

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Využití indentačních zkoušek tvrdosti pro stanovení mechanických vlastností materiálů**

**The use of indentation hardness tests for determining the mechanical properties of materials**

**AUTOR: Mgr. Maxim Puchnin**

**STUDIJNÍ OBOR: Materiálové inženýrství**

**ŠKOLITEL: Doc. Ing. Jiří Cejp CSc.**

**ŠKOLITEL – SPECIALISTA (studijní garant): Ing. Jakub Horník, Ph.D.**

**PRAHA 2018**

## **Využití indentačních zkoušek tvrdosti pro stanovení mechanických vlastností materiálů**

### **The use of indentation hardness tests for determining the mechanical properties of materials**

#### **Anotace:**

Stanovení materiálových vlastností všech objektů patří mezi základní požadavky technické praxe. Dodavatelem definované materiálové vlastnosti jsou vizitkou tohoto materiálu, na jejichž základě je materiál předurčen pro konkrétně zatěžované součásti anebo technologické procesy. Jsou to například tyto údaje: mez kluzu  $R_e$  a  $R_{p0.2}$ , mez pevnosti v tahu  $R_m$ , Youngův modul pružnosti v tahu  $E$ , exponent  $n$  a součinitel  $K$  deformačního zpevnění. V technické praxi se obvykle pro jejich měření používají standardní destruktivní metody. Například pro základní statickou zkoušku tahem se používají zvláště vyrobené normalizované tyče, které jsou osově namáhané do konečného roztrhnutí. Tyto mechanické zkoušky se provádějí na univerzálních trhacích strojích různého zatížení a velikosti.

Disertační práce se zabývá návrhem metodologie určení mechanických vlastností různých strojírenských materiálů na základě parametrů získaných z procesu instrumentovaného indentačního měření pomocí experimentálního zařízení speciálně navrženého a vyvinutého v rámci této práce. Věnuje se studiu materiálu a jeho odezvy na proces vniknutí indentoru do jeho povrchu na základě světelné a elektronové mikroskopie spolu s využitím výpočtového modelování (VM) metodou konečných prvků (MKP).

Vyvinutá instrumentovaná měřicí soustava pro stanovení mechanických vlastností materiálů indentační metodou může být alternativním způ-

sobem, jak rychle a nedestruktivně změřit potřebné parametry strojírenských materiálů nebo konstrukcí.

## **Abstract**

**Determining the material properties of all objects is one of the basic requirements for technical practice. The defined material properties by Supplier is a business card of this material, based on which the material is predetermined for specifically stressed components or technological processes. These are for example the following data: yield strength  $R_e$  and  $R_{p0.2}$ , tensile strength  $R_m$ , Young's modulus  $E$ , strain hardening exponent  $n$  and coefficient  $K$ . In basic technical practice, standard destructive methods are used for their measurement. For example a standard static tensile test uses specially produced standardized bars that are axially loaded into the final tear. These mechanical tests are carried out on universal tensile testing machines of various loads and sizes.**

**The dissertation thesis deals with the proposal of methodology for determination of mechanical properties of different engineering materials which are based on obtained parameters from the process of instrumental indentation measurement by using an experimental equipment specially which was designed and developed in this work. It deals with the study of the material and its response to the penetration process of the indenter into its surface based on light and electron microscopy together with the use of finite element analysis (FEA).**

**The developed instrumental measuring system for determining the mechanical properties of materials by the indentation method may be an alternative way for quick and non-destructive measurements of the required parameters directly on engineering materials or constructions.**

## **Věnování**

**Tuto disertační práci bych chtěl věnovat mému tatínkovi Sergeji Vladimirovičovi Puchninovi, který byl vždy moji duševní oporou a byl by určitě rád, kdyby se dožil jejího dokončení a obhajoby.**

## **Poděkování**

**Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Cejpovi CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D., který působil jako školitel specialista a také prof. Ing. Františce Pešlové, Ph.D. a doc. Ing. Vojtěchu Pražmovi CSc. za jejich pomoc při experimentech a jejich zpracování, cenné rady při řešení dané problematiky a přátelský přístup.**

**V neposlední řadě děkuju své přítelkyni a rodině za jejich trpělivost a podporu.**



## Obsah

Seznam obrázků .....	6
Seznam tabulek.....	10
Seznam použitých symbolů .....	11
Seznam použitých zkratek.....	14
Úvod a popis řešené problematiky.....	15
1. Současný stav.....	17
2. Literární rešerše o vývoji metodik měření tvrdosti.....	19
3. Chronogický přehled indentačních metodik a výpočtů metodou konečných prvků (MKP). .....	38
4. Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti (DSI) .....	58
5. Popis plastické zóny dle Tabora .....	66
6. Norma ISO 14577 .....	72
7. Metodologický přístup k experimentu na základě kritické rešerže ....	73
Cíle disertační práce.....	76
8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	78
9. Návrh softwaru .....	80
10. Návrh metodologie primárního výpočtu mechanických vlastností ....	88
11. Ověření primárního výpočtu na slitinách hliníku .....	91
12. Návrh řešení výpočtové úlohy pomocí metody konečných prvků (MKP) .....	98
13. Popis experimentálního materiálu .....	108
14. Chemické složení materiálů.....	110
15. Mikrostruktury zkušebních materiálů .....	116
16. Statická zkouška tahem.....	124
17. Zkouška tvrdosti .....	134
18. Studium plastické zóny pod vtiskem pro vybraný materiál.....	135
19. Indentační zkoušky na makrotvrdoměru EXPIMER - ověření navržené konečné metodologie výpočtu mechanických vlastností .....	140
20. Zkouška mikrotvrdomosti.....	149
21. Závěrečné porovnání výsledků.....	152
22. Důsledky pro vědu a praxi.....	155
Závěr.....	157
SEZNAM LITERATURY .....	161
Seznam publikační činnosti autora.....	171
Přílohy .....	175

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Diagram ze statické zkoušky v tahu
- Obr. 2 Indentační nástroj Wade
- Obr. 3 Přístroj pro měření tvrdosti podle Calverta a Johnsona
- Obr. 4 Elastická deformace tělesa kuličkou („Hertzův kontakt“)
- Obr. 5 Distribuce hlavních napětí při elastické deformaci tělesa kuličkou
- Obr. 6 Příčný pohled na Hertzovou interakci
- Obr. 7 Kritéria vzniku plastického tečení
- Obr. 8 Elasticko – plastická interakce mezi kulovým indentorem a tělesem
- Obr. 9 Diagramy NDS získané Ishlinskim
- Obr. 10 Elasticko – plastický model Hilla – Johnsona
- Obr. 11 Elasticko – plastický model Hardi
- Obr. 12 Přejídná elasticko - plastická zóna
- Obr. 13 MKP model a výsledky ve formě indentačních křivek
- Obr. 14 Porovnání závislosti napětí – deformace z indentační zkoušky a statické zkoušky v tlaku
- Obr. 15 Výsledky experimentu Hubera
- Obr. 16 Indentační přístroj a MKP model Nayebi
- Obr. 17 Výsledky měření Naybi pro různé druhy oceli
- Obr. 18 Schematické zobrazení závislosti napětí - deformace
- Obr. 19 Grafy distribuce napětí při indentaci
- Obr. 20 Schematické znázornění „pile-up“ a „sink-in“ plastického chování materiálu při sférické indentaci
- Obr. 21 Porovnání experimentální a vypočtené cyklické závislosti zatížení – hloubka vtisku
- Obr. 22 Různé režimy provedení indentační zkoušky
- Obr. 23 Schematické znázornění procesu indentace do systému základní materiál-povlak
- Obr. 24 Výsledky indentačních měření
- Obr. 25 Výsledky experimentu a MKP výpočtu Nagahisa
- Obr. 26 MKP model procesu indentace do systému základní materiál – povlak
- Obr. 27 Výsledky Alcalá
- Obr. 28 Indentační systém Lee
- Obr. 29 Výsledky a model Oliver Bartier
- Obr. 30 Výsledky podle Haušilda
- Obr. 31 SEM - povlak a plastická zóna pod povrchem
- Obr. 32 Porovnání plastické zóny ze snímků a metody MKP
- Obr. 33 Indentační křivka – plastická a elastická část práce vnikacího procesu
- Obr. 34 Schematický průběh indentační křivky
- Obr. 35 Schéma indentace sférickým indentorem
- Obr. 36 Indentační křivka při použití sférického indentoru, závislost síly na hloubce indentace

- Obr. 37 Velikost plastické zóny pod vtiskem – dosažení meze kluzu
- Obr. 38 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast I elasticko-plastické deformace
- Obr. 39 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast II elasticko-plastické deformace
- Obr. 40 Elastická deformace zobrazující maximální smykové napětí v materiálu pod vtiskem
- Obr. 41 Plastická deformace ideálně plastického materiálu
- Obr. 42 Pile-up a sink-in chování materiálu při použití sférického indentoru
- Obr. 43 Chování materiálu: (a) pile-up; (b) sink-in
- Obr. 44 Postup od návrhu, vývoje, montáže až po konečné zařízení
- Obr. 45 Panel nastavení
- Obr. 46 Hlavní okno aplikace s jednotlivými prvky
- Obr. 47 Blokové schéma softwaru
- Obr. 48 Příklad vygenerované zprávy z měření ve formátu pdf.
- Obr. 49 3D návrh konstrukce měřicího modulu (výpočtové modelování)
- Obr. 50 Prototyp experimentálního zařízení „EXPIMER“
- Obr. 51 Schéma vzniku elastické deformace kulového indentoru
- Obr. 52 Grafické vyjádření funkce  $f(P, E, \Delta)$
- Obr. 53 Mikrostruktura odlitých slitin
- Obr. 54 Fraktografie odlitých slitin
- Obr. 55 Indentační křivky odlitých hliníkových slitin
- Obr. 56 Charakter deformovaných oblastí pod indentačním vtiskem slitiny S2 při různém zatížení
- Obr. 57 Schéma testovacího zařízení
- Obr. 58 Osový symetrický pohled na MKP model
- Obr. 59 Grafická interpretace výsledků výpočtů MKP (klasický režim)
- Obr. 60 Grafická interpretace výsledků výpočtů MKP (cyklický režim)
- Obr. 61 Indentační křivky na základě dat z MKP výpočtu
- Obr. 62 Přepočítané křivky napětí-deformace pomocí navržené metodologie
- Obr. 63 Příklad výpočtu v Excelu
- Obr. 64 Oblasti chemické analýzy CuZn40Pb2 na elektronovém mikroskopu
- Obr. 65 Oblasti chemické analýzy oceli E335GC na elektronovém mikroskopu
- Obr. 66 Spektrum EDS slitiny CuZn40Pb2
- Obr. 67 AlCu4PbMg, podélný řez.
- Obr. 68 Detail mikrostruktury AlCu4PbMg, podélný řez
- Obr. 69 AlCu4PbMg, příčný řez
- Obr. 70 Detail mikrostruktury AlCu4PbMg, příčný řez
- Obr. 71 Cu-ETP, podélný řez
- Obr. 72 Detail mikrostruktury Cu-ETP, podélný řez
- Obr. 73 Cu-ETP, příčný řez

- Obr. 74 Detail mikrostruktury Cu-ETP, příčný řez  
Obr. 75 CuSn8, podélný řez  
Obr. 76 Detail mikrostruktury CuSn8, podélný řez  
Obr. 77 CuSn8, příčný řez.  
Obr. 78 Detail mikrostruktury CuSn8, příčný řez  
Obr. 79 CuZn40Pb2, podélný řez.  
Obr. 80 Detail mikrostruktury CuZn40Pb2, podélný řez  
Obr. 81 CuZn40Pb2, příčný řez.  
Obr. 82 Detail mikrostruktury CuZn40Pb2, příčný řez  
Obr. 83 S235JRC, podélný řez  
Obr. 84 Detail mikrostruktury S235JRC, podélný řez  
Obr. 85 S235JRC, příčný řez  
Obr. 86 Detail mikrostruktury S235JRC, příčný řez  
Obr. 87 S355J2, podélný řez  
Obr. 88 Detail mikrostruktury S355J2, podélný řez  
Obr. 89 S355J2, příčný řez  
Obr. 90 Detail mikrostruktury S355J2, příčný řez  
Obr. 91 11SMn30, podélný řez  
Obr. 92 Detail mikrostruktury 11SMn30, podélný řez  
Obr. 93 11SMn30, příčný řez  
Obr. 94 Detail mikrostruktury 11SMn30, příčný řez  
Obr. 95 E335GC, podélný řez  
Obr. 96 E335GC, podélný řez 2  
Obr. 97 E335GC, příčný řez  
Obr. 98 E335GC, příčný řez 2  
Obr. 99 Univerzální trhací stroj LabTest 5.100 SP1  
Obr. 100 Univerzální trhací stroj INSTRON 5582  
Obr. 101 Připravené vzorky  
Obr. 102 Deformační diagramy neželezných slitin INSTRON (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)  
Obr. 103 Deformační diagramy ocelí INSTRON (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)  
Obr. 104 Soubor deformačně - napěťových diagramů pro uvedené materiály z LabTest (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)  
Obr. 105 Univerzální tvrdoměr EMCOTEST M4C 075/750  
Obr. 106 Zalisované vzorky  
Obr. 107 Vtisk na displeji tvrdoměru EMCOTEST M4C 075/750  
Obr. 108 Plastická zóna Al slitiny (polarizační a světelný mikroskop)  
Obr. 109 Deformovaná oblast pod vtiskem Al slitiny studovaná pomocí elektronového mikroskopu  
Obr. 110 Indentační křivka EN AW-2030 T3  
Obr. 111 Sklon odlehčovací části indentační křivky  
Obr. 112 Porovnání indentačního diagramu a tahovým diagramem

- Obr. 113 Indentační křivky neželezných kovů a slitin  
Obr. 114 Indentační křivky ocelí  
Obr. 115 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu AlCu4PbMg  
Obr. 116 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu Cu-ETP  
Obr. 117 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu CuSn8  
Obr. 118 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu CuZn40Pb2  
Obr. 119 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu E335  
Obr. 120 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu S235  
Obr. 121 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu S355  
Obr. 122 Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečného) diagramu 11SMn30  
Obr. 123 Indentační křivky CuZn40Pb2 v příčném řezu z mikroindentace

## Seznam tabulek

- Tab. 1 Poměr  $0,102F/D^2$  pro různé materiály
- Tab. 2 Poměr zatěžující síly a průměru indentoru
- Tab. 3 Přehled norem pro zkoušky tvrdosti podle Brinella
- Tab. 4 Nominální chemické složení
- Tab. 5 Chemické složení získané metodou EDX
- Tab. 6 Mechanické vlastnosti získané primární metodologií a standartními testy
- Tab. 7 Deformované oblasti slitiny S2 s vypočítaným koeficientem stlačení
- Tab. 8 Vybrané materiály pro ověření navržené metodologie
- Tab. 9 Základní vlastnosti použitých materiálů
- Tab. 10 Chemické složení pro  $CuZn_{40}Pb_2$ .
- Tab. 11 Chemické složení neželezných kovů, určeného z materiálových listů a měřením metodou EDS
- Tab. 12 Chemické složení ocelí, určené z materiálových listů a měřením metodou EDS
- Tab. 13 Mechanické vlastnosti zjištěné softwarem Instron a LabTest pro barevné slitiny
- Tab. 14 Mechanické vlastnosti zjištěné softwarem Instron a LabTest pro ocele
- Tab. 15 Koeficient deformačního zpevnění  $K$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  zjištěný z diagramu Instron a LabTest pro barevné slitiny
- Tab. 16 Koeficient deformačního zpevnění  $K$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  zjištěný z diagramu Instron a LabTest pro ocele
- Tab. 17 Hodnoty tvrdosti vybraných materiálů
- Tab. 18 Mechanické vlastnosti různých materiálů odečtené z indentačních diagramů
- Tab. 19 Vtisková tvrdost, redukovaný a vtiskový modul pružnosti měřených materiálů určené pomocí mikroindentace
- Tab. 20 Porovnání výsledků barevné slitiny
- Tab. 21 Porovnání výsledků ocelí

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Popis
$R_u$	MPa	mez úměrnosti
$R_E$	MPa	mez pružnosti
$R_y$	MPa	mez kluzu
$R_m$	MPa	mez pevnosti
$E$	MPa	modul pružnosti
$d_e$	mm	průměr vtisku
$P_e$	N	zatížení v okamžiku vzniku plastického tečení
$P$	N	maximální hodnota použitého zatížení;
$D$	mm	průměr indentoru;
$a$	mm	kontaktní poloměr vtisku.
$h_1, h_2$	mm	hloubky vtisku pod různým zatížením
$c$		krok stupnice tvrdoměru
$h$	mm	hloubka vtisku
$\gamma$		relativní posuv (skluz)
$H_B$		tvrdost podle Brinella
$H_M$		tvrdost podle Meyera
$\sigma_s$	MPa	mez kluzu
$\varphi_1$	°	úhel mezi tečnou k povrchu indentoru a tělesem
$a_T$	mm	poloměr kontaktní plochy na začátku plastického deformování
$G_1, G_2$	MPa	smykové moduly materiálu tělesa a indentoru
$J = (1 - \nu^2)/E$	MPa	převedený modul pružnosti
$\varepsilon_r$		radiální plastická deformace
$\varepsilon_\theta$		kruhová plastická deformace
$q_i$	Pa	střední kontaktní tlak v průběhu odlehčení
$q_m$	Pa	maximální kontaktní tlak
$A_1, A_2$		koeficienty závislé na hloubce

		plastické zóny
$b$	mm	hloubka plastické zóny
$\varepsilon_p$		elastická deformace
$\Psi$		deformace
$\varepsilon_r$		typická deformace
$\alpha R$		koeficient změny síly
$k$		koeficient
$H$		hodnota tvrdosti
$P_{max}$	N	poměr maximální zatěžovací síly
$A$		zbytkové kontaktní (styčné) plochy
$h_r$	mm	průsečík osy hloubky vtisku s tečnou k odlehčovací křivce
$h_{max}$	mm	maximální hloubka vtisku
$F_{max}$	N	maximální zatěžovací síla
$H_{IT}$		vtisková tvrdost
$H_{pl}$		míra odporu na trvalou deformaci
$A_p$	mm <sup>2</sup>	průmět kontaktní plochy indentoru
$\varepsilon_i$		konstanta charakterizující geometrii použitého indentoru
$h_p$	mm	plastická hloubka po odlehčení indentoru
$S$	MPa	kontaktní tuhost (sklon křivky)
$E_{red}$	MPa	kombinovaný (redukovaný) modul
$a_c$	mm	kontaktní poloměr
$\beta$		korekční faktor
$h_c$	mm	kontaktní hloubka
$h_r$	mm	zbytková hloubka
$a_c$	mm	kontaktní poloměr
$h_{evS}$	mm	elastická zbytková hloubka
$h_p$	mm	kontaktní hloubka
$HB$		tvrdost dle Brinella
$HM$		tvrdost dle Martensa
$P_{1...m}$	N	maximální hodnota zatížení v cyklu
$h_{1...m}$	mm	hloubka vtisku po odlehčení



$D$	<b>mm</b>	<b>průměr indentoru</b>
$a$	<b>mm</b>	<b>kontaktní poloměr vtisku</b>
$n$		<b>koeficient zpevnění materiálu</b>
$R_{p0,2}$	<b>MPa</b>	<b>smluvní mez kluzu</b>
$e$		<b>poměrná deformace v tlaku</b>
$\varepsilon$		<b>poměrná deformace v tahu</b>
$C = 2,8 \dots 3,2$		<b>koeficient stlačování</b>
$K$	<b>MPa</b>	<b>faktor intenzity napětí</b>
$W_e$	<b>mJ</b>	<b>energie elastické deformace</b>
$W_p$	<b>mJ</b>	<b>energie plastické deformace</b>



## Úvod a popis řešené problematiky

Měření mechanických vlastností materiálů je velmi důležité pro různá průmyslová odvětví a vědecko-výzkumnou práci. Získané hodnoty se používají v inženýrském navrhování konstrukcí a strojů jako procesní parametry. Tahová zkouška je běžně používaným mechanickým testem, který nepřetržitě popisuje závislost napětí v materiálu na deformaci. Výsledkem je diagram používaný pro stanovení mechanických vlastností materiálů: meze kluzu  $R_e$  a  $R_{p0,2}$ , meze pevnosti  $R_m$  a modulu pružnosti  $E$ . Speciálně připravené standardní vzorky pro statickou zkoušku v tahu jsou během zkoušky zatěžované až do porušení.

Nicméně je velmi důležité vědět, že s rostoucí výrobou a vývojem nových materiálů a slitin, a s tím spojených způsobů zpracování strojírenských dílů a výrobků, se stává tahová zkouška více časově náročnou a drahou. To vede k potřebě urychlení a zjednodušení zkušebních metod, které by rovněž umožnily uživatelům zkoušet materiály a celé výrobky nedestruktivním způsobem. Metody měření tvrdosti jsou toho příkladem.

Zkoušky tvrdosti jsou založené na vnikání indentoru (kulička, kužel nebo jehlan) do povrchu a sledování odezvy materiálu. Tyto zkoušky mají vysokou přesnost výsledků především u homogenního materiálu. Kromě toho korelace mezi číslem tvrdosti a některými mechanickými vlastnostmi se ukázaly jako užitečné v technické praxi a byly standardizovány například v České Republice, Rusku, Německu a USA.

Lze vycházet z některých výhod měření tvrdosti:

1. Stanovení mechanických vlastností polotovarů a finálních výrobků.
2. Měření vlastností v mikro-objemech, zvláště když je materiál citlivý na některé strukturní vady, jako je tomu například v technologii svařování.
3. Při provozních zkouškách materiálů.
4. Využití v povrchovém inženýrství, kde je velmi důležitá kontrola degračních procesů probíhajících na povrchu a pod povrchem.
5. Automatizace měření, které umožňuje učinit testovací proces nepřetrži-

tým.

V technické praxi existují rizika spojená s konstrukčním návrhem, zvláště když jsou využity nové materiály nebo dochází ke strukturním změnám, při kterých se některé vlastnosti mohou změnit během provozu. Dostupnost a využití metod konečných prvků může snížit náklady a čas na testování a ověřování konkrétního konstrukčního návrhu. Avšak kvalita vstupních dat významně ovlivňuje výsledek získaný pomocí výpočtů metodou konečných prvků (MKP), což je výzvou pro nové metody zkoušení mechanických vlastností, které mohou být časově a ekonomicky efektivními, stejně jako přesnými. Z toho důvodu metoda instrumentovaného (automatizovaného) vtlačování indentoru kulového tvaru (ABI) má v tomto směru velký potenciál.

Metody měření tvrdosti mohou být rozděleny do tří skupin podle měřicího rozsahu: makro, mikro a nano; makro-indentace pracuje při zatížení indentoru od 2 N to 30 kN; mikro-indentace se používá při zatížení menším než 2 N a hloubce vtisku větší než 0,2  $\mu\text{m}$ ; nanoindentace je aplikovaná do hloubky 0,2  $\mu\text{m}$ .

## 1. Současný stav

V inženýrské praxi existuje několik principiálně odlišných způsobů zkoumání mechanických vlastností materiálů, a to již od návrhu a výroby až po konečnou kontrolu kvality a životnosti součástí, strojů a konstrukcí. Z metodologického hlediska je známo, že lze takové zkoumání provádět nedestruktivním nebo destruktivním způsobem. Nedestruktivní metody nacházejí uplatnění jako alternativní způsob pro standardně zavedené destruktivní metody, neboť umožňují provedení zkoušek i bez speciálně vyrobených vzorků přímo na konstrukční součásti, případně i za provozu, což je časově a energeticky velmi výhodné. Toto je umožněno vzhledem k extrémně malému objemu zkoumaného materiálu potřebného k měření a testovacímu zařízení, jehož měřicí prvky mají vysokou citlivost a rozlišovací schopnost. Testovací zařízení jako celek, díky pokročilé automatizaci na hardwarové i softwarové úrovni, umožňuje provedení komplexních testů s vysokou přesností. Lze tak měřit široké spektrum materiálových veličin, jako jsou hodnoty tvrdosti, meze pevnosti, meze kluzu, modulu pružnosti, energie elastické a plastické deformace, exponent a koeficient deformačního zpevnění. [1]

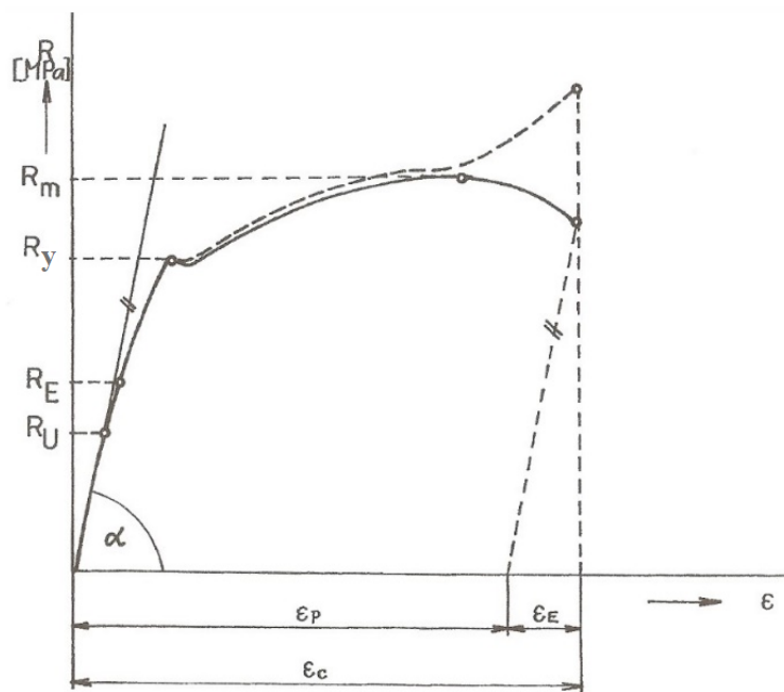
Měření tvrdosti se provádí indentační metodou, při které indentor s definovanou geometrií a daným způsobem zatížení, vniká do povrchu zkušebního tělesa. Tvrdost se určuje na základě měření geometrie vtisku nebo posuvu indentoru při daném zatížení. Z naměřených číselných hodnot tvrdosti lze následně získat další mechanické vlastnosti, za pomoci známých případně standardizovaných korelačních vztahů. [2,3,4,5]

Indentační zkouška poskytuje objektivní výsledky stanovených mechanických vlastností materiálů, nejen použitím jediné hodnoty tvrdosti při daném zatížení, ale průběžným zaznamenáváním parametrů procesu zatížení a odlehčení. Tato metoda je nazývána instrumentovanou indentační zkouškou materiálů. Závislost zatížení - hloubka vtisku popisuje charakteristické chování materiálu v průběhu elastické, elasticko-plastické a plastické deformace.

Princip vtlačování indentoru kulového tvaru do povrchu materiálu je známý ze zkoušek tvrdosti podle metody Rockwell a Brinell. Velké pokroky v jeho automatizaci byly aplikovány teprve v letech 1970 až 1990 přesto, že se o možnosti výpočtu pevnostních charakteristik materiálů a materiálových vlastností z hodnot tvrdosti, vědělo již dříve. Například v inženýrské praxi byly zavedené převodní tabulky z odměřené tvrdosti HB na mez pevnosti  $R_m$  (pro ocele a litiny), které byly později normalizované. V letech 1950 až 1970 o vztazích mezi pevností materiálu a tvrdosti psali významní vědci, jako R. Hill [6], D. Tabor [7], K. L. Johnson [8.9]. Ale ještě před tím někteří z teoretiků, jako například v bývalém Sovětském Svazu akademik A. J. Ishlinsky [10], potvrdili pomocí matematicko-fyzikálního modelování, že dokonce existuje vztah mezi mezí kluzu materiálu a číslem tvrdosti HB. Jak je vidět, uvedený princip vtlačování indentoru má bohatou historii a teoretickou podstatu i když první automatické zařízení a instrumentované systémy pocházejí z let 1980 až 1990. Vývojem těchto zařízení se stále zabývají vědecká pracoviště například v USA, Koreji a Rusku. Některé z nich dostaly své měřicí systémy na velmi dobrou technickou úroveň a distribuují je po celém světě.

## 2. Literární rešerše o vývoji metodik měření tvrdosti

Nejrozšířenějším způsobem zkoušení mechanických vlastností materiálu je statická zkouška tahem. Grafické závislosti, získané v průběhu zkoušky, popisují deformačně-napěťové stavy v materiálu ve všech stádiích procesu jeho deformování (elastické, elasticko-plastické, plastické). Z těchto závislostí lze stanovit mez úměrnosti, mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti, tažnost, kontrakci, exponent a koeficient deformačního zpevnění. Statické zkoušky v tahu vyžadují speciální zařízení (trhací stroj) a speciálně připravené vzorky (tahové tyče). Během zkoušky se vzorky zatěžují tahovou silou až do jejich roztržení. Typický tahový diagram je uveden na Obr. 1, kde jsou zobrazené mez úměrnosti  $R_u$ , mez pružnosti  $R_E$ , mez kluzu  $R_y$ , mez pevnosti  $R_m$ . I když je tato zkouška běžně používána, v průmyslu a výzkumu neustále existuje zájem o metodiky, které dovolují zkoušet materiál jednodušším, rychlejším, levnějším způsobem, ideálně bez porušení materiálu. Jednou z variant takového druhu zkoušení materiálu jsou instrumentované indentační zkoušky, například metody ABI.



*Obr. 1: Schématický diagram ze statické zkoušky tahem*

Sledování mechanických vlastností zkoušeného materiálu v průběhu vnikání

indentoru ve tvaru kuličky do povrchu materiálu, je propojené s vývojem teorií tvrdosti, lomové mechaniky a mechaniky kontaktní deformace. Počátek daných vědeckých teorií pochází z 19 století a začíná v experimentech Heinricha Hertze, který ve své práci od roku 1881 sledoval pružný kontakt dvou koulí a koule s rovinným povrchem. [11] V další práci Hertz definoval fyzikální hodnotu tvrdosti při zkoumání pružného kontaktu tvrdých těles [12]. Podle Hertze, je tvrdost hodnota tlaku v centru vtisku, který má „kritické rozměry“, což odpovídá přechodu z elastické deformace v plastickou. Hertzova tvrdost byla počítaná podle vzorce:

$$H_{He} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_e}{\frac{\pi d_e^2}{4}} = \frac{6P_e}{\pi d_e^2} \quad (1)$$

kde  $P_e$  - zatížení v okamžiku vzniku plastického tečení;

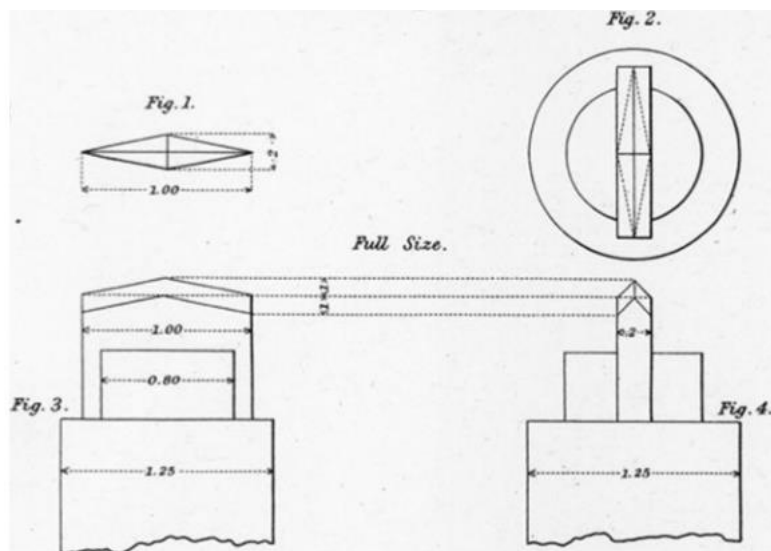
$d_e$  - průměr vtisku.

Hertz byl přesvědčený o tom, že tato hodnota je „absolutní“ a přímo definuje mechanické vlastnosti materiálu.

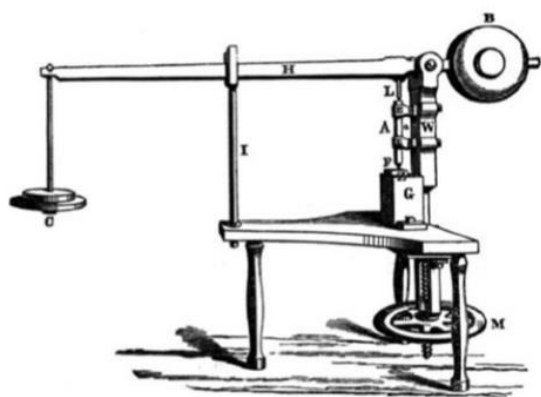
Problematice „absolutní tvrdosti“ věnoval velkou pozornost také F. Auerbach, který v jedné ze svých prací od roku 1891 dokonce stanovil vztah mezi poloměrem sférického indentoru a kritickým zatížením. [13]

Historicky lze předpokládat, že první přístroje pro měření tvrdosti, o kterých byly zveřejněné nějaké informace, navrhli a vyrobili Wade v roce 1856 (viz Obr. 2) a Calvert s Johnsonem v 1859 (viz Obr. 3). Číselná hodnota tvrdosti, kterou pomocí těchto přístrojů měřili, charakterizovala odpor tělesa vůči vniknutí indentoru. Na Obr. 3 je uveden příklad výsledku měření Calverta a Johnsona. [14]





*Obr. 2: Indentační nástroj Wade; upraveno z [13]*



Names of metals	Weight employed lbs.	Calculated cast iron=1000
Staffordshire cold blast cast iron: grey, no. 3	4800	1000
Steel	4600	958
Wrought iron	4550	948
Platinum	1800	375
Copper: pure	1445	301
Aluminium	1300	271
Silver: pure	1000	208
Zinc do	880	183
Gold do	800	167
Cadmium do	520	108
Bismuth do	250	52
Tin do	130	27
Lead do	75	16

a)

b)

*Obr. 3: Příklad pro měření tvrdosti podle Calverta a Johnsona*

*Zkušební zařízení, b) Výsledky měření; upraveno z [14]*

Velkým pokrokem ve vývoji teorií tvrdosti byla prezentace metodiky výpočtu tvrdosti a postupu měření švédským inženýrem Brinellem v Paříži (roku 1900) a také návrhu přístroje pro realizaci tohoto způsobu. [15] Tvrdost podle Brinella bere v úvahu parametry vtisku po jeho odlehčení. Vtisk byl přitom vytvořený indentorem ve tvaru koule, s maximálním zatížením, jehož hodnota je definována na začátku měření. Číslo tvrdosti lze počítat ze známého vzorce, ve kterém je

zatížení ( $P$ ) vyděleno plochou povrchu vtisku po jeho odlehčení ( $F_o$ ).

$$HB = \frac{P}{F_o} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Kde  $P$  - maximální hodnota použitého zatížení;

$F_o$  – plocha vtisku;

$D$  - průměr indentoru;

$d$  - průměr vtisku.

Tvrdoost podle Brinella neurčuje odpor tělesa vůči vniknutí indentoru do jeho povrchu, jako je to například u měření podle Rodmana, Calverta a Johnsona. Tvrdoost podle Brinella charakterizuje konečný výsledek deformace po odlehčení, tedy plastickou deformaci materiálu. Zkouška tvrdosti podle Brinella byla standardizovaná ve všech vyspělých zemích. V současnosti se také řídí mezinárodními standarty ISO [16], kde jsou dokonce popsány parametry provedení zkoušek pro různé materiály, viz Tab.1 až Tab.3.

**Tab. 1:** Poměr  $0,102F/D^2$  pro různé materiály; upraveno z [16]

Materiál	Tvrdoost HB	Poměr $0,102F / D^2$
Ocel	do 650	30
Litina <sup>1</sup>	< 140 HB	10
<sup>1</sup> Při zkouškách litiny musí být průměr kuličky 2,5 mm, 5 mm, nebo 10 mm.	≥ 140 HB	30
Měď a slitiny mědi	< 35	5
	35 až 200	10
	> 200	300
Lehké kovy a jejich slitiny	< 35	1,25 nebo 2,5
	35 až 80	5, 10, nebo 15
	> 80	10 nebo 15
Olovo, cín		1 nebo 1,25
Spékané kovy		viz ISO 4498 - 1

**Tab. 2: Poměr zatěžující síly a průměru indentoru; upraveno z [16]**

Průměr kuličky v mm		10	5	2,5	2	1
Zkušební síla		Poměr $0,102 F / D^2$				
N	(kp)					
29 400	3 000	30				
14 710	1 500	15				
9 807	1 000	10				
7 355	750		30			
4 903	500	5				
2 452	250	2,5	10			
1 839	187,5			30		
1 226	125	1,25	5			
1 177	120				30	
980,7	100	1				
612,9	62,5		2,5	10		
392,3	40				10	
294,2	30					30
306,5	31,25		1,25	5		
245,2	25		1			
196,1	20				5	
153,2	15,625			2,5		
98,07	10				2,5	10
76,61	7,8125			1,25		
61,29	6,25			1		
49,03	5				1,25	5
39,23	4				1	
24,52	2,5					2,5
12,26	1,25					1,25
9,807	1					1

**Tab. 3: Přehled norem pro zkoušky tvrdosti podle Brinella; upraveno z [16]**

	Název	Norma	Vydána	Účinnost
<b>ČSN EN</b>	Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda	ČSN EN ISO 6506-1	01-12-2000	01-01-2001
	Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních zařízení	ČSN EN ISO 6506-2	01-12-2000	01-01-2001
	Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 3: Kalibrace referenčních destiček	ČSN EN ISO 6506-3	01-12-2000	01-01-2001
<b>ISO</b>	Metallic materials -- Brinell hardness test -- Part 1: Test method	ISO 6506-1		01-10-1999
	Metallic materials -- Brinell hardness test -- Part 2: Verification and calibration of testing machines	ISO 6506-2		01-10-1999
	Metallic materials -- Brinell hardness test -- Part 3: Calibration of reference blocks	ISO 6506-3		01-10-1999
<b>ASTM</b>	Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials	ASTM E10		01-08-2001
<b>GOST</b>	Metals. Method of Brinell hardness measurement	GOST 9012-59		
<b>JIS</b>	Brinell hardness test -- Test method	JIS Z 2243		20-12-1998
	Brinell hardness test -- Verification of testing machines	JIS B 7724		20-03-1999
	Brinell hardness test -- Calibration of reference blocks	JIS B 7736		20-03-1999

Podobnou metodu výpočtu tvrdosti v roce 1898 navrhl Martens. [17] Martens provedl několik experimentů, z kterých zjistil, že závislost mezi hloubkou vtisku

(bez odlehčení) a zatížením není lineární. Zároveň s tím, pro hloubku po odlehčení Martens stanovil, že závislost mezi touto hloubkou a zatížením je lineární jen pro některé intervaly hodnot zatížení. Vzorec pro výpočet tvrdosti podle Martense je stále používaný, zejména když je třeba spočítat tvrdost z hodnoty hloubky vtisku:

$$H = \frac{P}{F_o} = \frac{P}{\pi Dt} \quad (3)$$

Kde  $P$  - hodnota použitého zatížení;

$D$  - průměr indentoru;

$t$  - hloubka vtisku.

Mayer v roce 1908 navrhl výpočet tvrdosti ze zatížení a plochy projekce vtisku [18]:

$$HM = \frac{P}{F}, \quad (4)$$

$$F = \pi a^2, \quad (5)$$

Kde  $P$  - hodnota použitého zatížení;

$a$  - kontaktní poloměr vtisku.

Clamer konstatoval, že na začátku XX století byla nejpoblárnější a nejpoužívanější metoda měření tvrdosti podle Brinella. [19] V roce 1920 Rockwell vyvinul svůj způsob měření tvrdosti, který eliminoval nevýhody Brinellovy metody jako jsou velké hodnoty zatížení a nutnost výpočtu hodnoty tvrdosti. Rockwellova tvrdost je definovaná smluvními hodnotami odečítanými z hloubky vtisku po dvou za sebou následujících zatíženích  $P_1$  a  $P_2$ , čím bylo umožněno odečítat hodnotu tvrdosti přímo ze stupnice tvrdoměru.

$$HRB = \frac{K - (h_2 - h_1)}{c}, \quad (6)$$

Kde  $K$  - je konstanta v mm nebo  $\mu\text{m}$ ;

$h_1$  a  $h_2$  - hloubky vtisku pod různým zatížením,

$c$  - krok stupnice tvrdoměru.

Rockwellova metoda díky rychlosti měření a vyhodnocení stále zůstává populární v průmyslových podmínkách. [20]

Další rychlou metodu měření tvrdosti, která se používá i do současnosti zejména u polymerních materiálů, vyvinul Shore. [21] Podstatou zkoušky je měření odporu proti vtlačování hrotu předepsaného tvaru do zkoušeného materiálu. Odpor, který klade materiál indentoru, se registruje pomocí pružiny. Tvrdost je nepřímo úměrná vniku hrotu do zkoušeného materiálu a závisí na jeho modulu pružnosti a viskoelastickém stavu. Vyjadřuje se v jednotkách Shore.

Russell navrhl výpočet tvrdosti ze zatížení vydělené objemem vtisku, který se počítá z jeho hloubky [22]:

$$H_{Ru} = \frac{P}{V} = \frac{P}{\pi h^2 \left( \frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)} \quad (7)$$

Kde  $P$  - hodnota použitého zatížení;

$V$  - objem vtisku;

$D$  - průměr indentoru;

$h$  - hloubka vtisku.

M.S. Drozd vzal v úvahu všechny výše uvedené způsoby, na jejichž základě navrhl své univerzální číslo tvrdosti, které získal ze dvou vtisků indentoru do materiálu při různém zatížení [23]:

$$H = \frac{P - P_1}{\pi D(h - h_1)}, \quad (8)$$

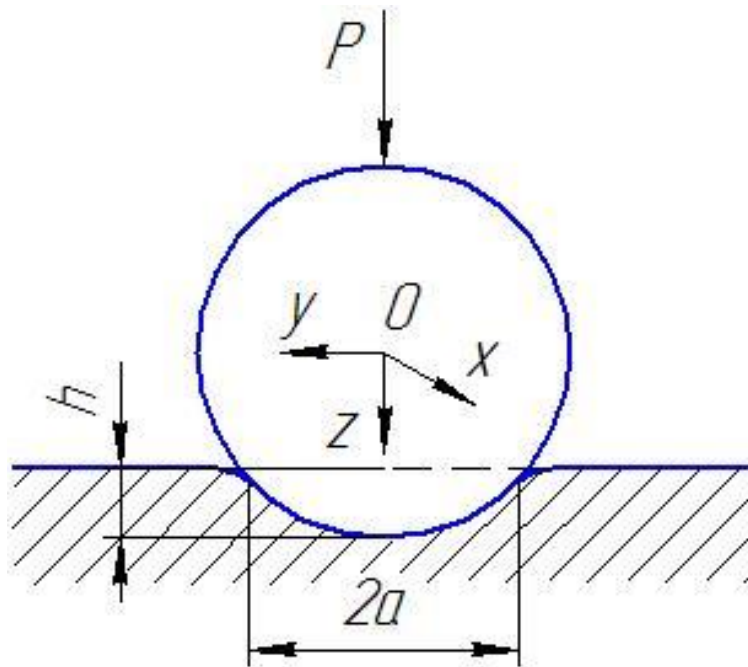
Kde  $P$  a  $P_1$  - zatížení, přičemž  $P > P_1$ ;

$h$  a  $h_2$  - hloubky vtisku po odlehčení.

V 60 letech XX století Pilipchuk definoval tvrdost jako zvláštní vlastnost, kterou mají tvrdá tělesa a která se projeví ve schopnosti těles reagovat na elastickou nebo plastickou deformaci. Jiným způsobem si tuto definici vysvětlil Lahtin, který tvrdil, že tvrdost je schopnost materiálu klást odpor plastické deformaci při kontaktním deformování jeho povrchu. [24] Toto tvrzení je neplatné pro materi-

ály, které se deformují pouze elasticky. Mott definoval tvrdost jako vlastnost, která může charakterizovat jak elastickou tak i plastickou deformaci. [25] Tyto definice odpovídají metodám kinetické tvrdosti, které byly vyvinuty Bulychevym a Alehinym. Při nich se průběžně registrují data zatížení a hloubky vtisku, z nichž se po skončení měření sestrojí indentační křivka. [26]

Vývoj teorií tvrdosti je propojený s lomovou mechanikou, která je také spojená s experimenty Henricha Hertze. Proces elastického vlačování indentoru do povrchu materiálu znázorňuje Obr. 4. Tento proces se nazývá „Hertzův kontakt“ nebo „Hertzova interakce“:



**Obr. 4:** Elastická deformace tělesa kuličkou („Hertzův kontakt“)

Hertz ve své práci uvedl kvantitativní poměry pro napětí, které vznikne na povrchu materiálu při jeho kontaktu. [12] Jen toto však nestačilo pro komplexní popis procesu vlačování sférického indentoru do povrchu tělesa. Z toho důvodu mnoho autorů hledalo matematické vyjádření procesu kontaktní deformace materiálu. Huber jako první vyvinul matematický popis pro celé napěťové pole v Descartově systému souřadnic [27]:

$$\begin{aligned}
\sigma_y &= q_a \psi_y(r, z), \\
\sigma_x &= q_a \psi_z(r, z), \\
\tau_{yx} &= q_a \psi_{yz}(r, z),
\end{aligned} \tag{10}$$

kde

$$\begin{aligned}
\psi_y(r, z) &= \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2+z^2} \left[ 1 - \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \\
&+ \frac{z}{\sqrt{u}} \left[ \frac{(1-\nu)u}{a^2 + u} + (1-\nu) \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right] \\
\psi_z(r, z) &= - \left( \frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\psi_{yz} = - \frac{(r^2 + z^2) z^2}{u^2 + a^2 z^2} \frac{a^2 \sqrt{u}}{a^2 + u}$$

kde  $u$  - je kladné řešení rovnice (12)

$$\left[ \frac{r^2}{a^2 + u} \right] + \left( \frac{z^2}{u} \right) = 1 \tag{12}$$

Lown popsal kontakt pevné (tvrdé) sféry s pružným tělesem s konstantním Poissonovým číslem ve válcové soustavě souřadnic následovně [28]:

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= \left[ -3P/(2\pi a^2) \right] \left\{ 2\sqrt{2} z^3 a^2 / [\Delta(\Delta + \gamma)^{3/2}] \right\}; \\
\sigma_r &= \left[ -3P/(2\pi a^2) \right] \left\{ -z(1+\nu) \operatorname{arctg}(a\sqrt{2}/\sqrt{\Delta + \gamma})/a + \right. \\
&+ \nu z(7\Delta + \gamma + 2a^2) / (4\sqrt{2}\Delta\sqrt{\Delta + \gamma}) + z[r^2(17\Delta + 7\gamma - 2a^2) - \\
&- 4\Delta(\Delta + \gamma - 2z^2)] / (8\sqrt{2}\Delta r^2 \sqrt{\Delta + \gamma}) - (1-2\nu)a^2(\sqrt{\Delta + \gamma} - z\sqrt{2})^3 \times \\
&\times \left. \left[ \sqrt{\Delta + \gamma}(7\Delta + 9\gamma + 6z^2) + 3\sqrt{2}z(3(\Delta + \gamma) - 2a^2) \right] / 48r^2\Delta(\Delta + \gamma)^2 \right\}; \\
\sigma_\theta &= \left[ -3P/(2\pi a^2) \right] \left\{ -z(1+\nu) \operatorname{arctg}(a\sqrt{2}/\sqrt{\Delta + \gamma})/a + \right. \\
&+ \nu z(9\Delta - \gamma - 2a^2) / (4\sqrt{2}\Delta\sqrt{\Delta + \gamma}) + z[r^2(7\Delta + \gamma + 2a^2) + \\
&+ 4\Delta(\Delta + \gamma - 2z^2)] / (8\sqrt{2}\Delta r^2 \sqrt{\Delta + \gamma}) - (1-2\nu)a^2(\sqrt{\Delta + \gamma} - z\sqrt{2})^3 \times \\
&\times \left. \left[ \sqrt{\Delta + \gamma}(7\Delta + 9\gamma + 6z^2) + 3\sqrt{2}z(3(\Delta + \gamma) - 2a^2) \right] / 48r^2\Delta(\Delta + \gamma)^2 \right\}; \\
\tau_{rz} &= \left[ -3P/(2\pi a^2) \right] \left\{ 2\sqrt{2} z^2 a^2 (\Delta + \gamma - 2z^2) / [r\Delta(\Delta + \gamma)^{3/2}] \right\},
\end{aligned} \tag{13}$$

Kde  $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  - relativní deformace,

$\gamma$  - relativní posuv (skluz).

Převod těchto napětí na hlavní složky napětí se provede stejně jako u osové symetrické kontaktní úlohy, pro kterou musí platit:

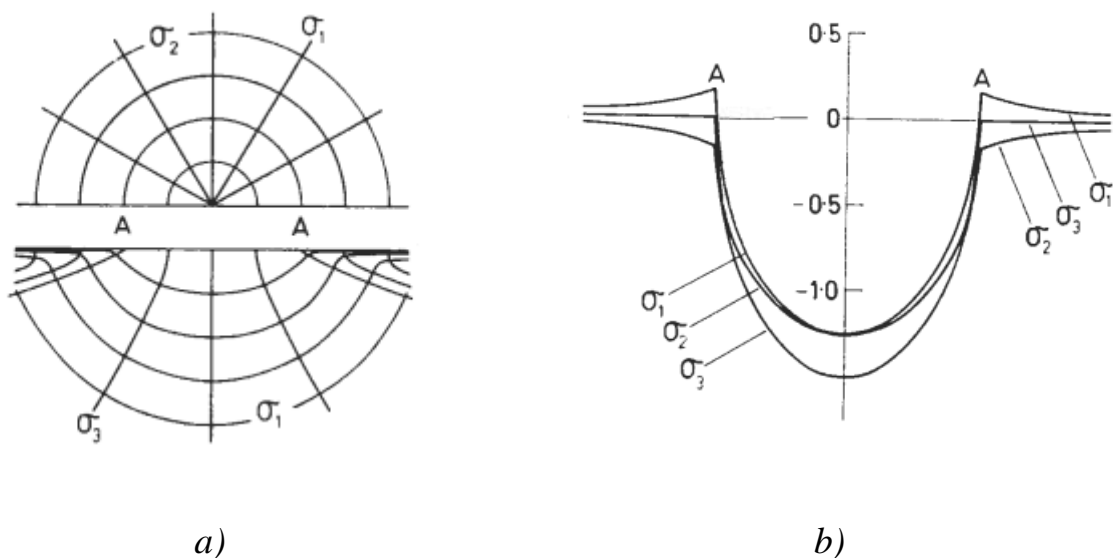
$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3;$$

$$\sigma_1 = \sigma_r \sin^2 \alpha + \sigma_z \cos^2 \alpha - 2\tau_{rz} \sin \alpha \cos \alpha;$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta; \tag{14}$$

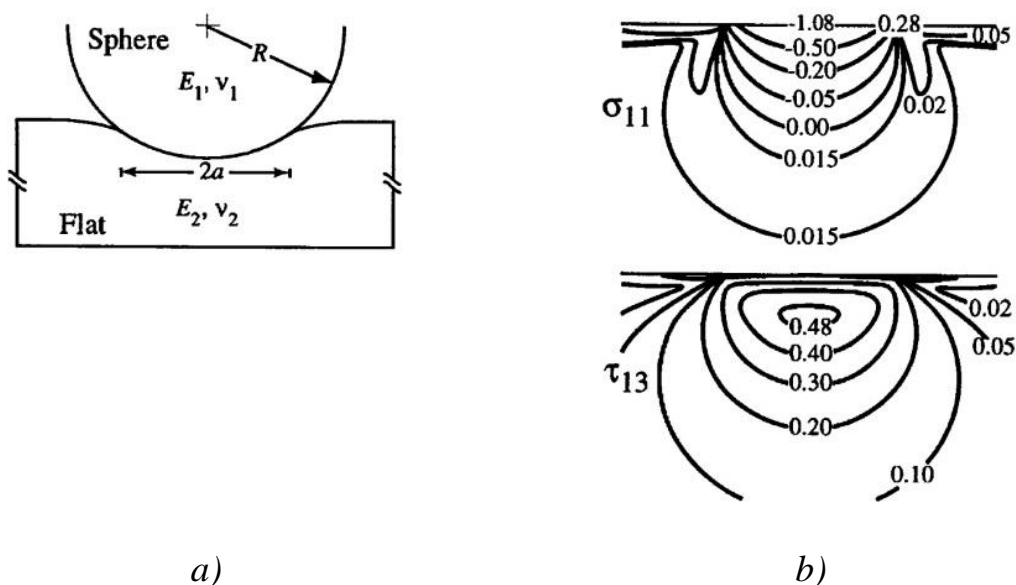
$$\sigma_3 = \sigma_r \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha + 2\tau_{rz} \sin \alpha \cos \alpha.$$

Lown a Wilshaw převedli výše uvedené výpočty do grafických závislostí viz Obr. 5. [29]



**Obr. 5:** Distribuce hlavních napětí při elastické deformaci tělesa kuličkou a) trajektorie napětí shora a řez v ploše symetrie b) trajektorie na povrchu a uvnitř tělesa; upraveno z [29]





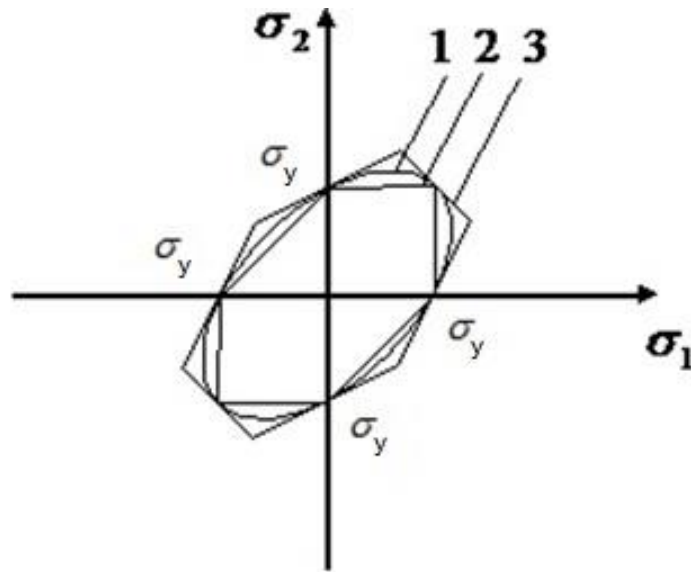
**Obr. 6:** Příčný pohled na Hertzovou interakci

*Schéma b) Trajektorie hlavních napětí; upraveno z [29]*

Na Obr. 5a jsou uvedené trajektorie napětí v horizontální rovině a rovině symetrie. Obr. 5b znázorňuje distribuci napětí na povrchu a v kontaktní zóně těsně pod povrchem. Z tohoto zobrazení je vidět, že charakter distribuce napětí v místě kontaktu indentoru a povrchu odpovídá smykovému napětí. Příčný pohled na Hertzovou interakci a trajektorie hlavních napětí jsou zobrazeny na Obr. 6.

Matematické vyjádření pro napěťové pole pružných těles na začátku XX století vytvořil Dinnik. [30] V jeho práci jsou uvedené závislosti, které charakterizují napěťovo-deformační stav při elastickém kontaktu. Autor uvažoval s tím, že kontaktní plocha má kruhovou geometrii, na rozdíl od eliptické. Řešení pro eliptickou kontaktní plochu pak našel Shtaerman. [31]

Pro popis modelu plastické deformace je třeba začít ze základního kritéria plastického tečení. Mezi nimi se nacházejí modely intenzity napětí (autory Huber a Mises), model maximálního tangenciálního napětí (autory Tresca a Saint-Venant) a model Ishlinskeho-Hilla. Grafická interpretace je uvedena na Obr. 7:



**Obr. 7:** Kritéria vzniku plastického tečení.

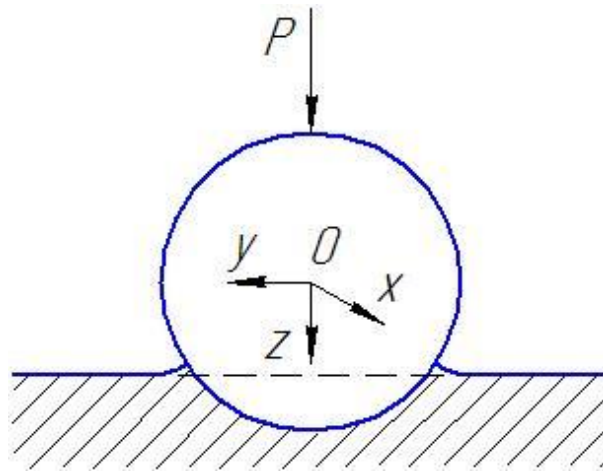
1 – Huber a Mizes, 2- Tresca a Saint-Venant, 3 – Ishlinskij – Hill

$\sigma_y$  na obrázku vyznačuje mez kluzu; upraveno z [34]

Lze konstatovat, že hodnoty napětí, definované podle těchto kritérií se málo liší. Spolu s tím uvedení autoři nezahrnují vliv napěťově-deformačního stavu (NDS) pro hodnotu kritériálního napětí. Hledání přesné závislosti popisující plastické tečení při vtisku kuličkového indentoru je náročné a proto každá práce v této oblasti je jednoznačně důležitá a jakýkoliv pokrok v tomto směru je přínosem pro základní analytické řešení.

V monografii [32] je uveden detailní rozbor modelů analytických a zpracovaných pomocí MKP pro případy vtláčování různými druhy indentoru, zahrnujících elasticko-plastické nebo pouze plastické vlastnosti deformovaného tělesa a definované podmínky jejich použití.

Elasticko-plastická interakce je znázorněná na Obr. 8.



