rozdíl hodnot může být až 50% (viz např. výsledky získané z rov. (18), kdy byl pozorován nejmenší rozptyl hodnot). Důležitá bude volba kritéria pro sestavení souboru dat, na který budou následně aplikovány přepočtové rovnice.

K přihlédnutím k závěrům z kapitoly 4.2 a 4.3 lze konstatovat, že rovnice obsahující normalizační člen $P_{y_h0/10}/h_0^2$ je z obecného pohledu vhodnější pro širší uplatnění při zkoušení různých typů souborů dat a je nejvhodnější pro přepočet na mez kluzu. Nejlépe pro přepočet na mez kluzu pro soubor dat hliníků a hořčíků vyšla rovnice s norm. členem P_{y_h}/h_0^2 .

Pro přepočet na mez pevnosti je pro širší uplatnění vhodnější rovnice s normalizačním členem $P_{\rm m}/h_0^2$. Pro přepočet pouze souboru dat obsahující tažné materiály (vykazující dobrou plasticitu) je nejvhodnější rovnice s normalizačním členem $P_{\rm m}/(h_0 \cdot u_{\rm m})$.



Obr. 64 Porovnání přepočtených mezí pevnosti a mezí kluzu z rovnic (15), (18), (24) a (25)

Doposud byly v této práci rovnice vytvořeny na základě souboru dat obsahujícího různé druhy slitin. V případě přepočtových rovnic (24) a (25) byly stanoveny na základě pouze jedné slitiny, kdy bylo využito odlišného chování slitiny Al 2024 při zkouškách za vyšších teplot. Při aplikaci rovnic (24) a (25) byly rozdíly meze kluzu a meze pevnosti menší (viz obr. 64) než v případě přepočtových rovnic (15) a (18) určených ze souboru dat z tab. 16 a tab. 17, stanovených za pokojové teploty.

Přehledně jsou rozdíly napěťových charakteristik uvedeny v tab. 28 (mez kluzu) a tab. 29 (mez pevnosti). Referenční hodnotou, se kterou jsou hodnoty vypočtené z jednotlivých rovnic porovnávány, je mez kluzu a mez pevnosti stanovená ze zkoušky tahem. Aby byl vyhodnocen vliv odlišných pracovišť (tedy např. vliv tuhosti zkušebního stroje), byla do rovnic dosazena data z tab. 16 (Česká rep.) a tab. 17 (Španělsko).

novnum rozunu nounot m meze klužu pri použiti rov. (
[%]	Špan	ělsko	ČR			
	rov. (15)	rov. (24)	rov. (15)	rov. (24)		
R _{p0,2}	22	8	17	2		

Tab. 28 Porovnání rozdílu hodnot H' meze kluzu při použití rov. (17) a (26)

Tab. 29 Porovnání rozdílu hodnot H' meze pevnosti při použití rov. (20) a (27)

[%]	Špar	iělsko	ČR	
	rov. (18)	rov. (25)	rov. (18)	rov. (25)
R _m	8	7	4	5

Z tab. 28 a 29 plyne následující:

- napěťové charakteristiky vycházejí při užití přepočtových rovnic (24) a (25) lépe než při užití přepočtových rovnic (15) a (18). Výjimkou je přepočet na mez pevnosti, kdy při dosazení hodnot z tab. 16 lépe vychází přepočet při užití přepočtové rovnice za pokojových teplot,
- v případě přepočtu meze pevnosti jsou rozdíly minimální. Oproti tomu rozdíly při určení meze kluzu jsou mnohonásobně vyšší, téměř 15% rozdíl mezi rovnicemi (15) a (24),
- přepočtové rovnice pro napěťové charakteristiky za vyšších teplot byly sestaveny ze souboru dat naměřeného v ČR. Proto při použití hodnot z tab. 17 (data určená na pracovišti ve Španělsku) vykazují mez pevnosti a mez kluzu větší rozdíl oproti mezi kluzu a mezi pevnosti, získaných při použití dat z tab. 16 (data určená na pracovišti v České republice).

4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo posoudit vhodnost využití metody Small Punch Test (SPT) pro zkoušky a odhad materiálových parametrů Al, Mg a jejich slitin a kompozitů. Na základě získaných experimentálních dat a simulací je možné stanovit následující závěry.

