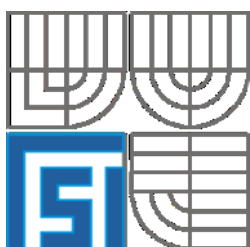


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ SVAROVÉHO SPOJE NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ TVRDOSTI

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELD MATERIALS BASED ON
HARDNESS TEST

DISERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MARTIN STODOLA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUBOMÍR JUNEK, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Práce se zabývá stanovováním mechanických vlastností materiálu na základě provedené instrumentované zkoušky tvrdosti. Podnětem k této práci byla smlouva o výzkumném projektu mezi ÚAM Brno, s.r.o. a společností ČEZ, a.s., kdy úkolem bylo vyvinout metodiku vyhodnocování změny mechanických vlastností pomocí NDT metody. Z těchto důvodů je vyvíjení metodiky zaměřeno především pro použití v praxi se zaměřením na určování mechanických vlastností heterogenního svarového spoje v provozu. Mechanické vlastnosti materiálu jsou určovány pomocí provedení nedestruktivního instrumentovaného měření tvrdosti dle Vickerse. Vyvíjená metodika pro stanovení základních mechanických vlastností je založena na principu inverzního modelování instrumentovaného měření tvrdosti metodou konečných prvků, kdy výstupem je indentační křivka a změřený povrch vtisku po odlehčení. Porovnáváním výstupů z experimentálního instrumentovaného měření tvrdosti a výstupů z modelované zkoušky tvrdosti pomocí MKP je dosaženo základních mechanických vlastností materiálu.

Klíčová slova: instrumentovaná zkouška tvrdosti, mechanické vlastnosti, MKP, Vickersův indentor, vtisk, indentační křivka, heterogenní svarový spoj

Abstract

This dissertation thesis deals with determination of the mechanical properties of weld materials based on instrumented hardness test. This work was caused by the research project between IAM Brno Ltd and CEZ corp., when the task was to develop a methodology for evaluation of mechanical material properties using NDT methods. For these reasons the development of methodology is reflected especially for use in practice focusing to determining the mechanical properties of the heterogeneous weld joint on the assembled equipment. The mechanical material properties are determined by carrying out non-destructive tests of the instrumented Vickers hardness. The developed methodology for determining of basic mechanical properties is based on the principle of inverse FEM modeling of the instrumented hardness tests, when output of the testing is indentation curve and measured surface imprint after unloading. The basic material mechanical properties are achieved by comparing the outputs of the experimental instrumented hardness tests and the outputs of the modeled hardness test using FEM.

Key words: instrumented hardness test, mechanical properties, FEM, Vickers indenter, imprint, indentation curve, heterogeneous weld

Bibliografická citace:

STODOLA, M.: Stanovení mechanických vlastností materiálů svarového spoje na základě měření tvrdosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016, 143 s. Vedoucí disertační práce: Ing. Lubomír Junek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Junka, Ph.D. s využitím vlastních znalostí získaných během studia a na základě použité a důsledně citované odborné literatury.

V Brně dne 7. 1. 2016

.....
Martin Stodola

Poděkování

Rád bych nejprve srdečně poděkoval svému školiteli Ing. Lubomíru Junkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a především za podporu, bez které by disertační práce nemohla vzniknout. S tím je velice úzce spojené poděkování svému zaměstnavateli, který umožnil využití firemních prostředků k realizaci této práce.

Dále bych chtěl také velice poděkovat mým kolegům za jejich ochotu a čas strávený při četných diskuzích nad problematikou disertační práce, zejména pak Ing. Martinu Vaškovi, Ph.D. za řešení problémů po stránce programovací.

Další lidé, kterým patří velké díky, jsou Ing. Hynek Hadraba, Ph.D. za provádění a pomoc při experimentálním měření tvrdosti na Ústavu fyziky materiálů, AV ČR a prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc., taktéž z Ústavu fyziky materiálů, AV ČR, za velice užitečné poskytnuté informace během tvorby disertační práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině, manželce a svým blízkým za psychickou podporu během celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
ABSTRACT	3
1. ÚVOD	12
2. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ	13
3. REŠERŠNÍ STUDIE	15
3.1. MĚŘENÍ TVRDOSTI	15
3.1.1. Metody zkoušení tvrdosti a mikrotvrdosti	15
3.1.1.1. Staticko-plastické zkoušky tvrdosti (vnikající)	16
3.1.1.2. Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti	18
3.1.1.3. Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti	19
3.1.1.4. Vrypové zkoušky tvrdosti	19
3.1.2. Přehled tvrdoměrů	19
3.1.2.1. Stacionární tvrdoměry	19
3.1.2.2. Přenosné tvrdoměry	21
3.1.2.3. Přehled vhodných tvrdoměrů	24
3.2. STANOVOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	29
3.2.1. Indentační zkoušky a mechanické vlastnosti	30
3.2.2. Stanovení mechanických vlastností materiálu pomocí instrumentovaného měření tvrdosti	31
3.2.2.1. Metoda určování závislosti napětí – přetvoření	34
3.2.2.2. Inverzní modelování pomocí MKP	35
3.2.2.3. Metoda neuronových sítí	37
4. HETEROGENNÍ SVAROVÝ SPOJ	39
4.1. MIKROSTRUKTURA HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE	39
4.2. PROVEDENÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ VVER 440	49
4.3. CHEMICKÉ SLOŽENÍ STRUKTUR HSS	52
4.4. MECHANICKÉ VLASTNOSTI STRUKTUR HSS	53
4.5. PROVOZNÍ PODMÍNKY	54
4.5.1. Vliv teploty a času	54
4.5.2. Vliv prostředí a času	59
4.5.2.1. Chemická koroze	59
4.5.2.2. Elektrochemická koroze	59
4.5.2.3. Radiační zkřehnutí	61
5. ANALÝZA PROBLÉMU A VOLBA METOD ŘEŠENÍ	62
5.1. METODA STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ Z MĚŘENÍ TVRDOSTI	62
5.2. DRUH INDENTORU	63
5.3. TŘENÍ	63
5.4. TUHOST INDENTORU	63
5.5. VÝBĚR ROVNICE POPISUJÍCÍ ELASTO-PLASTICKÉ CHOVÁNÍ MATERIÁLU	63
5.6. OPTIMALIZAČNÍ PROCES	63
6. REALIZACE PROCESU ŘEŠENÍ	65
6.1. NUMERICKÝ MODEL	66
6.2. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA	68

6.3.	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	84
6.3.1.	Tahové zkoušky	84
6.3.2.	Zkoušky tvrdosti	85
6.3.3.	Měření profilu vtisku	86
6.4.	OBDRŽENÁ DATA Z MĚŘENÍ	86
6.4.1.	Zpracování naměřených dat	86
6.5.	STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	91
6.5.1.	Stanovení Youngova modulu pružnosti	91
6.5.2.	Stanovení meze pevnosti a meze kluzu	92
6.5.2.1.	Metoda OptiSLang	93
6.5.2.2.	„Online“ metoda	95
7.	PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ PROBLÉMU	100
7.1.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z LADĚNÍ MODELU MATERIÁLU OCELI 10Ch2MFA	100
7.2.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z LADĚNÍ MODELU MATERIÁLU OCELI 22K	104
7.3.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z LADĚNÍ MODELU MATERIÁLU NEZNÁMÉ OCELI „X“	107
7.3.1.	Využití programu OptiSLang	107
7.3.2.	Využití metody „online“	110
7.4.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ STRUKTUR HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE	113
7.4.1.	Stanovení mechanických vlastností oceli 22K u heterogenního svarového spoje	114
7.4.1.1.	Stanovení mechanických vlastností oceli 22K v počátečním stavu	114
7.4.1.2.	Stanovení mechanických vlastností oceli 22K v zestárnutém stavu	116
7.4.2.	Stanovení mechanických vlastností 1. návaru heterogenního svarového spoje	119
7.4.2.1.	Stanovení mechanických vlastností 1. návaru v počátečním stavu	119
7.4.2.2.	Stanovení mechanických vlastností 1. návaru v zestárnutém stavu	121
7.4.3.	Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli heterogenního svarového spoje	124
7.4.3.1.	Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli v počátečním stavu	124
7.4.3.2.	Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli v zestárnutém stavu	126
7.4.4.	Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti heterogenního svarového spoje	129
7.4.4.1.	Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti v počátečním stavu	129
7.4.4.2.	Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti v zestárnutém stavu	131
8.	POŽADAVKY NA VHODNÝ TVRDOMĚR	134
9.	ZÁVĚRY A CÍLE DALŠÍHO VÝZKUMU	135
	LITERATURA	137
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	142
	SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE	143

1. Úvod

Tvrдост je definovaná jako odpor, který materiál klade vnikajícímu tělísku (indentoru). Tvrдост je mechanická vlastnost, která je velmi důležitá v technické praxi především pro kovové materiály a lze ji velmi snadno zjistit pomocí řady mechanických zkoušek. Používané metody měření tvrdosti prakticky neporušují měřenou součást a patří tak mezi nedestruktivní zkoušky.

V poslední době se tyto zkoušky využívají k určování nejen tvrdosti, ale také k určování mechanických vlastností materiálů běžně určených pomocí tahových zkoušek, které patří mezi zkoušky destruktivní. Určováním mechanických vlastností na základě měření tvrdosti se ve světě zabývá spousta vědců, kteří zkouší různé přístupy. Proto je v této práci vyvíjena vlastní metodika k určování mechanických vlastností materiálu svarového spoje za pomoci instrumentovaného měření tvrdosti. Určování mechanických vlastností pomocí nedestruktivních zkoušek je využíváno především v provozu, kde není možné odebírat vzorky ze zařízení a provádět na nich destruktivní zkoušky. Toto určování probíhá nejčastěji ze dvou důvodů. Prvním důvodem je určování mechanických vlastností svarových spojů, které vznikají až na místě v provozu a není možné tak určovat jeho vlastnosti tahovou zkouškou. Druhým důvodem určování změny mechanických vlastností během provozu je tzv. stárnutí materiálu. V provozu je materiál vystavován zatížení a prostředí, která ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu. Nedestruktivní zkouškou tvrdosti je tak kontrolováno, zda se výchozí mechanické vlastnosti během provozu výrazně nemění a nečiní tak zařízení nevyhovujícím z pohledu návrhových provozních podmínek, na které bylo zařízení navrženo.

Důvodem k započetí práce byl výzkumný projekt mezi ÚAM Brno, s.r.o. a společností ČEZ, a.s., kdy úkolem bylo vyvinout metodiku vyhodnocování mechanických vlastností pomocí NDT metody. S tímto účelem je vyvíjení metodiky zohledněno především pro použití v praxi se zaměřením na určování mechanických vlastností heterogenního svarového spoje měřením instrumentované tvrdosti.

Vytvořená a v této práci prezentovaná metodika uvedeným požadavkům daným praxí zcela vyhovuje. Výsledkem je postup, který v efektivním časovém rámci dostatečně přesně stanovuje mechanické vlastnosti měřeného materiálu.

Cílem disertační práce bylo vyvinout metodiku pro stanovení mechanických vlastností materiálů svarového spoje (stanovení napěťově-deformačních křivek) na základě znalosti indentační křivky materiálu, získanou při měření tvrdosti. Pro danou konfiguraci materiálů svarového spoje se vychází z indentačních křivek, změřených profilů vtisku a známých změřených mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky, které byly použity k verifikaci navržené metodiky.

2. Formulace problému a cíle řešení

Při dlouhodobém provozu zařízení dochází ke změně mechanických vlastností jeho materiálu. K těmto změnám dochází z důvodu vlivu prostředí, ve kterém zařízení pracuje, nebo jen působením času při zvýšených teplotách. Tyto změny mnohdy nelze v provozu určit destruktivní zkouškou, zejména na elektrárnách. Ve většině případů nemůžeme ze zařízení odebrat vzorek materiálu a na něm provádět materiálové zkoušky, aniž by se porušila funkčnost zařízení. Pro stanovení mechanických vlastností materiálu za provozu se nejčastěji používá metoda odběru malých vzorků. Využívá možnosti odběru tenké vrstvy materiálu z povrchu zařízení, aniž by to narušilo provozuschopnost a bezpečnost zařízení. Metoda se v literatuře nazývá „small punch test“. U tlakových nádob, zejména v jaderném průmyslu, je tato metoda nepoužitelná, neboť není možné odebírat i tenké a relativně malé vzorky z bezpečnostně významných zařízení. Proto se nabízí možnost využití měření tvrdosti ke stanovení mechanických vlastností materiálu provozovaného zařízení. Měření tvrdosti je v provozu běžně používanou nedestruktivní metodou, a to i na jaderných elektrárnách. Tato skutečnost se stala základem pro návrh této disertační práce.

Cílem této disertační práce bylo vyvinout metodiku pro stanovení mechanických vlastností materiálů svarového spoje (základní mechanické vlastnosti stanovené ze závislosti napětí - deformace) na základě znalosti indentační křivky materiálu, získanou při instrumentovaném měření tvrdosti.

Vývoj metodiky vycházel z dobře známých změřených mechanických vlastností tahovou zkouškou, indentačních křivek a změřených profilů vtisku. Pomocí metody MKP je simulována indentační zkouška, přičemž nelineární chování materiálu při zkoušce je popsáno matematickou funkcí. Výstupem ze simulované zkoušky tvrdosti pomocí programu MKP je vypočtená indentační křivka, která je porovnávána s experimentální indentační křivkou. Optimalizací parametrů v matematickém popisu nelineárního chování materiálů se musí docílit shody numerických a experimentálních indentačních křivek. Z optimalizovaných parametrů výpočtového modelu materiálového chování při simulaci měření tvrdosti je sestavena deformačně-napěťová (D-N) křivka. Tato křivka je porovnána s experimentálně změřenou tahovou křivkou napětí – deformace. Následně pro ověření správnosti stanovení parametrů chování materiálu je provedena jejich verifikace na sérii měření o různé hloubce vtisku na materiálu (feritický i austenitický materiál).

Hlavním cílem disertační práce bylo **vyvinout metodiku pro stanovení základních mechanických vlastností (smluvní mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti) na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti v provozu**. Metodika splňuje požadavek stanovení materiálových vlastností materiálu z instrumentované zkoušky tvrdosti, aniž by bylo známo, o jaký materiál se jedná.

Dílčí cíle práce [80]:

- Vyvinout metodiku pro stanovení mechanických vlastností známých a dobře proměřených homogenních ocelí, používaných v energetice (22K, P91, 10Ch2MFA) na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti.
- Ověření navržené metodiky na dalších vzorcích homogenních ocelí (použití metodiky a porovnání výsledků s experimentálními tahovými křivkami).

- Aplikace metodiky na určení mechanických vlastností oblastí heterogenního svarového spoje.
- Určit vhodný tvrdoměr, použitelný pro vyvinutou metodiku.

Pro poslední bod byla vyjmenována kritéria, podle kterých bude veden výběr vhodného tvrdoměru:

- Pro získávání mechanických vlastností materiálu musí být zaznamenávána indentační křivka, v závislosti síla vtlačování na hloubce vtisku indentoru. Indentační křivka je získána z instrumentovaného měření tvrdosti a musí se skládat ze zatěžovací i odlehčovací křivky.
- Měření tvrdosti probíhá na zařízení (materiálech) v provozu.
- Musí být dobrá manipulovatelnost se zařízením (některé svary jsou i na méně dostupných místech).

3. Rešeršní studie

Pro splnění cílů disertační práce bylo nejprve třeba provést rešeršní studii ke zjištění aktuálního stavu znalostí řešené problematiky. Rešeršní studie je rozdělena na dvě oblasti. V první části jsou rozebrány možnosti, jakým způsobem lze měřit tvrdost a jaké zařízení je možné použít pro toto měření, které bylo výchozím bodem k vývoji metodiky určování mechanických vlastností na základě měření tvrdosti (kapitola 3.1). V druhé části je provedena rešeršní studie na metodiky určování mechanických vlastností na základě provedeného měření tvrdosti (kapitola 3.2).

3.1. Měření tvrdosti

V této kapitole je uveden stručný přehled možností měření tvrdosti a poté je uvedena rešeršní studie tvrdoměrů se zaměřením na možnost měření instrumentované tvrdosti na zařízení v elektrárnách při provozu (při odstávce bez potřebné demontáže zařízení).

3.1.1. Metody zkoušení tvrdosti a mikrotvrdosti

Metody zkoušení tvrdosti se obvykle dělí podle způsobu zatěžování:

- statické,
- dynamické,

a dále jsou rozděleny podle typu deformace měřeného povrchu:

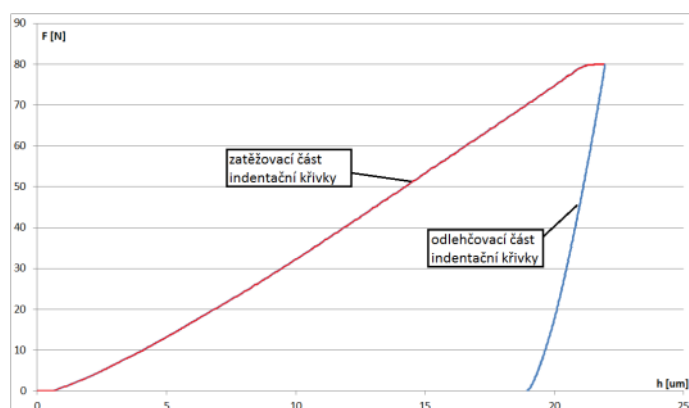
- elastické,
- plastické.

Různé metody měření tvrdosti jsou potom kombinacemi tohoto dělení.

Lze také rozdělit měření tvrdosti z pohledu možnosti měřícího zařízení na:

- měření se záznamem,
- měření bez záznamu.

Měření tvrdosti se záznamem se nazývá *instrumentované měření tvrdosti*, kdy výsledkem z měření není pouze hodnota tvrdosti, ale také indentační křivka. Tato indentační křivka popisuje závislost mezi silou působící na indentor a hloubkou vtisku v měřeném materiálu. Indentační křivku můžeme rozdělit na zatěžovací část a odlehčovací část indentační křivky (viz obr. 3.1.1).



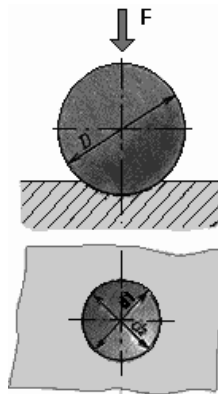
Obr. 3.1.1 – Schematický obrázek indentační křivky

3.1.1.1. Staticko-plastické zkoušky tvrdosti (vnikající)

Tyto zkoušky jsou nejpoužívanější zkoušky tvrdosti materiálů. Obecně je podstatou těchto měření vtlačování vnikajícího tělíska (indentoru) s velmi velkou tvrdostí do povrchu zkušební tělesa zatěžované silou F působící kolmo ke zkoušenému povrchu po stanovenou dobu. Měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku indentoru. Podle zkušební metody se pouze odlišují indentační tělíska a hodnocení vzniklého vtisku.

Zkouška tvrdosti dle Brinella - indentorem je ocelová kalená kulička, kulička z tvrdokovu nebo kulička z karbidu wolframu o daném průměru D . Vyhodnocují se dva kolmé průměry vtisku d_1 , d_2 , z nich se vypočítá aritmetický průměr d a z toho se počítá tvrdost ze známých hodnot D , F , d :

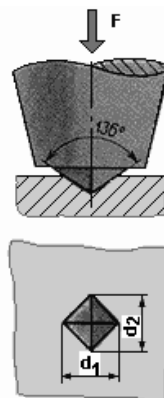
$$HB = \frac{1}{9,80665} \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$



Obr. 3.1.2 – Schematický obrázek vtisku při zkoušce tvrdosti dle Brinella [4]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse - indentorem je pravidelný čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami $\alpha = 136^\circ$. Tvrdost je vyhodnocena změřením délky úhlopříček vtisku d_1 , d_2 , z nich se vypočítá aritmetický průměr d a z toho se počítá tvrdost ze známých hodnot F a d :

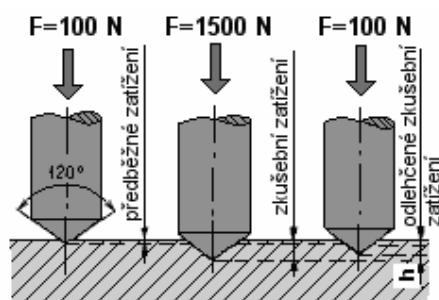
$$HV = \frac{1}{9,80665} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.2)$$



Obr. 3.1.3 – Schematický obrázek vtisku při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [4]

Zkouška tvrdosti dle Rockwella - indentorem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem zaoblení 0,2 mm nebo ocelová kulička o průměru 1,5875 mm ($1/16''$) nebo 3,175 mm ($1/8''$). U této zkoušky je rozdíl oproti předchozím zkouškám v tom, že indenter se vtlačuje

do zkušební tělesa nadvakrát za určitých podmínek. Hodnota tvrdosti se poté určuje z trvalé hloubky vtisku h .



Obr. 3.1.4 – Schematický obrázek vtisku při zkoušce tvrdosti dle Rockwella [4]

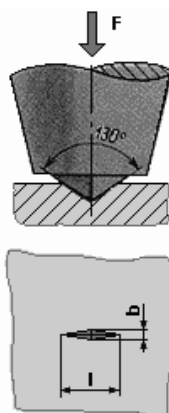
Měření zkoušky mikrotvrdosti

Název mikrotvrdost se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení tak, aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Mikrotvrdost nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. K proměřování vtisku slouží přesná optika. Pro zkoušky mikrotvrdosti jsou použitelné jediné vnikací metody s diamantovým indentorem. Zkouškami mikrotvrdosti jsou Vickersova, Knoopova a Berkovičova metoda. Měření mikrotvrdosti se používá k vyhodnocování tvrdosti velmi slabé vrstvy (povlaky) nebo i tvrdost jednotlivých zrn mikrostruktury materiálu. Problémem měření mikrotvrdosti je drsnost měřeného povrchu a měření je výrazně ovlivněno vzájemnou polohou indentoru a povrchu.

Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse – zkouška se provádí stejně jako klasická zkouška tvrdosti dle Vickerse. Je zde pouze rozdíl ve velikosti zatížení. Zatímco při měření tvrdosti se používá zatížení od 1,96 N (0,2 kp) výše, měření mikrotvrdosti se stanovuje zatížením v rozmezí od 0,098 N do 1,96 N (0,01 kp do 0,2 kp).

Zkouška mikrotvrdosti dle Knoop - indentorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovými úhly 130° a $172,5^\circ$ (poměr úhlopříček je 7:1). Tvrdost se vyhodnocuje měřením délky delší úhlopříčky vtisku l a z té se počítá tvrdost ze známých hodnot F a l :

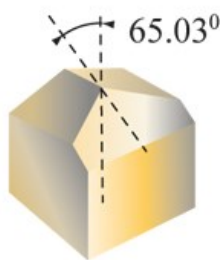
$$HK = 1,4509 \cdot \frac{F}{l^2} \quad (3.3)$$



Obr. 3.1.5 – Schematický obrázek vtisku při zkoušce tvrdosti dle Knoop [4]

Otisky u metody dle Knoop jsou při stejném zatížení téměř trojnásobně delší a mělčí než u zkoušky dle Vickerse.

Zkouška mikrotvrdomosti dle Berkoviče - indentorem je trojboký diamantový jehlan s velikostí úhlu $65,03^\circ$ nebo $65,27^\circ$ mezi osou indentoru a stěnou indentoru (obrázek 3.1.6), tvrdost se vyhodnocuje opět měřením délky úhlopříček.

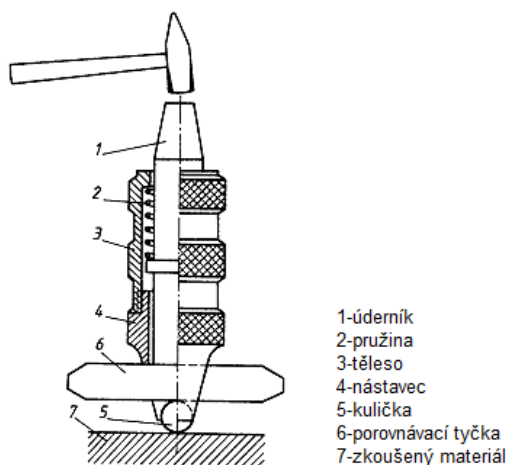


Obr. 3.1.6 – Obrázek indentoru dle Berkoviče [5]

Všechny zkoušky se provádí na povrchu, který je hladký, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a bez mazadel. Obecně platí, že při těchto zkouškách na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace.

3.1.1.2. Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti

Poldi kladívko – mobilní tvrdoměrné zařízení, často používané ve výrobních procesech. Součástí kladívka je etalonová tyč vyrobená z materiálu o známé tvrdosti. Zkouška se provádí úderem dílenského kladiva do Poldi kladívka, kdy dojde k současnému vtlačení vnikacího tělíska jak do měřeného materiálu, tak do etalonové tyče. Na základě známé tvrdosti etalonové tyče dochází k porovnání rozměrů vtisku do etalonové tyče a měřeného vzorku a určení tvrdosti pomocí tabulek. Vnikajícím tělískem je ocelová kalená kulička. Zatížení je libovolné, vyvolané ručně úderem dílenského kladiva.



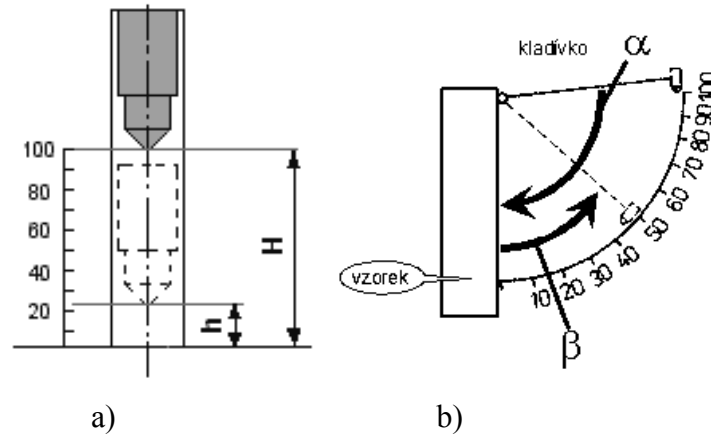
Obr. 3.1.7 – Schematický obrázek provedení měření tvrdosti Poldi kladívkem [4]

Baumannovo kladívko – mobilní tvrdoměrné zařízení často používané ve výrobních procesech. Podstata zkoušky spočívá v odjištění pružiny, která je součástí kladívka. Úderem kladívka na vnikající tělísko, kterým je ocelová kalená kulička, dojde ke vtlačení do povrchu měřeného tělesa. Tvrdost se určuje jako poměr zatížení a kolmého průmětu vtisku, získaného ze změřené průměrné velikosti průmětu vtisku. Síla nárazu je vždy stejná a známá.

Na tomto principu měření je založena většina přenosných dynamických tvrdoměrů.

3.1.1.3. Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti

Podstata těchto zkoušek je založena na odrazu vnikacího tělíska od měřeného materiálu. Vnikající těleso je pouštěno z určité výšky H – *Shoreho skleroskop*, nebo určitého úhlu α – *Duroskop*, a tvrdost se určuje z naměřené výšky h nebo úhlu β , do kterých míst vnikající těleso vystoupá (obr. 3.1.8). Shoreho skleroskopem se měří vzorky v horizontální poloze. Duroskopem jsou měřeny plochy ve svislé poloze. Tyto metody nejsou ovšem už tak spolehlivé a jsou tedy nepřesné.



Obr. 3.1.8 – Schematický obrázek provedení měření tvrdosti [4]
a) Shoreho skleroskopem b) Duroskopem

3.1.1.4. Vrypové zkoušky tvrdosti

Tyto zkoušky se těžko začleňují do jedné ze tří výše uvedených kategorií, proto jsou zde uvedeny samostatně. Dnes jsou používány jen pro tvrdé a křehké materiály, jako jsou sklo a porcelán. V technické praxi se používá *zkouška podle Martense*. Podstata této zkoušky spočívá v podobě přitlačování kuželového diamantového hrotu měnitelným tlakem na leštěný povrch měřeného vzorku, který se pohybuje danou rychlostí. Mírou tvrdosti je pak síla F , potřebná ke vzniku vrypu širokého 0,01mm.

3.1.2. Přehled tvrdoměrů

Tvrdoměry, které se v dnešních dnech používají, můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny a to na *stacionární tvrdoměry* a *přenosné tvrdoměry*.

3.1.2.1. Stacionární tvrdoměry

Stacionární tvrdoměry jsou nejrozšířenější hlavně v laboratořích nebo strojírenských dílnách, kde není problém tvrdoměr umístit. Jsou umístěné na pevném podstavci a lze s nimi provádět měření pouze na vzorcích nebo na malých částech zařízení. Tyto tvrdoměry, jak již bylo uvedeno, pracují na základě vtlačování daného indentoru do měřeného materiálu.

Na trhu se vyskytují stacionární tvrdoměry, které měří tvrdost dle Brinella, Vickerse a Rockwella. V současné době se též vyskytují univerzální tvrdoměry, které měří tvrdost v různých stupnicích.

Tvrdoměry měřící **dle Brinella** se používají zejména pro stanovení tvrdosti nehomogenních či hrubozrnných materiálů, u kterých nelze použít pro vtisk diamantový hrot. Velmi často se používá pro stanovení tvrdosti odlitků po normalizačním žíhání. Tvrdoměry disponují zatížením 147,1 N – 29430 N (15 – 3000 kp). Dřívější modely stolních tvrdoměrů neměly optiku pro následný odečet průměrů vtisku, který bylo nutno realizovat běžným přenosným mikroskopem se zvětšením 20x nebo 40x.

Oproti tomu současné automatizované stojanové tvrdoměry mohou obsahovat plně automatický systém odečtu hodnot na základě obrazové analýzy.



Obr. 3.1.9 – Tvrdoměr měřící dle Brinella BRIN 200D s plně automaticky měřícím systémem od firmy HANYKO Praha [7]

Stacionární tvrdoměry měřící **dle Vickerse** je možno ještě rozdělit na mikrotvrdoměry a makrotvrdoměry. *Makrotvrdoměry* se používají pro stanovení tvrdosti základního materiálu, tvrdosti jádra vzorku či pro měření povrchové tvrdosti. Tyto tvrdoměry disponují zatížením v rozsahu 9,81 N – 490,5 N (1-50 kp) a zvětšením 200x. *Mikrotvrdoměry* se používají zejména pro měření průběhu tvrdosti tvrzených vrstev a pro stanovení tvrdosti jednotlivých fází slitin. Disponují zatížením 0,098 N – 19,62 N (0,01-2 kp) a zvětšením až 500x. Stolek s mikroposuvem umožňuje posun vzorku ve dvou osách s přesností 0,01 μm .



Obr. 3.1.10 – Mikrotvrdoměr měřící dle Vickerse Micromet 5104 od firmy HANYKO Praha [7]

Stacionární tvrdoměry měřící **dle Rockwella** se používají zejména pro měření povrchové tvrdosti tepelně zpracovaných vzorků. Hodnota tvrdosti se zobrazuje na displeji tvrdoměru bezprostředně po vykonání zkoušky. Tvrdoměry disponují stupnicí standard Rockwell 588,6 N – 1471,5 N (60-150 kp), případně Rockwell Superficial 147,15 N – 441,45 N (15-45 kp) pro měření tloušťek vrstev až 0,2 mm.



Obr. 3.1.11 – Mikrotvrdoměr měřící dle Rockwella MacroMet 5101 Twin Rockwell pro tenké povrchy od firmy HANYKO Praha [7]

Stacionární **univerzální tvrdoměry** se svojí konstrukcí podobají všem stacionárním tvrdůměrům. Univerzální tvrdoměr je schopen měřit tvrdost dle všech výše uvedených metod díky možnosti vyměňování měřících hlav u těchto přístrojů.



Obr. 3.1.12 – Univerzální tvrdoměr DIGI-Test II zprostředkovávaný firmou JD Dvořák [8]

Uvedený tvrdoměr je schopen automaticky rozpoznat měřící hlavu a dle ní si nastavit parametry měření (čas, síla).

3.1.2.2. Přenosné tvrdoměry

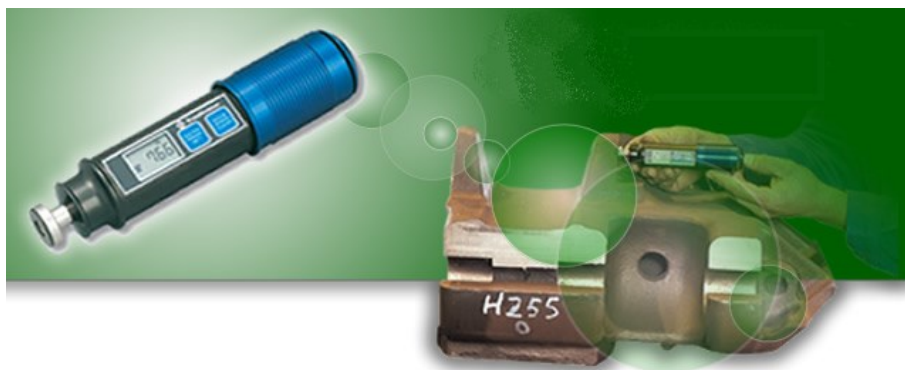
Přenosné tvrdoměry mají zcela určitě nezastupitelné místo v měření tvrdosti, protože častým požadavkem je měření tvrdosti na vstupních polotovarech nebo na hotových výrobcích, jejichž

rozměry přesahují možnosti měření pomocí stacionárních tvrdoměrů. Ruční tvrdoměry využívají měřicí metody, které jsou statické a vycházejí z definice podle Brinella, Vickerse či Rockwella, nebo využívají dynamický princip podle Leebea. Existují také tvrdoměry využívající ultrazvukovou metodu.

Podle provedeného průzkumu se dá říci, že největší zastoupení na trhu mezi přenosnými tvrdoměry mají právě tvrdoměry pracující na dynamickém principu.

Měření *dynamickou metodou* je prováděno pomocí sondy vystřelené směrem k testovanému objektu. Na povrch naráží definovanou rychlostí (danou kinetickou energií). Nárazem vzniká deformace povrchu, díky které vnikající tělísko ztrácí část své energie. Čím je větší deformace, tím je větší ztráta energie. Pro různě tvrdé materiály jsou používány různé sondy (vnikající tělíska) o různých tvarech. Měřenou hodnotu může ovlivnit celá řada vnějších vlivů, jako například tuhost zkoušeného tělesa (geometrie, hmotnost, upevnění, kvalita povrchu). Proto existuje mnoho měřicích sond vhodných k měření různých materiálů a vždy při odlišném měření je potřeba přístroj kalibrovat. Většina přenosných tvrdoměrů pracujících dynamickou metodou jsou velice malé a lehké. V základním vybavení je obsaženo již několik druhů sond, mají svoji interní paměť pro ukládání naměřených dat a je možnost přímého připojení k PC nebo tiskárně.

Tato metoda je vhodná pro měření na velkých dílech, pro hrubozrnné materiály a tam, kde je horší přístup k místu. Touto metodou lze měřit ze všech směrů. Je zde nutná příprava měřeného povrchu, a to na drsnost Ra 6,3 a lepší [9].



Obr. 3.1.13 – Přenosný tvrdoměr měřící tvrdost dynamickou metodou [9]

Měření tvrdosti *ultrazvukovou metodou* využívá axiálně kmitající tyčinku s Vickersovým diamantovým hrotem. Po zatížení na měřeném materiálu se změní frekvence kmitání tyčinky. Tato změna frekvence je závislá na ploše vpichu (určuje tvrdost materiálu) a modulu pružnosti měřeného materiálu (ke kalibraci přístroje musíme znát modul pružnosti měřeného materiálu). Metoda je rychlá a přesná a umožňuje operativní měření malých dílů a tvrdosti vrstev při malých zatěžovacích silách. Je také vhodná pro měření v těžko přístupných místech. Vzhledem k minimálnímu porušení povrchu měřeného materiálu je vhodná pro kontrolu tvrdosti na finálních opracovaných plochách (lopatky turbín, evolventní plochy ozubených kol, svarové spoje). Při měření velmi malých dílů je nutné použít stojan.