**Obr. 8:** *Elasticko–plastická interakce mezi kulovým indentorem a tělesem*

Mnoho autorů v rámci popisu elasticko–plastické interakce indentoru a tělesa vycházelo z výpočtů deformace plastického tělesa a metody skluzových čar, která byla vyvinutá Prandlem a Hillem. [33]

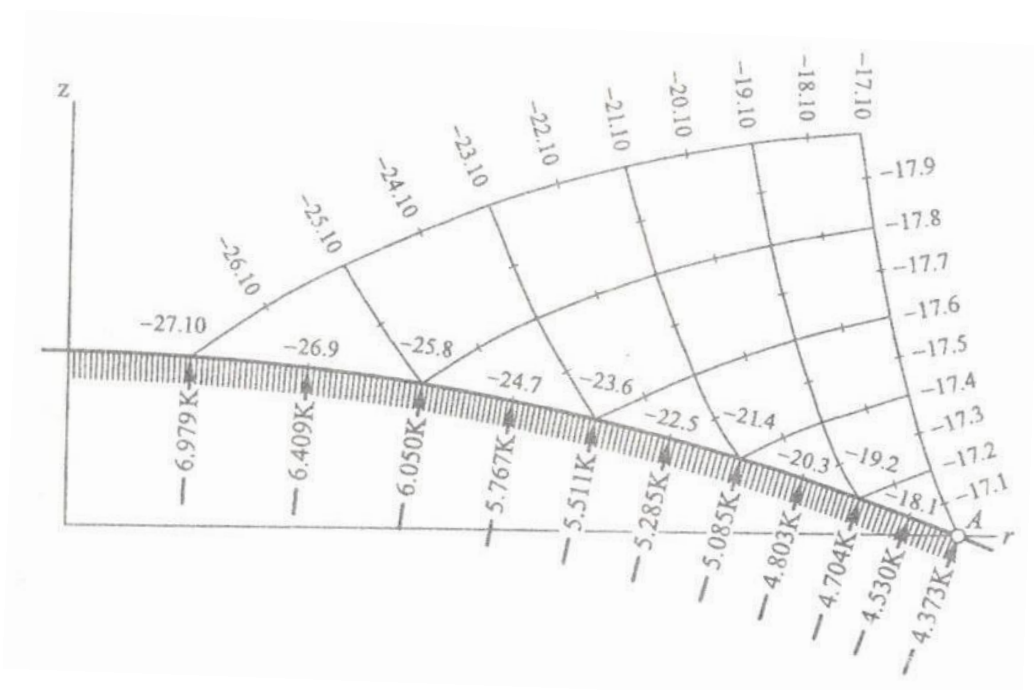
Velký význam v této oblasti má práce akademika A. U. Islinskeho [10], který s využitím hypotézy Haara-Karmana a metody skluzových čar popsal celý proces vtlačování sférického indentoru do plastického materiálu. Islinskyj nezahrnul do výpočtu tření a zpevnování materiálu. Výsledkem byla konstantní závislost mezi číslem tvrdosti podle Brinella nebo Meyra a mezí kluzu a diagramy NDS viz Obr. 9:

$$\sigma_s = 0,383H_B = 0,376H_M \quad (15)$$

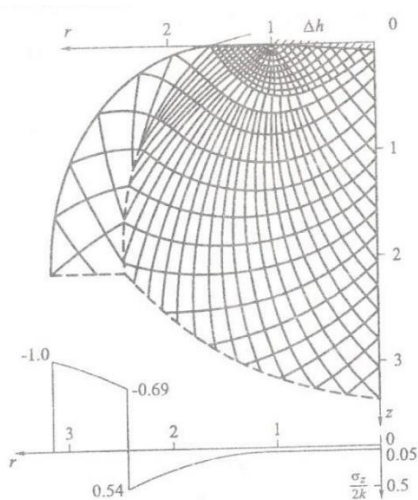
Kde  $\sigma_s$  - mez kluzu;

$H_B$  - tvrdost podle Brinella;

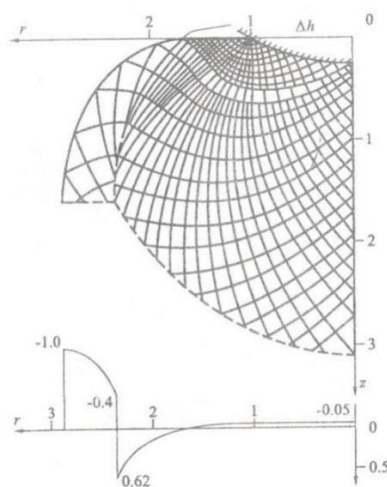
$H_M$  - tvrdost podle Meyera



a)



b)



c)

**Obr. 9:** Diagramy NDS získané Ishlinskim; upraveno z [10]

Později, v roce 1983, byla tato závislost experimentálně ověřená v Institutu Problém Mechaniky USSR, na počítači EC-1055. Výsledky byly ve shodě pro základní i upřesněný výpočet.

Závislosti stanovené Ishlinskim jsou shodné s výsledky, které nezávisle získal Tabor [35].

Marsh ve své práci sledoval vtlačování indentoru v rámci elasticko-plastického procesu šíření sférického prostoru na základě řešení Hilla [36].

Johnson studoval proces vtlačování a dokončil postup Marshe, který zpracoval pro malé hloubky vnikání bodového indentoru, přitom výpočet provedl pomocí rovnice 16 [37]:

$$\frac{q_a}{\sigma_T} = \frac{H}{\sigma_T} = \frac{2}{3} \left[ 1 + \ln \frac{(E/\sigma_T) \operatorname{tg} \varphi_1 + 4(1-2\nu)}{6(1-\nu)} \right] \quad (16)$$

Pro tuto rovnici musí platit, že  $a < 5R$

Kde  $\varphi_1$  - je úhel mezi tečnami k povrchu indentoru a tělesa, přičemž  $\operatorname{tg} \varphi_1 = a/R$

Pro sférický indentor lze tuto závislost použít jen po dosažení meze úměrnosti, přičemž  $\operatorname{tg} \varphi_1 = (a - a_T)/R$

$a_T$  - je poloměr kontaktní plochy na začátku plastické deformace.

Tento poloměr, lze spočítat podle Hertze, jak zobrazuje rovnice 17 [12]:

$$a^3 = (3/8)PR[(1-\nu_1)/G_1 + (1-\nu_2)/G_2] \quad (17)$$

Kde  $G_1$  a  $G_2$  - jsou smykové moduly materiálu tělesa a indentoru.

Závislost, která popisuje přiblížení kulového indentoru při elasticko-plastickém vtlačování, byla stanovena Netjagovym a Izmajlovym [38].

$$h = \frac{P}{2\pi RC\sigma_T} + \frac{3}{8} J \sqrt{\pi PC\sigma_T} \quad (18)$$

Kde  $J = (1-\nu^2)/E$  - je převedený modul pružnosti,

$\sigma_T$  - je mez kluzu.

Johnson studoval stlačování měděných koulí, v průběhu plastického tečení, při kterých stanovil závislosti pro povrchové napětí, které se nachází za kontaktní plochou [39]:

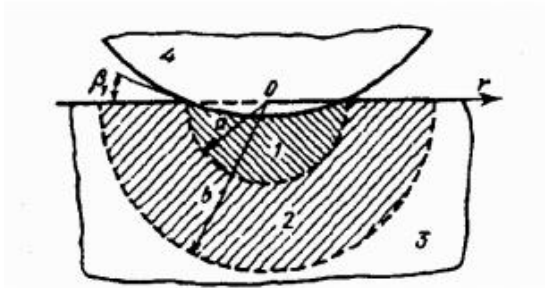
$$\sigma_r = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \frac{1+2\alpha}{\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \frac{2+\alpha}{\sqrt{1+\alpha+\alpha^2}} \quad (19)$$

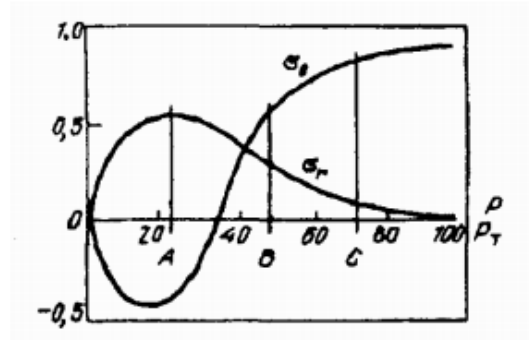
$$\alpha = \varepsilon_r' / \varepsilon_\theta', \quad \varepsilon_{r,\theta}' = \partial \varepsilon_{r,\theta} / \partial (a/R)$$

Kde  $\varepsilon_r$  - radiální plastická deformace;

$\varepsilon_\theta$  - kruhová plastická deformace.



a)



b)

**Obr. 10:** Elasticko–plastický model Hilla – Johnsona

schéma b) grafy hlavních napětí; upraveno z [39]

Na základě Johnsonova modelu byly získány závislosti pro výpočet napětí v elasticko-plastickém tělese při vtlačování kulového indentoru [32]:

$$\sigma_\theta = -\sigma_r = (\sigma_T / \sqrt{3})(b/r)^2 \quad \text{při } r > b \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -2\sigma_T \ln(b/r) - 2\sigma_T/3 \\ \sigma_\theta &= -2\sigma_T \ln(b/r) - \sigma_T/3 \end{aligned} \right\} \quad \text{při } a < r < b \quad (21)$$

Ale jak ukazuje srovnávací analýza, která byla provedena v práci [32] Johnsonův model nemá dobrou shodu s MKP výpočtem. Zbytkové napětí na hranici kontaktní plochy lze spočítat podle následujících vzorců:

$$\sigma_r^r = \sigma_{r\max} - 0,5(1 - 2\nu)(q_m - q_i) \quad (22)$$

$$\sigma_\theta^r = \sigma_{\theta\max} + 0,5(1 - 2\nu)(q_m - q_i)$$

Kde  $q_m$  - maximální kontaktní tlak,

$q_i$  - střední kontaktní tlak v průběhu odlehčení.

V případě elasticko - plastického procesu vtlačování sférického indentoru do povrchu, který se deformuje se zpevněním, M. S. Drozdu spolu s A. P. Osipenkovem se podařilo najít závislosti pro osové a zbytkové napětí [40]:

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= q_0 \left( A_1 \ln \frac{z}{R} - 1 \right); \\
\sigma_r &= \sigma_z + \sigma_i; \\
A_1 &= \frac{b^3}{\ln(b/R + 1) \sqrt{(b^2 - R^2)^3}}; \\
\sigma_i &= \frac{1,5 A_1 q_0 \varepsilon_i}{3 \varepsilon_i + \exp[-1,5 \varepsilon_0 + A_2 (z - R)]}; \\
A_2 &= \frac{1}{b} \left[ -1,5 \varepsilon_0 + \ln 3 \varepsilon_i \left( \frac{A_1 q_0}{2 \sigma_T} - 1 \right) \right]; \\
b &= \sqrt{P/2 \sigma_T - 1,6 a^2}; \\
\sigma_z^r &= q_0 \left\{ A_1 \ln \frac{z}{R} - \frac{(z - R)^3}{\sqrt{[(z - R)^2 + a^2]^3}} \right\}; \\
\sigma_r^r &= q_0 \left\{ A_1 \ln \frac{z}{R} + \frac{1}{2} \frac{(z - R)^3}{\sqrt{[(z - R)^2 + a^2]^3}} - \frac{(z - R)(1 - \nu)}{\sqrt{(z - R)^2 + a^2}} - (0,5 - \nu) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1,5 A_1 \varepsilon_i}{3 \varepsilon_i + \exp[-1,5 \varepsilon_0 + A_2 (z - R)]} \right\};
\end{aligned} \tag{23}$$

Kde  $\sigma_i$  - intenzita napětí;

$A_1$  a  $A_2$  - koeficienty závislé na hloubce plastické zóny  $b$ .

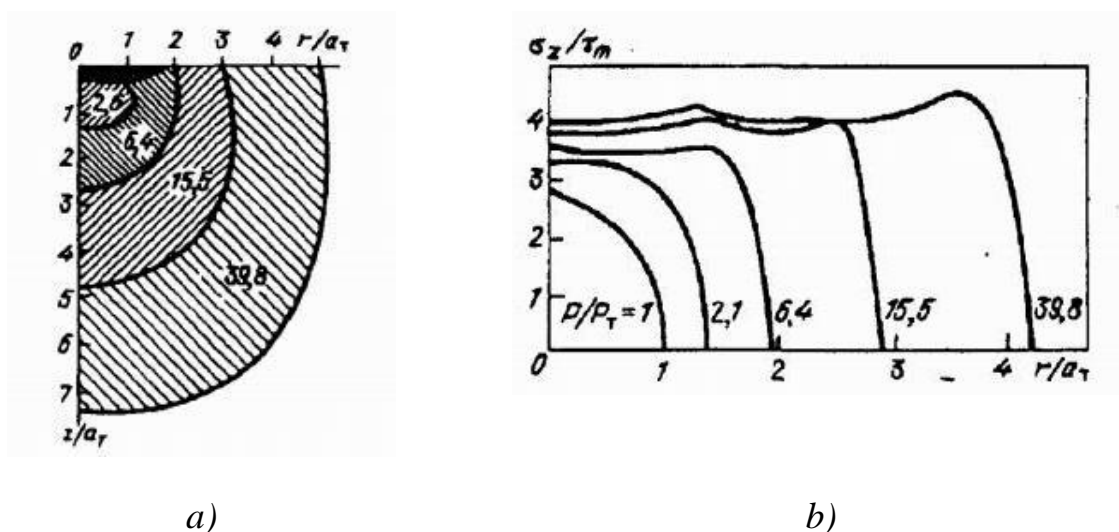
Přičemž hloubku plastické zóny lze spočítat podle vzorce:

$$b = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot R_{p0,2}} - 1,6 \cdot a_c^2} \tag{24}$$

Jakmile se začaly využívat numerické metody výpočtů (hlavně MKP), došlo ke zrychlení a zjednodušení matematického (řešení úlohy výpočtu parametru) zpracování procesu vtlačování indentoru do povrchu tělesa. Zároveň bylo nutné vycházet z takových numerických řešení, které sloužily jako vzor, pomocí kterých došlo k vývoji přesnějších metodik analytického výpočtu. Pravděpodobně první MKP řešení úlohy procesu vtlačování kuličkového indentoru do elasticko-plastického prostoru bylo popsáno v práci Hardi a jeho kolegy. [41]

Zhodnotíme-li všechny dostupné výsledky experimentů této doby, práce Hardiho je nejpřesnější. Autor využívá metodu konečných prvků v úloze vtlačování „nestlačitelné“ sféry do elasticko-plastického prostoru materiálu. Analýza zahrnuje přechodovou oblast, která začíná od maximálního kontaktního zatížení do jeho stonásobné hodnoty  $P_y < P < 100P_y$ .

Na Obr. 11 jsou uvedené průběhy vývoje plastické zóny a grafická závislost distribuce osového napětí.



**Obr. 11:** Elasticko – plastický model Hardiho

a) schéma a charakter distribuce plastické oblasti b) graf distribuce osového napětí; upraveno z [41]

Z grafického vyjádření je vidět, že uprostřed kontaktního povrchu existuje tenká pružná vrstva, která je na Obr. 11a černě vyznačená. Tato disproporce je zásadní mezi MKP a analytickým řešením dané úlohy. Výskyt této vrstvy prokázali Shou a De-Silvio pomocí svých experimentů. [42]

Zajímavé řešení se podařilo najít Kramskomu a Fedorovu. [43] Autoři vlastním přístupem popsali pevnostní matici konečného prvku, kterou použili v programu výpočtu. Výpočet zahrnoval možnost elastického odlehčení při vtlačování pružného kuličkového indentoru do elasticko-plastického tělesa. Dosažené výsledky byly experimentálně ověřeny Brinellovou metodou, kde se prokázala dostatečná shoda v hodnotách hloubky vtisku.



M. B. Bakhirov ve své práci [44] uvádí popis numerického řešení MKP úlohy vtlačování nestlačitelné sféry do elasticko - plastického prostoru. Autorovi se podařilo získat řešení ve 2D (dvourozměrném) a 3D (třírozměrném) prostoru. V práci autor diskutoval o možnosti použití dosažených výsledků pro interpretaci experimentálních dat, získaných nepřetržitým vtlačováním kulového indentoru, kde by na základě závislosti zatížení – hloubka vtisku, byla možnost sestavení tahového diagramu.

Na základě práce [44, 45] a výsledků Hardi [41], M. B. Bakhirov v článku [46] popsal vlastní metodologii návrhu deformačního diagramu pomocí neuronových sítí. Pracovní data pro síť byla převážně získaná z MKP výpočtů a indentačních zkoušek z registrace diagramu «zatížení – hloubka vtisku».

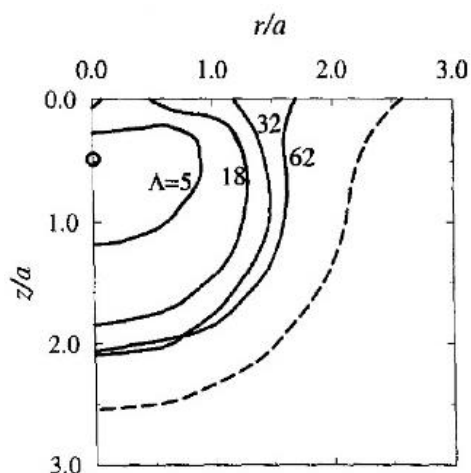
### **3. Chronogický přehled indentačních metodik a výpočtů metodou konečných prvků (MKP).**

Pro detailní pochopení chování materiálu v průběhu vnikání indentoru do jeho povrchu, je potřeba vycházet z výsledků prací, které byly v dané oblasti řešené. Tak lze vyloučit nesprávnou cestu výzkumu, která by vedla k nesplnění cílů a negativním výsledkům.

V časovém období od vzniku prvních prací Henricha Hertze do současnosti, bylo zveřejněno obrovské množství publikací a monografií (například O'Neill více než 400 publikací, Williams více než 1800 publikací), které se týkají problematiky tvrdosti, indentačních metod (v nano, mikro a makro měřítku), výpočtu mechanických vlastností na základě indentačních parametrů, korelace těchto vlastností pomocí neuronových sítí, modelování indentačního procesu pomocí metod konečných prvků (MKP) s experimentálním ověřením dosažených výsledků.

V této disertační práci byly provedeny literární rešerše z velkého množství dostupné literatury, ale všechny zdroje nebyly použitelné a přínosné pro další výzkum a vývoj vlastní indentační metodologie. V uvedeném přehledu byly zahrnuty pouze ty, které se týkají naplnění cílů disertační práce při plánování experimentu a obsahují přínosné výsledky.

V monografii [47] autoři popisují teoretický a výpočtový proces plastické deformace při vtlačování indentoru podle Brinella. Analýza je provedena na základě klasické teorie plastického tečení. Výsledky výpočtů ukazují postačující shodu s experimentem. Dále je v této práci věnována pozornost přechodové elasticko-plastické zóně viz Obr. 12.



**Obr. 12:** Přechodová elasticko - plastická zóna; upraveno z [47]

Autoři prací [48] provedli analýzu sférické indentace s použitím metody konečných prvků v programu ABAQUS. Výsledky výpočtu byly porovnané s experimentálními hodnotami a ukázaly dobrou shodu. V práci bylo prozkoumáno pět různých druhů materiálu: slitina Al-Mg, ocel A533-B, ocel SAE1010, Cu ve vyžíhaném a tvářeném stavu. Dále byla provedena analýza plastického chování pile-up a sink-in a možnost použití vzorce D. Tabora pro výpočet elastické deformace:

$$\varepsilon_p = 0,2 \frac{d}{D} \quad (25)$$

Kde,

D – průměr indentoru

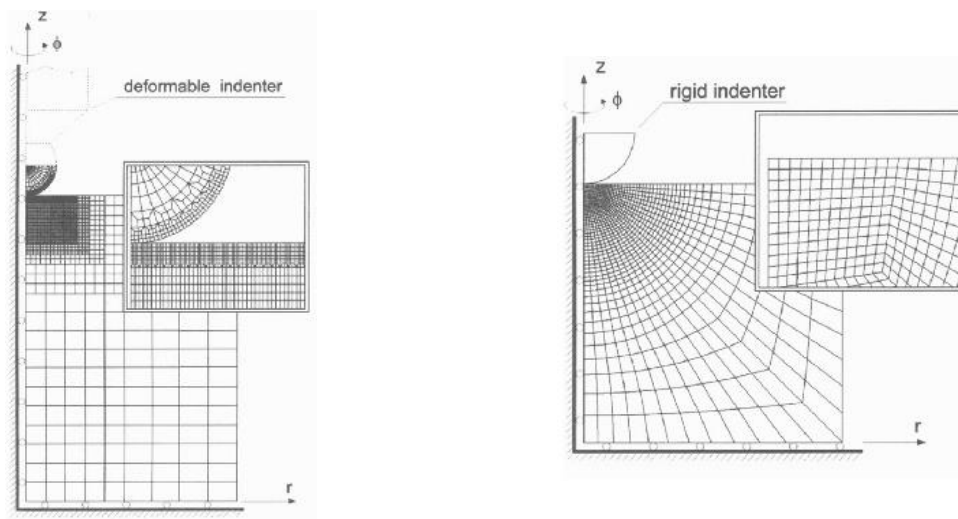
d – průměr vtisku

Autoři navrhli dvě různé možnosti realizace MKP modelu:

1. Vtlačování nestlačitelného sférického indentoru do povrchu pevných těles, které se nedeformují elasticky.
2. Model indentoru s držákem, ve kterém byla zahrnuta možnost deformace.

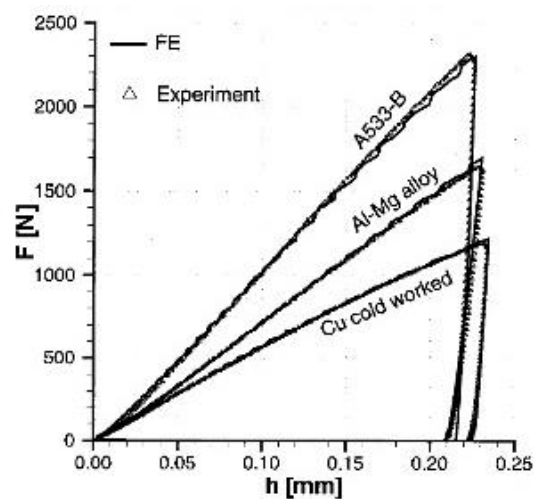
Na základě dosažených výsledků autoři navrhli takové závislosti pro výpočet  $\varepsilon_p$  a  $\Psi$ , které dovolují (díky indentoru s průhledného materiálu) nepřetržitý výpočet dat z diagramu  $\sigma_t - \varepsilon_p$  v průběhu zatížení, bez dočasných cyklů odlehčení

viz Obr. 13 a 14.



a)

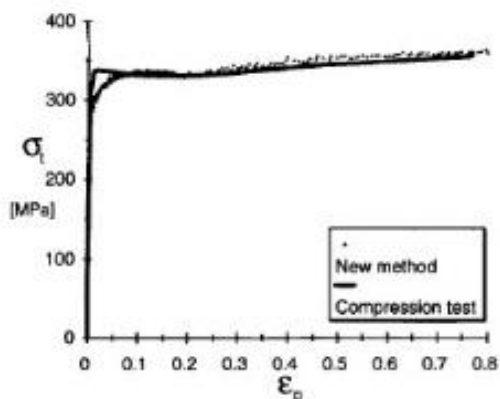
b)



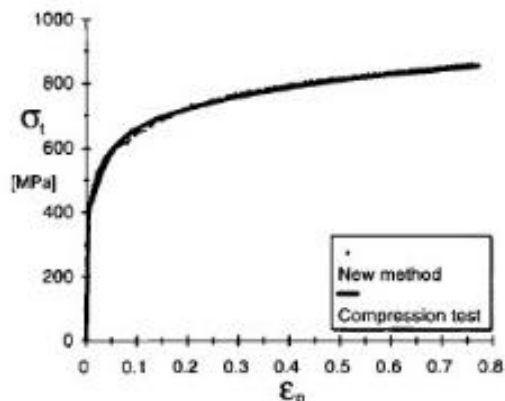
c)

**Obr. 13:** MKP model a výsledky ve formě indentačních křivek

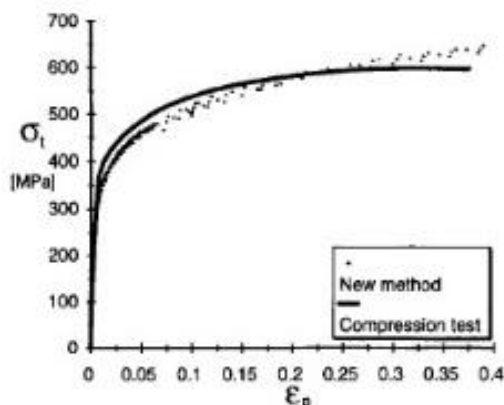
*Model indentoru s možností deformace v držáku, b) Model pevného indentoru bez možnosti deformace, c) Indentační křivky pro zkoušené materiály z MKP a experimentu; upraveno z [48]*



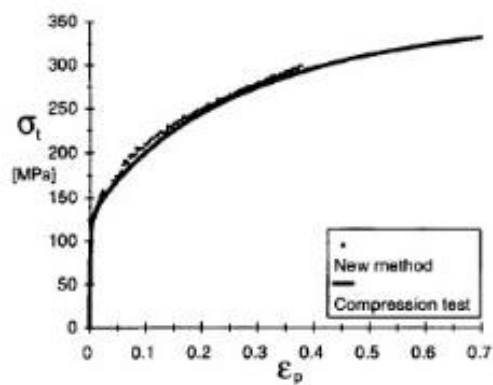
a)



b)



c)

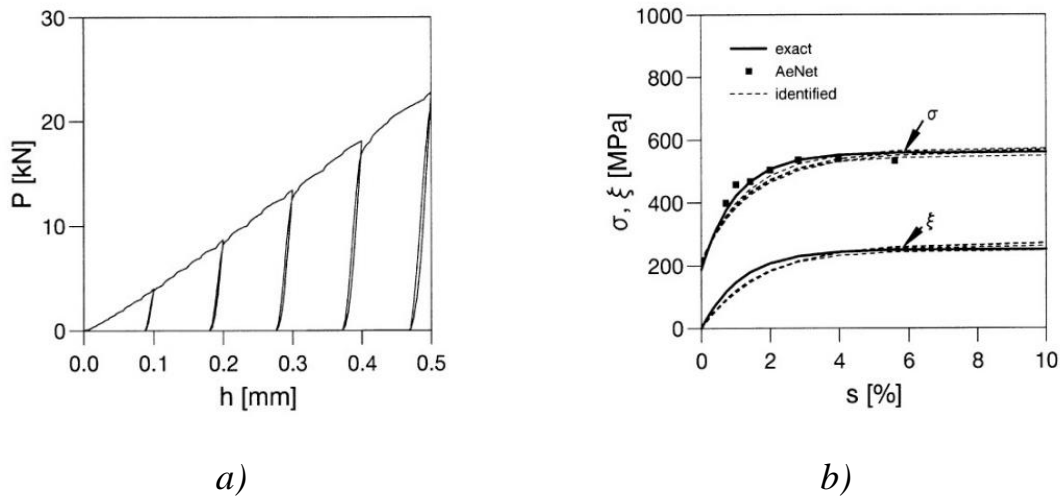


d)

**Obr. 14:** Porovnání závislostí napětí – deformace z indentační zkoušky a statické zkoušky v tlaku a) slitina Al-Mg, b) ocel A533-B, c) ocel SAE1010, d) Cu ve vyžíhaném a tvářeném stavu; upraveno z [48]

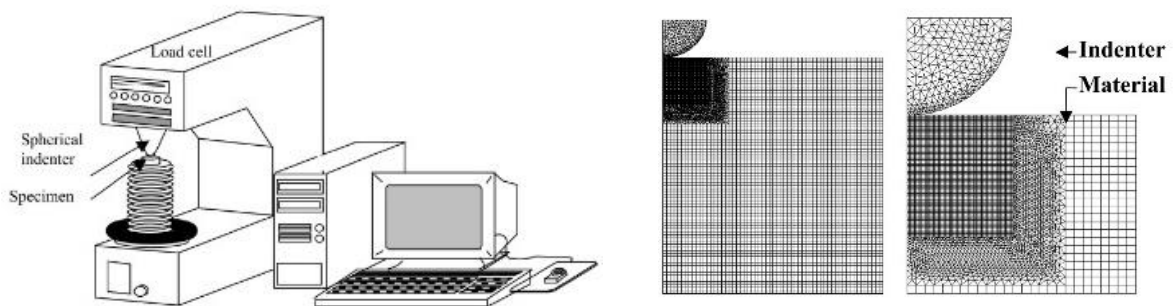
N. Huber a Ch. Tsakmakis ve svých monografiích [49, 50], z roku 1999 uvádějí, že prozkoumali sférickou indentaci pomocí neuronových sítí. V pracích, které byly vydané dříve [51, 52] bylo prokázáno, že proces vtlačování, který zahrnuje cykly zatížení, odlehčení a následující opakované zatížení obsahuje typickou hysterézi pro definované parametry materiálu viz Obr. 15. Postup sestavení deformační křivky  $\sigma - \varepsilon$  je založený na bázi neuronových sítí, kde vstupní data jsou výsledky z velkého množství MKP výpočtů. Autorům se povedlo dosáhnout dobrých výsledků pro rozsah sil od 0 do 30 kN. V práci je uvažovaný

pevný sférický indentor o průměru 5 mm.



**Obr. 15:** Výsledky experimentu Hubera a) cyklická indentační křivka, b) diagramy napětí - deformace; upraveno z [51]

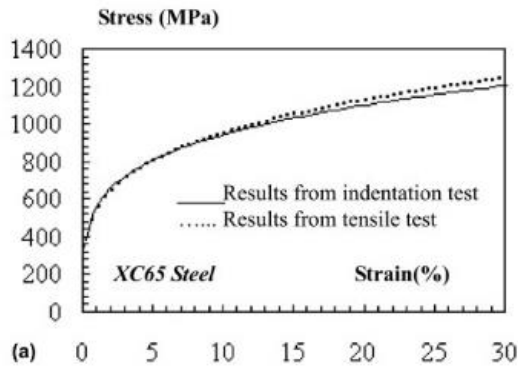
Práce [53] prezentuje nový postup získávání mechanických vlastností pomocí indentačních zkoušek. Na rozdíl od statických zkoušek v tahu tyto metody nevyžadují přípravu speciálních vzorků. Indentační experimenty uvedené v této práci spolu s navrženým způsobem umožňují stanovit mez kluzu a parametry zpevnění pro ocel. V práci autoři uvedli MKP model a také experimentální křivky viz Obr. 16 a 17.



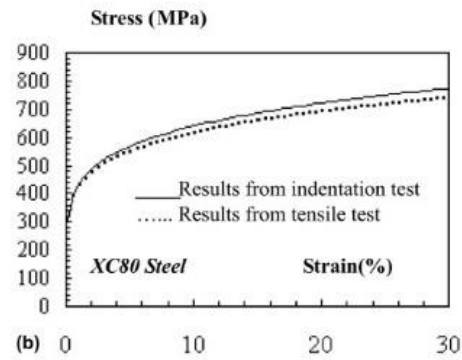
a) Schéma indentační soustavy

b) MKP model

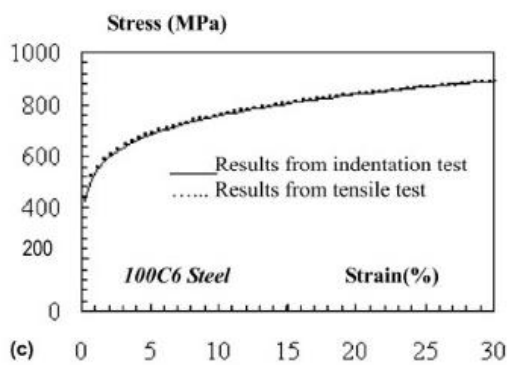
**Obr. 16:** Indentační přístroj a MKP model Nayebi; upraveno z [53]



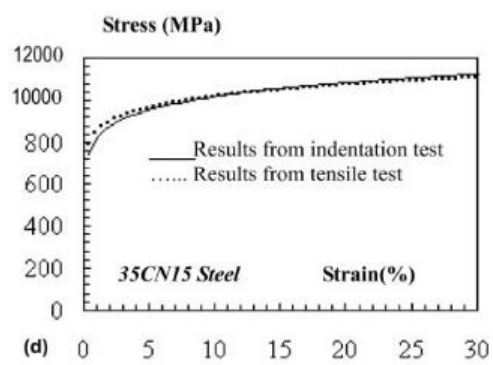
a)



b)



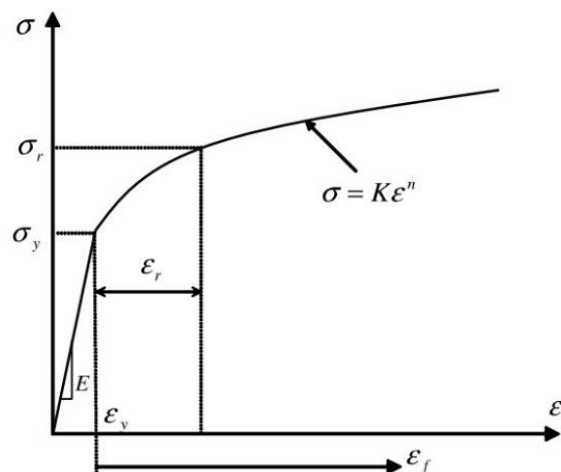
c)



d)

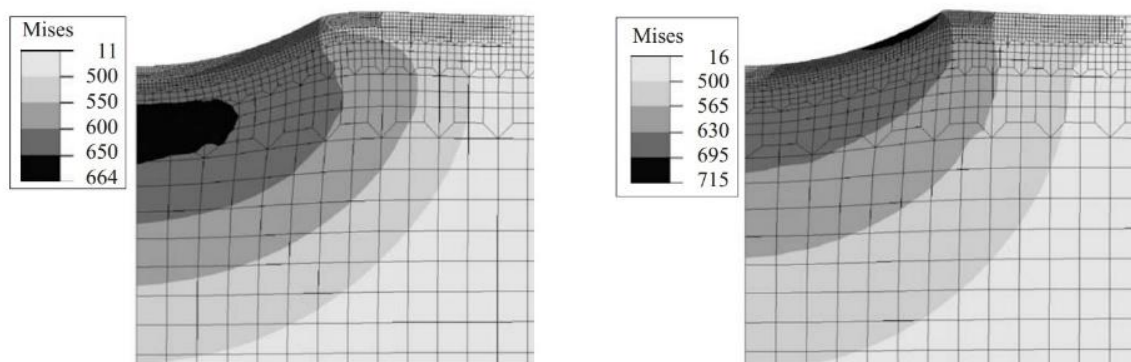
**Obr. 17:** Výsledky měření *Naybiho* pro různé druhy ocelí; upraveno z [53]

V práci [54] autora Yan Ping Cao je předvedená nová metodologie získání plastických vlastností kovových materiálů z křivek instrumentované sférické indentace Obr.18. Realizace výpočtů vycházela z analýzy rozměrů a výpočtů MKP. Typická deformace  $\varepsilon_r$ , která v práci [55] byla stanovena pouze pro ostré indentory, byla rozšířena na sférické. Spolu s tím byly stanoveny závislosti  $\varepsilon_r$  na základě hloubky vtisku  $h$  a poloměru indentoru  $R$ . Na bázi analytických výpočtů, uvedených v této práci, autoři navrhli tzv. «zpětný přístup», který dovoluje zjišťovat plastické vlastnosti kovových materiálů, stanovených pomocí křivky sférické indentace. MKP model byl řešený pomocí programu ABAQUS.



**Obr. 18:** Schematické zobrazení závislosti napětí-deformace; upraveno z [54]

Autoři práce [56] se zaměřili na možnost odstranění nepřesností a nedostatků existujících v indentačních teoriích, které vycházely především z předpokladů experimentálního pozorování procesu indentace a deformačních teorií plasticity viz Obr. 19. V uvedené publikaci byl popsán vliv vlastností zkoušeného materiálu na proces vtlačování i závislost zatížení – hloubka vtisku. Zhodnocení bylo provedeno na základě MKP výpočtu, zahrnující i jinou plastickou teorii. Bylo prokázáno, že deformace materiálu a distribuce funkce *napětí – deformace*, vypočtené na základě deformační plastické teorie, jsou velmi odlišné od jiných teorií plasticity. Autoři, proto navrhují v práci novou teorii vtlačování, která lépe popisuje deformační křivku a vlastnosti materiálů se střední odchylkou do 3 %.



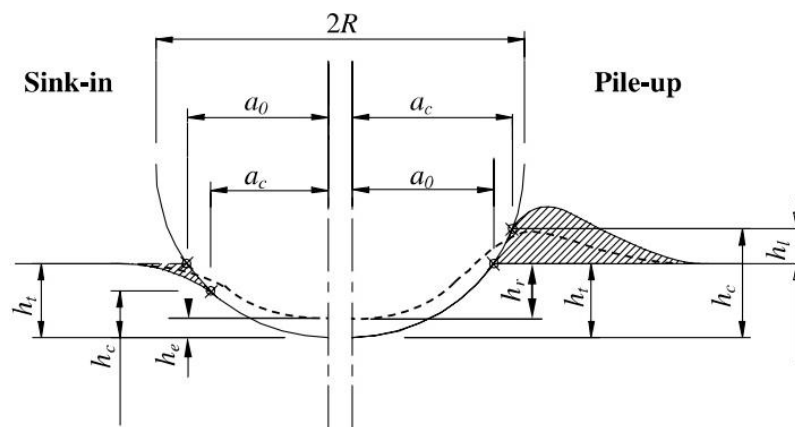
a) Deformační teorie plasticity

b) Jiná plastická teorie

**Obr. 19:** Grafy distribuce napětí při indentaci; upraveno z [56]

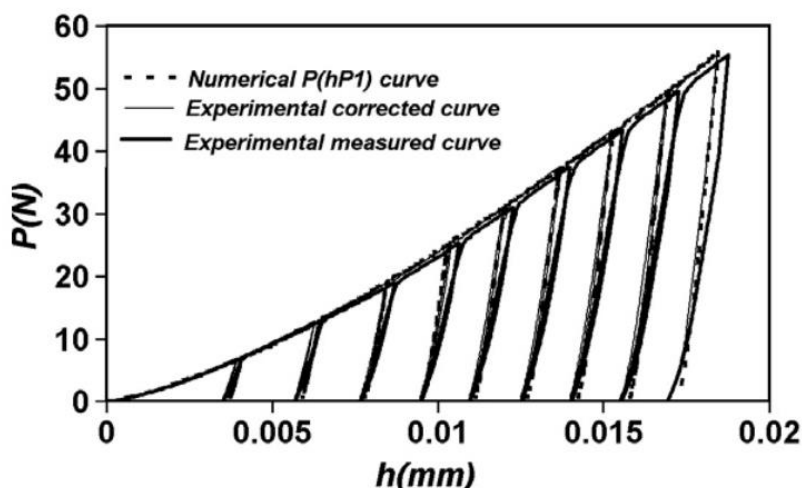


Habbabem byl v práci [57] představený MKP model, zobrazující proces vtlačování sférického indentoru včetně jeho chování s ohledem na tření v průběhu jeho kontaktu s povrchem materiálu. Tento model dovoluje provést kontrolu výstupní křivky *zatížení – hloubka vtisku*, použitou dále pro stanovení závislosti *napětí – deformace* pro materiály vykazující výrazné pile-up tečení. Dále byl prostudován vliv tření na pile-up chování materiálu. Byly definované slabé místa existujících závislostí pro výpočet deformačních charakteristik a další možnosti jejich využití. Dále byly pozměněny existující vzorce pro zahrnutí korekce rozměrů „návalu“ nebo „zaoblení“, které vznikají při „pile-up“ a „sink-in“ chování, používané pro ocel s přesnou definicí kontaktního poloměru viz Obr. 20. Tato změna byla provedena na základě analýzy odlehčovacích částí indentační křivky. Předpokládané výsledky výpočtu byly v dobré shodě s MKP modelem.



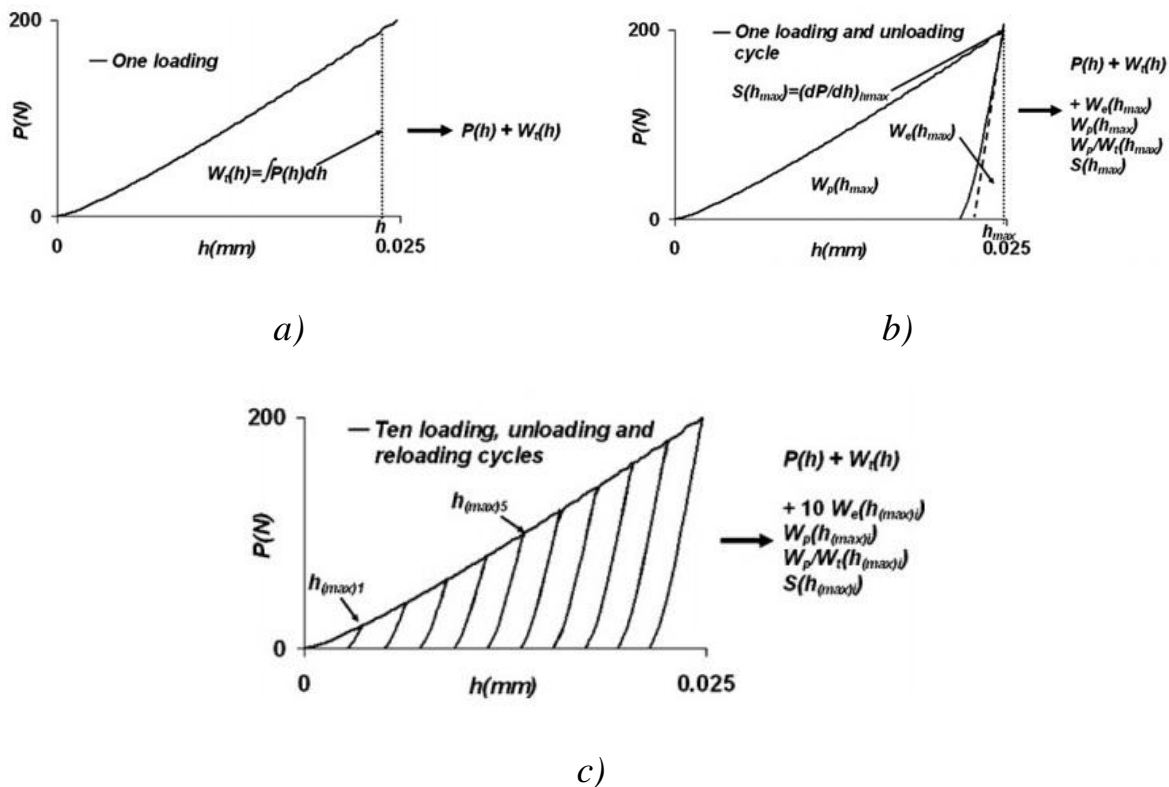
**Obr. 20:** Schematické znázornění „pile-up“ a „sink-in“ plastického chování materiálu při sférické indentaci; upraveno z [57]

V práci [58] autoři představili metodiku měření kontaktního poloměru při sférické indentaci. Metodika vychází z rovnice Hertze, která závisí pouze na pružných vlastnostech indentoru a materiálu. Autoři naprogramovali několik cyklů zatěžování, odlehčování a opakovaného zatěžování, navrhli metodiku pro získání reálné křivky *zatížení – hloubka vtisku*. Experimenty, které autoři provedli na dvou typech oceli, potvrdily jejich teoretické předpoklady, viz Obr. 21.



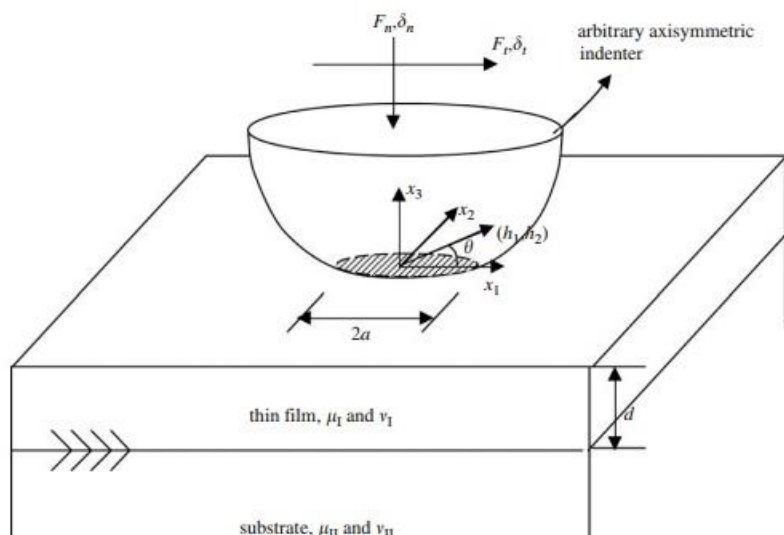
**Obr. 21:** Porovnání experimentální a vypočtené cyklické závislosti zatížení – hloubka vtisku; upraveno z [58]

V další práci [59] Jean-Marc Collin prezentoval nový postup sledování mechanických vlastností materiálu sférickou indentací, s použitím «zpětné analýzy» na bázi MKP řešení. Materiál indentoru byl tvrdokov s modulem pružnosti  $E = 600 \text{ GPa}$ . Autoři také prozkoumali změnu geometrie indentoru pomocí elektronového mikroskopu, čímž prokázali existenci deformace indentoru. Změřená geometrie byla dále použita v MKP modelu. Pro popis plastické části křivky napětí – deformace autoři použili Holomonovou rovnici  $\sigma = \sigma_y^{1-n} E^n \varepsilon^n$ , která obsahuje dva plastické parametry s respektováním zákona Ludviga  $\sigma = \sigma_y + k\varepsilon^m$  obsahující tři parametry. Autoři zde předvedli, že pro první závislost stačí provést jednu indentační zkoušku, aby bylo možné dosáhnout dobrou přesnost měření mechanických vlastností. Zatímco pro druhý případ je zapotřebí provést několik cyklů zatěžování, odlehčování a opakovaného zatěžování viz Obr. 22. Na závěr autoři konstatují, že metody “zpětných analýz” dovolují přesnější zjišťování mechanických vlastností, ale jen v případě prvního přiblížení. Dále už jsou vhodné pouze pro porovnání vlastností. Autorem byl použit indentor s poloměrem  $R_{\text{ind}}=0,5 \text{ mm}$  zatížený silou  $P_{\text{max}} = 200 \text{ N}$ .



**Obr. 22:** *Různé režimy provedení indentační zkoušky; upraveno z [59]*

V práci [60] autoři zdůrazňují možnost použití indentačních metod s registrací diagramu zatížení – hloubka vtisku pro zjišťování mechanických vlastností povlaku. V práci je zdůrazněno, že přesnost, pro kterou lze tyto vlastnosti určit, je definovaná „efektivním“ (kombinovaným) modulem pružnosti systému „povlak – základní materiál“ viz Obr. 23. Autoři navrhují vlastní postup zjišťování tohoto modulu na bázi přesného řešení funkce Grina ve Fourierových souřadnicích. Autoři dosáhli dobré shody výsledků analytického a MKP modelu v programu ABAQUS. V práci jsou také uvedeny hodnoty korelačních koeficientů.



**Obr. 23:** Schematické znázornění procesu indentace do systému základní materiál-povlak; upraveno z [60]

V následující práci [61] je navržena metoda s posouzením anizotropních plastických vlastností zpevněné oceli na mezi kluzu v ortogonálních směrech. Metoda je založena na MKP výpočtech, kterými autoři ověřili teoretické předpoklady a uskutečnili analytické výpočty. Výsledkem MKP analýzy v programu ABAQUS jsou analytické funkce, které definují vztah mezi indentačními parametry a anizotropní pevností. Také byla v této publikaci stanovena závislost mezi výškou „návalu“ od „pile-up“ či „sink-in“ chování pro široký rozsah hodnot meze kluzu a koeficientu deformačního zpevnění. Navržená metoda se skládala z následujících kroků:

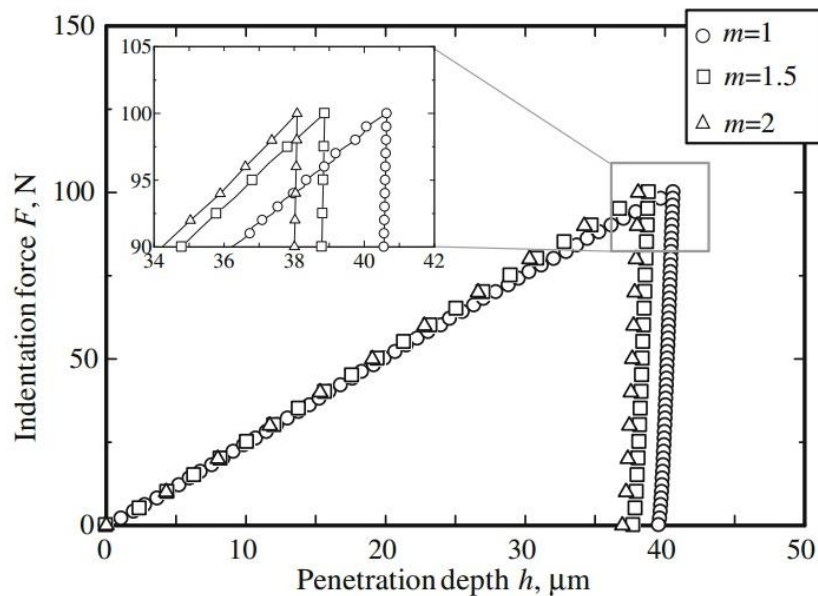
1 Mez kluzu se měří v oblasti odlehčení na indentační křivce při maximální hloubce vtisku.

2 Na základě funkce geometrie vtisku a kontaktního tlaku, je možné zjistit koeficient deformačního zpevnění  $n$ .

3 Koeficient  $m$  se vypočítá na základě rozdílu výšek „návalu“ od „pile-up“ a „sink-in“.

Tato metoda vyžaduje pouze jeden vtisk pro zjištění plastických parametrů. Pro ověření efektivity této metody autoři provedli tzv. „zpětnou analýzu“, která ukázala odchylku výsledků menší než 10 % Obr. 24. Na závěr autoři konstatují

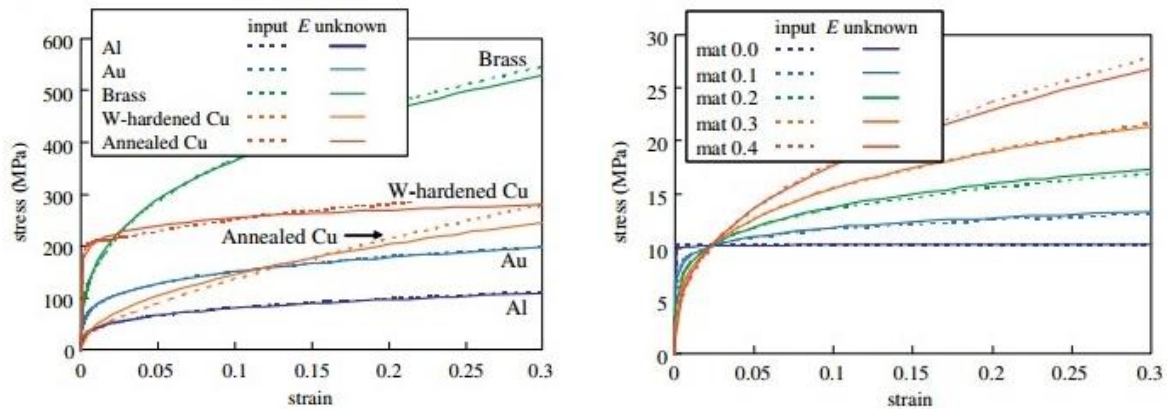
možnou závislost dané metody na poloměru indentoru a hodnotách zatížení.



**Obr. 24:** Výsledky indentačních měření; upraveno z [61]

Práce [62] uvádí MKP modelování pro vlačování velmi malých sférických indentorů (poloměr cca 10 μm) a výsledky modelování, které prokázaly dobrou shodu při měření tvrdosti Iridia.

V práci [63] je navržena jednoduchá metoda určování elasticko - plastických vlastností, pomocí interpretace výsledků ze sférické indentace. Ukázalo se, že předchozí metody mají složité formulace a hodně opravných a převodních koeficientů, které často nemají teoretické ani praktické opodstatnění. Metoda je založená na dvou jednoduchých rovnicích pro dvě různá místa (v procesu vlačování), na základě čeho je možné definovat plastické vlastnosti. Kromě toho na základě metody Fishera-Chripsa [79] je možné zjistit jak elastické, tak zároveň i plastické vlastnosti s postačující přesností. Tato metoda také dovoluje zjistit hodnotu modulu pružnosti. Autoři ověřili výsledky na deseti plastických materiálech a dostali dobrou shodu se skutečnými hodnotami elastických a plastických vlastností viz Obr. 25. V tomto případě modelování MKP bylo provedeno pomocí programu ANSYS.



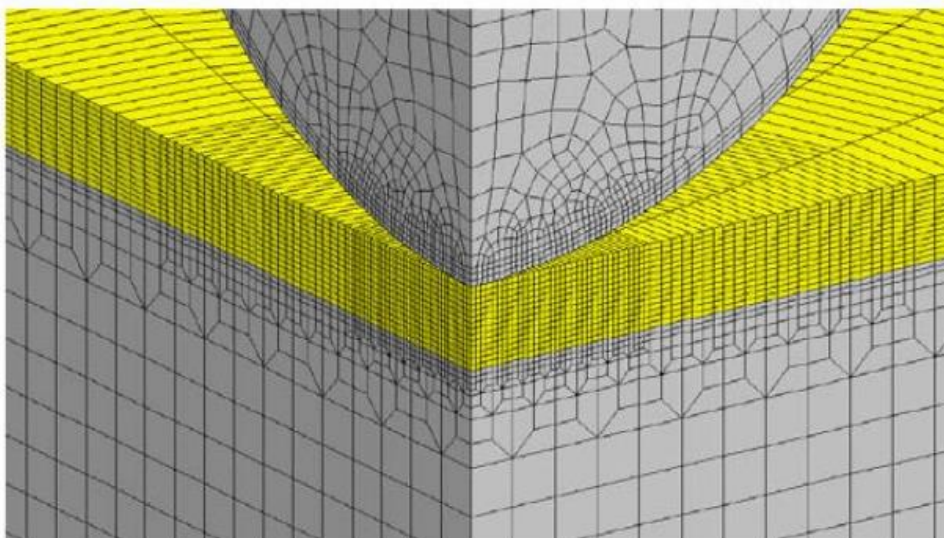
a)

b)

**Obr. 25:** Výsledky experimentu a MKP výpočtu Nagahisa; upraveno z [63]

V práci [64] je uveden model vlačování sférického indentoru o poloměru  $R = 100 \mu\text{m}$  metodou konečných prvků do povrchu anizotropních materiálů, monokrystalů a tenkých povlaků na tvrdé podložce viz Obr. 26. Jedním z výsledků práce, je použitelnost metodiky vlačování indentoru pro identifikaci anizotropie plastických vlastností s možnou přítomností skrytých trhlin a odlupování povlaku.

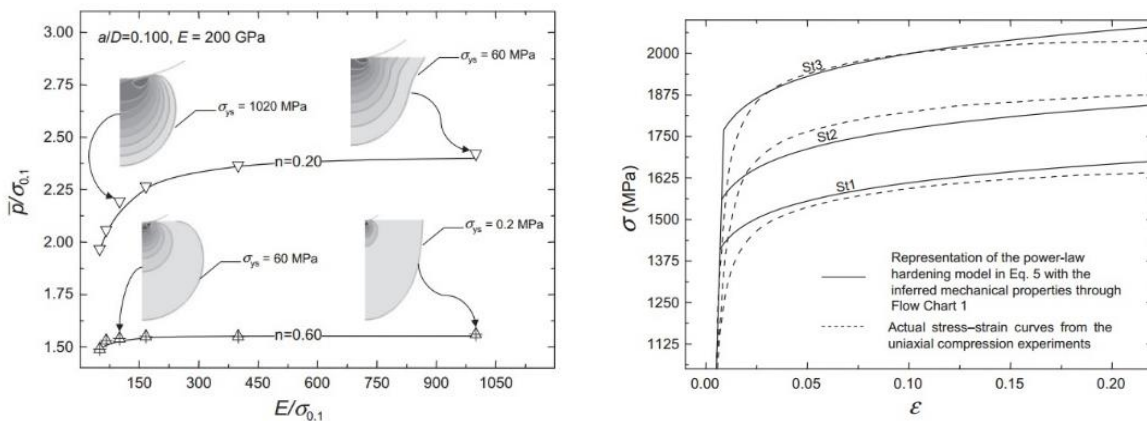
Autoři doporučili, že pro hodnoty mechanických vlastností spočítané na základě mikrotvrdomosti, je zapotřebí přidat korelační přepočet.



**Obr. 26:** MKP model procesu indentace do systému základní materiál – povlak;

upraveno z [64]

V práci [65] jsou výsledky modelování procesu vtláčování sférického indentoru prezentované na bázi plastické teorie. Autoři upozornili na to, že detailní chápání přechodu mezi elasticko-plastickým a plastickým režimem viz Obr. 27, dovoluje stanovit korelační závislosti tykající se tvrdosti  $\bar{p}$ , meze kluzu  $\sigma_{ys}$ , exponentu deformačního zpevnění a modulu pružnosti. Toto mohlo být možné díky zkoumání vztahu  $\bar{p}/\sigma_{0,1}$  a  $E/\sigma_{0,1}$  při různých hodnotách  $a/D$  a  $n$ , kde  $\sigma_{0,1}$  je charakteristika jednosměrného napětí, odpovídající jednosměrné deformaci 0,1, kterou používal ve svých analýzách Tabor [35]. Analýza ukazuje, že elasticko-plastický režim má různý mechanismus, závislý na rozsahu  $a/D$  a  $n$ . Výsledky mohou být uvedeny formou mapy kontaktní deformace, která popisuje přechod elasticko-plastického režimu v čistě plastický. Autoři provedli také rozsáhlou experimentální analýzu na polykrystalických materiálech.



