

# VYUŽITÍ INDENTAČNÍCH ZKOUŠEK TVRDOSTI PRO STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

**AUTOR: Mgr. Maxim Puchnin**  
**STUDIJNÍ OBOR: Materiálové inženýrství**  
**ŠKOLITEL: Doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.**  
**ŠKOLITEL – SPECIALISTA (studijní garant): Ing. Jakub Horník, Ph.D.**

**Cílem dizertační práce** je, na základě studia existujících indentačních technologií navrhnout a vyvinout nový systém zkoušení mechanických vlastností, využívající metodiku instrumentovaného vlačování 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.

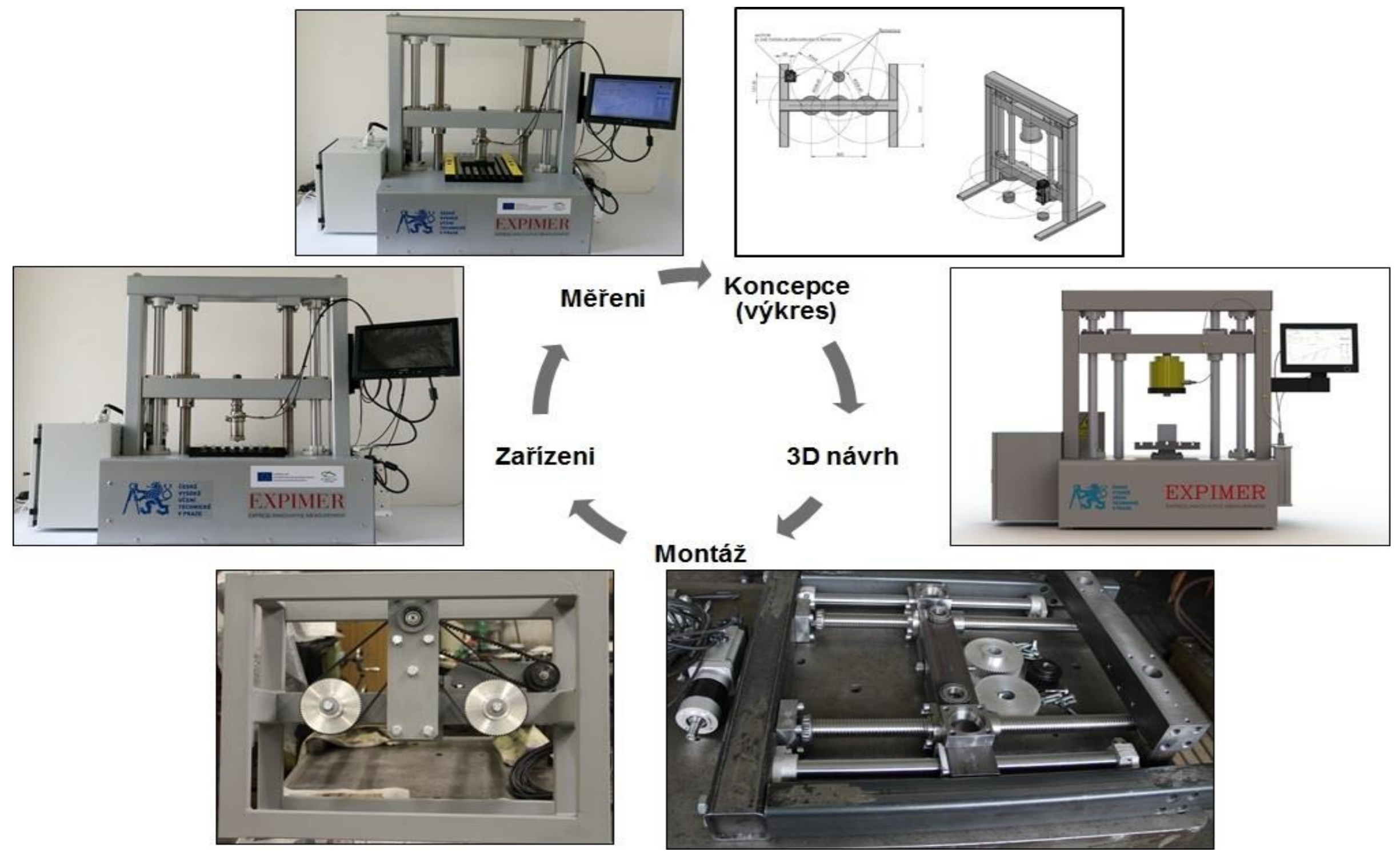
Experiment se zabývá návrhem, vývojem a ověřením prototypového experimentálního zařízení na základě indentačního systému, nazvaného v disertační práci „EXPIMER“. Návrh vycházel z poznatků získaných z patentů a odborných publikací. Zjednodušený postup vývoje od výkresu, návrhu v 3D, přes montáž a konečnou formu zařízení, na kterém může probíhat měření, je uveden na Obr. 1. Na Obr. 2 je zobrazen příklad indentační křivky slitiny EN AW 2030-T3 (AlCu4PbMg) a porovnání indentačního diagramu s tahovým diagramem.