Požadavky měřeného vzorku: minimální tloušťka materiálu je 2 – 3 mm, minimální hmotnost měřeného dílu 0.3 kg (při měření dílu menší hmotnosti je nutno díl akusticky spojit s dílem hmotnějším), homogenní materiály, kolmé vedení sondy k měřenému povrchu.

Výhody měření: dobrý přístup k místu měření, měření ze všech směrů. Pro měření je zapotřebí dobrá příprava povrchu s drsností Ra 1,6 a lepší [9].



Obr. 3.1.14 – Přenosný tvrdoměr měřící tvrdost ultrazvukovou metodou [9]

Tvrdoměr měřící **metodou TIV** je jediný přenosný tvrdoměr, který vyhodnocuje vtisk Vickersova diamantu optickou cestou. Přístroj vyhodnocuje automaticky nebo manuálně úhlopříčky vtisku. Tvrdoměr TIV („through indenter view“) používá statickou metodu. Sonda přístroje TIV obsahuje CCD kameru umístěnou s optikou hned za průhledným Vickersovým indentorem, která snímá v reálném čase vpich v materiálu a číslíkovým zpracováním obrazu vyhodnocuje délku úhlopříček. Statické zatížení zajišťuje stabilitu soustavy. Měření není závislé na směru měření, ani na hmotnosti dílu ani na druhu měřeného materiálu (není potřeba kalibrace vzhledem k materiálu). Vtisk je velmi malý a lze tedy tuto metodu používat na finálně obrobených plochách. Přístroj je dodáván s ruční sondou 10 nebo 50 N. Má velice snadnou obsluhu s možností uložení dat, které lze přenést do PC. Je to jediný tvrdoměr s přímou kontrolou vnikajícího tělíska: poloha diamantu je kontrolována přímo na obrazovce. Další výhodou je, že na měření nemá vliv hmotnost a geometrie zkoušených dílů. Mezi nevýhody můžeme zařadit, že se používá na homogenní materiály, je velice citlivý na kolmost a je zde opět nutná dobrá příprava povrchu až na Ra 1,6 a lepší [9].



Obr. 3.1.15 – Přenosný TIV tvrdoměr měřící tvrdost stacionární Vickersovou metodou [9]

Dalším typem tvrdoměru, který pracuje na základě dynamické metody (obsahuje předem zatíženou pružinu), je „*PUSH-TYPE*“ tvrdoměr. Tento tvrdoměr obsahuje systém měření, který je zcela mechanický a využívá zvláštní, předem zatíženou pružinu. Indentorem je diamantový hrot. Pro přesnější měření malých částí je k dispozici i stojan a naopak pro měření velkých částí je k dispozici magnetický držák. Tento tvrdoměr se dodává buď v analogové, nebo v digitální podobě.



Obr. 3.1.16 – Přenosný PUSH-TYPE tvrdoměr – a) analogový, b) digitální [9]

3.1.2.3. Přehled vhodných tvrdoměrů

V předešlé podkapitole je uveden obecný přehled možností všech tvrdoměrů, se kterými jsem se v literatuře do této doby seznámil. Jsou to tvrdoměry, které obecně vyrábějí s různými modifikacemi všechny firmy na světě, které se touto problematikou zabývají a jsou přes české firmy zprostředkovávány v ČR. V této podkapitole jsou již uvedeny tvrdoměry, na kterých je možné realizovat vyvinutou metodiku stanovení mechanických veličin. Tyto tvrdoměry zde jsou představeny už jen jako jednotlivé modely.

Z vymezených cílů práce a s poznatky z rešeršní studie ohledně možností měření tvrdosti vyplývá, že nejlepší variantou je tvrdoměr měřící podle stacionárních metod dle Brinella či Rockwella s tím, že tvrdoměr musí splňovat funkci přenosnosti a může měřit zařízení v provozu. Bohužel pokud je nutno měřit velmi malé plošné rozměry s malým zatížením (mikrotvrdost), je potom nutné přistoupit i k měření dle Vickerse s diamantovým indentorem.

Z výše uvedených kritérií a dosavadním výskytem na trhu, co se týká nabídek tvrdoměrů, se zatím ukazují jako vhodné cesty řešení výběru tvrdoměrů tyto:

a) *Tvrdoměr Stress-Strain Microprobe System, model SSM-M1000TM*

Model SSM-B4000 (obr. 3.1.17) je o něco větší varianta modelu SSM-M1000TM. Tento model má pouze větší kapacitu zatížení. Model SSM-B4000 má zatížení až 17 800 N a model SSM-M1000TM má zatížení až 4 450 N, což je hodnota dostačující. Tyto tvrdoměry vyrábí a vytvořila si na tyto tvrdoměry patent americká firma *ATC (Advanced Technology Corporation)*. Tyto tvrdoměry pracují dle Brinellovy metody. Připevňovacím mechanismem k měřenému zařízení je elektromagnet o ploše zhruba 35x7,5 cm. Tyto tvrdoměry by dle propozic měly umět vyhodnocovat základní materiálové charakteristiky (mez kluzu, mez pevnosti,...), než jen hodnotu tvrdosti. Avšak po konzultaci s panem profesorem Dlouhým z AV ČR, který byl v kontaktu s touto firmou, jsou tato měření opět závislá na znalosti měřeného materiálu. Pokud měřený materiál není znám, pak tento přístroj, dle ověření pana profesora, v určování ostatních materiálových charakteristik není dostatečně přesný.



Obr. 3.1.17 – Přenosný tvrdoměr Stress-Strain Microprobe System, model SSM-B4000TM [10]

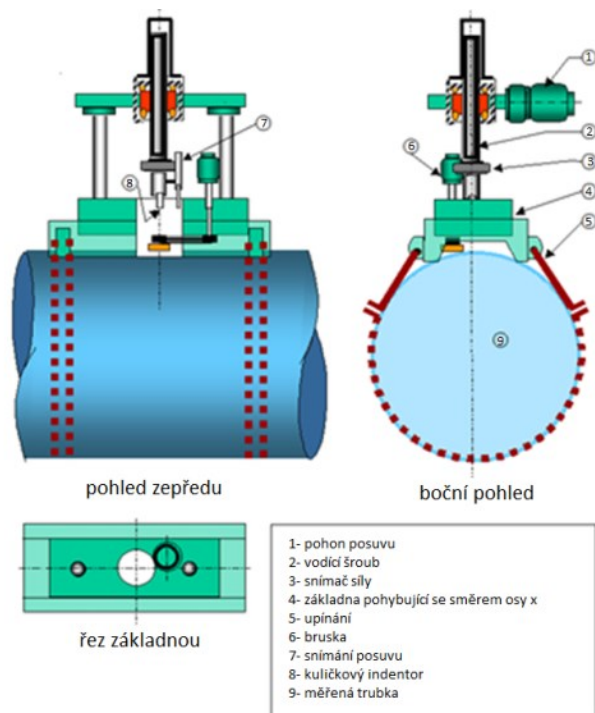
Indentorem tohoto tvrdoměru jsou kuličky z karbidu wolframu nebo nitridu křemíku o velikostech v průměru 0.25 mm (1/100“), 0.51 mm (1/50“), 0.76 mm (1/33“) a 1.57 mm (1/16“). Indentor se používá dle tvrdosti zkoušeného materiálu. Vyhodnocování probíhá automaticky, ale jak již bylo uvedeno pro dostatečnou přesnost, je nutné znát měřený materiál. Rozsah hloubky vtlačení je od 40 μm do 400 μm .

Pořizovací cena samotného přístroje byla v roce 2006 zhruba 2,6 mil. Kč. Jedná se ovšem pouze o samotný přístroj, ke kterému je nutné dokoupit příslušenství.

b) Tvrdoměr od společnosti National metallurgical laboratory

Další firma, která se zabývá vývojem přístrojů na měření tvrdosti, je indická firma *NML (National metallurgical laboratory)*. Tento tvrdoměr (obr. 3.1.18) provádí instrumentované měření tvrdosti dle metody Brinella, kdy výstupem je indentační křivka, potřebná pro vyhodnocování dalších materiálových vlastností. Upevňovacím mechanismem tvrdoměru k měřenému vzorku je tentokrát mechanické, v podobě upínacího řetězu a svorek, což umožňuje měření různých průměrů trubek.

Pořizovací cena tohoto přístroje byla zjištěna při posledním průzkumu a kontaktu v roce 2006 cca 1,2 mil. Kč.



Obr. 3.1.18 – Schematický náčrt přenosného tvrdoměru od firmy NML

c) RS – MAG od Testimy

Další možností přenosného tvrdoměru nám byl nabídnut od české firmy *Testima*, která zprostředkovává prodej přenosného tvrdoměru *RS-MAG*. Tento tvrdoměr měří tvrdost dle metod Brinella či Rockwella. Na obrázku 3.1.19 je znázorněn analogový přenosný tvrdoměr RS – MAG. Vyrábí se také v podobě digitální, u kterého je měření přesnější. Hmotnost tohoto tvrdoměru je cca 20 kg a připevňovací mechanismus k měřenému zařízení je elektromagnet o ploše 10x5 cm. Elektromagnet je pouze z jedné strany od vnikajícího tělíska, proto by nebyl u heterogenních svarů problém, kdyby jedna trubka nebyla z magnetické oceli. Indentorem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo 1/16“ kulička pro metodu měření dle Rockwella. Pro měření dle Brinella je indentorem kulička z karbidu wolframu o průměru 2.5 mm. Rozsah zatížení pro měření dle Rockwella je cca od 580 N do 1450 N, pro měření dle Brinella je rozsah zatížení až do 1830 N. Tvrdoměr RS-MAG má rozsah směru měření v celém rozsahu (360°). Tento tvrdoměr pouze nemá záznam dat, což by nemusel být problém po domluvě s výrobcem a podílení se na vývoji záznamu dat.



Obr. 3.1.19 – Přenosný tvrdoměr RS-MAG zprostředkovávaný firmou Testima [11]

d) *Portable automated ball indenter – SC 07*

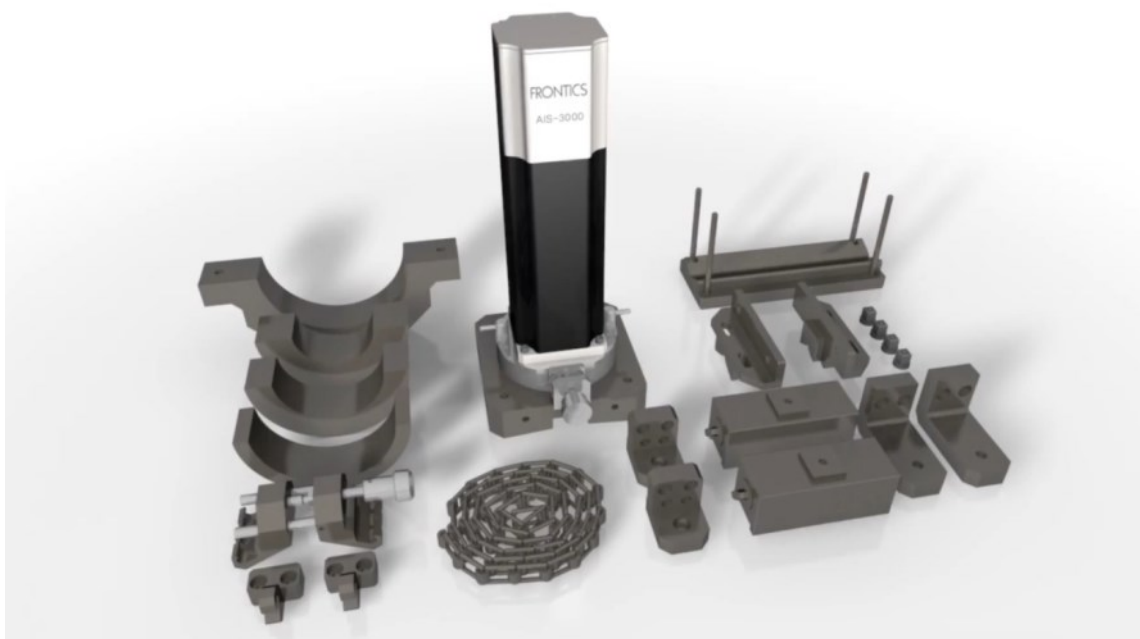
Další možností přenosného tvrdoměru je tvrdoměr *Portable automated ball indenter – SC07* od firmy *Ducom*. Tento tvrdoměr měří metodou dle Brinella, kdy indentorem je kulička z karbidu wolframu či křemíku o výjimečných průměrech 0.5, 0.7 nebo 1.5 mm. Tento přenosný tvrdoměr disponuje zatížením při měření až 3 500 N. Rozsah posuvu indentoru je od nulové polohy ± 2 mm s rozlišením 1 μm . Zpracování dat je automatické, kdy data jsou elektronicky zpracovávána. Nedostatkem tohoto tvrdoměru by mohl být rozsah měřených objektů, kterými jsou pouze trubky o průměru od 100 do 600 mm. Ostatní informace, jako je cena a rozměry tvrdoměru či způsob upnutí k objektu, bohužel na stránkách výrobce nejsou uvedeny, ale byl navázán kontakt prostřednictvím e-mailu a tyto informace byly od výrobce vyžádány. Přenosný tvrdoměr od firmy Ducom je zobrazen na obrázku 3.1.20 [12].



Obr. 3.1.20 – Přenosný tvrdoměr SC 07 nabízený firmou DUCOM [12]

e) Frontics AIS 3000

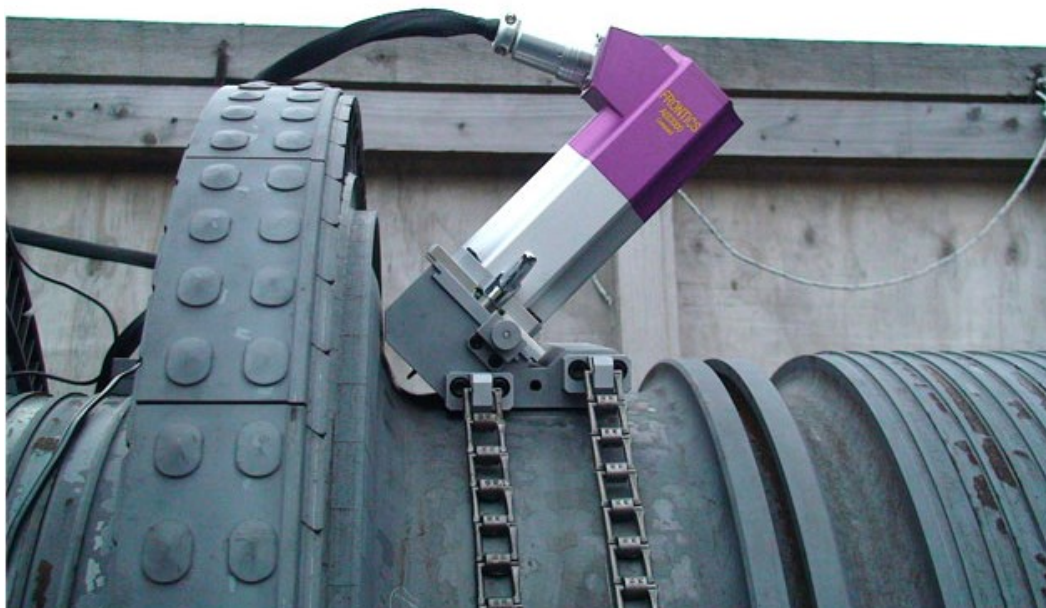
Posledním vhodným tvrdoměrem uvedeným v této práci je přenosný tvrdoměr *AIS 3000* od korejské firmy *Frontics*. Tento tvrdoměr měří metodou Brinella nebo Vickerse podle používaného indentoru. Vickersovým indentorem je diamantový jehlan o vrcholovém úhlu 136° , pro metodu dle Brinella je indentorem kulička z karbidu wolframu o průměru 0.5 nebo 1 mm. Základna přenosného tvrdoměru AIS 3000 (obr. 3.1.21) má rozměry 18x18 cm, vysoký je 43 cm a jeho hmotnost je 7 kg. Upínání daného tvrdoměru k měřenému objektu je buď mechanické (různé upevňovací mechanismy pro rozdílné rozměry trubek) nebo magnetické. Možnosti zatížení měřeného objektu je až 2940 N s rozlišením 0.05 N, rozsah posuvu indentoru je až 40 mm s rozlišením 0.1 μm . Zpracování naměřených dat je automatické v elektronické podobě, která jsou ukládána v PC a jsou přenesena pomocí kabelu či wireless modulu.



Obr. 3.1.21 – Přenosný tvrdoměr AIS 3000 nabízený firmou FRONTICS [13]

Rozměry měřených objektů jsou variabilní ve velikém rozsahu díky více druhům připevňovacích mechanismů. Lze měřit jak potrubí, tak rovné plochy díky magnetickému připevňovacímu mechanismu. Cena je odborníky odhadována na 3-4 mil. Kč, přesná cena produktu byla opět poptávána.

Tato firma disponuje velice podobným přenosným tvrdoměrem AIS 3000 compact (obr. 3.1.22), který je ještě více „přenosným“ tvrdoměrem díky svým rozměrům a hmotnosti, ovšem tyto klady mají na druhou stranu oproti modelu AIS 3000 zápory v jiných vlastnostech. Základna tohoto tvrdoměru má rozměry 8x8 cm, vysoký je 30 cm a jeho hmotnost je 3.5 kg. Možnosti zatížení měřeného objektu je až 980 N s rozlišením 0.025 N, rozsah posuvu indentoru je až 25 mm s rozlišením 0.1 μm . Z obr. 3.1.22 je vidět, že upínací mechanismus dovoluje měřit i méně dostupná místa.



Obr. 3.1.22 – Přenosný tvrdoměr AIS 3000 compact nabízený firmou FRONTICS [13]

Ovšem u všech těchto tvrdoměrů, které jsou uvedeny v této podkapitole, měří tvrdost statickou metodou a proto je nutno měřený objekt vždy opracovat na dostatečně nízkou drsnost, protože chyba instrumentovaného měření tvrdosti je závislá právě na drsnosti povrchu.

3.2. Stanovování základních mechanických vlastností materiálu

Měření mechanických vlastností materiálu je často spojováno provedením jednoosé tahové zkoušky. Vzorek materiálu je upnut do trhačího stroje a deformace vzorku je způsobená neustálým zvyšováním zatěžování, kdy je zaznamenávána závislost působení síly na deformaci vzorku. Způsob upnutí a provedení zkoušky se v průběhu času samozřejmě zdokonaloval, ale základní princip této zkoušky zůstal stále stejný. Tahová zkouška je tradiční metoda k získání modulu pružnosti, vlastností spojenými s elastickým chováním materiálu a plastické části deformačně-napěťové křivky.

Jednoosá tahová zkouška má samozřejmě výhody v provedení měření, ze kterého se jednoduše přímo vyhodnocují materiálové charakteristiky, avšak je zde také několik negativ [14]:

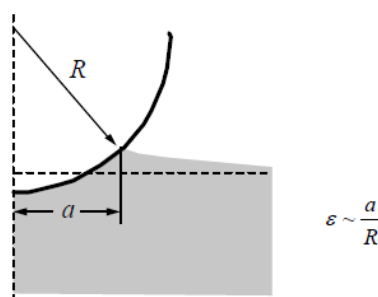
- Překvapivě se ukázalo, že je obtížné dosáhnout chyb v měření pod 10 procent, ačkoli v poslední době docházelo ke zdokonalení odhalení chyb vedoucí k nejistotám v měření (EU projekt TENSTAND). Upevnění vzorku do zařízení a metody měřící deformaci jsou zdrojem nejistot při měření a získání materiálových vlastností z měřených dat.
- K provedení zkoušky je potřeba velké množství materiálu. Tahové zkoušky se mohou provádět také na malých vzorcích, ale čím menší vzorek je, tím se můžeme setkat s větší chybou měření.
- Vzorky musí být obrobena do předepsané geometrie umožňující tahovou zkoušku, aniž by byly poničeny, či se měnily jejich mechanické vlastnosti.
- Zkouška je destruktivní.

Jinou zkouškou ke stanovení mechanických vlastností materiálu je také indentační zkouška nebo také zkouška tvrdosti.

3.2.1. Indentační zkoušky a mechanické vlastnosti

K získávání indentačních křivek, uváděných závislostí působící síly indentorem na hloubce jeho vtlačení do vzorku, je čím dál více používáno konečno-prvkové analýzy, což dokazuje závislost vedoucí od deformačně-napěťové křivky k indentační křivce. Avšak při používání konečno-prvkového modelování je potřeba znát reálné materiálové vlastnosti (deformačně-napěťovou křivku) posuzované součásti. Proto se vyskytla otázka, zda je možné touto metodou řešit inverzní problém, tj. pomocí znalosti indentační křivky určit deformačně-napěťovou křivku potřebnou jako vstup do konečno-prvkových analýz. Kdyby toto bylo možné, zbavili bychom se tak mnoha nevýhod vycházejících z tahové zkoušky, které u indentace nejsou. Měření tvrdosti může být přenosné, může být prováděno v provozu, je to nedestruktivní zkouška a příprava měřeného vzorku není náročná. Proto by se pro sledování změny mechanických vlastností zařízení během provozu stala levnější a snazší, bez potřeby svědečných vzorků.

Už v roce 1951 Tabor [15] empiricky ukázal, že existuje vztah mezi odezvou z měření tvrdosti a přetvořením způsobené indentací. Přetvoření způsobené kuličkovým indentorem je úměrné poměru poloměru otisku a ku poloměru indentoru R a je tedy funkcí hloubky [14].



Obr. 3.2.1 – Otisk kuličkového indentoru ve vzorku [14]

Pro zjednodušené určování mechanických vlastností z měření tvrdosti tak byly určeny empirické vztahy mezi hodnotou tvrdosti a mechanickými vlastnostmi poměrem dané konstanty vždy podle měřeného materiálu. V literatuře se vyskytují dva vztahy mezi hodnotou tvrdosti a mezí kluzu:

$$R_e \text{ (MPa)} = 3,45 \cdot HB \quad (3.4)$$

a

$$R_e \text{ (MPa)} = 10/3 \cdot H \quad (3.5)$$

kde $H \text{ [N/mm}^2\text{]} = F/S$,

$F \text{ [N]}$ – síla působící na indentor,

$S \text{ [mm}^2\text{]}$ – plocha vtisku na povrchu vzorku.

Vztah mezi hodnotou meze pevnosti a hodnotou tvrdosti je následující:

$$R_m = k \cdot HB, \quad (3.6)$$

kde k – konstanta závislá na měřeném materiálu.

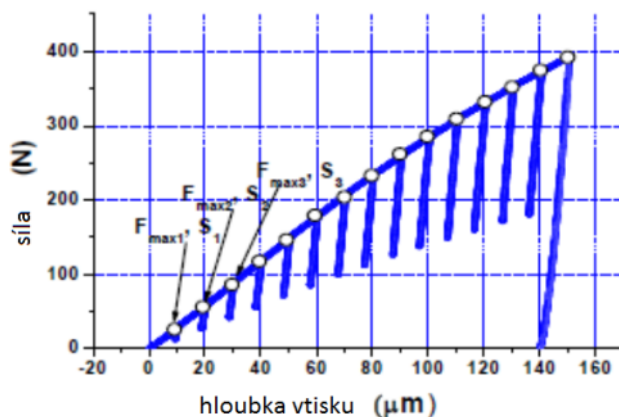
Tab. 3.2.1 – Tabulka konstant k odhadu meze pevnosti materiálu [16]

Materiál	k
Oceli	3,4 – 3,6
Austenitické oceli	3,7 – 4
Slitiny Cu	4,0 – 5,0
Slitiny Al	3,4 – 4,4
Slitiny Ni	5,0 – 5,5

Díky uvedeným vztahům je možné získat z jednoduchého měření tvrdosti přibližné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti.

3.2.2. Stanovení mechanických vlastností materiálu pomocí instrumentovaného měření tvrdosti

Se vzrůstající dostupností instrumentovaného měření tvrdosti, díky které je více informací ze samotného měření, je ovšem možné určovat tyto mechanické vlastnosti přesněji. Obzvláště potom, když je instrumentované měření tvrdosti prováděno cyklicky. To znamená, že indenter je zatěžován plynule až na jistou hodnotu síly zatěžování, poté je částečně odlehčen a takto se to opakuje až je indenter zatížen maximální celkovou silou a poté zcela odlehčen (viz obr. 3.2.2).



Obr. 3.2.2 – Indentační křivka při několikanásobném částečném odlehčení a zatížení [14]

Tímto způsobem měření získáváme ještě více dat z odezvy materiálu při různých hodnotách deformace. Toto opakující se zatěžování, navíc v případě kuličkového indentoru, může být prováděno v jednom místě, což umožňuje snadněji určovat materiálové charakteristiky zkoušeného materiálu. V této kapitole shrneme možnosti určování mechanických vlastností materiálu na základě instrumentovaného měření tvrdosti. V literatuře se vyskytují 3 metody, a to:

- 1) Určování závislosti napětí – přetvoření empirickými vztahy při různých hodnotách hloubky vtisku
- 2) Inverzní MKP modelování
- 3) Metoda neuronových sítí

U každé z těchto metod je deformačně – napěťová křivka určována na základě změřené a zaznamenané indentační křivky na materiálu, u kterého chceme určit materiálové vlastnosti. U každé z těchto tří metod existuje jiný přístup a jiná metodika k určování mechanických vlastností materiálu a každá vyžaduje jinou teoretickou znalost a technickou podporu. Hlavním předpokladem u těchto metod ke korektnímu určení mechanických materiálových vlastností měřeného vzorku je absence zbytkového napětí ve vzorku, protože výskyt zbytkového napětí ve vzorku nám může ovlivnit vyhodnocení mechanických materiálových vlastností[14].

U každé z uvedených metod je vždy několik *metodických faktorů* ovlivňujících přesnost určování mechanických vlastností na základě měření tvrdosti.

U určování mechanických vlastností na základě měření tvrdosti je vždy nutné zvolit **konstitutivní rovnici** elasto-plastického chování zkoušeného materiálu, díky které jsou určovány materiálové

charakteristiky. Autoři v literatuře používají například konstitutivní exponenciální rovnici popisující elasto-plastické chování dle:

- Hollomona [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_{pl}^n, \quad (3.7)$$

- Ludwiga [29], [30]

$$\sigma = \sigma_y + K \cdot \varepsilon_{pl}^n, \quad (3.8)$$

- Ramberg-Osgooda [31], [32], [33], [34]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n}, \quad (3.9)$$

- Voce [35]

$$\sigma = \sigma_0 + R_0 \cdot \varepsilon_{pl} + R_\infty \cdot (1 - e^{-b\varepsilon_{pl}}), \quad (3.10)$$

kde σ – napětí,

σ_y – mez kluzu,

σ_0 – mez úměrnosti,

ε – přetvoření,

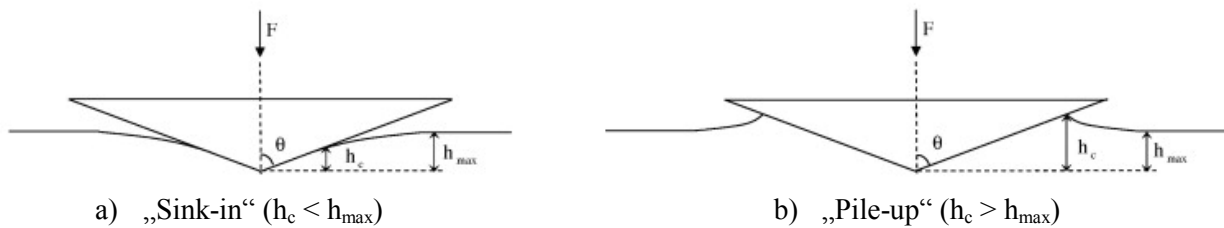
ε_{pl} – plastické přetvoření,

K, n, b, R_0, R_∞ - materiálové konstanty.

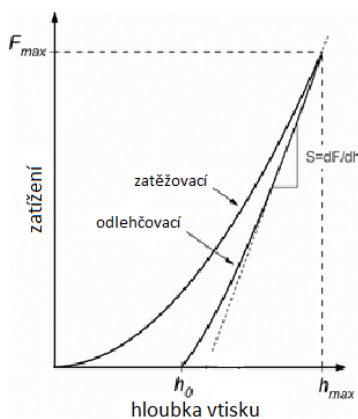
Dále se v literatuře odlišuje zvolený **indentor** při měření tvrdosti. Autoři převážně používají k určování mechanických vlastností jako indentor kuličku [18], [19], [20], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [29], [30], [31], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Méně se už pak vyskytuje diamantový jehlan a měření dle Vickerse [22], [27], [32], [43]. Výjimečně je také užíváno metodiky, kde bylo použito měření dle Berkoviče [28], [38], [40], přičemž indentorem je diamantový čtyřstěn a Rockwella [22], [32], [41], kdy je indentorem kužel. Rozlišují se také přístupy v modelování indentoru, a to z pohledu jeho **tuhosti**. Ne vždy autoři uvádí, jak je indentor modelovaný, což lze považovat jako jeden z důležitých faktorů ovlivňující stanovení mechanických vlastností. Ve [37] autoři právě porovnávají výsledky mezi stanovením mechanických vlastností s modelovaným indentorem jako tuhým a modelovaným indentorem jako pružným, přičemž docházejí k závěru, že u určování meze kluzu docházejí k lepším výsledkům u modelovaného tuhého indentoru než u pružného. Z rešeršní studie vyplývá, že se při vývoji určování mechanických vlastností používá modelování jak tuhého indentoru [22], [24], [25], [30], [34], [35], [37], [38], [42], tak i pružného [18], [26], [31], [32], [36], [37], [39], [44]. Dalším faktorem, který značně ovlivní přesnost určení mechanických vlastností materiálu je, zda při modelování simulace indentace uvažujeme **tření** v kontaktu mezi indentorem a měřeným vzorkem. Ač toto tření považujeme za důležité, někteří autoři uvádějí, že tření zanedbávají [26], [33], [34], [35].

Autoři popisují při různých přístupech určování mechanických vlastností chybu jejich určení. Například v [31] autor dosahuje chyby u testovaných 4 ocelí maximálně 5% u meze kluzu, kterou zapříčiňuje výskyt Lüdersovy deformace při experimentálním měření deformačně-napěťové křivky. U určení modulu pružnosti dosahuje maximální chyby 10% v porovnání s hodnotami získanými z tahové zkoušky. Autoři v [22] používají k optimalizaci software Matlab a MKP program k simulaci indentace Abaqus, kde optimalizují pouze indentační křivku. Jejich přístupem dosahují odchylky v hodnotách meze kluzu a modulu pružnosti v porovnání s experimentální deformačně-napěťovou křivkou maximálně 10%. Autoři v [27] určují hodnotu meze kluzu a meze pevnosti dokonce

s maximální chybou 3%, ovšem jejich metoda je založena na empirických vztazích, kde vystupuje parametr, který je závislý na materiálu. Tudíž při této metodě je nutné vědět, o jaký materiál k takovému určení přesnosti se jedná. V této zmíněné práci se také uvádí, že kromě určování mechanických vlastností materiálu dané deformačně-napětovou křivkou lze určovat materiálové charakteristiky dané lomovou zkouškou. Ve [21] jsou zdůrazněny faktory ovlivňující přesnost indentační křivky a následné určení mechanických vlastností, jako je reálný tvar indentoru, drsnost měřeného povrchu a heterogenita povrchu. V článku [32] autoři připomínají, že u inverzní metody nelze určit korektně deformačně-napětovou křivku pouze z ladění indentační křivky, protože z více kombinací hodnot parametrů materiálové rovnice lze naladit stejnou indentační křivku. Z těchto kombinací parametrů vyplývá vždy jiná deformačně-napětová křivka nebo-li jiné materiálové charakteristiky. Proto je vhodné optimalizovat nejen indentační křivku, ale i vzniklý profil vtisku indentoru. U metody závislosti deformace-napětí, kdy je užíváno empirických vztahů, pak autoři [39] používají korekční součinitele z důvodu vzniku tzv. „pile-up“ a „sink-in“ efektu od vzniku vtisku (obr. 3.2.3). Těmito součiniteli upravují hodnoty charakteristické z geometrie vzniklého vtisku, užívané v empirických vztazích. Ve stejném článku autoři také používají korekci deformace podle místa odečítání posuvu na modelu indentoru (zahrnutí elastické deformace řetězce od vrcholu indentoru k místu odečítání posuvu). Autoři zde tuto korekci používají pro zatížení až 1000 N. Jak již bylo dříve zmíněno, během provozu dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu. Toto dokazují pomocí indentační zkoušky a následného určení materiálových charakteristik v článku [19]. V případě určování mechanických vlastností pomocí empirických vztahů, ale i u metod inverzního modelování, autoři používají vztahy pro výpočet modulu pružnosti testovaného vzorku, kdy se využívá sklonu odlehčovací indentační křivky (viz obr. 3.2.4 a rovnice 3.11 a 3.12).



Obr. 3.2.3 – Znázornění „Sink-in“ a „Pile-up“ efektu při indentační zkoušce



Obr. 3.2.4 – Indentační křivka

$$S = \frac{dF}{dh} = \frac{2}{\pi} \cdot E_r \cdot \sqrt{A_c} \cdot \beta \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\mu_s^2}{E_s} + \frac{1-\mu_i^2}{E_i} \quad (3.12)$$

kde E_r , E_s , E_i – modul pružnosti relativní (vzorku, indentoru),

A_c – plocha průmětu vtisku,

μ_s , μ_i – poissonův poměr vzorku (indentoru),

β – koeficient závislý na druhu indentoru ($\beta_{\text{kulička}} = 1$,

$\beta_{\text{Vickers}} = 1.024$, $\beta_{\text{Berkovič}} = 1.034$) [58].

V následujících podkapitolách budou výše zmiňované metody stanovení mechanických vlastností materiálu na základě provedení instrumentované zkoušky tvrdosti blíže popsány a specifikovány výhody a nevýhody jejich použití.

3.2.2.1. Metoda určování závislosti napětí – přetvoření

Tato metoda používá metodu konečných prvků pouze k jedinému výpočtu a je zde použito empirických vztahů k určení konečného výsledku deformačně – napěťové křivky s použitím dat z MKP výpočtu. Tento přístup tak nezabírá velký výpočtový čas, protože není potřeba dalších MKP výpočtů. Nejlepších výsledků je dosaženo měřením několika materiálů, které mají podobnou deformačně – napěťovou křivku a jsou tak hromadně generovány empirické vztahy pro celou skupinu materiálů. Základem je tak určit správný empirický vztah se správnými konstantami pro danou skupinu testovaného materiálu (obr. 3.2.5). Tato metoda je vhodná pro malý rozsah materiálů nebo pro skupinu stejného materiálu, u kterého je požadavkem sledovat materiálové vlastnosti v průběhu času [14].

Princip metody:

Body na tahové křivce tvořené dvojicemi hodnot skutečných napětí a přetvoření jsou definovány napětím a deformací v materiálu při různých hloubkách vtisku kuličkovým indentorem. Indentační materiálové vlastnosti mohou být stanoveny vhodnou konstitutivní rovnicí vycházející z bodů tahové křivky tvořené dvojicemi hodnot skutečného napětí a skutečného přetvoření (viz obr. 3.2.5).

Výhody metody:

Deterministický algoritmus, není potřeba numerické simulace, dostatečně ověřená experimentální data.

Nevýhody metody:

Pevný algoritmus, numerické odhady empirických parametrů.

Vyhodnocováním mechanických vlastností materiálu touto metodou je popsáno například v literatuře [19], [23], [24], [27], [28], [29], [31], [34], [36], [37], [39], [41], [43], [44], [45], [46], [47] a [48].