- Vliv vtlačení horní matrice do vzorku ovlivňuje průběh SPT slitin na bázi hořčíku a hliníku při vyhodnocení síly P_m a P_y. Vlivem vtlačení matrice do vzorku dochází ke změně tvaru zátěžné křivky. Předdeformování vzorku výrazně ovlivňuje hodnotu síly P_y. Předdeformovaním vzorku není výrazně ovlivněna hodnota maximální síly P_m, ale dochází k posunu zátěžné křivky SPT směrem k vyšším hodnotám průhybu. Není tak možno využít přepočtových rovnic, založených na porovnávacím parametru u_m.
- Reprodukovatelnost metody byla hodnocena na základě porovnání rozdílů naměřených charakteristik na jednotlivých pracovištích při použití shodných normalizačních členů. Rozdíly v určení mezí kluzu studovaných materiálů byly výrazně vyšší než rozdíly v určení mezí pevnosti (17 % vs. 6 %).
- Byly stanoveny přepočtové vztahy pro vyhodnocení meze pevnosti a meze kluzu za pokojové teploty pro skupinu materiálů, zahrnující slitiny hořčíku a hliníku. Pro slitinu Al 2024 byla stanovena samostatná přepočtová rovnice pomocí souboru dat získaných za vyšších teplot. Jako nejvhodnější normalizační člen pro stanovení přepočtové rovnice pro slitiny na bázi hořčíku a hliníku za pokojových teplot byl určen parametr $P_{y_n/10}/h_0^2$ pro mez kluzu a parametr P_m/h_0^2 pro mez pevnosti. Pro slitinu Al 2024 za vyšších teplot se jako nejvhodnějším jeví normalizační parametr $P_{y_n/10}/h_0^2$ pro mez kluzu a $P_m/(h_0 \cdot u_m)$ pro mez pevnosti.
- Na základě několika vztahů, převzatých z literatury, byly dále vyhodnoceny tažnosti vyšetřovaných slitin. Při porovnání s hodnotami tažností zjištěných prostřednictvím standardních zkušebních metod byly zjištěny velké odchylky, v některých případech o víc jak 50 %.
- Na základě uvedených skutečností je možné konstatovat, že pro kvantitativní odhad napěťových charakteristik je možné pro výpočty použít přepočtovou rovnici, jejíž parametry byly získány ze souboru dat, obsahujícího větší počet materiálů, ovšem materiálů s podobným chemickým složením a vykazujících podobné lomové chování. Pro kvalitativní odhad napěťových charakteristik, získaných na základě přepočtu veličin z SPT je nutné použít rovnici, jejíž parametry byly zjištěny pro jeden konkrétní materiál. Takto stanovená přepočtová rovnice vykazuje po přepočtu SPT dat nižších napěťových rozdílů než při kvantitativním odhadu.

LITERATURA

- [1] GARCÍA T.E., C. RODRÍGUEZ, F.J. BELZUNCE a C. SUÁREZ. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, č. 582, 708–717.
- [2] MATOCHA Karel. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů. 1. vyd. Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, 2010. ISBN ISBN 978-80-248-2223-5.
- [3] KANDER Ladislav; Miroslav FILIP; Karel MATOCHA a Jaroslav PURMENSKÝ. Hodnocení materiálových vlastností kotlového tělesa po dlouhodobém provozu metodou malých vzorků. In: *Metal 2013* [online]. 2013 [cit. 2014-26-02]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_06/papers/206.pdf
- [4] MAO X. a H. TAKAHASHI. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TJZM disk (0.3 mm) small punch tests. *Jurnal of Nuclear Materials*. 1987, č. 150, 42–52.
- [5] NORRIS S.D a J.D. PARKER. Deformation processes during disc bend loading. *Materials Science and Technology*. 1996, č. 12, 163-170.
- [6] CWA 15627. Small Punch Test Method for Metallic Materials: CEN Workshop Agreement. Brusel: CEN, 2007, 70 s.
- [7] NĚMČÍKOVÁ E. *Protlačovací zkouška konstrukčních ocelí za snížených teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 86 s.
- [8] JEČMÍNKA M. Využitelnost protlačovacích zkoušek na miniaturních discích (small punch test - SPT) pro stanovování materiálových charakteristik za vysokých teplot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 112 s.
- [9] WEI T., D.G. CARR, E. BUDZAKOSKA, W. PAYTEN, R.P. HARRISON a M.I. RIPLEY. Assessment of the fracture toughness of 6061 aluminium by the small punch test and finite element analysis. *Materials forum.* 2006, č. 30, 39-44.
- [10] FLEURY Eric a Jeong Soo HA. Small Punch Test on steels For steam power plant. *KSME International jurnal*. 1998, č. 5, 827-835.
- [11] DYMÁČEK Petr. Short Term Creep Small Punch Testing of P91 and P92 Steels, Observations and Correlations with the Numerical Results. *Key Engineering Materials* [online]. 2011, č. 465, s. 179-182 [cit. 2014-05-16]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.465.179. Dostupné z: http://www.scientific.net/KEM.465.179
- [12] LACALLE Roberto, José Alberto ÁLVAREZ, Sergio CICERO a Frederico GUTIÉRREZ-SOLANA. From Archaeology to Precious Metals: Four Applications of Small Punch Test. In: *Hutnické listy*. 53. vyd. Ostrava: Státní nakladatelství technické literatury, 2010, s. 59-68. ISSN 0018-8069..