Zobrazení elasticko – plastického přechodu

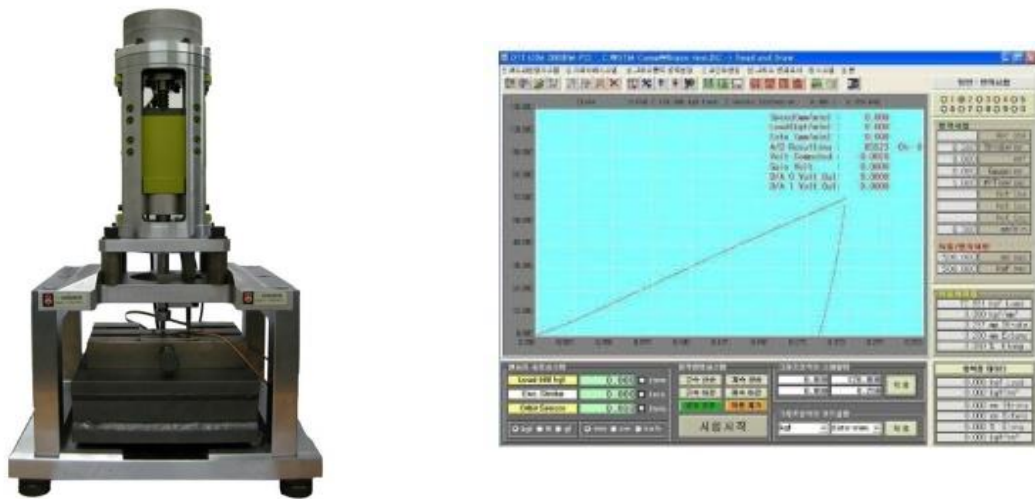
Porovnání diagramu z indentační a tlakové zkoušky

**Obr. 27:** Výsledky Alcala; upraveno z [65]

V další práci [66] byla představena numerická a experimentální analýza sférického vtláčování pro spolehlivý způsob vyhodnocování mechanických vlastností izotropních elasticko-plastických materiálů. Odhad napjatosti a plastických deformací byl proveden pomocí analýzy metodou konečných prvků v programu ABAQUS. Křivka "napětí-deformace", která byla získaná pomocí navržené metody z křivky "zatížení – hloubka vtisku" umožňuje stanovit mez kluzu, modul



pružnosti a koeficient zpevnění se střední odchylkou menší než 5 %. Autoři používali vlastní měřicí systém DKTT-3000 viz Obr. 28. Pro numerické reálné testy byl použit indentor z tvrdokovu o průměru  $D = 0,5$  mm. Uvedený systém umožňuje využít zatížení v rozmezí od 5 do 500 kg a vtisk do maximální hloubky 0,1 mm. V publikaci je také uvedeno, že tato metoda platí pro jakoukoliv elastickou deformaci indentoru z tvrdokovu nebo diamantu.



*Zkušební přístroj*

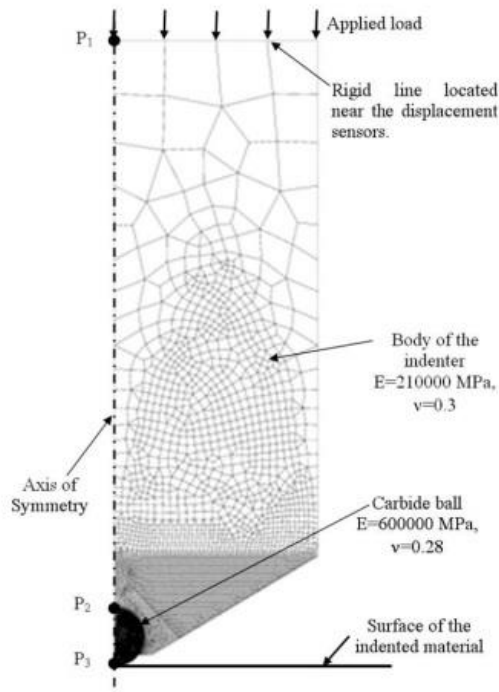
*2) Softwarové rozhraní*

**Obr. 28:** Indentační systém Lee; upraveno z [66]

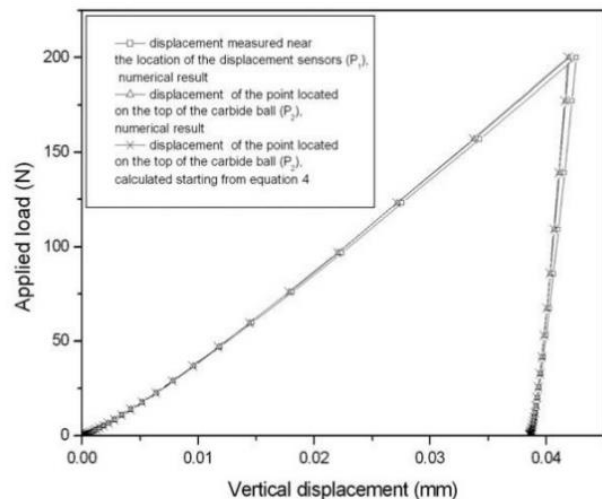
V práci Oliviera Bartiera [67] byl proveden průzkum analytických modelů, které určují kontaktní poloměr mezi sférickým indentorem a elasticko-plastickým materiálem. Porovnání experimentálních, numerických a vypočítaných závislostí mezi sebou s různými analytickými modely ukazuje, že charakteristiky vtláčování mohou být určeny od okamžiku působení zpevnění. Prokázalo se, že zvýšení koeficientu tření vede k nepatrnému snížení kontaktního poloměru při velké hloubce vnikání. Autoři konstatují, že třecí kontakt v analytických modelech nebyl zohledněn a proto byl v důsledku toho, kontaktní poloměr počítán s odchylkou. Zásadní teoretické modely závisí na koeficientu deformačního zpevnění. Bylo rovněž zjištěno, že modely Lee, Hernota, Kima [56, 80, 81] mohou poskytnout výsledky výpočtů kontaktní plochy podle hloubky vniknutí, které se nejvíc přibližují k experimentu. Rovněž zde byla provedena analýza me-



totodu konečných prvků indentoru v držáku, a nejen samotného indentoru, jako ve většině modelů viz Obr. 29. Materiálem indentoru je tvrdokov o průměru  $D = 1$  a  $2,5$  mm, s maximální hodnotou zatížení  $200$  N.



*MKP model*



*Indentační křivka*

**Obr. 29:** *Výsledky a model Oliver Bartier; upraveno z [67]*

V práci Wenyi Yana [68] je popsána metoda sférického vlačování, uplatněná pro měření vlastností kovových pěn. Kovové pěny se využívají v bioinženýrství, jako plnivo lehkých sendvičových struktur pro výrobu implantátů. Autoři provedli analýzu této úlohy metodou konečných prvků, aby vytvořili vztah mezi charakteristikami vtisku a charakteristikami materiálu, jako je porozita, tvarový faktor a koeficient zpevnění. Výsledky simulace ukázaly, že metoda vlačování může být použita jako jednoduchý a velice účinný způsob měření mechanických vlastností i pěnových materiálů. V daném případě byl použitý indenter s poloměrem  $30$  mm.

V následující práci Fuping Yuan [70] byla provedena detailní parametrická analýza, která se zabývala mechanikou kontaktu mezi sférickým indentorem a homogenními materiály. Práce se také věnovala materiálům, které mají plastic-

kou povrchovou vrstvou s lineární změnou meze kluzu a nezměněného koeficientu deformačního zpevnění. Sférická indentace pro homogenní materiály může být popsána dvěma parametry: koeficientem deformačního zpevnění a normalizovanou hloubkou vtisku. V této práci byl prozkoumán vliv těchto parametrů na různých technických materiálech. Získané výsledky mohou sloužit k posouzení „pile-up“, „sink-in“ chování materiálů při jejich zatížení. Pro materiály s plastickou povrchovou vrstvou byly kontrolovány tři parametry: normalizovaná hloubka vtisku, koeficient změny síly  $\alpha R$  (od -4 do 4) a normalizovaná tloušťka plastické vrstvy (od 0 do 0,4). Vliv těchto parametrů byl systematicky analyzován. V konečném důsledku autoři poznamenávají, že materiály s plastickou vrstvou s kladným  $\alpha R$  mohou snést velké zatížení a mají mnohem větší odolnost proti porušení. Data byla získána na základě modelování metodou konečných prvků v programu ABAQUS, kde indentorem byla pevná sféra  $R = 0,5$  mm.

V práci Jean-Marc Collina [71] byl získán korelační koeficient pro metodu navrženou autorem v jeho předchozím článku [59]. Výsledky byly otestované na pěti vzorcích z oceli [72]. Navržená metoda umožňuje přesné určení kontaktního poloměru (pokud poměr  $a/R$  při odlehčení je menší než 0,25). Korelační koeficient umožňuje určit parametry bez ohledu na poměr  $a/R$ . Autor uvádí, že při zahrnutí korelačního koeficientu je metoda přesnější jako metody, které pracují s koeficientem  $c^2$ , závislým na plastických vlastnostech materiálu. Metoda se stává jedinečnou pro určení kontaktního poloměru během odlehčování. Koeficient  $k$ , byl získán na základě simulace metodou konečných prvků procesu vtlačování sférického indentoru z tvrdokovu o  $R = 1,5$  mm. Na základě získaných závislostí byla vygenerovaná funkce  $\eta = f(R^*, h^*)$ .

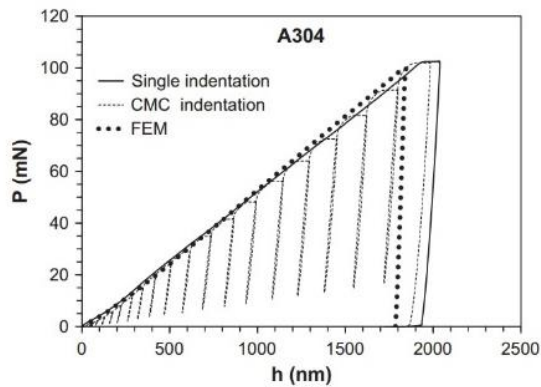
V uvedených pracích [56, 66] autoři používají sférickou indentaci pro vyhodnocení objemových vlastností materiálu, které lze rozšířit také na elasticko-plastické vlastnosti základního materiálu. V nové práci Jin Haeng Lee [73] autoři hodnotí elasticko-plastické vlastnosti povlaku metodou sférické indentace.

Přitom následné rozměrové změny jsou také zaznamenány. Úloha je řešená pomocí modelování metodou konečných prvků v programu ABAQUS. V první řadě autoři navrhují zvolit místo, kde gradient deformace bude nejmenší a koeficient tření může být zanedbán. Pomocí nového přístupu k povlakům se podařilo získat hodnoty modulu pružnosti, mezního napětí a koeficientu deformačního zpevnění. Autoři také uvádějí, že efektivní rozsah  $E_s/E$  může být výrazně rozšířen bez dalších MKP výpočtů.

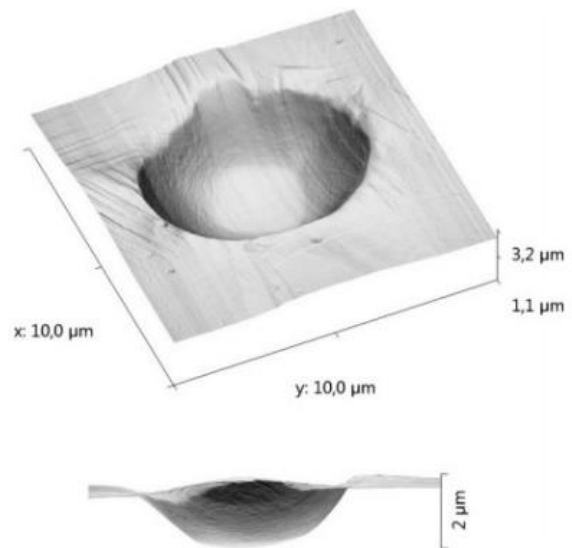
V publikaci Minh-Quy Le [74] autor aplikuje techniku původně navrženou pro ostré indentory [75, 76] na sférické. Byla zde provedena rozsáhlá analýza metodou konečných prvků pro široký rozsah maximálních hloubek vtisku. V daném případě byly brány v úvahu účinky tření a elastická deformace. Zjistilo se, že elastická deformace snižuje hodnotu práce při vtlačování, čímž se snižuje hodnota poměru  $W_i/W_e$ . Rozdíly v hodnotách  $C$  a  $W_i/W_e$  mezi elastickým vtiskem diamantem a tuhým nestlačitelným indentorem zvyšují poměry  $H/E_i$  a  $E/E_i$ . Autoři použili "zpětnou analýzu", což znamenalo získání hodnot tvrdosti a vlastností materiálu z dat naměřených pomocí sférické indentace, kde se projevíly dobré výsledky pro 22 materiálů, ale jen v případě použití tuhého nestlačitelného indentoru. Je-li zahrnuta deformace, chyby při stanovování modulu pružnosti mohou být až 7 %. Autoři v práci konstatují, že vliv tření a nedokonalý tvar indentoru se v praxi vyskytuje vždy. Navíc skutečné materiály neodpovídají přísnému zákonu zpevnění. Z tohoto důvodu se v praxi vždy objevují nějaké odchylky výsledků měření.

Petr Haušild ve své práci [77] prezentoval výsledky experimentálních testů sférickým vtlačováním, použitím dvou různých poloměrů indentoru, pro dvě austenitické korozivzdorné ocele (A304, A301). Testy byly také modelovány metodou konečných prvků. Autor podotýká, že simulace MKP má omezené použití, vzhledem na skutečný tvar indentoru. V citovaném článku byl zobrazený snímek povrchu diamantového sférického indentoru a model vtisku získaný na

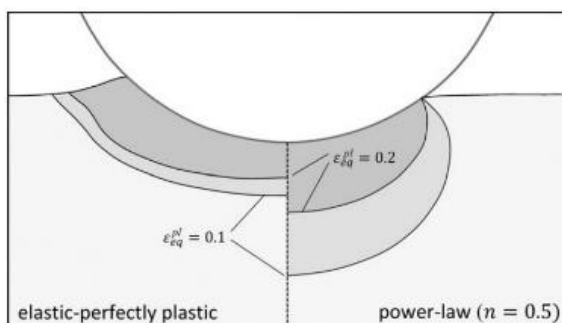
AFM mikroskopu viz Obr. 30. Autoři tvrdí, že použití Taborového vzorce nedostatečně přesně charakterizuje proces vtláčování indentoru vzhledem k drsnosti povrchu, stejně jako skutečný tvar indentoru a elasticko-plastické vlastnosti vzorku. Toto může vést k chybným výsledkům, hlavně při mezifázové transformaci (mezních stavech). Rovněž je v této práci uvedeno porovnání rekonstruovaných křivek "napětí a deformace" s výsledky z tahových zkoušek.



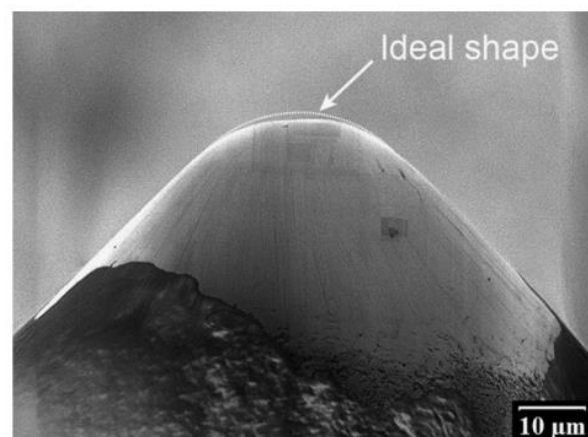
a) *Cyklická indentační křivka*



b) *AFM snímek vtisku*



c) *Schematické znázornění oblasti pod vtiskem*

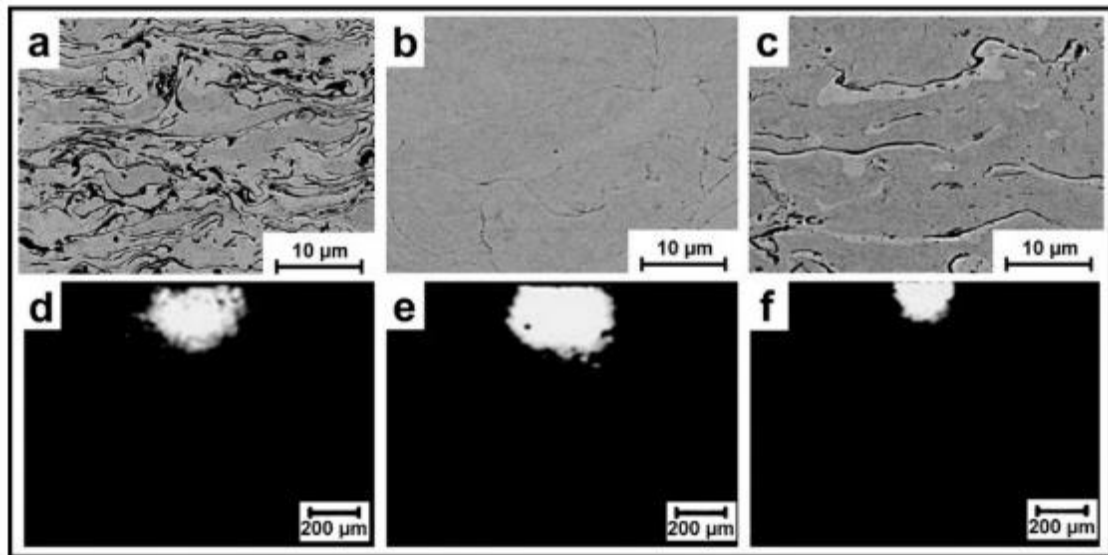


d) *SEM snímek skutečného tvaru indentoru*

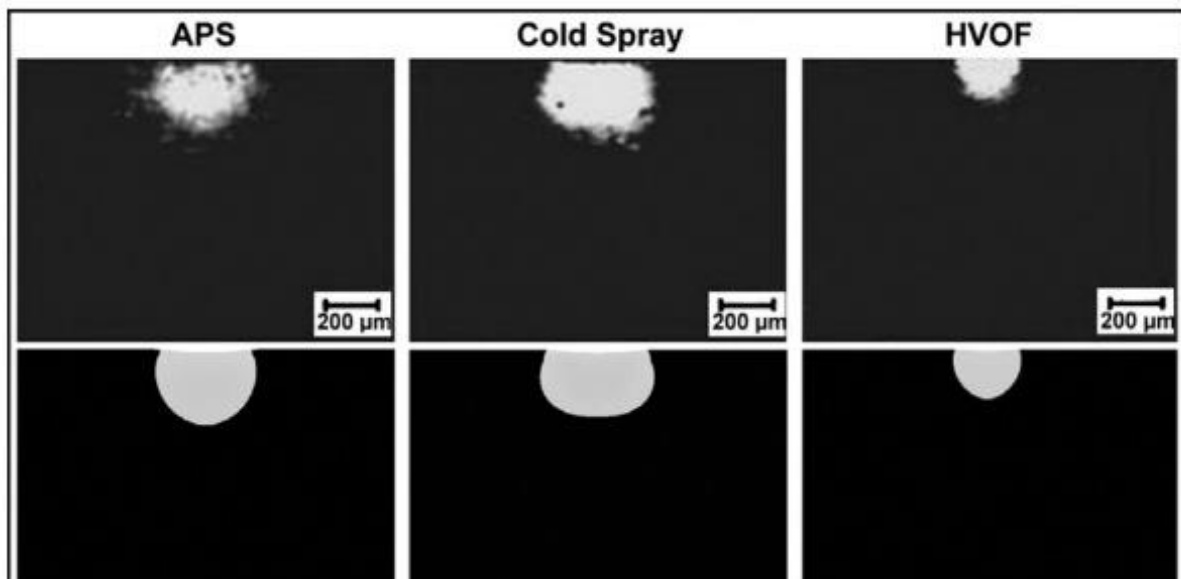
**Obr. 30:** *Výsledky podle Haušilda; upraveno z [77]*

Salmon ve své práci [78] uvedl výsledky modelování MKP procesu vtláčová-

ní sférického indentoru do povrchu třech napovlakovaných vzorků viz Obr. 31 a 32. Autory [78] modifikovaná metoda umožňuje sledovat anizotropii plastických vlastností. Výsledky z modelu porovnávali s daty získanými pomocí Brinellova tvrdoměru. Modelování proběhlo v programu ABAQUS s rádiusem indentoru  $R = 1,58 \text{ mm}$ .



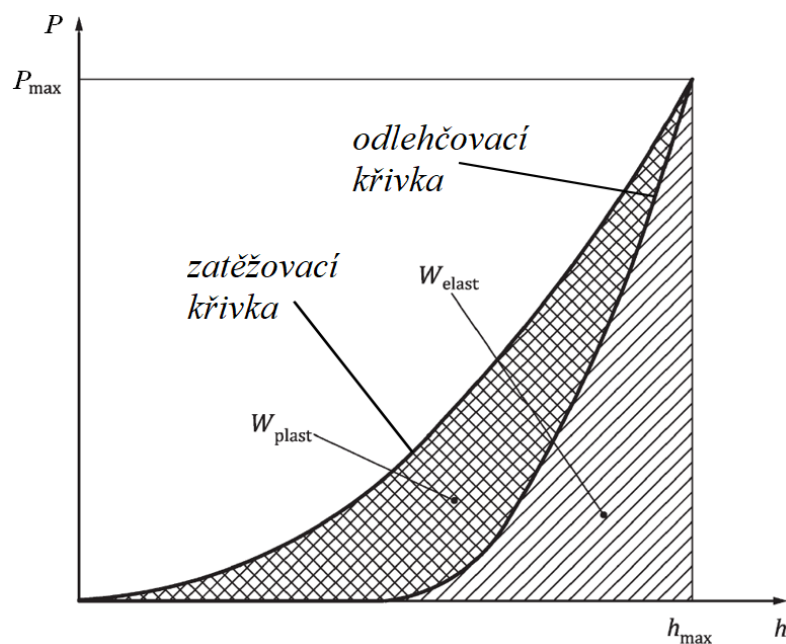
*Obr. 31: SEM - povlak a plastická zóna pod povrchem; upraveno z [78]*



*Obr. 32: Porovnání plastické zóny ze snímků a metody MKP; upraveno z [78]*

#### 4. Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti (DSI)

Metoda DSI (Depth Sensing Indentation) se v českém jazyce nazývá Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti. Někdy bývá v literatuře označována jako IIT (Instrumented Indentation Testing) nebo ABI (Automated Ball Indentation). Tato metoda začala být vyvíjena v 70. letech 20. století vědci Bulychevem a Alekinem. Na počátku osmdesátých let vylepšili Oliver a Pharr metodiku, analýzu a shromažďování dat. [82]



**Obr. 33:** Indentační křivka – plastická a elastická část práce vnikacího procesu; upraveno z [83]

DSI patří mezi nedestruktivní metody. Princip DSI je stejný jako u konvenčních vnikacích metod měření tvrdosti. Odlišuje se vyhodnocováním a řízeným odlehčováním indenteru. Základním prvkem této metody je přístroj, který umí vyhodnotit okamžitou změnu hloubky průniku indenteru do měřeného povrchu v závislosti na nárůstu nebo poklesu zatěžování v průběhu celého procesu zatěžování nebo odlehčování. Dokáže tedy nepřetržitě monitorovat zatížení a hloubku vtisku. Přístroj, který díky připojení počítači tato data zaznamenává a ukládá, dokáže v průběhu měření vykreslovat grafickou závislost *zatížení na*

hloubce vtisku. Grafická závislost zatížení – hloubka vtisku se nazývá indentační křivka, viz Obr. 33. Přístroj s připojeným softwarem kromě indentačních křivek umí vyhodnotit i některé materiálové charakteristiky. [82]

### Stanovení tvrdosti a modulu pružnosti

Hodnota tvrdosti je obecně definována jako poměr maximální zatěžovací síly  $P_{max}$  a zbytkové kontaktní (styčné) plochy  $A$ , tedy

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (26)$$

Instrumentovanou indentační zkouškou lze určit tvrdost jako funkci okamžité hloubky vtisku. Takto se definuje Martensova tvrdost  $HM$ , která je často nazývána jako univerzální tvrdost  $HU$ . Pro Vickersův indenter platí vztah

$$HM = \frac{P}{A(h)} = \frac{P}{26,43 \cdot h^2} \quad (27)$$

Martensova tvrdost je funkcí hloubky vtisku  $HM = f(h)$ , zatím co univerzální tvrdost  $HU$  je definována jako tvrdost při maximálním zatížení a tomu odpovídající maximální hloubce, viz (12).

$$HU = \frac{P_{max}}{A} = \frac{P_{max}}{26,43 \cdot h_{max}^2} \quad (28)$$

Univerzální tvrdost zahrnuje elastickou i plastickou odezvu materiálu na působící zatížení. Proto se zvlášť definuje plastická tvrdost, která popisuje plasticou deformaci materiálu a lze ji vyjádřit jako

$$H_{pl} = \frac{P_{max}}{A} = \frac{P_{max}}{26,43 \cdot h_r^2}, \text{ kde} \quad (29)$$

$h_r$  je průsečík osy hloubky vtisku s tečnou k odlehčovací křivce v bodě a  $P_{max}$ .  $h_r$  je definován vztahem

$$h_r = h_{max} - \frac{P_{max}}{dP/dh}, \text{ kde} \quad (30)$$

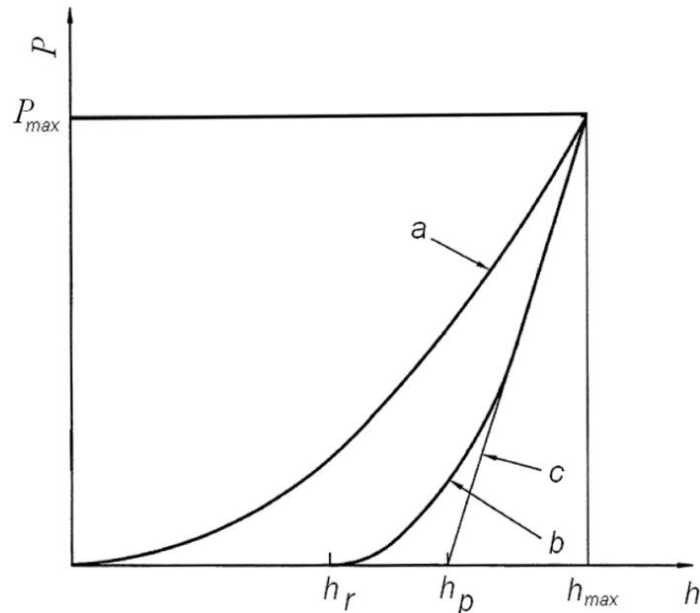
$h_{max}$  je maximální hloubka vtisku při maximální zatěžovací síle  $F_{max}$ .

Mnohem častěji se používá vtisková tvrdost  $H_{IT}$ , která stejně jako  $H_{pl}$  odpovídá míře odporu ku trvalé deformaci.

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_P} = \frac{P_{max}}{24,50 \cdot h_r^2}, \text{ kde} \quad (31)$$

$A_P$  je průmět kontaktní plochy indentoru ve vzdálenosti  $h_r$  od hrotu,  $h_r$  značí

redukovanou (fiktivní) hloubku kontaktu indentoru se zkušebním tělesem při maximálním zatížení. [82]



**Obr. 34:** Schématický průběh indentační křivky: a) zatěžovací křivka; b) odlehčovací křivka; c) tečna ke křivce b v  $P_{max}$ ; upraveno z [82]

Pro kontaktní hloubku platí vztah:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon_i \cdot \frac{P_{max}}{dP/dh} = h_{max} - \varepsilon_i \cdot (h_{max} - h_p) \quad , \text{kde} \quad (32)$$

$\varepsilon_i$  je konstanta charakterizující geometrii použitého indentoru,  $h_p$  plastická hloubka po odlehčení indentoru. [82]

Pro válcový (plochý) indentor platí  $\varepsilon = 1$ , kde  $h_p$  je tedy speciálním případem  $h_r$ . V případě rotačního paraboloidu, včetně koule, a Vickersova indentoru je  $\varepsilon = 3/4$ , pro kuželový indentor platí  $\varepsilon = 0,73$ . [82]

Průběh indentační křivky začíná vtačováním indentoru do povrchu, přičemž se logicky současně zvyšuje zatěžovací síla a okamžitá hloubka vtisku. Tato křivka se nazývá zatěžovací a na Obr. 34 je označena písmenem a. Následuje odlehčovací křivka označená b. Síla i okamžitá hloubka klesá. Odlehčovací



křivka končí na souřadnicích [ $\mathbf{P} = \mathbf{0}; \mathbf{h} = \mathbf{h}_p$ ].  $\mathbf{h}_p$  je plastická hloubka po odlehčení zatížení, jak již bylo výše uvedeno. Pokud se sestrojí tečna k odlehčovací křivce v bodě  $\mathbf{P}_{max}$ , protne osu hloubky vtisku v bodě  $\mathbf{h}_r$ . Hloubka  $\mathbf{h}_r$  značí redukovanou (fiktivní) hloubku vtisku. Tečna ke křivce je označena jako c.

Metodou DSI lze získat nejen okamžitou hloubku vtisku, ale i vtiskový, nebo-li indentační modul. Vtiskový modul je roven elastickému (Youngovu) modulu pouze v ideálním případě. Materiál nevykazuje jednotnou odezvu v průběhu indentace (pile-up, sink-in). Ve výpočtech není tato odezva zahrnuta, proto nelze oba moduly považovat za identické. Vtiskový modul lze určit ze sklonu křivky odlehčení, platí tedy:

$$S = \frac{dP}{dh} = 2 \cdot h \cdot E_{red} \cdot \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (33)$$

S - značí kontaktní tuhost (sklon křivky),  $E_{red}$  kombinovaný (redukovaný) modul.  $E_{red}$  je kombinace modulů indentoru a zkoumaného materiálu. Je definovaný rovnicí:

$$\frac{1}{E_{red}} = \frac{(1 - \nu^2)}{E} + \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \quad , \text{ kde} \quad (34)$$

členy s indexem  $i$  platí pro indentor a členy bez indexu pro měřený materiál. Rovnice (18) byla odvozena za předpokladu, že se indentor a zkušební těleso chovají jako dvě sériově spojené pružiny. [83], [84]

Pokud se z rovnice (17) vyjádří kombinovaný (redukovaný) modul  $E_{red}$ , mění se na tvar

$$E_{red} = \frac{S \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{A_p}} = \frac{S}{2 \cdot a_c} \quad , \text{ kde} \quad (35)$$

$a_c$  značí kontaktní poloměr.

Vtiskový modul  $E_{IT ISO}$  je dle norem a standardů určen vzorcem

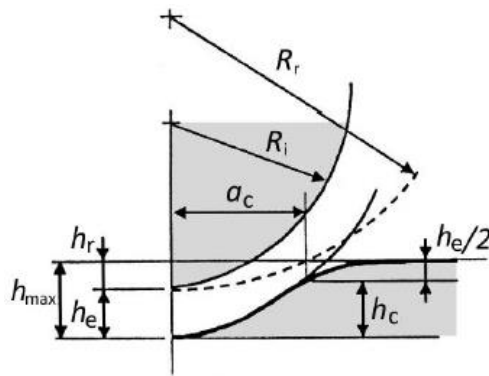
$$E_{IT ISO} = \frac{1 - \nu^2}{\frac{1}{E_{red}} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (36)$$

Tento vzorec však není korektní, pokud před měřením není známo Poissonovo číslo  $\nu$  materiálu. Správný vzorec pro výpočet vtiskového modulu, který vyhovuje definici, je roven

$$E_{IT ISO} = \frac{1}{\frac{1}{E_{red}} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad [83], [84] \quad (37)$$

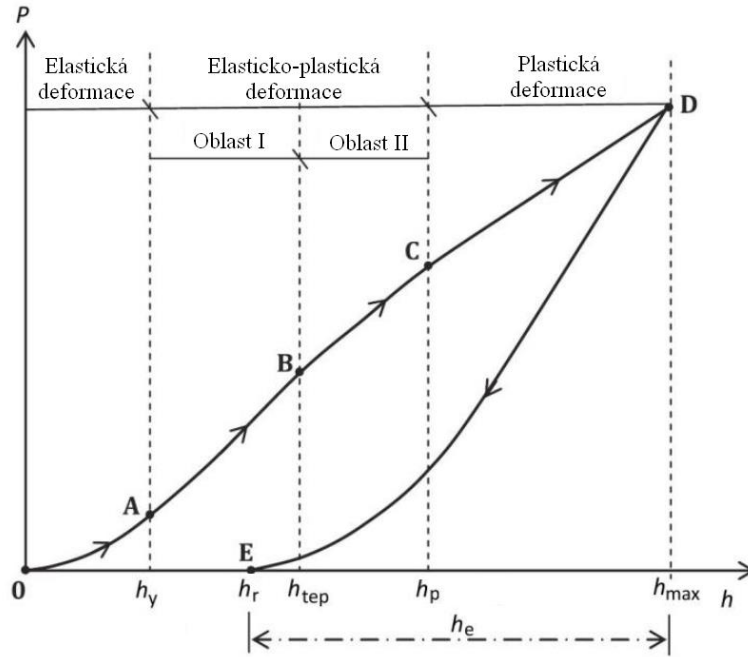
### Sférický indentor

Na rozdíl od jiných indentorů má sférický indentor výhodu v tom, že u něj nedochází k plastické deformaci v důsledku přítomnosti hran. Použitím sférického indentoru se vykresluje indentační křivka určitého tvaru, ze které lze vyčíst vlastnosti zkoumaného materiálu. Na Obr. 35 je znázorněno schéma indentace sférickým indentorem. Poloměr indentoru je označen  $R_i$ .  $R_r$  a značí poloměr zbytkového vtisku.



**Obr. 35:** Schéma indentace sférickým indentorem; upraveno z [85]

Zatěžovací křivka z procesu indentace pomocí sférického indentoru se rozděluje na tři fáze deformace, jak je zobrazeno na Obr. 36.



**Obr. 36:** Indentační křivka při použití sférického indentoru, závislost síly na hloubce indentace; upraveno z [86]

Výše uvedenou indentační křivku definovali Akuro Big-Alabo, Philip Harrison a Matthew P. Cartmell působící na univerzitách v Glasgow a Sheffieldu. Tito vědci rozdělili problematickou elasticko-plastickou část křivky na dvě oblasti. Tím se zjednodušil výpočet, avšak experimentálně se zjistilo, že model není zcela přesný. [86]

### Popis indentační křivky

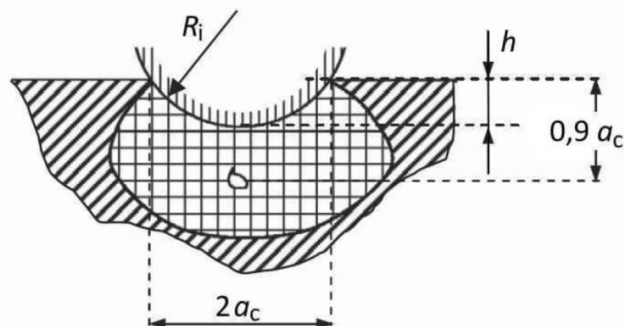
#### Elastická deformace

Na počátku zatěžování dochází k elastické deformaci, kdy se materiál dokáže ještě vrátit zpět do svého původního tvaru. Popis této fáze vychází z Hertzovy kontaktní teorie. Elastická fáze končí dosažením meze kluzu - bodu A na Obr. 36, který odpovídá hloubce  $h_y$ , hloubce na mezi kluzu.

Bod A je určen středním napětím mezi kontaktními plochami indentoru a zkoušeným materiálem. Tato hodnota je definována jako  $1,1 \sigma_y$ , kde  $\sigma_y$  je smluvní napětí na mezi kluzu materiálu. Při dosažení tohoto zatížení se pod

vtiskem začíná vytvářet plasticky deformovaná zóna, viz Obr. 37.

Jelikož se postupně zvětšuje kontaktní plocha indentoru s materiálem, křivka této fáze není lineární.



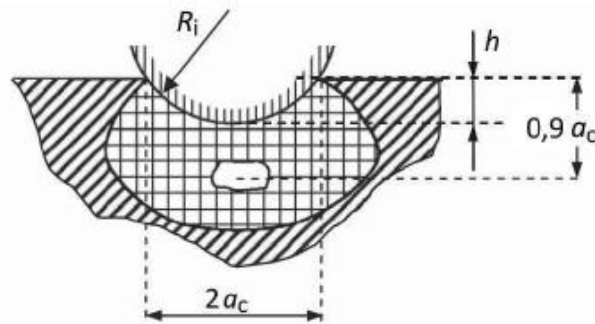
**Obr. 37:** Velikost plastické zóny pod vtiskem – dosažení meze kluzu; upraveno z [86]

#### Elasticko-plastická deformace

Ve druhé fázi se již uplatňuje zároveň i plastická deformace. Tato fáze se nazývá elasticko-plastická deformace, kterou dále rozdělujeme na dvě oblasti. Oblasti jsou od sebe odděleny bodem B, který odpovídá přechodové hloubce  $h_{tep}$ .

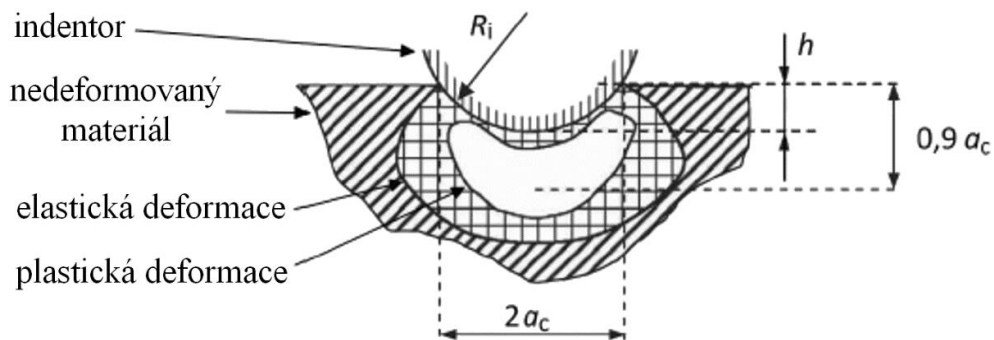
Oblast I začíná dosažením meze kluzu a končí přechodovou hloubkou  $h_{tep}$ . Křivka v oblasti I má nelineární průběh. Podíl elasticky deformovaného materiálu převyšuje podíl plasticky deformovaného materiálu. Velikost plastické zóny zobrazuje Obr. 38.

Experimentálně bylo zjištěno, že k vyrovnání podílů elasticky a plasticky deformovaného materiálu dochází v okamžiku, kdy je střední napětí na kontaktní ploše rovno  $1,95 \sigma_y$ . Tato hodnota je přímo uprostřed mezi mezí kluzu a mezí, kdy je kontakt čistě plastický. Pro čistě plastický kontakt platí  $2,8 \sigma_y$ .



**Obr. 38:** Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast I elasticko-plastické deformace; upraveno z [86]

Oblast II navazuje na oblast I a končí hloubkou  $h_p$ . V hloubce  $h_p$  se plasticky deformovaná oblast materiálu přiblíží na rozhraní kontaktu s indentorem. Podíl plasticky deformovatelného materiálu je srovnatelný, někdy i větší oproti podílu elasticky deformovatelného materiálu, viz Obr. 39. Oblast II se vyznačuje lineárním průběhem na křivce indentace.



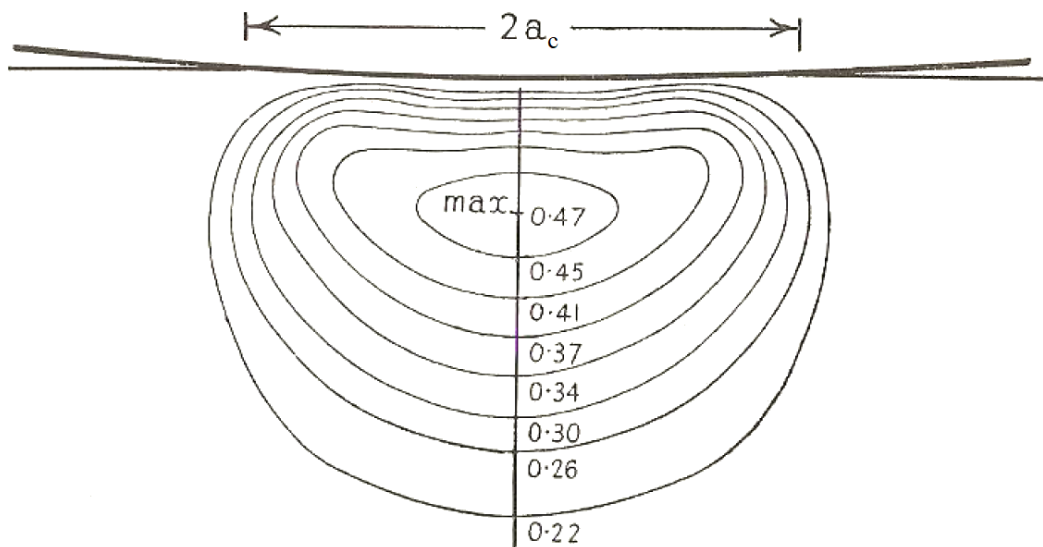
**Obr. 39:** Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast II elasticko-plastické deformace; upraveno z [86]

Plastická deformace

Třetí fázi je plně plastická deformace. Fáze začíná dosažením hloubky  $h_p$ . Plastická deformace nastane dotykem plasticky deformovaného materiálu s indentorem, respektive šířením plastické deformace v materiálu až na povrch zkoušeného materiálu. Začátek plastické deformace odpovídá střednímu napětí na kontaktní ploše o hodnotě  $2,8 \sigma_y$ .

## 5. Popis plastické zóny dle Tabora

Jiným způsobem došel k podobnému závěru D. Tabor, který vycházel z výzkumu R. M. Daviese z roku 1949. Pro výpočet byla použita Trescova a Huber-Misesova podmínka plasticity. Bylo zjištěno, že místo dosažení podmínky plasticity, tedy místo s nejvyšší hodnotou smykového napětí, se vyskytuje uprostřed vtisku ve vzdálenosti přibližně  $0,5 a_c$  pod povrchem. [7]



*Obr. 40: Elastická deformace zobrazující maximální smykové napětí v materiálu pod vtiskem; upraveno z [7]*

Hodnota smykového napětí závisí na Poissonově čísle. Pro materiály, které mají Poissonovo číslo rovno přibližně 0,3, je hodnota smykového napětí rovna  $0,47 p_m$ , kde  $p_m$  je střední napětí mezi indentorem a materiálem. [7]

Dle podmínky plasticity podle Tresca a Huber-Misesa platí, že plastická deformace nastane tehdy, pokud se střední napětí rovná polovině mezi kluzu

$$p_m = 0,5 \sigma_y. \quad (38)$$

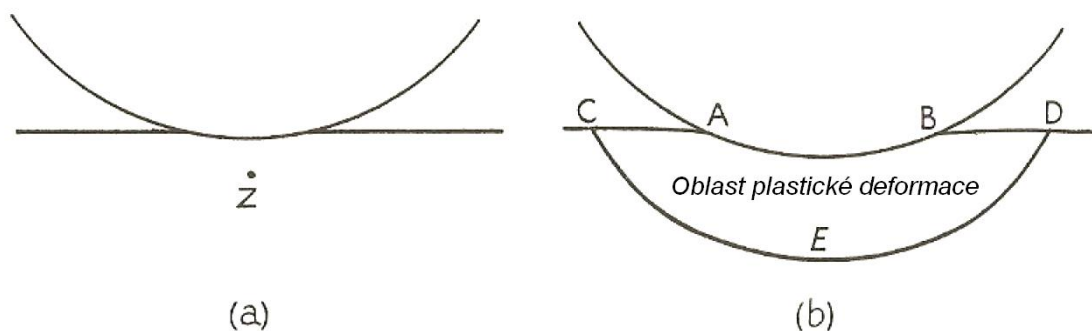
Například pokud se pro materiály s Poissonovým číslem 0,3 vloží hodnota smykového napětí  $0,47 P_m$  do výše uvedené rovnice, vznikne matematický výraz

$$0,47 p_m = 0,5 \sigma_y, \quad (39)$$

což je rovnice odpovídající podmínce pro vznik plastické deformace. Pokud se z rovnice vyjádří  $p_m$ , vyjde hodnota uvedená již výše při popisu elastické fáze

$$p_m \approx 1,1 \sigma_y. \quad (40)$$

Pokud je hodnota středního napětí vyšší než  $1,1 \sigma_y$ , dochází v oblasti Z k plastické deformaci. Zbytek materiálu je elasticky deformován, takže při odstranění zatížení je množství zbytkové deformace velmi malé.



**Obr. 41:** *Plastická deformace ideálně plastického materiálu: (a) počátek lokalizace v oblasti Z za podmínky  $p_m = 1,1 \sigma_y$ ; (b) pozdější fáze, kdy se celý materiál plasticky deformuje; upraveno z [7]*

Faktory ovlivňující indentační měření

Měření tvrdosti indentační zkouškou je založeno na přesném určení zatížení a hloubky průniku indentoru do zkušebního povrchu. Jakékoliv přesné měření v praxi je velmi obtížné a bývá ovlivněno různými vnějšími i vnitřními faktory.

Faktory, které ovlivňují měření metodou DSI, lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou tzv. faktory vnější. Do této skupiny patří okolní podmínky měření a vlastnosti měřicího přístroje. Těmito faktory jsou například kolísání teploty, jež ovlivňuje přístroj a zároveň zkušební těleso, tuhost měřicího přístroje, skutečná geometrie indentoru, určení bodu prvního dotyku indentoru s povrchem (nulová poloha), kalibrace přístroje a nakloněná plocha. [82], [85]

Do druhé skupiny patří vlastnosti samotného zkušebního vzorku. Zkušební

vzorek je ovlivněn již při jeho přípravě, jelikož je při měření velmi důležitá kvalita povrchu. Měření může ovlivnit drsnost povrchu, znečištění povrchu, velikost vtisku (ISE), tvar vtisku (pile-up, sink-in), zpevnění materiálu, zbytkové napětí, vady ve struktuře. [82], [85]

Některé z výše uvedených faktorů ovlivňujících měření budou dále podrobně charakterizovány.

#### Určení bodu prvního dotyku indentoru

Určení nulové polohy indentoru je důležité pro správné určení hloubky vniknutí. Ideálním stavem je, pokud se hrot indentoru dotýká povrchu zkušební vzorku bez jakéhokoliv deformačního ovlivnění.

Takového stavu bez deformačního ovlivnění v podstatě nelze dosáhnout. V praxi se první kontakt uskutečňuje s nejmenším možným zatížením, které lze přístrojem vyvinout. Nulová počáteční hloubka se vypočítá pomocí Hertzových rovnic. Předpokládá se tedy působení pouze elastické deformace. [82]

Počáteční hloubka vniknutí pak musí být přičtena ke všem dále změřeným hloubkám.

#### Geometrie indentoru

Principem vnikací zkoušky je průnik indentoru do povrchu, z jehož zanechané stopy v materiálu, projekční plochy, se tvrdost určuje. Proto je skutečný tvar indentoru podstatný. Pro odstranění odchylky projekční plochy se používá korekční faktor  $A/A_i$ , kde  $A$  značí skutečnou plochu a  $A_i$  ideální plochu. [82]

Korekční faktor lze určit mikroskopickými technikami AFM či SEM. V praxi se však používá nepřímá metoda měření provedením sérií vtisků při různých zatíženích na etalonu o známé hodnotě modulu pružnosti a Poissonova čísla. [82]

#### Velikost vtisku

Dalším ovlivňujícím faktorem měření tvrdosti je velikost vtisku, anglicky Indentation Size Effect – ISE. Vliv velikosti vtisku na měření tvrdosti se vyskytuje zejména při zatížení nižším, než 5 N. S klesajícím zatížením roste naměřená hodnota tvrdosti. Jsou však známy i výjimečné případy, kdy byl výsledek opač-



ný. Pokud s nižším zatížením tvrdost poklesla, označuje se jako negativní ISE. Častější efekt je nazýván pozitivní ISE. [82]

Nejčastějším vysvětlením příčiny tohoto jevu je:

Při snížení zatížení se na měřicím přístroji více projevují vibrace. To má za následek zvětšení velikosti vtisku a tím zdánlivý pokles tvrdosti.

Povrch materiálu vzorku je deformačně zpevněn procesem mechanického leštění, tudíž se tvrdost zvýší.

Měření velikosti vtisku po působení malého zatížení na optickém mikroskopu je obtížné. Obvyklé rozlišení optického mikroskopu činí přibližně 0,5  $\mu\text{m}$ . Proto je měření těchto vtisků nepřesné. Vtisk se může jevit jako větší, než ve skutečnosti je. [87]

Příčina efektu velikostního faktoru může také souviset s vnitřní strukturou zkoumaného vzorku. Podle M. Bückleho může ISE způsobovat:

- Elastické zotavení při nízkém zatížení je mnohem výraznější.
- Objem vtisku je tak malý, že neobsahuje téměř žádné dislokace, takže se tvrdost blíží teoretickému limitu pro dokonalý krystal.
- V průběhu indentace dochází k deformačnímu zpevnění.
- Z důvodu přítomnosti povrchových a vnitřních nečistot i vzniku oxidové vrstvy na povrchu, je tvrdost vyšší. [82], [87]

Nakloněná plocha

Měření povrchové tvrdosti těles, které mají obecný tvar, neobsahují žádnou rovinnou plochu, což může způsobit nepřesnosti. Pokud se tvar skutečné kontaktní plochy liší oproti předpokládané přímé rovinné zkušební ploše, může docházet k chybám měření. Průnik indentoru do nakloněné plochy může vyvolat v materiálu vzorku asymetrické síly, které následně nepříznivě ovlivňují naměřené hodnoty. [85]

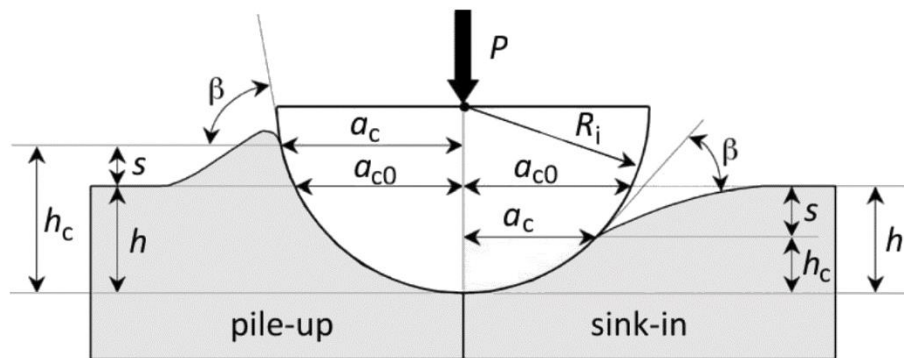
Zbytková napětí

Proces technologie výroby ovlivňuje nejenom povrch, ale do určité hloubky i materiál. Poslední výrobní operace má tedy na součástku nejvýraznější vliv.

Zbytková napětí se v materiálu vyskytují bez působení vnějšího zatížení. Napětí přímo souvisí se změnou tvrdosti, pokud jsou napětí v intervalu platnosti Hookova zákona. Platí, že tahová napětí vyvolávají větší změnu tvrdosti, než tlaková napětí. [82]

#### Pile-up a sink-in chování materiálu

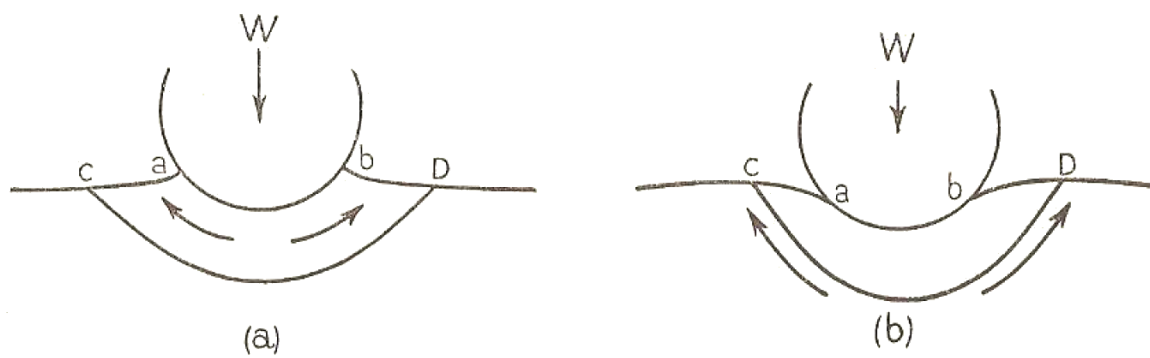
Pro zjištění tvrdosti je zapotřebí správně určit projekční plochu vtisku, zejména kontaktní poloměr  $a_c$ , Obr. 42. Pokud se kontaktní poloměr stanoví nepřesně, výsledky měření mohou být vyhodnoceny až s 60% chybou. [88]



**Obr. 42:** Pile-up a sink-in chování materiálu při použití sférického indentoru; upraveno z [88]

Chování materiálu se posuzuje na základě poměru  $E/\sigma_y$  a schopnosti deformačního zpevnění. Pokud je tento poměr malý, materiál je měkký, je schopen se deformovat, tudíž se při indentaci objeví efekt sink-in. Naopak při velkém poměru bude převládat pile-up Obr. 43.

Materiály, které se při indentaci deformačně nezpevnějí (např. tvářené kovy, již deformačně zpevněné), vykazují pile-up, protože dochází k plastické deformaci v těsném okolí indentoru. Pro materiály schopné deformačního zpevnění nastane sink-in, jelikož se plastická zóna šíří dál do materiálu. [7], [82], [88]



Obr. 43: Chování materiálu: (a) pile-up; (b) sink-in; upraveno z [88]

## 6. Norma ISO 14577

Pro možnost standardizace zkoušení, vyhodnocení vtisků a dat po instrumentované indentační zkoušce byla Mezinárodní organizací pro normalizaci vydána norma ISO 14577 ve čtyřech dílech. Českým ekvivalentem této normy je:

ČSN EN ISO 14577 Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část:

Část 1: Zkušební metoda ČSN EN ISO 14577-1

Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních strojů ČSN EN ISO 14577-2

Část 3: Kalibrace referenčních destiček ČSN EN ISO 14577-3

Část 4: Zkušební metoda pro kovové a nekovové povlaky ČSN EN ISO 14577-4.

Normy popisují princip metody, její definici, zajišťují správný postup a opakovatelnost zkoušky a podávají informace o různých metodách kalibrace. [83]

Norma specifikuje metodu zkoušky pro tři rozsahy:

rozsah makro:  $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$

rozsah mikro:  $2 \text{ N} > F; h > 0,2 \mu\text{m}$

rozsah nano:  $h \leq 0,2 \mu\text{m}$

První část normy uvádí a vysvětluje všechny značky a výpočty vztahující se k této vnikací zkoušce.

## 7. Metodologický přístup k experimentu na základě kritické rešerže

Existuje několik principiálně odlišných způsobů zkoumání mechanických vlastností materiálů a to již od návrhu designu až po konečnou kontrolu kvality a životnosti součástí strojů a konstrukcí. Z metodologického hlediska lze takové zkoumání provádět nedestruktivním nebo destruktivním způsobem. Nedestruktivní metody nacházejí alternativní uplatnění k standardně zavedeným destruktivním metodám, neboť umožňují provedení zkoušek i bez speciálně vyrobených vzorků, přímo na konstrukční součásti, případně i za provozu, což je časově a ekonomicky velmi výhodné. V předkládaném experimentu je toto umožněno díky extrémně malému objemu zkoumaného materiálu potřebného k provádění měření. V daném případě se využívá lokální zatížení pomocí testovacího zařízení, jehož měřicí prvky musí mít vysokou citlivost a rozlišovací schopnost. Testovací zařízení s vysokou stabilitou pracuje na základě pokročilé automatizace na hardwarové i softwarové úrovni. Výhodou předkládaného zařízení je kompaktní provedení a jeho mobilita. Navrhnuté zařízení, umožňuje provedení komplexních testů s vysokou přesností a získání širokého spektra materiálových veličin, jako jsou hodnoty tvrdosti, meze pevnosti, meze kluzu, modulu pružnosti, energie elastické a plastické deformace s exponentem a koeficientem deformačního zpevnění.

Tuto metodu lze nazvat instrumentovanou zkouškou tvrdosti materiálů na základě vtlačování indentoru. Křivka zatížení-hloubka vtisku přitom popisuje charakteristické chování materiálu na základě elastické, elasticko-plastické a plastické deformace.

Měřicí zařízení, používané pro uvedený druh zkoušení materiálu, obsahuje snímače zatížení a posuvu indentoru nebo snímač hloubky vniknutí. Existují různé metody zatížení indentoru, například hydraulické, pneumatické, elektro-mechanické s použitím elektrických motorů se zubovou převodovkou nebo s řemenovým převodem, elektromagnetem anebo piezoelektrickými prvky, mechanické s použitím závaží, pomocí klikových a pákových mechanismů. Hyd-

raulické a pružinové měřiče zatížení, piezoelektrické prvky, kapacitní a tenzometrické snímače jsou používány pro měření hodnot zatížení. Dále metody založené na laserové optice a elektro-optické mechanice, kapacitní, potenciometrické, elektromagnetické, piezoelektrické a tenzometrické snímače, které jsou často využívány pro záznam hloubky vtisku neboli aktuálního lineárního posuvu indentoru během indentační zkoušky.