V uvedeném obrázku (obr. 3.2.5) mají jednotlivé parametry následující význam:

h_{pile}^* [mm] – výška plastického hrbolku

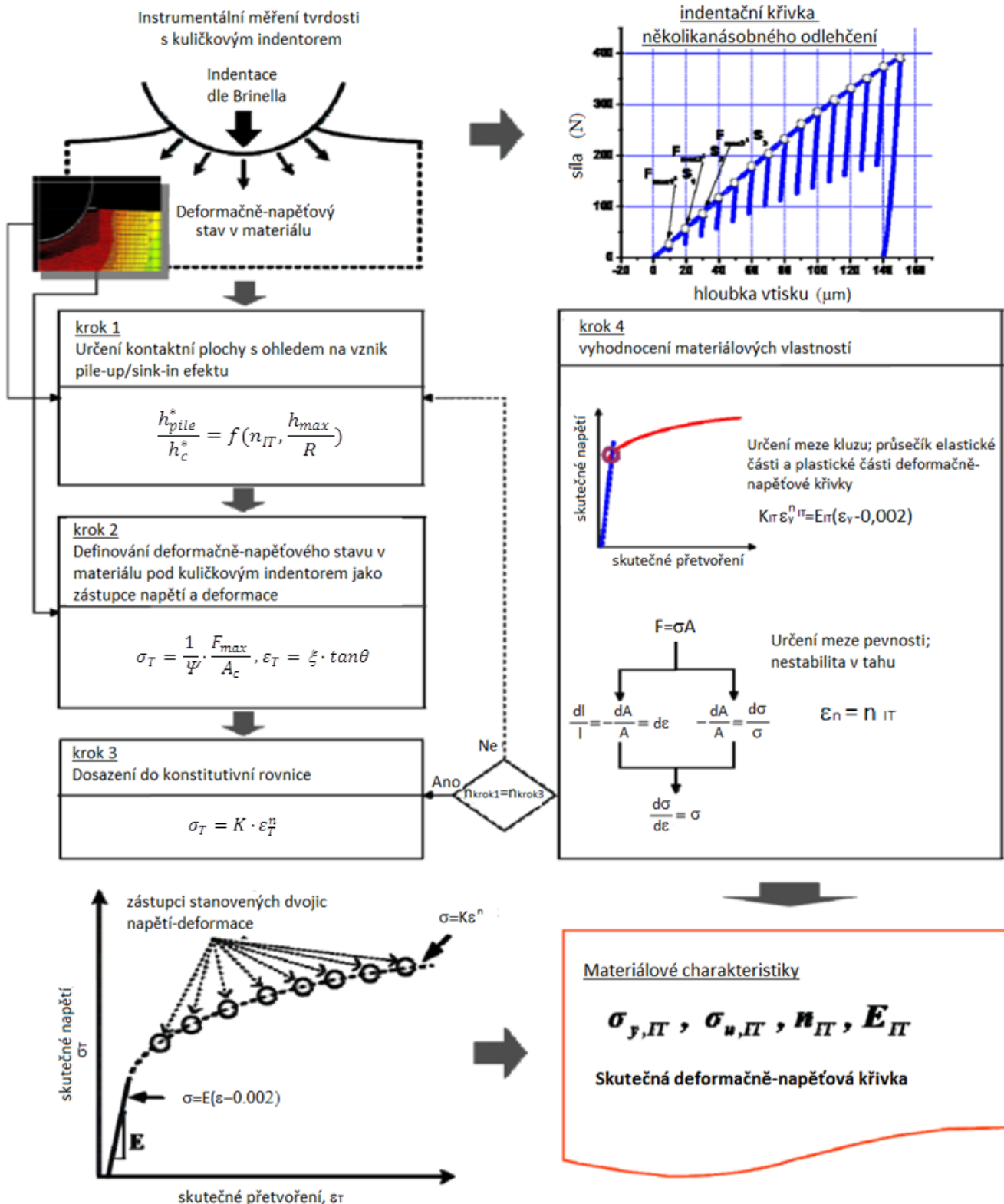
h_c^* [mm] – hloubka vtisku po odlehčení

θ [°] – polovina úhlu kontaktních ploch

ξ [–] – koeficient skutečného přetvoření

Ψ [–] – koeficient plastické kontrakce

K [–] – koeficient zpevnění



Obr. 3.2.5 – Schéma postupu určení materiálových charakteristik metodou určování závislostí napětí – přetvoření [14]

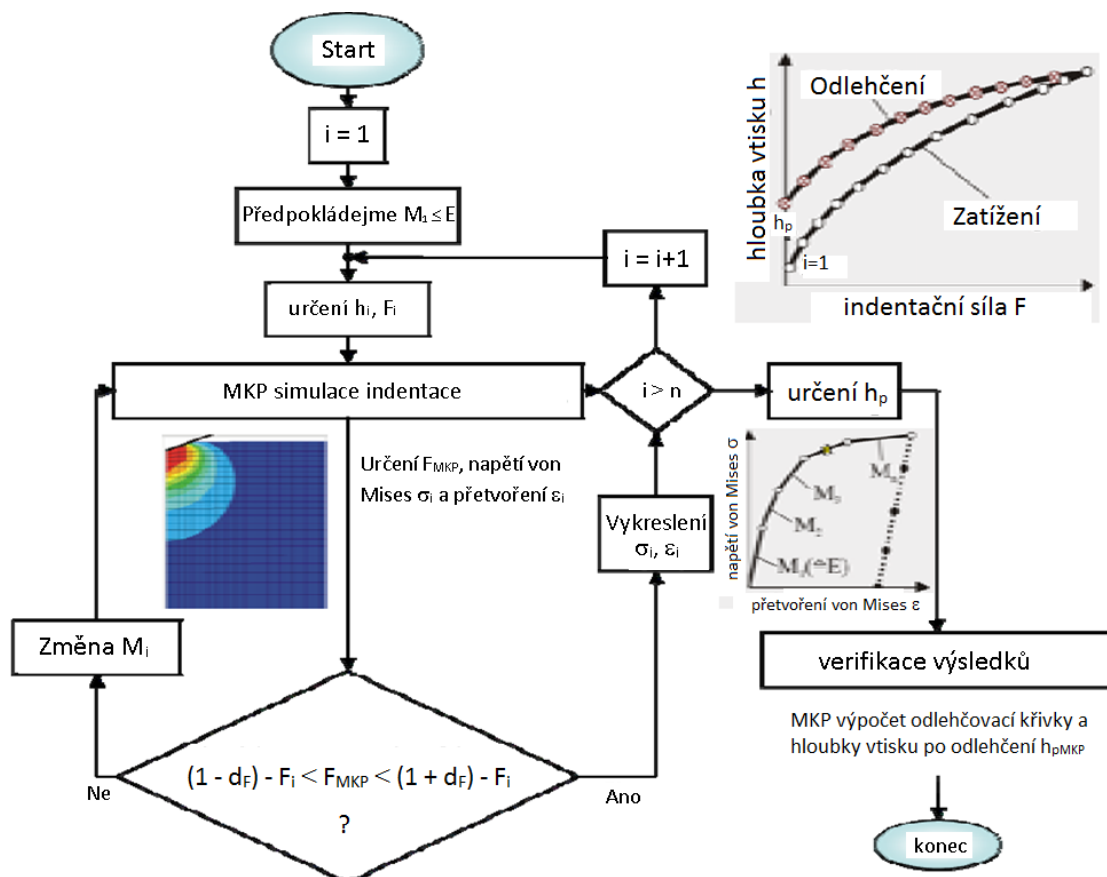
3.2.2.2. Inverzní modelování pomocí MKP

Inverzní modelování pomocí MKP je vyznačeno používáním numerického výpočtu pro získání každé deformačně – napěťové křivky. Je mnoho přístupů, jak redukovat výpočtový čas použitím více

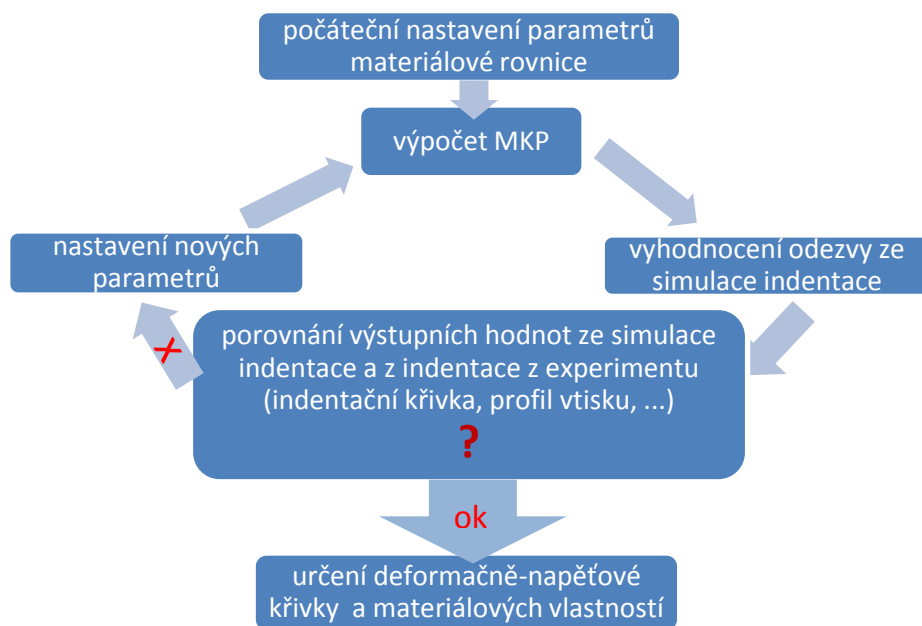
dat z indentační zkoušky, které budou dále popsány. Tato metoda je velice výhodná v tom, že lze získat výsledek deformačně – napěťové křivky neznámého materiálu. Metoda je vhodná pro uživatele, který má schopnosti a možnosti pracovat s MKP programem a potřebuje znát materiálové vlastnosti neznámého materiálu.

Princip metody:

Pro získávání indentačních křivek se v minulosti užívala MKP k simulaci zkoušky tvrdosti při známosti materiálových charakteristik. Avšak protože se měření tvrdosti zařazuje do nedestruktivních zkoušek oproti tahové zkoušce, vznikla otázka, zda by se nedal řešit inverzní problém pomocí MKP, určovat deformačně – napěťovou křivku pomocí známé indentační křivky. V literatuře se vyskytují dvě metody k určování deformačně – napěťové křivky pomocí inverzního modelování indentace s využitím MKP. První metodou, tzv. „Inverzní kónickou metodou“, se určuje deformačně – napěťovou křivku po částech. U této metody jsou důležité při získávání indentačních dat k určení materiálové deformačně – napěťové křivky tyto podmínky: určení indentačního napětí při různém přetvoření a nezbytný výpočet vztahu mezi napětím a deformací k optimální simulaci experimentálních dat. Úkolem této metody je určit univerzální bezrozměrnou funkci a sestavit inverzní algoritmus s určením této funkce (obr. 3.2.6). Druhá metoda, tzv. „Inverzní numerická metoda“, spočívá pouze v porovnání odezvy ze simulace indentace pomocí MKP s odezvou z indentace z experimentálního měření. Jednotlivé výpočty (iterace) s proměnlivými materiálovými charakteristikami se provádějí tak dlouho, dokud indentační křivka z MKP výpočtu nesouhlasí s indentační křivkou z experimentálního měření (obr. 3.2.7)[14].



Obr. 3.2.6 – Schéma postupu určení materiálových charakteristik Inverzní kónickou metodou s využitím MKP [14]



Obr. 3.2.7 – Schéma postupu určení materiálových charakteristik Inverzní numerickou metodou

Výhody metody:

Aplikace různých indentorů, libovolný algoritmus (zavádění nových materiálových modelů).

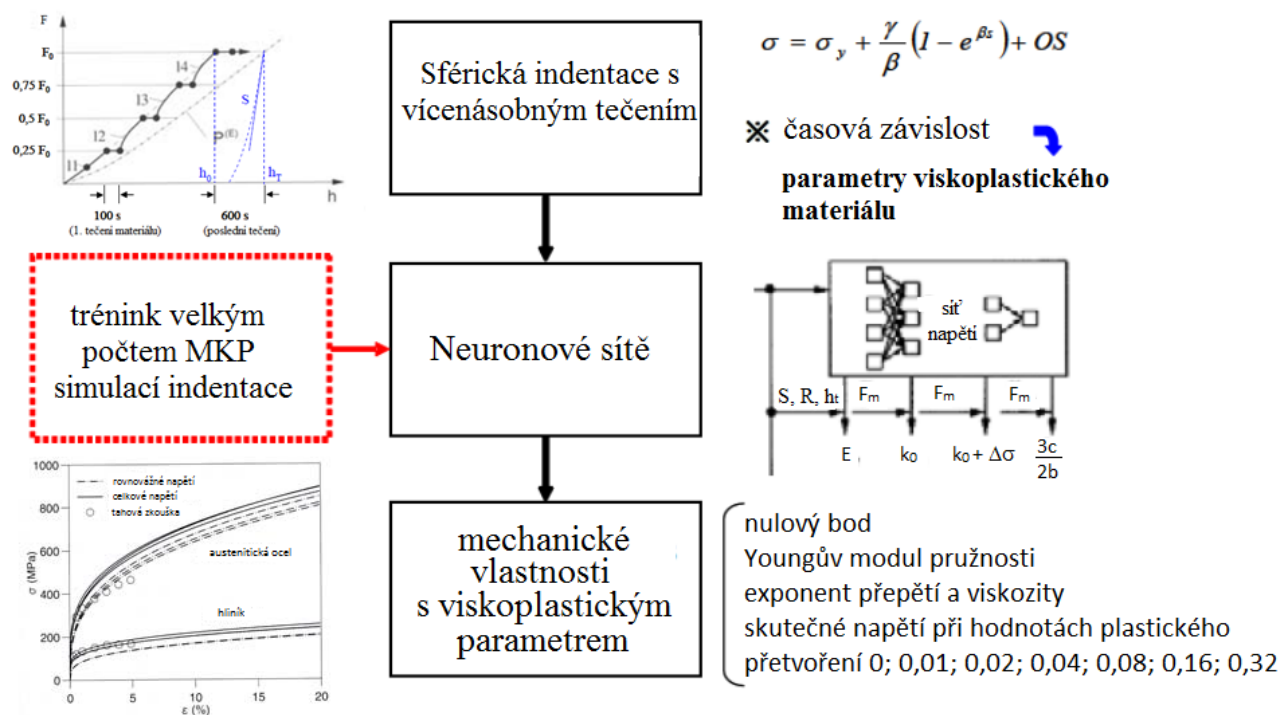
Nevýhody metody:

Nutnost použití MKP, použití speciálního softwaru (MKP software, optimalizační software), nutnost určení počátečních parametrů.

Vyhodnocování mechanických vlastností materiálu touto metodou je popsáno například v literatuře [18], [20], [21], [22], [32], [33], [35], [49], [50], [51], [52], [53] a [54].

3.2.2.3. Metoda neuronových sítí

Poslední zmiňovanou metodou je *metoda neuronových sítí*. Můžeme ji považovat jako sofistikovanou metodu zmenšující počet předběžných MKP výpočtů. Síť je připravována (trénována) pomocí částečné odezvy materiálu modelu, dokud nedojde k funkci, která umožňuje určit výsledek přesného řešení, které se „naučil“. Tato metoda je typem úlohy, která kombinuje předešlé dvě metody. Výpočtový čas u metody neuronových sítí je nižší než u metody MKP modelování, ale v mnoha ohledech je pro uživatele tzv. „černou skříňkou“. U této metody je možno určovat mechanické materiálové vlastnosti i u neznámých materiálů. Nicméně metoda je velice ovlivněna kvalitou obdržených (vstupních) dat a rozsahem „tréninkového“ procesu.



Obr. 3.2.8 – Schéma postupu určení materiálových charakteristik metodou neuronových sítí [14]

U metody neuronových sítí je používáno při MKP výpočtech viskoplastického modelu materiálu. Indentační křivka je modelována v podobě čtyř-stupňového zatěžování s použitím relaxace materiálu (obr. 3.2.8). Náhodně generované dvojice vstupů do výpočtu (indentační křivka) a výstupů z výpočtu (materiálové parametry) jsou používány k „naučení“ neuronových sítí. V takovém případě je daná neuronová síť schopna určit konkrétní vztah mezi vstupními a výstupními hodnotami. Budování a cvičení neuronové sítě se provádí velkým počtem indentačních zkoušek s „creep“ efektem a MKP výpočty. Verifikace neuronových sítí je provedena posledním MKP výpočtem odlišným od cvičících výpočtů [14].

Výhody metody:

Zahrnutí časové závislosti chování materiálu (viskoplastický model materiálu), jednoznačné řešení pro více typů materiálu, získaná deformačně – napěťová křivka je imunní vůči chybám experimentu.

Nevýhody metody:

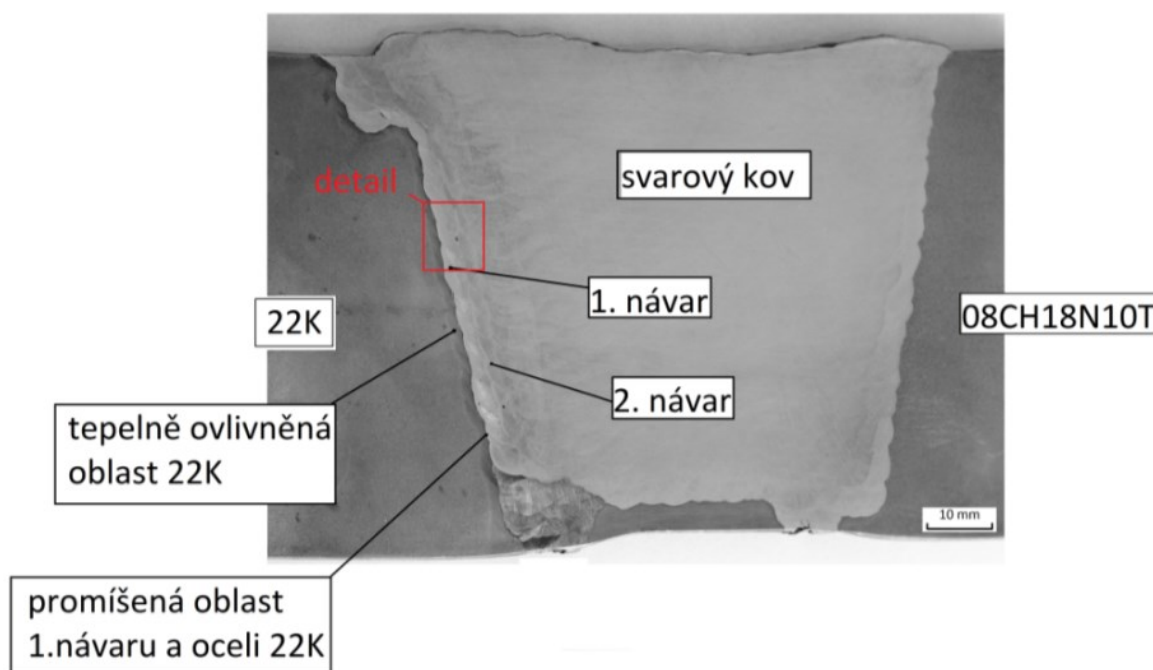
Použití speciálního softwaru (proces cvičení neuronových sítí), časově náročný testovací cyklus, výsledky viskoplastických parametrů nejsou stabilní jako výsledky deformačně-napěťové křivky.

Vyhodnocování mechanických vlastností materiálu touto metodou je popsáno například v literatuře [30], [42], [55], [56] a [57].

4. Heterogenní svarový spoj

Vyvíjená metodika stanovení základních mechanických vlastností na základě měření instrumentované tvrdosti je zaměřena na HSS. HSS je nestabilizovaný materiál, ve kterém dochází k difuzi uhlíku do první návarové vrstvy. Tvoří se tak vrstvy karbidů a mění se jeho mechanické vlastnosti. To je prokázáno sledováním struktury jak reálně zestárnutého HSS (30 let) vyskytující se v jaderné energetice, tak i simulačně zestárnutého HSS. Proto je důležité blíže popsat heterogenní svarové spoje vyskytující se v jaderné energetice. V této kapitole je blíže popsána struktura HSS, jejich chemické složení a mechanické vlastnosti. Dále jsou zde popsány podmínky, které mohou ovlivňovat tvrdost HSS a tedy i jejich mechanické vlastnosti.

Heterogenní svarový spoj vzniká spojením (svařením) dvou materiálů s různými mechanickými vlastnostmi, fyzikálními vlastnostmi a odlišnou strukturou. Heterogenní svar v jaderné energetice většinou pojí vysoce legovanou ocel (austenitická ocel) s nelegovanou ocelí, která má feritickou strukturu. Z důvodu tak odlišné struktury a rozlišných vlastností ocelí jsou pro lepší svařitelnost tyto oceli svařovány pomocí aplikací jednotlivých vrstev návarů mezi svařované ocele, které zmenšují svými vlastnostmi rozdíly v přechodu mezi jednotlivými vrstvami heterogenního svaru než by tomu bylo při přechodu přímo mezi feritickou a austenitickou ocelí. Na obrázku 4.1 je makroskopická fotografie vzorku heterogenního svaru s uvedenými popisy oblastí heterogenního svaru ze zařízení na jaderné elektrárně.

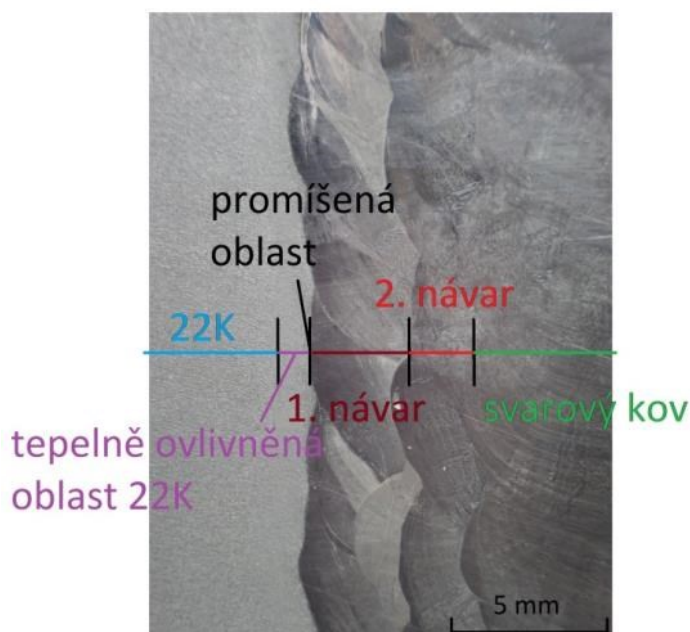


Obr. 4.1 – Makroskopická fotografie heterogenního svarového spoje

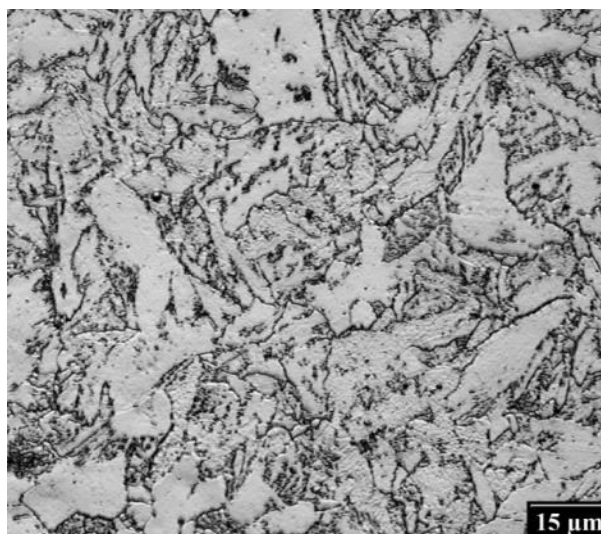
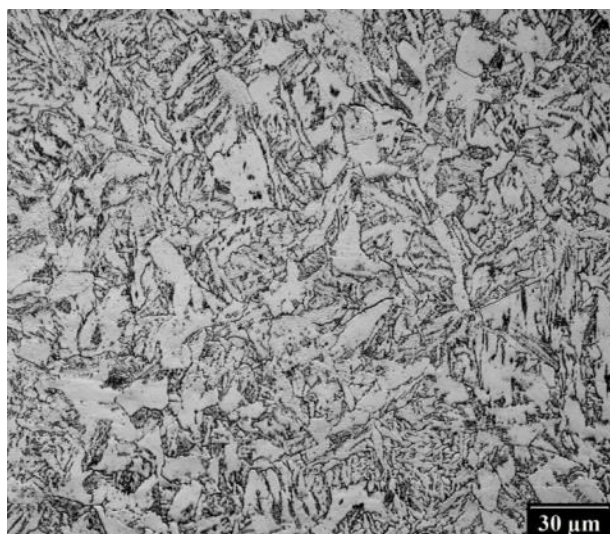
4.1. Mikrostruktura heterogenního svarového spoje

Na následujícím obrázku (obr. 4. 1. 1.) je uveden detail heterogenního svarového spoje (HSS) a to konkrétně přechodné oblasti mezi svarovým kovem a ocelí 22K (viz obr. 4.1), kde můžeme vidět strukturu housenek 1. a 2. návarového kovu. Je zde už patrnější promíšená oblast mezi 1. návarem a ocelí 22K, která je výrazněji zobrazena na snímcích mikrostruktury heterogenního svarového spoje. Obrázek 4.1.2 ukazuje feriticko – perlitickou strukturu základního materiálu 22K. Na obrázku 4.1.3 je znázorněna tepelně ovlivněná oblast základního materiálu 22K, kde je vidět rovnoosé jemné feritické

zrno. Na obrázku 4.1.4 je zobrazeno rozhraní mezi základním materiálem a 1. návarem a mezi 1. a 2. návarem (Sv-04Ch19N11M3). Na rozhraní oceli 22K a 1. návaru (Sv-10Ch16N25AM6) dochází k oduhličení základního kovu a naopak nauhličení 1. návaru (obr. 4.1.3, obr. 4.1.5 až obr. 4.1.7).

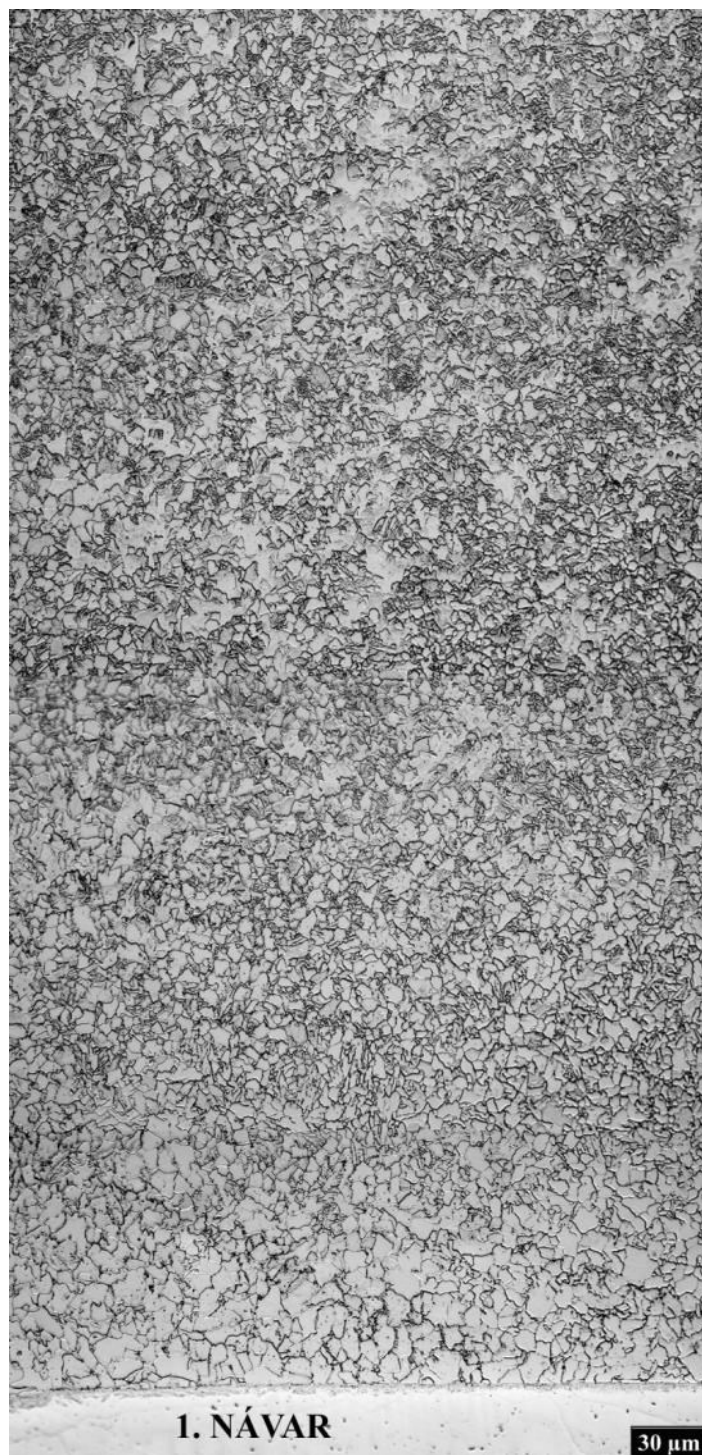


Obr. 4.1.1 – Detail přechodové oblasti HSS mezi svarovým kovem a ocelí 22K

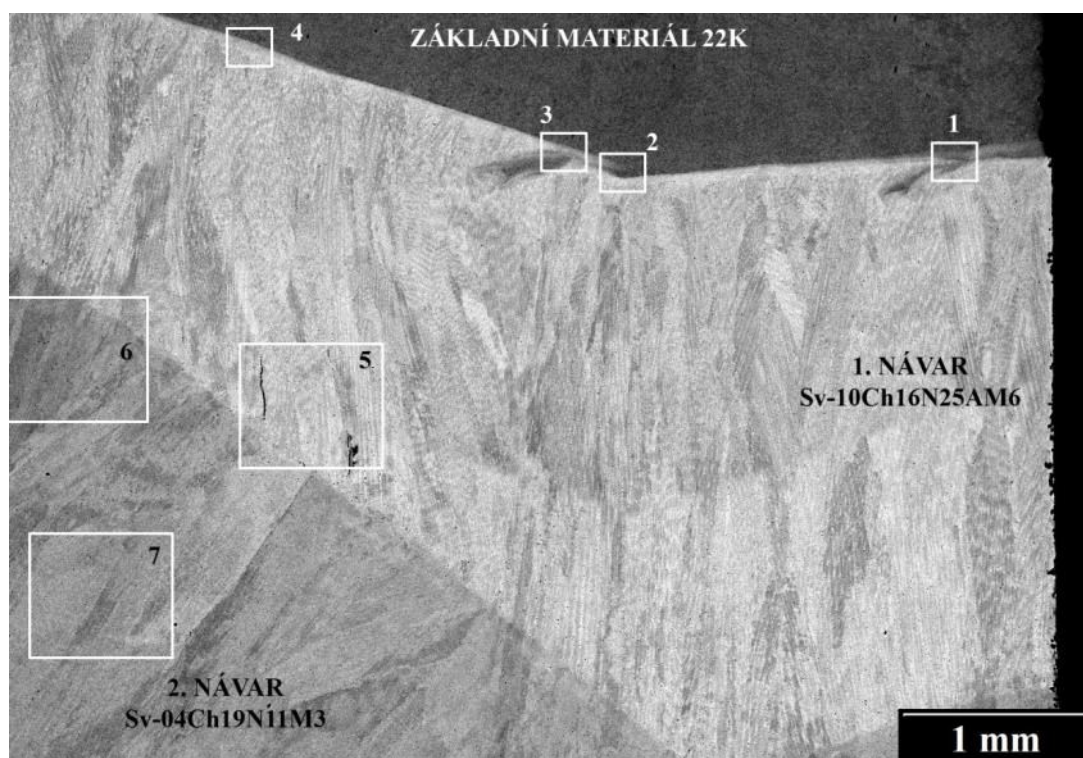


Obr. 4.1.2 – Charakteristická mikrostruktura základního materiálu 22K (leptáno nital 3%) [60]

Při tvorbě návaru docházelo lokálně k promíšení materiálů 22K a 1. návaru (Sv-10Ch16N25AM6), tj. k tzv. podtavení - část austenitického návaru pronikla do základního materiálu a místy část základního materiálu pronikala do austenitického návaru (obr. 4.1.5b, 4.1.6). V oblastech promíšení byla pozorována mikrostruktura odpovídající martenzitu, resp. bainitu.