- [13] SANDERS M. W. In situ small scale mechanical characteriyation of materials under enviromental effects. Office of Graduate Studies of Texas A&M University. Texas. 2010. 115 str.
- [14] HURST R. a K. MATOCHA. The European Code of Practice for Small Punch Testing - where do we go from here? In: Proc. Of 1st International Conference Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testing Techniques". Ostrava, Česká republika, srpen 31 až září 2, 2010, 5 - 11, ISBN 978 – 80 – 254 - 7994-0.
- [15] RODRÍGUEZ C., J. GARCÍA, E. CÁRDENAS a C. BETEGÓN. Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test. *Welding Journal*. 2009, č. 88, 188–192.
- [16] FINARELLI D., F. CARSUGHI a P. JUNG. The small ball punch test at FZJ. *Journal* of Nuclear Materials. 2008, č. 377, 65–71.
- [17] MA Young Wha a Kee Bong YOON. Assessment of tensile strength using small punch test for transversely isotropic aluminum 2024 alloy produced by equal channel angular dressing. *Materials Science and Engineering*. 2010, č. 527, 3630–3638.
- [18] MA Young Wha, Jeong Woo CHOI a Kee Bong YOON. Change of anisotropic tensile strength due to amount of severe plastic deformation in aluminum 2024 alloy. *Materials Science and Engineering*. 2011, č. 529, 1-8.
- [19] BESTERCI Michal. Preparation, microstructure and properties of Al-Al₄C₃ system produced by mechanical alloying. *Materials and design*. 2006, č. 27, 416-421.
- [20] BESTERCI Michal, Milan ŠLESÁR a Gerhard JANGG. Structure and Properties of dispersion hardened Al-Al₄C₃ materials. *PMI*. 1992, č. 24, 27-32.
- [21] 2024 Aluminum Plate [online]. 2009 [cit. 2014-09-15]. Dostupné z: <u>http://www.speedymetals.com/information/Material53.html</u>
- [22] *Aluminium Alloy 6082* [online]. 1.10. 2014 [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <u>http://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/6082.html</u>
- [23] Aluminium Alloy 7020 [online]. 8.9. 2014 [cit. 2014-10-03].
 Dostupné z: <u>http://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/7020.html</u>
- [24] JONATHAN, A. Lee. NASA 398 Material Properties Data Sheet. EM30/Metal Engineering Division, Huntsville,: NASA-Marshall Space Flight Center, 2010. AL 35812, USA.
- [25] YUAN Jiawei, Kui ZHANG, Xuhu ZHANG a Xinggang LI. Thermal characteristics of Mg–Zn–Mn alloys with high specific strength and high thermal conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, č. 578, 32–36.
- [26] HROUDA, V. Slitiny hořčíku a jejich aplikace ve velkoprůmyslu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28s. Vedoucí bakalářské práce Karel Němec, Ph.D.
- [27] Slitiny hořčíku. In: BENEŠ, Libor. *users.fs.cvut.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: <u>http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/Slitiny_Mg.pdf</u>
- [28] ZHANG Aimin, Hai HAO, Xiaoteng LIU a Xingguo ZHANG. Effects of precipitates on grain size and mechanical properties of AZ31-x%Nd magnesium alloy. *Journal of rare earths.* 2014, č. 5, 451 457.
- [29] SVOBODA M., M. PAHUTOVÁ, K. KUCHAŘOVÁ, V. SKLENIČKA a T.G. LANGDON. The role of matrix microstructure in the creep behaviour of discontinuous fiber-reinforced AZ 91 magnesium alloy. *Materials science and engineering*. 2002, č. 33, 151–156.
- [30] DOBEŠ Ferdinand, Karel MILIČKA a Michal BESTERCI. Small punch testing of 4vol% Al₄C₃ composite in creep condition. *High temperature materials and processes*. 2007, č. 26, 193-199.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