Existující zařízení, která realizují instrumentovanou indentační metodu s vysokou přesností a opakovatelností procesu měření, mají větší rozměry, jsou často omezené rozsahem používaného zatížení anebo rozměrem indentoru a měří celkový lineární posuv indentoru. [1, 101, 103, 104, 105, 106]

Ashinger [92] popisuje možnost využití tenzometrických snímačů, které jsou připojeny k pružnému ramenu, pro registraci nízkých hodnot zatížení a posuvů indentoru. Měření vyšších hodnot parametru indentace popisuje [89]. Napetschnig [93] navrhuje vertikální umístění pružného ramene. U zařízení Fohey [94] je realizován krátký měřicí obvod měření posuvu, kde je zatěžován pouze držák indentoru a indentor, což je nejnižší nalezený počet prvků mezi snímačem a indentorem, které se deformují. Borgersen [95] realizuje pákovým mechanismem odpočet parametru zatížení.

V patentu [96] je popis měřícího zařízení pro zkoušení, indentační metodou, kovových plechů. Měření pohybu se provádí s použitím tří LVDT snímačů posuvu, umístěných v blízkosti indentoru, kde konečný signál je zprůměrován. Tento systém neřeší otázku deformace sousedních komponentů indentoru. Měření pohybu třemi senzory upevněnými v blízkosti indentoru bude ovlivněno deformací zatížených součástí zařízení, což bude podstatné pro měření plechů, kde se vyžadují malé hodnoty zatížení. Je třeba brát v úvahu, že se také komplikuje konstrukce a zvyšují se nároky na manipulaci. Patent [97] popisuje ruční indentační zařízení se stejným principem měření pohybu.

Další patent [98] popisuje jak indentační soustavu, která se může připojit k různým zatěžovacím mechanismům, tak počítačový systém pro provedení mě-

ření, zpracování dat a vyhodnocování výsledků. Soustava se skládá ze dvou částí. V horní části je siloměr, indentor a snímač posuvu. V dolní části je držák pro uchycení vzorku a zrcadlo snímače posuvu. Snímač posuvu je umístěn mimo osu zatížení, co může být důvodem toho, že měření bude ovlivněno deformací komponentů soustavy, a manipulace se vzorkem nebo provedení měření v simulovaném prostředí bude velmi obtížné.

Indentační zařízení ZWICK, dostupné z [99], je založené na patentu [100] a dalších patentových dokumentech. Toto zařízení má indentační hlavici, která je součástí vlastního zatěžovacího mechanismu s tím, že se na jejím krytu nachází snímač posuvu. Měření geometrie vtisku zabezpečuje optický systém v kombinaci s manuálním nebo motorizovaným stolkem. Elastická deformace způsobená zatížením systému ovlivňuje přesnost odečítaných hodnot ze stupnice. Zařízení umožňuje použití různých indentorů, je plně automatizované, ale kromě hodnot tvrdosti a indentační křivky se nezískávají žádné další mechanické parametry.

Na základě těchto studií, metodologie a zařízení navržené v disertační práci odstraňují všechny nedostatky uvedené v literárních rešerzích.

## Cíle disertační práce

**Cílem dizertační práce** je, na základě studia existujících indentačních technologií navrhnout a vyvinout nový systém zkoušení mechanických vlastností, využívající metodiku instrumentovaného vtlačování indentoru kulového tvaru. V rámci experimentu vypracovat metodologii výpočtu mechanických vlastností strojírenských materiálů a získané charakteristické závislosti ověřit s hodnotami změřenými na standardních zkušebních přístrojích (trhací stroj, univerzální tvrdoměr, nanotvrdoměr).

Splnění stanovených cílů potvrdit na vybraném materiálu (např. na hliníkové slitině EN AW 2030-T3), u kterého bude možné reprezentovat probíhající proces odezvy struktury po zatížení.

Pro splnění cílů navrhuji dodržet následující postup:

1. Zpracovat literární reserše k dane problematice.
2. Pomocí metody konečných prvků navrhnout model pro novou koncepci zkoušení materiálových vlastností vtlačováním sférického indentoru.
3. Využít způsob instrumentovaného vtlačování indentoru pro návrh speciálního experimentálního zařízení.
4. Provést matematické zpracování vybraných mechanických vlastností.
5. Verifikaci výpočtů na standartních zkušebních zařízeních.
6. Výběr materiálů pro standartní a indentační zkoušky a jejich detailní rozbor.
7. Volba tvaru a rozměrů vzorků pro statickou tahovou zkoušku a zkoušky tvrdosti.
8. Porovnání výsledků z jednotlivých metod měření.
9. Studium mikrostruktury a chemického složení pro vybrané materiály.
10. Na slitinách hliníku provést fraktografické zkoumání lomových ploch.
11. Vyhodnotit odezvu vybraných materiálů z procesu vtlačování indentoru.
12. Navrhnout prototyp experimentálního zařízení.
13. Vyrobit prototyp experimentálního zařízení.

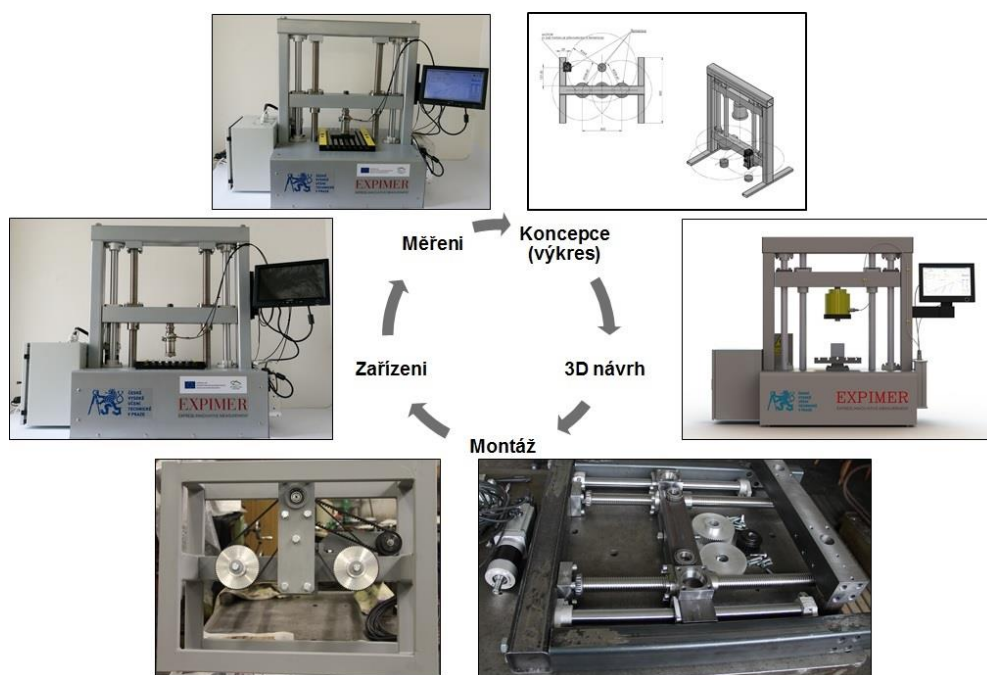


14. Uvést do provozu experimentální zařízení.

15. Ověřit metodiku primárního a upřesněného výpočtu mechanických vlastností.

## 8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment se zabývá návrhem, vývojem a ověřením prototypového experimentálního zařízení na základě indentačního systému, nazvaného v disertační práci „EXPIMER“. Návrh vycházel z poznatků získaných z výše uvedených patentů a odborných publikací. Postup vývoje od výkresu, návrhu v 3D, přes montáž a konečnou formu zařízení, na kterém může probíhat měření, je uveden na Obr. 44.



**Obr. 44:** Postup od návrhu, vývoje, montáže až po konečné zařízení

Přístroj navržený a vyvinutý na ústavu materiálového inženýrství, Českého Vysokého Učení Technického v Praze, v rámci disertační práce (a v průběhu řešení projektů „Materiálový výzkum pro InovaSEED“, reg. č. CZ.1.05/3.1.00/14.0301, který je spolufinancovaný z Evropského fondu pro regionální rozvoj prostřednictvím Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace a SGS13/186/OHK2/3T/12 – Výzkum vlivu povrchových úprav na zvýšení životnosti a spolehlivosti komponentů vodních turbín) je plně automatizovaným, multifunkčním zařízením pro zkoušení materiálových vlastností, různých druhů strojírenských materiálů. Jedná se o následující materiálové vlastnosti:

- ▶ tvrdost HB,
- ▶ mez pevnosti  $R_m$ ,
- ▶ mez kluzu  $R_{p0.2}$ ,
- ▶ modul pružnosti  $E$ ,
- ▶ exponent  $n$  a součinitel  $K$  deformačního zpevnění.

Metoda je navržena jako nedestruktivní tak, aby nebylo nutné vyrábět zvlášť vzorky, čímž se tyto zkoušky stávají rychlejší a levnější. Získání velkého množství parametrů z jednoho rychlého a jednoduchého měření dělá tuto metodu flexibilní. Na základě uvedených předpokladů, bude možné určovat materiálové vlastnosti a jejich změny jak v průběhu vývoje, výroby, provozování tak i zpracování materiálu s tím, že jsou odstraněny všechny uvedené restriktce předcházejících zařízení.

Součástí navrženého měřicího systému je speciální software napojený na zařízení, který je uživatelsky příjemný a zároveň schopný zpracovávat průběžně získané hodnoty do protokolu. Pro celý experiment není nutnost náročného zaskolování obslužného personálu. Bereme-li v úvahu, že tato zkušební metoda je aplikovatelná na jakýkoliv kovový materiál, získané veličiny mohou sloužit jako vstupní materiálové vlastnosti pro další matematické metody, kde na základě výpočtového modelování lze souběžně predikovat budoucí chování zatěžovaného materiálu v daných konstrukčních prvcích. [109]

## 9. Návrh softwaru

Návrh softwaru vycházel z předpokladu, že bude modulární. Obslužná aplikace pracuje pomocí PC s přehledným a přátelským grafickým uživatelským rozhraním. Tato aplikace byla implementována v jazyce C#. Znárodnění hlavního okna programu je patrné z Obr. 46. Tato aplikace dovoluje pružně nastavovat parametry experimentu (čas, rychlost, velikost zatížení, počet cyklů), spustit a kdykoliv zastavit měření, ovládat pohony, ukládat naměřené hodnoty a data do protokolu v pdf formátu nebo exportovat do Excelu.

### Vstupy a výstupy

V následujícím jsou uvedeny signály, které je třeba v průběhu obsluhy přístroje zpracovávat. Během experimentů je zapotřebí měřit posun a zatížení indentoru, pro následující vstupy:

- Zatížení měřené tenzometrickým můstkem. Měří se s rozdílového napětí můstku v jednotkách mV. Toto napětí je převedeno na zatížení. K tomu se musí odečíst hodnoty z A/D převodníku.
- Posun měřený digitální posuvkou.

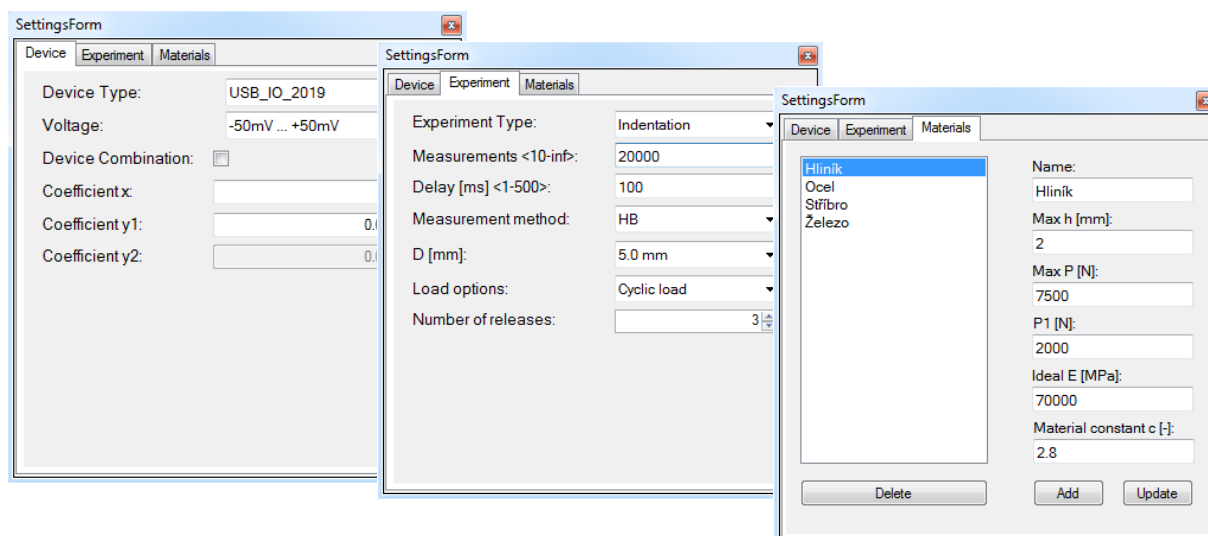
Je třeba řídit servomotor, pomocí něhož je postupně vtlačovaný indentor, pro získání následujících vstupů a výstupů:

- Výstupní PWM signál jehož frekvence udává rychlost otáčení motoru.
- Výstup indikující směr otáčení motoru.
- Výstup indikující běh motoru.
- Vstup indikující chybu motoru.

### Návrh aplikace

Před začátkem nového experimentu, je potřebné správně nastavit použitá pracovní zařízení a parametry pro konkrétní měření. Pro tuto aplikaci slouží panel nastavení, který je vyobrazen na Obr. 45. U tohoto zařízení je potřebné nastavit především typ měření a koeficienty pro přepočítání rozdílového napětí tenzometrických můstků pro stanovení zatížení. V případě experimentu se nastavuje jeho průběh, velikost indentoru, apod. Poslední záložkou v panelu nastavení je ozna-

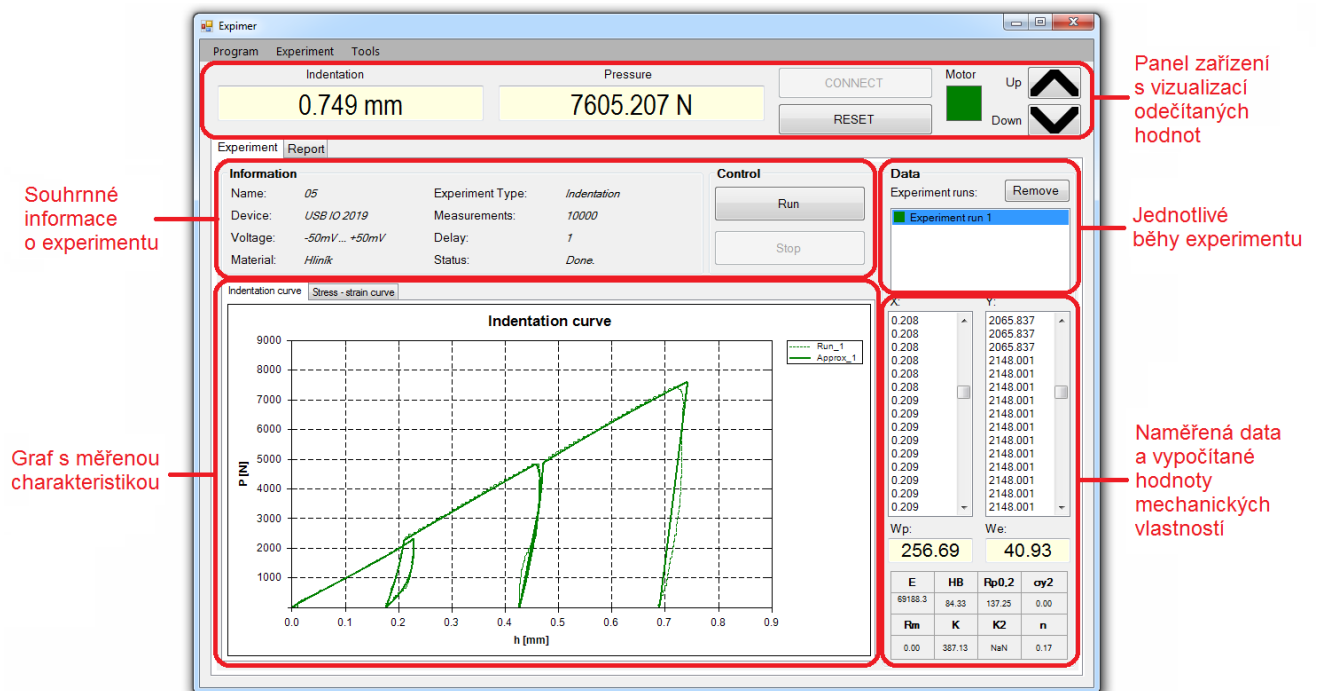
čení zkoušených materiálů.



*Obr. 45: Panel nastavení.*

Po nastavení zařízení lze přikročit k novému experimentu. V průběhu experimentu uživatel vybere materiál a připravená aplikace se připojí k danému zařízení. Aplikace pak již nepřetržitě vizualizuje hodnoty získané z jednotlivých zařízení. Hlavním prvkem aplikace je panel pro ovládání celého experimentu. Zde se zobrazuje průběh a detaily měření a po jeho skončení i vypočítané mechanické vlastnosti materiálu. Důležitým výsledkem je grafické vyjádření, které průběžně vykresluje měřenou charakteristiku. Po ukončení experimentu lze přepnout na vizualizaci křivky „napětí – deformace“ („stress - strain“), která je vypočítána z naměřených dat. Data jsou rovněž filtrována a extrapolována. Experiment lze spustit několikrát po sobě. Jednotlivé charakteristiky se pak vykreslí přes sebe, pro snadné vzájemné porovnávání. Pokud se jednotlivý běh experimentu nezdaří, je možné naměřená data odstranit. Z hotového experimentu, je možné pomocí záložek zobrazit panel pro tvorbu zprávy z měření. Ta je vygenerována automaticky a obsahuje jednotlivé grafy a všechny naměřené vlastnosti přehledně zobrazené v tabulce. Zprávu lze uložit ve formátu jako pdf nebo xlsx soubor obsahující všechna naměřená data. Celý experiment je možné také uložit do xml souboru, odkud je možné ho kdykoliv opět načíst. Rozložení jednotlivých prvků aplikace je znázorněno na Obr. 46. Příklad zprávy z měření je uve-

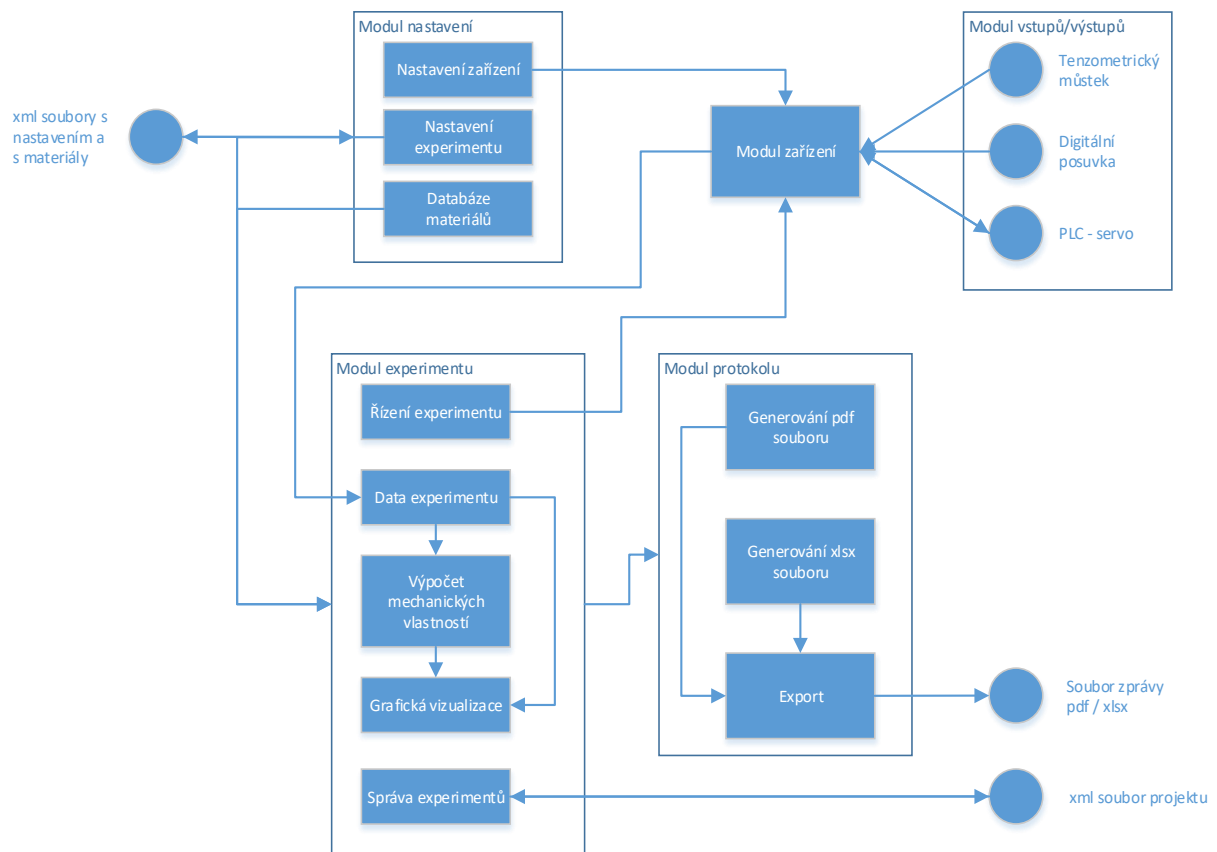
dený na Obr. 48.



**Obr. 46:** Hlavní okno aplikace s jednotlivými prvky.

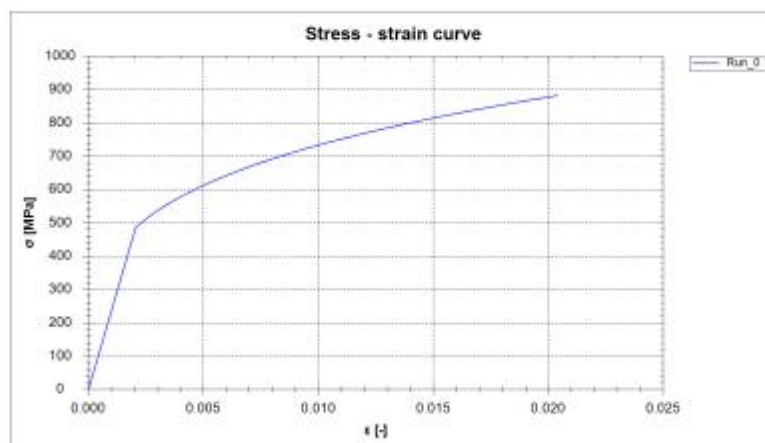
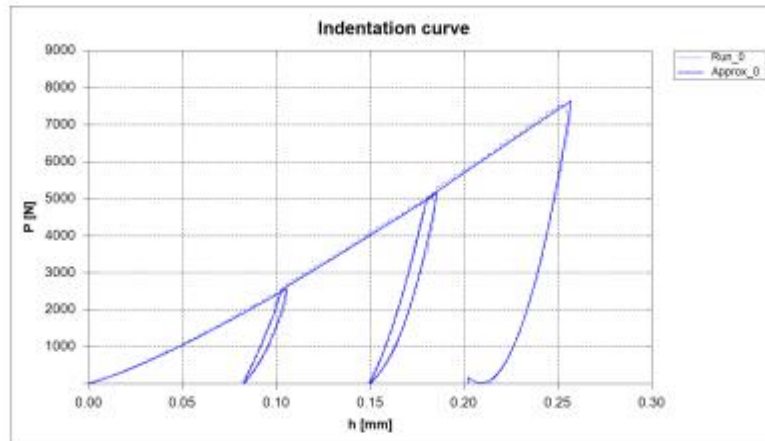
Získané vyhodnocení celého experimentu je stručné a přehledné. Může také sloužit jako protokol Obr. 48, který bude garancí kvality dodaného materiálu.

Jednotlivé moduly softwaru lze znázornit pomocí blokového schéma zobrazeného viz Obr. 47.



**Obr. 47:** Blokové schéma softwaru.

## Report of indentation test



Run	E [MPa]	HB [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	K [MPa]	n [-]
0	237244.008	199.759	486.246	559.325	2419.650	0.259

Run	W <sub>p</sub> [J]	W <sub>e</sub> [J]	HMy [?]
0	123.493	30.335	1044.848

Expimer

*Obr. 48: Příklad vygenerované zprávy z měření ve formátu pdf.*



Popis jednotlivých modulů:

Modul nastavení - zabezpečuje uchování dat a možnost změn v nastavení zařízení, parametrů experimentu a informací o materiálech. Panel nastavení je možné vyvolat pomocí položky v menu aplikace. Změny v nastavení jsou automaticky ukládány a projeví se vždy v novém experimentu.

Modul zařízení – slouží pro připojení ke zvoleným prvkům zařízení v momentě vytvoření experimentu. Také pravidelně odečítá hodnoty senzorů, které jsou kontinuálně zobrazovány. V průběhu experimentu jsou hodnoty zapisovány a modul řídí motor působící na indenter na základě nastavených parametrů experimentu.

Modul vstupů/výstupů - zprostředkovává komunikaci s různými zařízeními pro odečítání hodnot senzorů a ovládání servomotoru. V případě senzorů zatížení se jedná o odpočet rozdílového napětí tenzometrického můstku pomocí A/D převodníku a jeho převod na sílu. Pokud jsou to senzory posuvu, jedná se o přímé odečtení hodnoty z digitální posuvky. V případě ovládání servomotoru se jedná o komunikaci s RPi pomocí protokolu ssh. RPi generuje podle instrukcí řídicí aplikace PWM signál, který je přiveden k PLC, podle kterého se řídí servomotor.

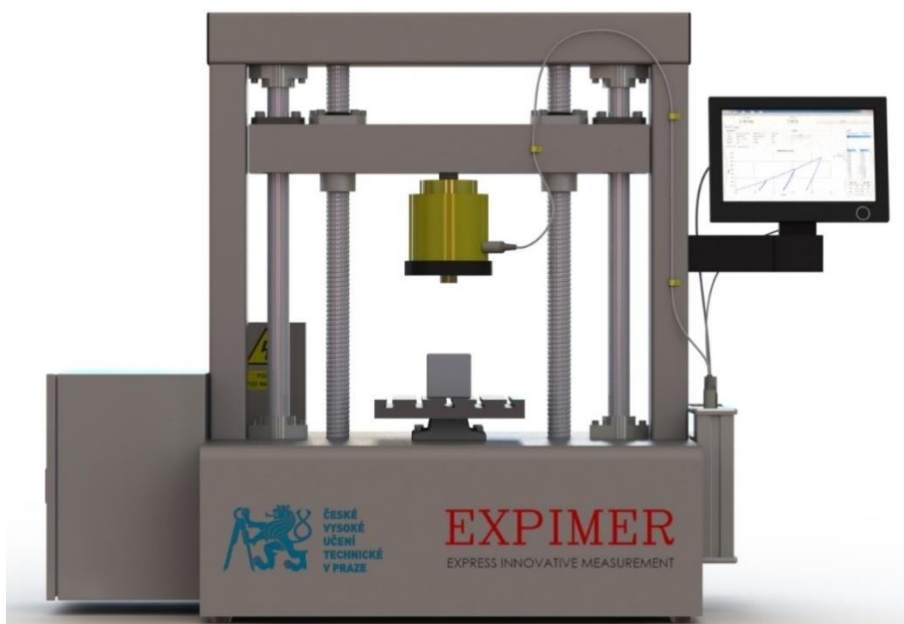
Modul experimentu - centrální modul, zabezpečuje samotný experiment. Vykresluje data do grafu, je nástrojem pro jejich extrapolaci a provádí výpočet požadovaných vlastností materiálu z naměřených hodnot. Celý experiment se řídí podle toho, jak je nastaven. Je zde možnost experiment uložit do souboru a poté jej opětovně načíst.

Modul protokolu – se používá po ukončení experimentu k vytvoření protokolu. Sbírá všechny informace z modulu experimentu a je schopen uložit zprávu obsahující naměřené charakteristiky a vypočítané vlastnosti materiálu do pdf souboru. Dále je schopný uložit data do xlsx souboru, který navíc obsahuje tabulky se všemi naměřenými hodnotami.

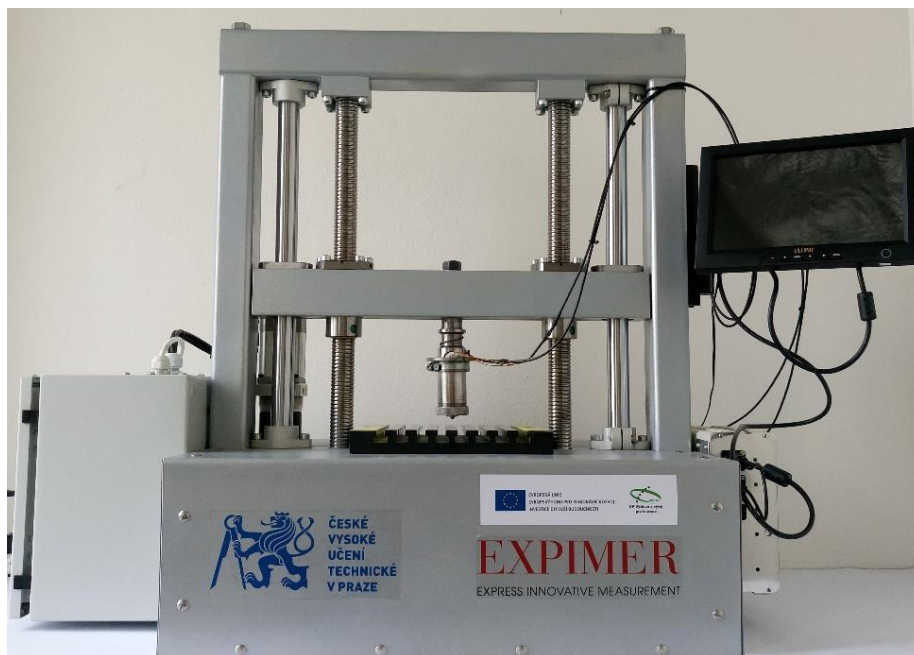
Výhody měřicího systému:

- Požadovaná přesnost měření, statistický počet snímaných dat,
- Možnost rychlé, flexibilní kontroly i v terénu,
- Nedestruktivní metoda,
- Relativně nízká výrobní cena,
- Malé rozměry zařízení,
- Jednoduchý a uživatelský příjemný software,
- Existence několika možných variant zařízení,
- Jednoduchá obsluha.

Pomocí výpočtového modelování, byl navržen vzhled, vytvořené výkresy a 3D model, který znázorňuje komplexní konstrukci na Obr. 49. Podle zvoleného návrhu bylo měřicí zařízení vyrobeno, viz Obr. 50



*Obr. 49: 3D návrh konstrukce měřicího modulu (výpočtové modelování)*



*Obr. 50: Prototyp experimentálního zařízení „EXPIMER“*

Na vyrobeném zařízení byl následně měřením získán statistický soubor dat materiálových vlastností pro různé typy materiálů.

## 10. Návrh metodologie primárního výpočtu mechanických vlastností

Pro stanovení mechanických vlastností byly použity algoritmy a postupy popsané níže. V těchto výpočtech jsou uvedené značky, symboly a zkratky vysvětlené na začátku disertační práce.

Stanovení mechanických vlastností materiálů indentační metodou podle patentu [1] se provádí následujícím způsobem. V první řadě se provede výpočet hodnoty tvrdosti dle Brinela v každém cyklu:

$$HB_{1...m} = \frac{P_{1...m}}{\pi \cdot D \cdot h_{1...m}}, \quad (41)$$

kde  $P_{1...m}$  je maximální hodnota zatížení v cyklu,  $h_{1...m}$  je hloubka vtisku po odlehčení,  $D$  – průměr indentoru.

Potom se pomocí těchto hodnot spočítá koeficient zpevnění materiálu  $n$ , podle následujícího vzorce (42)

$$n = \frac{HB_2 - HB_1}{(HB_m - HB_{m-1}) \cdot (m-1)}, \quad (42)$$

Výpočet modulu pružnosti  $E$  a meze kluzu  $Re$  se provede v oblasti elastické deformace od 0 do  $P_1$ . Kontaktní poloměr  $a$  se počítá pomocí vzorce (43)

$$a = \sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2} = \sqrt{D \cdot h - h^2}, \quad (43)$$

a deformaci  $e$  a  $\varepsilon$  dle (44)

$$e = 0,2 \frac{a}{D}; \quad \varepsilon = \frac{h}{D}, \quad (44)$$

Tvrdoost dle Martensa se počítá pomocí vzorce (45)

$$HM = \frac{P}{\pi \cdot a^2}, \quad (45)$$

Analogicky na základě poznatků ze statické zkoušky v tahu, kde platí Hookov zákon, lze spočítat modul pružnosti  $E$  [MPa]

$$E = \frac{HM}{e}, \quad (46)$$

Pro výpočet meze kluzu je třeba získat hodnotu  $HM$ , při které  $\varepsilon_{0,2} \approx 0,002$ . Tato hodnota je označovaná  $HM_{0,2}$ .

$$R_{p0,2} = C \cdot HM_{Y0,2} \quad (47)$$

$C = 2,8 \dots 3,2$  koeficient stlačování

Hodnota meze pevnosti  $R_m$  se počítá dle vzorce (48)

$$R_m = C \cdot HB_1, \quad (48)$$

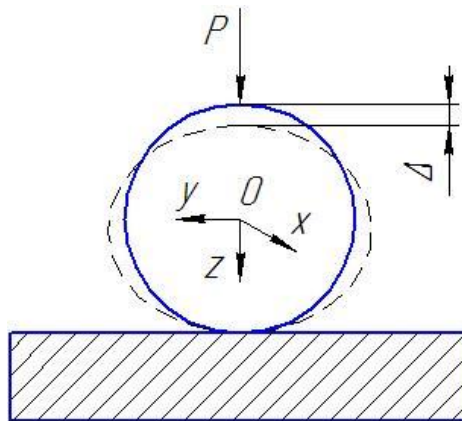
Hodnotu faktoru intenzity napětí  $K$  je možné spočítat dle vzorce (49)

$$K = R_{p0,2} \left( \frac{E}{R_{p0,2}} \right)^n, \quad (49)$$

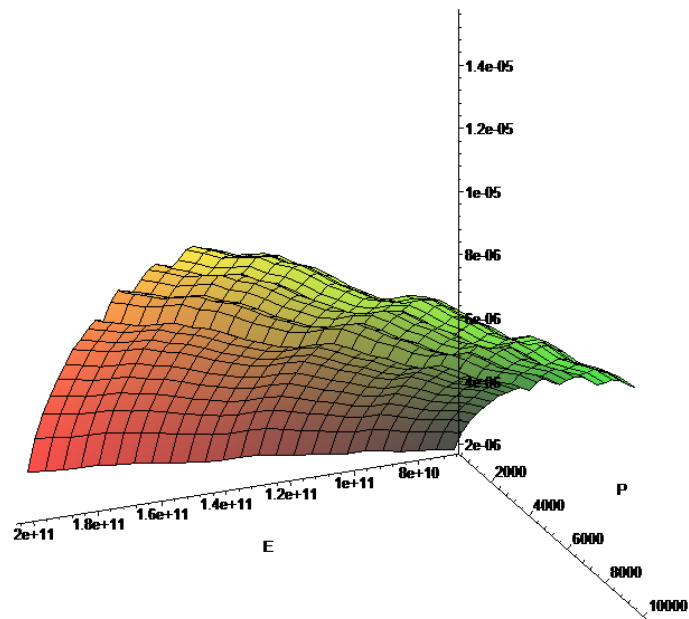
Křivku „napětí – deformace“ lze získat z výpočtu podle systému rovnic (50)

$$\begin{cases} R = E \cdot \varepsilon, & R < R_{p0,2}, & (I) \\ R = K \cdot \varepsilon^n, & R \geq R_{p0,2}, & (II) \end{cases} \quad (50)$$

Energie elastické  $W_e$  a plastické  $W_p$  deformace se počítá klasickým způsobem, jako plocha pod indentační křivkou. Při cyklickém měření to je první úsek do zatížení  $P_1$ .



*Obr. 51: Schéma vzniku elastické deformace kulového indentoru*



**Obr. 52:** Grafické vyjádření funkce  $F(P, E, \Delta)$

Pro určení vlivu elastické deformace indentoru na celkové měření (viz Obr. 51) byly provedeny výpočty metodou konečných prvků. Z výsledků byly získány hodnoty elastické deformace  $\Delta$  indentoru při různých hodnotách modulu pružnosti  $E$  vzorku s různým působícím zatížením  $P$ . Tyto hodnoty byly aproximovány kubickými „splajny“ v závislosti na elastické deformaci pro získání povrchové funkce  $F(P, E, \Delta)$ , která je vyobrazená na Obr. 52. Z uvedené funkce lze stanovit hodnotu elastické deformace indentoru pro různé kombinace hodnot modulu pružnosti vzorku a zatížení. Tato závislost může být použita při korekci indentační křivky. [114, 115]

## 11. Ověření primárního výpočtu na slitinách hliníku

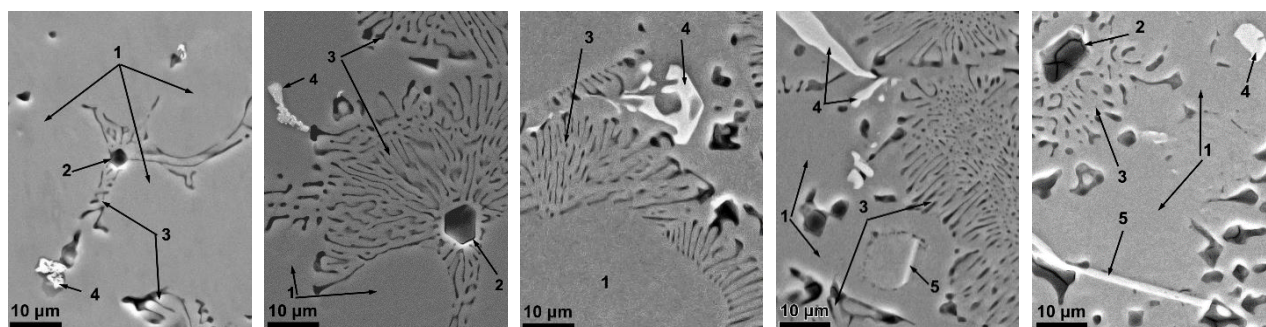
Ověření metodologie primárního výpočtu bylo provedeno na laboratorně odlišných materiálech. Nominální chemické složení získaných slitin je uvedeno v Tab. 4. Na materiálech bylo provedeno hodnocení mikrostruktury a chemického složení viz Obr 53 a Tab. 5. Chemické složení bylo analyzováno na skenovacím elektronovém mikroskopu s vysokým rozlišením a EDS analyzátozem (JEOL JSM-7600F High Resolution Scanning Electron Microscope with EDS analysers (Oxford INCA Energy 250, UK), Japan). Pro studium mikrostruktury byly připravené metalografické výbrusy, které byly zkoumané pomocí elektronového mikroskopu JEOL JSM 7600F. [107, 108]

**Tab. 4** Nominální chemické složení

Označení slitiny	Prvek, hmotnostní % (zbytek Al)					
	Mg	Si	Mn	Fe	Ti(+Zr)	Cu(+Zn)
<b>M3</b>	6.0	0.4	0.6	0.3	0.1	0.1
<b>MS1</b>	7.0	1.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>MS2</b>	7.0	2.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>M59</b>	5.0	2.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>MS3</b>	7.0	3.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>MS4</b>	7.0	4.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>MS5</b>	7.0	5.0	0.6	0.02	0.1	0.1
<b>S1</b>	0.3	6.9	0.02	0.2	0.1	0.1
<b>S2</b>	0.1	12	0.5	0.5	0.1	0.1

**Tab. 5** Chemické složení získané metodou EDX

<i>Označení slitiny</i>	<i>Prvek, hmotnostní % (zbytek Al)</i>				
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>M3</i>	5.4	-	0.1	0.6	<0.1
<i>MS1</i>	5.8	0.2	0.2	0.5	<0.1
<i>MS2</i>	3.5	0.2	0.2	0.5	<0.1
<i>MS3</i>	2.5	0.3	0.3	0.5	<0.1
<i>MS4</i>	2.1	0.5	0.3	0.4	<0.1
<i>MS5</i>	1.5	1.1	0.3	0.4	<0.1
<i>S1</i>	0.4	1.2	<0.1	<0.1	<0.1
<i>S2</i>	0.2	1.4	0.1	<0.1	<0.1



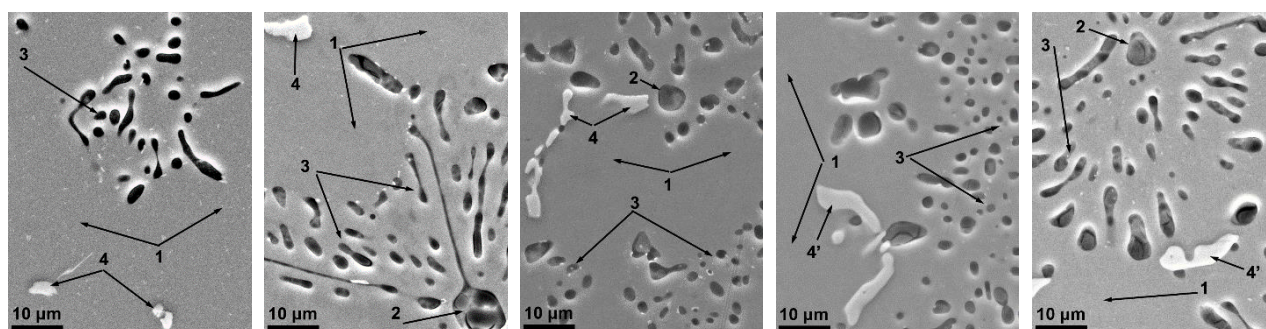
*a) MS1*

*b) MS2*

*c) MS3*

*d) MS4*

*e) MS5*



*f) MS1 (TZ)*

*g) MS2 (TZ)*

*h) MS3 (TZ)*

*i) MS4 (TZ)*

*j) MS5 (TZ)*

**Obr. 53:** Mikrostruktura odlitých slitin: a) - e) stav po odlití, f) - j) stav po tepel-

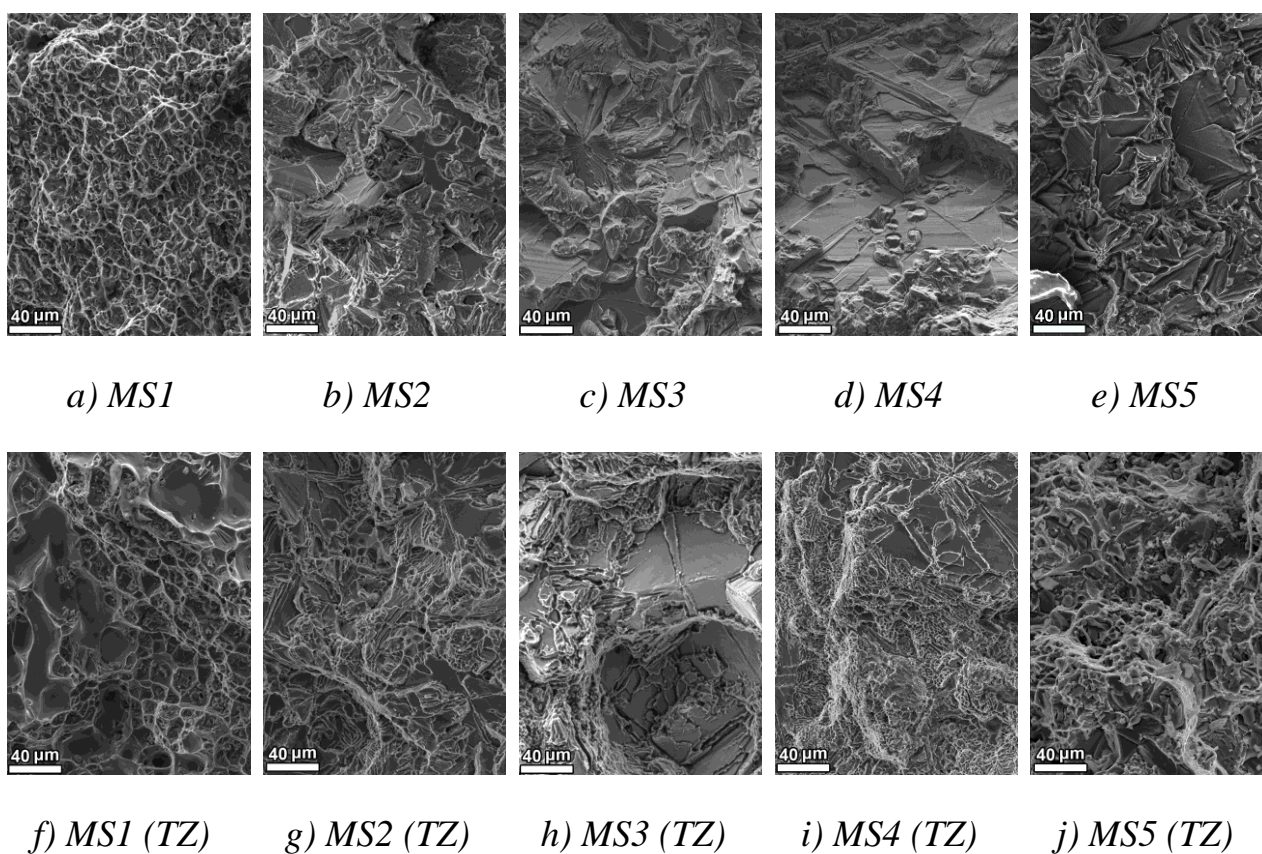


*ném zpracování.*

Označené elementy mikrostruktury na Obr. 53 jsou:

1. Matrice  $\alpha$ -Al (světlé oblasti);
2. Primární krystaly  $Mg_2Si$  (tmavé hranaté);
3. Eutektikum Al- $Mg_2Si$  (tmavošedé oblasti);
4. Fáze Mn  $Al_6(Mn,Fe)$ ,  $\alpha-Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ ;
- 4'. Fáze Mn-Si  $\beta-Al_5(Mn,Fe)Si$ ;
5. Fáze Si-Mn  $\delta-Al_4Si_2(Mn,Fe)$ .

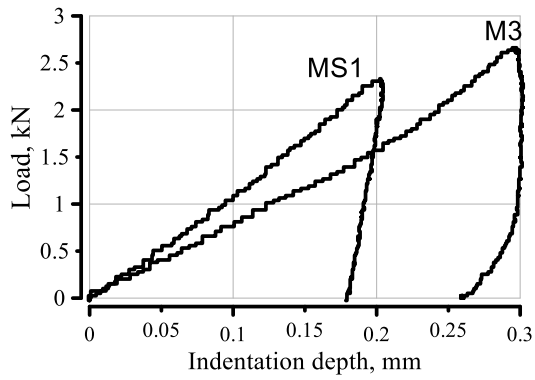
Obr. 54 znázorňuje fraktografii studovaných materiálů v odlitém stavu a po tepelném zpracování.



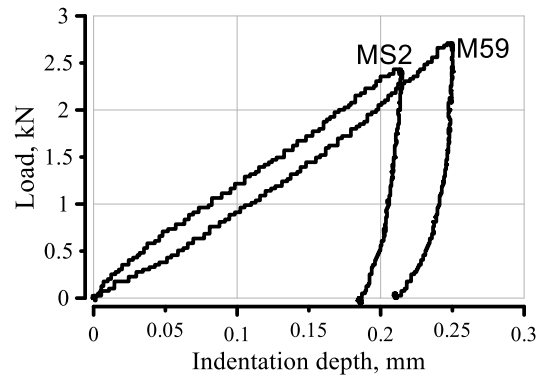
**Obr. 54:** Fraktografie odlitých slitin: a) - e) stav po odlití f) - j) stav po tepelném zpracování

Z uvedených lomových ploch hliníkových slitin je patrna rozdílnost v porušování materiálu. Převážně se jednalo o tvárné porušení s lokalitami štěpného porušení

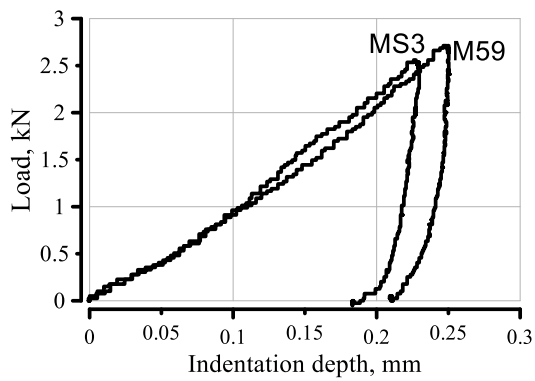
v oblastech, výskytu intermediárních fází. Charakter mikrostruktury a množství dalších fází se projeví v konečném důsledku i v materiálových vlastnostech hliníkových slitin viz Obr. 55. [107, 111, 113]



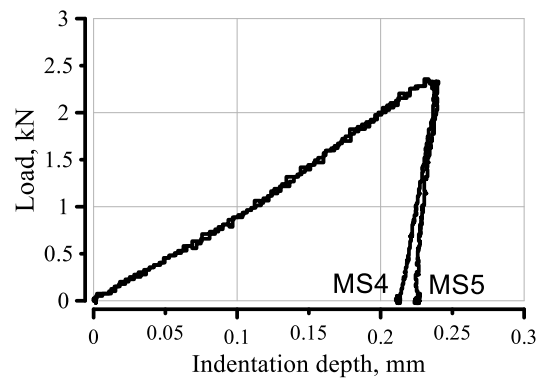
a)



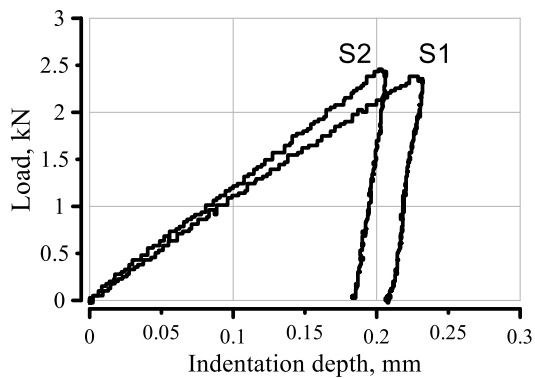
b)



c)



d)



e)

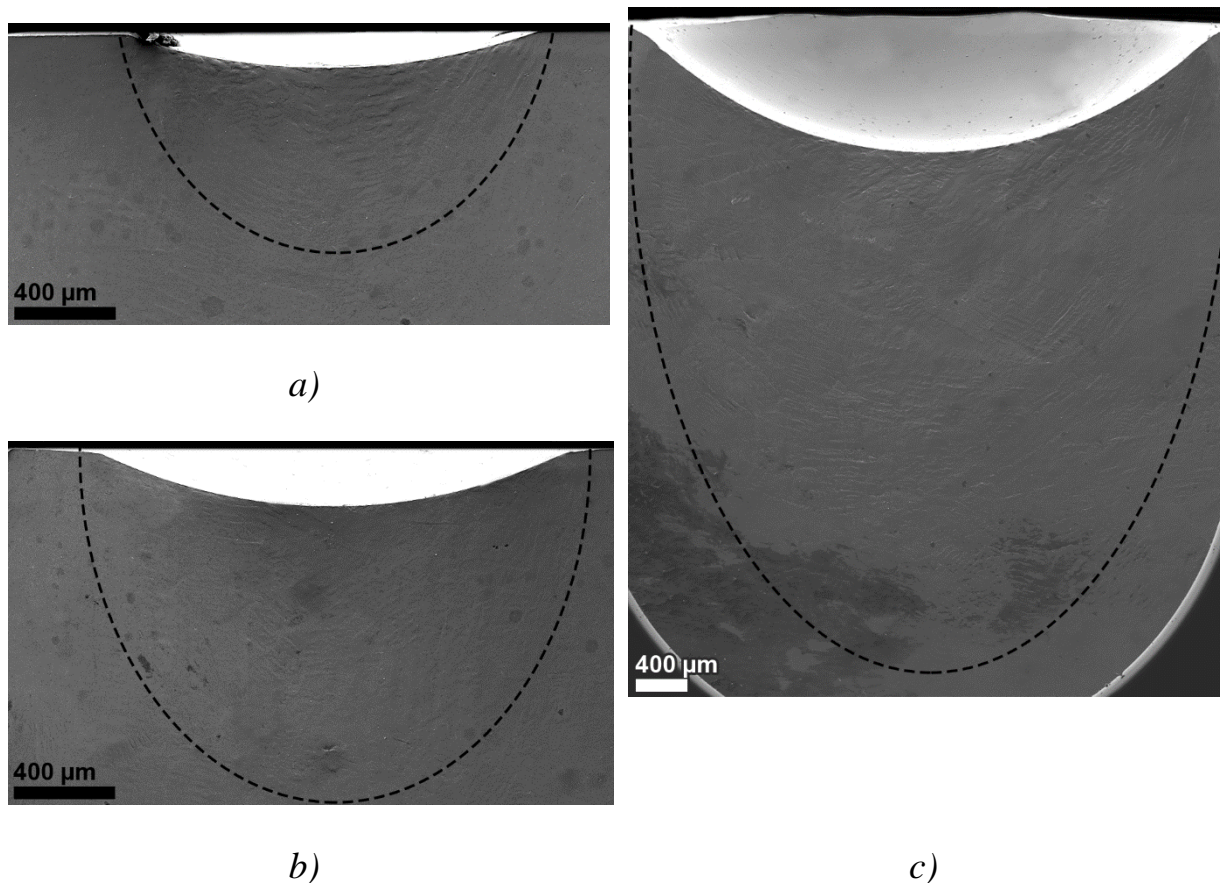
**Obr. 55:** Indentační křivky odlitých hliníkových slitin

**Tab. 6** Mechanické vlastnosti získané primární metodologií a standartními testy

Stav	Metoda	S1	S2	M3	M59	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	
TZ 570°C	1 h, Základní po odlití	HB, ABI	72.0	84.0	65.0	82.3	83.6	83.9	89.4	70.0	66.2
		HB*	75.0	80.0	65.0	81.0	84.0	86.8	87.8	71.1	69.0
		$\sigma_{sm}$ , %	4.0	5.0	0.0	1.6	0.5	3.3	1.8	1.5	4.1
		Rp0.2, ABI	180. 2	137. 0	145. 6	166. 4	194. 1	134. 4	223. 9	145. 5	124. 8
		Rp0.2* $\sigma_{sm}$ , %	182. 5	140. 0	130. 0	155. 5	169. 4	155. 3	203. 5	137. 9	123. 5
		$\sigma_{sm}$ , %	1,3	2,1	12,0	7,0	14,6	13,5	10,0	5,5	1,1
		Rm, ABI	201. 6	236. 0	179. 5	226. 1	229. 5	230. 5	245. 6	192. 4	182. 0
		Rm* $\sigma_{sm}$ , %	205. 1	240. 0	180. 0	219. 9	199. 4	223. 1	239. 8	185. 6	163. 5
		$\sigma_{sm}$ , %	1.7	1.7	0.3	2.8	15.1	3.3	2.4	3.7	11.3
TZ 570°C	1 h,	HB, ABI	-	-	-	73.0	79.1	70.5	73.1	71.1	78.7
		HB*	-	-	-	71.0	77.5	69.6	73.2	71.1	75.5
		$\sigma_{sm}$ , %	-	-	-	2.8	2.1	1.3	0.1	0.0	4.2
TZ (1 h, 570°C + 1.5 h, 175 °C)		HB, ABI	90.0	-	-	93.6	83.6	80.9	99.5	100. 4	107. 3
		HB*	90.0	-	-	96.1	82.2	79.6	100. 7	101. 9	113. 7
		$\sigma_{sm}$ , %	0.0	-	-	2,6	1,7	1,6	1,2	1,5	5,6
		Rp0.2, ABI	194. 1	-	-	155. 4	194. 1	145. 6	179. 2	224. 0	233. 0
		Rp0.2* $\sigma_{sm}$ , %	171. 9	-	-	175. 3	174. 2	164. 2	200. 6	227. 1	200. 8
		$\sigma_{sm}$ , %	12,9	-	-	11.4	11.4	11.3	10.7	1.4	16.0

	$R_m, ABI$	243.	-	-	257.	229.	222.	273.	275.	294.
		0			1	7	4	1	8	7
	$R_m^*$	256.	-	-	256.	226.	222.	262.	264.	280.
		9			3	2	1	4	9	7
	$\sigma_{sm}, \%$	5.4	-	-	0.3	1.5	0.1	4.1	49.1	5.0
<i>*Standartní testy</i>										

Pro ověření hodnoty koeficientu stlačení „c“ bylo provedeno studium zplasti-  
zované zóny pod indentačním vtiskem při různém zatížení pomocí elektronové-  
ho mikroskopu. Výpočet vycházel ze změny deformované oblasti. Na Obr. 56  
jsou pro příklad uvedeny deformované oblasti slitiny S2. Hodnoty z výpočtu  
koeficientu stlačení „c“ popisuje Tab. 7. [110]



**Obr. 56:** Charakter deformovaných oblastí pod indentačním vtiskem slitiny S2  
při různém zatížení: a) zatížení 1250 N, b) zatížení 2500 N, c) zatížení 7500 N

Z uvedeného zobrazení oblastí, pod zatížením, hliníkové slitiny indentorem, je patrná změna plasticky přetvořených oblastí pod vtiskem. Plastická zóna se zvětšuje do hloubky směrem kolmým na vtisk do zkoušeného materiálu. Vzhledem k tomu, že pro ověření odezvy materiálu na velikost zatížení byla zvolena hliníková slitina, lze předpokládat, že na charakter vytvořené plastické zóny bude mít vliv i velikost a tvar zrn.

**Tab. 7** *Deformované oblasti slitiny S2 s vypočítaným koeficientem stlačení*

<i>Zatížení, N</i>	<i>7500</i>	<i>2500</i>	<i>1250</i>
<i>Plocha, mm<sup>2</sup></i>	<i>15.161</i>	<i>1.924</i>	<i>0.997</i>
<i>Hodnota koeficientu stlačení „c“</i>	<i>2.627 (mezi 7500 N a 2500 N)</i>		
	<i>2.534 (mezi 7500 N a 1250 N)</i>		

## **12.Návrh řešení výpočtové úlohy pomocí metody konečných prvků (MKP)**

Jedná se o úlohu matematického zpracování parametru vtisku indentoru do povrchu elasticko – plastického materiálu.