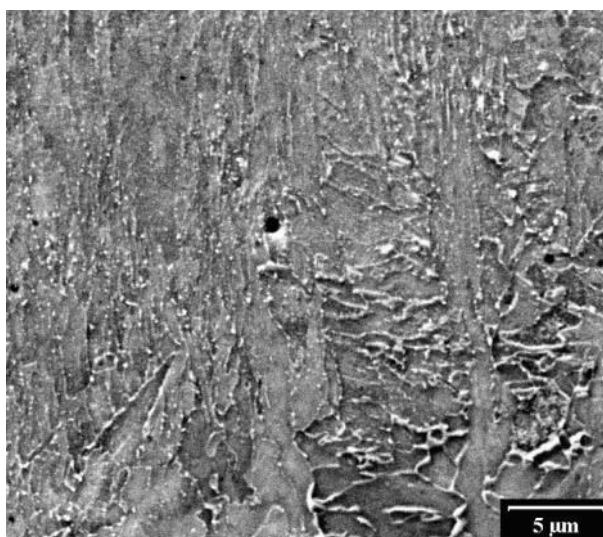
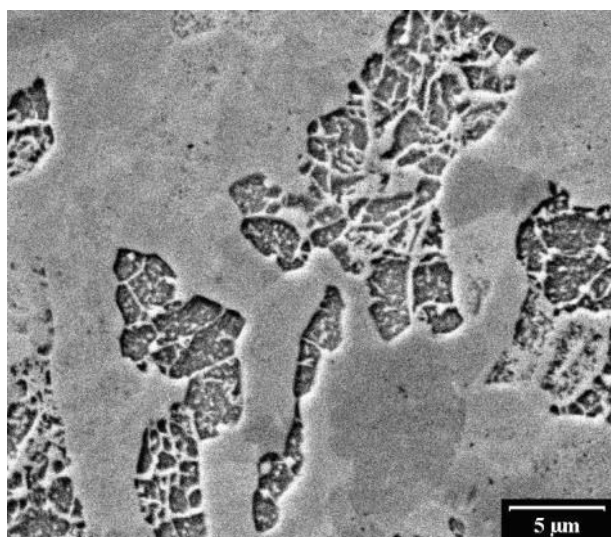
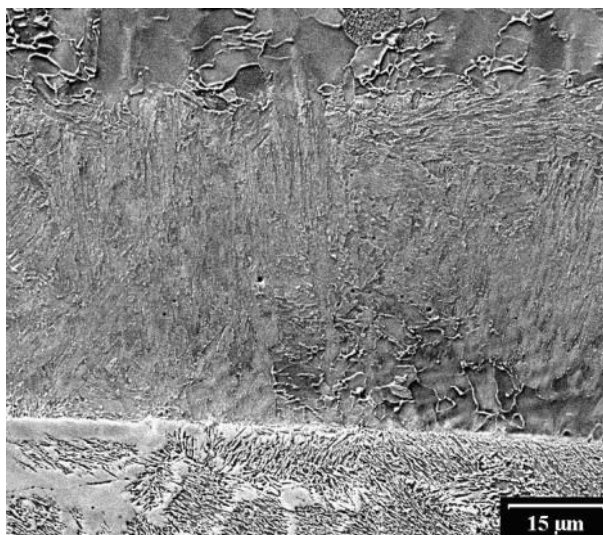
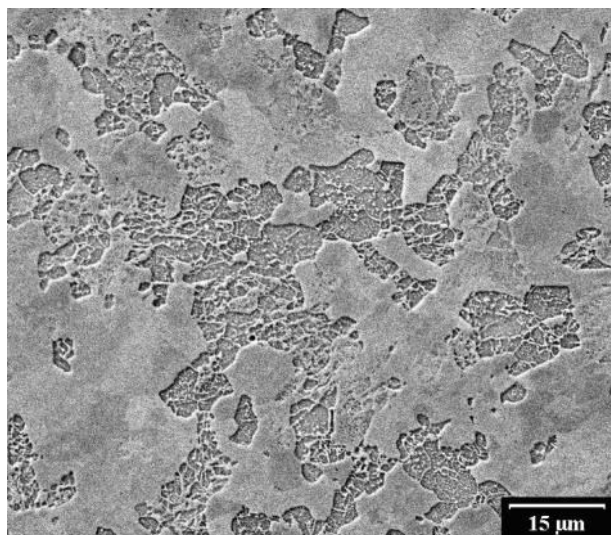
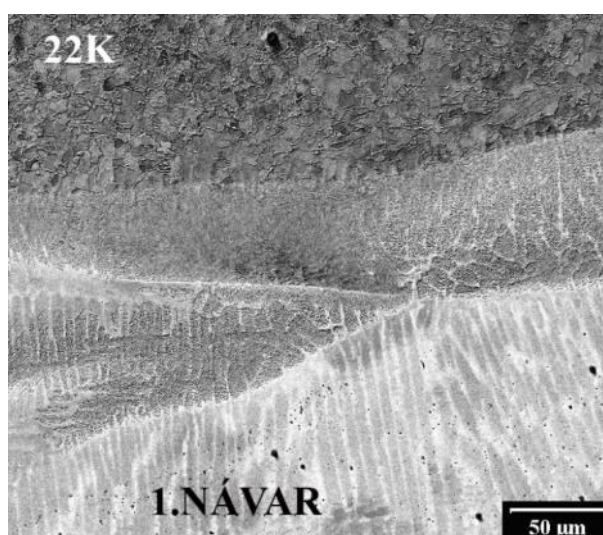
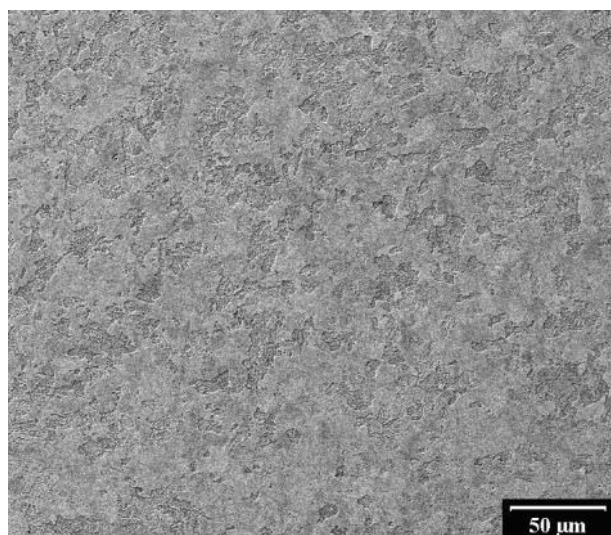


Obr. 4.1.3 – Změny mikrostruktury oceli 22K v tepelně ovlivněné oblasti u rozhraní s 1. návarem (leptáno 2% nital) [60]



Obr. 4.1.4 – Mikrostruktura materiálu v oblasti heterogenního svaru [60]

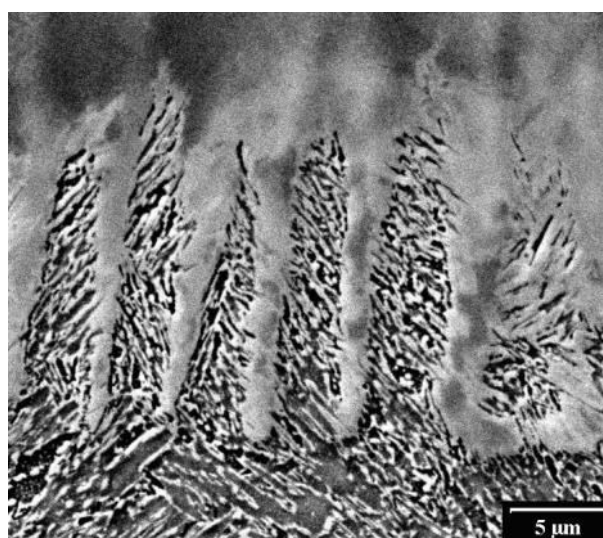
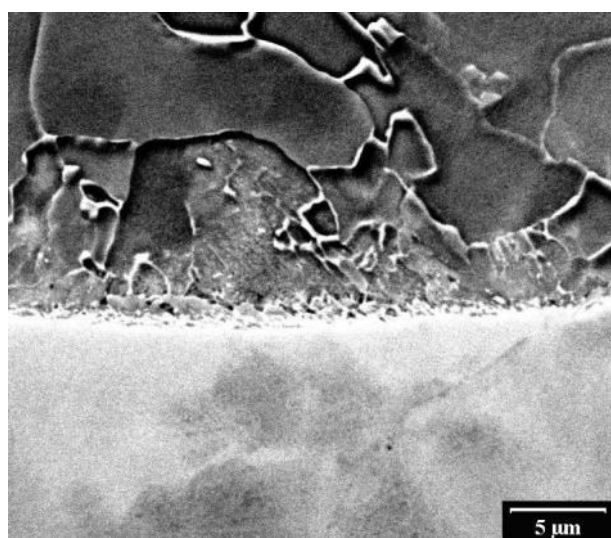
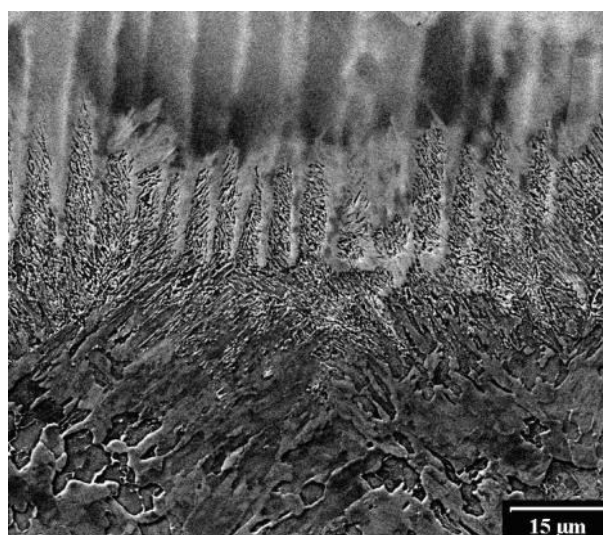
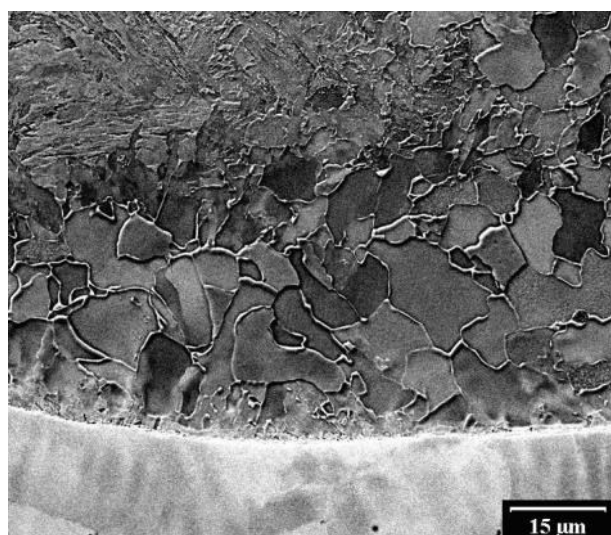
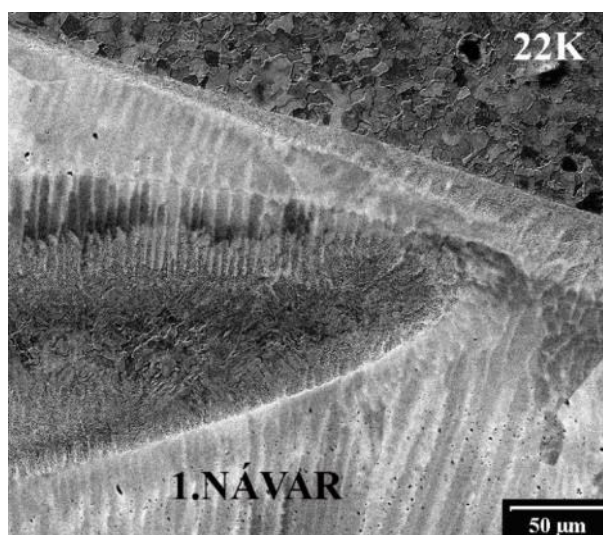
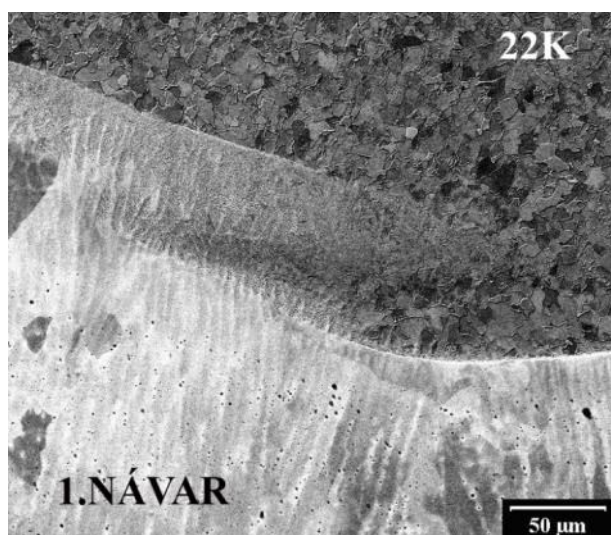
Mikrostruktura prvního návaru se mění směrem od rozhraní se základním materiálem (od promíšené oblasti). Přibližně rovnoosá austenitická zrna se změnila na sloupcová zrna orientovaná ve směru tepelného toku, tj. kolmo na rozhraní se základním materiálem (obr. 4.1.5b až 4.1.7). Mikrostruktura druhého návaru je obdobná mikrostruktuře prvního návaru. Charakteristickým jsou sloupcová zrna orientovaná zhruba kolmo na rozhraní se základním materiálem, resp. 1. návarem (obr. 4.1.4 a 4.1.8). Pomocí energiově disperzní spektroskopie (EDS) liniové analýzy bylo prokázáno, že změny mikrostruktury 1. návaru směrem od rozhraní se základním materiálem jsou provázeny poměrně výraznými změnami obsahu hlavních legujících prvků (obr. 4.1.9) [60].



a) Základní materiál 22K

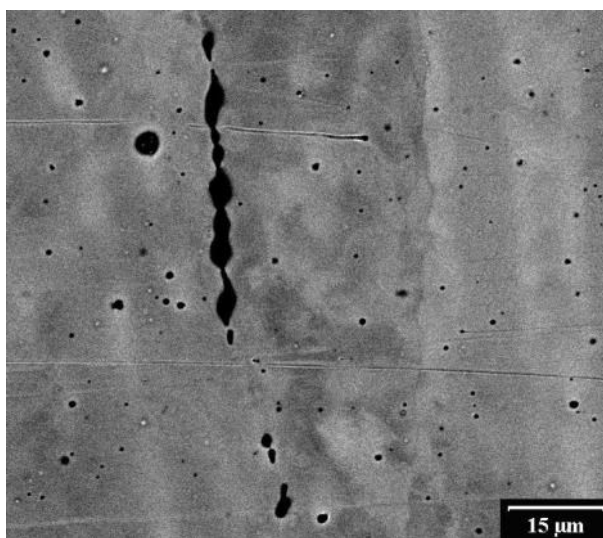
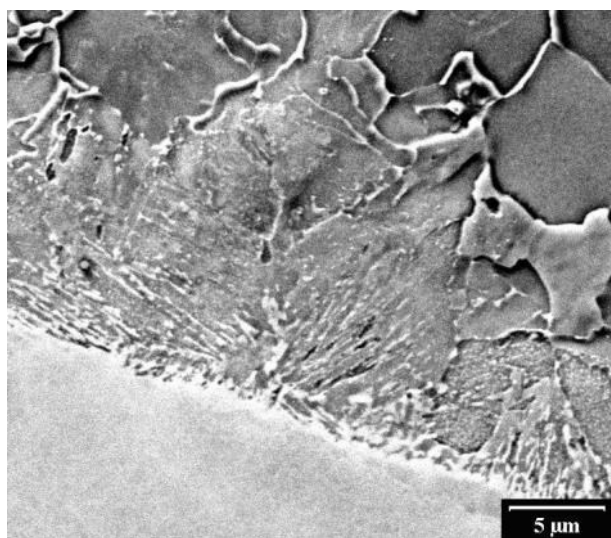
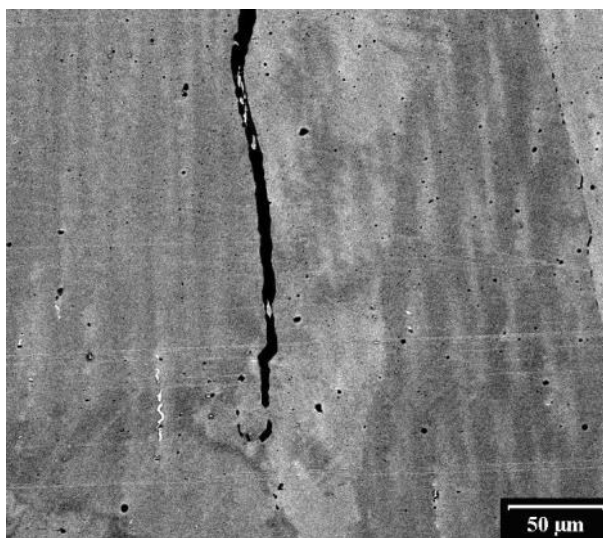
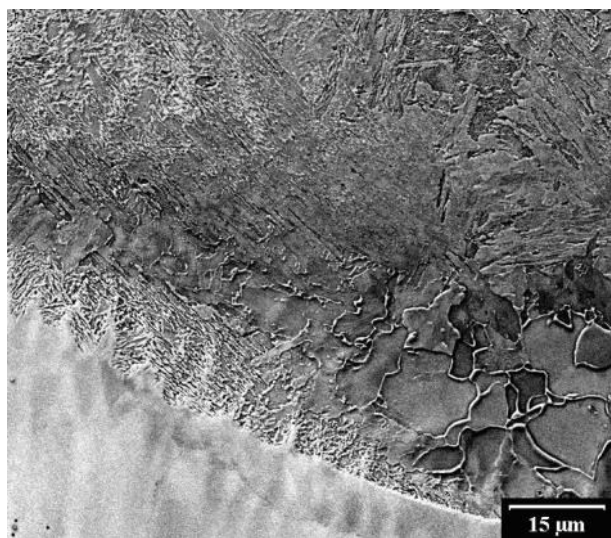
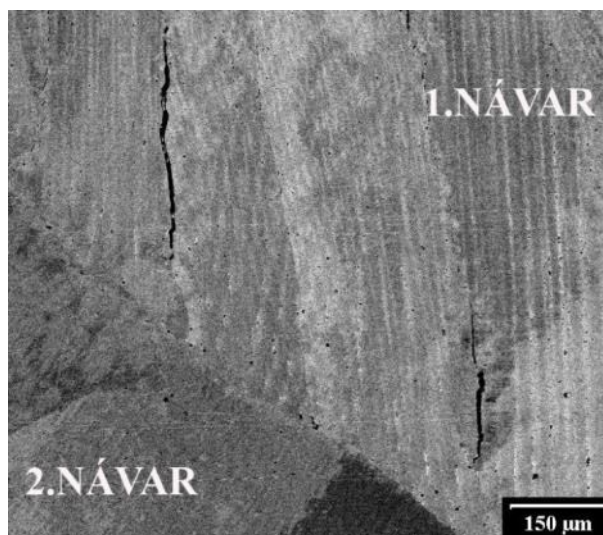
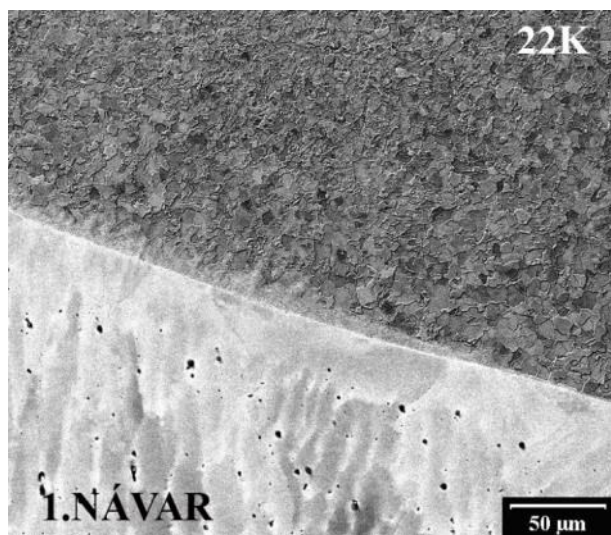
b) Rozhraní ocel 22K-1.návar (oblast 1 z obr. 4.1.4)

Obr. 4.1.5 – Mikrostruktura materiálu v oblasti heterogenního svaru [60]



a) Rozhraní ocel 22K-1.návar (oblast 2 z obr. 4.1.4) b) Rozhraní ocel 22K-1.návar (oblast 3 z obr. 4.1.4)

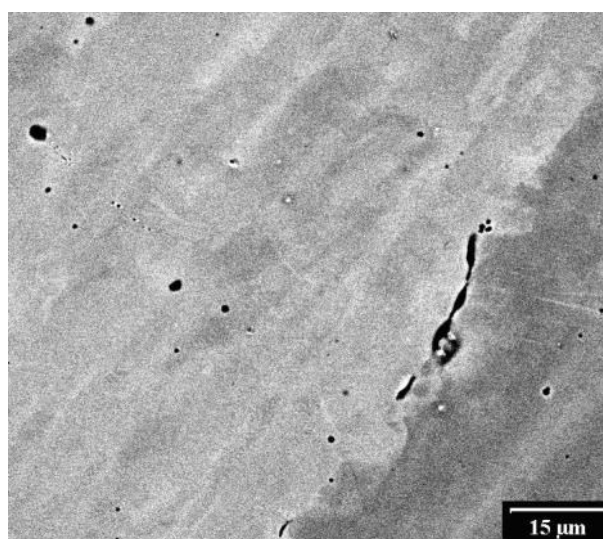
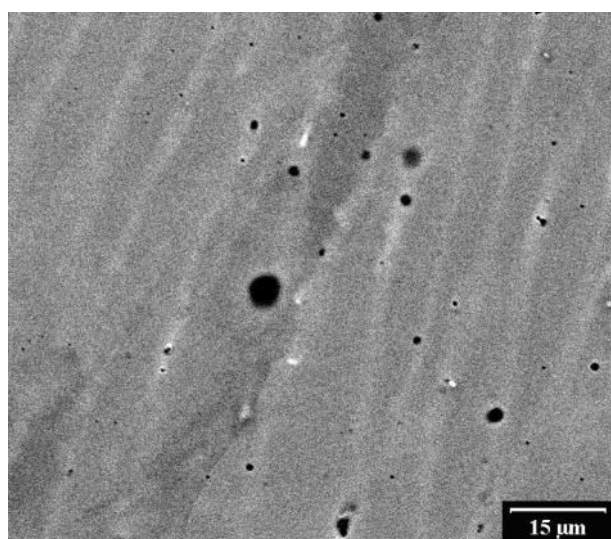
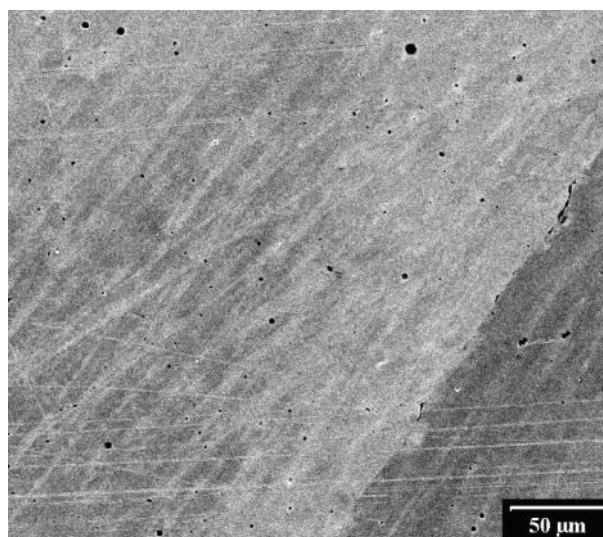
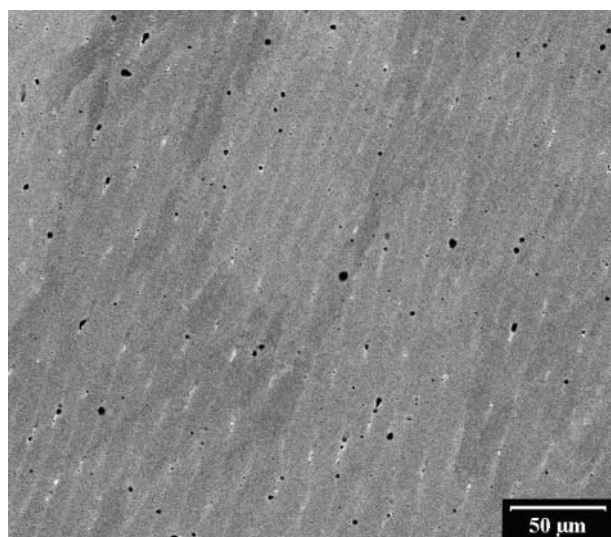
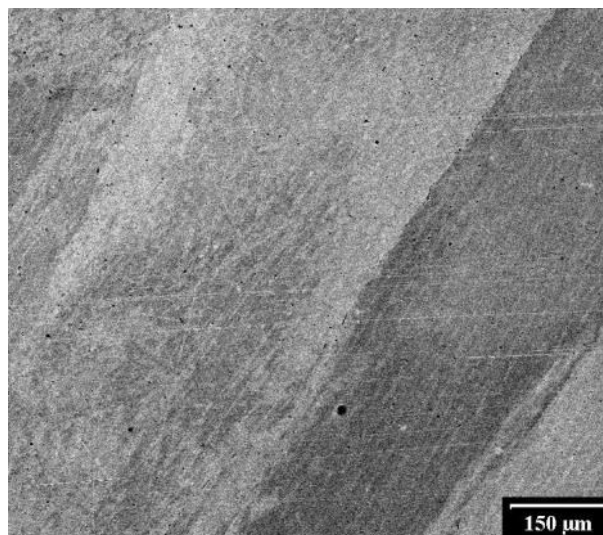
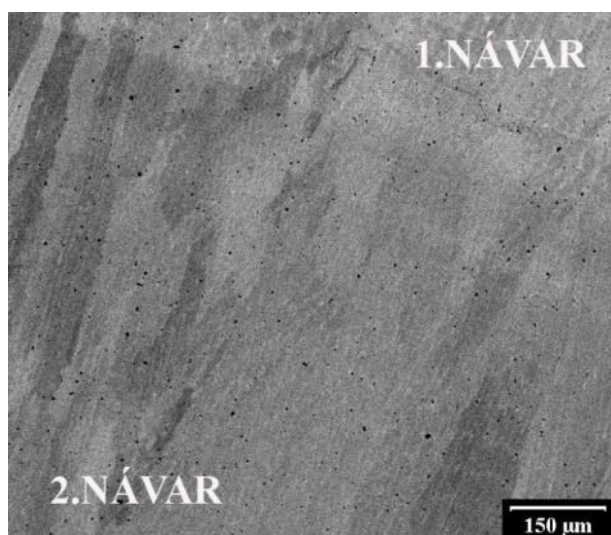
Obr. 4.1.6 – Mikrostruktura materiálu v oblasti heterogenního svaru [60]



a) Rozhraní ocel 22K-1.návar (oblast 4 z obr. 4.1.4)

b) 1. návar (oblast 5 z obr. 4.1.4)

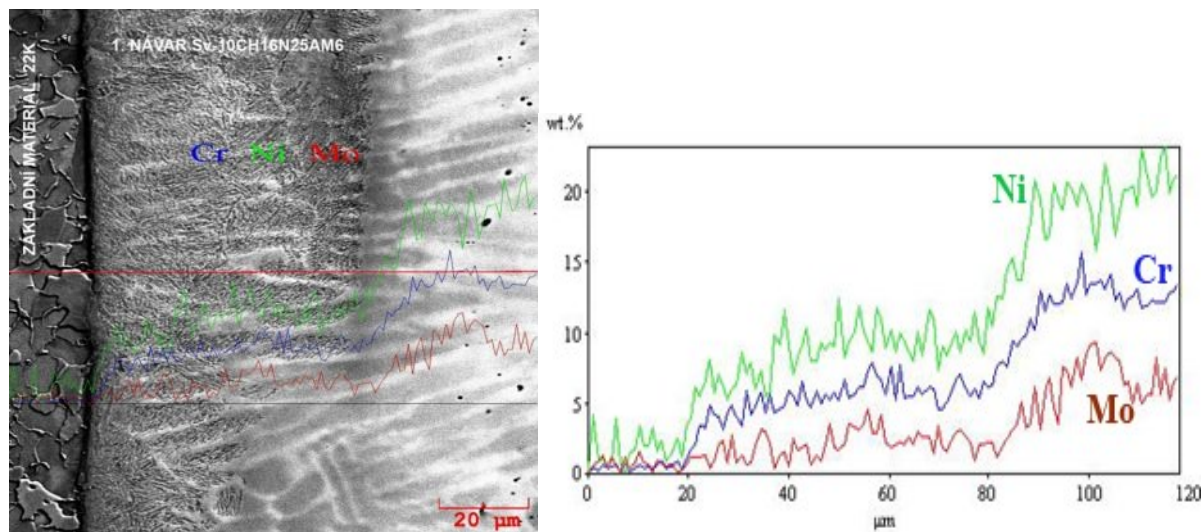
Obr. 4.1.7 – Mikrostruktura materiálu v oblasti heterogenního svaru [60]



a) 2. návar (oblast 6 z obr. 4.1.4)

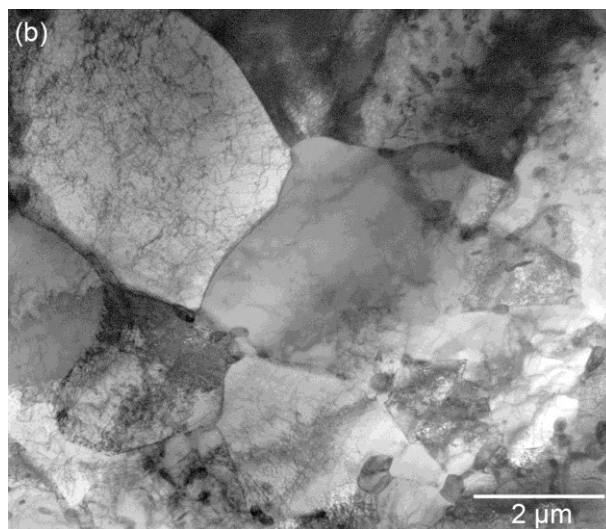
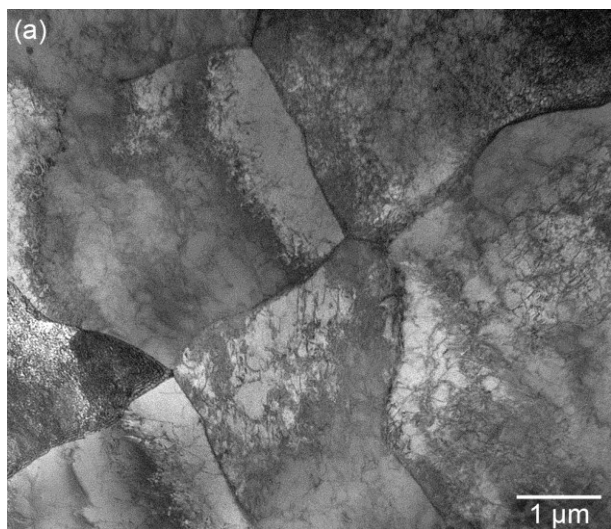
b) 2. návar (oblast 7 z obr. 4.1.4)

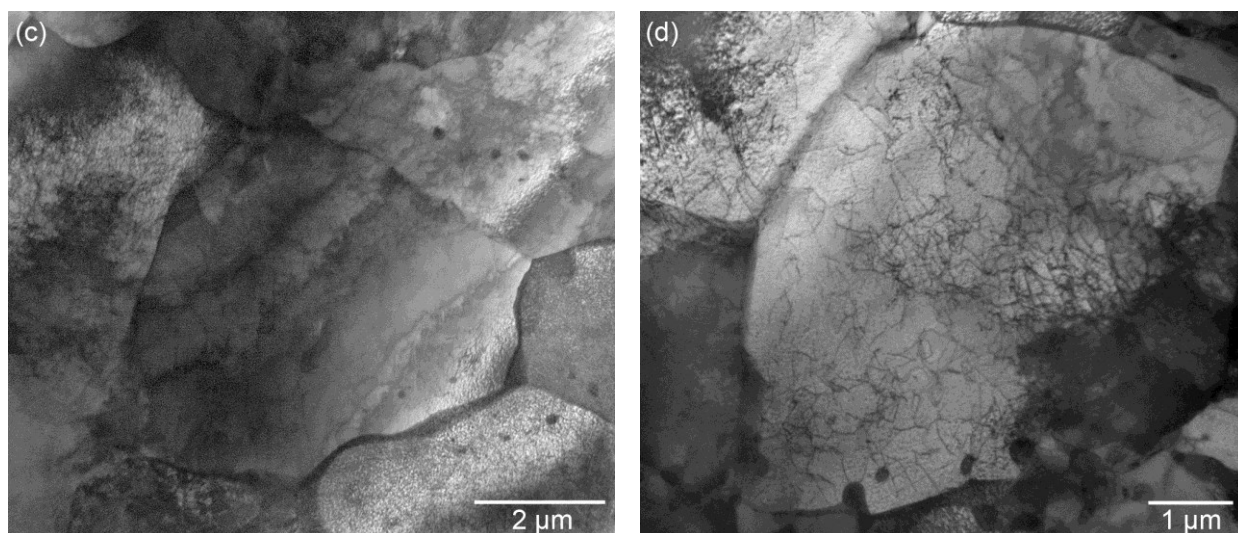
Obr. 4.1.8 – Mikrostruktura materiálu v oblasti heterogenního svaru [60]



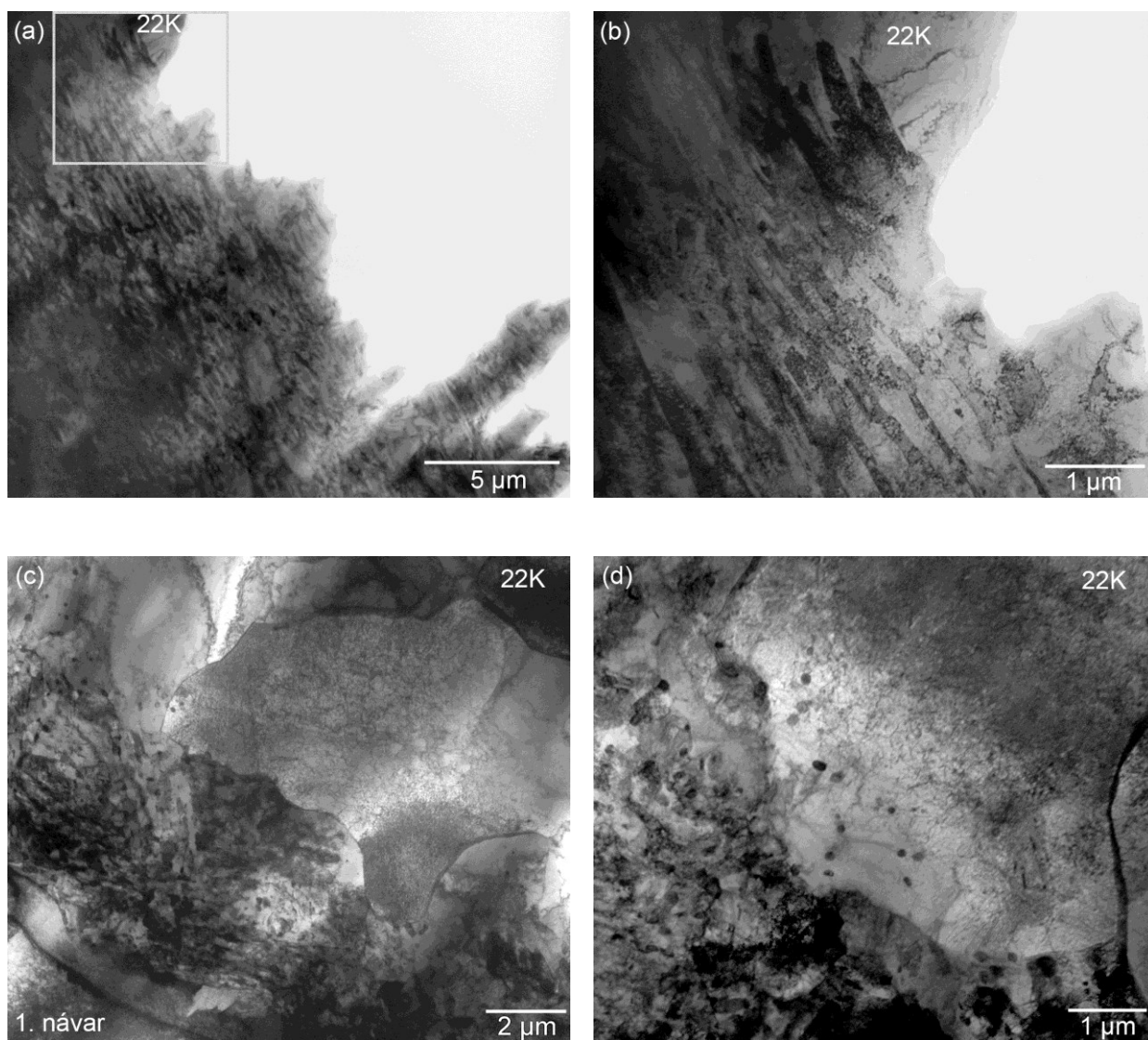
Obr. 4.1.9 – Změny obsahu hlavních legujících prvků (Cr, Ni a Mo) v oblasti rozhraní mezi základním materiálem 22K a 1. návarem (měření bylo provedeno podle červené čáry - oblast 4 z obr. 4.1.4 - natočeno o 110°) [60]

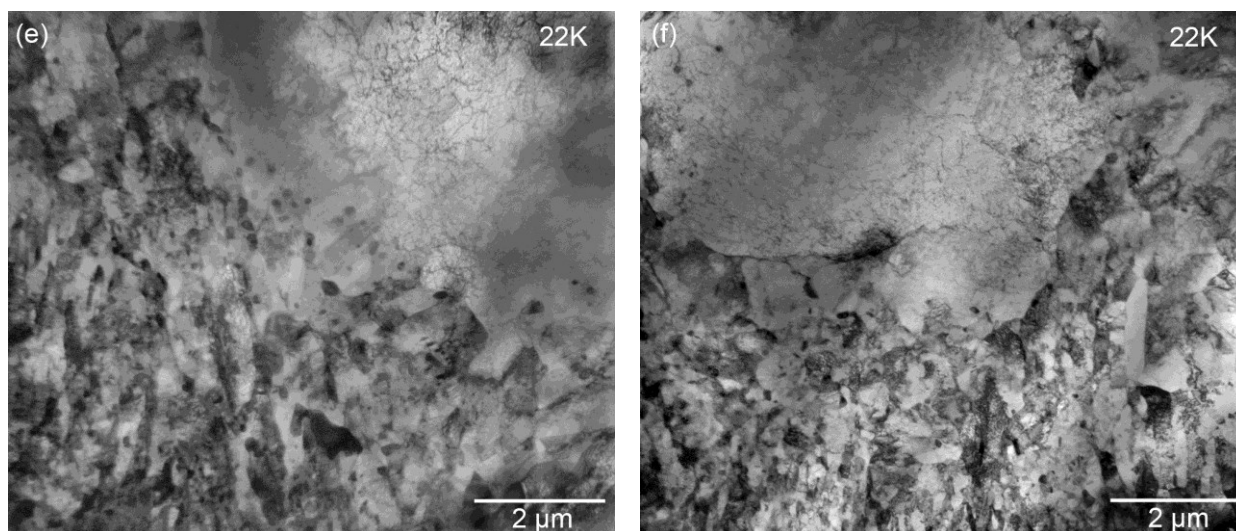
Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny tenké fólie odebrané z promíšené zóny HSS ve směru kolmém k rozhraní mezi ocelí 22K a 1. návarem tak, aby bylo možné na jediné fólii pozorovat změny mikrostruktury obou materiálů v závislosti na vzdálenosti od rozhraní. Zobrazení těchto fólií pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM) je na následujících snímcích. Jak již bylo uvedeno, mezi základním materiálem 22K a austenitickým návarem je nauhličená oblast, jejíž šířka se na pozorovaných fóliích pohybovala v rozmezí 5 μm až 30 μm (obr. 4.1.11). V této oblasti jsou velmi tenká a protáhlá zrna či subzrna (obr. 4.1.11a, 4.1.11b, 4.1.11c), drobná rovnoosá zrna (obr. 4.1.11d, 4.1.11e) a vysoká hustota karbidů (obr. 4.1.11d, 4.1.11e, 4.1.11f). Difuze uhlíku do austenitu měla za následek vznik četných karbidů v mezidendritických oblastech (obr. 4.1.12).