Přístroj je plně automatizovaným, multifunkčním zařízením pro zkoušení materiálových vlastností různých druhů strojírenských materiálů. Jedná se o následující materiálové vlastnosti:

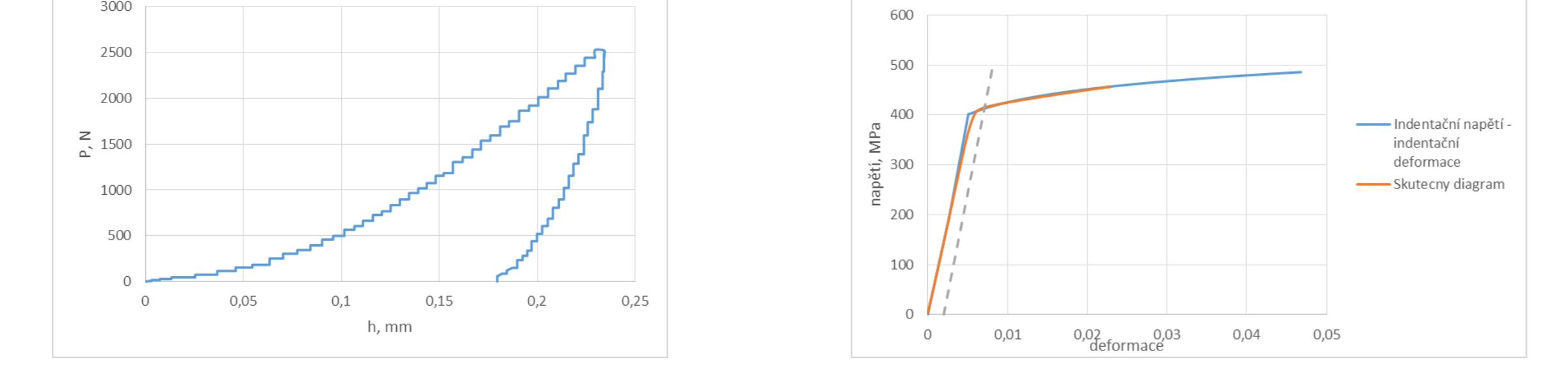
- ▶ tvrdost HB,
- ▶ mez pevnosti  $R_m$ ,
- ▶ mez kluzu  $R_{p0.2}$ ,
- ▶ modul pružnosti E,
- ▶ exponent n a součinitel K deformačního zpevnění.

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 zaškolení 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. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