V práci [90] je uveden přehled dostupných řešení MKP úlohy vtlačování indentoru. V roce 2004 vyšel článek [91], který je dosud příručkou pro provádění experimentu metodami vtlačování indentoru.

Je možné s jistotou říci, že v současné době existují data MKP analýzy pro všechny typy běžně používaných materiálů. MKP řešení jsou potřebné pro upřesnění indentačních výsledků prováděných na nano, mikro a makro úrovni, které jsou zpravidla vázána na konkrétní experimentální zařízení a podmínky testů. Hodně autorů používá pro modelování koncepci pevného (nestlačitelného) indentoru, která není vždy přesná, ale využívá se ve všeobecnosti proto, že výrazně usnadňuje výpočet. Na moderním trhu existuje široká nabídka testovacích zařízení, které v oblasti mikro a nano – analýz implementují tyto metody. Bez ohledu na všechny výše popsané výhody zařízení pro analýzy v mikro a nano měřítku jsou to zkušební komplexy, jejichž celkové rozměry jsou často poměrně velké a jsou nákladné (odhadují se na desítky a stovky tisíc dolarů).

V současnosti již existuje řada základních požadavků, které je nutné dodržet při návrhu MKP modelů pro vtlačování sférického indentoru:

1. Úloha vtlačování je kontaktní a vyžaduje proto kontaktní konečné prvky.
2. Vzhledem k osově symetrii úloha může být značně zjednodušena pomocí osově symetrických prvků.
3. Vzorek materiálu musí být elasticko - plastický a zároveň, pokud je to možné, měl by odpovídat reálnému materiálu s hodnotami mechanických vlastností.
4. Indentor se musí deformovat.
5. Zatížení je aplikované postupně.

6. Plastické chování materiálu při vtláčování předpokládá specifické chování vzorku v kontaktní zóně, které se nazývá „pile - up“ nebo „sink - in“.
7. V kontaktní zóně, v závislosti na výkonu počítače, musí být síť konečných prvků zjemněna (jemná diskretizace).

Na základě uvedených poznatků o výpočtovém modelování (VM), bude následně úloha řešena podle vybraného MKP programu ANSYS. Vzhledem k tomu, že tato úloha řeší proces vtláčování sférického indentoru do elasticko - plastického materiálu, jsou zde použity osově symetrické (PLANE42) a kontaktní prvky (TARGE169, CONTA175). Vzorek materiálu byl stanoven jako izotropní, s použitím skutečných hodnot mechanických vlastností získaných ze statické zkoušky v tahu.

Výpočty byly provedeny pro hliníkovou slitinu AlCu4PbMg při aplikaci různých modelů vtláčování. První klasický model, zahrnuje náběh na maximální hodnotu zatížení, vydrž 10 sekund a odlehčení zpět na nulovou hodnotu. Druhý model je cyklický a dovoluje nastavit určitý počet cyklů zatížení – odlehčení. Pro tuto hliníkovou slitinu byly vybrány 3 cykly, rozdíl mezi maximálními hodnotami zatížení v každém z těchto cyklů se rovnal třetině maximálního zatížení z klasického modelu. Klasický model byl nastavený podle dat stanovených normou pro Brinellovou zkoušku tvrdosti.

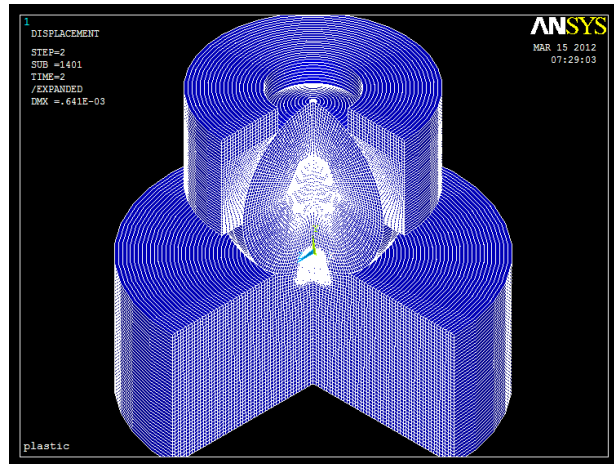
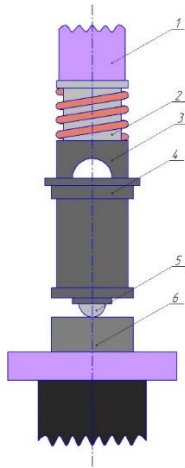
MKP model v programu ANSYS Multiphysics, je znázorněn na Obr. 59. Důležitou podmínkou modelu je, že výpočet se provádí pro indentor upnutý ve specifickém držáku, což v literárních rešerších bylo zaznamenáno pouze u dvou prací [48, 67]. Takové uspořádání provazuje výpočet s konkrétním zařízením, které implementuje průběh vtláčování koulového indentoru [101, 102, 103, 104, 105, 106, 109, 112, 116] a zároveň umožňuje záznam závislostí "zatížení - hloubka vtláčování" v automatickém režimu.

Schéma zařízení je znázorněna na Obr. 57. Měřicí systém zahrnuje: uzel aplikací zatížení 1, speciální adaptér 2, pouzdro 3, senzor hloubky vtláčování inden-



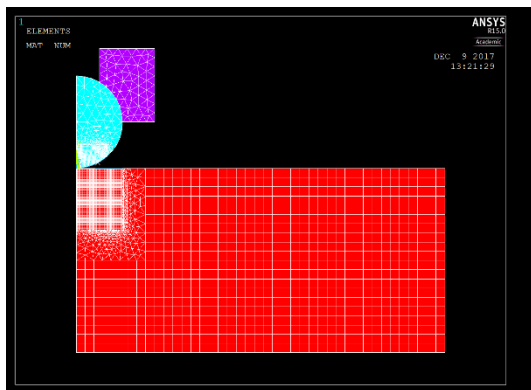
toru 4, kuličkový indentor 5, vzorek 6.

Na Obr. 58 je znázorněn osový symetrický pohled na MKP model. Síť konečných prvků a výsledky výpočtů v grafické interpretaci jsou uvedeny na Obr. 59 – 60. Obr. 61 – 63 ukazuje příklad použití dat z indentačního experimentu MKP pro sestavení indentační křivky a závislosti napětí – deformace. [115]

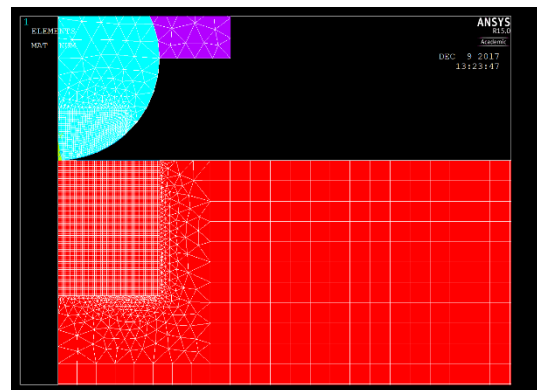


*Obr. 57: Schéma testovacího zařízení*

*Obr. 58: Osový symetrický pohled na MKP model*

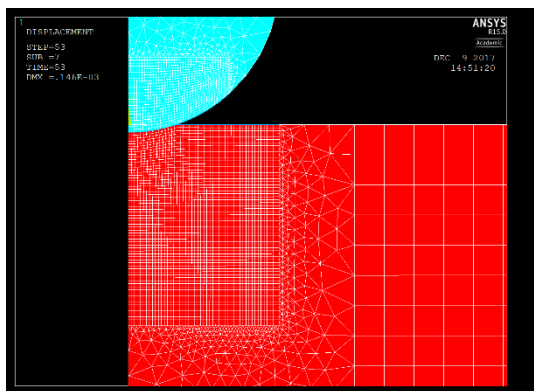


*a) MKP model*

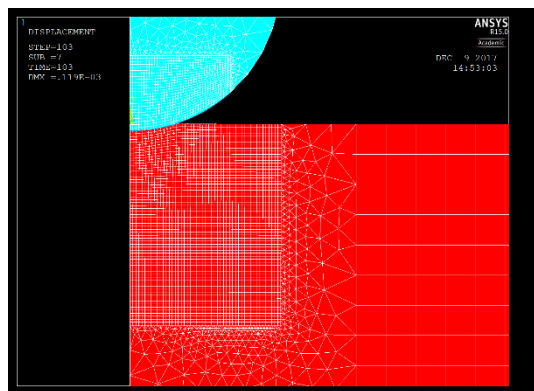


*b) MKP model detail*

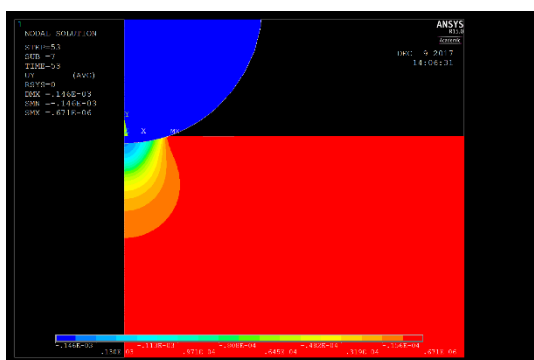




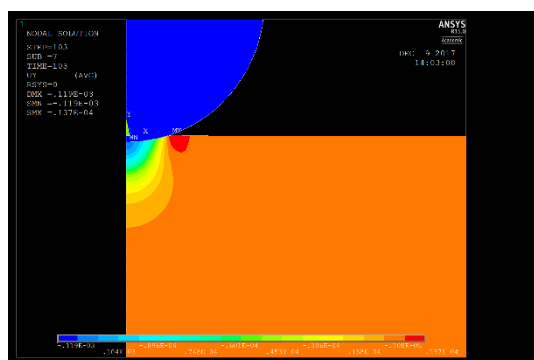
c) Posunutí ve směru osy Y při maximální hodnotě zatížení v 2500 N



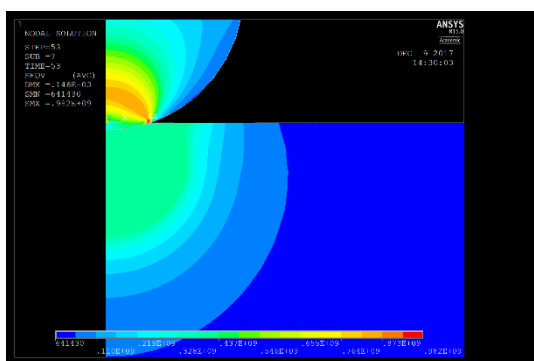
d) Posunutí ve směru osy Y po odlehčení



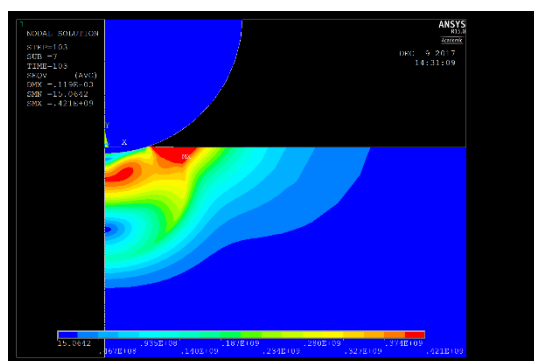
e) Napětí (Von-Mizes) při maximální hodnotě zatížení v 2500 N



f) Napětí (Von-Mizes) po odlehčení

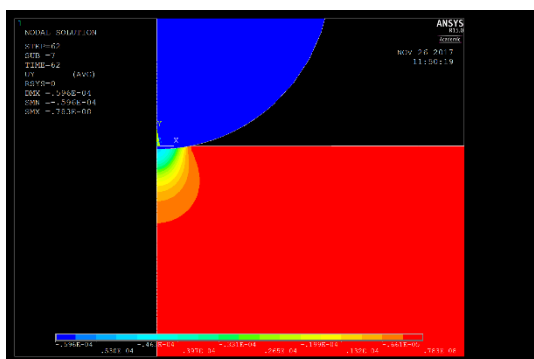


g) Napětí (Von-Mizes) při maximální hodnotě zatížení v 2500 N

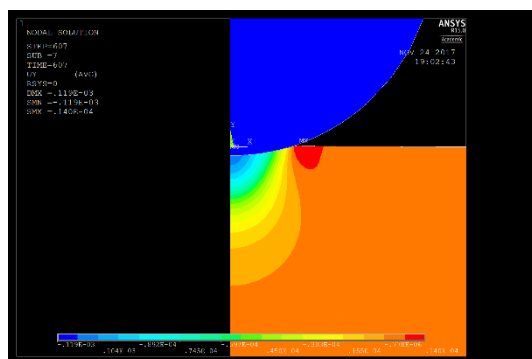


h) Napětí (Von-Mizes) po odlehčení

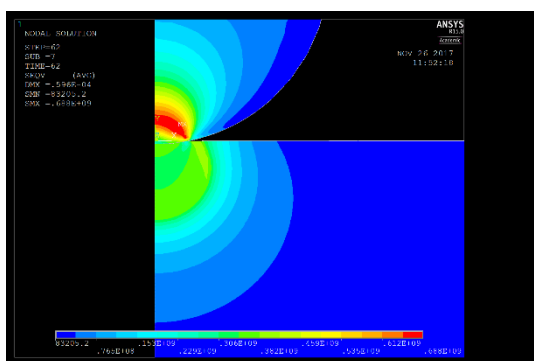




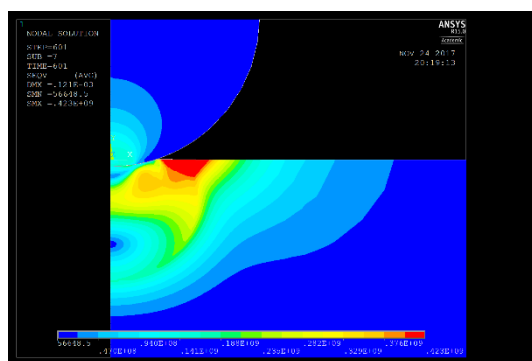
a) Posunutí ve směru osy Y po odlehčení 1 cyklus



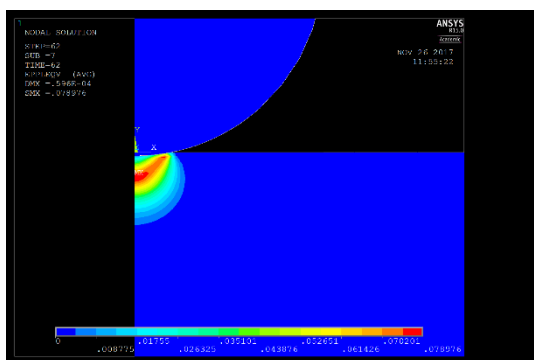
b) Posunutí ve směru Y po odlehčení 3 cyklus



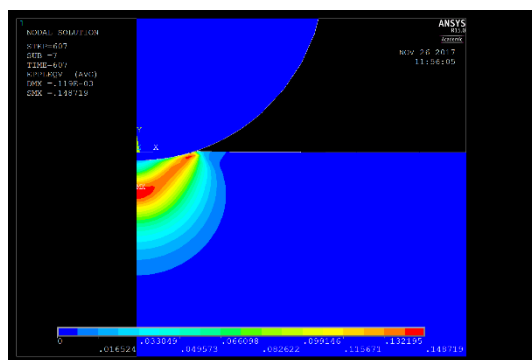
c) Napětí (Von-Mizes) po odlehčení 1 cyklus



d) Napětí (Von-Mizes) po odlehčení 3 cyklus

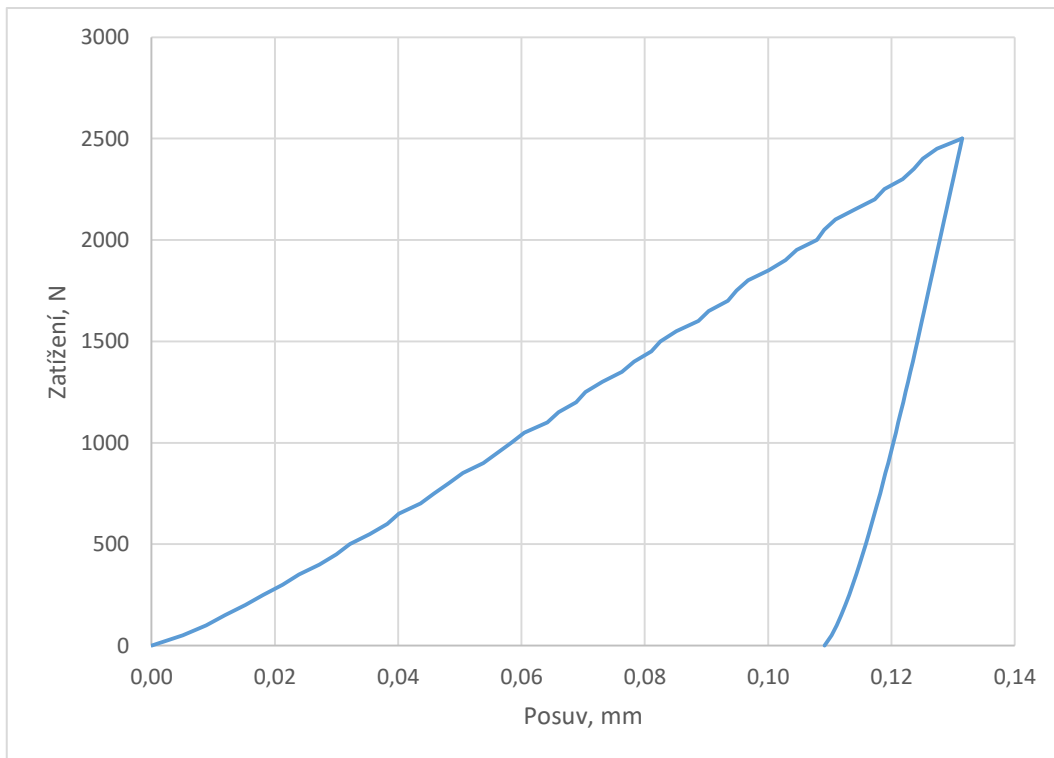


e) Plastická deformace (Von-Mizes) po odlehčení 1 cyklus

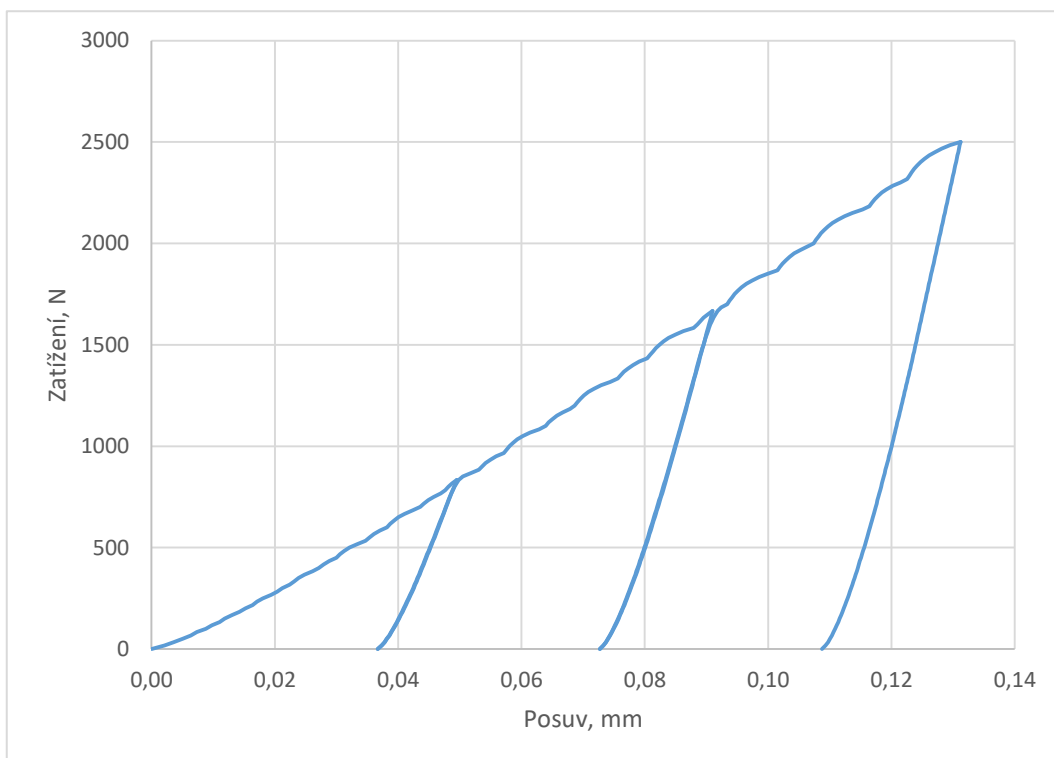


f) Plastická deformace (Von-Mizes) po odlehčení 3 cyklus

**Obr. 60:** Grafická interpretace výsledků výpočtů MKP (cyklický režim)

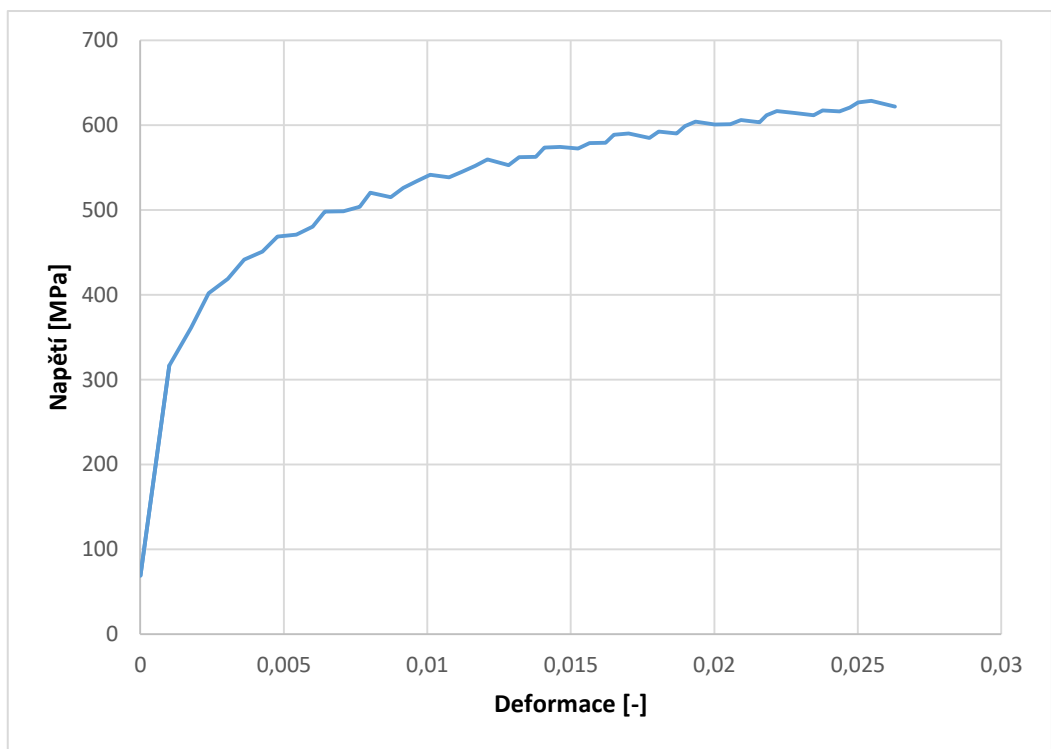


a) Indentační křivka z MKP výpočtu

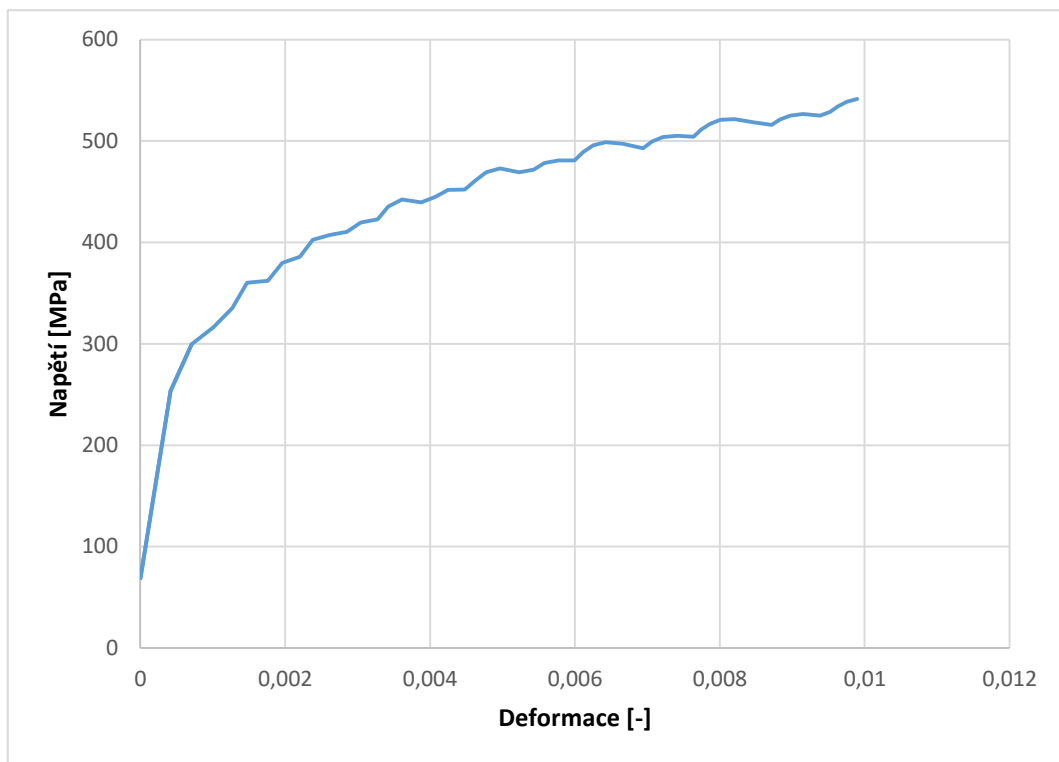


b) Indentační křivka z MKP výpočtu cyklický režim

**Obr. 61:** Indentační křivky na základě dat z MKP výpočtu

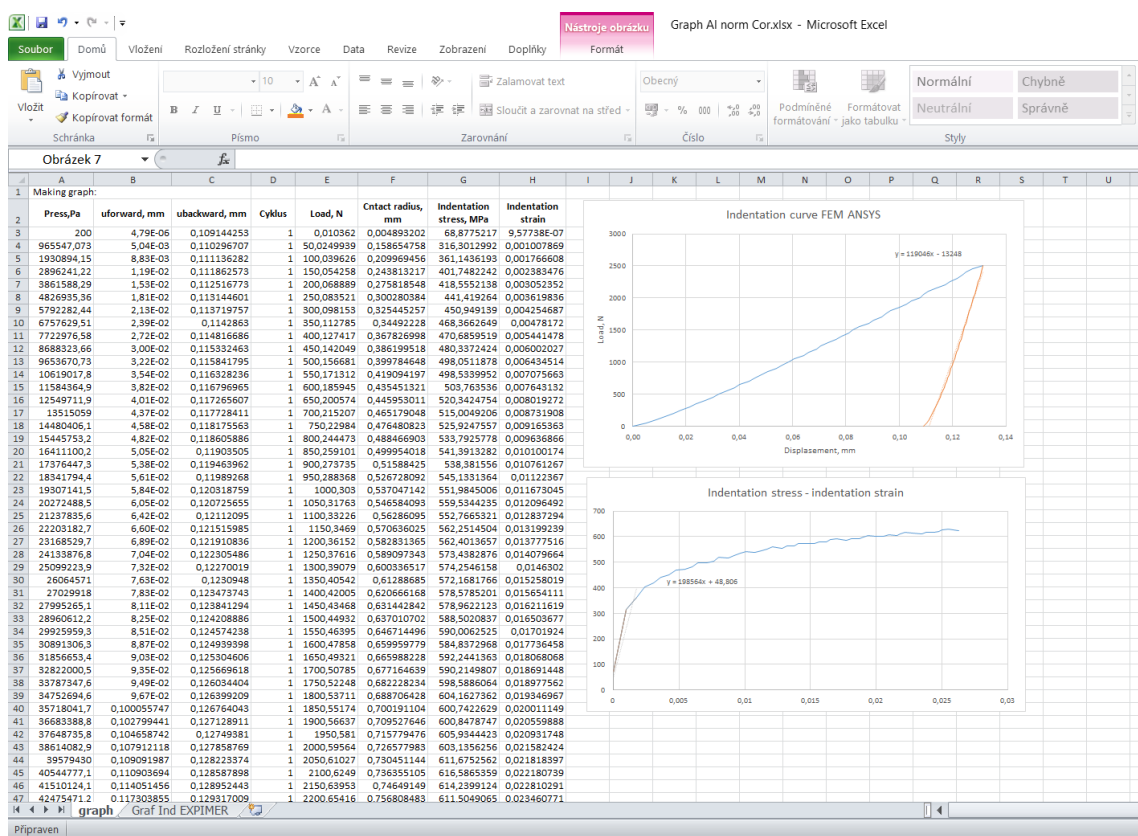


a) *Přepočítaná křivka napětí-deformace pomocí navržené metodologie*



b) *Přepočítaná křivka napětí-deformace při cyklickém režimu pomocí navržené metodologie*

**Obr. 62:** *Přepočítané křivky napětí-deformace pomocí navržené metodologie*



Obr. 63: Příklad výpočtu v Excelu

Uplatnění MKP při výpočtu jednotlivých napětí přehledně udává charakter zatížení materiálu a jeho odezvu jak těsně pod povrchem tak i v objemu materiálu. Indentační křivky na základě MKP výpočtů zobrazují klasický a cyklický režim zatěžování. Každý materiál má specifické chování na různý charakter zatěžování (statické a cyklické) co se zobrazí v charakteru napjatosti dané struktury.

Pro ověření navržené metody MKP byly v následujícím vybrané různé typy materiálů, u kterých lze dokumentovat mechanické vlastnosti získané metodikou instrumentovaného vtlačování.

Analýza MKP byla provedena za účelem zkoumání elastické, elasto-plastické a plastické deformace, která se projevuje během indentačního procesu. Pomocí navrženého postupu indentační data pak byly přepočítané na hodnoty napětí a deformace. Model nezahrnuje vliv dislokací a proto se dosažené hodnoty mohou

lišit od skutečných hodnot ze zkoušek. Posunutí spodního vrcholu indentoru v ose symetrie bylo ve výpočtech použito za indentační hloubku. Zatížení bylo aplikováno postupně do maximální hodnoty u všech režimů.

### 13. Popis experimentálního materiálu

Materiály vybrané pro provádění experimentů se vyznačují rozdílností mikrostruktur, chemickým složením a materiálovými vlastnostmi. Základní vlastnosti deklarované výrobcem v atestech (viz Příloha) souhrnně popisují Tab. 8 a Tab. 9.

**Tab. 8** Vybrané materiály pro ověření navržené metodologie

<i>Materiál</i>	<i>Označení</i>
<i>Slitina hliníku</i>	<i>AlCu4PbMg, EN AW-2030 T3, 3.1645</i>
<i>Měď</i>	<i>Cu-ETP, 2.006</i>
<i>Bronz</i>	<i>CuSn8, 2.1030</i>
<i>Mosaz</i>	<i>CuZn40Pb2, 2.0402</i>
<i>Ocel 1</i>	<i>S235JRC, 1.0122</i>
<i>Ocel 2</i>	<i>S355J2, 1.0577</i>
<i>Ocel 3</i>	<i>11SMn30, 1.0715</i>
<i>Ocel 4</i>	<i>E335GC, 1.0543</i>

**Tab. 9** Základní vlastnosti použitých materiálů

<i>Materiál</i>	<i>Modul pružnosti E [MPa]</i>	<i>Mez pevnosti R<sub>m</sub> [MPa]</i>	<i>Mez kluzu R<sub>p0,2</sub> [MPa]</i>	<i>Tvrdość HBW [-]</i>	<i>Poissonovo číslo ν [-]</i>
<i>AlCu4PbMg</i>	<i>72 500</i>	<i>470</i>	<i>410</i>	<i>-</i>	<i>0,32</i>
<i>Cu-ETP</i>	<i>127 000</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,33</i>
<i>CuSn8</i>	<i>115 000</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>169</i>	<i>0,34</i>
<i>CuZn40Pb2</i>	<i>96 000</i>	<i>430</i>	<i>220</i>	<i>153</i>	<i>0,33</i>
<i>S235JRC</i>	<i>210 000</i>	<i>640</i>	<i>590</i>	<i>185</i>	<i>0,30</i>
<i>S355J2</i>	<i>210 000</i>	<i>725</i>	<i>650</i>	<i>-</i>	<i>0,30</i>

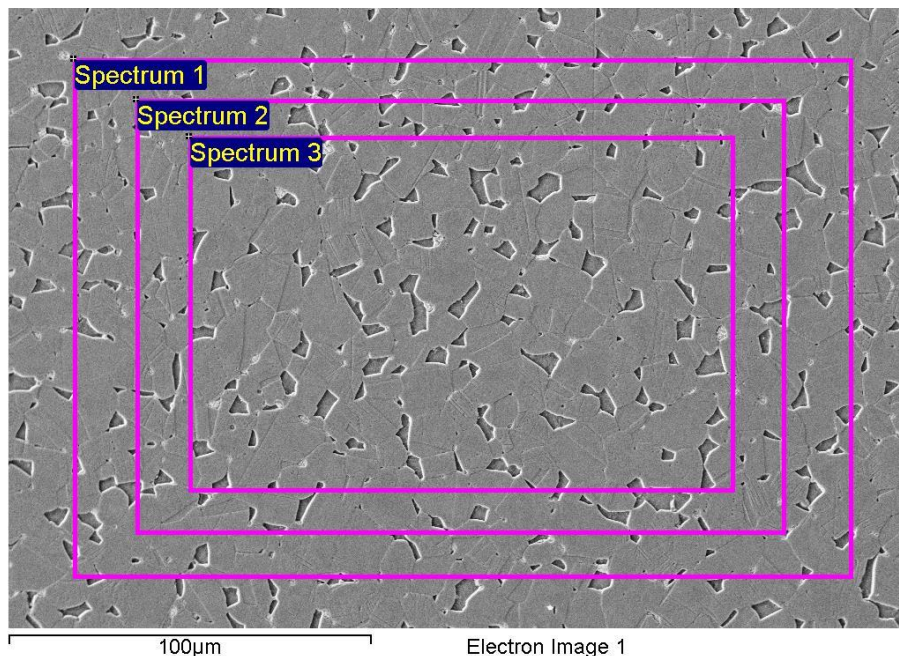


<i>11SMn30</i>	<i>210 000</i>	<i>583</i>	<i>540</i>	<i>177</i>	<i>0,30</i>
<i>E335GC</i>	<i>210 000</i>	<i>767</i>	<i>652</i>	-	<i>0,30</i>

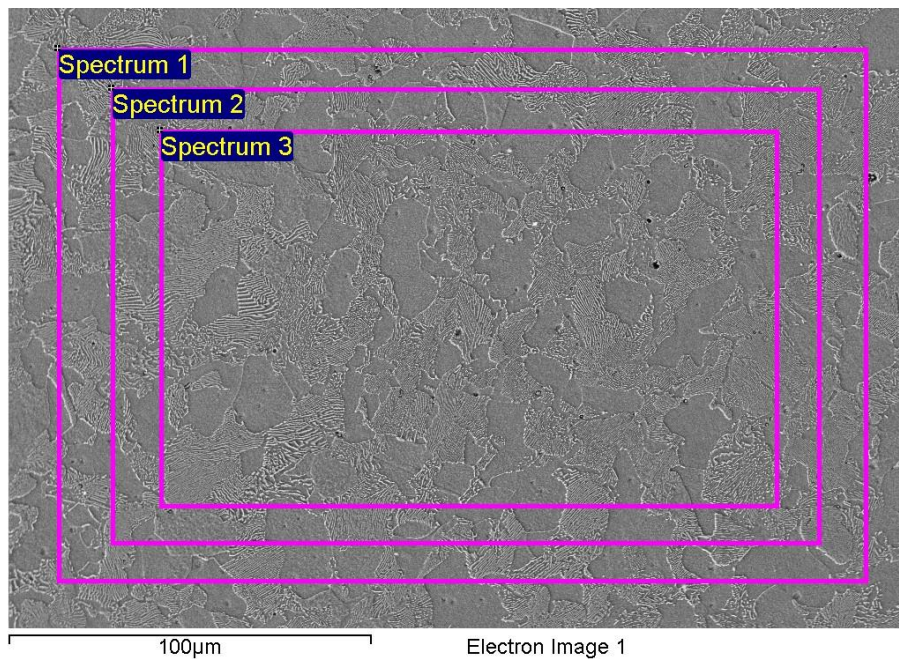
Prezentované hodnoty deklarovaných materiálových vlastností byly v dalším porovnány s hodnotami získanými z měřicího zařízení EXPIMER a s výsledky ze standartních materiálových zkoušek.

## 14. Chemické složení materiálů

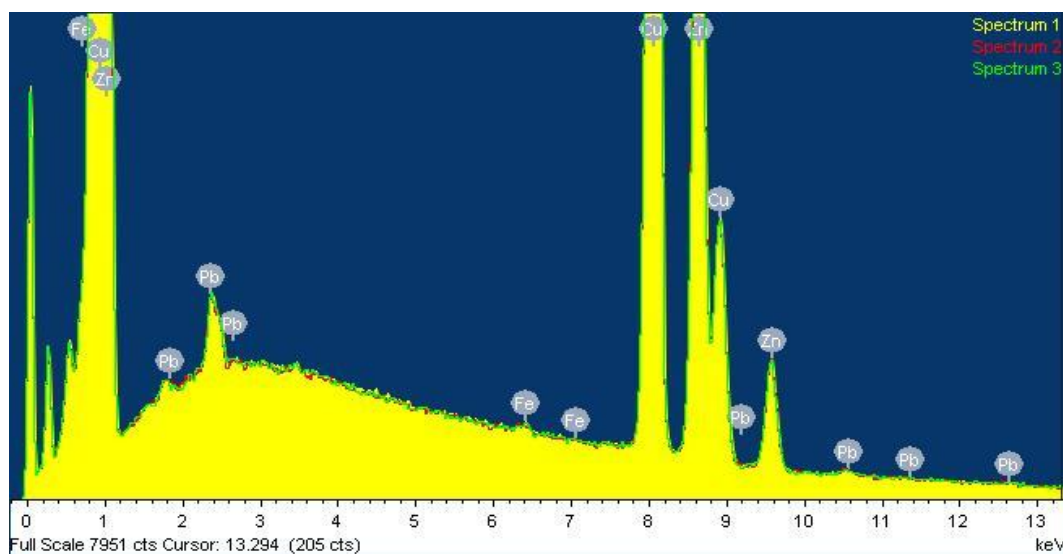
Mikrostrukturní zkoumání vychází z chemického složení a bylo provedeno s použitím metody EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) pomocí elektronového mikroskopu JEOL JSM 7600F. Analýza chemického složení byla provedena v příčném řezu na leptaných vzorcích. Bylo použito zvětšení 500× s urychlovacím napětím elektronů 15 kV. Plošná analýza byla provedena vždy na třech místech způsobem, který je pro CuZn40Pb2 znázorněn na Obr. 64 a pro ocel E335GC na Obr. 65. Spektra vybuzeného záření z měření CuZn40Pb2 jsou patrná na Obr. 66.



**Obr. 64:** Oblasti chemické analýzy CuZn40Pb2 na elektronovém mikroskopu



*Obr. 65: Oblasti chemické analýzy oceli E335GC na elektronovém mikroskopu*



*Obr. 66: Spektrum EDS slitiny CuZn40Pb2*

V Tab. 10 jsou uvedeny zjištěné hodnoty chemického složení pro slitinu CuZn40Pb2. Získané hodnoty chemického složení (tři měření), byly zprůměrovány a byla spočítána směrodatná odchylka  $\sigma_{sm}$  z výsledků měření pro jednotlivé chemické prvky.

Tab. 10 Chemické složení pro CuZn40Pb2.

<i>Prvek</i>	<i>Cu</i> [hm. %]	<i>Zn</i> [hm. %]	<i>Pb</i> [hm. %]	<i>Fe</i> [hm. %]
<i>Spectrum 1</i>	60,81	37,55	1,53	0,11
<i>Spectrum 2</i>	60,91	37,50	1,50	0,09
<i>Spectrum 3</i>	60,73	37,67	1,46	0,14
<i>průměr</i>	<b>60,82</b>	<b>37,57</b>	<b>1,50</b>	<b>0,11</b>
$\sigma_{sm}$	0,09	0,09	0,04	0,03

V Tab. 11 je uvedeno chemické složení vybraných neželezných kovů, získané z materiálových listů (viz Příloha) a z chemické analýzy provedené stejným způsobem, jak to bylo popsáno pro případ CuZn40Pb2. V Tab. 12 jsou zaznamenané hodnoty chemického složení ocelí z elektronového mikroskopu. Vzhledem k tomu, že je chemické složení metodou EDS je zjišťováno vždy z jedné velmi malé lokality na vzorku, lze tuto analýzu charakterizovat jako orientační. Obsah uhlíku není přesně určován z toho důvodu, že jeho měření bývá zatíženo větší chybou.

**Tab. 11** Chemické složení neželezných kovů z materiálových listů a změřené metodou EDS

Prvek	AlCu4PbMg		Cu-ETP		CuSn8		CuZn40Pb2	
	mat. list	změřené	mat. list	změřené	mat. list	změřené	mat. list	změřené
Cu [hm. %]	3,9	5,10	min.9 9,9	98,78	zbytek	91,42	58,34	60,82
Pb [hm. %]	0,92	0,39	max. 0,05	0,07	0,015	0,03	1,76	1,5
Sn [hm. %]	-	-	-	-	8,01	8,20	0,24	-
P [hm. %]	-	-	-	-	0,3	0,37	0,005	-
O [hm. %]	-	-	max. 0,06	1,17	-	-	-	-
Al [hm. %]	zbytek	91,88	-	-	-	-	0,019	-
Mg [hm. %]	0,74	0,63	-	-	-	-	-	-
Zn [hm. %]	0,35	0,59	-	-	0,071	-	zbytek	37,57
Mn [hm. %]	0,68	0,57	-	-	-	-	-	-
Fe [hm. %]	0,36	0,29	-	-	0,014	-	0,3	0,11
Si [hm. %]	0,57	0,46	-	-	-	-	0,043	-
Cr [hm. %]	0,021	0,03	-	-	-	-	-	-
Ti [hm. %]	0,076	0,06	-	-	-	-	-	-
Bi [hm. %]	0,02	-	-	-	-	-	0,002	-
Ni [hm. %]	-	-	-	-	0,001	-	0,22	-
S [hm. %]	-	-	-	-	-	-	0,002	-
Sb [hm. %]	-	-	-	-	-	-	0,005	-

Ze zjištěných analýz chemického složení pro neželezné kovy je patrné, že je poměrně dobrá shoda s údaji v materiálových listech. Materiál AlCu4PbMg se liší v obsahu olova, v porovnání s materiálovými listy a u materiálu Cu-ETP bylo naměřeno velké množství kyslíku, které pravděpodobně zůstalo z metalografické přípravy (při leptání) vzorku.

**Tab. 12** Chemické složení ocelí z materiálových listů a změřené metodou EDS

Prvek	S235JRC		S355J2		11SMn30		E335GC	
	mat. list	změřené	mat. list	změřené	mat. list	změřené	mat. list	změřené
Fe [hm. %]	Zbytek	99,34	zbytek	96,82	zbytek	96,02	zbytek	97,48
C [hm. %]	0,13	-	0,19	-	0,11	-	0,48	-
Mn [hm. %]	0,6	0,47	1,4	1,33	1,19	1,50	0,74	0,83
Cu [hm. %]	0,24	-	0,04	0,97	-	1,35	-	1,04
Si [hm. %]	0,22	0,12	0,24	-	0,02	0,32	0,28	0,34
P [hm. %]	0,03 5	0,04	0,007	0,04	0,049	0,07	0,018	0,05
S [hm. %]	0,02 9	0,03	0,007	0,02	0,28	0,59	0,005	0,06
N [hm. %]	0,00 9	-	-	-	-	-	0,0037	-
Cr [hm. %]	0,18	-	-	-	-	-	-	0,21
Al [hm. %]	0,00 9	-	0,033	-	-	-	-	-
Ni [hm. %]	0,09	-	-	-	-	-	-	-
Mo [hm. %]	0,03	-	-	-	-	-	-	-

U ocelí se chemické složení také velmi dobře shoduje s údaji v materiálových listech. Jen ocel 11SMn30 obsahovala podle EDS určitý podíl mědi a mírně vyšší obsah síry, než uvádí materiálový list. U oceli E335GC byly určeny další prvky (Cu, Cr). Analýzou naměřených dat bylo zjištěno, že se tyto prvky v materiálu opravdu vyskytovaly a jejich výsledky nebyly příliš závislé na vyhodnocení obsahu uhlíku a kyslíku.



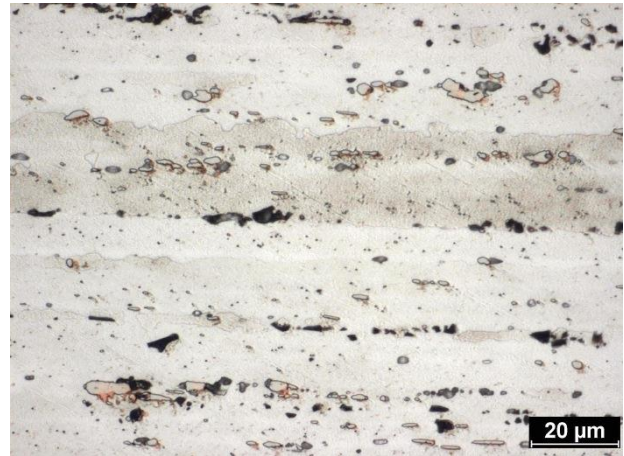
## 15. Mikrostruktury zkušebních materiálů

Hodnocení mikrostruktur bylo provedeno pomocí mikroskopu Zeiss Neophot 32. Každý materiál byl mikroskopicky studovaný v příčném a podélném řezu v přehledovém měřítku (při zvětšení 100×) a v detailu (při zvětšení 500×).

Na Obr. 67 – 70 jsou zobrazené mikrostruktury AlCu4PbMg. Na metalograficky připraveném vzorku Obr. 67, v podélném řezu je patrná řádkovitost intermediárních fází. Tmavé zrna odpovídají fázím s větším obsahem olova, Obr. 68 zobrazuje detail této struktury. V příčném řezu (Obr. 69 a Obr. 70) je struktura rovnoměrná.



*Obr. 67: AlCu4PbMg, podélný řez.*



*Obr. 68: Detail mikrostruktury Al-Cu4PbMg, podélný řez.*



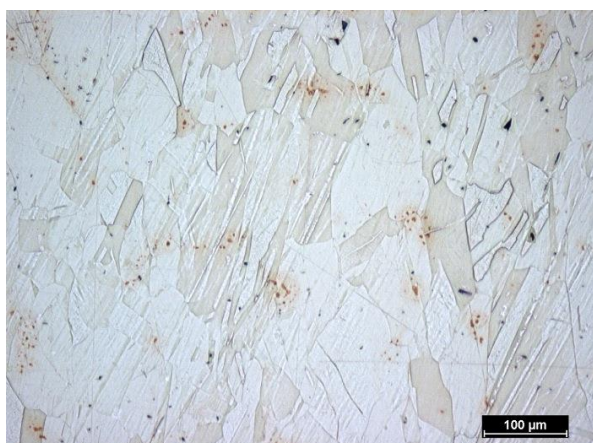
*Obr. 69: AlCu4PbMg, příčný řez.*



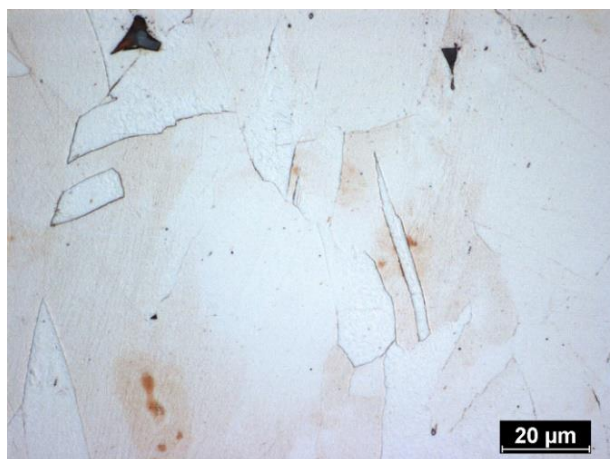
*Obr. 70: Detail mikrostruktury Al-Cu4PbMg, příčný řez.*



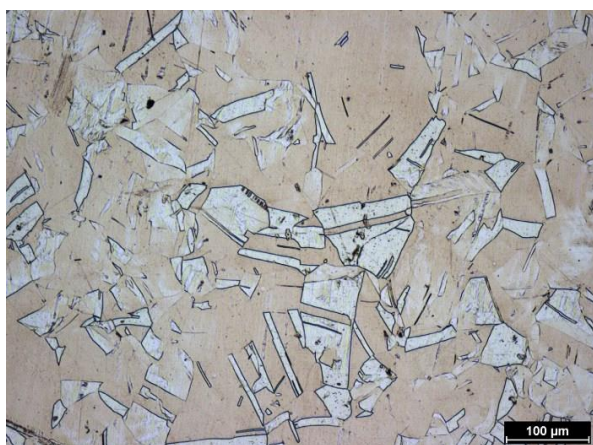
Mikrostruktury Cu-ETP jsou dokumentovány na Obr. 71 – 74. V podélném řezu na Obr. 71 v přehledovém měřítku, není u této struktury patrná řádkovitost a zrna jsou relativně velká. Detail mikrostruktury je na Obr. 72, kde tmavé fáze jsou pravděpodobně na bázi Pb. V příčném řezu (Obr. 73 a detail na Obr. 74) je zobrazena nepatrně jemnější mikrostruktura. Ve struktuře jsou přítomny dvojčatové deformační pásy. Zabarvení a odstíny jednotlivých zrn souvisí s odlišnou intenzitou leptání různě orientovaných krystalografických rovin.



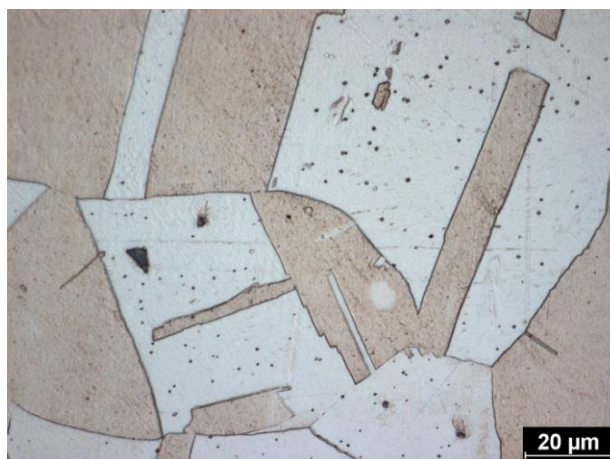
**Obr. 71:** Cu-ETP, podélný řez.



**Obr.72:** Detail mikrostruktury Cu-ETP, podélný řez.



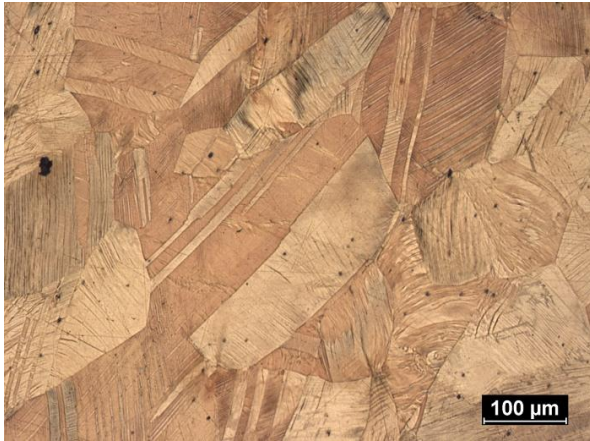
**Obr. 73:** Cu-ETP, příčný řez.



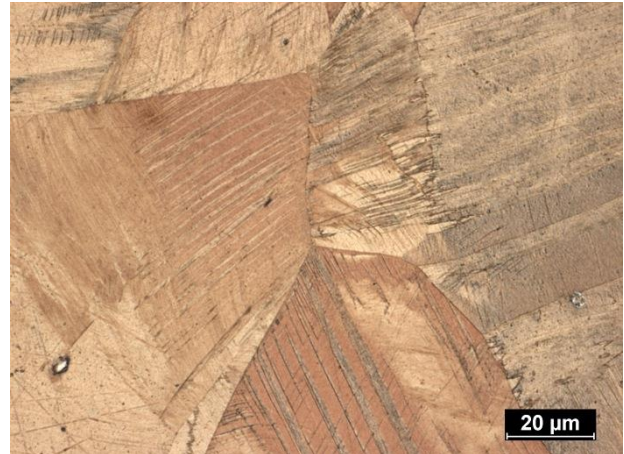
**Obr. 74:** Detail mikrostruktury Cu-ETP, příčný řez.

Mikrostruktury CuSn8 jsou prezentovány na Obr. 75 – 78, kde podélný řez v přehledovém měřítku je na Obr. 75. Není zde patrná řádkovitost, struktura je

homogenní a zrna jsou relativně velká. Detail této struktury je na Obr. 76, kde tmavé fáze obsahují fosfor. V příčném řezu (Obr. 77 a detail na Obr. 78) je struktura jemnější a jsou zde poměrně dobře viditelné dvojčatové pásy. Stejně jako u Cu-ETP jsou patrná různá zbarvení zrn.



*Obr. 75: CuSn8, podélný řez.*



*Obr. 76: Detail mikrostruktury CuSn8, podélný řez.*



*Obr. 77: CuSn8, příčný řez.*

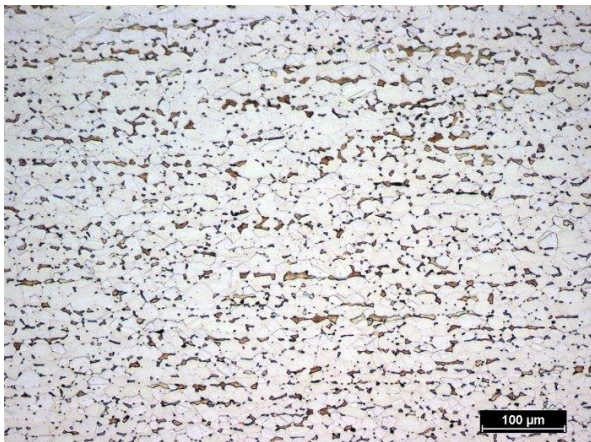


*Obr. 78: Detail mikrostruktury CuSn8, příčný řez.*

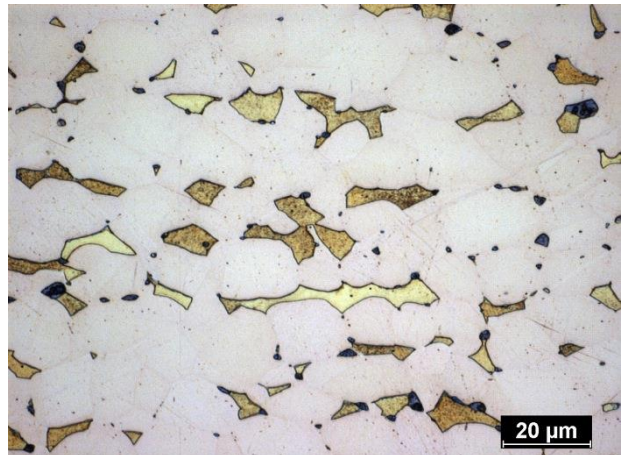
Morfologicky rozdílná mikrostruktura CuZn40Pb2 je na Obr. 79 – 82, kde Obr. 79 zobrazuje podélný řez v přehledovém měřítku. Struktura je dvoufázová ( $\alpha + \beta'$ ) a je zde patrná mírná řádkovitost fáze  $\beta'$ . Na Obr. 80 je detail této



struktury. Tmavé fáze odpovídají vyloučenému olovu. V příčném řezu (Obr. 81 a detail na Obr. 82) lze pozorovat strukturu rovnoměrnější a jemnější.