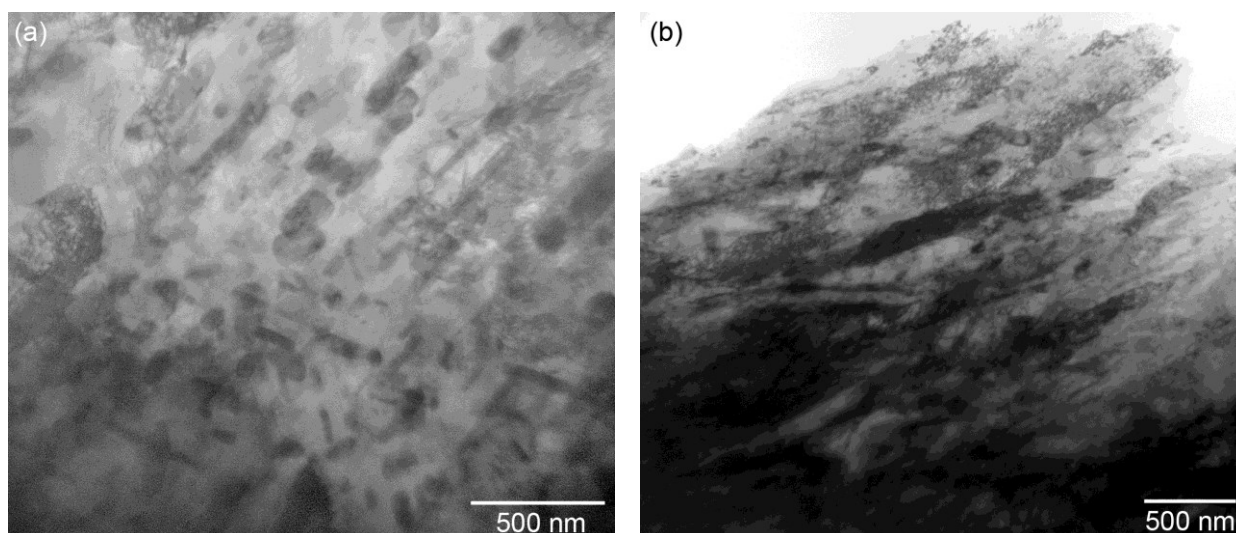


Obr. 4.1.10 – Rovnoosá zrna a subzrna feritické struktury základního materiálu 22K v tepelně ovlivněné zóně asi 200 μm od rozhraní 22K – 1. návar (TEM) [60]





Obr. 4.1.11 – Oblast promíšení základního materiálu 22K s 1. návarem (TEM): (a) přehledový snímek dlouhých tenkých zrn a subzrn na straně základního materiálu 22K, (b) detail rámečku na snímku (a), (c) základní materiál 22K, zóna promíšení i 1. návar, (d-f) karbidy a velmi malá zrna v zóně promíšení na straně základního materiálu 22K [60]

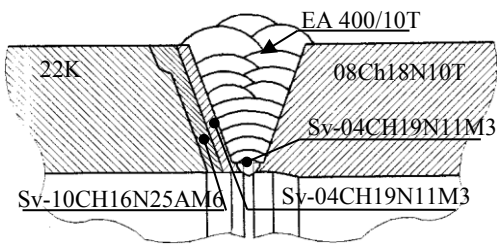
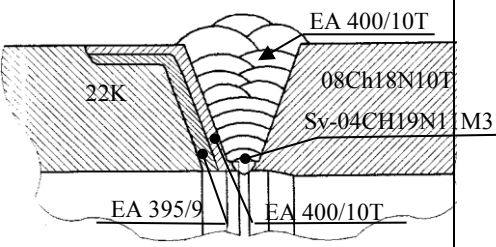
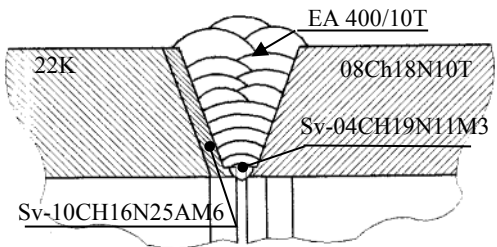
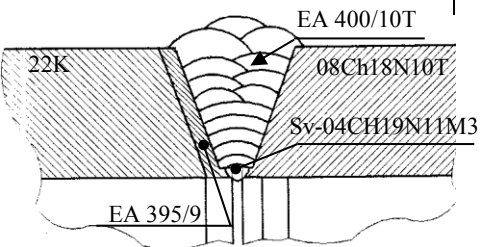
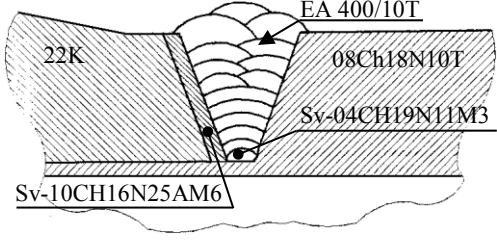
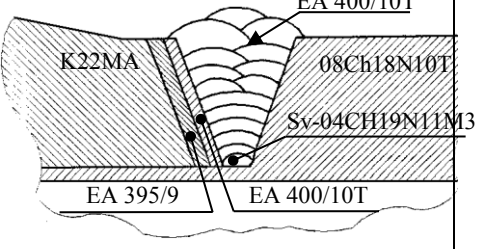
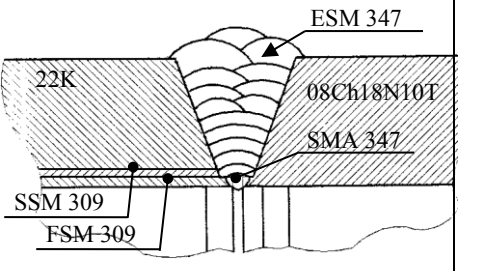
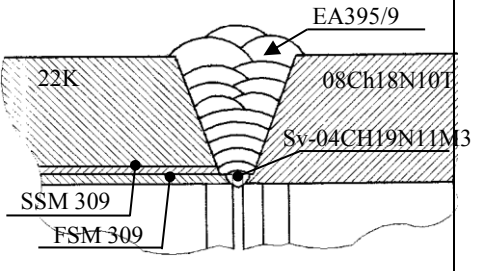


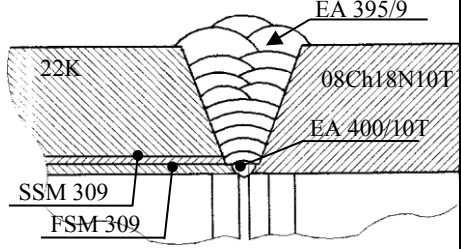
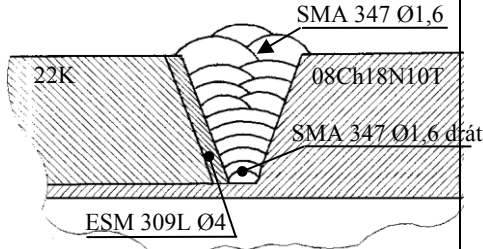
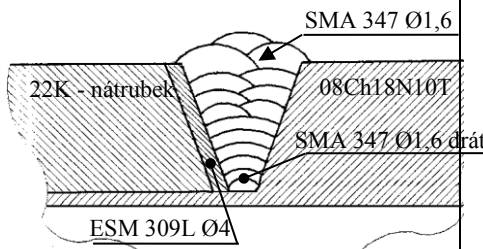
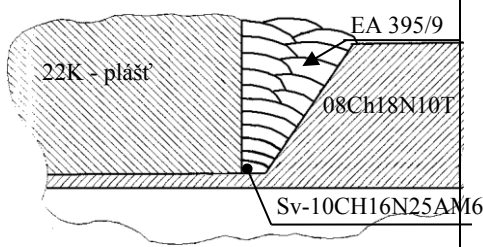
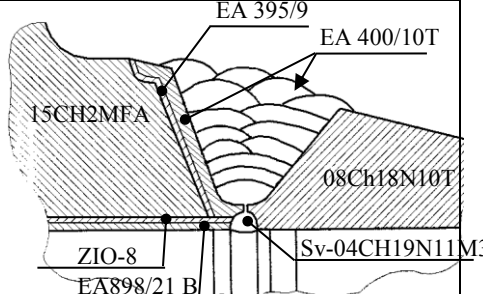
Obr. 4.1.12 – Karbidy v mezidendritických oblastech 1. návaru v těsné blízkosti (cca 100 μm) od promíšené zóny na rozhraní 22K – 1. návar [63]

4.2. Provedení heterogenních svarových spojů v jaderné elektrárně VVER 440

V jaderných elektrárnách se vyskytují různé typy heterogenních svarových spojů. Za prvé se liší ve způsobu provedení svaru a za druhé v materiálovém provedení. Podle materiálového způsobu provedení dělíme heterogenní svary na svary vyrobené dle Vítkovické technologie výroby a na svary vyrobené dle Ruské technologie. V následující tabulce je na schématických obrázcích popis všech způsobů provedení heterogenních svarových spojů vyskytujících se v jaderné elektrárně typu VVER 440MW s popisky použitých materiálů u jednotlivých provedení [64].

Tab. 4.2.1-Schématické obrázky HSS vyskytujících se v jaderné elektrárně typu VVER 440 MW

	Schéma materiálového provedení HSS	
Místo výskytu HSS	Vítkovické provedení HSS	Ruské provedení HSS
HSS horkého a studeného kolektoru parogenerátoru (PG)		
HSS nátrubku superhavarijního napájení parogenerátoru		
HSS nátrubků kompenzátoru objemu (KO)		
HSS spodních nátrubků hydroakumulátoru (HA)	Ruské provedení HSS	
HSS spodních nátrubků hydroakumulátoru (HA)		

Místo výskytu HSS	Provedení, výrobce HSS	Schéma materiálového provedení HSS
HSS spodních nátrubků hydroakumulátoru	Královopolská strojírna	
HSS nátrubku hydroakumulátoru pro plnění a vypouštění dusíku	Ruské provedení HSS	
HSS nátrubků pro měření hydroakumulátoru	Ruské provedení HSS – varianta A	
HSS nátrubků pro měření hydroakumulátoru HSS nátrubků reaktoru (RE)	Ruské provedení HSS – varianta B	
	Škoda Plzeň	

4.3. Chemické složení struktur HSS

V následujících tabulkách je uvedeno chemické složení základního materiálu, svarového a návarového kovu vyskytujících se ve výše uvedených HSS.

Tab. 4.3.1 - Chemické složení základního materiálu (hm. %)

Materiál	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S max.	P max.	Cu	Ti
K22MA⁴⁾	0,17 ÷ 0,23	0,15 ÷ 0,35	0,80 ÷ 1,10	≤0,3	≤0,3	0,25 ÷ 0,40	0,03	0,03	≤0,3	-
22K - díly pláště (plech, výkovky)	0,19 ÷ 0,26	0,20 ÷ 0,40	0,75 ÷ 1,00	≤0,3	≤0,3	-	0,03	0,03	≤0,3	-
08CH18N10T - díly kolektoru I. okruhu (výkovky, plechy) [64]	≤0,08	≤0,80	1,0 ÷ 2,0	17,0 ÷ 19,0	9,0 ÷ 11,0	-	0,02	0,035	≤0,25	0,4 ÷ 0,7
15CH2MFA - díly pláště (plech, výkovky)[65]	0,13 ÷ 0,18	0,17 ÷ 0,37	0,3 ÷ 0,6	2,5 ÷ 3,0	≤0,4	0,6 ÷ 0,8	0,025	0,025	≤0,1	-

Poznámky: 1) Pro základní materiál 08Ch18N10T se připouští obsah feritu max. 15%.

2) U oceli 22K při dodržení všech ostatních jakostních ukazatelů dovoluje překročení obsahu Mn a Si o 0,05% a obsah Ni do 0,5%.

3) U oceli 22K se připouští residuální obsah Mo max. 0,15%.

4) Kompenzátor objemu dle ruského provedení je vyroben z materiálu označeného K22MA, obdobného chemického složení jako 22K, kromě obsahu Mo.

Tab. 4.3.2 - Chemického složení svarového a návarového kovu

Materiál	C max.	Si (max.)	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S max.	P max.	Co max .	N
Drát Sv-10CH16N25AM6 +tavidlo OF-10 nebo argon	0,12	1,2	0,80 ÷ 2,00	12,5 ÷ 17,0	20,0 ÷ 27,0	5,5 ÷ 7,5	-	0,018	0,025	0,05	0,08 ÷ 0,18
Drát Sv-04CH19N11M3 + tavidlo OF-6 nebo argon	0,10	0,60	0,8 ÷ 2,0	15,0 ÷ 20,0	10,0 ÷ 14,0	2,0 ÷ 3,0	-	0,018	0,025	0,05	-
EA395/9	0,12	0,70	1,0 ÷ 2,2	13,5 ÷ 17,0	22,0 ÷ 27,0	4,5 ÷ 7,0	-	0,018	0,025	-	0,08 ÷ 0,15
EA400/10T [64]	0,10	0,60	1,15 ÷ 3,10	16,8 ÷ 19,0	9,0 ÷ 12,0	2,0 ÷ 3,5	0,30 ÷ 0,75	0,025	0,025	0,05	-
SSM 309, FSM 309, ESM 309L [66]	0,04	1,0	0,5 ÷ 2,5	22,0 ÷ 25,0	12,0 ÷ 14,0	≤0,75	-	0,03	0,04	-	-
ESM 347, SMA 347 [66]	0,08	0,65 ÷ 1,0	1,0 ÷ 2,5	19,0 ÷ 21,5	9,0 ÷ 11,0	≤0,75	-	0,03	0,03	-	-

Materiál	C max.	Si (max.)	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S max.	P max.	Co max .	N
ZIO – 8 [67]	0,12	1,0	1,0 ÷ 2,5	22,5 ÷ 27,0	11,5 ÷ 14,0	-		0,02	0,03	0,05	-
EA898/21 B [68]	0,1	0,7	1,6 ÷ 2,5	18,0 ÷ 20,0	9,0 ÷ 10,0	0,3 ÷ 1,0		0,03	0,03	0,05	-

Poznámky: 1) Pro vysoce legované svařovací materiály se připouští tolerance chemického složení u svařových a návarových kovů: Cr $\pm$ 0,25%, Ni $\pm$ 0,25%, Mo $\pm$ 0,15 u ostatních prvků, kromě C, S a P, $\pm$ 0,10%.

2) Pro austenitické přídavné materiály se připouští obsah feritu max. 8%.

4.4. Mechanické vlastnosti struktur HSS

Minimální požadované mechanické vlastnosti (R_m - mez pevnosti, $R_{p0,2}$ - mez kluzu, A - tažnost, Z - kontrakce, RM - vrubová houževnatost) použitých materiálů je součástí technických podmínek, resp. specifikace materiálů pro PG, KO a RE. Mechanické vlastnosti dle [64] použitých ocelí jednotlivých dílů, svařového a návarového kovu HSS jsou uvedeny v tab. 4.4.1 a tab. 4.4.2.

Tab. 4.4.1 - Mechanické vlastnosti použitých ocelí jednotlivých dílů [64]

Materiál		Minimální hodnoty pro teploty									
		20°C					270°C	325°C		350°C	
		R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]	RM [J/cm ²]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]
PG	22K výkovky	431	216	20	45	69	186	-	-		
	08CH18N10T výkovky	490	196	38	55	-	-	353	177		
KO	K22MA výkovky	410	215	21	45	39	-			-	186
	22K výkovky	412	216	20	50	78	-			-	186
	08CH18N10T výkovky	491	196	38	50	-	-			334	157
Re	15CH2MFA výkovky[69]	540	432	14	50	69	402	466	398	461	395

Tab. 4.4.2 - Mechanické vlastnosti svařového a návarového kovu [64]

Materiál		Minimální hodnoty pro teploty								
		20°C					325°C		350°C	
		Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	Z [%]	RM [J/cm ²]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]
PG	Sv-10CH16N25AM6 + tavidlo OF-10 (v.s.)	539	392	13	15	-	392	245		
	Sv-10CH16N25AM6 + argon (v.s.)	539	245	25	-	-	-	-		
	Sv-10CH16N25AM6 + tavidlo OF-10 (t.z.)	-	-	-	-	39	-	245		

Materiál		Minimální hodnoty pro teploty							
		20°C				325°C		350°C	
		R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]	RM [J/cm ²]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
	Sv-04CH19N11M3 + tavidlo OF-6 (t.z.)	392	245	25	30	49	343	196	
	Sv-04CH19N11M3 + argon (v.s.)	441	275	25	40	-	392	245	
	EA395/9 (v.s.)	588	363	23	40	118	490	343	
	EA395/9 (t.z.)	-	-	-	-	39	-	343	
	EA400/10T (v.s.)	539	343	25	30	88	441	245	
	EA400/10T (t.z.)	539	343	18	30	39	431	245	
KO	Sv-04CH19N11M3 + argon (v.s.)	441	275	35	40	-			392
	EA395/9 (t.z.)	-	-	-	-	39			-
	EA400/10T (v.s.)	539	343	25	30	-			441
HA	SSM 309, FSM 309, ESM 309L [70]	600	440	41	-	160			
	ESM 347, SMA 347 [66]	650	460	35	-	-			
	ZIO – 8 [71]	539	294	13	15	-			441
	EA898/21 B [71]	539	343	10	30	49			441

Poznámka: t.z. - tepelně zpracováno, v.s. - výchozí stav

4.5. Provozní podmínky

Předchozí podkapitoly se věnovaly popisu heterogenního svarového spoje, jeho mechanickým vlastnostem a chemickému složení. Tato kapitola se zaměří na změnu těchto vlastností vlivem provozních podmínek, a to především u zařízení v jaderné energetice.

Pokud mluvíme o provozních podmínkách v jaderné energetice, tak potom musíme zmínit:

- *zatížení působící na materiál zařízení*
- *teplotu, při které pracuje zařízení (difuze legujících prvků)*
- *prostředí, ve kterém zařízení pracuje (provozní médium, okolní prostředí, korozní děje)*
- *čas (vlivem času dochází k únavě materiálu zařízení)*

Provozní podmínky v podobě zatížení (zatížení tlakem, vnějšími silami) nemá na materiálové vlastnosti svarových spojů vliv. Zatížení pouze způsobuje deformaci materiálu, nikoli však změnu jeho vlastností. U ostatních vlivů provozních podmínek už se nedá říct, že by neměly vliv na vlastnosti HSS.

4.5.1. Vliv teploty a času

Pokud jde o vliv teploty na vlastnosti materiálů, musíme toto hledisko brát ze dvou pohledů. Zaprvé, jaký vliv má teplota na mechanické vlastnosti materiálů v daném okamžiku (při určité teplotě)

a zadruhé, jaký vliv má působení teploty na změnu vlastností materiálů v průběhu času. Toto hledisko se pak již kombinuje právě s vlivem času a potom mluvíme o tzv. stárnutí materiálů.

Provozní teplota, která je vyšší než pokojová (20°C), má vliv na urychlení difuzních procesů uvnitř materiálu. Při vyšší teplotě je urychlená difuze materiálu a mění se tak chemické složení materiálu a jeho mikrostruktura, zejména pak u heterogenních materiálů (tab. 4.5.1 a obr. 4.5.5), pokud není stabilizovaná první vrstva návaru.

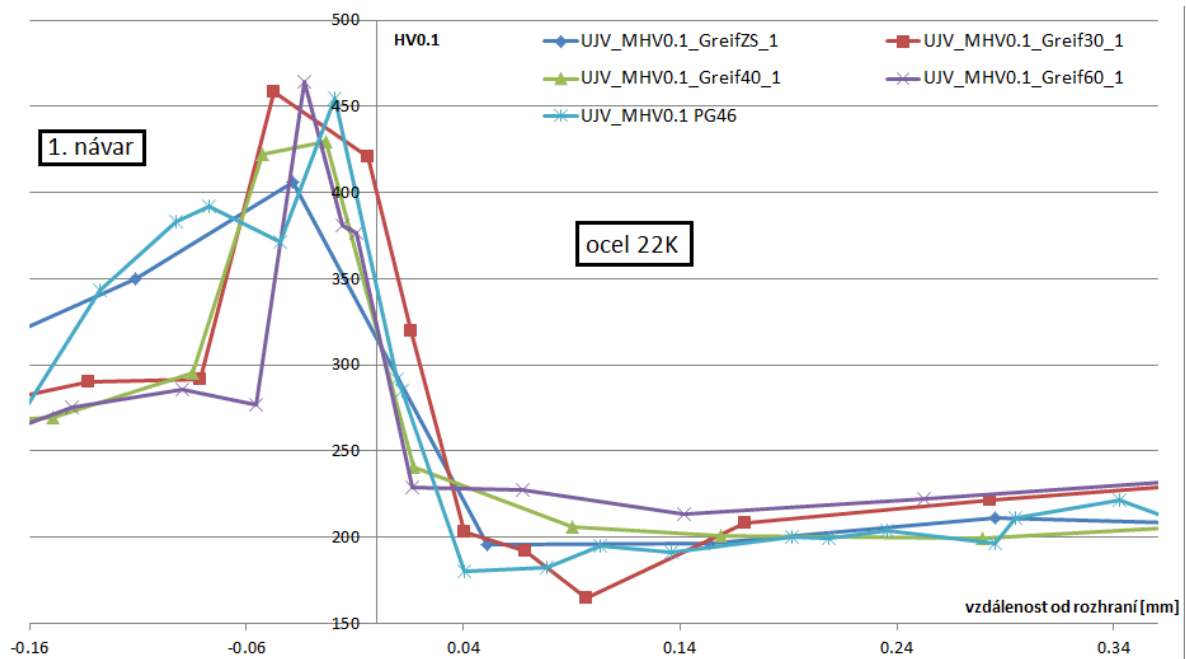
Pro měření změny mechanických vlastností materiálů a zjišťování tak jejich materiálových charakteristik v závislosti na čase můžeme získat jen dlouhodobým sledováním změn, kterým podléhají v průběhu jejich reálného stárnutí. Kdybychom měli toto sledovat v reálném čase a určovat vlivy po několika desítkách let, byl by tento experiment velice náročný. Proto používáme tzv. simulované stárnutí, kde působení času v podobě několika let nahrazujeme působením zvýšené teploty, která adekvátně nahrazuje určitý čas. Pod pojmem stárnutí si můžeme představit změnu vlastností daného materiálu (většinou v negativním, ale i pozitivním slova smyslu). Jedná se jak o změnu chemických, tak i mechanických vlastností.

Změna tvrdosti HSS byla stanovována měřením tvrdosti na pracovištích ÚJV Řež [63] a UFM, AV ČR [72], [73]. Měření bylo prováděno na reálně zestárnutém 25-ti letém HSS tak i výchozím HSS a následně simulovaně zestárnutém na 30, 40 a 60 let. Výsledky z těchto měření jsou uvedeny v následujících tabulkách a obrázcích.

Tab. 4.5.1 - Chemické složení návarů [hm. %]; výchozí hodnoty [64], HSS - simulace 30 let, HSS – reálný provoz 25 let [63]

		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
1. návar (výchozí)		max. 0,12	max. 1,2	0,8 -2,0	12,5-17,0	20,0-27,0	5,5-7,5	0,025	0,018
1. návar (simulace 30 let)	průměr	0,07	0,44	0,93	14,1	22,1	6,4	0,030	0,013
	sm. odch.	0,02	0,01	0,06	0,5	0,8	0,1	0,001	0,001
1. návar (provoz 25 let)	průměr	0,09	0,66	1,04	13,1	21,0	6,4	0,031	0,014
	sm. odch.	0,01	0,01	0,12	0,3	0,7	0,2	0,001	0,001
2. návar (nominální)		max. 0,1	max. 0,6	0,8-2,0	15,0-20,0	10,0-14,0	2,0-3,0	0,025	0,018
2. návar (simulace 30 let)	průměr	0,04	0,59	1,20	18,4	14,1	3,1	0,029	0,013
	sm. odch.	0,01	0,01	0,08	0,2	0,4	0,1	0,001	0,000
2. návar (provoz 25 let)	průměr	0,04	0,57	1,25	17,6	13,4	3,2	0,029	0,014
	sm. odch.	0,01	0,02	0,10	0,3	0,4	0,1	0,001	0,000

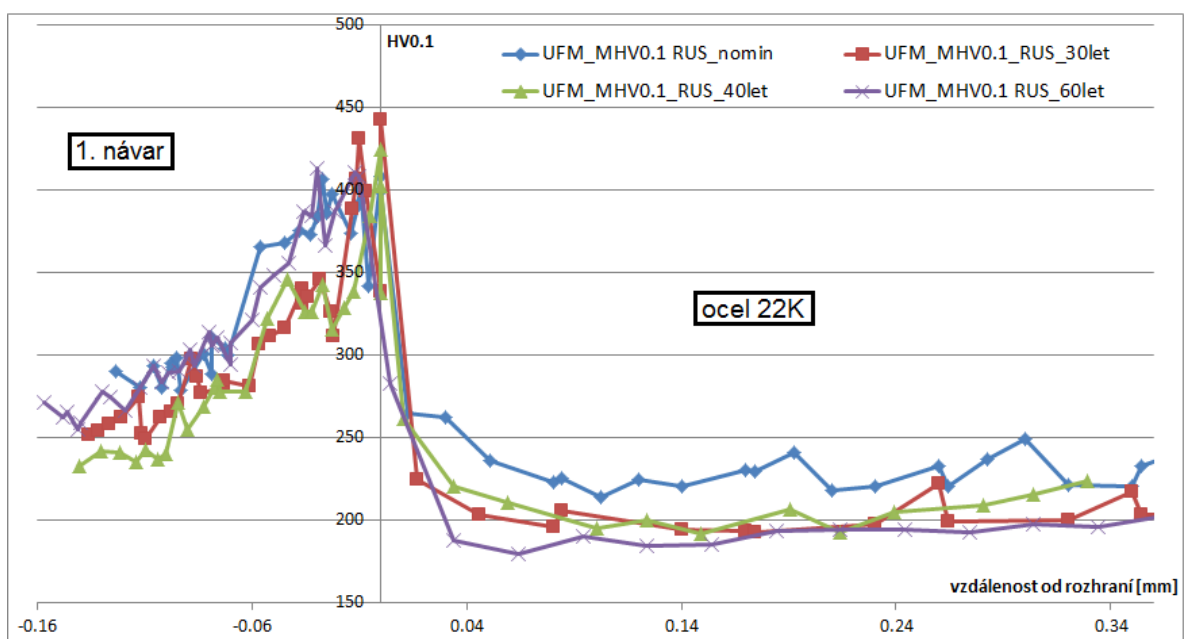
Chemické složení obou návarů po simulaci 30 let provozu a po reálném provozu v délce 25 let se neliší a odpovídá výchozím hodnotám, s výjimkou mírně zvýšeného obsahu fosforu. V reálně zestárleém HSS byl naměřen zvýšený obsah fosforu – v 1. návahu o 0,006 hm. %, ve 2. návahu pak o 0,004 hm. %. Dané měření je provedeno na HSS dle vítkovického provedení. Na následujícím grafu (obr. 4.5.1) jsou vyhodnoceny výsledky ÚJV Řež z měření tvrdosti na tomto HSS [63]. V grafu jsou zobrazeny hodnoty tvrdosti HV0.1 v závislosti na vzdálenosti od rozhraní oceli 22K a 1. návahu (nulová hodnota). Je zde porovnání jak reálně zestárleého HSS po 25 letech (UJV_MHV0.1 PG46), tak HSS ve výchozím stavu (UJV_MHV0.1_GreifZS_1) a po simulovaném zestárnutí (UJV_MHV0.1_Greif30(40,60)_1).



Obr. 4.5.1 – Měření tvrdosti (HV0,1) napříč HSS (vítkovická technologie) [63]

Z grafu na obr. 4.5.1 je vidět, že tvrdost jak oceli 22K, tak i 1. návaru HSS se v průběhu času vlivem stárnutí výrazně nemění. Pouze HSS, které jsou zestárlé (simulačně nebo reálně) mají na rozhraní mezi 1. návarem a ocelí 22K tvrdost nepatrně vyšší než rozhraní u HSS ve výchozím stavu. Mezi těmito zestárlými HSS však už výrazný rozdíl mezi hodnotami tvrdosti na rozhraní mezi ocelí 22K a 1. návarem není. Tyto vyšší hodnoty tvrdosti se také mírně posouvají do 1. návaru, což je také patrné na obr. 4.5.5, kde je zřejmý difuzní proces na rozhraní HSS.

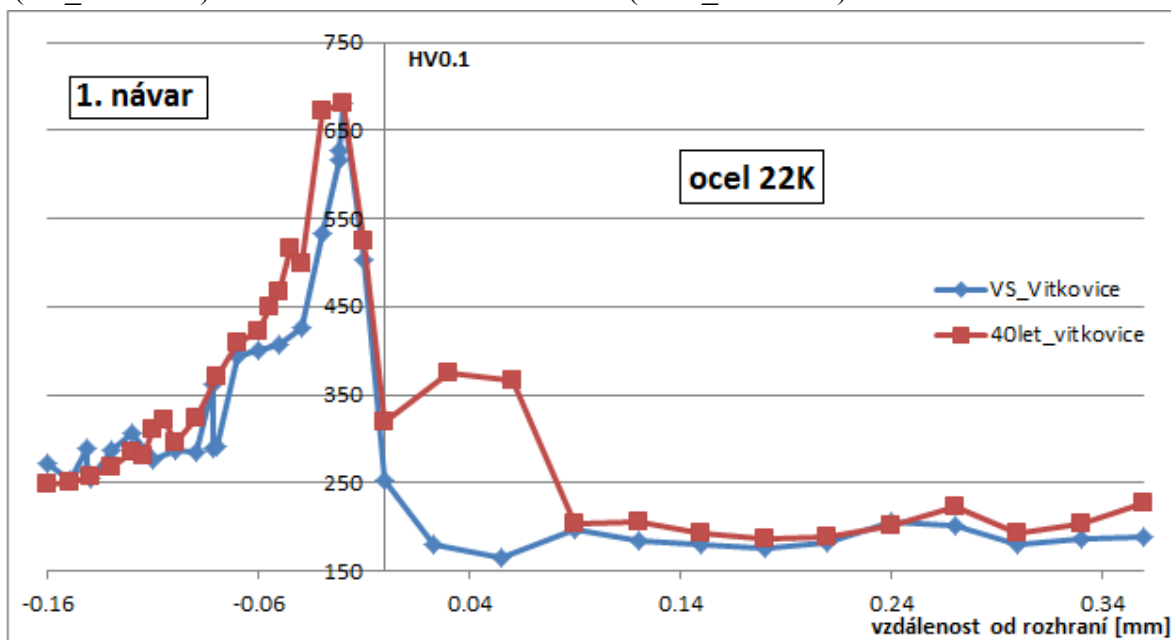
Na následujícím grafu (obr. 4.5.2) jsou vyhodnoceny výsledky AV ČR, UFM z měření tvrdosti HV0.1 HSS vyrobeného dle ruského provedení. V grafu jsou opět zobrazeny hodnoty tvrdosti HV0.1 v závislosti na vzdálenosti od rozhraní oceli 22K a 1. návaru (nulová hodnota). Jsou zde porovnávány stavy nominální a simulované stárnutí 30, 40 a 60 let [72].



Obr. 4.5.2 – Měření tvrdosti (HV0,1) napříč HSS (ruská technologie) [72]

Z měření tvrdosti HSS vyrobeného podle ruské technologie vychází z hodnocení vlivu stárnutí na tyto mechanické vlastnosti HSS rozdílné chování než tomu bylo u HSS vítkovické technologie. Dle měření tvrdosti ocel 22K u HSS podle ruské technologie vykazuje vlivem stárnutí snížení tvrdosti. Na rozhraní a v 1. návaru u tohoto HSS nelze jednoznačně určit chování těchto struktur vlivem stárnutí. U 1. návaru je možné pozorovat tendenci snižování tvrdosti, ale toto snižování není zcela monotónní s rostoucí dobou stárnutí.

Na následujícím grafu (obr. 4.5.3) je znázorněno měření tvrdosti HV0.1 HSS vyrobeného podle vítkovické technologie. Toto měření probíhalo na UFM, AV ČR. Měření bylo provedeno opět v blízkosti a směru kolmém k rozhraní mezi 1. návarem a ocelí 22K. Byl měřen HSS ve výchozím stavu (VS_vitkovice) a simulačně zestárlém na 40 let (40let_vitkovice).