- CEN European committee for Standardization
- Small punch test SPT
- costant displacement rate metoda konečných prvků CDR
- MKP
- constant force CF
- Garcia a Rodrigézová GaR
- Mao a Takahashi MaT

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a, b	[-]	obecné regresní parametry přepočtové rovnice
c	[m]	vůle mezi penetrační kuličkou a dolní matricí
d	[m]	průměr otvoru horní matrice
D	[m]	průměr otvoru dolní matrice
d_0	[m]	počáteční průměr zkušebního tělesa SPT
d _k	[m]	průměr plochy penetrační kuličky ve styku se vzorkem
E^{SP}	[J]	celková lomová energie materiálu
f	[-]	koeficient tření
F, P	[N]	zátěžná síla na vzorek
h	[m]	okamžitá tloušťka zkušebního tělesa
Н	[%]	rozdíl absolutních hodnot mezi pracovišti v ČR a Španělsku
\mathbf{h}_0	[m]	tloušťka zkušebního tělesa
1	[m]	velikost vtlačení horní matrice do zkušebního tělesa
P, F	[N]	zátěžná síla na vzorek
P _{ČR}	[N]	průměrná hodnota síly naměřená na pracovišti v ČR
Pm	[N]	maximální síla v závislosti SPT síla-průhyb
P _{SPA}	[N]	průměrná hodnota síly naměřená na pracovišti ve Španělsku
Pv	[N]	síla na mezi kluzu v závislosti SPT síla-průhyb
r	[m]	průměr penetrační kuličky
R	[m]	poloměr zaoblení hrany dolní matrice
\mathbf{R}^2	[-]	koeficient determinace
$R_e, Rp_{0.2}, \sigma_v$	[MPa]	mez kluzu
R_m, σ_m	[MPa]	mez pevnosti
Sk	$[m^2]$	velikost kontaktní plochy penetrační kuličky se vzorkem
t	[s]	čas
Т	[°C]	teplota
u	[m]	okamžitý průhyb vzorku
u _f	[m]	průhyb vzorku v okamžiku nestability P _f
u _m	[m]	průhyb vzorku při maximální síle P _m
v	[m/s]	rychlost zatěžování
Х	[-]	porovnávací parametr
Y/X	[-]	normalizační člen
Y, Z	[-]	obecné členy pro vysvětlení funkce přepočtové rovnice
α_1, α_2	$[N/m^2]$	regresní parametry přepočtové rovnice pro mez kluzu
β_1, β_2	$[N/m^2]$	regresní parametry přepočtové rovnice pro mez pevnosti
γ	[-]	parametr úměrnosti pro přepočet tažnosti vzorku podle [15]
γʻ	[-]	parametr úměrnosti pro přepočet tažnosti vzorku podle [15]
σ	[MPa]	napětí působící na vzorek