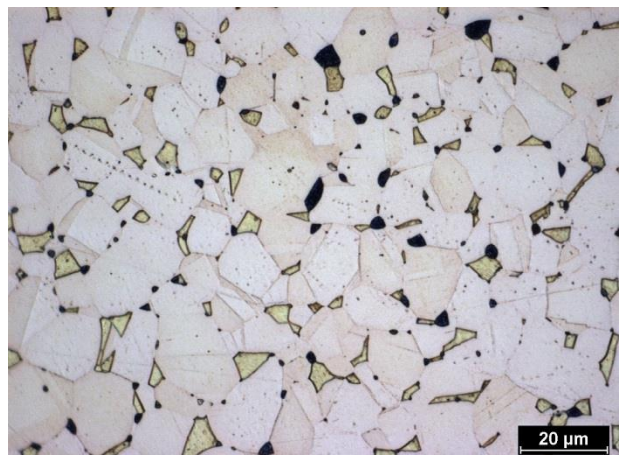
*Obr. 79: CuZn40Pb2, podélný řez.*



*Obr. 80: Detail mikrostruktury CuZn40Pb2, podélný řez.*



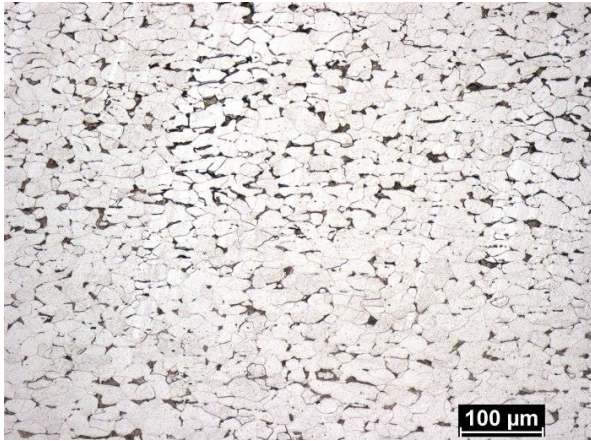
*Obr. 81: CuZn40Pb2, příčný řez.*



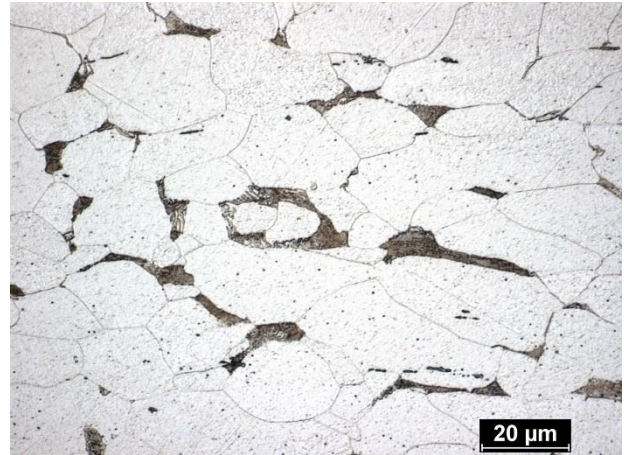
*Obr. 82: Detail mikrostruktury CuZn40Pb2, příčný řez.*

Mikrostruktury feriticko – perlitické oceli S235JRC jsou na Obr. 83 – 86. Na Obr. 83 je podélný řez v přehledovém měřítku, z jehož zobrazení je vidět nerovnoměrné rozložení perlitu bez patrné řádkovitosti. Detail prezentované struktury je na Obr. 84. Malé množství perlitu značí malé množství uhlíku v této oceli. V příčném řezu (Obr. 85) a jeho detailu na Obr. 86 je vidět, že je struktura podobná a opět nevykazuje řádkovitost.

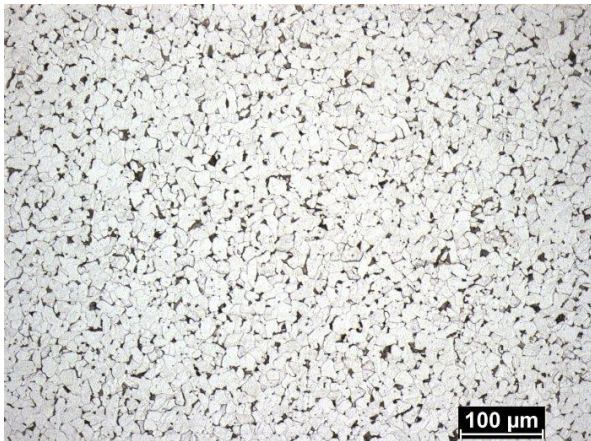




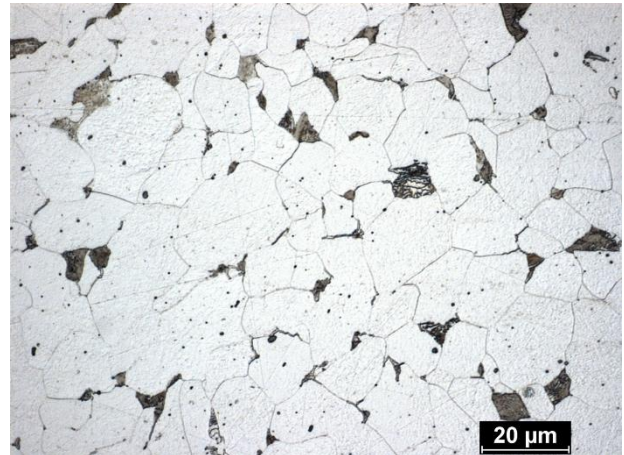
*Obr. 83: S235JRC, podélný řez.*



*Obr. 84: Detail mikrostruktury S235JRC, podélný řez.*



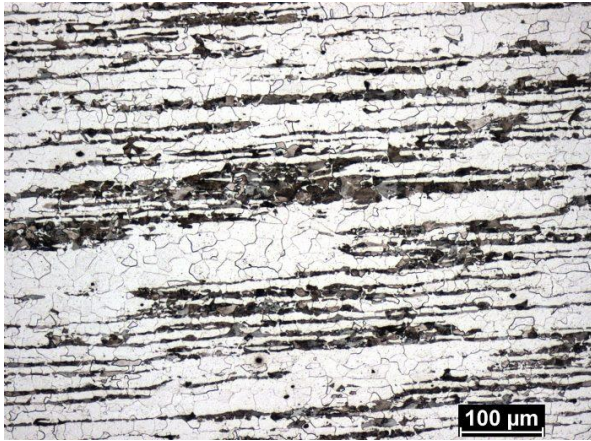
*Obr. 85: S235JRC, příčný řez.*



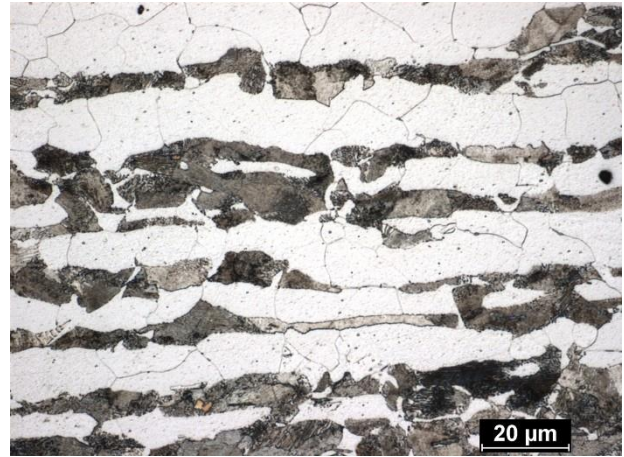
*Obr. 86: Detail mikrostruktury S235JRC, příčný řez.*

Na Obr. 87 – 90 jsou mikrostruktury oceli S355J2. Struktura této oceli je také feriticko – perlitická. Na Obr. 87 je podélný řez v přehledovém měřítku, z něhož je patrná výrazná řádkovitost a pásmovitost perlitu. Na Obr. 88 je detail této struktury. Z příčného řezu (Obr. 89 a detail na Obr. 90) je zřejmé, že struktura je deformací usměrněná. Zrna se jeví v tomto řezu mnohem menší.

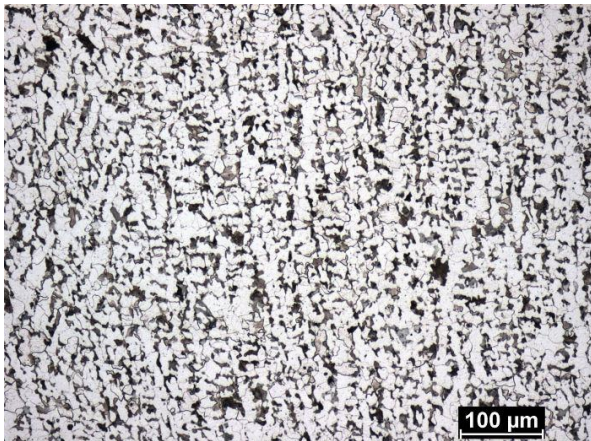




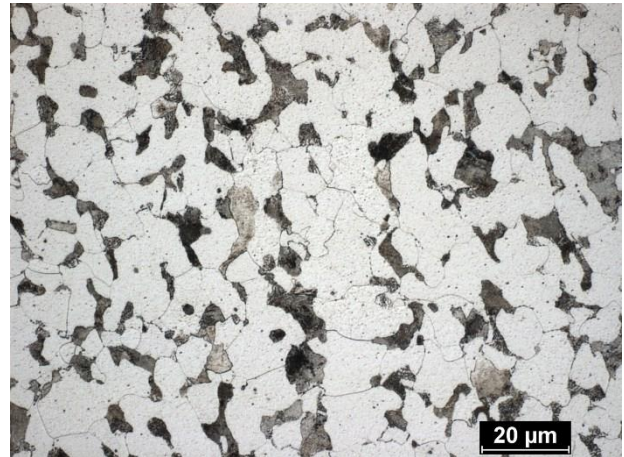
*Obr. 87: S355J2, podélný řez.*



*Obr. 88: Detail mikrostruktury S355J2, podélný řez.*



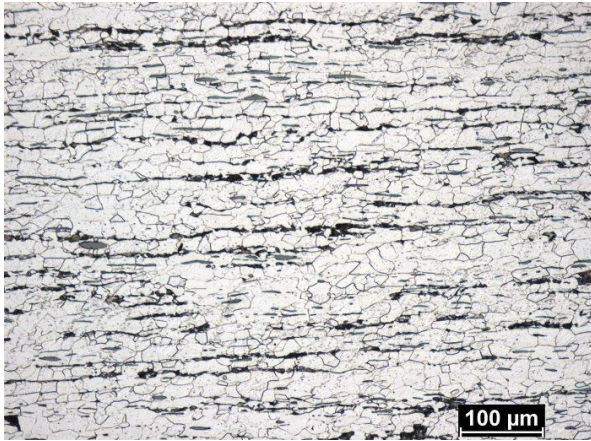
*Obr. 89: S355J2, příčný řez.*



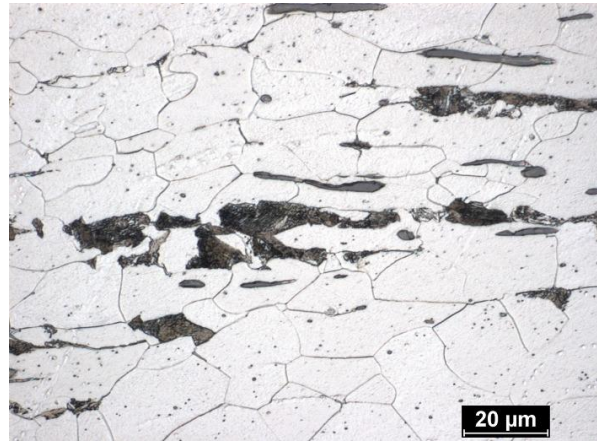
*Obr. 90: Detail mikrostruktury S355J2, příčný řez.*

Na Obr. 91 – 94 jsou zobrazeny feritickoperlitické mikrostruktury oceli 11SMn30. Obr. 91 znázorňuje podélný řez v přehledovém měřítku, z kterého je patrná mírná řádkovitost perlitu. Na Obr. 92 je detail této struktury. V příčném řezu (Obr. 93 a detail na Obr. 94) je struktura podobná, ale nevykazuje řádkovitost.

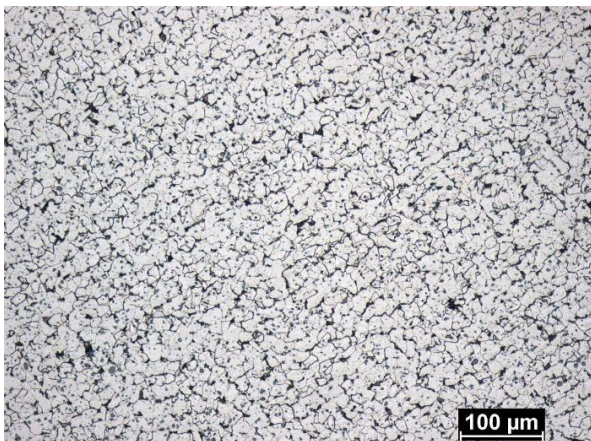




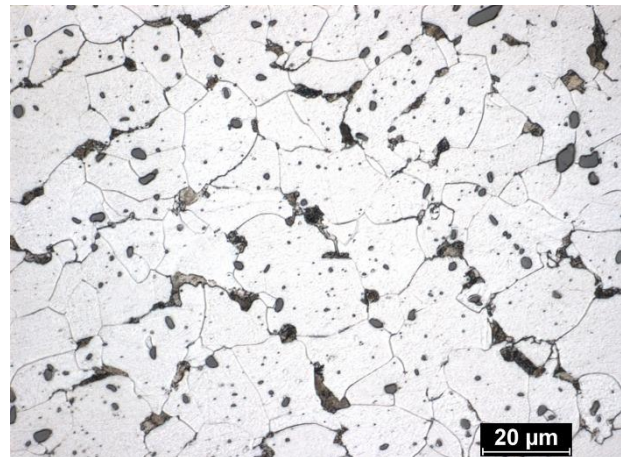
*Obr. 91: 11SMn30, podélný řez.*



*Obr. 92: Detail mikrostruktury  
11SMn30, podélný řez.*

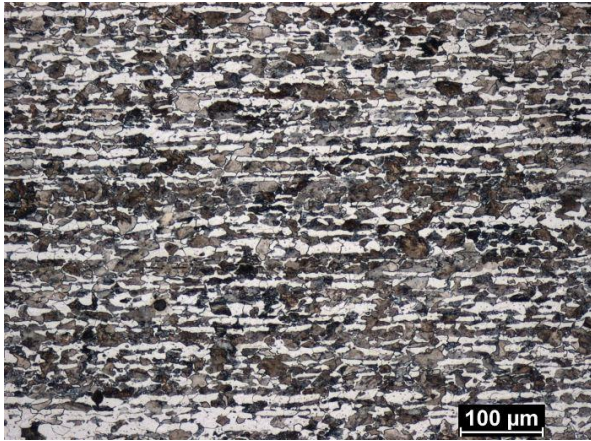


*Obr. 93: 11SMn30, příčný řez.*

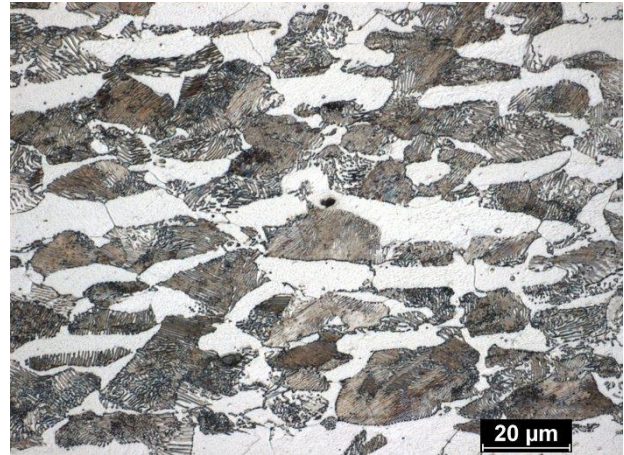


*Obr. 94: Detail mikrostruktury  
11SMn30, příčný řez.*

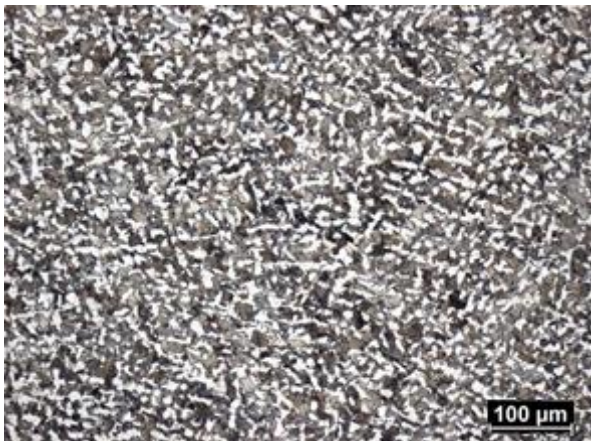




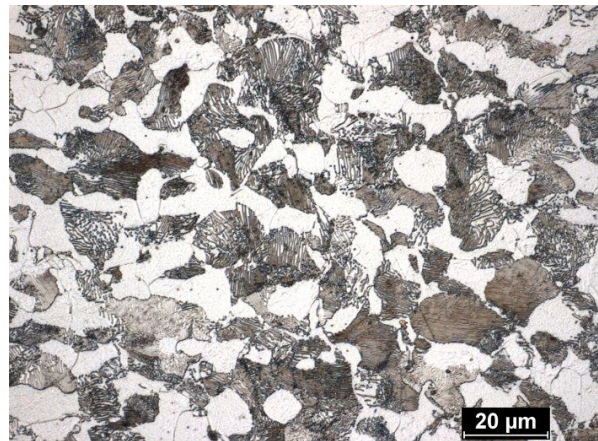
*Obr. 95: E335GC, podélný řez*



*Obr. 96: Detail mikrostruktury  
E335GC, podélný řez.*



*Obr. 97: E335GC, příčný řez*



*Obr. 98: Detail mikrostruktury  
E335GC, příčný řez.*

Mikrostruktury oceli E335GC na Obr. 95 – 98 zobrazují perliticko–feritický charakter oceli. Z Obr. 95 (podélný řez), v přehledovém měřítku je patrná řadkovitost. Detail mikrostruktury na Obr. 96 tento charakter potvrzuje. V příčném řezu (Obr. 97 a detail na Obr. 98) je struktura tvořena menšími zrny. Velké množství perlitu značí mnohem větší obsah uhlíku v oceli v porovnání se všemi předchozími ocelovými vzorky.

## 16. Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem byla provedena na speciálně připravených vzorcích (tahových tyčích) pro výše uvedené materiály. Jednalo se o 4 druhy neželezných slitin (hliníková slitina AlCu4PbMg, měď, bronz CuSn8, mosaz CuZn40Pb2) a 4 oceli (S355J2, S355J2, 11SMn30, E335GC) viz Obr. 97. Měření mechanických vlastností (pro porovnání) bylo provedeno na dvou různých univerzálních trhacích strojích Instron a LabTest.

Univerzální trhací stroj LabTest viz Obr. 99 dokáže vyvinout maximální sílu 100 kN, rozlišení polohy příčnicku 1  $\mu\text{m}$  a přesnost řízení jeho polohy je 0,5 %. Je vybaven snímačem síly KAF 100 kN, extenzometrem MSQ-R1 měřícím změnu průměru vzorku (kontrakci) a laserovým průtahoměrem LE-05 pro měření změny délky v definované oblasti vzorku. Průtahoměr měří v rozsahu 8-127 mm, s rozlišením 1  $\mu\text{m}$  a nelinearitou měření  $\pm 0,01$  mm.



a) *Univerzální trhací stroj  
LabTest 5.100 SP1.*



b) *Vzorek upnutý v závitových čelistech s extenzometrem MSQ-R1.*

**Obr. 99:** *Univerzální trhací stroj LabTest 5.100 SP1*



Univerzální trhací stroj INSTRON 5582 dokáže vyvinout maximální sílu 100 kN, s rozlišením polohy příčnicku 1  $\mu\text{m}$ . Trhací stroj je vybaven snímačem síly a extenzometrem INSTRON viz Obr 100.



a) *Univerzální trhací stroj  
INSTRON 5582*



b) *Vzorek upnutý v závitových čelistech s průtahoměrem*

**Obr. 100:** *Univerzální trhací stroj INSTRON 5582*

Vzorky pro statickou zkoušku tahem byly vyrobeny obráběním na soustruhu z kruhových tyčí s průměrem 12 mm v počtu 4 kusy od každého materiálu, ve shodě s normou ČSN EN ISO 6892-1. Nákres a rozměry vzorků jsou uvedeny v Příloze. Vzorky byly upnuty do závitových čelistí se závitem M12. Připravené vzorky na statickou zkoušku tahem jsou dokumentovány na Obr. 101.



*Obr. 101: Připravené vzorky*

Smluvní diagram statické zkoušky tahem (smluvní napětí,  $R$ , poměrná deformace,  $\varepsilon$ ) byl vypočítán podle vzorců (51), ve kterém je  $S_0$  počáteční průřezová plocha zkoušené délky a  $\Delta L_e$  je prodloužení měřené průtahoměrem.

$$R = \frac{P}{S_0} [\text{Nmm}^{-2}], \quad \varepsilon = \frac{\Delta L_e}{L_e} [-] \quad (51)$$

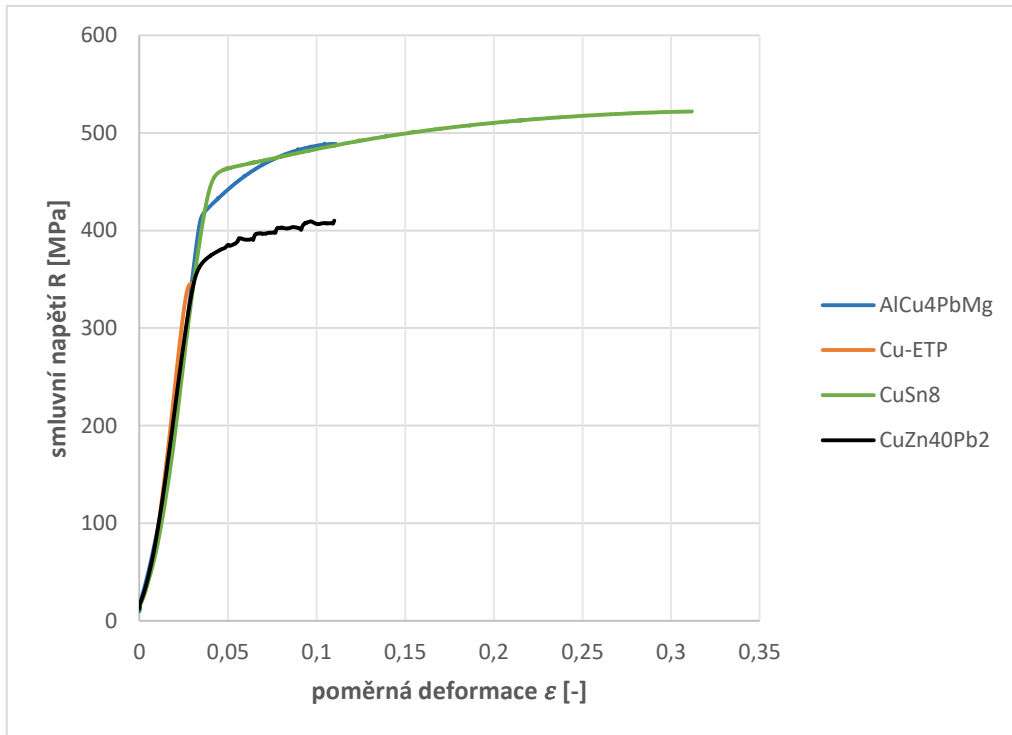
Skutečný diagram statické zkoušky v tahu (skutečné napětí,  $\sigma$ , skutečná deformace,  $\varphi$ ) byl vypočítán podle vzorců (52), kde  $S_A$  je aktuální průřezová plocha zkoušené délky.

$$\sigma = \frac{P}{S_A} [\text{Nmm}^{-2}], \quad \varphi = \ln(1 + \varepsilon) [-] \quad (52)$$

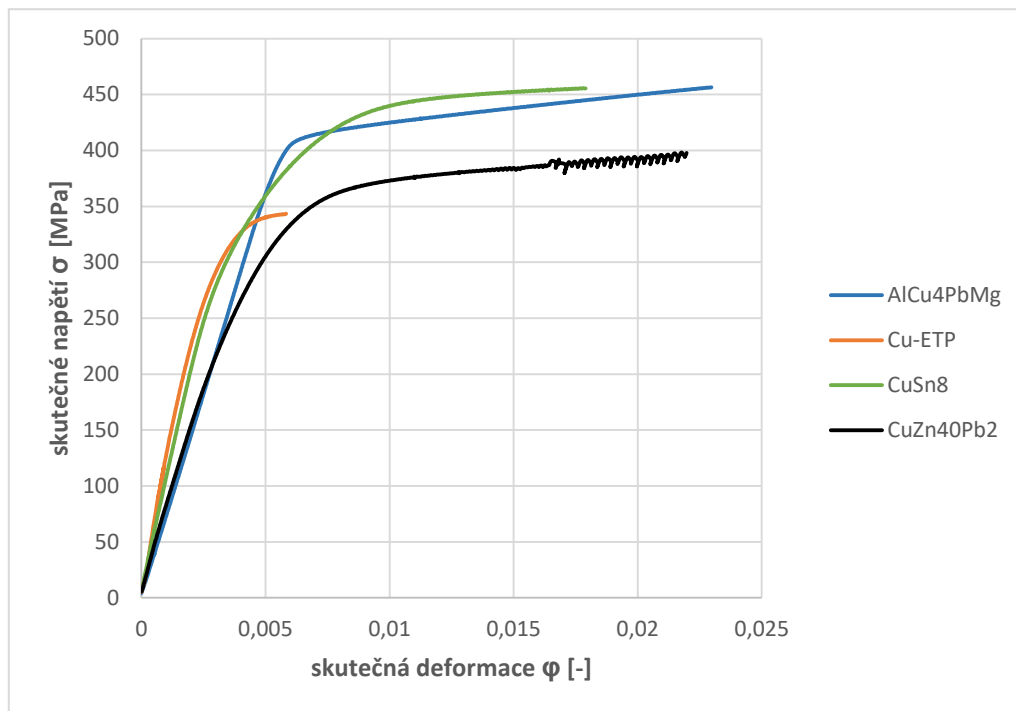
Modul pružnosti  $E$ , mez kluzu  $R_{p0,2}$ , mez pevnosti  $R_m$  a tažnost  $A_{11,3}$  byly získány z vyhodnocení softwarů univerzálních trhacích strojů. Ze skutečného diagramu byly dále zjišťovány hodnoty koeficientu a exponentu deformačního zpevnění,  $K$  a  $n$ , proložením jeho části mocninnou funkcí pomocí Excelu.

Deformační diagramy jsou dále uvedeny v grafické formě, viz Obr. 102 – 104.

Hodnoty naměřených mechanických vlastností byly strukturovaně seřazeny v tabulkách s výpočtem průměrné hodnoty a směrodatné odchylky viz Tab. 9 – 12.

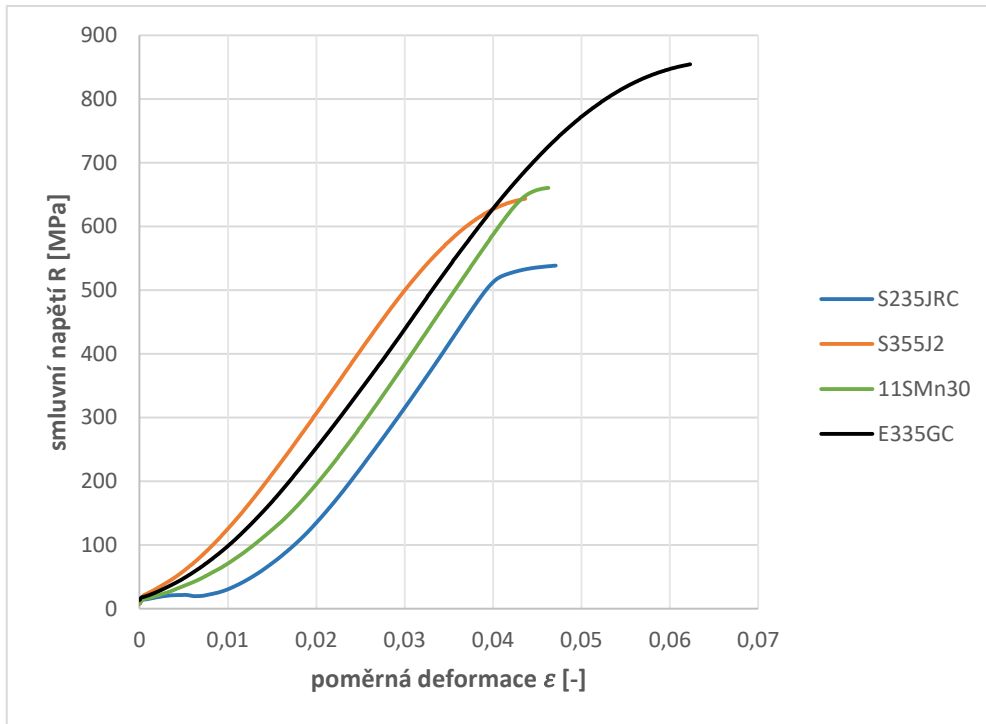


a)

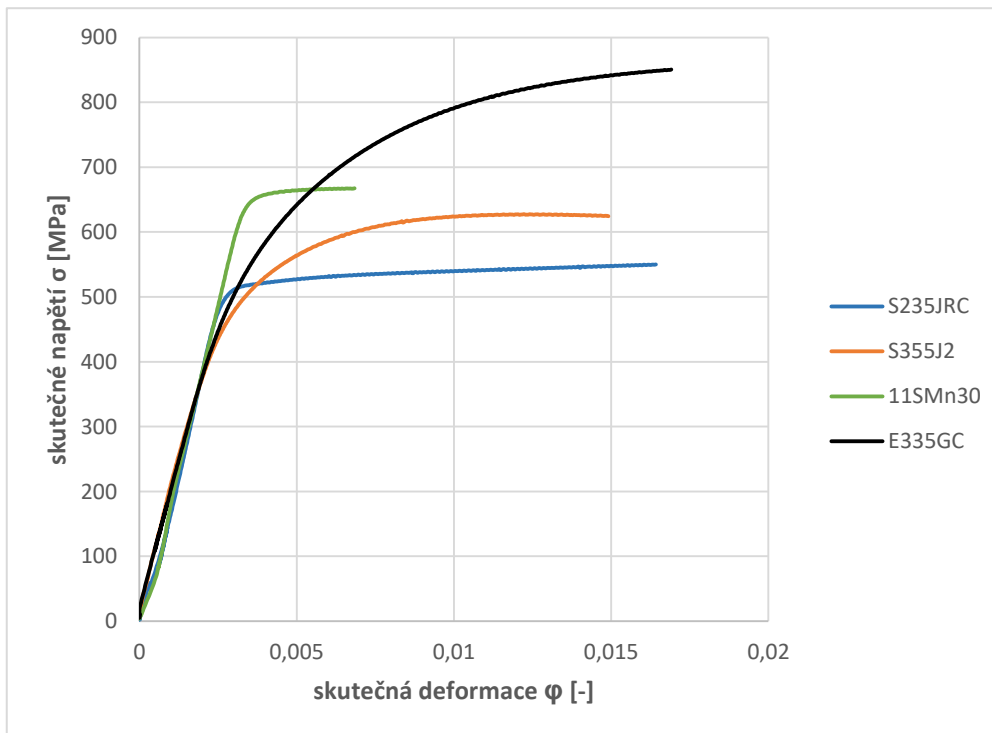


b)

**Obr. 102:** Deformačně-napěťové diagramy neželezných slitin INSTRON (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)

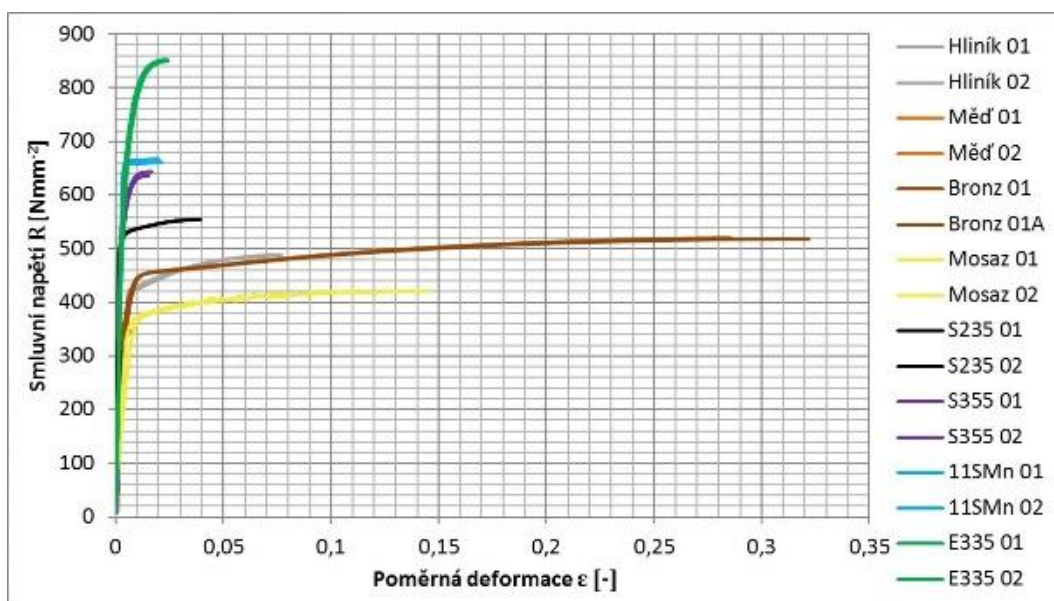


a)

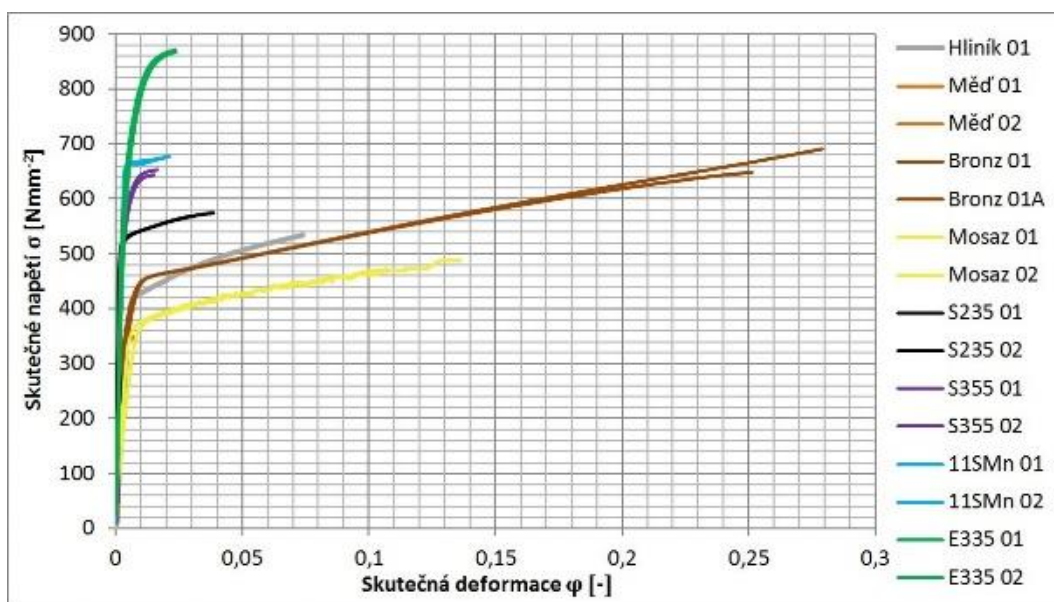


b)

**Obr. 103:** Deformačně-napětové diagramy ocelí INSTRON (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)



a)



b)

**Obr. 104:** Soubor deformačně-napěťových diagramů pro uvedené materiály z LabTest (a - smluvní diagramy, b - skutečné diagramy)

**Tab. 13** Mechanické vlastnosti zjištěné softwarem Instron a LabTest pro neželezné slitiny

Tahový stroj	Označení materiálu	$E$ [MPa]	$R_{p02}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{11,3}$ [%]
Instron	AlCu4PbMg	14 940	418	489	8,5
Instron *		72 705	414	456	3,0
LabTest		72 743	419	489	10,6
LabTest/		73 086	426	487	8,2
<b>Průměr</b>		72 845	419	480	9
<b>Směrodatná odchylka</b>		209,9	5,0	16,2	1,3
Instron	Cu-ETP	16 599	347	329	7,9
Instron *		122 640	336	343	4,0
LabTest		109 415	340	345	8,5
LabTest/		127 901	345	347	7,6
<b>Průměr</b>		119 985	340	345	8
<b>Směrodatná odchylka</b>		9 524,6	4,5	2,0	0,5
Instron	CuSn8	15 029	431	523	31,6
Instron *		98 158	377	455	2,6
LabTest		102 136	399	520	32,3
LabTest/		118 887	394	518	35,1
<b>Průměr</b>		106 394	400	504	33
<b>Směrodatná odchylka</b>		11 000,8	22,6	32,7	1,9
Instron	CuZn40Pb2	13 625	353	410	17,3
Instron *		71 370	344	397	3,1
LabTest		70 631	356	423	15,6
LabTest/		65 078	322	421	18,3
<b>Průměr</b>		69 026	344	413	17
<b>Směrodatná odchylka</b>		3 439,3	15,4	12,0	1,4

\* měření s průtahoměrem

**Tab. 14** Mechanické vlastnosti zjištěné softwarem Instron a LabTest pro ocele

Tahový stroj	Označení materiálu	$E$ [MPa]	$R_{p02}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{11,3}$ [%]
Instron	S235JRC	19 980	512	538	8,0
Instron *		219 485	523	550	4,7
LabTest		224 542	528	555	9,5
LabTest/		198 955	528	553	7,3
<b>Průměr</b>		214 327	523	549	8
<b>Směrodatná odchylka</b>		13 550,8	7,5	7,6	1,1
Instron	S355J2	19 769	597	643	8,25
Instron *		200 215	575	624	2,0
LabTest		207 764	584	644	8,0
LabTest/		196 420	572	636	7,6
<b>Průměr</b>		201 466	582	637	8
<b>Směrodatná odchylka</b>		5 774,6	11,2	9,2	0,3
Instron	11SMn30	20 240	656	660	6,8
Instron *		273 670	660	667	2,8
LabTest		197 870	664	667	5,5
LabTest/		201 734	659	661	3,4
<b>Průměr</b>		224 425	660	664	5
<b>Směrodatná odchylka</b>		42 691,4	3,3	3,8	1,7
Instron	E335GC	19 143	740	854	5,3
Instron *		184 028	661	850	3,5
LabTest		201 013	659	850	3,6
LabTest/		239 596	675	853	4,3
<b>Průměr</b>		208 212	684	852	4
<b>Směrodatná odchylka</b>		28 475,0	38,2	2,1	0,9

\* měření s průtahoměrem

**Tab. 15** Koeficient deformačního zpevnění  $K$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  zjištěný z diagramu Instron a LabTest pro neželezné slitiny

<i>Tahový stroj</i>	<i>Označení materiálu</i>	<i>K [MPa]</i>	<i>n [-]</i>
<i>Instron</i>	<i>AlCu4PbMg</i>	632	0,086
<i>LabTest</i>		714	0,117
<b><i>Průměr</i></b>		673	0,1015
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		58,0	0,0219
<i>Instron</i>	<i>Cu-ETP</i>	404	0,031
<i>LabTest</i>		435	0,046
<b><i>Průměr</i></b>		420	0,0385
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		21,9	0,0106
<i>Instron</i>	<i>CuSn8</i>	609	0,070
<i>LabTest</i>		830	0,189
<b><i>Průměr</i></b>		720	0,1295
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		156,3	0,0841
<i>Instron</i>	<i>CuZn40Pb2</i>	530	0,077
<i>LabTest</i>		643	0,138
<b><i>Průměr</i></b>		587	0,1075
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		79,9	0,0431



**Tab. 16** Koeficient deformačního zpevnění  $K$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  zjištěný z diagramu Instron a LabTest pro ocele

<i>Tahový stroj</i>	<i>Označení materiálu</i>	<i>K [MPa]</i>	<i>n [-]</i>
<i>Instron</i>	<i>S235JRC</i>	667	0,044
<i>LabTest</i>		647	0,037
<b><i>Průměr</i></b>		657	0,0405
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		14,1	0,0049
<i>Instron</i>	<i>S355J2</i>	1 062	0,117
<i>LabTest</i>		936	0,088
<b><i>Průměr</i></b>		999	0,1025
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		89,1	0,0205
<i>Instron</i>	<i>11SMn30</i>	727	0,017
<i>LabTest</i>		803	0,037
<b><i>Průměr</i></b>		765	0,0270
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		53,7	0,0141
<i>Instron</i>	<i>E335GC</i>	1 492	0,137
<i>LabTest</i>		1732	0,185
<b><i>Průměr</i></b>		1612	0,1610
<b><i>Směrodatná odchylka</i></b>		169,7	0,0339

## 17. Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno na univerzálním tvrdoměru EMCO TEST viz Obr 101. Hodnoty tvrdosti byly naměřené v souladu s normou podle Brinella pro kovové materiály (ČSN EN ISO 6506). Naměřené hodnoty tvrdosti jsou uvedené v Tab. 13.



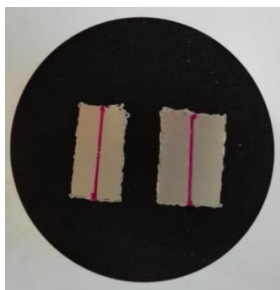
*Obr. 105: Univerzální tvrdoměr EMCOTEST M4C 075/750*

*Tab. 17 Hodnoty tvrdosti vybraných materiálů*

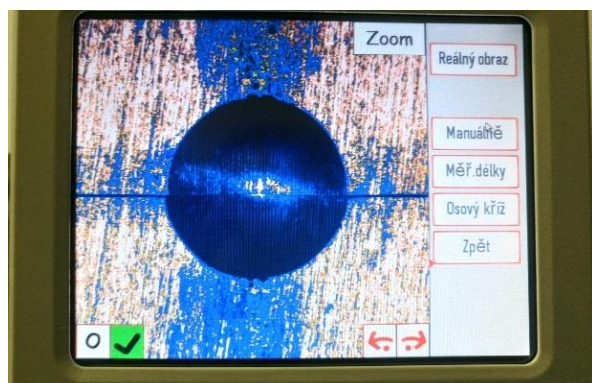
<i>Materiál</i>	<i>Označení</i>	<i>Zatížení [N]</i>	<i>Index</i>	<i>EMCO HBW</i>
<i>Hliník</i>	<i>EN AW-2030 T3, AlCu4PbMg</i>	<i>2452</i>	<i>10</i>	<i>121</i>
<i>Měď</i>	<i>Cu-ETP</i>	<i>2452</i>	<i>10</i>	<i>92.5</i>
<i>Bronz</i>	<i>CuSn8</i>	<i>2452</i>	<i>10</i>	<i>140</i>
<i>Mosaz</i>	<i>CW617N, CuZn40Pb2</i>	<i>2452</i>	<i>10</i>	<i>121</i>
<i>Ocel 1</i>	<i>S235</i>	<i>7355</i>	<i>30</i>	<i>174</i>
<i>Ocel 2</i>	<i>S355</i>	<i>7355</i>	<i>30</i>	<i>211</i>
<i>Ocel 3</i>	<i>11SMn30, 1.0715</i>	<i>7355</i>	<i>30</i>	<i>186</i>
<i>Ocel 4</i>	<i>E335, St60-2, C45E, 1.0060</i>	<i>7355</i>	<i>30</i>	<i>201</i>

## 18. Studium plastické zóny pod vtiskem pro vybraný materiál

Princip měření materiálových vlastností pomocí indentačních metod je z fyzikálního hlediska založen na odezvě materiálu na mechanické zatížení. Vzhledem k tomu, že indentační zkoušky probíhají v oblasti plastických deformací zkoušeného materiálu, byla disertační práce zaměřena i na studium plastické zóny pod vtiskem indentoru. Pro zviditelnění plasticky ovlivněné oblasti, zobrazené výpočtovým modelováním pomocí MKP (viz předcházející kapitoly), bylo využito v této práci mikroskopické zkoumání na metalograficky připravených vzorcích. Na základě předpokladu o změně mikrostruktury, lze identifikovat rozsah a charakter plastické deformace v oblasti pod vtiskem indentora. Experimentální potvrzení přítomnosti plastické deformace v této oblasti si vyžaduje speciální postup. Metalograficky připravený vzorek byl rozřezaný v polovině (obě části byly broušené a leštěné i ve směru kolmém na povrch vzorku), byl zatížený indentorem tak, aby vtisk vznikl symetricky na rozděleném řezu, jak zobrazují Obr. 106 - 107. Na základě poznatků o mikroskopické identifikaci skluzových čar po plastické deformaci měkkých materiálů, byla jako reprezentativní, vybraná hliníková slitina AlCu4PbMg. Vtisk byl vytvořený pomocí univerzálního tvrdoměru EMCOTEST M4C 075/750, který byl uveden na Obr. 105.

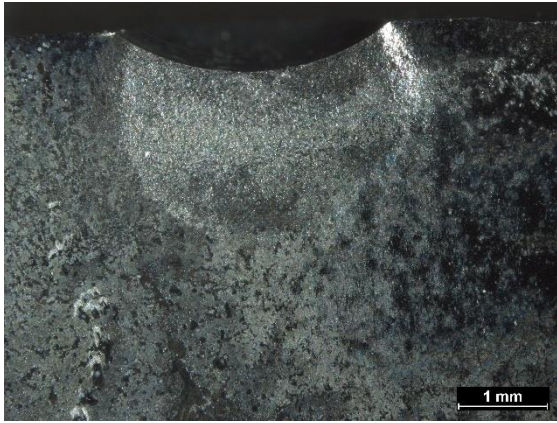


*Obr. 106: Zalisované vzorky*

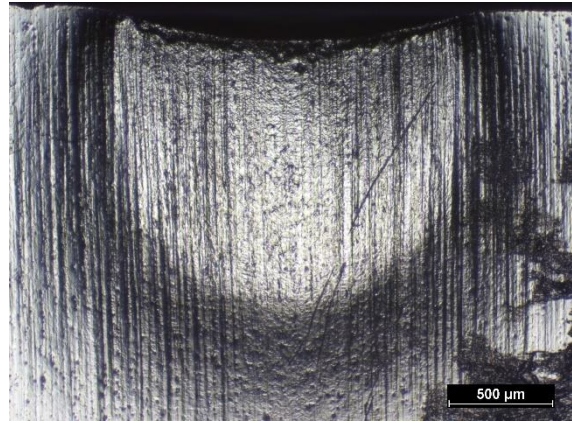


*Obr. 107: Vtisk na displeji tvrdoměru  
EMCOTEST M4C 075/750*

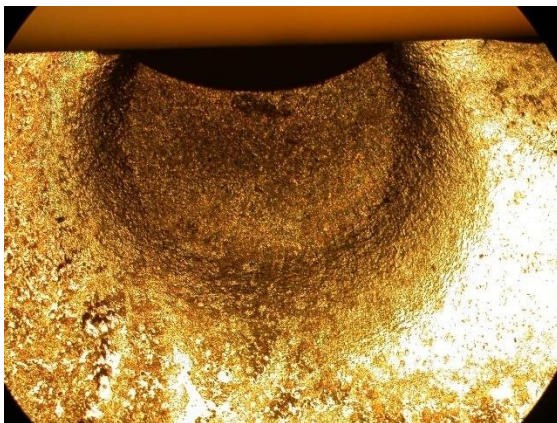
Po vybrání vzorků z fixační pryskyřice byly rozřezané části mikroskopicky (světelnou a elektronovou mikroskopií) studované v příčném řezu jak znázorňuje Obr. 108 a Obr. 109.



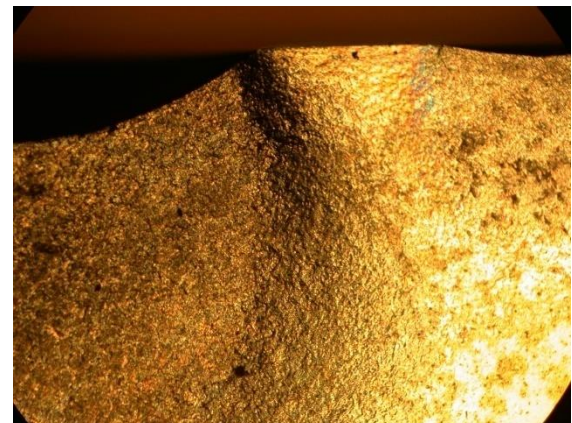
a) *Plastická deformace 750 kg*



b) *Plastická deformace 750 kg*



c) *Polarizované světlo, zvětšení 2,5x*



d) *Polarizované světlo, zvětšení 5x*

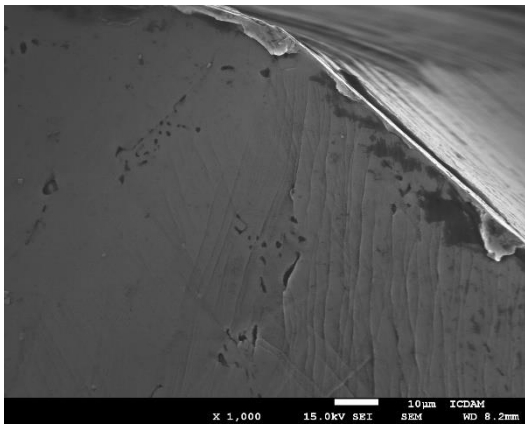
**Obr. 108:** *Plastická zóna Al slitiny (polarizační a světelný mikroskop)*

Charakter a velikost zóny ovlivněné deformací na příčných řezech, je možno poměrně dobře identifikovat pro každý materiál. Plastická zóna Obr. 108 je barevně odlišná od základního nedeformovaného materiálu, zobrazuje se i směr, ve kterém bylo uskutečněno stlačení materiálu pod indentorem. Plastická deformace probíhá v tak velkém objemu materiálu, který mu daná struktura dovolí. Z toho důvodu odezva zkoušeného materiálu bude vždy záležet na charakteru mi-

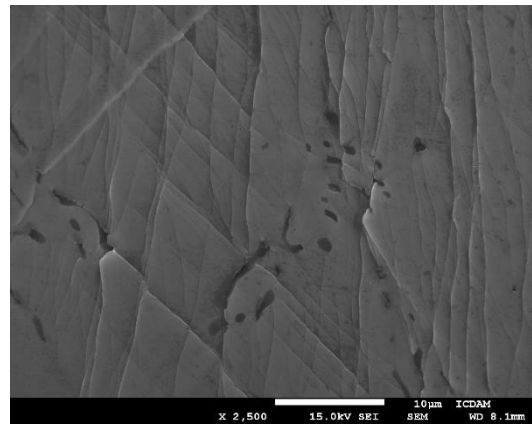
krostruktury (krystalické mřížce).

Detailní studium deformačně ovlivněné mikrostruktury umožňuje elektronový mikroskop. V oblasti pod vtiskem jsou typické znaky plastické deformace, které vytváří celkový obraz o jejím průběhu od povrchu směrem dovnitř materiálu.

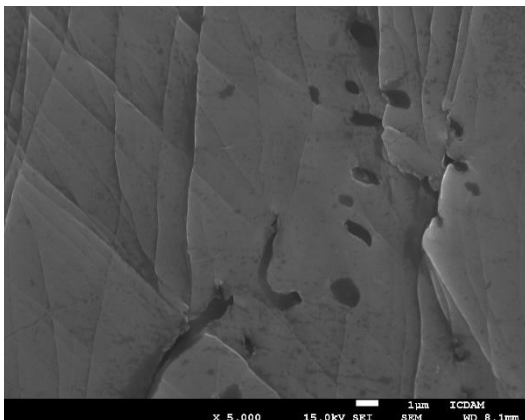
U Al slitiny jsou tyto znaky výraznější než na jiných materiálech.



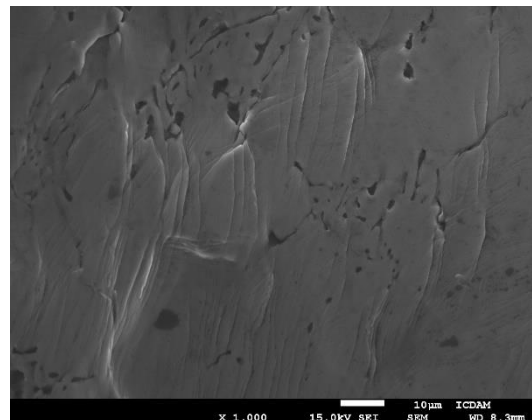
*a) Plastická zóna Al slitina*



*b) Detail plastické zóny Al slitiny*

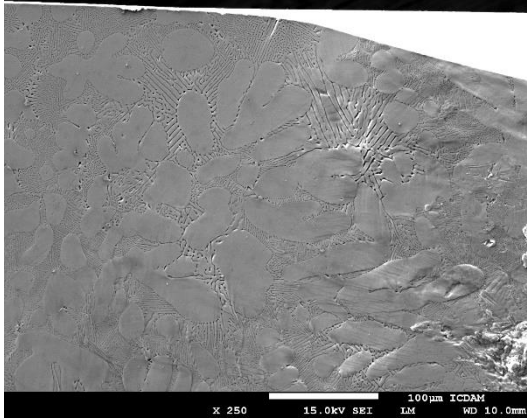


*c) Detail plastické zóny Al slitiny*

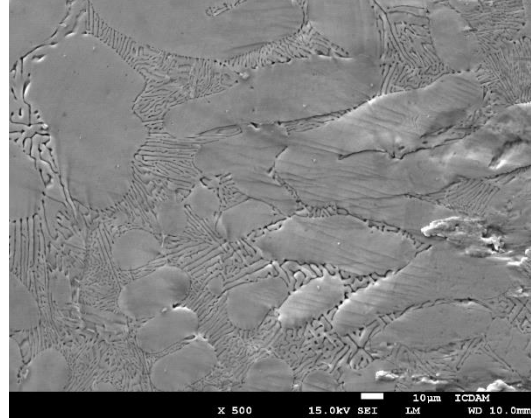


*d) Střední část plastické zóny Al slitina*

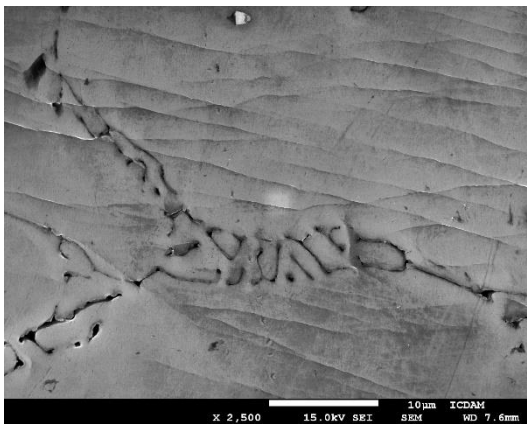




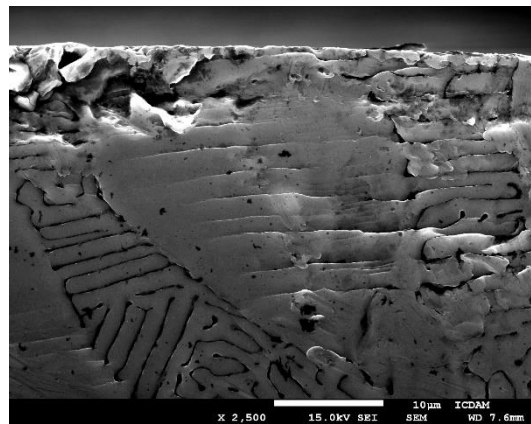
e) Al slitina deformovaná



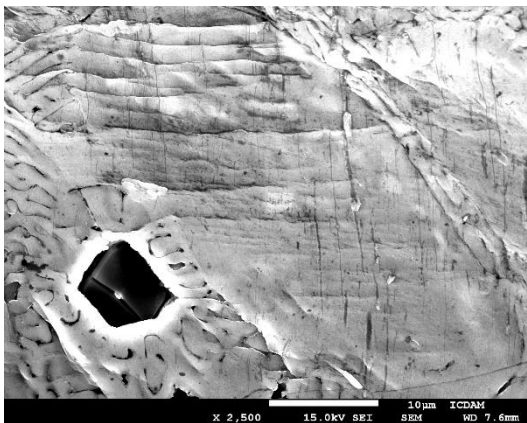
f) Al slitina deformovaná zrna



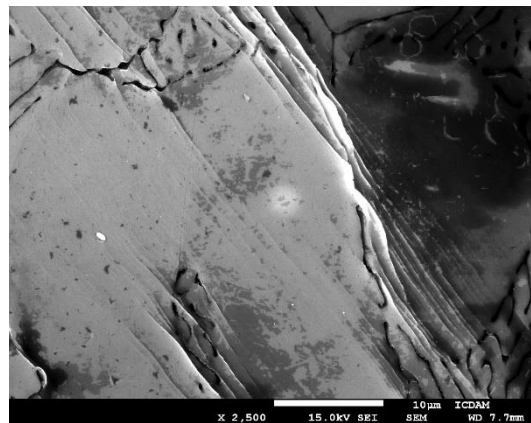
g) Deformovaná oblast Al slitiny,  
skluzové čáry



h) Al slitina deformovaná, oblast  
pod povrchem



i) Skluzový systém (a vměstek)  
v deformované oblasti



j) Deformovaná oblast Al slitiny,  
skluzový systém

**Obr. 109:** Deformovaná oblast pod vtiskem Al slitiny studovaná pomocí elektronového mikroskopu

Vzhledem k tomu, že jako vstupní parametr do MKP výpočtů nelze použít charakter mikrostruktury materiálů, je nutno věnovat pozornost materiálům i z hlediska její morfologie pro doplnění celkového obrazu zkoumaného materiálu.

V disertační práci je věnována pozornost výchozím mikrostrukturám, vybraných materiálů, které se podílí na vzniku dvojčat nebo skluzových čar v plasticky deformované oblasti pod indentačním vtiskem (viz předchozí kapitoly).

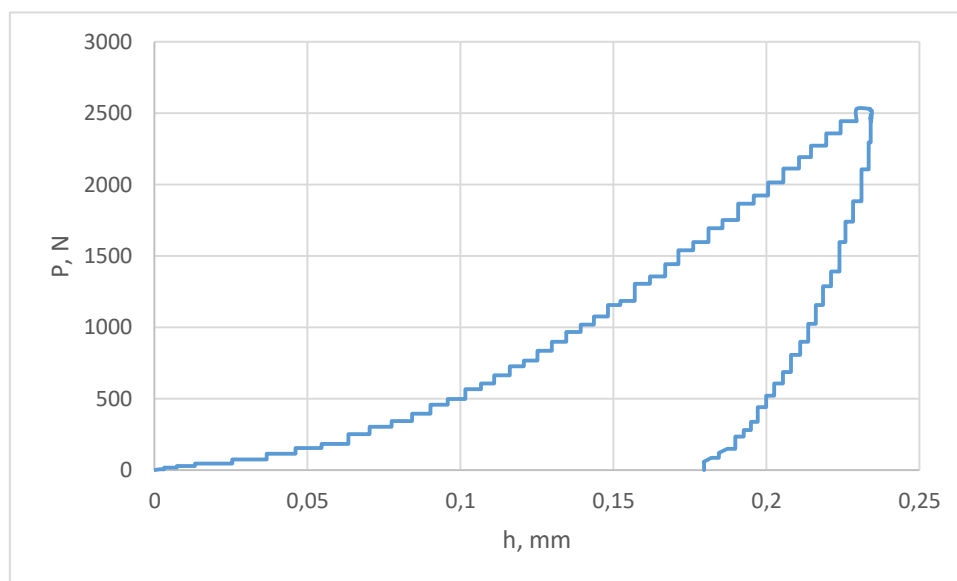
## 19. Indentační zkoušky na makrotvrdoměru EXPIMER - ověření navržené konečné metodologie výpočtu mechanických vlastností

Indentační zkoušky byly ověřené pomocí experimentálního makrotvrdoměru EXPIMER (viz předchozí kapitoly) na všech vybraných materiálech, pro které již bylo provedeno studium mikrostruktury, chemického složení a aplikovaná statická zkouška tahem, zkouška tvrdosti a nanotvrdosti.