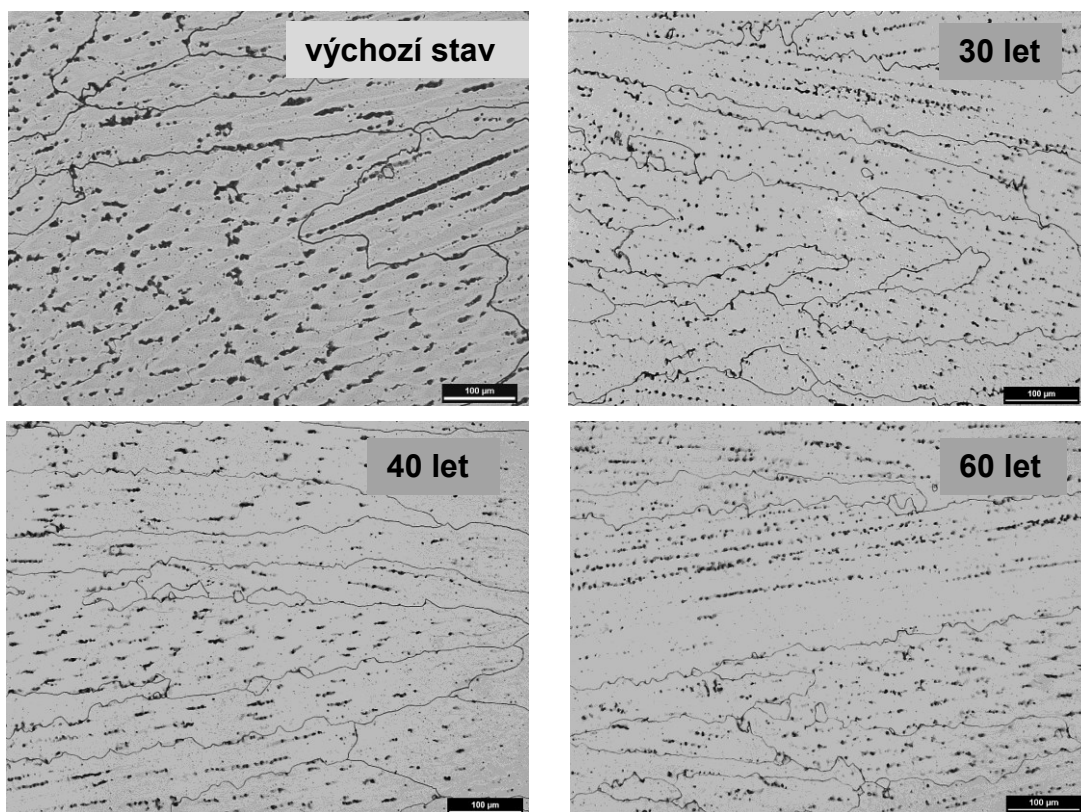


Obr. 4.5.3 – Měření tvrdosti (HV0.1) na UFM, AV ČR napříč HSS (vítkovická technologie)

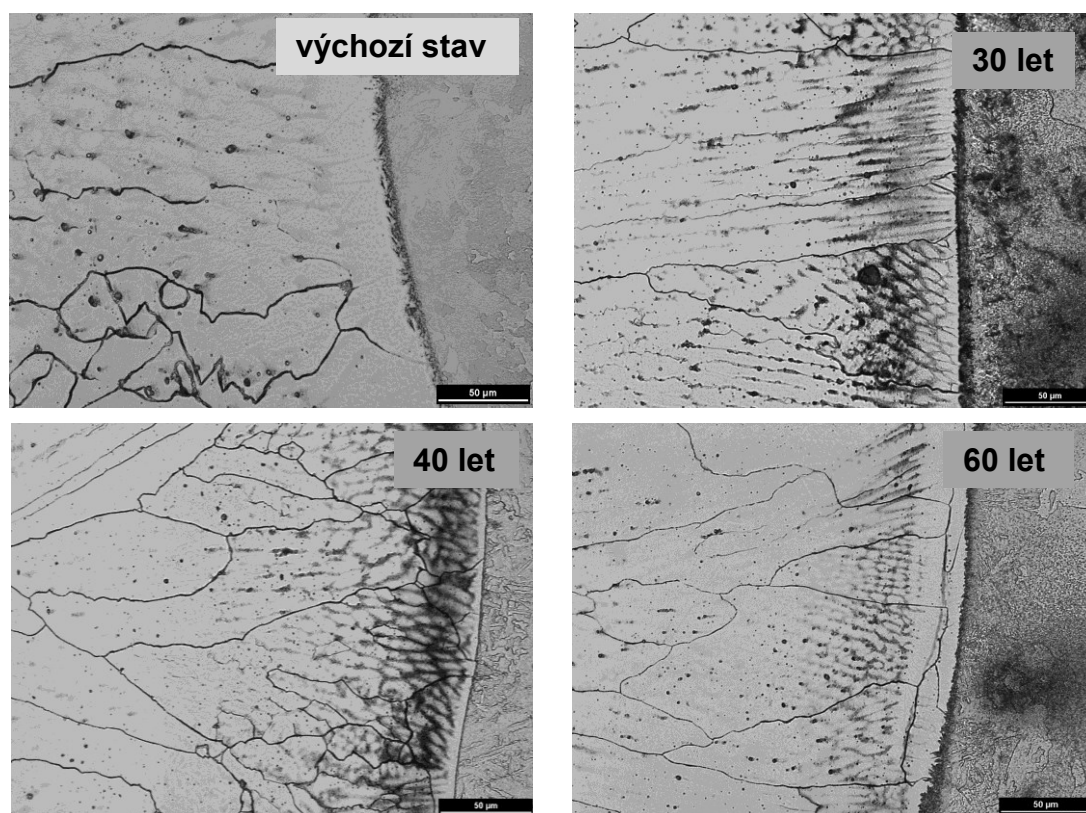
Z tohoto grafu na obr. 4. 5. 3 je vidět mírně rostoucí tendence tvrdosti v blízkosti rozhraní vlivem stárnutí. V oblasti 1. návaru změna tvrdosti už patrná není. Výsledky jsou tedy podobné výsledkům z měření tvrdosti HSS vyrobeného podle vítkovické technologie, který byl měřen také na ÚJV Řež (viz obr. 4.5.1 [63]).

Na základě těchto měření tvrdosti (ne z hodnot tvrdosti, ale celého průběhu instrumentovaného měření tvrdosti a profilů vtisku) bylo cílem této disertační práce určit základní mechanické vlastnosti jednotlivých struktur HSS. Stanovují se mechanické vlastnosti struktur jak HSS ve výchozím stavu, tak i simulačně zestárlého HSS. Tímto se pak případně určují změny mechanických vlastností HSS. Z důvodu, že HSS vyrobený podle vítkovické technologie vykazuje větší změny mechanických vlastností vlivem stárnutí, metodika bude použita na tomto HSS.

Na následujících obrázcích je znázorněna změna mikrostruktury 1. návaru a promíšené oblasti u HSS, vyrobeného podle vítkovické technologie, v závislosti na provedeném simulovaném stárnutí (VS – výchozí stav). U 1. návaru není zřejmá výrazná změna mikrostruktury. U promíšené oblasti dochází po simulačním stárnutí k další precipitaci karbidů v nauhličené oblasti 1. návaru v blízkosti rozhraní.



Obr. 4.5.4 – Mikrostruktura 1. návaru při různém stádiu simulovaného stárnutí [62]



Obr. 4.5.5 – Mikrostruktura promíšené oblasti při různém stádiu simulovaného stárnutí [62]

4.5.2. Vliv prostředí a času

Faktor vlivu prostředí na změnu vlastností heterogenního svarového spoje je samozřejmě také úzce spjat s vlivem času, protože asi žádné prostředí nemá zásadní vliv na změnu vlastností materiálu v okamžiku působení prostředí, ale významnou roli hraje doba působení prostředí na materiál (HSS, zařízení).

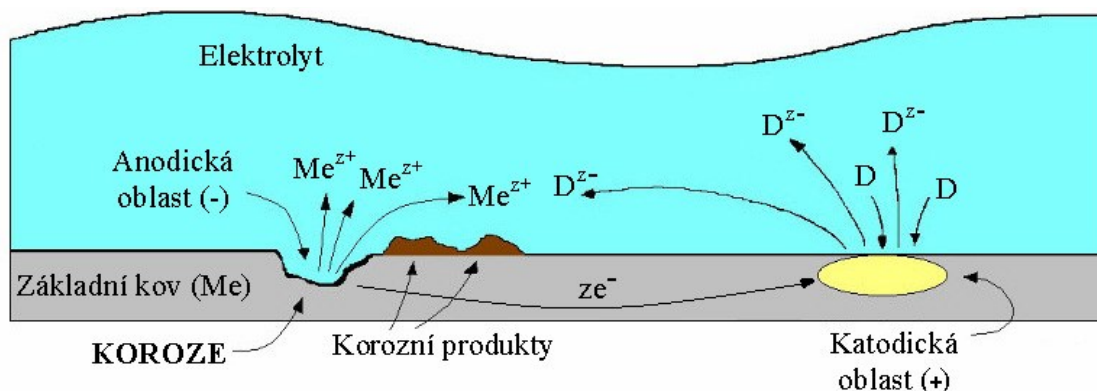
V jaderné energetice se HSS nejčastěji nachází v prostředí borité vody, výjimečně pak v plynném prostředí v podobě vzduchu (zařízení mimo provoz) nebo plynného dusíku. Proto prostředí vyskytující se u HSS v jaderné energetice zapříčiňuje chemickou nebo elektrochemickou korozi. Koroze kovů a jejich slitin je samovolný nevratný proces rozrušování kovových materiálů v důsledku jejich chemických nebo elektrochemických reakcí s obklopujícím agresivním prostředím, který směřuje ke ztrátě funkčních vlastností výrobků z těchto materiálů vyrobených [74]. Základní rozdělení korozních procesů, jak již bylo zmíněno, je na korozi chemickou a elektrochemickou. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že chemická koroze na rozdíl od koroze elektrochemické probíhá v nevodivých prostředích. Z toho tedy plyne, že elektrochemická koroze probíhá naopak v prostředích elektricky, přesněji iontově vodivých, tj. v elektrolytech.

4.5.2.1. Chemická koroze

Tato koroze je charakteristická tím, že na rozdíl od elektrochemické probíhá v nevodivých prostředích a to většinou v plynech. Při vlastním procesu chemické koroze potom dochází k přímé interakci materiálu s tímto plynem, kdy nejprve dochází k adsorpci plynu na mezifázovém rozhraní (tj. na kovovém povrchu) a následně pak k tvorbě vlastních korozních produktů (většinou oxidu, sulfidu, atd.) [75]. Tato koroze (chemická reakce) probíhá za neúčasti elektrolytu a tedy bez vzniku elektrochemického článku. Tento proces může probíhat při odstavení bloku jaderné elektrárny nebo při plynném médiu v zařízení.

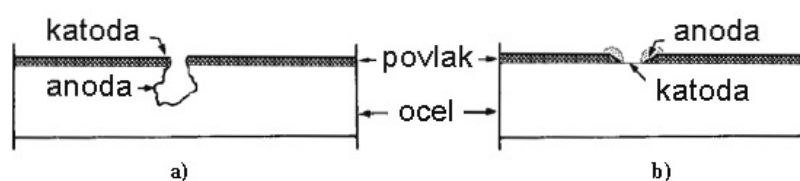
4.5.2.2. Elektrochemická koroze

Tato koroze je typická tím, že probíhá v elektrolytech, a že při ní dochází ke vzniku elektrochemického článku (galvanického nebo koncentračního) a tedy k přenosu elektronu na větší vzdálenost. Tento typ korozních procesů probíhá ve velmi významných a rozšířených korozních prostředích, jakými jsou například atmosféra, voda a roztoky kyselin. Soustava kov – korozní prostředí je tedy soustavou dvou vzájemně se ovlivňujících redoxních systémů (anodického a katodického), ve které součást prostředí oxiduje kov na jeho ionty (tzv. anodická oxidace kovu) a sama se redukuje příjmem elektronu kovu (tzv. katodická redukce depolarizátoru) [75]. To je zjednodušeně zobrazeno na obr. 4.5.6.



Obr. 4.5.6 – Schéma elektrochemického korozního procesu [75]

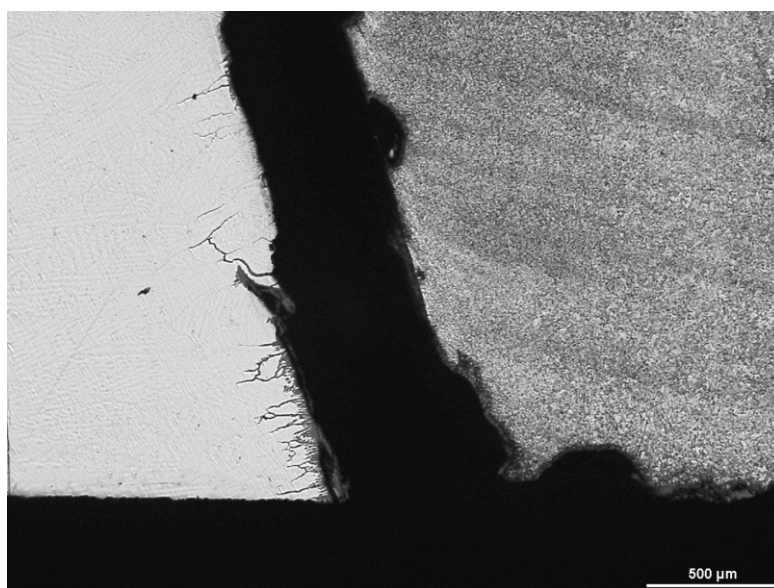
Na druhou stranu je elektrochemický korozní proces využíván právě na ochranu kovu proti korozi, a to tvorbou kovových povlaků. Pro tvorbu kovových povlaků je využívána celá řada kovů, od velmi ušlechtilých po méně ušlechtilé kovy vzhledem k povlakovanému materiálu (většinou železu). Podle ušlechtilosti povlakového materiálu pak rozlišujeme tzv. katodické kovové povlaky (vzhledem k chráněnému kovu jsou katodou – chráněný kov je méně ušlechtilý než povlakový materiál) a anodické kovové povlaky (vzhledem k chráněnému kovu jsou anodou – chráněný kov je více ušlechtilý než povlakový materiál), viz obr. 4.5.7. V této práci je zmíněna právě metoda anodických kovových povlaků jako ochrana kovu před korozním procesem, protože princip této metody spočívá v tom, že méně ušlechtilý kov (povlak a v případě HSS je to ocel 22K) se stává anodou v elektrochemickém procesu a ušlechtilejší kov (v našem případě 1. návar) je katodou a k jeho rozpouštění tak nedochází. Proto za prvotní mechanismus degradace heterogenního svarového spoje lze považovat anodické rozpouštění, kdy vznikají korozní důlky, které se tak stávají koncentrátory napětí pro další mechanismy porušování heterogenních svarových spojů.



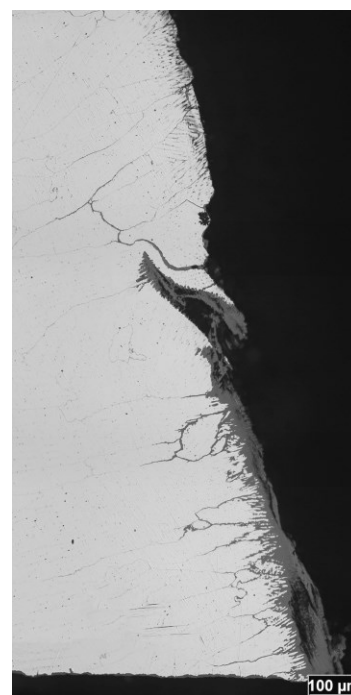
Obr. 4.5.7 – Důsledek poruchy kovového povlaku a) katodický povlak, b) anodický povlak [75]

U reálného zestárlého heterogenního svarového spoje byly pozorovány trhliny ve svaru a sledovány příčiny vzniku. Ze studie vzešlo, že počáteční degradační mechanismus v HSS je již dříve zmiňované anodické rozpouštění, přičemž vznikají korozní důlky a vznikají tak koncentrátory pro korozní praskání (SCC) materiálu 1. návaru jako důsledku kombinace faktorů napětí (od rozdílné teplotní roztažnosti materiálů HSS a vnitřního přetlaku) [60], [76].

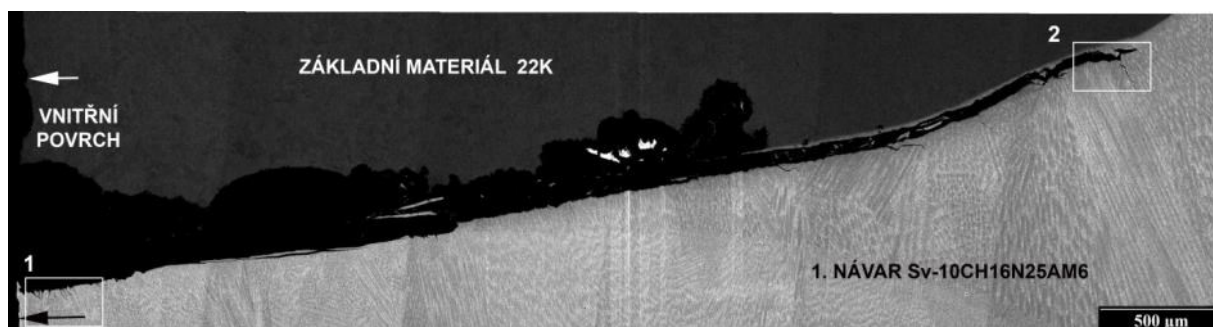
Na následujících obrázcích je zobrazeno anodické rozpouštění na rozhraní oceli 22K a 1. návaru v HSS a mezikrystalická koroze (MKK).



a)



b)



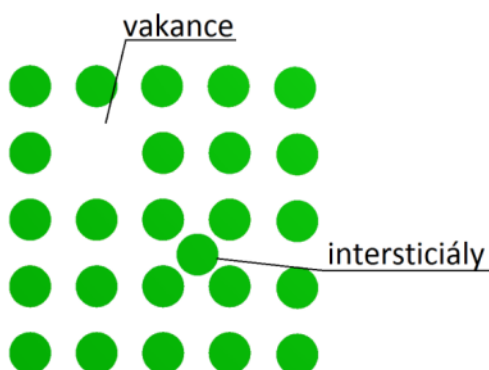
c)

Obr. 4.5.8 – Detail rozhraní HSS mezi 22K a 1. návarem a), b)[63], c)[60]

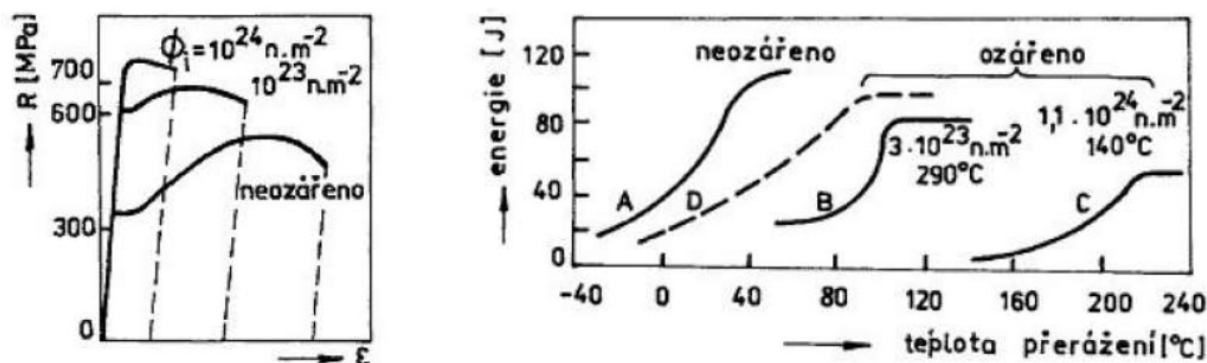
4.5.2.3. Radiační zkřehnutí

Pokud mluvíme o vlivu prostředí na vlastnosti HSS v jaderné energetice, tak potom také musíme zmínit v neposlední řadě vliv radiace na změnu mechanických vlastností HSS. Neutronové záření způsobuje výrazné změny mechanických vlastností materiálů. Tyto změny se projevují radiačním zkřehnutím, které ovlivňuje teplotu zastavení trhliny. Velikost radiačního zkřehnutí je ovlivněna neutronovou dávkou, ozařovací teplotou a chemickým složením oceli. K poškození materiálů dochází interakcí částic (neutrony, protony a elektrony) dopadajícího paprsku s atomy ozařovaného materiálu. Pokud je dávka dopadajícího paprsku do 1 eV, dochází pouze k tepelnému ovlivnění, jádro atomu se pouze vychýlí ze své pozice a poté vrátí zpět. Mohou vznikat natavené a rychle ztuhlé mikrooblasti. Při předávané energii přes 25eV dochází ke vzniku bodových poruch. Atomy jsou vyraženy z uzlové polohy a pohybují se mřížkou, dochází tak k sekundárním srážkám mezi ionty a vznikají tak dvojice vakance – intersticiál (obr. 4.5.9), což nazýváme tzv. „Frenkelova porucha“. Zvýšený obsah vakancí urychluje difuzní proces [77].

Materiál po ozáření zvětšuje svůj objem a mluvíme o „bobtnání vlivem ozáření“. Na tento jev je náchylná především austenitická část HSS. Vznik Frenkelových poruch se projevuje na mechanických vlastnostech jako radiační zpevnění. S rostoucí dávkou ozáření roste mez kluzu a mez pevnosti a naopak klesá tažnost a kontrakce. U nelegovaných a nízkoalegovaných ocelí dochází k poklesu houževnatosti [77] (obr. 4.5.10) a tím tak ke zvýšení tvrdosti.



Obr. 4.5.9 – Znázornění Frenkelovy poruchy v krystalové mřížce



Obr. 4.5.10 – Vliv intenzity radiace na změnu vlastností materiálu [77]

5. Analýza problému a volba metod řešení

Z předchozí provedené rešeršní studie vyplývá, že lze zvolit až 4 přístupy stanovení mechanických vlastností materiálu na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti. Nejběžnější metoda (kap. 3.2.1.), která se nejčastěji vyskytuje v odborné literatuře, je založena na empirických vztazích, kde jsou dosazovány parametry z cyklicky částečně odlehčovaného postupného měření tvrdosti. U této metody jsou charakteristické rozměry vtisku indentoru. Metodu využívají tvrdoměry uvedené v kapitole 3.1.2.3, konkrétně tvrdoměry od firem *ATC*, *Ducom* a *Frontics*. V článcích se ale uvádí, že při určování mechanických vlastností je nutné vědět, jaký materiál měříme, protože ve vztazích vystupuje parametr, jehož hodnota je závislá na měřeném materiálu [27]. Zbylé tři metody už používají MKP program a nejsou závislé na znalosti zkoušeného materiálu. Při těchto metodách lze navíc použít při měření tvrdosti libovolnou geometrii indentoru.

Metodiku stanovení mechanických vlastností z měření instrumentované tvrdosti ovlivňuje celá řada dalších faktorů. Zejména to jsou následující faktory:

- konstituční rovnice popisující elasto-plastické chování materiálu,
- výběr indentoru,
- vliv tření v kontaktu mezi indentorem a vzorkem,
- vliv tuhosti indentoru,
- proces optimalizace.

Následující podkapitoly stručně popisují jednotlivé faktory, jak jsou zohledněny ve vyvinuté metodice.

5.1. Metoda stanovení mechanických vlastností z měření tvrdosti

Pro splnění cíle disertační práce stanovení mechanických vlastností z měření instrumentované tvrdosti byla zvolena metoda, při níž jsou určeny materiálové charakteristiky, „metoda inverzního numerického modelování“ pomocí MKP. Tato metoda byla zvolena z následujících důvodů:

- vychází z běžně používané nedestruktivní kontroly za provozu,
- metoda není závislá na různé volbě indentoru (kulička nebo jehlan),
- použitelnost na homogenní a nehomogenní materiály,
- dlouholetá zkušenost s používáním metody konečných prvků, dostupnost metody na pracovišti a na ústavu mechaniky.

5.2. Druh indentoru

Metoda umožňuje používat různé indentory. Má-li být metodika aplikována na svarové spoje a na základní homogenní materiály, musí vyvinutá metodika zahrnovat použití různých indentorů. Pro stanovování mechanických vlastností materiálu o větší měřené ploše může být použito měření tvrdosti pomocí kuličky (dle Brinella). Výhodou použití kuličky je rychlejší proces optimalizace z hlediska kratší doby numerického výpočtu. Pro aplikaci vyvíjené metodiky pro jednotlivé oblasti svarového spoje se ale musí použít měření tvrdosti pomocí jehlanu. Pro tuto aplikaci byl vybrán **Vickersův indentor**.

5.3. Tření

Na základě rešeršní studie a provedené citlivostní analýzy bylo rozhodnuto při výpočtech uvažovat tření mezi indentorem (jehlan nebo kulička) a měřeným materiálem. Tření významně ovlivňuje numerické výsledky, zejména při hlubších vtiscích nebo u velmi tvrdých materiálů.

5.4. Tuhost indentoru

Mnoho autorů ve svých článcích uvádí, že uvažují při modelování indentace model indentoru jako tuhý. Toto řešení není mnohdy správné, protože při vyšším zatížení indentoru dochází při experimentálním měření k jeho elastické deformaci, proto je vhodné uvažovat indentor jako flexibilní (elastický) s materiálovými vlastnostmi dle studie $E=1\,200\,000\text{ MPa}$, $\mu=0.07$. Někteří autoři dokonce zahrnují do výpočetního modelu měřicí řetězec, který se vyskytuje mezi indentorem a místem odečítání posuvu pro korektnost indentační křivky. V tomto případě tento měřicí řetězec není nutné uvažovat vzhledem k zvolenému malému zatížení při instrumentovaném měření tvrdosti provedeném pro vývoj metodiky.

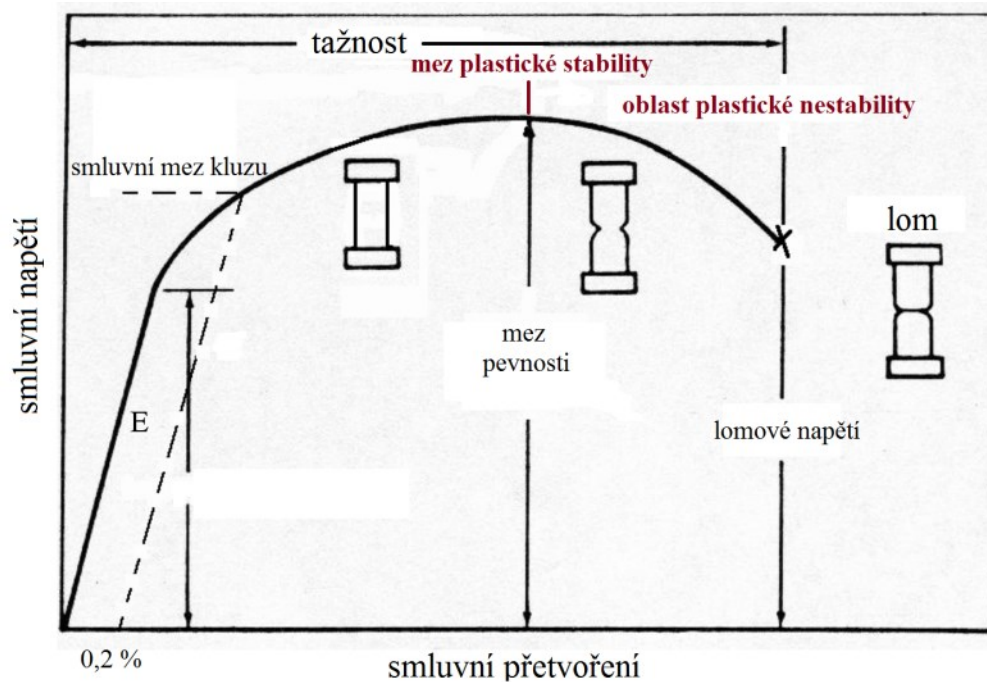
5.5. Výběr rovnice popisující elasto-plastické chování materiálu

Při vývoji metodiky byly použity dvě konstitutivní rovnice popisující elasto-plastické chování materiálu. Nejprve byla použita rovnice dle Ludwiga (rovnice 3.8). Tato rovnice nevykazovala tak přesné výsledky, jako rovnice **dle Voce** (rovnice 3.10). Rovnice dle Ludwiga obsahuje 4 materiálové parametry, zatímco rovnice dle Voce obsahuje 5 materiálových parametrů a je s ní možné lépe modifikovat tvar deformačně-napětové křivky. Z tohoto důvodu byla zvolena pro další vývoj a finální podobu metodiky rovnice dle Voce.

5.6. Optimalizační proces

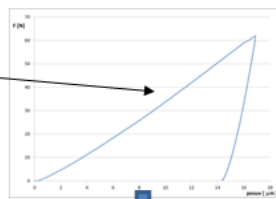
Při vývoji metodiky byly použity 3 způsoby stanovení výsledných parametrů materiálové rovnice. Při optimalizaci modelu materiálu pomocí MKP výpočtu je průběžně v této práci využívána postupná iterace (změna materiálových parametrů) MKP výpočtů na základě provedené citlivostní analýzy. Poté byl používán optimalizační software OptiSLang a nakonec stanovení parametrů materiálové rovnice je provedeno tzv. „online“ metodou. Tato metoda spočívá v porovnání experimentálních dat s předem vypočtenými daty pomocí MKP a výběru nejoptimálnější kombinace parametrů materiálové rovnice. Ve finální podobě metodiky jsou používány poslední 2 přístupy stanovení materiálových parametrů.

Na obrázku 5.1.2 je uvedeno obecné schéma zvoleného metodického postupu stanovení mechanických vlastností na základě instrumentovaného měření tvrdosti. V prvním kroku se provádí instrumentované měření tvrdosti materiálu, kdy výstupem jsou data v podobě indentační křivky a zmapování povrchu vtisku. Získaná data z experimentu jsou následně zpracována a porovnávána s výstupními hodnotami z numerické simulace indentace. Pro první výpočet je nutné definovat počáteční hodnoty parametrů vyskytujících se v konstitutivní rovnici (rovnice 3.10), když následně postupnými výpočty MKP programem optimalizujeme materiálový model (materiálové parametry) než dosáhneme požadované minimální odchylky. Tato odchylka je vyhodnocována metodou nejmenších čtverců. Po dosažení požadované přesnosti jsou stanoveny materiálové parametry a dosazením do rovnice popisující elasto-plastické chování materiálu pak získáváme deformačně-napěťovou křivku v závislosti skutečného napětí na skutečném přetvoření. Cílem metodiky je tak nejen stanovit základní mechanické vlastnosti, ale také určit odpovídající deformačně-napěťovou křivku, a to v oblasti do meze plastické stability (obr. 5.1.1). Youngův modul pružnosti je stanoven empirickými vztahy z odlehčovací indentační křivky (viz kapitola 3.2, rovnice 3.11, 3.12). Postup lze schematicky popsat následujícím diagramem (obr. 5.1.2). Tak je obecně popsána celá metodika stanovení základních mechanických vlastností na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti. Konkrétní a podrobnější popis postupu řešení uvedené metodiky je popsán v následující kapitole 6.

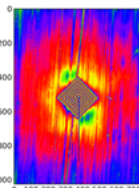
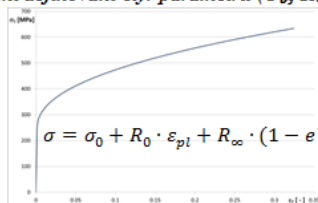


Obr. 5.1.1 – Smluvní deformačně-napěťová křivka s vyznačenou mezí plastické stability a oblastí plastické nestability

Experimentální měření indentace

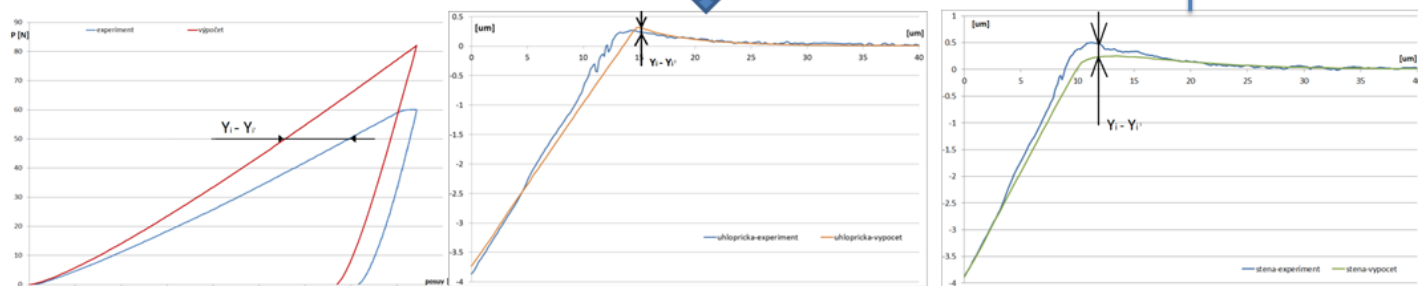


- určení E (viz kapitola 3.2, rovnice 3.11, 3.12)

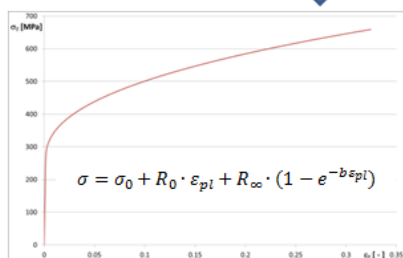
Počáteční definování čtyř parametrů (σ_0 , R_0 , R_∞ , a b)

Stanovení nových hodnot parametrů

Numerický výpočet MKP



$$F(X_1, X_j \dots X_m) = \int_{i=1}^n \sqrt{(Y_i - Y_{i'})^2}$$

-vyhodnocení chyby e : $e_i = Y_i - Y_{i'}$ $e_i < e_{krit}$ $e_i > e_{krit}$ 

Výstup:

- určení čtyř parametrů materiálové rovnice (σ_0 , R_0 , R_∞ , a b)
- určení průběhu napětí-ovně-deformační křivky (určení smluvní meze kluzu a meze pevnosti)

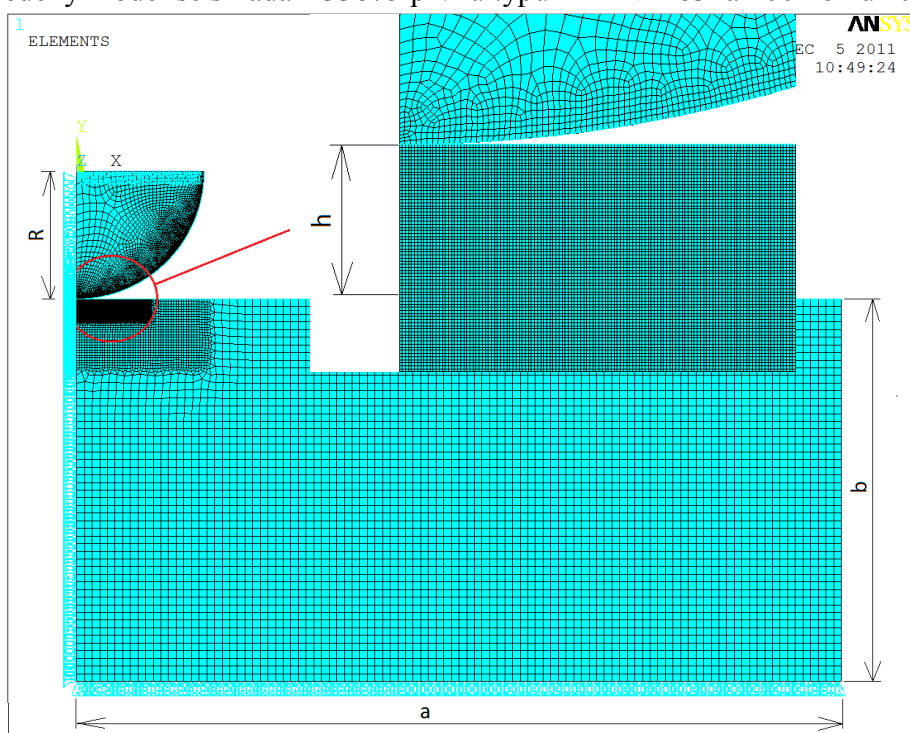
Obr. 5.1.2 – Vývojový diagram optimalizačního algoritmu

6. Realizace procesu řešení

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, pro vyvinutou metodiku je nutné získání dat z instrumentovaného měření tvrdosti v podobě indentační křivky a zmapování povrchu vtisku, která jsou podkladem pro optimalizaci modelu materiálu pomocí MKP výpočtu.

6.1. Numerický model

V rámci disertační práce a vývoje metodiky byly vytvořeny parametrické MKP modely pro numerické simulace instrumentovaného měření tvrdosti. V první části práce byl vytvořen axisymetrický model kuličkového indentoru a měřeného vzorku (obr. 6.1.1). MKP model je modelován jako 2D model s osou axisymetrie, kterou je globální osa y. Na obrázku 6.1.1 jsou znázorněny okrajové podmínky, které simulují indentační zkoušku. V ose y je zadána okrajová podmínka axisymetrie, na spodní plochu modelu je zabráněno posuvu ve směru osy y a na vrchní plochu indentoru je zadán posuv vždy dle porovnávaného experimentu. Tento konečno-prvkový model je zadáván parametricky, kdy parametrem jsou rozměry zkoušeného vzorku a indentoru (a , b , R) a hloubka indentace (h), které se mohou libovolně měnit podle experimentu, se kterým je numerický výpočet porovnáván. Stejně tak podle rozměrových parametrů je model parametricky diskretizován. Uvedený model se skládá z 33875 prvků typu PLANE183 a 100 461 uzlů.