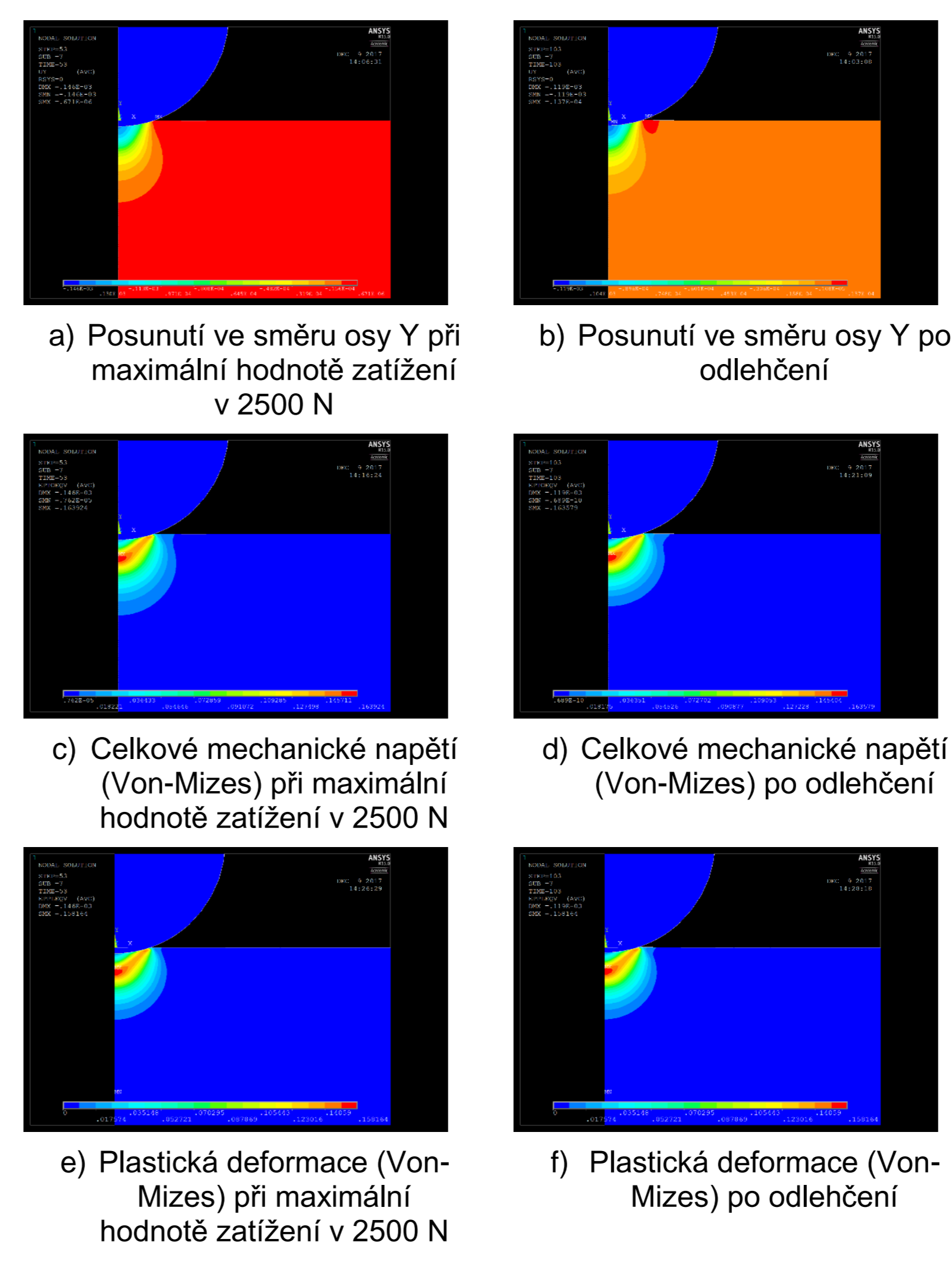
Indentační zkoušky byly ověřené pomocí experimentálního makrotvrdoměru EXPIMER na všech vybraných materiálech, pro které již bylo provedeno studium mikrostruktury, chemického složení a aplikovaná statická zkouška tahem, zkouška tvrdosti a nanotvrdosti viz Tab.1 a Tab. 2. Obr.3 ukazuje grafickou interpretaci výsledků MKP výpočtů. Na Obr. 4 a Obr. 5 jsou zobrazeny deformované oblasti pod indentačním vtiskem, studované pomocí světelné a elektronové mikroskopie.