Z hlediska reprodukovatelnosti experimentu vzorky byly připravené ve formě válečků s výškou 5-7 mm.

Příklad vyhodnocení indentačních výsledků byl proveden na vzorku, jehož materiál byl hliníková slitina EN AW-2030 T3 (AlCu4PbMg).

Po skončení experimentu, software EXPIMER ukládá průběžný záznam celé zkoušky pomocí senzoru zatížení a posuvu ve formě indentační křivky viz Obr. 110.

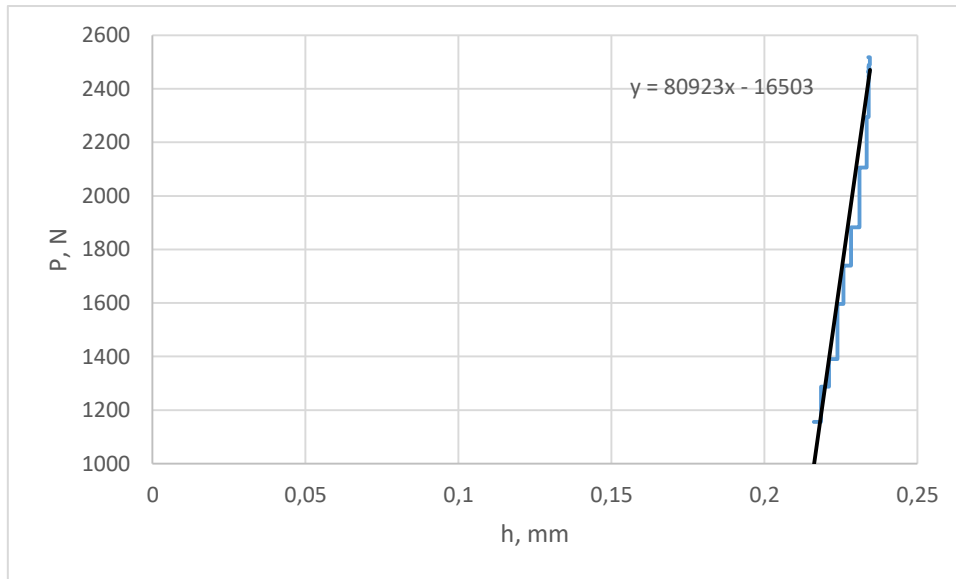


**Obr. 110:** Indentační křivka EN AW-2030 T3

Dále se z odlehčovací části (viz Obr. 111) odečte parametr sklonu  $S$ , ze kterého lze stanovit indentační modul pružnosti  $E_{IT}$ , který se počítá podle vzorce 53.

$$E_{IT} = E_{red} \cdot (1 - \nu^2) = S \cdot (1 - \nu^2) = 80\,923 \cdot (1 - 0,32^2) = 72\,636 \text{ MPa} \quad (53)$$





**Obr. 111:** Sklon odlehčovací části indentační křivky

Následně se stanoví indentační deformace podle vzorce z vlastního návrhu

$$\varepsilon_{ind} = 1 - \frac{L_{D0} - h}{L_{D0}} \quad (54)$$

Parametr  $L_{D0}$  je závislý na průměru indentoru i v našem případě se bude rovnat 5. Tento parametr ukazuje hloubku zóny, ve které už nedojde k plastické deformaci.

Parametry zpevnění  $n$  a  $K$  se stanoví ze zatěžovací části indentační křivky dle následujících vzorců:

$$n = \left( \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(h_2/h_1)} - 1 \right) \cdot 0,102 = \left( \frac{(\ln(P_2) - \ln(P_1))}{(\ln(h_2) - \ln(h_1))} - 1 \right) \cdot 0,102 \quad (55)$$

$$K = \frac{1}{0,102} \cdot \left( \frac{P}{h^n} \right) \text{ [MPa]} \quad (56)$$

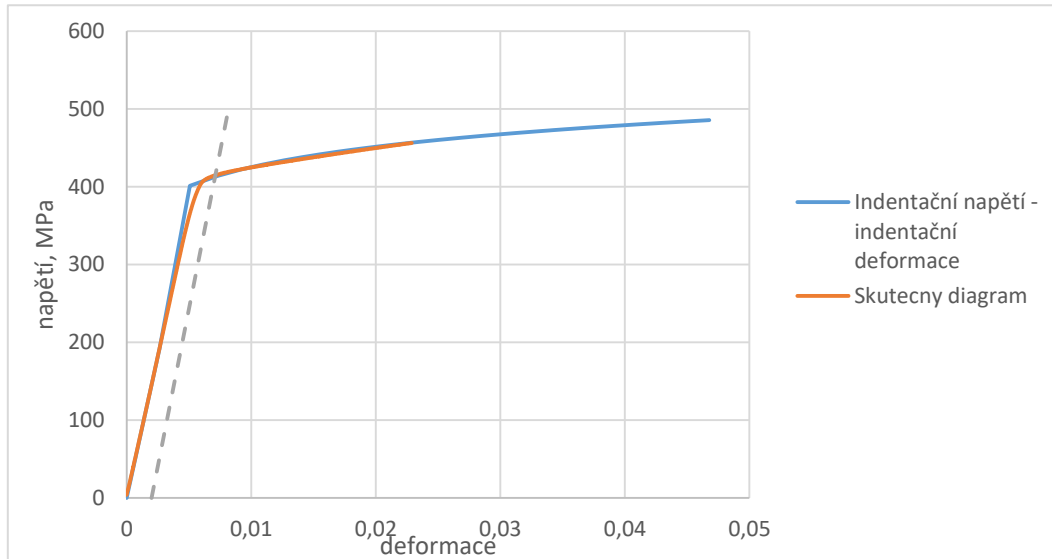
Hodnoty zatížení a hloubky vtisku pro výpočet  $n$  byly vybrány mezi maximální hodnotou a hodnotou s deformací nejbližší k hodnotě 0,002.

Napětí na mezi pevnosti bylo odečítáno jako napětí odpovídající maximální hodnotě zatížení.

Indentační napětí se spočítá na základě systému rovnic

$$\begin{cases} R = E \cdot \varepsilon, & R < R_{p0,2} \\ R = K \cdot \varepsilon^n, & R \geq R_{p0,2} \end{cases} \quad (57)$$

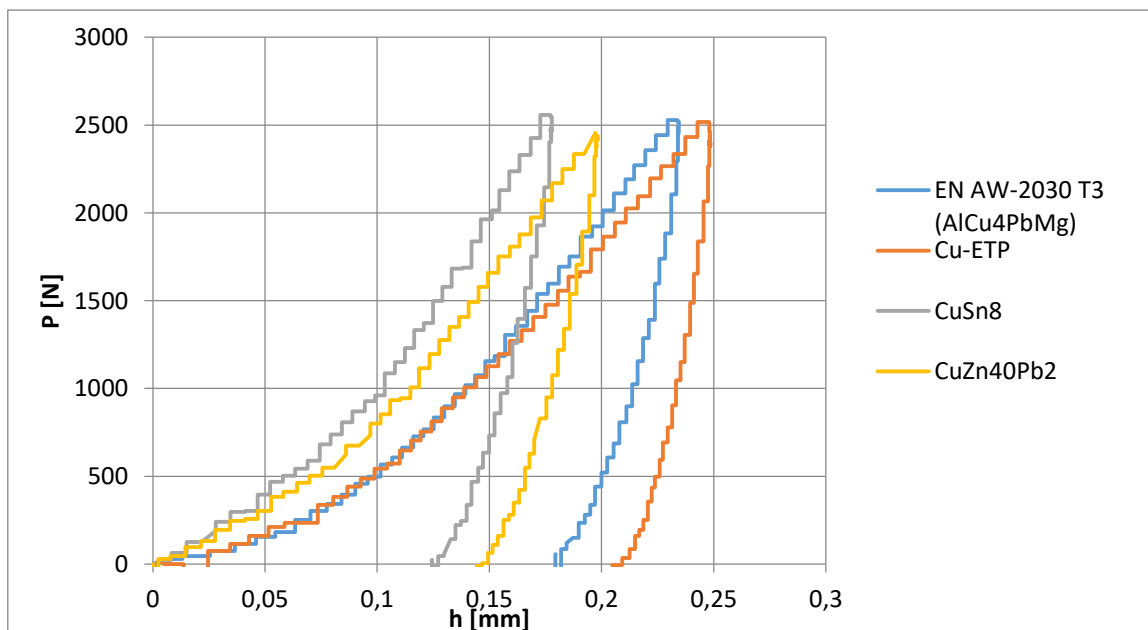
Na základě získaných hodnot je možné sestavit digram napětí-deformace. Na Obr. 112 je uvedeno porovnání získaného indentačního diagramu se skutečným diagramem ze statické zkoušky tahem, s vyznačením bodu na mezi kluzu.



**Obr. 112:** Porovnání indentačního diagramu s tahovým diagramem

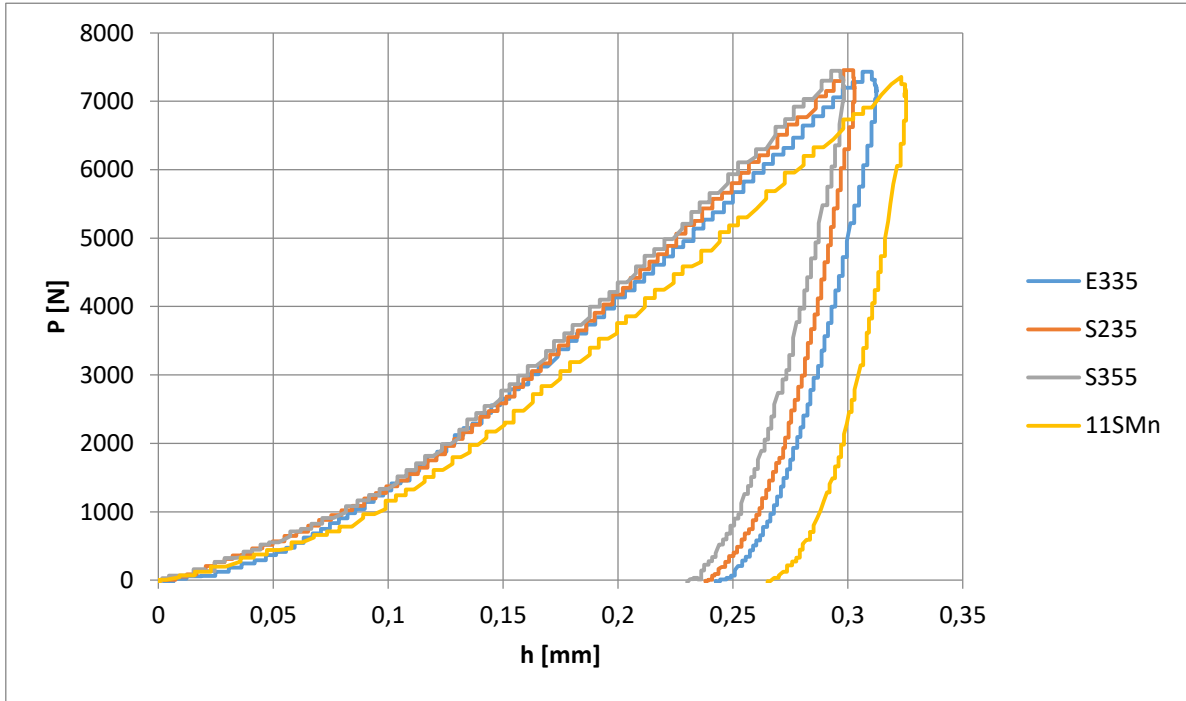
Z uvedeného diagramu lze odečíst mez kluzu materiálu, která v tomto případě bude 415 MPa a mez pevnosti odpovídá 486 MPa.

Na Obr. 113 - 114 jsou uvedené indentační diagramy pro všechny vybrané a odzkoušené materiály.

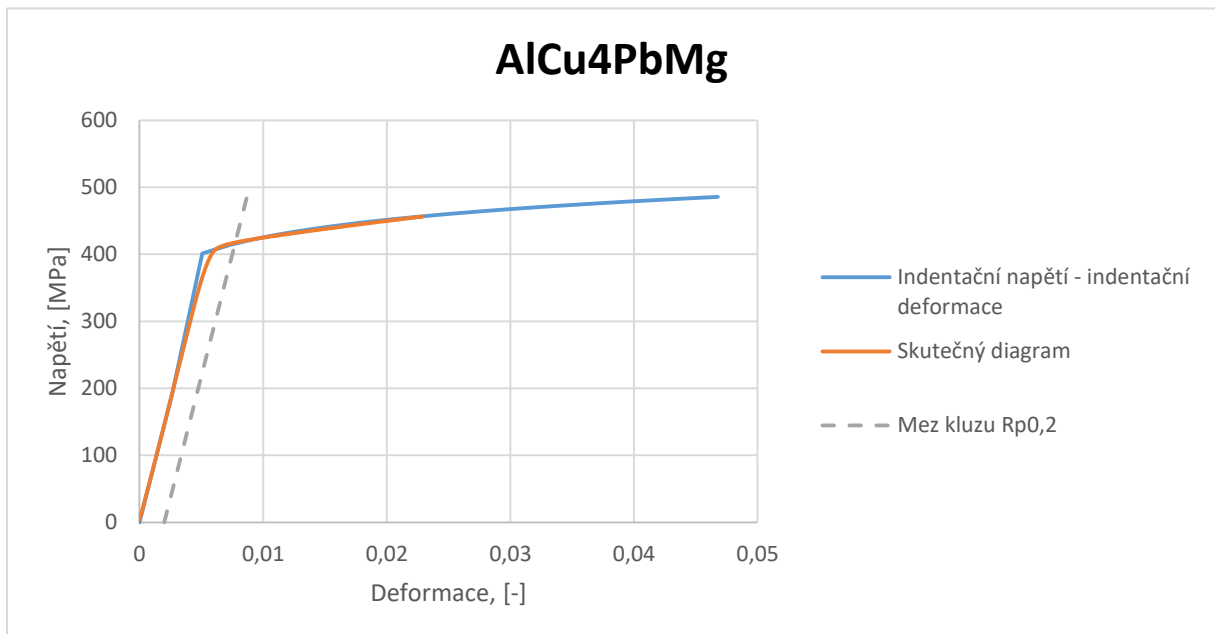


**Obr. 113:** Indentační křivky barevných kovů a slitin

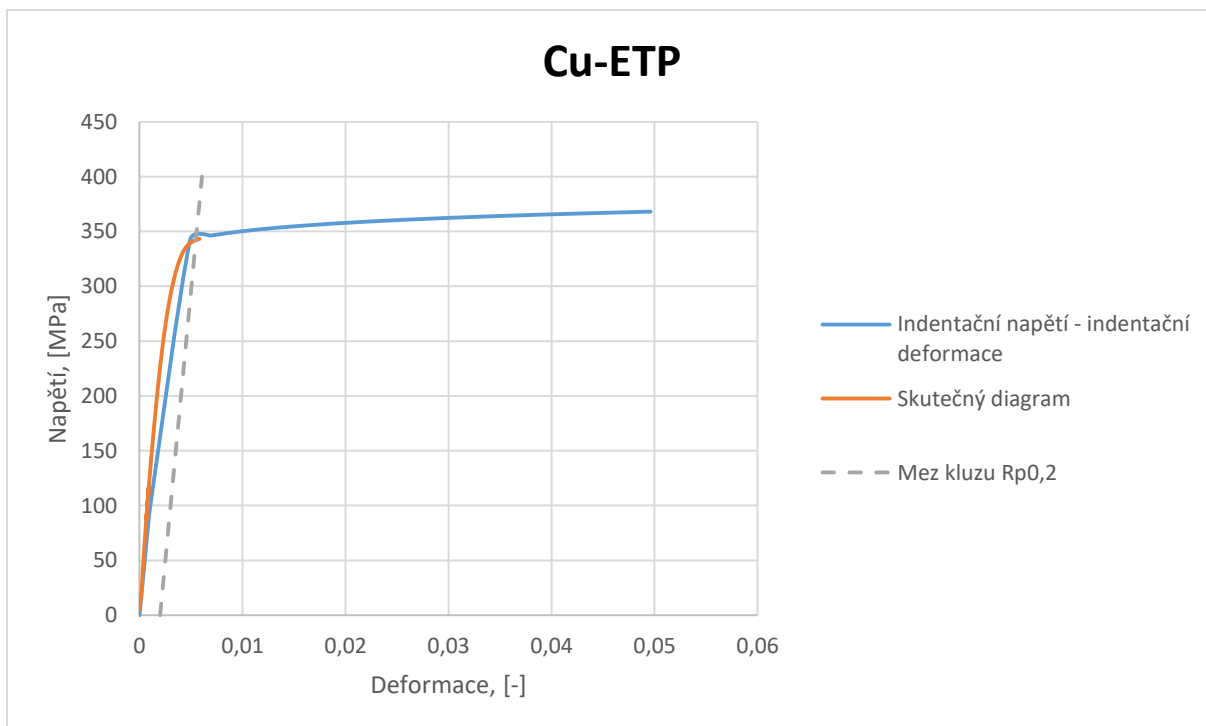
Byly sestrojeny indentační křivky zvlášť pro barevné kovy a jejich slitiny a zvlášť pro ocele. Dále byly výsledky výpočtů porovnány s tahovým diagramem a indentačním měřením.



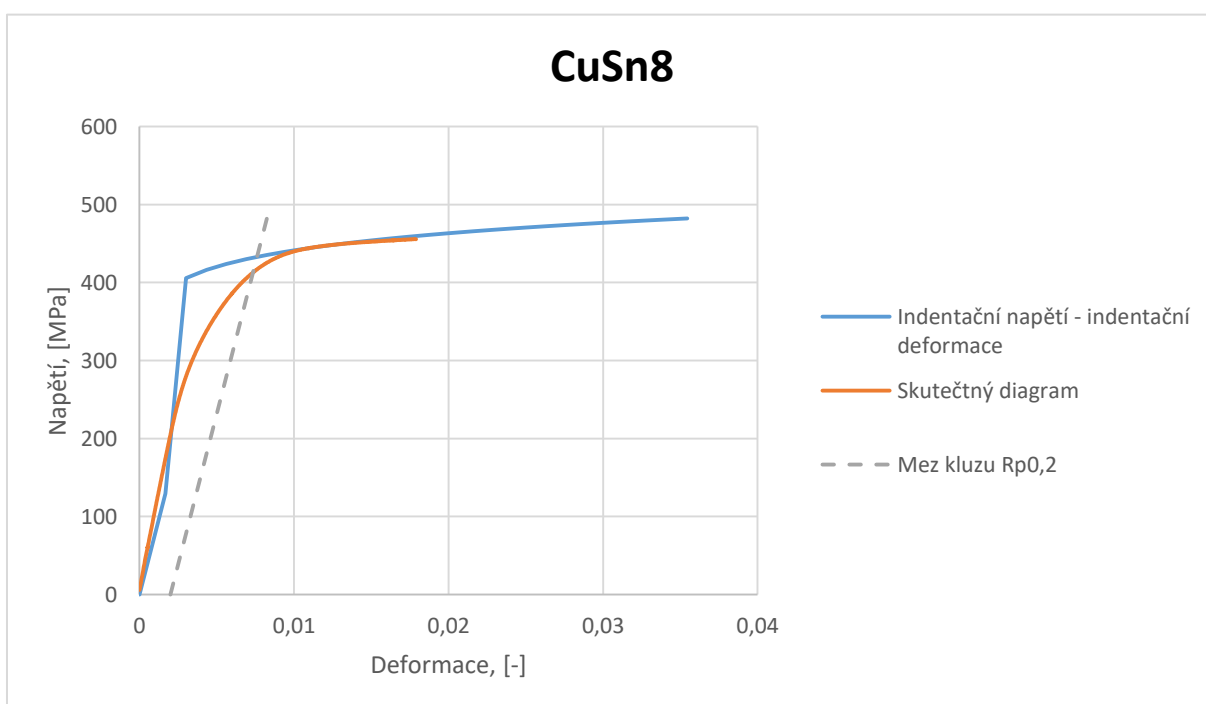
**Obr. 114:** Indentační křivky ocelí



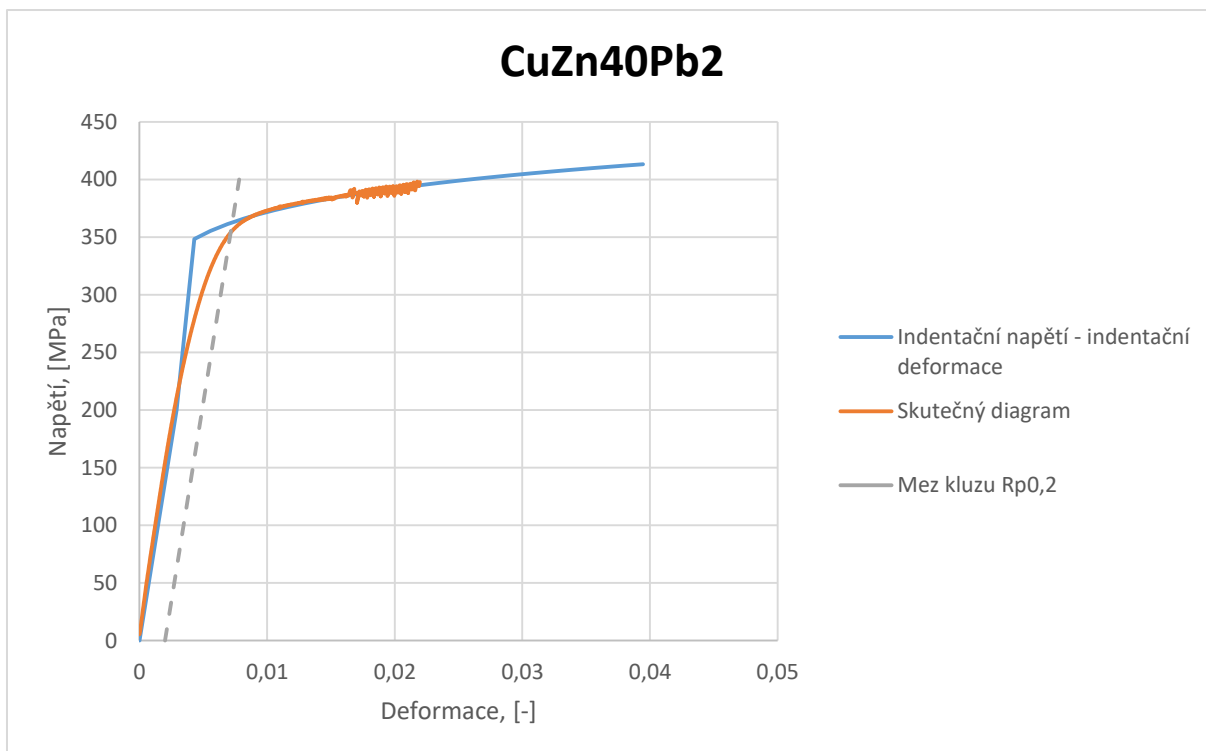
**Obr. 115:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu AlCu4PbMg



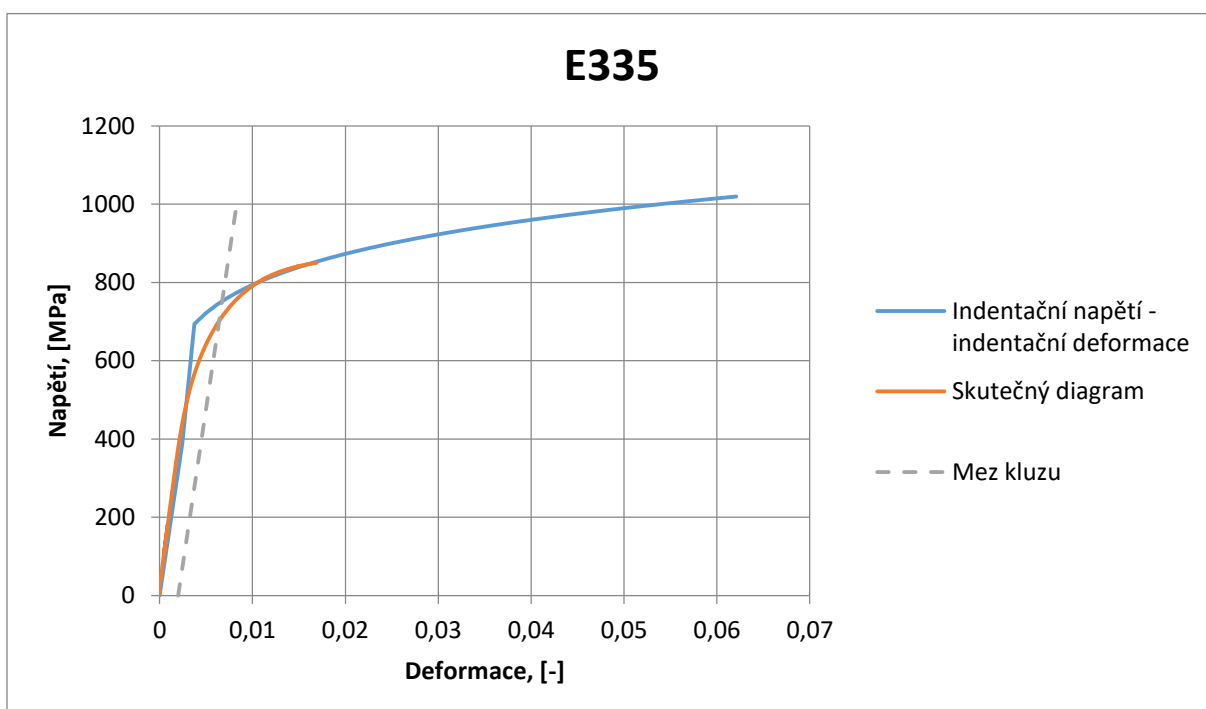
**Obr. 116:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu Cu-ETP



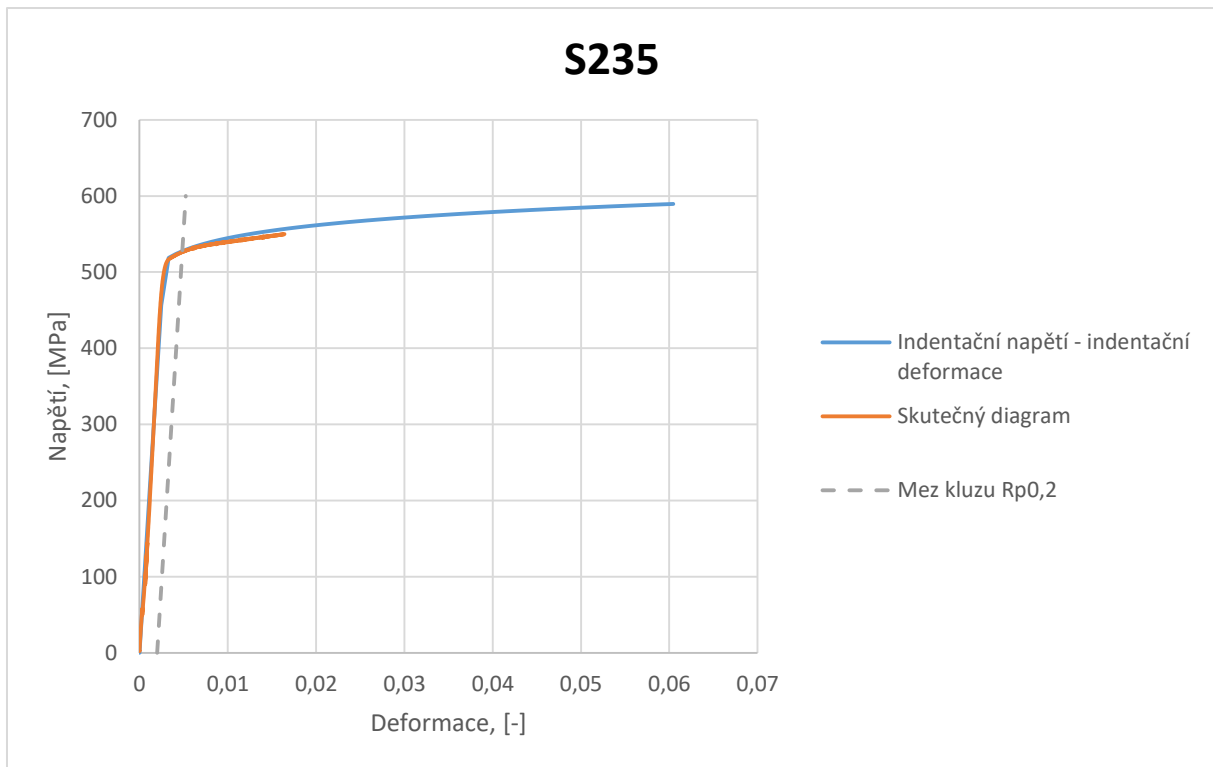
**Obr. 117:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu CuSn8



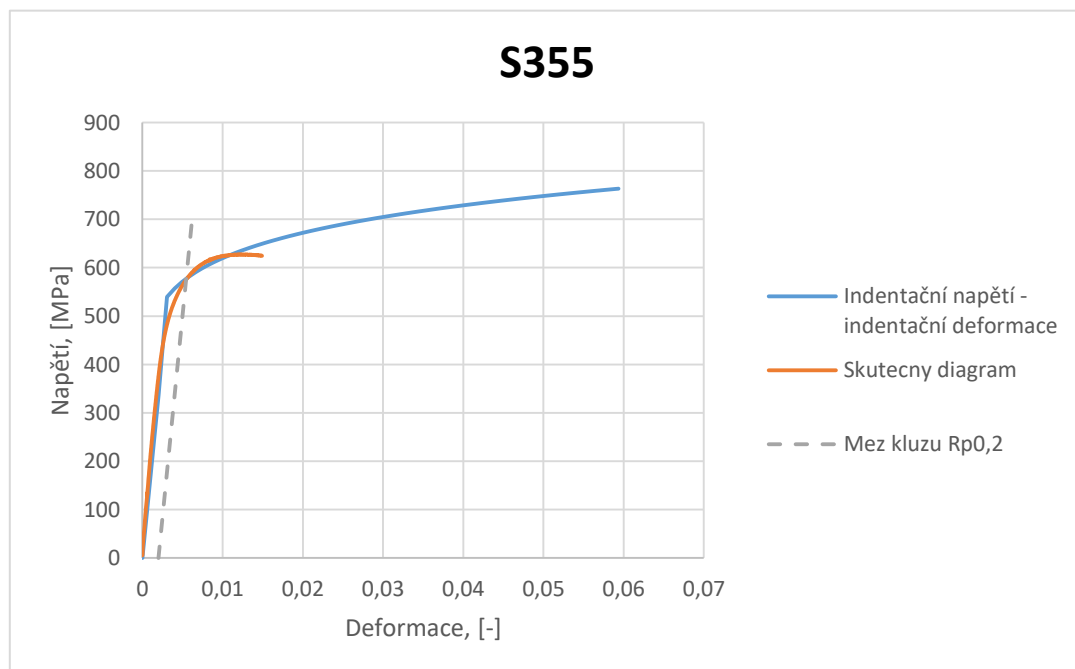
**Obr. 118:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu CuZn40Pb2



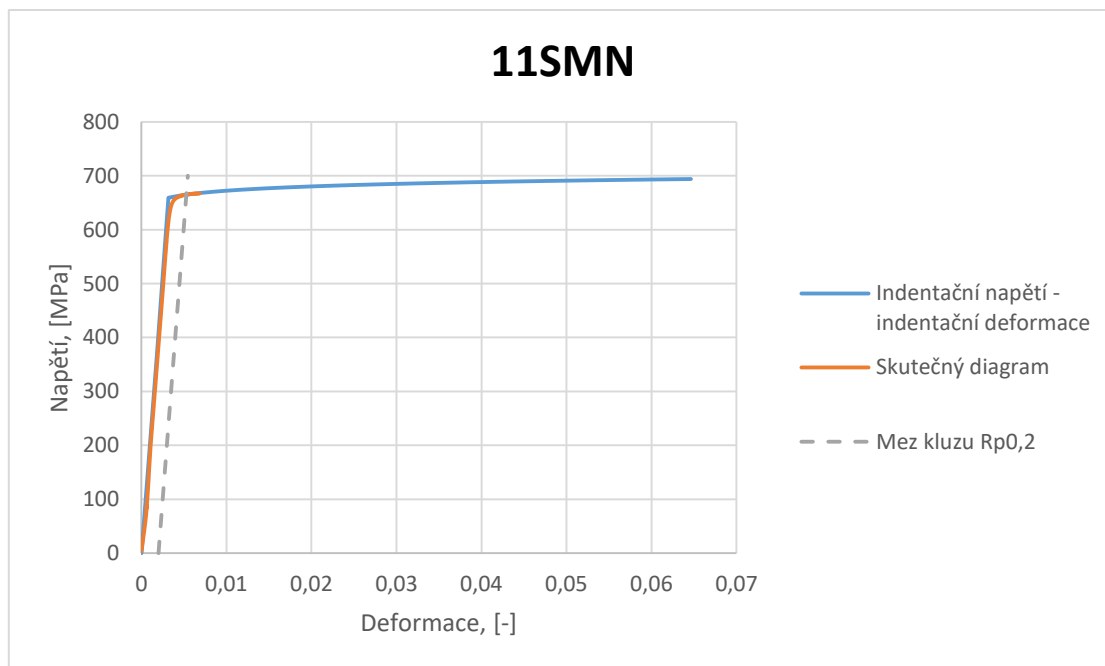
**Obr. 119:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu E335



**Obr. 120:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu S235



**Obr. 121:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu S355



**Obr. 122:** Porovnání indentačního diagramu a tahového (ozn. jako skutečný) diagramu 11SMn30

**Tab. 18** Mechanické vlastnosti různých materiálů odečtené z indentačních diagramů

<i>Materiál</i>	$E_{IT}$ [MPa]	$S$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	HBW
<i>AlCu4PbMg</i>	72 636	80 923	415	486	90
<i>Cu-ETP</i>	98 528	110 569	345	368	78
<i>CuSn8</i>	77 201	86 636	430	482	133
<i>CuZn40Pb2</i>	68 829	77 240	362	413	109
<i>E335</i>	158 830	174 539	743	1020	197
<i>S235</i>	185 392	203 727	525	590	203
<i>S355</i>	166 951	183 463	560	763	210
<i>11SMn30</i>	202 895	222 962	663	694	180

Obr. 115 - 122 a Tab. 14 zobrazují porovnání napětově-deformačních diagramů a jejich získané hodnoty pomocí indentačních zkoušek na EXPIMERu a na trhacím stroji. Toto porovnání verifikuje navrženou metodologii a zkušební zařízení, kterým byly vybrané materiály odzkoušeny.

Pro komplexní obraz o charakteru materiálu (anizotropii) a jeho materiálových vlastnostech lze doplnit získané veličiny zkouškou mikro a nanotvrdosti.

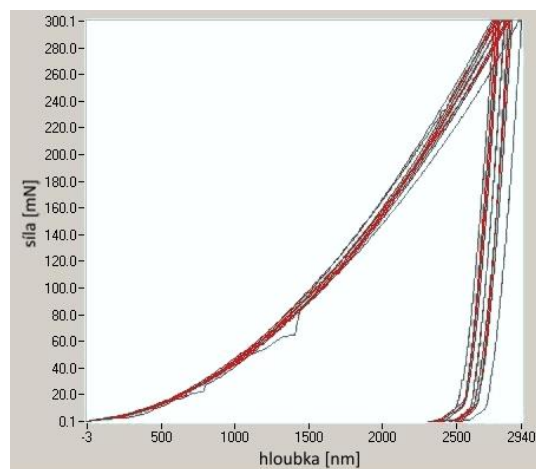


## 20. Zkouška mikrotvrdomosti

Z toho důvodu, že se jedná o materiály s rozdílnou mikrostrukturou, byla vnikací zkouška v měřítku mikro, provedena kvůli zjištění anizotropie vlastností v příčném a podélném směru. Mikroskopické pozorování mikrostruktur prokázalo, že se struktura neshoduje jak v příčném tak podélném směru.

Experiment byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 14577-1. Bylo využito měřicí zařízení NanoTest s indentorem typu Berkovich. Maximální síla byla zvolena 300 mN pro všechny materiály. Rychlost zatěžování a odlehčování byla zvolena 0,625 mN/s. Výdrž na maximálním zatížení byla 10 s.

Každý materiál byl měřený 10× v příčném a 10× v podélném řezu (příklad naměřených hodnot je uveden na Obr. 123), vždy na jedné přímce. Jednotlivé vpichy byly od sebe vzdálené 30 μm. Z naměřených dat byly vypočteny průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky. Dále byly vypočteny průměrné hodnoty zjišťovaných vlastností z obou řezů a směrodatná odchylka těchto hodnot. Mezi zjišťované vlastnosti mikroindentací patří vtisková tvrdost,  $H_{IT}$ , vtiskový modul,  $E_{IT}$ , elastická práce vnikacího procesu,  $W_e$ , a její podíl z celkové práce,  $\eta_{IT}$ , a nakonec plastická část práce vnikacího procesu,  $W_p$ , a její podíl z celkové práce,  $100 - \eta_{IT}$ . Všechny tyto vlastnosti s jejich směrodatnými odchylkami,  $\sigma_{sm}$ , jsou uvedeny v Tab. 15.



*Obr. 123: Indentační křivky CuZn40Pb2 v příčném řezu z mikroindentace*

**Tab. 19** Vtisková tvrdost, redukovaný a vtiskový modul pružnosti měřených materiálů určené pomocí mikroindentace

<i>Materiál</i>	<i>směr měření</i>	$H_{IT}$	$\sigma_{sm}$	$E_{red}$	$\sigma_{sm}$	$E_{IT}$	$\sigma_{sm}$
		[kNmm <sup>-2</sup> ]	[kNmm <sup>-2</sup> ]	[kNmm <sup>-2</sup> ]	[kNmm <sup>-2</sup> ]	[kNmm <sup>-2</sup> ]	[kNmm <sup>-2</sup> ]
<i>AlCu4PbMg</i>	<i>podélný</i>	2,01	0,04	114,6	1,8	102,8	1,6
	<i>příčný</i>	1,96	0,05	101,0	1,7	90,7	1,5
	<b><i>průměr</i></b>	<b>1,98</b>	<b>0,05</b>	<b>107,8</b>	<b>7,0</b>	<b>96,8</b>	<b>6,3</b>
<i>Cu-ETP</i>	<i>podélný</i>	1,90	0,04	164,2	8,4	146,3	7,5
	<i>příčný</i>	1,94	0,11	180,5	8,1	160,9	7,2
	<b><i>průměr</i></b>	<b>1,92</b>	<b>0,09</b>	<b>172,4</b>	<b>11,6</b>	<b>153,6</b>	<b>10,3</b>
<i>CuSn8</i>	<i>podélný</i>	2,95	0,22	153,7	3,1	135,9	2,7
	<i>příčný</i>	2,64	0,27	163,0	2,4	144,2	2,1
	<b><i>průměr</i></b>	<b>2,80</b>	<b>0,29</b>	<b>158,3</b>	<b>5,4</b>	<b>140,0</b>	<b>4,8</b>
<i>CuZn40Pb2</i>	<i>podélný</i>	2,20	0,07	128,3	6,3	114,3	5,7
	<i>příčný</i>	2,10	0,07	128,1	4,6	114,2	4,1
	<b><i>průměr</i></b>	<b>2,15</b>	<b>0,09</b>	<b>128,2</b>	<b>5,5</b>	<b>114,3</b>	<b>4,9</b>
<i>S235JRC</i>	<i>podélný</i>	3,38	0,13	244,2	7,8	223,7	7,1
	<i>příčný</i>	3,21	0,07	253,0	14,1	223,2	13,0
	<b><i>průměr</i></b>	<b>3,29</b>	<b>0,13</b>	<b>248,6</b>	<b>12,2</b>	<b>223,4</b>	<b>11,2</b>
<i>S355J2</i>	<i>podélný</i>	3,30	0,23	241,9	10,7	221,6	9,8
	<i>příčný</i>	3,20	0,26	223,6	8,8	204,8	8,1
	<b><i>průměr</i></b>	<b>3,25</b>	<b>0,25</b>	<b>232,7</b>	<b>13,4</b>	<b>213,2</b>	<b>12,3</b>
<i>11SMn30</i>	<i>podélný</i>	3,51	0,28	236,4	11,0	209,1	9,8
	<i>příčný</i>	3,71	0,13	259,8	8,7	229,8	7,7
	<b><i>průměr</i></b>	<b>3,61</b>	<b>0,24</b>	<b>248,1</b>	<b>15,3</b>	<b>219,4</b>	<b>13,6</b>
<i>E335GC</i>	<i>podélný</i>	4,24	0,40	234,3	14,7	214,7	13,4

<i>příčný</i>	4,13	0,17	233,3	12,1	213,7	11,1
<i>průměr</i>	<b>4,19</b>	<b>0,32</b>	<b>233,8</b>	<b>13,5</b>	<b>214,2</b>	<b>12,4</b>

Touto zkouškou se prokázalo, že vtisková tvrdost se v podélném a příčném řezu výrazněji liší jen u CuSn8 a u ocelí S235JRC a 11SMn30. Naopak téměř shodné jsou u AlCu4PbMg, Cu-ETP a u oceli E335GC. U ostatních materiálů jsou relativně málo rozdílné. Rozdíl v měření je nejvyšší u bronzu, CuSn8, přibližně 10 %, nepatrně nižší je u oceli E335GC. Nejlepší výsledky jsou u slitiny hliníku AlCu4PbMg, a to s chybou přibližně 2 %.

Vtiskový modul je počítán z redukovaného modulu pružnosti podle normy ČSN EN ISO 14577-1. U CuZn40Pb2, S235JRC a E335GC je téměř shodný v obou směrech měření. Další zkoušky ukázaly, že u ostatních materiálů se liší přibližně o 7-10 %. Odchytky při měření vtiskového modulu se pohybují kolem 5 %, nejnižší je opět u slitiny hliníku, přibližně 1,5 %. Uvedené charakteristiky jsou citlivé k detekci směru deformace, například u valcování.

## 21. Závěrečné porovnání výsledků

Na závěr disertační práce byly výsledky jednotlivých materiálových vlastností porovnávány s hodnotami získanými na navrženém zařízení EXPIMER a klasickými stroji, jako jsou trhací stroj, univerzálním tvrdoměr a nanotvrdoměr.

**Tab. 20** Porovnání výsledků neželezné kovy

<i>Parametr</i>	<i>Metoda</i>	<i>AlCu4PbMg</i>	<i>Cu-ETP</i>	<i>CuSn8</i>	<i>CuZn40Pb2</i>
<i>E [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER, E<sub>IT</sub></i>	<i>72 636</i>	<i>98 528</i>	<i>77 201</i>	<i>68 829</i>
	<i>Indentace EXPIMER, S</i>	<i>80 923</i>	<i>110 569</i>	<i>86 636</i>	<i>77 240</i>
	<i>Mikroinden- tace, E<sub>IT</sub></i>	<i>96 800</i>	<i>153 600</i>	<i>140 000</i>	<i>114 300</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>72 845</i>	<i>119 985</i>	<i>106 394</i>	<i>69 026</i>
<i>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>415</i>	<i>345</i>	<i>430</i>	<i>362</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>419</i>	<i>340</i>	<i>400</i>	<i>344</i>
<i>R<sub>m</sub> [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>486</i>	<i>368</i>	<i>482</i>	<i>413</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>480</i>	<i>345</i>	<i>504</i>	<i>413</i>
<i>HBW</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>90</i>	<i>78</i>	<i>133</i>	<i>109</i>
	<i>Zkouška tvr- dosti</i>	<i>121</i>	<i>92,5</i>	<i>140</i>	<i>121</i>

**Tab. 21** Porovnání výsledků ocelí

<i>Parametr</i>	<i>Metoda</i>	<i>E335GC</i>	<i>S235JRC</i>	<i>S355J2</i>	<i>11SMn30</i>
<i>E [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER, E<sub>IT</sub></i>	<i>158 830</i>	<i>185 392</i>	<i>166 951</i>	<i>202 895</i>
	<i>Indentace EXPIMER, S</i>	<i>174 539</i>	<i>203 727</i>	<i>183 463</i>	<i>222 962</i>
	<i>Mikroin- dentace, E<sub>IT</sub></i>	<i>214 200</i>	<i>223 400</i>	<i>213 200</i>	<i>219 400</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>208 212</i>	<i>214 327</i>	<i>201 466</i>	<i>224 425</i>
<i>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>743</i>	<i>525</i>	<i>560</i>	<i>663</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>684</i>	<i>523</i>	<i>582</i>	<i>660</i>
<i>R<sub>m</sub> [MPa]</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>1020</i>	<i>590</i>	<i>763</i>	<i>694</i>
	<i>Tahová zkouška</i>	<i>852</i>	<i>549</i>	<i>637</i>	<i>664</i>
<i>HBW</i>	<i>Indentace EXPIMER</i>	<i>197</i>	<i>203</i>	<i>210</i>	<i>180</i>
	<i>Zkouška tvrdosti</i>	<i>201</i>	<i>174</i>	<i>211</i>	<i>186</i>

Materiály pro experiment byly vybírány z pohledu velkého rozdílu mikroskopických charakteristik (odlišné mikrostruktury). Z toho důvodu byly zvoleny oceli a slitiny neželezných kovů.

Navrženou metodiku lze uplatnit i pro jiné materiály, ale vzhledem k rozsahu práce byly uvedeny jen některé ze slitin nejvíce frekventovaných ve strojírenství.

## 22. Důsledky pro vědu a praxi

V disertační práci je popsáno jakou historií a vývojem prošla myšlenka o způsobu stanovení mechanických vlastností materiálů na základě parametrů vtlačování indentoru. Základní kameny tohoto oboru byly položeny ještě Henrichem Hertzem na konci XXI století. Od této doby prošel výzkum dlouhým řetězcem poznání. Mnoho významných vědců XX století, také vidělo v aplikaci indentačních metod velký potenciál. Patří mezi ně hlavně Ishlinsky, Tabor, Johnson. V současnosti v tomto směru materiálového inženýrství existuje velké množství metodologických postupů jak zpracovávat indentační výsledky a jak pomocí vtlačování indentoru stanovit mechanické vlastnosti materiálů. Většinou jsou takové postupy přímo navázané na konkrétní podmínky prováděných zkoušek nebo na konkrétní zařízení.

V rámci disertační práce byl proveden rozbor existujících způsobů a metodik stanovení mechanických vlastností pomocí vtlačování kulového indentoru. Na základě tohoto rozboru je zřejmé co bylo dosud zpracováno a na co je potřeba se v budoucnosti ještě soustředit. Navržená metodologie výpočtu mechanických vlastností zahrnuje poznatky z teoretických pramenů a vlastní studie. Je flexibilní což umožňuje její použití při vyhodnocování jakýchkoliv indentačních výsledků. V disertační práci byla v plném rozsahu využívána a uplatněná metoda konečných prvků (MKP). Pomocí MKP modelu lze poměrně přesně stanovit, jakým způsobem bude distribuované napětíovo-deformační pole ne jen ve zkoušeném materiálu, ale i ve funkční oblasti indentoru. Výpočet funkce  $F(E, P, \Delta)$ , pomocí metody MKP, lze použít při korekci indentačních křivek, v důsledku elastické deformace indentoru. Navržené zařízení spolu se softwarem, může být v plném rozsahu využito při vědecko-výzkumné práci, od návrhu nových materiálů a technologických procesů (tepelné zpracování, obrábění, svařování atd.) až po běžné mechanické testy pro hodnocení strojírenských materiálů.

Navržená metodologie a nové indentační zařízení (patentované v průběhu řešení DP) najde v průmyslové praxi široké uplatnění. Přínos disertační práce lze spatřovat v rychlé a nedestruktivní metodě stanovování mechanických vlastností.

Vzhledem k tomu, že v praxi vždy existují rizika spojená se záměnou a nevhodným použitím materiálů, je výrobce nucen stále hledat řešení jak je minimalizovat. Ve většině případů se výrobci musí splehnout na dodavatele a použít materiál, který je deklarovaný na základě dodacích listů a případně atestů. Ale v technické praxi a okolo nás je mnoho případů, že až ve výrobku se zobrazí nevhodnost navržených materiálů nebo jejich záměna, což vede k velkým ekonomickým ztrátám. Například v dopravě, letectví, kosmonautice, jaderné energetice si chyby nelze dovolit. Využití nedestruktivních indentačních metod s výpočtovým modelováním otevírá nový směr ve zkoušení materiálů, šetří náklady a lze předpokládat spolehlivé výsledky.



## Závěr

Cíle dizertační práce byly splněny v celém rozsahu. Dizertační práce vycházela z podrobné rešerše literárních zdrojů od experimentů Henricha Hertze na konci XXI století do současnosti. Byl prostudován vývoj měření tvrdosti, elastické, elasticko – plastické a plastické chování zkoušeného materiálu během procesu indentace. Z dostupných publikací byly analyzovány existující metodiky výpočtů mechanických vlastností materiálu na základě indentačních experimentů a principy, na základě, kterých fungují přístroje pro realizaci podobného druhu měření. Ze získaných poznatků a zhodnocení kladů a záporů existujících metodik výpočtů mechanických vlastností a konstrukcí přístrojů, byla vypracovaná vlastní předložená koncepce, *měření indentačních parametrů*. V této nové koncepci byla uplatněna analýza deformačně-napěťových stavů metodou konečných prvků (MKP) na základě, které byly prokázány všechny výhody návrhu. Toto nové řešení umožnilo lepší představu o odezvě struktury materiálu na silové působení indentoru, které bylo zkoumáno pomocí mikroskopických metod.

Souhrn všech poznatků posloužil pro návrh vlastní metodologie výpočtu mechanických vlastností na základě indentačních dat a *pro vývoj a výrobu nového měřicího systému EXPIMER*. Toto zařízení dovoluje jedním rychlým, jednoduchým měřením zjistit modul pružnosti, koeficient a exponent deformačního zpevnění, mez pevnosti, mez kluzu, energii elastické a plastické deformace. Dizertační práce představuje měření na nově vyvinutém zařízení na 8 vybraných strojírenských materiálech (3 typy slitin barevných kovů, elektrolytická měď a 4 druhy konstrukční oceli), u kterých byla provedena jak chemická, tak podrobná mikrostrukturní analýza. Hodnoty materiálových vlastností získané z indentačních měření byly následně porovnány se standardními testy (statická zkouška tahem, zkouška tvrdosti podle Brinella, zkouška mikroindentace), které byly provedeny na kalibrovaných přístrojích podle odpovídajících norem. Výsledky získané indentačním zařízením EXPIMER v tomto srovnávání, prokázaly velmi dobrou shodu a v některých případech byly identické.

Na základě získaných výsledků experimentů, lze hodnotit možnosti indentačních zkoušek podle předložené metodiky na zařízení EXPIMER, jako potenciální pro technickou aprobaci a jeho budoucí uplatnění v průmyslových podmínkách. Toto bylo prokázáno vyjádřením zájmu o uvedenou technologii měření společností MODELÁRNA LIAZ s.r.o. (viz Příloha).

Závěrem lze konstatovat, že navržená indentační zkouška (v porovnání z literárními zdroji), poskytuje objektivní výsledky stanovených mechanických vlastností materiálů. Nevyužívá se pouze jediná hodnota tvrdosti při daném zatížení, ale celý průběh zaznamenaných parametrů z procesu zatěžování a odlehčování, vynesené do grafické závislosti zatížení - hloubka vtisku.

Z řešení dizertační práce lze závěrem vyzvednout několik zásadních poznatků: Přesnost měření lineárního posuvu indentoru závisí na citlivosti snímače indentační hloubky, jež má svoje rozlišení a umožňuje záznam určitého konečného počtu hodnot při daném posuvu. Problematika přesnosti záznamu malých posuvů indentoru se řeší obvykle pomocí laserové optiky nebo elektromagnetickým systémem. Celková přesnost měření závisí nejen na diskrétnosti zaznamenaných veličin, ale také na vzdálenosti snímače od indentoru.

V současnosti větší počet konstrukčních prvků používaných mezi snímačem a indentorem zvětšuje chybu měření. To se dá vysvětlit tím, že samotné měření je ovlivněno napěťově-deformačními stavy těchto prvků v závislosti na zatěžovacích podmínkách, počtu cyklů a na atmosférických parametrech provozu, zejména tlaku, teplotě a vlhkosti. Snímač posuvu, současně používaných přístrojů, je často součástí zatěžovacího mechanismu, čímž se během indentace komplikuje proces korektní interpretace výsledků.

Nevýhody současně známých a používaných indentačních hlavic a instrumentovaných měřících systémů, využívaných pro měření mechanických vlastností materiálů indentační metodou, spočívají především v tom, že zcela neodstraňují vliv deformace součástí z hodnot měření posuvu vyvolané působením zatěžující síly. V současnosti není zařízení, které by s dostatečnou přesností a reproduk-

vatelností výsledků, umožnilo zkoušení materiálů výrobků nedestruktivní metodou ve velkém rozsahu zatěžovací síly, např. od 1N do 35kN, a které by mělo zároveň malé rozměry a hmotnost a současně by umožňovalo připojení k různým zatěžovacím mechanismům i s ruční aplikací. Je důležité, aby takové zařízení bylo kompaktní s účinnou ochranou všech citlivých senzorů tak, aby mohlo zařízení být využitelné i v simulovaném prostředí a odolávalo nešetrnému zacházení.

Běžně používané indentační mechanismy se nedají aplikovat kvůli různým restrikcím z vnějších příčin, jako jsou:

- Malý objem materiálu, ze kterého se nedají připravit standardní vzorky,
- Malý časový limit, na rychlou orientaci v materiálových vlastnostech a následné změny některých operací v technologickém procesu,
- Složitý tvar konstrukce nebo výrobku, na kterém je potřeba zjistit distribuci mechanických vlastností.

V instrumentovaných měřících systémech, založených na indentační metodě, je důležitá rozlišovací schopnost používaných snímačů a přesnost jimi měřených hodnot lineárního posuvu indentoru, odpovídajícího hloubce vnikání indentoru a také působící síly v průběhu zatížení.

Při novém návrhu indentačního zařízení, bylo nutné brát v úvahu i to, že přesnost měření těchto parametrů může být ovlivněna řadou faktorů, jako například: umístění snímače v těle zařízení, jeho vzdálenost od indentoru a počet dalších prvků mezi nimi. Kromě toho napětově-deformační stavy indentoru a ostatních prvků také ovlivňují vlastní měření v závislosti na zatěžovací síle, počtu cyklů zatížení - odlehčení. Uvažovat ve výpočtech s tak velkým počtem proměnných bylo velmi náročné a obtížné i s použitím MKP modelování celé soustavy.

Nevýhody popsaných instrumentovaných zařízení pro indentační metody spočívají v tom, že senzor pohybu je umístěn mimo osu zatížení a tím i osu indentoru. Některé z nich obsahují i další namáhané části mezi indentorem a senzorem pohybu, což limituje rozsah používaných zatížení.

Všechny zmíněné nevýhody jsou v této práci odstraněny patentovaným návrhem, který popisuje indentační hlavici, obsahující jak snímač posuvu opatřený deformačním páskem s tenzometrem a tyčí umístěnou mezi ním a indentorem, tak snímač zatížení (siloměr) opatřený válcem s deformačními pásky a tenzometry. Výhodou popisovaných snímačů je násobení deformace deformačních pásků, umožňující větší rozsah a tím i rozlišení měřeného signálu. Nicméně to, že snímače posuvu a zatížení obsahují deformační prvky, které jsou navíc mezi sebou spojené mechanicky, může ovlivnit stabilitu generovaného signálu a celkový výsledek měření.

Navržené a patentované indentační zařízení, představené v předložené disertační práci, všechny výše uvedené nedostatky eliminuje a odstraňuje. Verifikace získaných materiálových vlastností indentační metodou, byla provedena porovnáním naměřených hodnot získaných z klasického zkoušení na jednoúčelových zkušebních zařízeních.

## SEZNAM LITERATURY

[1] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. *Systém instrumentovaného měření parametrů vtlačování indentoru*. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42, G 01 N 3/44. Česká republika. Patentový spis 304637. 02.07.2014.

[2] ČSN 42 0379. *Zkoušení kovů. Porovnávací tabulky tvrdosti pro ocel*. 1965

[3] GOST 22761-77. *Metals and alloys. Brinell test by static action portable hardness meters*. 1977

[4] DIN 50150:1976-12 *Testing of Steel and Cast Steel; Conversion Table for Vickers Hardness, Brinell Hardness, Rockwell Hardness and Tensile Strength*. 1976

[5] USA ASTM E140 - 12be1. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. 1997

[6] R. Hill. *The mathematical Theory of Plasticity*. Oxford: Clarendon Press, 1998, 355p. ISBN 0 19 850367 9

[7] D. Tabor. *The Hardness of Metals*. Oxford: Clarendon Press, 1951, 177 p.

[8] K. L. Jonson. The correlation of indentation experiments. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1970, Vol. 18, p. 115

[9] K. L. Jonson. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, 453 p. ISBN 0 521 25576 7

[10] A. J. Ishlinsky. The axi-symmetrical problem in plasticity and the Brinell test. *PMM*, 1944, Vol. 8, pp. 201-224.