SEZNAM OBRÁZKŮ

- 1 Odběr vzorku na principu mechanického odbrušování [2]
- 2 Odběr vzorku na principu elektrojiskrového řezání [2]
- 3 Zkušební přípravek pro ball punch test
- 4 Teoretický průběh deformace při smyku střihovém penetračním testu
- 5 Schéma ohybového penetračního testu
- 6 Schéma zkoušecího zařízení SPT, upraveno podle [10]
- 7 Typické tvary a rozměry zkušebních těles pro SPT (a) kruhový, (b) čtvercový
- 8 Závislost síla-průhyb pro tažné materiály při SPT při konstantní rychlosti průhybu (Constant Displacement Rate) a při pokojové teplotě, upraveno podle [8]
- 9 Simulace oblasti I pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,02 mm. Napětí je koncentrováno především ve středu vzorku [9]
- 10 Simulace oblasti II pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,2 mm. Dochází k posuvu působiště max. napětí a plastickému ohybu [9]
- 11 Simulace oblasti III pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 0,8 mm. Zkušební těleso vykazuje membránové chování [9]
- 12 Simulace oblasti IV pomocí MKP na vzorku z materiálu Al 6061 při průhybu 1,5 mm. Viditelné výrazné smykové napětí soustředěné pod úhlem 45°.
- 13 Rozdílný způsob šíření trhliny v závislosti na charakteru působení smykového napětí, upraveno podle [2]
- 14 Určení síly P_{y} , upraveno podle [1]
- 15 Ukázka membránového režimu, upraveno podle [6]
- 16 Ukázka vlivu externích faktorů na průběh SPT. Simulace pomocí MKP.
- 17 Vliv velikosti penetrační kuličky na průběh zkoušky. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al 6082
- 18 Vliv rychlosti zatížení na vzorek o tloušťce 250 ± 5 μm z oceli Eurofer'97, upraveno podle [16]
- 19 Závislost zatížení-průhyb pro vzorky o průměru 3mm a různé tloušťce z oceli Eurofer'97, upraveno podle [16]
- 20 Stanovení vhodného normalizačního členu v závislosti na tloušťce zkušebního tělesa. Závislosti byly určeny MKP modelováním vzorků z oceli Eurofer'97, upraveno podle [1]
- 21 Vliv velikosti zaoblení hrany dolní matrice na průběh zkoušky. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al 6082
- 22 Závislost síla-průhyb pro vzorky s odlišnou drsností povrchu z materiálu Al 3003-H14, upraveno podle [13]
- 23 Vzorek o průměru 3 mm a tloušťce 250 \pm 5 µm z oceli Eurofer'97, zatěžovaný za různého tlaku okolí, upraveno podle [16]
- 24 Vliv vtlačení horní matrice do vzorku. Disk o průměru 8 mm je modelován pomocí MKP z materiálu Al 6082.
- 25 Graf závislosti maximální síly P_m z SPT a meze pevnosti, zjištěné zkouškou tahem, upraveno podle [13]
- 26 Stanovení přepočtové rovnice pro mez pevnosti, upraveno podle [13]
- 27 Závislost síla-průhyb SPT pro vzorek $d_0=3 \text{ mm a}$) materiál Al 3003-H14, b) materiál Al 2618-T61 (oba s vodíkem a bez vodíku) [13]

- 28 Napěťové a geometrické poměry na styku penetrátoru a vzorku při uvažování vlivu smykového napětí [17]
- 29 Křivka SPT pro ECAP Al 2024 ve směru L; REM, upraveno podle [17]
- 30 Křivka SPT pro ECAP Al 2024 ve směru T; REM, upraveno podle [17]
- 31 Ukázka působení smykového napětí na vzorek Al 2024 ve směru L [17]
- 32 a) Schéma zkušebního stroje pro měření SPT v ÚFM AV ČR, Brno. Upraveno podle [8];b) Schéma přípravku
- 33 Schéma přípravku SPT, Španělsko. Upraveno podle [1]
- 34: Struktura Al 2024, vlevo směr T, vpravo směr L; zvětšeno 200×
- 35 Struktura Al 6082 T6, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 36 Struktura Al 7020, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 37 Struktura AlSiMg1, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 38 Struktura NASA 398, vlevo zvětšeno 50×, vpravo zvětšeno 500×, směr L
- 39 Struktura MgZnMn, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 40 Struktura AZ31, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 41 Struktura AZ61, vlevo směr T, vpravo směr L, zvětšeno 200×
- 42 Struktura kompozitu AZ91 + 20 % saffilu [29]
- 43 Struktura kompozitu Al + 4 % Al₄C₃ [30]
- 44 Ukázka zatěžovací křivky kompozitu Al + Al₄C₃ s vyznačenými charakteristickými veličinami
- 45 Příklad závislosti síla-průhyb pro předdeformovaný vzorek Al60_06 v porovnání se záznamy nepředdeformovaných zkušebních těles Al60_04 (ÚFM AV ČR) a Al60_08 (Universidad de Oviedo Španělsko)
- 46 Změny v charakteru zatěžovacích křivek, naměřených na různých pracovištích doposud neobjasněná příčina nárůstu max. síly *P*_m, slitina NASA 398
- 47 Vlevo příčný řez vzorkem SPN398_3 po zkoušce SPT, slitina NASA 398, zvětšeno 25×. Vpravo příčný řez vzorkem AlSi 02 po zkoušce SPT, slitina AlSiMg1, zvětšeno 25×
- 48 Přepočtová rovnice pro mez kluzu $P_{\rm y \ h0/10}/{h_0^2}$
- 49 Přepočtová rovnice pro mez kluzu $P_{\rm y Mao}/{h_0^2}$
- 50 Přepočtová rovnice pro mez kluzu $P_{\rm y INF}/h_0^2$
- 51 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/{h_0}^2$
- 52 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/h_0$
- 53 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/h_0 \cdot u_{\rm m}$
- 54 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/h_0^2$ s nenulovým parametrem b
- 55 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/h_0$ s nenulovým parametrem b
- 56 Přepočtová rovnice pro mez pevnosti $P_{\rm m}/h_0 \cdot u_{\rm m}$ s nenulovým parametrem b
- 57 Přepočtové rovnice meze kluzu pro Al 2024 za vyšších teplot
- 58 Přepočtové rovnice meze pevnosti pro Al 2024 za vyšších teplot
- 59 Schéma souborů dat pro vytvoření přepočtových rovnic
- 60 Porovnání normalizačního členu $P_{\rm m}/h_0^2$ na jednotlivých pracovištích.
- 61 Porovnání normalizačního členu $P_{y=h0/10}/h_0^2$ na jednotlivých pracovištích.
- 62 Porovnání hodnot meze pevnosti určené z tahové zkoušky a vypočítaných pomocí přepočtových rovnic