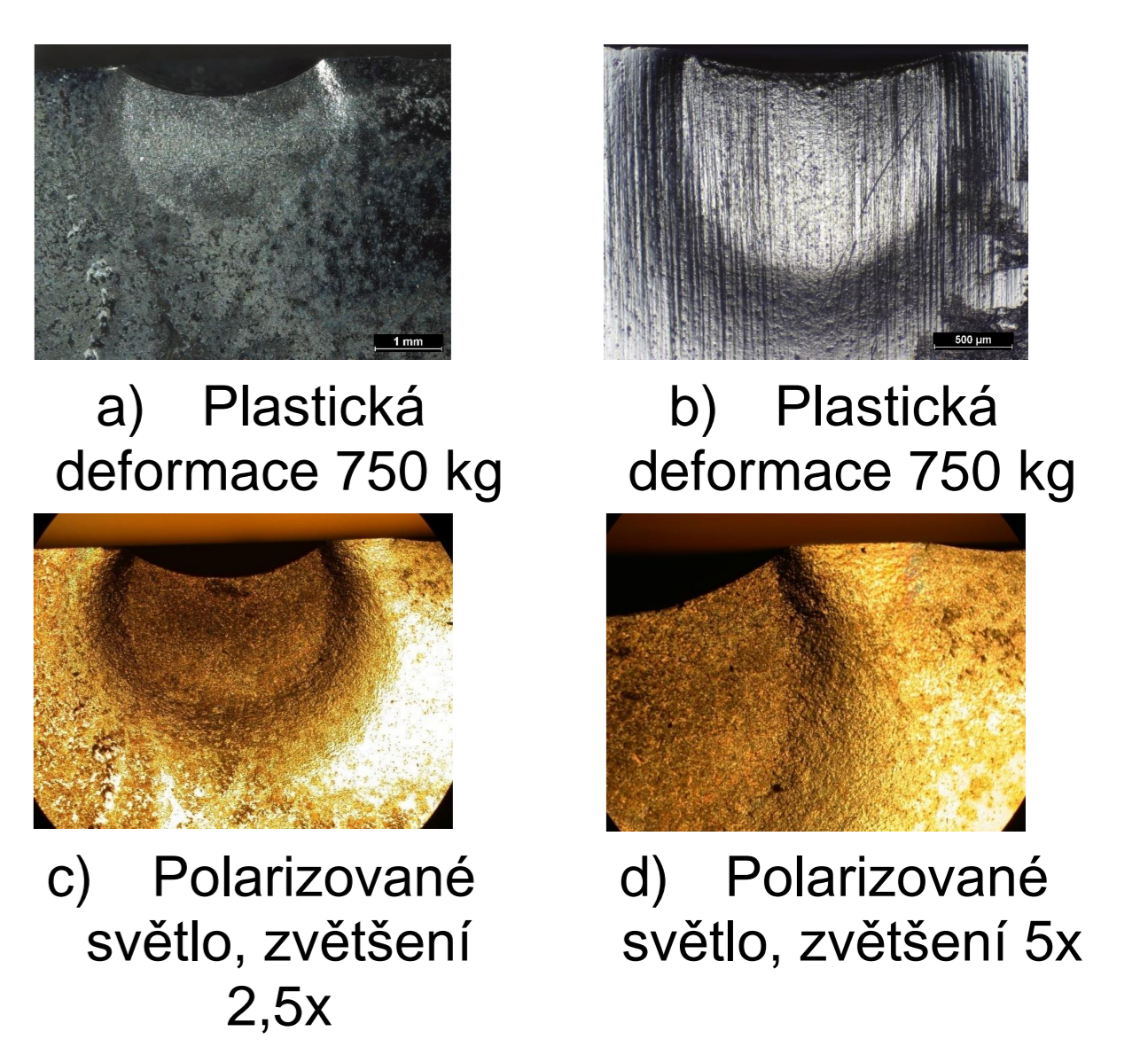
**Obr. 1:** Postup od návrhu, vývoje, montáže až po konečné zařízení



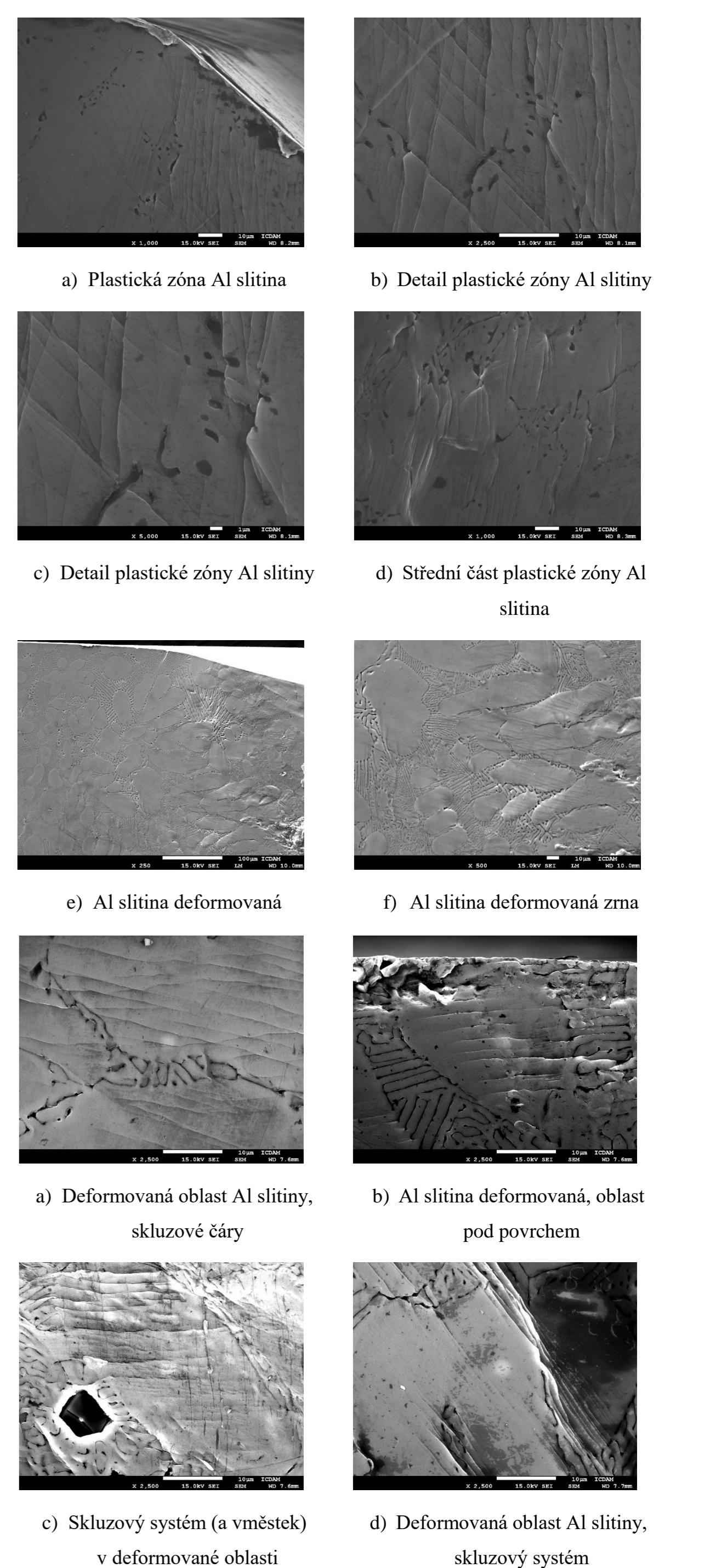
**Obr. 2:** Indentační křivka slitiny EN AW 2030-T3 (AlCu4PbMg) a porovnání indentačního diagramu s tahovým diagramem