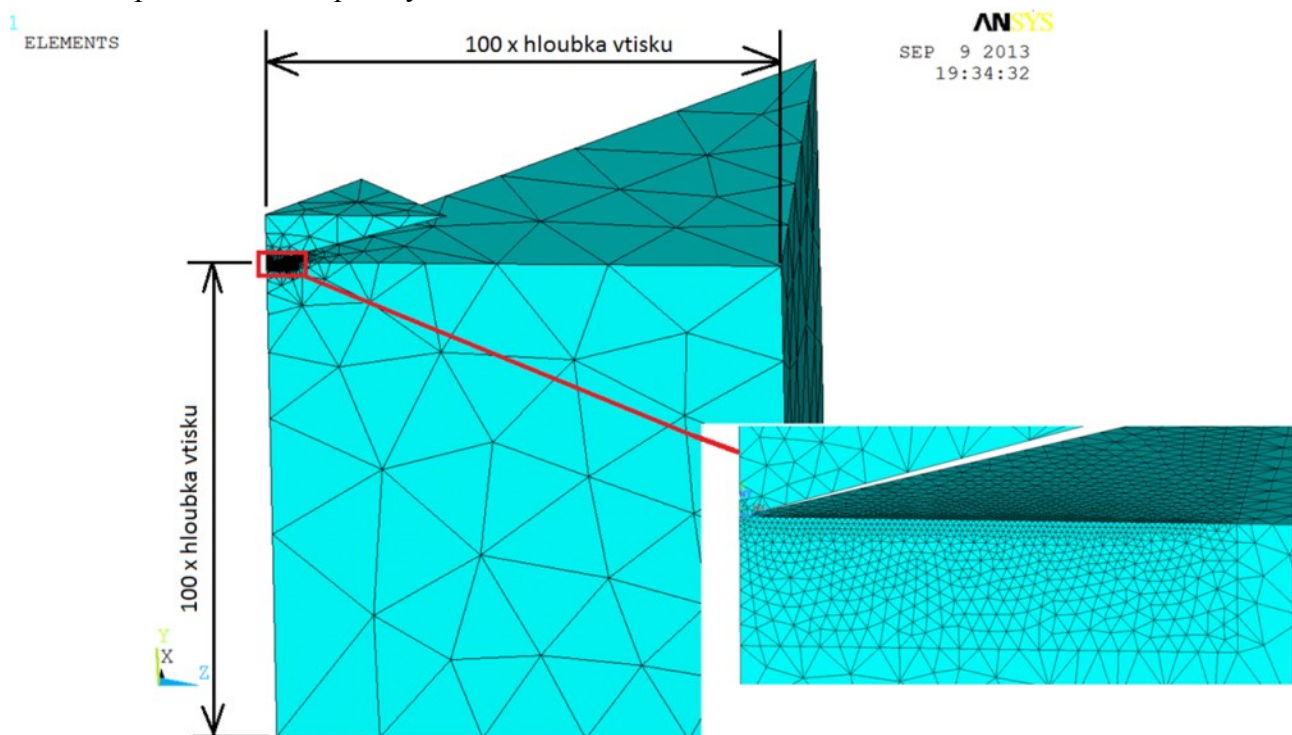


Obr. 6.1.1 – MKP model kuličkového indentoru s měřeným vzorkem pro numerické simulování indentace

Na tomto modelu byla provedena citlivostní analýza na tvar indentační křivky a geometrii povrchu vtisku v závislosti na měnící se materiálové parametry a koeficient tření. Jak již bylo uvedeno, nejprve byla používána materiálová rovnice dle Ludwiga (rovnice 3.8) a poté rovnice dle Voce (rovnice 3.10). První testy stanovení mechanických vlastností materiálu pomocí provedeného instrumentovaného měření tvrdosti tak probíhaly na základě získaných experimentálních dat z měření tvrdosti dle Brinella, a to pouze v podobě indentační křivky. Optimalizace materiálových parametrů probíhala postupnou iterací na základě provedené citlivostní analýzy, která byla výše specifikována.

S požadavkem na určování mechanických vlastností svarového spoje a jeho jednotlivých oblastí byla změněna metoda měření instrumentované tvrdosti na měření dle Vickerse, kdy indentorem je diamantový jehlan. S tímto ohledem byl také vytvořen MKP model nového indentoru s měřeným vzorkem.

Byla vytvořena jedna osmina 3D modelu Vickersova indentoru a měřeného vzorku materiálu (obr. 6.1.2). Měřený vzorek byl rozdělen na dva objemy. Menší objem je modelován v místě vpichu indentoru. V místě kontaktu vzorku s indentorem je modelována jemnější síť s velikostí hrany elementu $0,7 \mu\text{m}$ a s postupně narůstající vzdáleností od indentoru se velikost elementu zvětšuje (detail obr. 6.1.2). Z důvodu plynulého přechodu mezi jemnou a hrubou sítí je volena volná síť. Model je tvořen prvkem Solid187. Model měřeného vzorku má výšku i šířku vždy 100x větší od maximální hloubky vtisku indentoru. Počet uzlů modelu je závislý na maximální hloubce vtisku indentoru (pro hloubku vtisku $10 \mu\text{m}$ je počet uzlů modelu 6327). Velikost zvolené sítě byla definována na základě provedené citlivostní analýzy na velikost elementu s vlivem na tvar indentační křivky. Byl tak zvolen vhodný poměr mezi přesností této odezvy a délkou výpočtového času úlohy. Na dělicí rovině symetrie modelu byla předepsána okrajová podmínka symetrie. Na spodní ploše vzorku bylo zamezeno posuvu ve směru osy y a na kontaktní plochy byl předepsán kontakt se třením s koeficientem tření $f = 0,12$ (koeficient tření mezi diamantem a ocelí). Zatížení na indentor je definován posuvem horní plochy indentoru.



Obr. 6.1.2 – MKP model pro numerické simulování indentace

Tento model byl použit v další části práce ke stanovení mechanických vlastností materiálu na základě získaných dat z instrumentovaného měření tvrdosti dle Vickerse v podobě indentační křivky a zmapovaného povrchu vtisku. V této části práce byla již výhradně používána konstitutivní materiálová rovnice dle Voce. Ladění materiálových parametrů přešlo z postupné iterace na základě citlivostní analýzy na ladění pomocí programu OptiSLang. Toto ladění je používáno v konečné podobě metodiky a bude blíže popsáno později v příslušné podkapitole, stejně jako ladění metodou „online“.

Pro korektní stanovení základních mechanických vlastností materiálu je také důležité zpracování získaných experimentálních dat z měření a použití těchto dat k ladění materiálových parametrů. V průběhu práce postup zpracování naměřených dat prošel několika změnami. Závěrečná metoda zpracování experimentálních dat je blíže popsána v příslušné podkapitole.

Všechny postupné a důležité kroky, které obsahuje výsledná metodika stanovení mechanických vlastností, jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. K těmto postupným krokům byly vytvořeny spouštěcí programy v programovacím jazyku Python. Díky těmto programům je celý proces částečně zautomatizován. V následujících podkapitolách jsou tyto spouštěcí programy blíže popsány.

6.2. Citlivostní analýza

Před optimalizací výpočtového modelu podle uvedené metody řešení bylo potřeba nejprve provést citlivostní analýzy na parametry (σ_0 , R_0 , R_∞ , b , E), vyskytujících se v rovnici (3.10) popisující elasto-plastické chování materiálu a na ostatní parametry (koeficient tření, poissonovo číslo měřeného materiálu), ovlivňující porovnávání výstupy (indentační křivka a křivka profilu) z numerické simulace indentace.

Rovnice 3.10, představující deformačně-napěťovou křivku, má čtyři parametry. Čtyřmi parametry Voceho rovnice jsou materiálová charakteristika **mez úměrnosti** (σ_0) a tři další **obecné parametry rovnice** (R_0 , R_∞ , b), které mění tvar deformačně-napěťové křivky.

Citlivostní analýza byla tedy provedena pro tyto čtyři parametry (σ_0 , R_0 , R_∞ , b), dále na Youngův modul pružnosti (E), poissonovo číslo měřeného materiálu (μ_s) a na součinitel smykového tření mezi indentorem a měřeným materiálem (f). Při citlivostní analýze byl posuzován vliv změny hodnot uvedených parametrů na změnu tvaru indentační křivky (mění se hodnota zatížení při konstantní maximální hloubce vtisku a na změnu tvaru profilu vtisku (velikosti pile-up nebo sink-in efektu). Vliv na změnu tvaru profilu vtisku byl prováděn jak na profil řezu vedený *úhlopříčkou indentoru*, tak řezem profilu vedeným *kolmo ke stěně indentoru*.

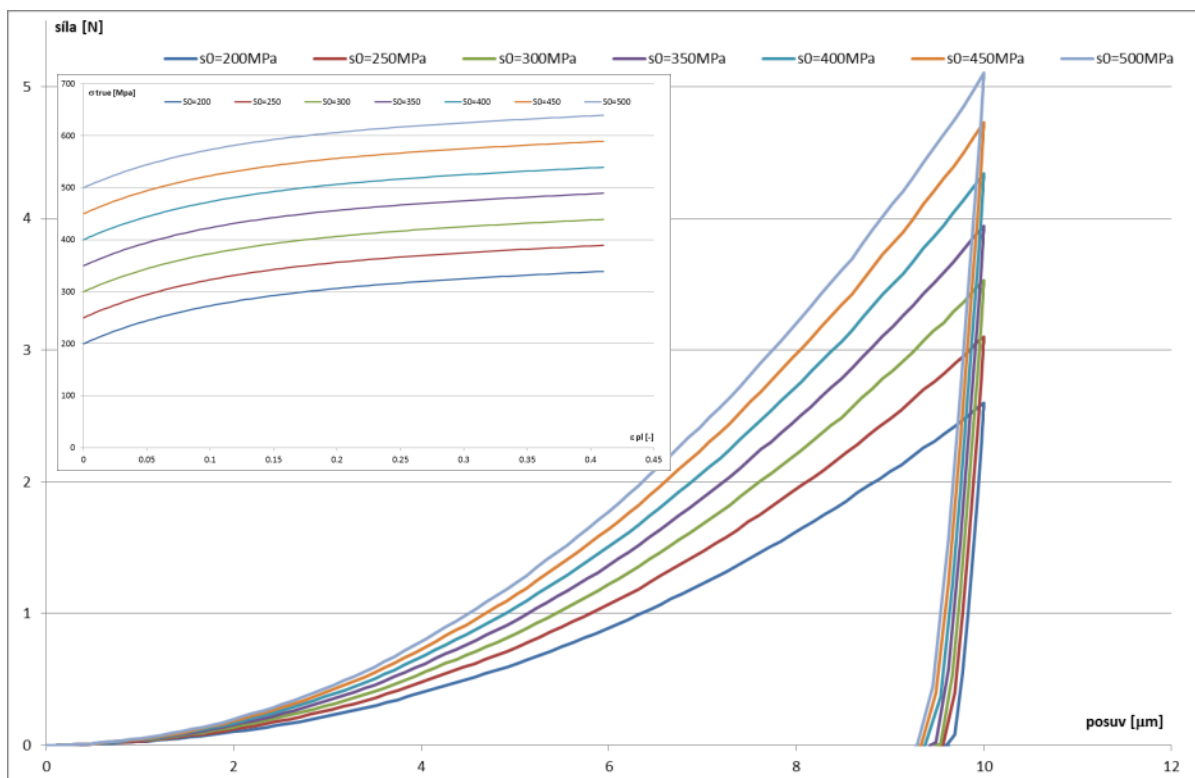
Na následujících grafech jsou zobrazeny výsledky z citlivostních analýz. Tyto grafy zobrazují, jak velký vliv mají jednotlivě měnící se parametry na tvary porovnávaných křivek. Citlivostní analýzy na parametry z materiálové rovnice dle Voce [$\sigma = \sigma_0 + R_0 \cdot \varepsilon_{pl} + R_\infty \cdot (1 - e^{-b\varepsilon_{pl}})$] a Youngův modul pružnosti byly provedeny pro získání přehledu o chování porovnávaných křivek při ladění modelu materiálu. Citlivostní analýzy na změnu poissonova čísla měřeného materiálu a součinitele smykového tření mezi indentorem a měřeným materiálem posloužily ke správnému nastavení výpočtového modelu pro ladění modelu materiálu. Rozsah hodnot parametrů, u kterých jsou prováděny analýzy, jsou uvedeny v tabulce 6.2.1. Tento rozsah hodnot byl stanoven na základě práce [41]. Při analýze se vycházelo vždy ze stejně nastavených parametrů a pro každou analýzu se měnil vždy jen jeden parametr v rozsahu hodnot dle následující tabulky a četnosti dle následujících grafů. Základní nastavení parametrů pro všechny analýzy bylo následující:

$$\sigma_0 = 200 \text{ MPa}, R_0 = 100 \text{ MPa}, R_\infty = 100 \text{ MPa}, b = 10, E = 190\,000 \text{ MPa}, f = 0.1, \mu = 0.3$$

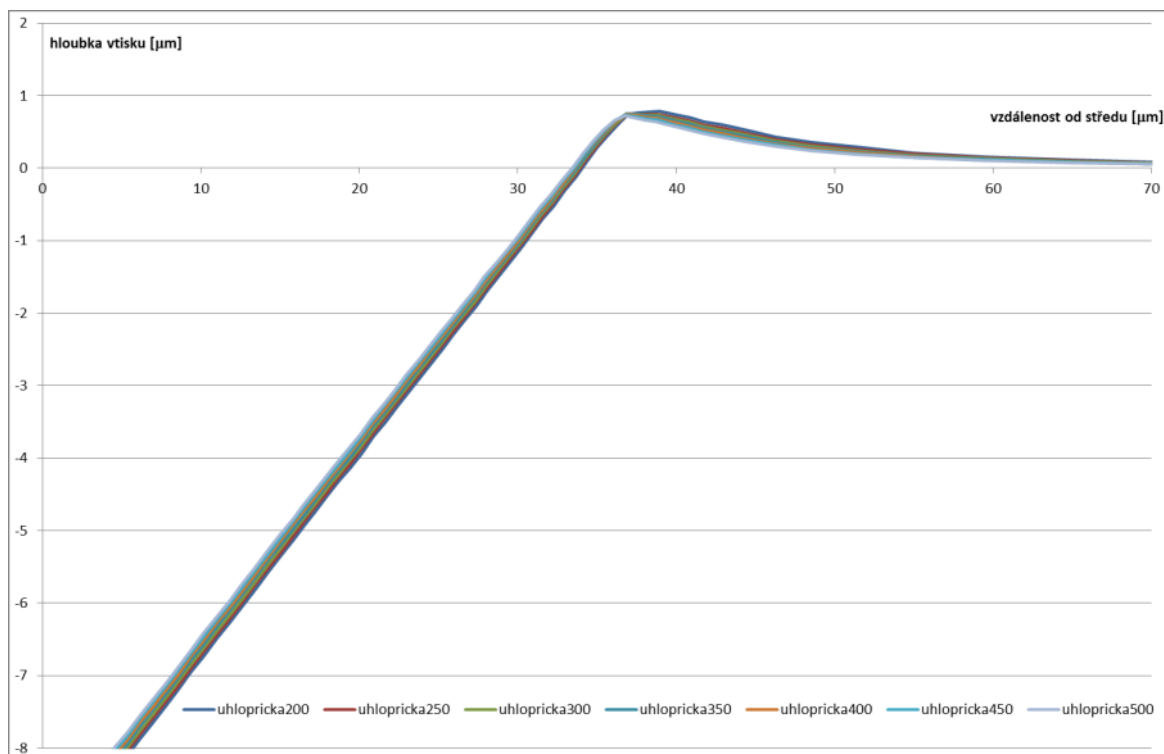
Tab. 6.2.1 – Rozsah hodnot parametrů při citlivostní analýze

	σ_0 [MPa]	R_0 [MPa]	R_∞ [MPa]	b [-]	E [MPa]	f [-]	μ [-]
Rozsah hodnot při citlivostní analýze	200 – 500	100 – 700	100 – 580	10 – 40	150 000 – 250 000	0,01 – 0,3	0,2 – 0,45

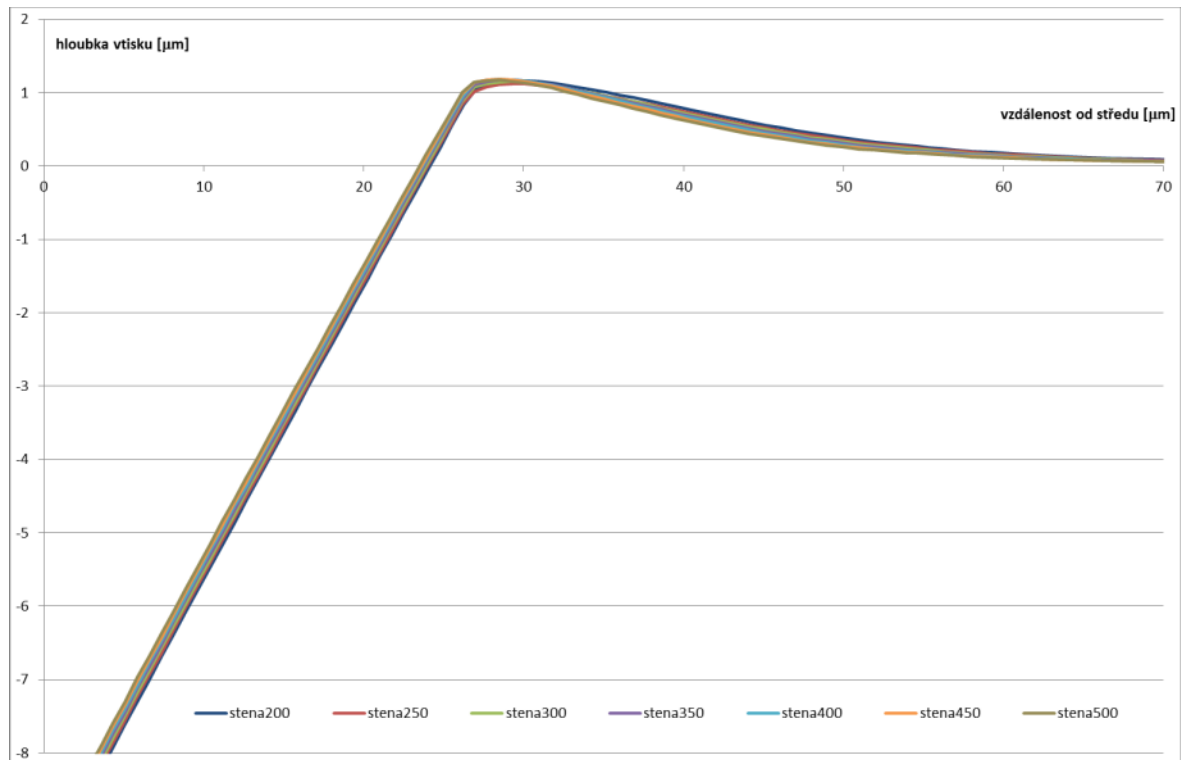
U grafů znázorňujících vliv měnících se parametrů materiálové rovnice na chování indentační křivky je také znázorněna změna tvaru deformačně-napětové křivky při měnícím se příslušném parametru rovnice.



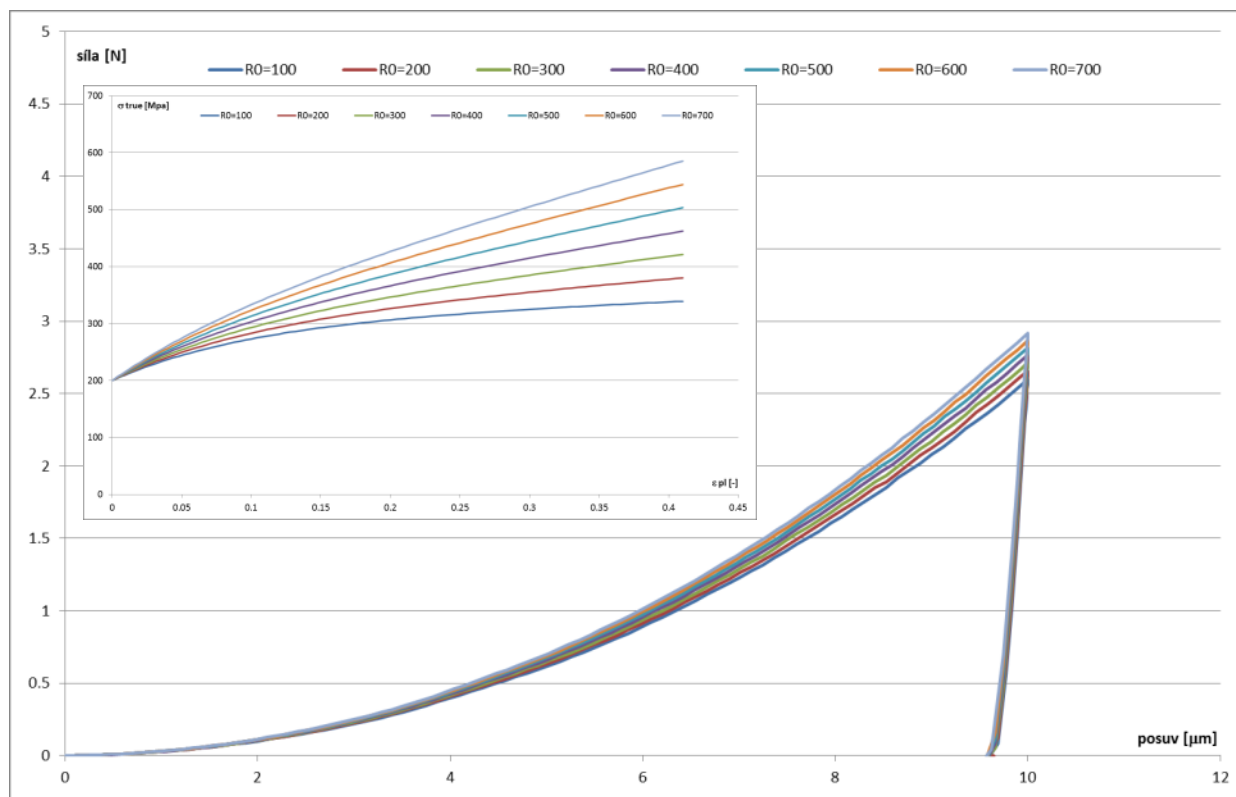
Obr. 6.2.1 - Vliv změny meze úměrnosti (σ_0) na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



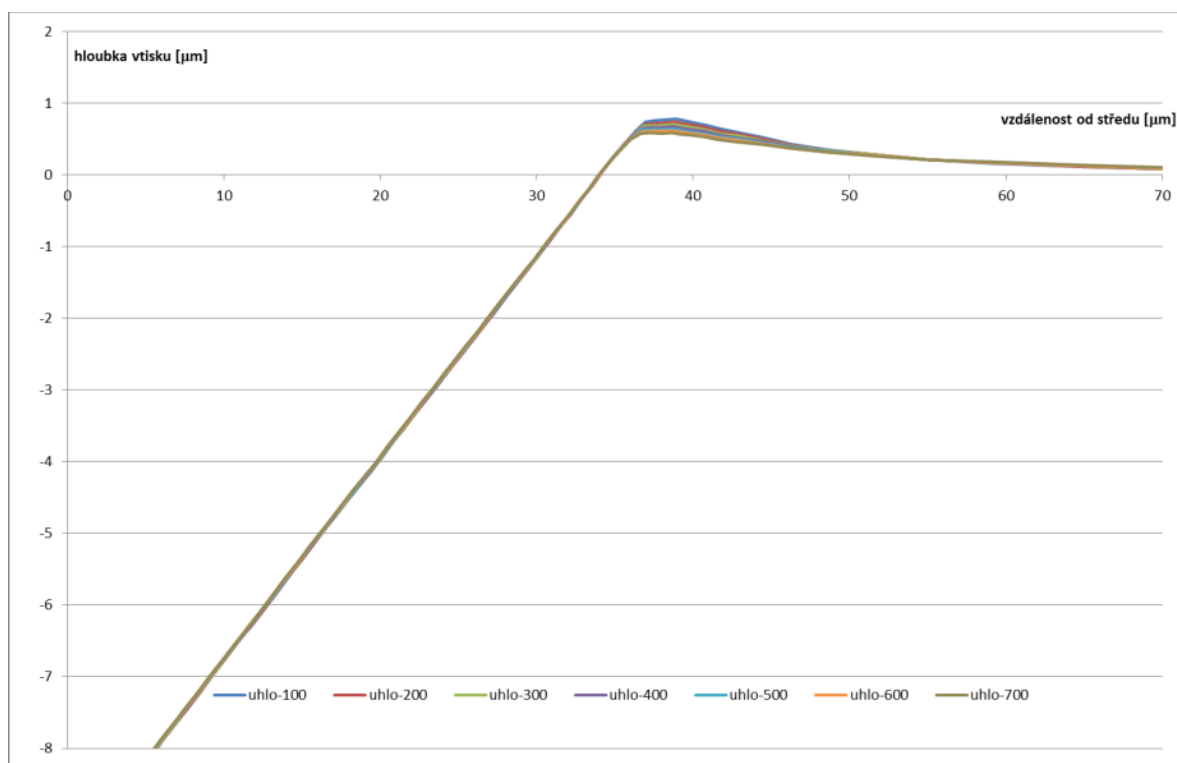
Obr. 6.2.2 - Vliv změny meze úměrnosti (σ_0) na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



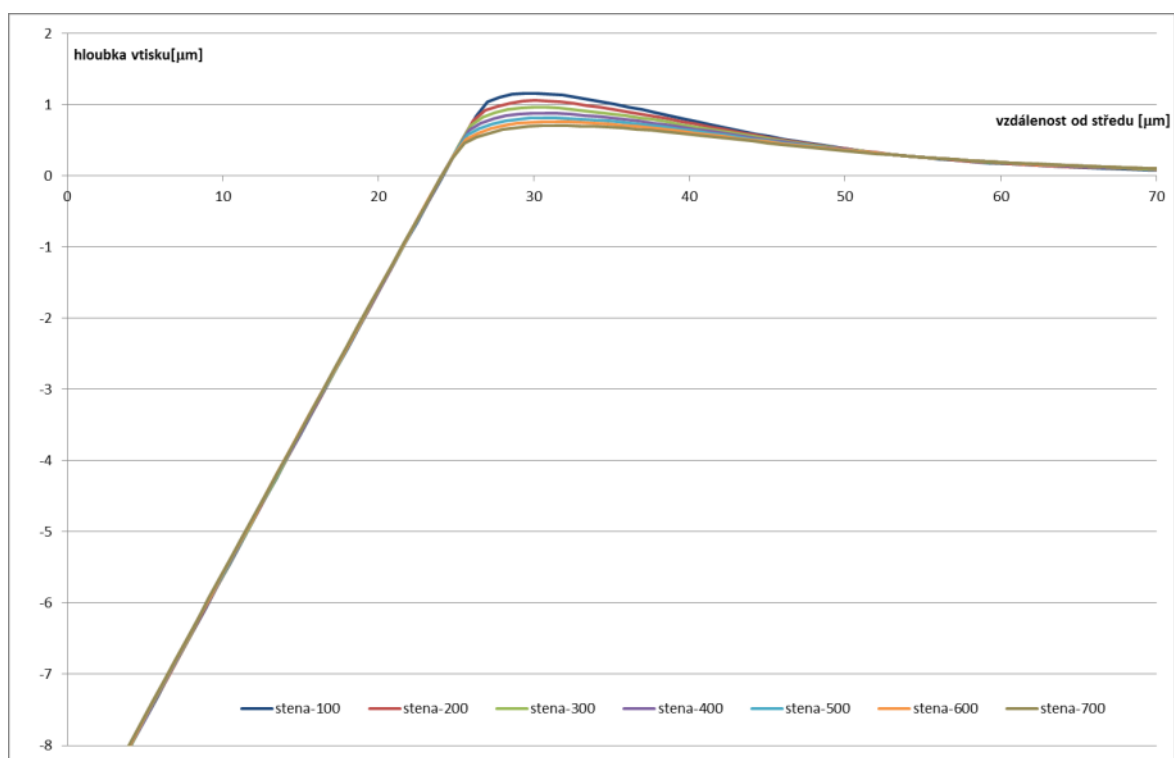
Obr. 6.2.3 - Vliv změny meze úměrnosti (σ_0) na tvar profilu vtisku indenteru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



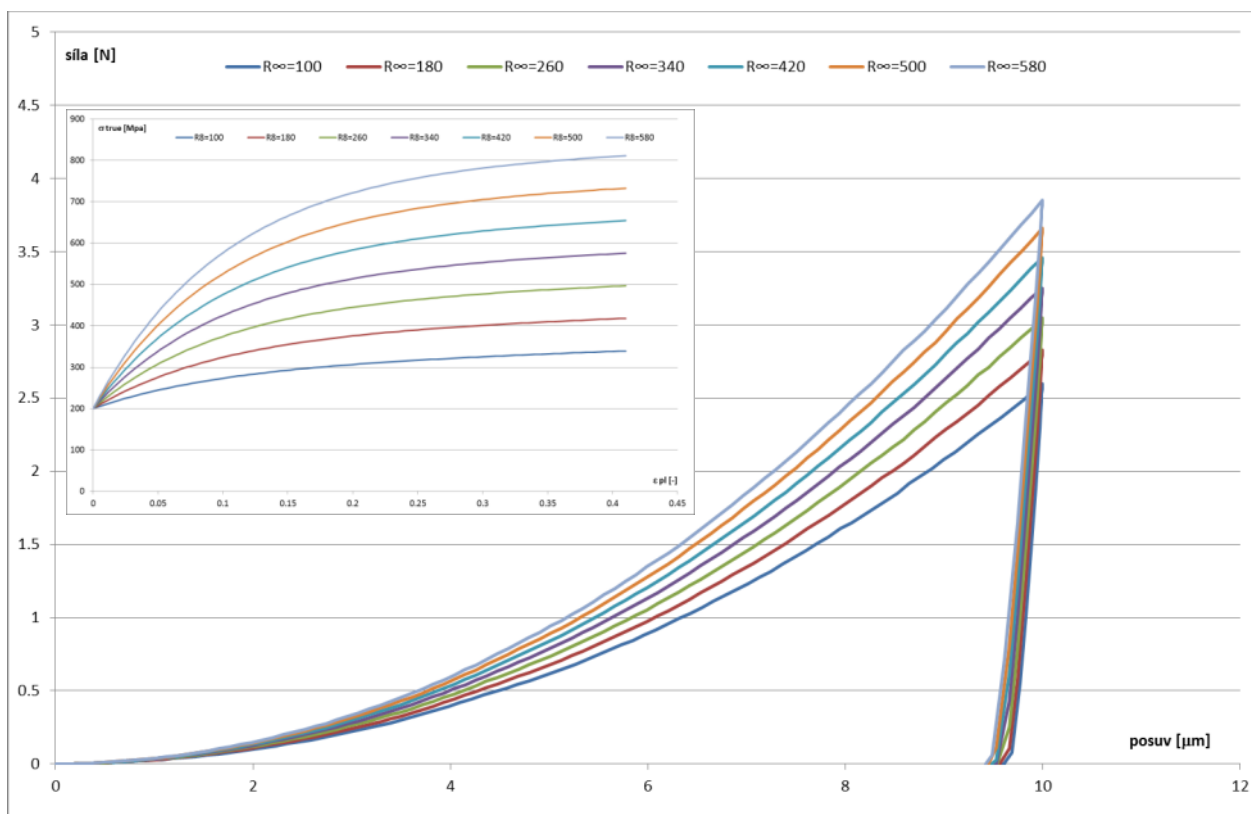
Obr. 6.2.4 - Vliv změny parametru R_0 materiálové rovnice na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



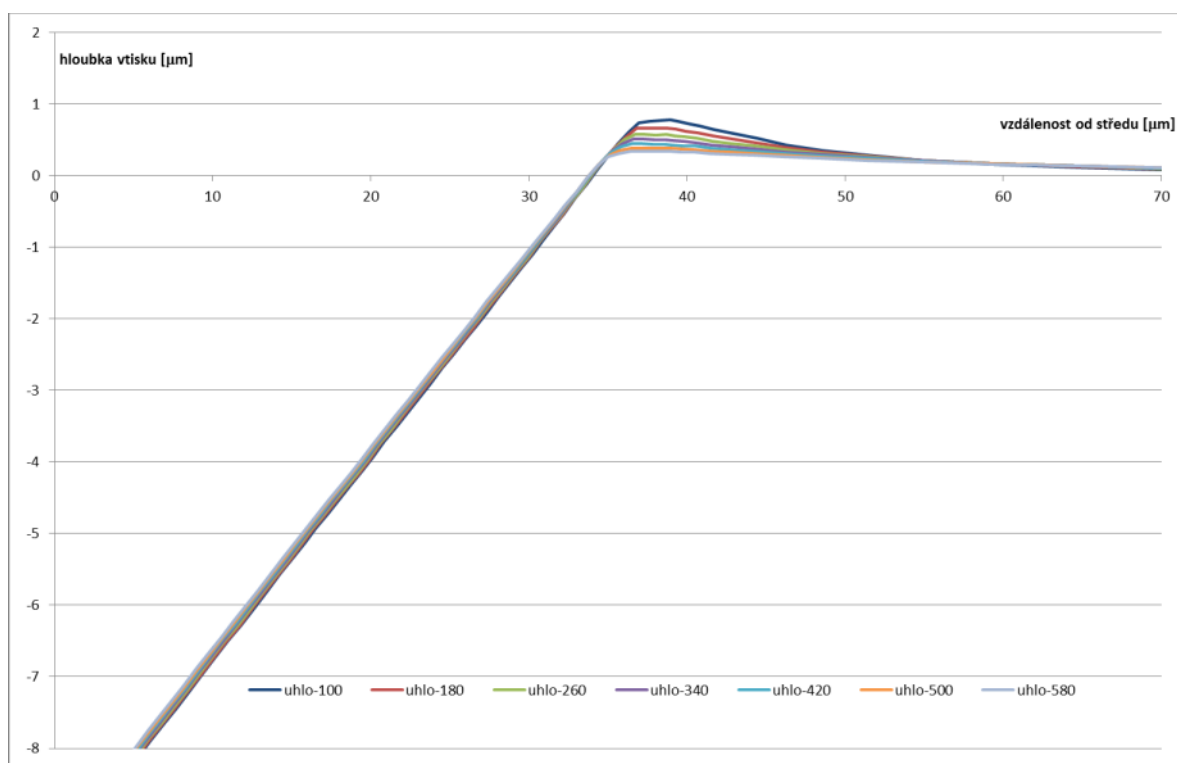
Obr. 6.2.5 - Vliv změny parametru R_0 materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



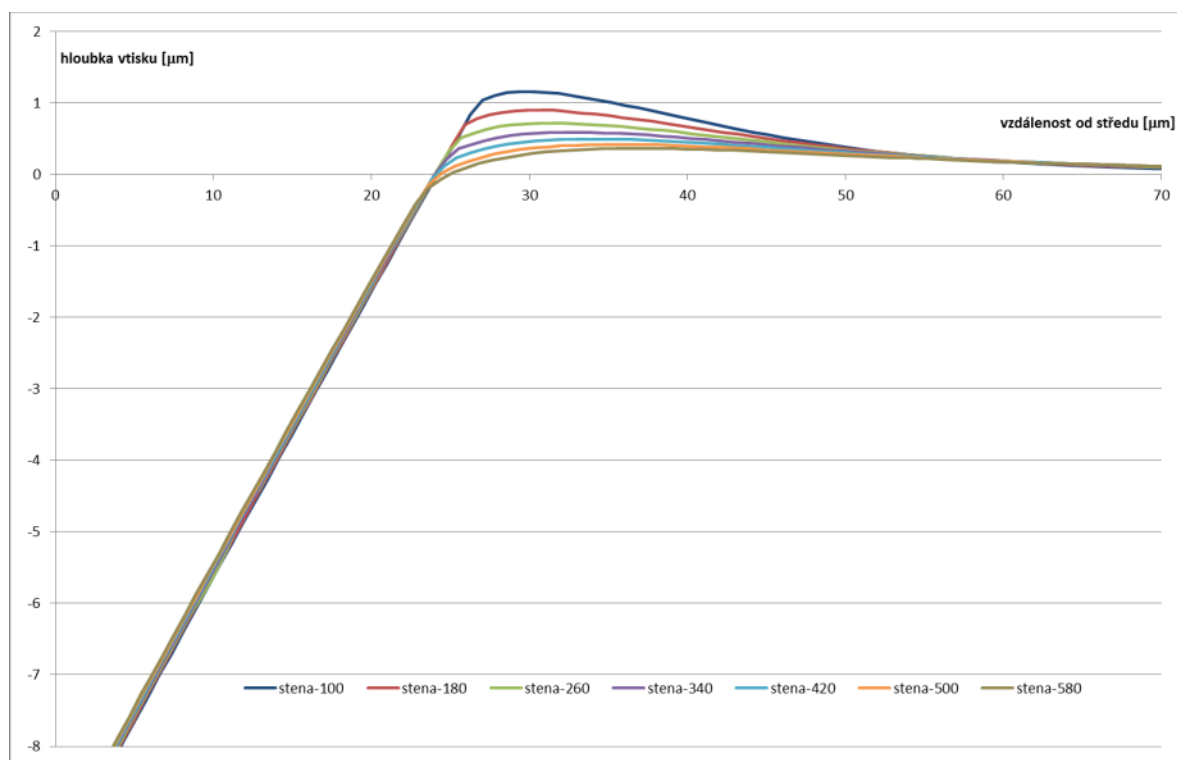
Obr. 6.2.6 - Vliv změny parametru R_0 materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