[11] H. Hertz. Über die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of elastic solids). *Journal reine und angewandte Mathematik*, 1882, Vol. 92, pp. 156—171.

[12] H. Hertz. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Här-

te (On the contact of rigid elastic solids and on hardness). *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, Leipzig*, 1882.

[13] S. M. Walley. Historical origins of indentation hardness testing. *Materials Science and Technology*, 2012, Vol. 28, Issue 9–10, pp. 1028 – 1044.

[14] F. C. Calvert, R. Johnson. On the hardness of metals and alloys, *Philosophical Magazine*, 1859, Vol. 17.

[15] J.A.Brinnell. *II Congres Int des Methodes d'essai*. Paris, 1900, p. 176

[16] ČSN EN ISO 6506-1 (420359). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. 2015

[17] A. Martens. *Handbuch der Materialenkunde*. Berlin: Springer, 1898.

[18] E. Mayer. Untersuchungen über Härteprüfung und Härte. *Z. Ver. Dtsch Ing.*, 1908, Vol. 52, pp. 645–654.

[19] G. H. Clamer, A. E. Outerbridge, Jr, A. W. Allen, W. H. Wahl. Ballentine's process of testing the hardness and density of metals, *J. Franklin Inst.*, 1908, Issue 166, pp. 447–451.

[20] *Hardness tester*. Původce vynalezu: H. M. Rockwell, S. P. Rockwell. Publication info: US 1294171, 1919.

[21] SHORE INSTR & MFG CO. *Apparatus for measuring the hardness of materials*. Původce vynalezu: A. F. SHORE, CH. P. SHORE. Publication info: US 1770045, 1930.

[22] T. F. Russell. *Journal Iron and Steel Institut*, roč. 2, 1918.

[23] M.S. Drozd. *Měření mechanických vlastnosti kovů bez porušení*. Moskva: Strojirenství, 1985. (originál v ruštině).

[24] B. I. Pilipchuk. *Přehled teorií tvrdosti*. Standartgiz, 1962. (originál v ruštině).

[25] R. F. Bishop, R. Hill and N. F. Mott. The theory of indentation and hardness tests, *Proc. Phys. Soc.*, 1945, Vol. 57, p. 147–159.

[26] S. I. Bulychev, V. P. Alehin. *Zkoušení materiálů nepřetržitým vtlačováním indentoru*. Moskva: Strojirenství, 1990. s.224. (originál v ruštině).

- [27] M. T. Huber. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. *Ann. Phys.*, 1904, Vol. 14, p. 153–163
- [28] B. R. Lawn. Hertzian Fracture in Single Crystals with the Diamond Structure. *Journal of Applied Physics*, 1968, Vol. 39, Issue 10, p. 4828 – 4836.
- [29] B. Lawn, R. Wilshaw. Review Indentation fracture: principles and applications. *Journal of Materials Science*, 1975, Vol. 10, p. 1049 – 1081.
- [30] A. N. Dinnik. *Vybrané práce. Kniha 1*. Kiev: Nakladatelství AV USSR, 1952. (originál v ruštině).
- [31] I. Shtaerman. Kontaktní úloha teorii elasticity. Moskva – Leningrad: Gostechizdat, 270 s. (originál v ruštině).
- [32] Yu. V. Kolesnikov, E. M. Morozov. *Contact fracture mechanics*. Moscow: Nauka, 1989. 219 p. (originál v ruštině).
- [33] J. R. Rice. Plane strain slip line theory for anisotropic rigid/plastic materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 1973, Vol. 21, pp. 63 - 74.
- [34] R. M. Jones. *Deformation Theory of Plasticity*. Bull Ridge Publishing, 2009, 640 p. ISBN 978-0-9787223-1-9
- [35] D. Tabor. A simple theory of static and dynamic hardness. *Proceedings of The Royal Society*, 1948, Vol. 192, pp. 247-274.
- [36] D. M. Marsh. Plastic flow in glass. *Proceedings of The Royal Society*, 1964, Vol. 279, Issue 1378, pp. 420-435.
- [37] K. L. Johnson. Non-Hertzian contact of elastic spheres. *The Mechanics of Contact between Deformable Bodies*, Eds. de Pater & Kalker, Delft: University Press, 1975. p. 26.
- [38] P. D. Netjagov, V. V. Izmajlov. Elasto-plastický kontakt jedinečné nerovnosti. *Izv. vuzov. Strojirenství*. 1975 č.5, s.16-20 (originál v ruštině)
- [39] K. L. Johnson. Reversed plastic flow during the unloading of a spherical indenter. *Nature*, 1963, Vol. 199, Issue 4899, p. 1282.
- [40] M. S. Drozd, A. P. Osipenko. Analytické sledování napěťového stavu při pronikání elastické sféry do elasticko-plastického prostoru. *Metallovedenie i*

*prochnost metallov. Nauchnye trudy Volgogradskogo politehnicheskogo instituta.* 1976, č.8, s.58-68 (originál v ruštině)

[41] C. Hardi, C. N. Baronet, G. V. Tordion. The elastic-plastic indentation of a half-space by a rigid sphere. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* 1971, Vol. 3, pp. 451-462

[42] M. G. Show, G. J. De Salvo. On the plastic flow beneath a blunt axis-symmetric indenter. *Trans. ASME: J. Eng. Ind.* 1970, Vol. 92, Issue 2, pp.480-493.

[43] L. M. Kramskoj, A. S. Fedorov. Úloha o vtlačování elastické koule do čela elasticko-plastického válce. *Mehanika sterzhnevnyh sistem i sploshnyh sred.* Leningrad: LISI, 1980, s.5-7 (originál v ruštině)

[44] M.B. Bakirov, M. A. Zajcev, I. V. Frolov. Matematické modelování procesu vtlačování sféry do elasticko-plastického prostoru. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov.* 2001, č.1, s. 37-47 (originál v ruštině)

[45] M.B. Bakirov, V. V. Potapov. Fenomenologická metoda stanovení mechanických vlastnosti oceli skříní atomových reaktoru podle diagramu vtlačování kulového indentoru. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov.* 2000, č.12, s. 35-44 (originál v ruštině)

[46] M. B. Bakirov, O. A. Mishulina, I. A. Kiselev, I. A. Kruglov. Průzkum možnosti stanovení deformačních diagramů pomocí neuronových sítí. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov.* 2010, č.7, s. 42-47 (originál v ruštině)

[47] S. Biwa, B. Storakers, An analysis of fully plastic Brinell indentation, Elsevier Science Ltd., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 43, No. 8, pp. 1303-1333, 1995

[48] B. Taljat, T. Zacharia, F. Kosel, New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data, Elsevier Science Ltd, *Int. J. Solids Structures* Vol. 35, No. 33, pp. 4411-4426, 1998

[49] N. Huber, Ch. Tsakmakis, Determination of constitutive properties from spherical indentation data using neural networks Part I: the case of pure kinema-



tic hardening in plasticity laws, Elsevier Science Ltd., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47, 1999, pp. 1569-1588.

[50] N. Huber, Ch. Tsakmakis Determination of constitutive properties from spherical indentation data using neural networks Part II: plasticity with nonlinear isotropic and kinematic hardening, Elsevier Science Ltd., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47, 1999, pp. 1589-1607.

[51] N. Huber, Ch. Tsakmakis, A finite element analysis of the effect of hardening rules on the indentation test, *J. Eng. Mat. Tech.*, 120, 1998, pp. 143-148

[52] N. Huber, Ch. Tsakmakis, Experimental and theoretical investigation of the effect of kinematic hardening on spherical indentation, *Mech. Mat.*, 27, 1998, pp. 241-248

[53] A. Nayebi, R. El Abdi, O. Bartier, G. Mauvoisin, New procedure to determine steel mechanical parameters from the spherical indentation technique, Elsevier Science Ltd., *Mechanics of Materials*, 34, (2002), p.243–254

[54] Yan Ping Cao, Jian Lu, A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve, Elsevier Ltd., *Acta Materialia*, 52, (2004), p.4023–4032

[55] M. Dao, N. Chollacoop, K. J. Van Vliet, T. A. Venkatesh, S. Suresh, Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation, *Acta Mater.*, 49, (2001), p. 3899

[56] Hyungyil Lee, Jin Haeng Lee, George M. Pharr, A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation, Elsevier Ltd., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, (2005), p.2037–2069

[57] H. Habbab, B.G. Mellor, S. Syngellakis, Post-yield characterisation of metals with significant pile-up through spherical indentations, Elsevier Ltd., *Acta Materialia*, 54, (2006), p.1965–1973

[58] J.-M. Collin, G. Mauvoisin, R. El Abdi, An experimental method to determine the contact radius changes during a spherical instrumented indentation, Elsevier Ltd., *Mechanics of Materials*, 40, (2008), p.401–406

[59] Jean-Marc Collin, Gérard Mauvoisin, Philippe Pilvin, Rochdi El Abdi, Use of spherical indentation data changes to materials characterization based on a new multiple cyclic loading protocol, Elsevier B.V., *Materials Science and Engineering, A* 488, (2008), p.608–622

[60] Y.F. Gao, H.T. Xu, W.C. Oliver, G.M. Pharr, Effective elastic modulus of film-on-substrate systems under normal and tangential contact, Elsevier Ltd., *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56, (2008), p.402–416

[61] Akio Yonezu, Yoshiki Kuwahara, Keishi Yoneda, Hiroyuki Hirakata, Kohji Minoshima, Estimation of the anisotropic plastic property using single spherical indentation—An FEM study, Elsevier B.V., *Computational Materials Science*, 47, (2009), p.611–619

[62] Jiang Qin, Shaoxing Qu, Xue Feng, Yonggang Huang, Jianliang Xiao, Keh-Chih Hwang, A numerical study of indentation with small spherical indenters, AMSS Press, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 22, No. 1, February, 2009

[63] Nagahisa Ogasawara, Norimasa Chiba, Xi Chen, A simple framework of spherical indentation for measuring elastoplastic properties, Elsevier Ltd., *Mechanics of Materials*, 41, (2009), pp.1025–1033

[64] O. Casals, S. Forest, Finite element crystal plasticity analysis of spherical indentation in bulk single crystals and coatings, Elsevier B.V., *Computational Materials Science*, 45, (2009), p.774–782

[65] J. Alcalá, D. Esqué-de los Ojos, Reassessing spherical indentation: Contact regimes and mechanical property extractions, Elsevier Ltd., *International Journal of Solids and Structures*, 47, (2010), p.2714–2732

[66] Jin Haeng Lee, Taehyung Kim, Hyungyil Lee, A study on robust indentation techniques to evaluate elastic–plastic properties of metals, Elsevier Ltd., *International Journal of Solids and Structures*, 47, (2010), p.647–664

[67] Olivier Bartier, Xavier Hernot, Gérard Mauvoisin, Theoretical and experimental analysis of contact radius for spherical indentation, Elsevier Ltd., *Me-*

chanics of Materials, 42, (2010), p.640–656

[68] Wenyi Yan, Chung Lun Pun, Spherical indentation of metallic foams, Elsevier B.V., Materials Science and Engineering, A 527, (2010), p. 3166–3175

[70] Fuping Yuan, Ping Jiang, Jijia Xie, Xiaolei Wu, Analysis of spherical indentation of materials with plastically graded surface layer, Elsevier Ltd., International Journal of Solids and Structures, 49, (2012), p. 527–536

[71] Jean-Marc Collin, Correction factor for contact radius in spherical indentation measurements, Elsevier Ltd., Volume 50, July 2012, Pages 47–52

[72] Jean-Marc Collin, Gérard Mauvoisin, Olivier Bartier, Rochdi El Abdi, Philippe Pilvin, Experimental evaluation of the stress–strain curve by continuous indentation using different indenter shapes, Elsevier B.V., Materials Science and Engineering, A 501, (2009), p. 140–145

[73] Jin Haeng Lee, Dongkyu Lim, Hongchul Hyun, Hyungyil Lee, A numerical approach to indentation technique to evaluate material properties of film-on-substrate systems, Elsevier Ltd., International Journal of Solids and Structures, 49, (2012), p.1033–1043

[74] Minh-Quy Le, Material characterization by instrumented spherical indentation, Elsevier Ltd., Mechanics of Materials, 46, (2012), p.42–56

[75] Minh-Quy Le, A computational study on the instrumented sharp indentations with dual indenters, Elsevier Ltd., International Journal of Solids and Structures, 45 (10), (2008), p. 2818–2835

[76] Minh-Quy Le, Material characterization by dual sharp indenters, Elsevier Ltd., International Journal of Solids and Structures, 46, (2009), p.2988–2998

[77] Petr Haušild, Aleš Materna, Jiří Nohava, On the identification of stress–strain relation by instrumented indentation with spherical indenter, Elsevier Ltd., Materials and Design, 37, (2012), p. 373–378

[78] Salmon M. Kalkhoran, W. Brian Choi, Andrew Gouldstone, Estimation of plastic anisotropy in Ni–5% Al coatings via spherical indentation, Elsevier Ltd., Acta Materialia, 60, (2012), p.803–810

[79] Anthony C. Fischer-Cripps, *Nanoindentation*, Springer-Verlag New York, 2004, 264 p., ISBN 978-0-387-22045-1

[80] Hernot, X., Bartier, O., Bekouche, Y., Mauvoisin, G., El Abdi, R., 2006. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation. *Int. J. Solids Struct.* 43, pp. 4136–4153.

[81] Kim, S.H., Lee, B.W., Choi, Y., Kwon, D., 2006. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials - a FEM study. *Mater. Sci. Eng. A* 415, 59–65 pp.

[82] DUŠEK, Jiří. Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI [online]. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně, přírodovědecká fakulta. Školitel Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc. [cit. 5. 3. 2017]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/40981/prif\\_d/](https://is.muni.cz/th/40981/prif_d/)

[83] ČSN EN ISO 14577-1 Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2016.

[84] OLIVER, W. C., PHARR, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [online]. *Journal of Material Research*, Vol. 7, No. 4, 1992, pp. 1564-1583. [cit. 29. 6. 2017]. Dostupné z: [http://web.mit.edu/cortiz/www/3.052/3.052CourseReader/45\\_OliverPharr1992Nanoindentation.pdf](http://web.mit.edu/cortiz/www/3.052/3.052CourseReader/45_OliverPharr1992Nanoindentation.pdf)

[85] STRATIL, Pavel. Analysis of instrumented indentation [online]. Brno, 2009 [cit. 10. 3. 2017]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/53442/prif\\_m/](http://is.muni.cz/th/53442/prif_m/). Diploma thesis. Masaryk University, faculty of Science. Vedoucí práce RNDr. Vilma Buršíková, Ph.D.

[86] BIG-ALABO, Akuro, HARRISON, Philip, CARTMELL, P. Matthew. Contact model for elastoplastic analysis of half-space indentation by a spherical impactor. [online]. 2015, 151, 20- 29 [cit. 10. 3. 2017].

DOI:10.1016/j.compstruc.2015.01.005. ISSN 00457949. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794915000140>

[87] IOST, Alain, BIGOT, Régis. Indentation size effect: Reality or artefact? [online]. Lille, Laboratoire de Metallurgie Physique, 1996. [cit. 12. 6. 2017]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/225924208\\_Indentation\\_size\\_effect\\_Reality\\_or\\_artefact](https://www.researchgate.net/publication/225924208_Indentation_size_effect_Reality_or_artefact)

[88] TALJAT, B, PHARR, G. M. Development of pile-up during spherical indentation of elastic-plastic solids. [online]. International Journal of Solids and Structures, 2004. [cit. 12. 6. 2017]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768304000897?via%3Dihub>

[89] Degtyarev V.I., Lagveshkin V.Ya. Perenosnaya tenzometricheskaya golovka dlya opredeleniya mehanicheskikh svoystv metallov vdavlivaniem, Izmeritelnaya tehnika, 1982, No. 5, SSSR, ISSN 0368-1025, (originál v ruštině)

[90] Jaroslav Mackerle, Finite element modelling and simulation of indentation testing: a bibliography (1990-2002), Engineering Computations Vol. 21 No. 1, 2004 pp. 23-52

[91] W.C. Oliver, G.M. Pharr, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, Journal of Materials Research, Vol. 19, No. 1, 2004, p. 3-20

[92] *Micro hardness tester*. Původce vynalezu: H. Aschinger, E. Kubasta, A. Wagendristel, H. Bangert, E. Tschegg. Publication info: US 4304123, 1981.

[93] *Portable material hardness tester*. Původce vynalezu: F. Napetschnig. Publication info: US 4245496, 1981.

[94] K. J. LAW ENGINEERS, Inc. *Penetration hardness tester with digital readout*. Původce vynalezu: Donald R. Fohey. Publication info: US 4182164, 1980.

[95] KING TESTER CORPORATION. *Portable hardness tester*. Původce vynalezu: R. Borgersen, James G. Mullen. Publication info: US 4312220, 1982

[96] UNIVERSITE DE RENNES 1. *Continuous or instrumented indentation device with convex bearing surface and use thereof, particularly for metal sheet indentation*. Původce vynalezu: G. Mauvoisin. Publication info: US 8621903, 2014.

[97] UNIVERSITE DE RENNES 1. *Continuous or instrumented indentation device*. Původce vynalezu: G. Mauvoisin. Publication info: US 9228928, 2016.

[98] MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Depth sensing indentation and methodology for mechanical property measurements*. Původce vynalezu: S. Suresh, J. Alcala, Antonios E. Giannakopoulos. Publication info: US 6134954, 2000.

[99] Tvrdoměry ZHU zwickiLine 0.5/Z2.5 a ZHU zwickiLine 2.5/Z2.5 [online]. Dostupné z: <https://http://www.zwick.cz/cs/produkty/tvrdomery/univerzalni-tvrdost-tvrdomery/zhu-zwicki-line-pro-stanoveni-univerzalni-tvrdosti.html>

[100] ZWICK GmbH. *Apparatus for hardness testing*. Původce vynalezu: R. Meyer. Publication info: GB 2 161 279, 1986.

## Seznam publikační činnosti autora

### Patenty:

[101] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. Systém instrumentovaného měření parametrů vtláčování indentoru. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42, G 01 N 3/44. Česká republika. Patentový spis 304637. 02.07.2014.

[102] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. Způsob vyvolání mikrostruktury materiálu pro hodnocení velikosti zrna a zařízení pro provádění tohoto způsobu. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 15/02, G 01 N 3/48. Česká republika. Patentový spis 305016. 11.02.2015.

[103] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. Indentační hlavice, instrumentovaný měřicí systém a způsob stanovení mechanických vlastností materiálů indentační metodou. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42. Česká republika. Patentový spis 2015-420. 04.01.2017.

[104] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. Indentation device, automated measurement system and method for materials mechanical properties determination by indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42. Ruská federace. Patentový spis RU2621935 (C2). 08.06.2017

[105] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. An indentation device, instrumented measurement system, and a method for determining the mechanical properties of materials by the indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: WO2016/206655 (A8). 02.03.2017

[106] Applicant: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ, PRAHA 2. An indentation device, instrumented measurement system, and a method for determining the mechanical properties of materials by the indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: US2016/0377518 A1 29.12.2016

Publikace související s tématem dizertační práci:

Články v časopisech

[107] PUCHNIN, Maxim, TRUDONOSHYN, Oleksandr, PRACH, Olena. Use of the ABI technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: Effect of chemical composition on the mechanical properties of the alloys. *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, 2016, Volume 50, Issue 2, Pages 247-252. ISSN 1580-2949.

[108] TRUDONOSHYN, Oleksandr, PUCHNIN, Maxim, PRACH, Olena. Use of the abi technique to measure themechanical properties of aluminium alloys: effectof heat-treatment conditions on the mechanicalproperties of alloys. *Materiali in tehnologije / Materials and technology*, 2016, Volume 50, Issue 3, Pages 427-431. ISSN 1580-2949.

[109] PUCHNIN, Maxim, PEŠLOVÁ, Františka. EXPIMER – EXPRESNÍ ZAŘÍZENÍ PRO RYCHLÉ STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ. *MM Průmyslové spektrum*, 2016, Issue 5, Pages 92-93. ISSN: 1212-2572

[110] PUCHNIN, Maxim, TRUDONOSHYN, Oleksandr, PRACH, Olena, PEŠLOVÁ, Františka. Comparison of ABI Technique and Standard Methods in Measuring Mechanical Properties of Aluminium Al-alloys *Manufacturing Technology*, 2016, Volume 16, Issue 3, pp. 600-607. ISSN 12132489.

[111] PUCHNIN, M.,ANISIMOV, E.,CEJP, J.,KUNKA, I.,VICENS, S. Advantages of express-methods in investigation of mechanical and physical properties of aluminum alloys. *Manufacturing Technology*, 2014, Volume 14, Issue 2, Pages 234-238. ISSN 12132489.

[112] ANISIMOV, Evgeniy, PUCHNIN, Maxim. Reduction of Elastic Modulus of Titanium Alloy Ti-6Al-4V by Quenching. *Key Engineering Materials*, 2014, Volume 586, Pages 15-18. ISSN 10139826.

[113] ANISIMOV, E., MANAK, J., PUCHNIN, M., SACHR, P. The effect of microstructural features on mechanical properties. *Key Engineering Materials*, 2014, Volume 606, Pages 47-50. ISSN 10139826.

Články v konferenčních sbornících

[114] PUCHNIN, Maxim, ANISIMOV, Evgeniy. Investigation of DLC coating and its influence on the mechanical properties of titanium alloy Ti-6Al-4V by means of automated ball indentation test. In: *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2013. Hotel Vornonez I Brno. Czech Republic. 15 - 17 May 2013. TANGER Ltd. Ostrava. 2013. Pages 943-946. ISBN 978-808729441-3.

[115] PUCHNIN, Maxim, ANISIMOV, Evgeniy. The method of accounting of elastic deformation occur during the automated ball indentation test. In: *COMAT 2012 - 2nd International Conference on Recent Trends in Structural Materials, Conference Proceeding*. 2nd International Conference on Recent



Trends in Structural Materials, Conference Proceeding, COMAT 2012. Parkhotel Plzen. Czech Republic. 21<sup>st</sup> – 22<sup>nd</sup> November. TANGER Ltd. Ostrava. 2012. Pages 240-245. ISBN 978-80-87294-38-3.

[116] PUCHNIN, Maxim, PEŠLOVÁ, Františka. Express automated ball indentation measurement of material properties. In: *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry", Conference Proceeding*. 21st IMEKO World Congress on Measurement in Research and Industry; Prague Congress Centre Prague; Czech Republic; 30 August 2015 - 4 September 2015 IMEKO-International Measurement Federation Secretariat. 2015. Pages 818-820. ISBN 978-80-01-05793-3.

Ostatní publikace:

Články v časopisech

[117] TRUDONOSHYN, O., PUCHNIN, M., MYKHALENKOV, K. Features of structure formation and changes in the mechanical properties of cast Al-Mg-Si-Mn alloy with the addition of (Ti + Zr). *Acta Polytechnica*, 2015, Volume 55, Issue 4, Pages 282-290. ISSN 12102709.

[118] HORNIK, J., TONDL, D., SACHR, P., ANISIMOV, E., PUCHNIN, M., CHRASKA, T. The effect of PVD tungsten-based coatings on improvement of hardness and wear resistance. *Key Engineering Materials*, 2014, Volume 606, Pages 163-166. ISSN 10139826.

[119] KONOVALOVA, O., SUCHANEK, J., TATICEK, F., PUCHNIN, M. Tribological Analysis of the Nano-modified Industrial Polymer. *Procedia Engineering*, 2014, Volume: 69, Pages: 1481-1489. ISSN 1877-7058.

[120] PEŠLOVÁ Františka, KOŠTIALIKOVÁ Daniela, JANEKOVÁ Mariana, PUCHNIN Maxim. The Effect of the Primary Implant Production Technology on the Occurrence of Degradation. *Procedia Engineering*, 2016, Volume: 136, Pages: 306-313. ISSN 1877-7058.

[121] LIPTAKOVA, T., HALAMOVA, M., ALASKARI, A., LOVISEK, M., PUCHNIN, M. Corrosion properties of various copper pipes joints. *Komunikacie*, 2014, Volume 16, Issue 3A, Pages 194-199. ISSN: 13354205

Články v konferenčních sbornících

[122] TRUDONOSHYN, O., PRACH, O., BOYKO, V., PUCHNIN, M., MYKHALENKOV, K. Design of a new casting alloys containing Li or Ti+Zr and optimization of its heat treatment. In: *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Hotel Voronez I Brno; Czech Republic; 21 - 23 May 2014. TANGER Ltd. Ostrava. 2014. Pages 1399-1404. ISBN 978-808729454-3.

[123] KRUM, S., HORNÍK, J., TONDL, D., PEŠLOVÁ, F., PUCHNIN, M., ANISIMOV, E. Structural changes of PVD coated CR-NI steel after heat load. In: *METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials*,

Conference Proceedings. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Hotel Voronez I Brno; Czech Republic; 21 - 23 May 2014. TANGER Ltd. Ostrava. 2014. Pages 902-907. ISBN 978-808729454-3.

Přednášky:

1. 16.02.2016 na Ústavu fyziky materiálů, Akademie věd ČR, v. v. i. Žižkova 22, 616 62 Brno, přednáška s názvem EXPRESS AUTOMATED BALL INDENTATION MEASUREMENT OF MECHANICAL PROPERTIES.

## 1 Vyjádření zajmu o odkoupení patentů



Kamenická 743, 460 06 Liberec 6, Česká republika



**Nástroje a přípravky  
pro automobilový průmysl**

### Potvrzení záměru spolupráce

mezi

Název firmy: MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o.

IČO: 27342191

Adresa: 460 06, Kamenická 743, Liberec 6

Česká republika

a

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství

Karlovo náměstí 13

121 35 Praha 2

Podpisem tohoto potvrzení společnost MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o.

stvrzuje svůj záměr odkoupení patentů a patentových přihlášek v oblasti technického řešení

„Instrumentovaný měřicí systém a způsob stanovení mechanických vlastností materiálů indentační metodou“, které je výsledkem výzkumu a vývoje ČVUT v Praze:

1. Systém instrumentovaného měření parametrů vtlačování indentoru. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42, G 01 N 3/44. Česká republika. Patentový spis 304637. 02.07.2014.
2. Způsob vyvolání mikrostruktury materiálu pro hodnocení velikosti zrna a zařízení pro provádění tohoto způsobu. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 15/02, G 01 N 3/48. Česká republika. Patentový spis 305016. 11.02.2015.
3. Indentační hlavice, instrumentovaný měřicí systém a způsob stanovení mechanických vlastností materiálů indentační metodou. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42. Česká republika. Patentový spis 2015-420. 04.01.2017.
4. Indentation device, automated measurement system and method for materials mechanical properties determination by indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: IPC (MPT) G 01 N 3/42. Ruská federace. Patentový spis RU2621935 (C2). 08.06.2017
5. An indentation device, instrumented measurement system, and a method for determining the mechanical properties of materials by the indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: WO2016/206655 (A8). 02.03.2017
6. An indentation device, instrumented measurement system, and a method for determining the mechanical properties of materials by the indentation method. Původce vynalezu: Maxim PUCHNIN, Evgeniy ANISIMOV, Františka PEŠLOVÁ. Publication info: US2016/0377518 A1 29.12.2016

IČO: 27342191  
DIČ: CZ27342191  
Tel.: 485 130 448  
Fax: 485 134 177

Registrace:  
K. S. v Ústí nad Labem,  
oddíl C, vložka 25217,  
den zápisu 17.12.2007

Bankovní spojení:  
UniCredit Bank, Czech republic, a.s.  
č. účtu CZK: 515691007/2700  
IBAN CZK: CZ31 2700 0000 0005 1569 1007

S důrazem na obchodní vztahy s reálnými obchodními partnery v oblasti automobilového průmyslu, letectví, energetického průmyslu, slévárenského průmyslu, designu, umění a architektury tak vyjadřuje podporu projektovému záměru, který vznikl v rámci přepravy a řešení projektu "Materiálový výzkum pro InovaSEED Z.1.05/3.1.00/14.0301".

Jsme společnost působící na trhu od roku 1996. Specializujeme se především na vývoje, konstruování a výrobu dílů, nástrojů a přípravků pro automobilový, energetický, slévárenský a letecký průmysl. Technologický rozvoj firmy je podpořen spoluprací na výzkumných projektech v rámci České republiky a zemí EU. Modelárna LIAZ v rámci vývojových a výzkumných projektů zpracovává nové technologie v oblasti informatiky, managementu, materiálového inženýrství a nástrojařství. Naši zákazníci jsou:

ADIENT Interiors Ltd & Co, Motus Headliner GmbH, AC Group GmbH,  
F.S.Fehrer Automotive GmbH, Proseat Foam Manufacturing.

Oceňujeme, že technologie adresuje potřeby tržního prostředí a konstatujeme, že technologie po dopracování technologičnosti konstrukce a adresného marketingu může vytvořit prodátný produkt. Potenciál technologie spočívá především v možnosti získání materiálových vlastností bez porušení zkoušeného objektu, díky čemuž systém nevyžaduje přípravu speciálních zkušebních vzorků a také je schopný provést měření přímo na konstrukcích. Tuto výhodu nemají klasické metody zkoušení materiálu, kde je zapotřebí vytvořit zkušební vzorky (např. tyče u statické zkoušky v tahu).

Technologie by pro naši firmu přinesla možnost rozvoje a výroby zařízení, které vzešlo z uvedených patentů a udržení duševního vlastnictví, proto máme zájem o odkoupení výše uvedených patentů a patentových přihlášek.

MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o.  
Kamenická 743  
460 06 Liberec 6  
Tel. 485 130 448, Fax 485 134 177  
DIČ CZ27342191

V Liberci dne 24.07.2017



Podpis oprávněného zástupce

IČO: 27342191  
DIČ: CZ27342191  
Tel.: 485 130 448  
Fax: 485 134 177

Registrace:  
K. S. v Ústí nad Labem,  
oddíl C, vložka 25217,  
den zápisu 17.12.2007

Bankovní spojení:  
UniCredit Bank, Czech republic, a.s.  
č. účtu CZK: 515691007/2700  
IBAN CZK: CZ31 2700 0000 0005 1569 1007

## 2 Potvrzení zajimu o spolupráce



Innovation Centre for Diagnostics  
and Application of Materials (ICDAM)  
Faculty of Mechanical Engineering  
Department of Materials Engineering  
Czech Technical University in Prague  
Karlovo náměstí 13, Praha 2  
121 35, Czech Republic

Datum 26.10.2015

*Věc / Subject: Metoda vtlačování indentoru pro zjišťování mechanických vlastností*

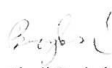
V rámci „Holečkovy konference“ v dubnu 2015, byli pracovníci vývoje Kovolisu Hedvíkov seznámeni s metodou „Vtlačování indentoru“ a jejím výzkumem a vývojem probíhajícím na Ústavu materiálového inženýrství, ČVUT v Praze. Seznámení proběhlo v rámci přednášky Mgr. Maxima Puchnina „Porovnání výsledků indentační metody a standardních mechanických zkoušek při stanovení mechanických vlastností hliníkových slitin“. Tematické zpracování přednesené problematiky je řešeno v rámci projektu Pre-seed grantu.

V rámci vzájemných odborných konzultací Kovolis Hedvíkov projevil o tento výzkum a vývoj zájem, především kvůli možnosti využít předloženou metodiku na odlitcích v průběhu výroby.

Na základě dohodnuté spolupráce byly v první fázi otestovány, (podle dané metodiky) prototypy držáku motoru odlité technologií rheocasting (semisolid) ze slitiny hliníku s křemíkem. Odlitky byly vyrobeny a tepelně zpracovány v Kovolisu Hedvíkov a zaslány na UMI, FS, ČVUT v Praze.

V první fázi spolupráce s týmem Mgr. Maxima Puchnina a Prof. Ing. Františky Pešlové PhD, byl proveden experiment na poskytnutých 25 odlitcích zpracovaných při 5 různých podmínkách tepelného zpracování.

První výsledky z měření byly publikovány v článku „The study of the properties of Al alloy castings produced by rheocasting method seed“ autory Bryksí Stunová Barbora, Bryksí Vlastimil, Puchnin Maxim prezentované na konferenci Metal 2015. Pro další fáze spolupráce jsou naplánované publikace ze získaných výsledků společných experimentů a testů přímo v průmyslových podmínkách.

  
Vlastimil Bryksí  
Vedoucí vývoje  
KOVOLIS HEDVIKOV a.s.  
Hedvíkov 1  
538 43 Tremosnice  
www.kovolis-hedvikov.cz  
T: +420 469 619 138  
M: +420 777 619 138  
E: v.bryksi@kovolis-hedvikov.cz

KOVOLIS HEDVIKOV a. s.  
Hedvíkov 1  
P. O. Box 31  
CZ - 538 43 Tremosnice  
Tel. (+420 469) 619 111  
Fax (+420 469) 619 103  
e-mail: kovolis@kovolis-hedvikov.cz

DIČ / V. A. T. Nr.: CZ61058041  
IČO / Reg. Nr.: 61058041  
Bank: Sberbank CZ, a. s., 4050000218/6800 (CZK)  
Sberbank CZ, a. s., 1030002247/6800 (Euro)  
ČSOB a. s. 108089094/0300

Společnost zapsaná v OR u Krajského soudu v Hradci Králové, oddíl B, vložka 1436



VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.

\*Váš dopis zn :  
Ze dne:  
Naše značka: 804 06/002/VPE  
Vyřizuje: Ing. Lukáš Pomikálek  
Tel. +420 595 952 895  
GSM: +420 724 083 849  
E-mail: lukas.pomikalek@vitkovice.cz

Datum: 26.7. 2013

Innovation Centre for Diagnostics  
And Application of Materials  
(ICDAM) Faculty of Mechanical  
Engineering  
Department of Materials Engineering  
Czech Technical University in  
Prague  
Karlovo nam. 13  
121 35 Prague 2

Czech Republic

**Věc: Možnost spolupráce při zkoušení metod a zařízení pro nedestruktivní kontrolu mechanických vlastností.**

Metody a zařízení pro nedestruktivní kontrolu mechanických vlastností, jejíž vývoj probíhá na ústavu Materiálového inženýrství na ČVUT v Praze, umožňuje stanovení modulu pružnosti, meze kluzu, meze pevnosti, koeficientu zpevnění a tvrdosti materiálu, bez vytvoření standardních vzorků nebo přímo na povrchu součástí či konstrukcí.

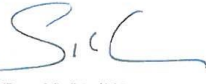
Metoda je založená na principu automatizovaného vtláčování indentoru kulového tvaru do povrchu materiálu s průběžným záznamem parametrů procesu vtláčování (křivka „zatížení – hloubka vtisku“). Nabízené zařízení existuje i v mobilním provedení, také je možné využít v kombinaci s tvrdoměrem nebo trhacím strojem.

V zařízení se používají indenty o průměru 10, 5, 2.5 mm a rozsah zatížení od 0 až 30 kN, kde dostatečně vysoká přesnost určení parametrů vtláčování je podmíněna unikátní konstrukcí zařízení (0,01-30000 N pro zatížení a 0,01-3000 µm pro hloubku).

Naše společnost má zájem dozvědět se více o daném zařízení na schůzce, která se uskuteční předběžně v září 2013 (od 11. 9. 2013). Na základě této schůzky se VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s. rozhodne, zda bude chtít otestovat dané zařízení na svém pracovišti a poskytnout podporu v rámci spolupráce při jeho zkoušení v průmyslových podmínkách.



**VÍTKOVICE**  
VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.  
Ruská 1142/30  
706 00 Ostrava-Vítkovice



Ing. David Sivčák  
Technický ředitel





## 4 Materiálový list CuSn8

### KOVOHUTĚ ROKYCANY, a. s. INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.1 PODLE EN 10204:2004

**Dodavatel:** KOVOHUTĚ ROKYCANY, a. s.  
Zeyerova 285  
337 01 Rokycany

**Odběratel:** Feron, a.s.  
Havlíčková čp. 1043/11  
111 82 Praha 1

**Zakázka:** 31240544  
**Výrobek:** tyč CuSn8 pr.14

**Č. objednávky:** 553509/G ze dne 5.9.2014  
**Množství:** 462,00 *12*  
**Datum:** 08.10.2014

#### Dodací podmínky a rozměrová specifikace:

**Norma:** EN 12 163

**Číslo atestu:** 22942

**KORO proces:** 13.13002487.1

#### Naměřené hodnoty:

Prvek	Sn (%)	Pb (%)	P (%)	Fe (%)	Ni (%)	Zn (%)	Tvrlost HBW
Od	7,5	0	0,01	0	0	0	120
Do	8,5	0,02	0,4	0,1	0,2	0,2	170
<b>Měřeno</b>	<b>8,01</b>	<b>0,015</b>	<b>0,3</b>	<b>0,014</b>	<b>0,001</b>	<b>0,071</b>	<b>169</b>
Prvek							
Od							
Do							
<b>Měřeno</b>							
Prvek							
Od							
Do							
<b>Měřeno</b>							

**Poznámky:**  
Tavba 48248

KOVOHUTĚ ROKYCANY, a.s.  
IČO: 49195719, DIČ: CZ49195719  
-5-

*[Podpis]*  
Razítko a podpis

Telefon +420 371 763 111, Fax +420 371 723 359, email: kovohute@koro.cz



## 5 Materiálový list CuZn40Pb2

RUSSIA, Kamensk-Uralsky Non-Ferrous Metal Working Plant, str. Lermontov, 40												
<span style="font-size: 1.5em; font-family: cursive;">519161/4</span>												
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПРИЕМКЕ			EN 10204-3.1	INSPECTION CERTIFICATE								
Лист Sheet	1	Листов Sheets	1	№ No	12	Дата date	08.01.14					
Контракт № Contract No		13021 от 02.07.2013		Грузополучатель адрес, страна Consignee address, country		Profimet.s.r.o., Jesenicka 525, Dolni Jircany - 252 44 Czech Republic						
Приложение № Appendix No												
Наименование, Description		Марка Grade	Стандарт Standard	Размер Size, mm		Точность Precision	Состояние State					
Пруток латунный		CW617N (CuZn40Pb2)	DIN EN 12164	диаметр Kp. 14	длина 3000		R 430					
Партия Lot №		Вес weight, kg										
		нетто, net										
Зц												
Зц												
Итого		492										
Химический состав			Chemical properties, %				Стандарт Standard	EN 12164				
Основные компоненты Content of main components, %				Примеси Impurities, %								
№ пар- тин по НД	Cu	Pb	Zn	Al	Fe	Ni	Sn	Bi	P	S	Si	Sb
	57,0-59,0	1,6-2,2	ост	0,05	0,3	0,3	0,3	Прочие вместе 0,2				
Зц 850	58,34	1,76	ост	0,019	0,30	0,22	0,24	0,002	0,005	0,002	0,043	0,005
Зц 460	58,09	1,71	ост	0,011	0,27	0,19	0,21	0,001	0,005	0,002	0,015	0,006
Механические свойства			Mechanical properties				Стандарт Standard		EN 12164 T.T. 2-523-13			
по НД	Временное сопротивление разрыву, не менее МПа Temporal rupture strength, min Mpa			Относительное удлинение, не менее % Relativity lengthening, min			Предел текучести, МПа не ме- нее/ Yeld point, min Mpa					
	не менее 430			не менее 10			не менее 220					
Зц	530			18,0			380					
Зц	470			19,0			300					



Уровень радиации металла не превышает естественного уровня.  
 Radioactivity of the metal doesn't exceed naturally permissible level of radiation.

## 6 Materiálový list S235JRC

32.01.2014 07:22:29  
8/2013 17630

FERONA A.S. MALOPRODEJNA P 7  
PROFIMARKET  
U PERGAMENKY 11  
PRAHA 7  
170 00

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. k zakázce č. 648228, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 63596 na množství 314 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

 <b>STALMA</b> <small>STALMA Co. 20 622 Lublin, ul. Puławska 38, e-mail: office@stalma.com.pl</small>	<b>INSPECTION CERTIFICATE</b>	
	No. <b>14675/3</b>	

- 3.1 EN 10204  
 2.2 EN 10204

Customer <b>FERONA a.s.</b>  <b>111 82 PRAHA 1, Havlickova 1043/11, Czech Republic</b>	Order No. / Confirmation No. <b>523930/P</b>
Delivery address <b>Feron a.s.</b> <b>Skład 11</b> <b>108-33 Praha, Polygraficka 3/262, Czech Republic</b>	Weight [kg] <b>3062</b>

Product / Specifications	Dimensions	Quality / Finished condition	Prod. batch No.
Cold drawn bar, rd EN-10025 EN-10277; EN-10278	rd 14.00 h9 3000+500	S235JRC+C	W/3405

CEV: 0.29

### I. CHEMICAL COMPOSITION

Charge No.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Pb	N <sub>2</sub>
X63596	0.13	0.60	0.22	0.035	0.029	0.18	0.09	0.24	0.03	0.009		0.009

### II. MECHANICAL TESTS

Charge No.	R/R <sub>m2</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A5* [%]	Hardness [HB]	Other tests*
X63596	590	640	10.4	185	.

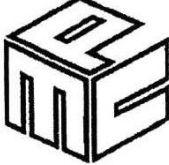
\* test is carried out under the agreement made when placing the order

### III. CHARACTERISTICS AND PARAMETERS AGREED WHEN PLACING THE ORDER

Surface: class 1,  
Straightness: EN 10278  
Other tests: Radioisotopic activity max 100Bq/kg

QUALITY CONTROL		DECLARATION OF CONFORMITY
Lublin	Date <b>2013.06.24</b>	STALMA Co. declares that the product satisfies requirements of documents to in this Certificate.
Rafał Dobosz		
Issued by	Approved by	

## 7 Materiálový list S355J2

 <b>MPC METAL</b> Sp. z o.o. Adres: 20-474 Lublin ul. Smoluchowskiego 7 www.mpcmetal.pl tel: 81 744 65 11 fax: 81 749 89 20 e-mail: office@mpcmetal.pl	<b>INSPECTION CERTIFICATE</b>  <b>No. 02686/4</b>

- 3.1 EN 10204  
 2.2 EN 10204

Customer <b>Ferona a.s.</b>  <b>108 33 Praha, Polygraficka 3/262</b>	Order No. / Confirmation No. <b>558314/P</b>
--	---

Delivery address <b>Ferona a.s.</b>  <b>108 33 Praha, Polygraficka 3/262</b>	Weight [kg] <b>3034</b>
--	----------------------------

Product / Specifications	Dimensions	Quality / Finished condition	Prod. batch No.
Cold drawn bar, rd  EN-10277; EN-10278	rd 14.00 h9 3000+100	S355J2+C	W/ 1108/5

### I. CHEMICAL COMPOSITION

Charge No.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Pb		N <sub>2</sub>
413242	0,19	1,4	,240	0,007	0,007			0,04		,033			

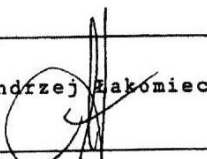
### II. MECHANICAL TESTS

Charge No.	R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub> * [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A5* [%]	Hardness [HB]	Other tests*
413242	650	725	13,6		

\* test is carried out under the agreement made when placing the order

### III. CHARACTERISTICS AND PARAMETERS AGREED WHEN PLACING THE ORDER

Surface: class 1, Straightness: Other tests:
--

QUALITY CONTROL		DECLARATION OF CONFORMITY
Lublin	Date	MPC Metal Ltd declares that the product satisfies requirements of documents to in this Certificate.
	2014.11.26	
Andrzej Zakomic  Issued by	Approved by	

## 8 Materiálový list 11SMn30



<b>A02 Druh dokumentu / Type of inspection document</b> Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004					
<b>A01/A05 Výrobní závod / Manufacturer</b> TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech republic VF -Tavárna oceli, Továrni 1688, 686 02 Staré Město, Czech republic				Stránka / Page 1/1	
<b>A07 Číslo objednávky / Purchaser's order No.</b> 555811/P <b>A10 Číslo kontraktu / Contract No.</b> 0041323703 <b>A08 Číslo zakázky / Manufacturer's order No.</b> 9910071307/000010				<b>A06 Příjemce / Consignee</b> Feron, a.s. Centrální likvid. fakt. VO,útv. 312 Polygrafická 3/262 108 33 Praha 10 - Malešice Česká republika	
<b>B01, B09-B11</b> Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Product description / Dimensions / Tolerance		<b>B02, B04</b> Označení oceli / Stav dodaný Steel designation / Deliv. state		<b>B03</b> Materiálová norma Classification standard	
Tyč tažená kruhová (h9) Cold-drawn round steel bar (h9) 14 mm  3,000 m +100 -0		11SMN30+C		EN 10277-3	
<b>A11</b> Dopr. prostředek č. Waggon No.		<b>A13 / A12</b> Avizo / Ložný list č. Delivery note / Loading list No.		<b>B07</b> Tavba Heat No.	
4Z07021 1Z97890		14/11/001817 5914004312		T19656	
<b>B07, B14, C70</b> Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Heat No. / Year of production Steelmaking process		<b>C71-C92</b> Chemické složení-Chemical composition [%]			
T19656/2014 BO-ZPO2 BOF-cc billets		C	Mn	Si	P
		0.11	1.19	0.02	0.049
		S 0.280			
<b>Mechanické hodnoty-Mechanical values</b>					
<b>B07</b> Tavba Heat No.	<b>B05</b> Stav zkoušení Test state	<b>C11</b> Mez kluzu Yield point Rp0,2 [MPa]	<b>C12</b> Mez pevnosti Tensile strength Rm [MPa]	<b>C13</b> Táznost Elongation A5 [%]	<b>C14</b> Kontrakce Contraction Z [%]
T19656	+C	540	583	9	
<b>B07</b> Tavba Heat No.	<b>D53</b> 100% kontrola totožnosti Sparking test 100%				
T19656	provedena/O.K.				
<b>D05</b> Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg. Radio - isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.					
<b>Z01</b> Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky. Products conform with the prescription of order.					
<b>Z03</b> Tento dokument byl elektronicky podepsán v souladu se zákonem č. 227/2000 Sb. This document was electronically signed according to Law No. 227/2000 Coll undersigned.					
<b>Z02</b> Potvrdil - Expert: : Stonáček Karel, referent T.Jut, nezávislý oprávněný zástupce Officer of Quality Inspection of Realising and Attesting, independent authorized agent					
Staré Město: 12.11.2014					

## 9 Materiálový list E335GC

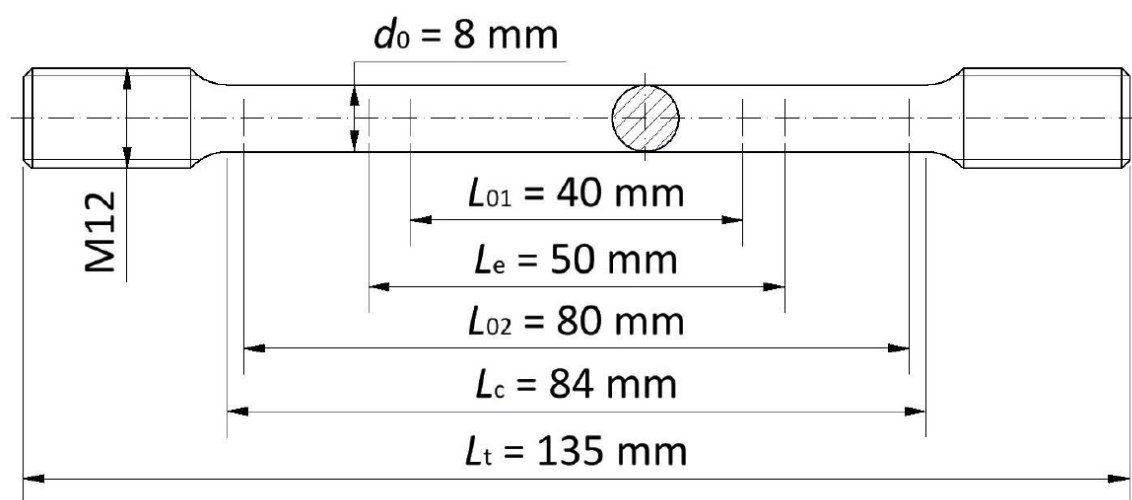
A04 Značka výrobce / Manufacturer's logo



**TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY**  
**MORAVIA STEEL**

<b>A02 Druh dokumentu / Type of inspection document</b> <b>Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004</b>								
A01/A05 Výrobní závod / Manufacturer <b>TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.,</b> Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech republic VF - Tažirna oceli, Tovární 1688, 686 02 Staré Město, Czech republic						Stránka / Page 1/1		
A03 Číslo dokumentu / Document No. <b>2014/11/003967-STO</b>								
A07 Číslo objednávky / Purchaser's order No. 555834/P				A06 Příjemce / Consignee Feron, a.s. Centrální likvid. fakt. VO,útv. 312 Polygrafická 3/262 108 33 Praha 10 - Malešice Česká republika				
A10 Číslo kontraktu / Contract No. 0041323706								
A08 Číslo zakázky / Manufacturer's order No. 9910071329/000010								
<b>B01, B09-B11</b> Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Product description / Dimensions / Tolerance			<b>B02, B04</b> Označení oceli / Stav dodaný Steel designation / Deliv. state		<b>B03</b> Materiálová norma Classification standard		<b>B03</b> Rozměrová norma Dimensional standard	
Tyč tažená kruhová (h9) Cold-drawn round steel bar (h9) 14 mm  3,000 m +100 -0			E335GC+C		EN 10277-2		EN 10278	
<b>A11</b> Dopr. prostředek č. Waggon No.		<b>A13 / A12</b> Avizo / Ložný list č. Delivery note / Loading list No.		<b>B07</b> Tavba Heat No.	<b>B08</b> Kruhy / Kusy Coils / Pieces	<b>B08</b> Svazky Crbd	<b>B13</b> Hmotnost (kg) Weight (kgs)	
4207021 1297890		14/11/001817 5914004312		T59629	0	2	2020	
<b>B07, B14, C70</b> Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Heat No. / Year of production  Steelmaking process T59629/2013 BO-ZPO2 BOF-cc billets		<b>C71-C92</b> <b>Chemické složení-Chemical composition [%]</b>						
		C	Mn	Si	P	S	N	
		0.48	0.74	0.28	0.016	0.005	0.0037	
<b>Mechanické hodnoty-Mechanical values</b>								
<b>B07</b> Tavba Heat No.	<b>B05</b> Stav zkoušení Test state	<b>C11</b> Mez kluzu Yield point Rp0.2 [MPa]	<b>C12</b> Mez pevnosti Tensile strength Rm [MPa]	<b>C13</b> Tažnost Elongation A5 [%]	<b>C14</b> Kontrakce Contraction Z [%]	<b>B05</b> Stav zkoušení Test state	<b>C03</b> Zkušební teplota Test temperature	<b>C40, C42</b> Zkouška rázem v ohybu Energy of impact KV [J] / KCV [J/cm2]
T59629	+C	652	767	10				
<b>B07</b> Tavba Heat No.	<b>D53</b> 100% kontrola totožnosti Sparking test 100%							
T59629	provedena/O.K.							
<b>D05</b> Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg. Radio - isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.								
<b>Z01</b> Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky. Products conform with the prescription of order.								
<b>Z03</b> Tento dokument byl elektronicky podepsán v souladu se zákonem č. 227/2000 Sb. This document was electronically according to Law No. 227/2000 Coll undersigned.								
<b>Z02</b> Potvrdil - Expert : Stonáček Karel,				referent T.Jut, nezávislý oprávněný zástupce Officer of Quality Inspection of Realising and Attesting, independent authorized agent				
Staré Město: 12.11.2014								

## 10 Tvar zkušební vzorku pro statickou zkoušku tahem



# 11 Kalibrační listy

## Akreditovaná kalibrační laboratoř č. 2263



METROLOGICKÉ CENTRUM

Pavel Čutka, Kašparovo náměstí 2254/4, 180 00 Praha 8 - Libeň

Telefon: 284 841 212, 602 525 985, fax: 284 841 313, e-mail: cutka@cutka.cz, www.cutka.cz

strana / počet stran: 1 / 1

### KALIBRAČNÍ LIST č. 261 / 15

Podnik: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství  
Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2

Umístění: ICDAM - Inovační centrum diagnostiky a aplikace materiálů Typ: M4C 075 G3  
Tvrdoměr: Rockwell - Vickers - Brinell Výrobní číslo: 780 06 07  
Výrobce: EMCO-TEST Rok výroby: 2007

#### Výsledky měření

##### Měření síly:

Síla	Zatížení	Odchylka	Síla	Zatížení	Odchylka
1471 N	150 kp	+ 0.3 %	612.9 N	62.5 kp	+ 0.3 %
49.03 N	5 kp	+ 0.4 %	1226 N	125 kp	+ 0.2 %
98.07 N	10 kp	+ 0.3 %	1839 N	187.5 kp	+ 0.3 %
294.2 N	30 kp	+ 0.2 %	2452 N	250 kp	+ 0.4 %
490.3 N	50 kp	+ 0.2 %	4903 N	500 kp	+ 0.4 %
980.7 N	100 kp	+ 0.3 %	7355 N	750 kp	+ 0.6 %

##### Měřicí zařízení:

Přesnost měření velikosti vtisku při použití objektivů:  
67.1 x, 33.7 x, 147.3 x, 321.6 x je lepší než  $\pm 0.5$  %.

Funkční zkouška: s vnikacím tělesem Rockwell Pramet 9152 ; Vickers EMCO 2913

Tvrдость	Odchylka	Opakovatelnost	Tvrдость	Odchylka	Opakovatelnost
22.6 HRC	+ 0.1 HRC	0.5 %	278 HV5	+ 3 HV	1.1 %
36.7 HRC	- 0.3 HRC	0.9 %	452 HV10	+ 2 HV	0.7 %
48.0 HRC	$\pm$ 0.2 HRC	0.5 %	457 HV30	+ 1 HV	0.9 %
51.4 HRC	- 0.2 HRC	1.0 %	259 HBW2.5/187.5	+ 1 HB	1.2 %
62.8 HRC	- 0.8 HRC	0.7 %	256 HBW5/750	$\pm$ 0 HB	0.7 %

Tvrdoměr byl zkoušen přímou a nepřímou metodou podle PI 022, PI 011, PI 021 (ČSN EN ISO 6507-2, ČSN EN ISO 6508-2, ČSN EN ISO 6506-2) za použití etalonových siloměrných dóz ESD 50 (KL č. E 103/15), ESD 250 (KL č. E 104/15), ESD 3000 (KL č. E 105/15) a sad etalonů Vickers č.3, Rockwell č. 1 a Brinell č. 7 při teplotě 23.0 °C.

Přístroj byl shledán správným a způsobilým k provádění zkoušek tvrdosti metodami Vickers (HV5 až HV100), Rockwell (HRC) a Brinell (zatížení 612.9 až 7355 N) podle norem ČSN EN ISO 6507-1, ČSN EN ISO 6508-1 a ČSN EN ISO 6506-1.

Tvrdoměr byl opatřen kalibrační značkou: KL 261/15

Datum měření: 28.04.2015  
Datum vystavení kalibračního listu: 28.04.2015



*Čutka*  
Pavel Čutka  
vedoucí AKL

Nejistota stanovených odchylek u metody Rockwell je  $\pm 0.5$  HR. Nejistota stanovených odchylek u metody Vickers je u zatížení  $\pm 0.1$  %F, u odchylek délky  $\pm 0.1$  %d. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k=2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Výsledky zkoušek se vztahují k místu a datu provedené zkoušky. Výsledky zkoušek se týkají jen zkoušeného tvrdoměru. Kalibrační list se nesmí bez písemného souhlasu AKL reprodukovat jinak, než celý. Konec kalibračního listu.



**Český metrologický institut**  
Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz



**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.**  
Pracoviště: Oblastní inspektorát Praha, Radiová 3, 102 00 Praha 10  
Oddělení mechanických zkoušek materiálu, tel. +420 266020111, fax. +420 266020169

## KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10230-14

Datum vystavení: 26.3.2014

List 1 ze 2 listů

Zákazník: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní  
Technická 4 , 166 07 Praha 6

Měřidlo: Zkušební stroj pro stanovení pevnosti materiálu v tahu a tlaku.  
Nejvyšší zatížení.: 100 kN  
Zkoušený snímač síly: 100 kN, v.č.40390

Rok výroby: nezjištěn  
Měřicí ústrojí : tenzometrický snímač síly

Výrobce: INSTRON

Typ: hydraulický

Výrobní číslo: H1339

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace: 26.3.2014

Kalibraci provedl:

Ředitel oblastního inspektorátu:

  
Jaroslav Městka



Ing. Vladimír Peršl



*Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.*



Použité etalony:	Typ a výrobní č.	Nejistota měření	Kalibrační list	Platnost do:
	S9M/30971274/10 kN Z4A/102730025/100 kN	$W_{\max} = 0,11\%$ $W_{\max} = 0,11\%$	8011-KL-F0123-12 8011-KL-F0073-13	19.10.2015 7.6.2015

Kalibrační postup: ČMI č. 151-MP-C001, 151-MP-C003

Místo kalibrace: Laboratoř Karlovo náměstí

Podmínky prostředí: změřená teplota vzduchu ( $23,2 \pm 1,0$ ) °C,  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Podmínky kalibrace: teplota vzduchu ( $23 \pm 10$ ) °C,  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Výsledky kalibrace:

Stroj nebyl seřizován.

rozsah : (0-100)kN TAH		rozšířená nejistota stup. síly W %
stup.stroje kN	chyba q %	
0,5	-0,78	0,35
1	-0,60	0,35
2	-0,61	0,36
5	-0,66	0,35
10	-0,65	0,35
20	-0,62	0,35
40	-0,52	0,35
60	-0,36	0,35
80	-0,30	0,35
100	-0,24	0,35

rozsah : (0-100)kN TLAK		rozšířená nejistota stup. síly W %
stup.stroje kN	chyba q %	
0,5	1,66	0,36
1	1,47	0,35
2	1,15	0,36
5	0,78	0,36
10	0,64	0,35
20	0,65	0,35
40	0,42	0,35
60	0,34	0,35
80	0,33	0,35
100	0,34	0,35

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$ .

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut  
Oblastní inspektorát Praha  
Raciová 3  
102 00 Praha  
-2-

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.