- 63 Porovnání hodnot mezí kluzu určených z tahové zkoušky a vypočítaných pomocí přepočtových rovnic
- 64 Porovnání přepočtených mezí pevnosti a mezí kluzu z rovnic (15), (18), (24) a (25)

SEZNAM TABULEK

- 1 Výběr porovnávacích parametrů pro určení Re
- 2 Výběr porovnávacích parametrů pro určení R_m
- 3 Výsledky z SPT testů při navodíkování [13]
- 4 Srovnání hodnot z tahové zkoušky s přepočítanými hodnotami podle rov. (11) a (12)
- 5 Porovnání hodnot z tahové zkoušky s hodnotami určenými ze vztahů (13) a (14), upraveno podle [17]
- 6 Chemické složení Al 2024 [hm %]
- 7 Chemické složení Al 6082 T6 [hm %]
- 8 Chemické složení Al 7020 [hm %]
- 9 Chemické složení AlSiMg1 [hm %]
- 10 Chemické složení NASA 398 [hm %]
- 11 Chemické složení MgZnMn [hm %]
- 12 Chemické složení AZ31 [hm %]
- 13 Chemické složení AZ61 [hm %]
- 14 Chemické složení matrice AZ91 [hm %]. Převzato z [29]
- 15 Složení vláken [% zastoupení]. Převzato z [29]
- 16 Charakteristiky SPT (ÚFM AV ČR, Brno)
- 17 Charakteristiky SPT (Universidad de Oviedo, Gijon, Španělsko)
- 18 Vyhodnocení SPT slitiny Al 2024 za vyšších teplot
- 19 Posouzení normalizačních členů na základě jejich koeficientu determinace
- 20 Přepočet tažnosti
- 21 Porovnání přepočtových rovnic na mez kluzu
- 22 Porovnání přepočtových rovnic na mez pevnosti
- 23 Porovnání přepočtových rovnic na mez pevnosti
- 24 Srovnání koeficientu determinace normalizačních členů
- 25 ÚFM AV ČR vs Universidad de Oviedo Španělsko. Rozdíl hodnot normalizačních členů mezi pracovišti [%]
- 26 Porovnání rozdílu hodnot *H*[•] mezi hodnotou meze kluzu ze zkoušky tahem a přepočtenou hodnotou meze kluzu
- 27 Porovnání rozdílu hodnot H' mezi hodnotou meze pevnosti ze zkoušky tahem a přepočtenou hodnotou meze pevnosti
- 28 Porovnání rozdílu hodnot H' meze kluzu při použití rov. (17) a (26)
- 29 Porovnání rozdílu hodnot H' meze pevnosti při použití rov. (20) a (27)

SEZNAM PŘÍLOH

- A. Příčné řezy zkušebních těles slitin po zkoušce SPT
- B. Lomové plochy slitin a kompozitů
- C. Záznamy síla-průhyb SPT lehkých slitin
- D. Záznamy ze zkoušek tahem lehkých slitin