**Obr. 3:** Grafická interpretace výsledků výpočtů MKP



**Obr. 4:** Plastická zóna Al slitiny (polarizační a světelný mikroskop)



**Obr. 5:** Deformovaná oblast pod vtiskem Al slitiny studovaná pomocí elektronového mikroskopu

Publikace související s tématem dizertační práce:

[1] 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. *Materials in technology*, 2016, Volume 50, Issue 2, Pages 247-252. ISSN 1580-2949.

[2] TRUDONOSHYN, Oleksandr, PUCHNIN, Maxim, PRACH, Olena. Use of the abi technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: effect of heattreatment conditions on the mechanical properties of alloys. *Materials in technology*, 2016, Volume 50, Issue 3, Pages 427-431. ISSN 1580-2949.

[3] PUCHNIN, Maxim, PEŠLOVÁ, Františka. EXPIMER – EXPRESNÍ ZAŘÍZENÍ PRO RYCHLÉ STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ. *MM Průmyslové spektrum*, 2016, Issue 5, Pages 92-93. ISSN: 1212-2572 46

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

**Tab. 1** Porovnání výsledků nezelezné kovy

Parametr	Metoda	AlCu4PbMg	Cu-ETP	CuSn8	CuZn40Pb2
E [MPa]	Indentace EXPIMER, $E_{IT}$	72 636	98 528	77 201	68 829
	Indentace EXPIMER, S	80 923	110 569	86 636	77 240
	Mikroindentace, $E_{IT}$	96 800	153 600	140 000	114 300
	Tahová zkouška	72 845	119 985	106 394	69 026
$R_{p0.2}$ [MPa]	Indentace EXPIMER	415	345	430	362
	Tahová zkouška	419	340	400	344
$R_m$ [MPa]	Indentace EXPIMER	486	368	482	413
	Tahová zkouška	480	345	504	413
HBW	Indentace EXPIMER	90	78	133	109
	Zkouška tvrdosti	121	92,5	140	121

**Tab. 2** Porovnání výsledků ocelí

Parametr	Metoda	E335GC	S235JRC	S355J2	11SMn30
E [MPa]	Indentace EXPIMER, $E_{IT}$	158 830	185 392	166 951	202 895
	Indentace EXPIMER, S	174 539	203 727	183 463	222 962
	Mikroindentace, $E_{IT}$	214 200	223 400	213 200	219 400
	Tahová zkouška	208 212	214 327	201 466	224 425
$R_{p0.2}$ [MPa]	Indentace EXPIMER	743	525	560	663
	Tahová zkouška	684	523	562	660
$R_m$ [MPa]	Indentace EXPIMER	1020	590	763	694
	Tahová zkouška	852	549	637	664
HBW	Indentace EXPIMER	197	203	210	180
	Zkouška tvrdosti	201	174	211	186