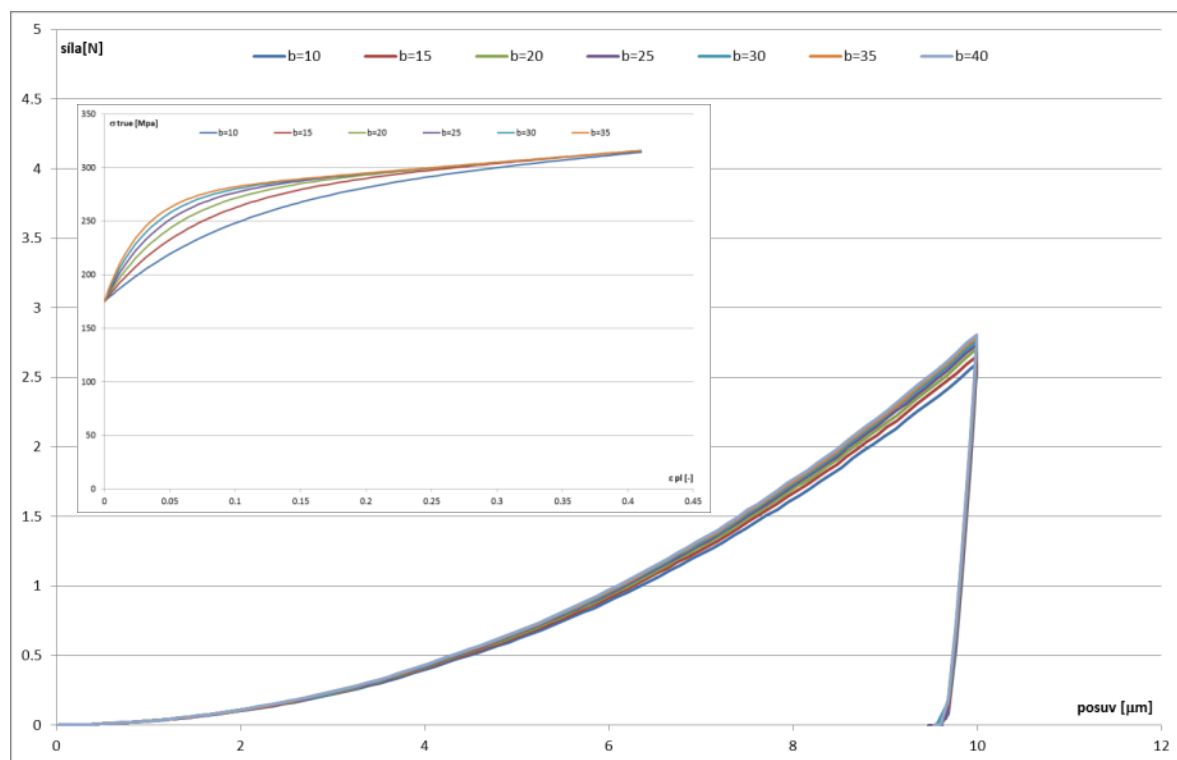
Obr. 6.2.7 - Vliv změny parametru R_∞ materiálové rovnice na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



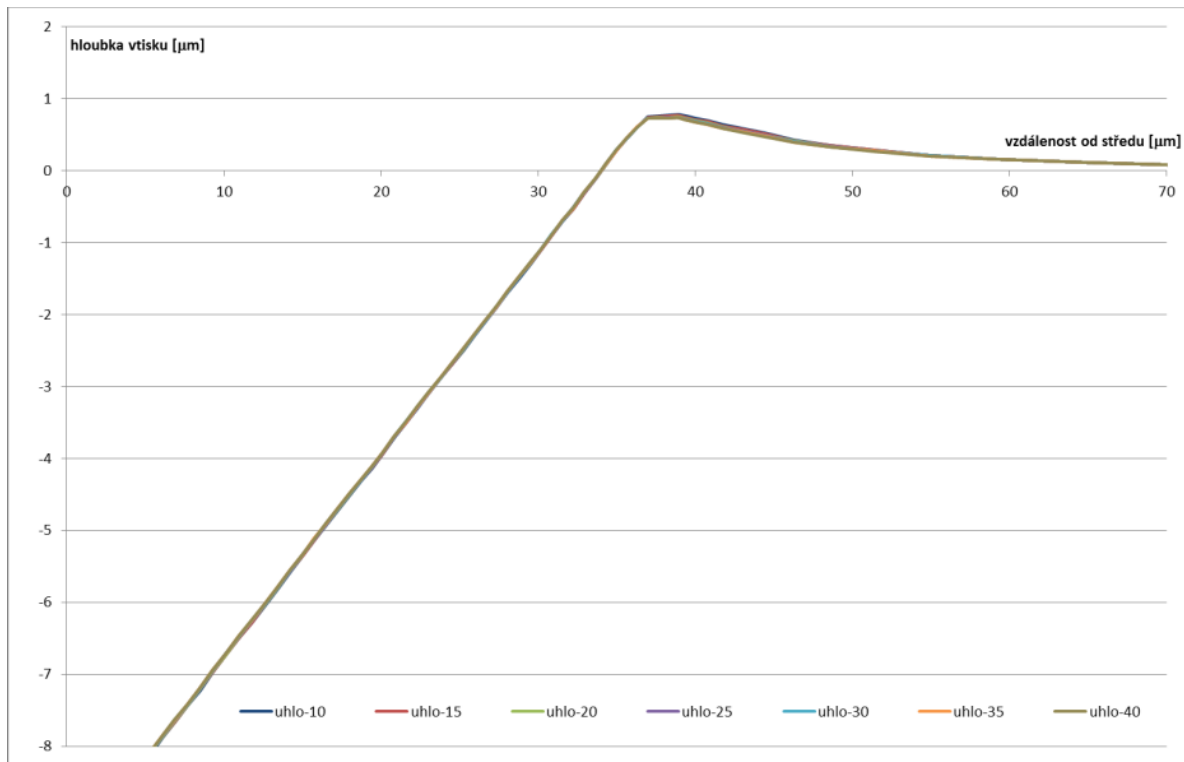
Obr. 6.2.8 - Vliv změny parametru R_∞ materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



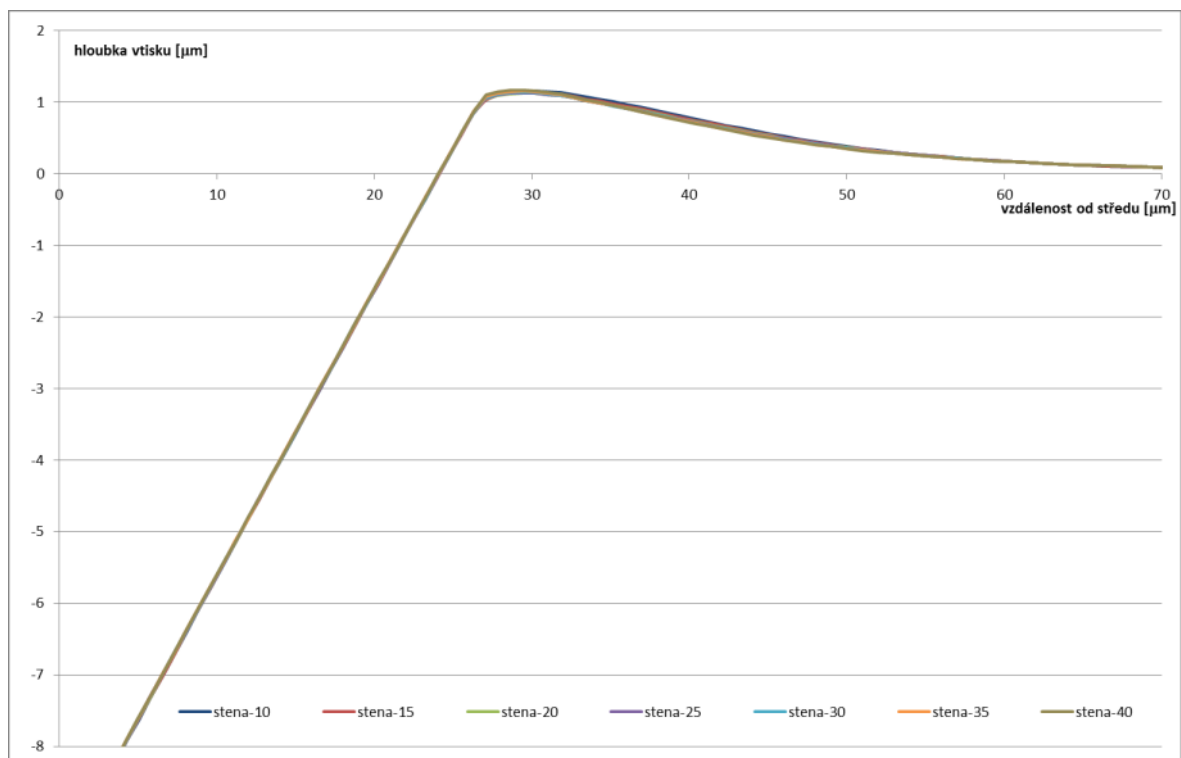
Obr. 6.2.9 - Vliv změny parametru R_∞ materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



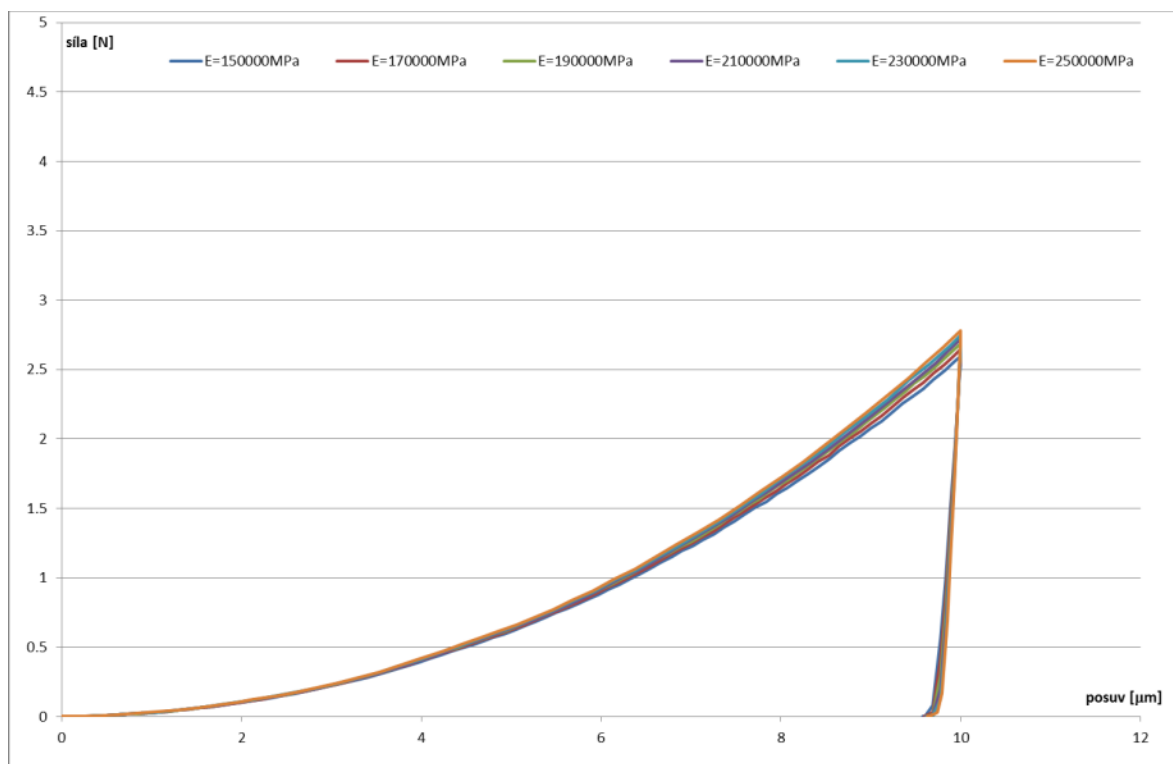
Obr. 6.2.10 - Vliv změny parametru b materiálové rovnice na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



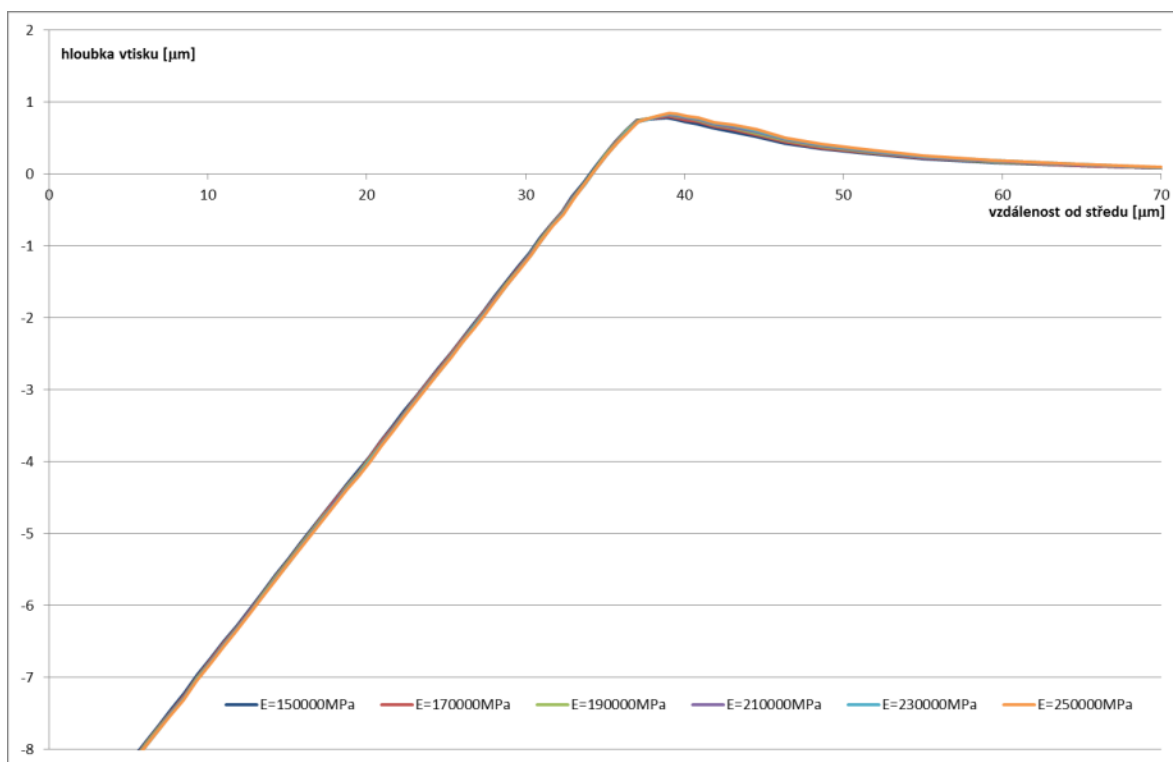
Obr. 6.2.11 - Vliv změny parametru b materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



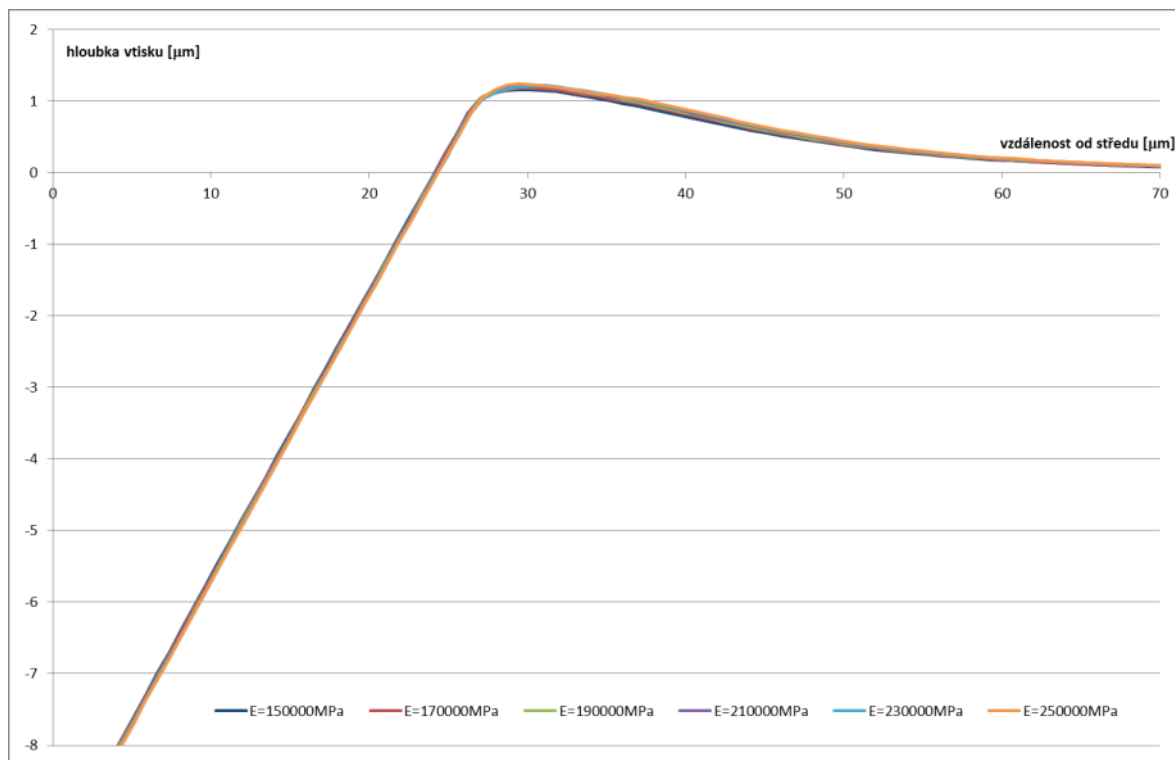
Obr. 6.2.12 - Vliv změny parametru b materiálové rovnice na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



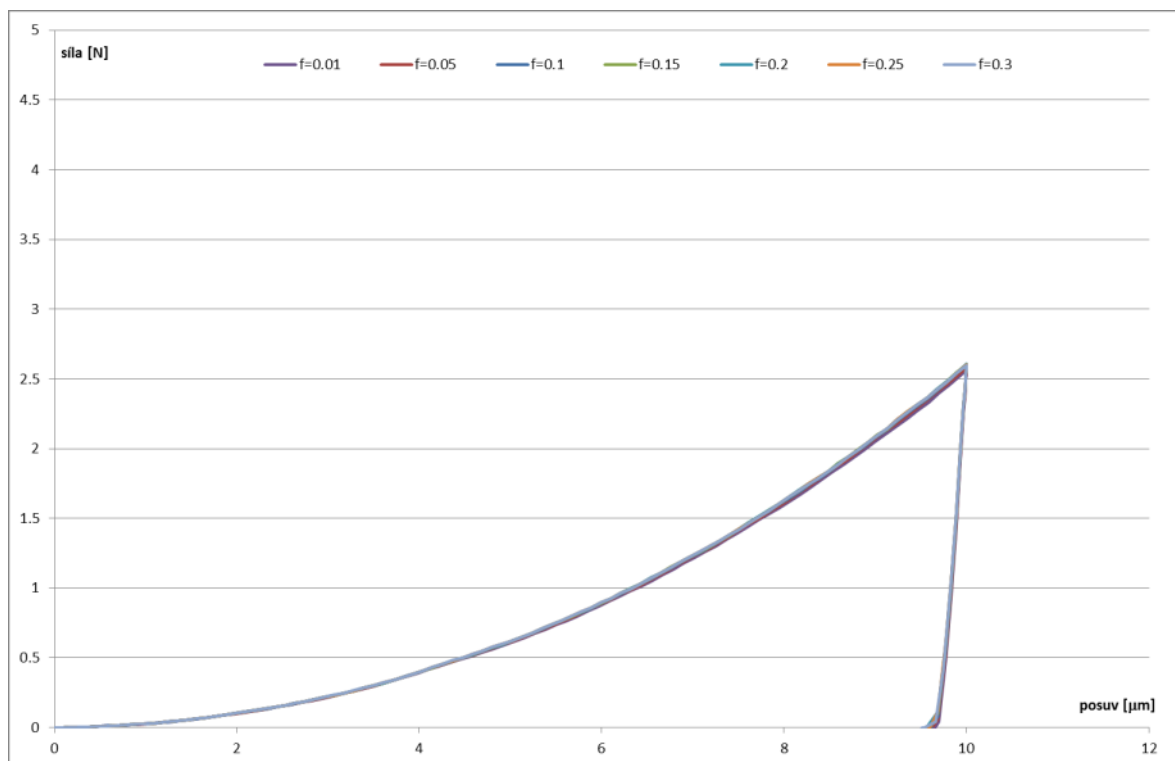
Obr. 6.2.13 - Vliv změny hodnoty Youngova modulu pružnosti na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



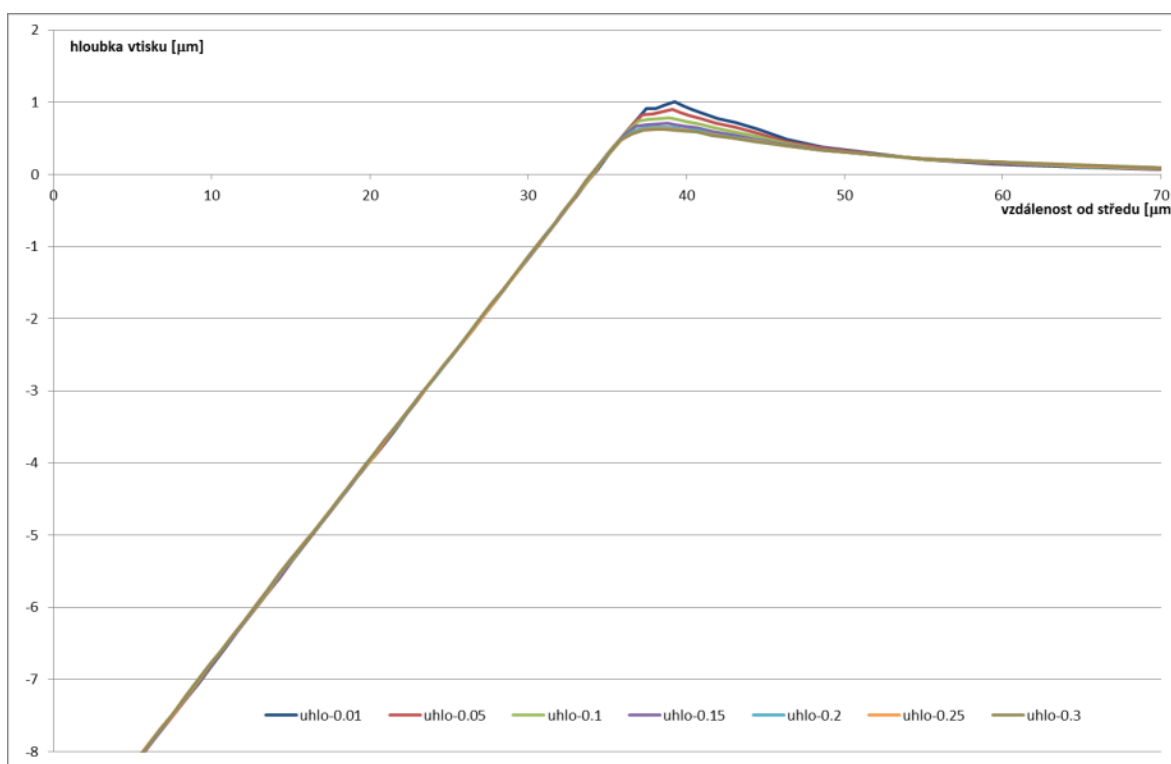
Obr. 6.2.14 - Vliv změny hodnoty Youngova modulu pružnosti na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



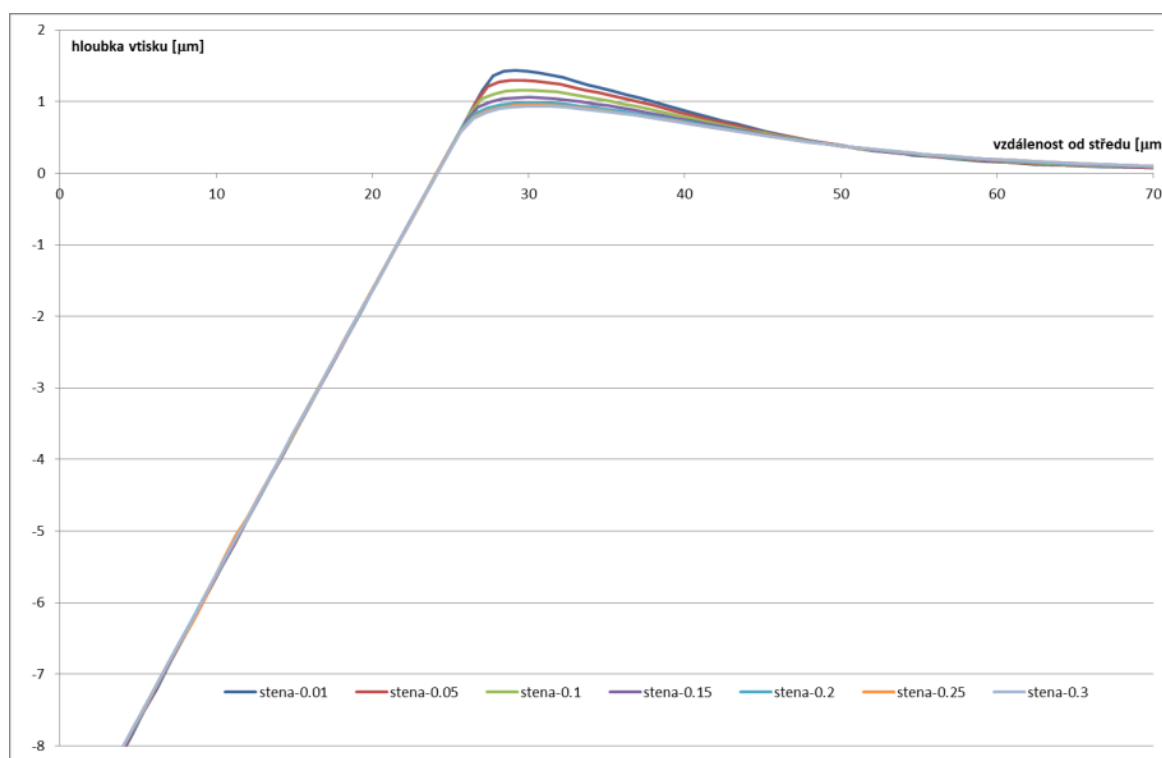
Obr. 6.2.15 - Vliv změny hodnoty Youngova modulu pružnosti na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



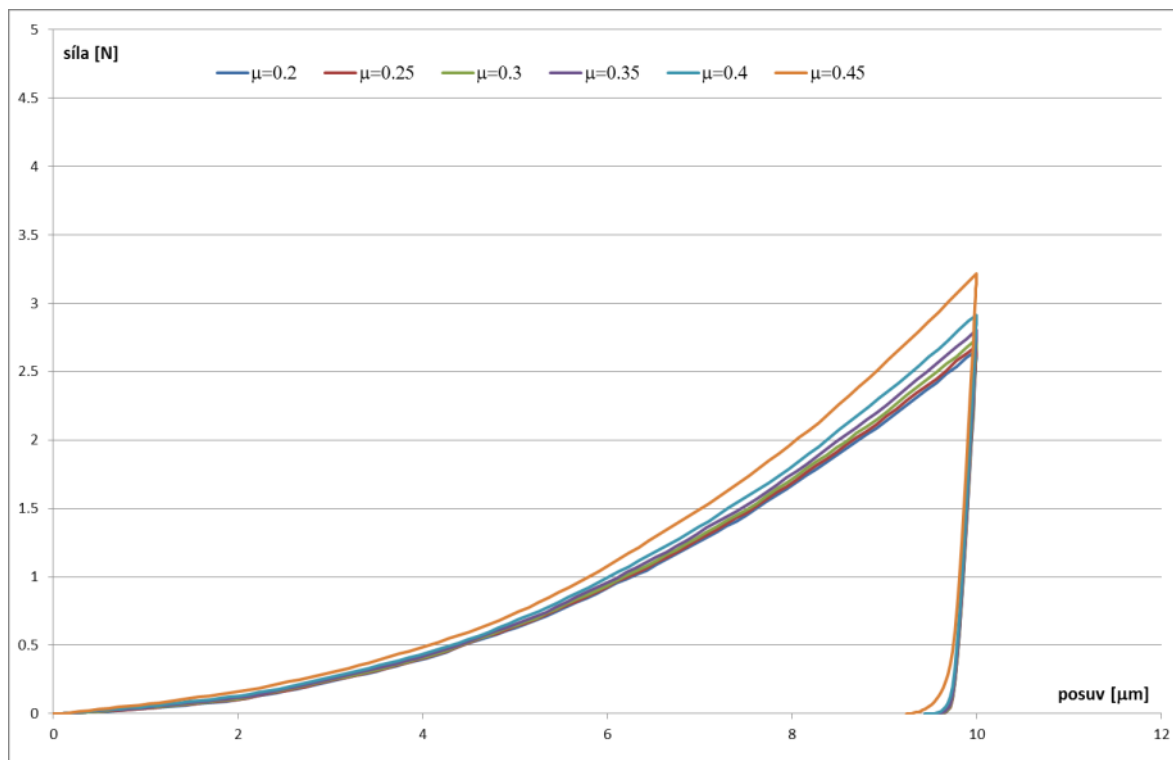
Obr. 6.2.16 - Vliv změny hodnoty součinitele smykového tření mezi indentorem a měřeným vzorkem na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



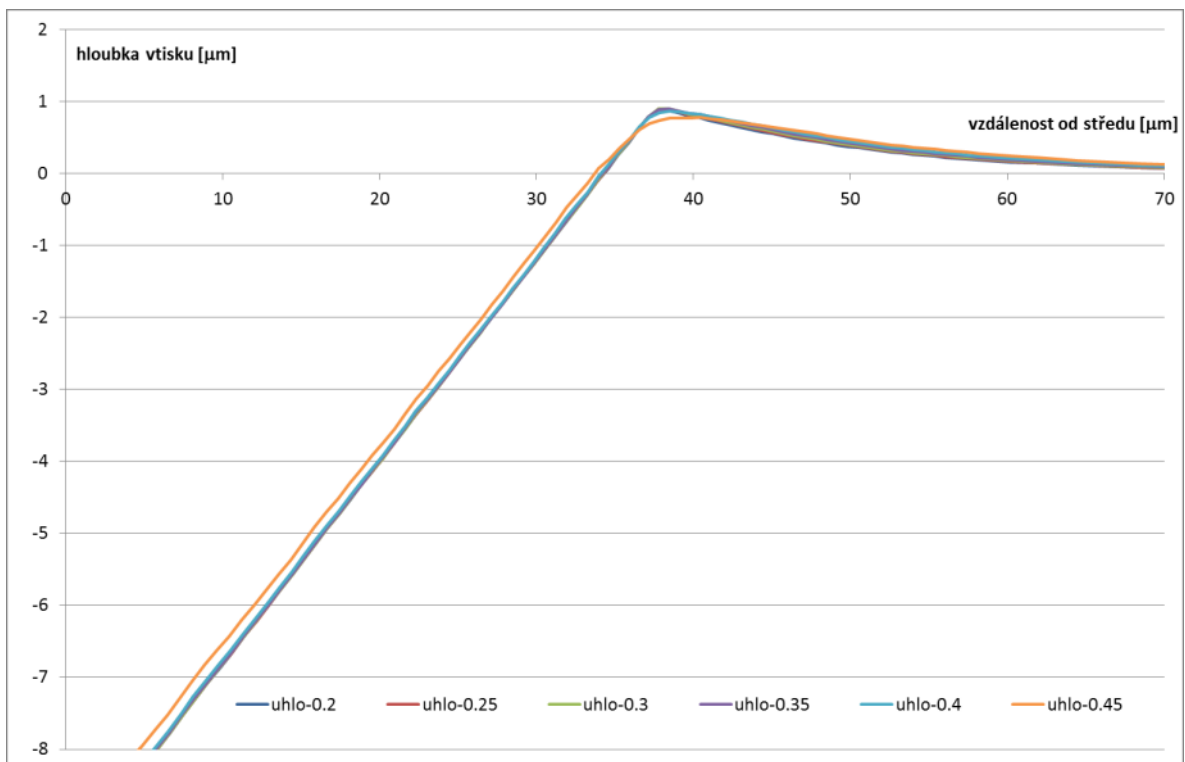
Obr. 6.2.17 - Vliv změny hodnoty součinitele smykového tření mezi indentorem a měřeným vzorkem na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



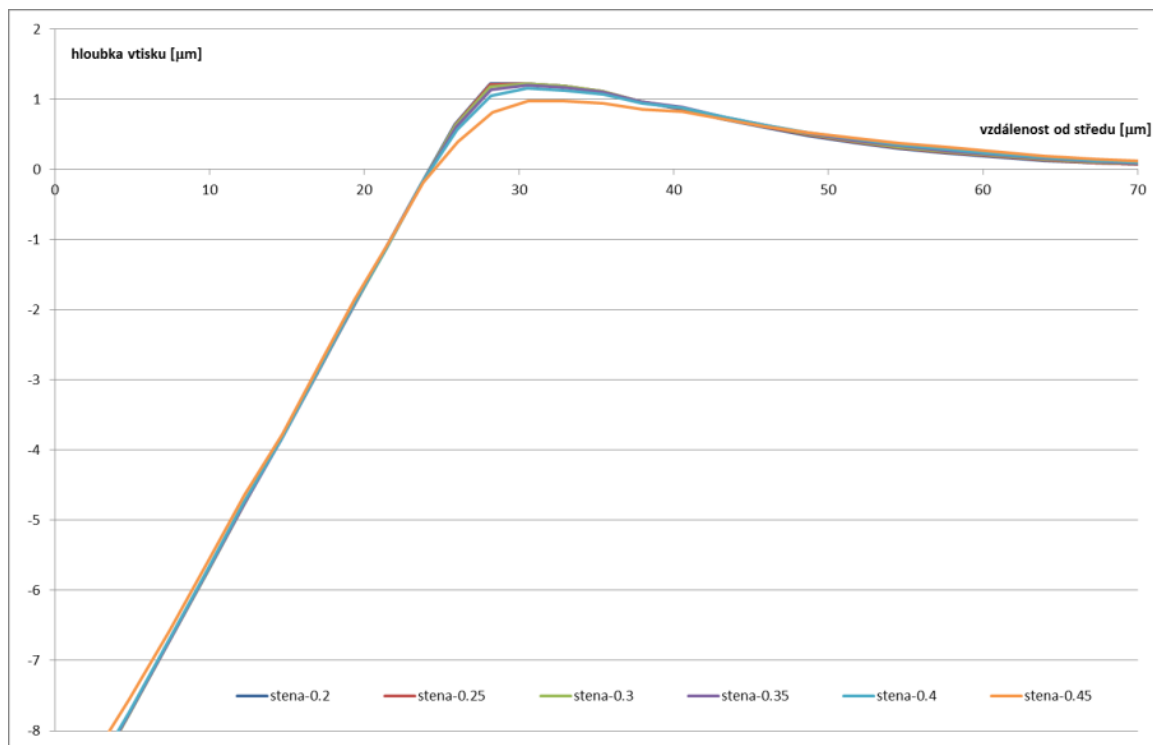
Obr. 6.2.18 - Vliv změny hodnoty součinitele smykového tření mezi indentorem a měřeným vzorkem na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



Obr. 6.2.19 - Vliv změny poissonova čísla měřeného vzorku na tvar indentační křivky při maximální hloubce vtisku 10 μm



Obr. 6.2.20 - Vliv změny poissonova čísla měřeného vzorku na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes uhlopříčku jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm



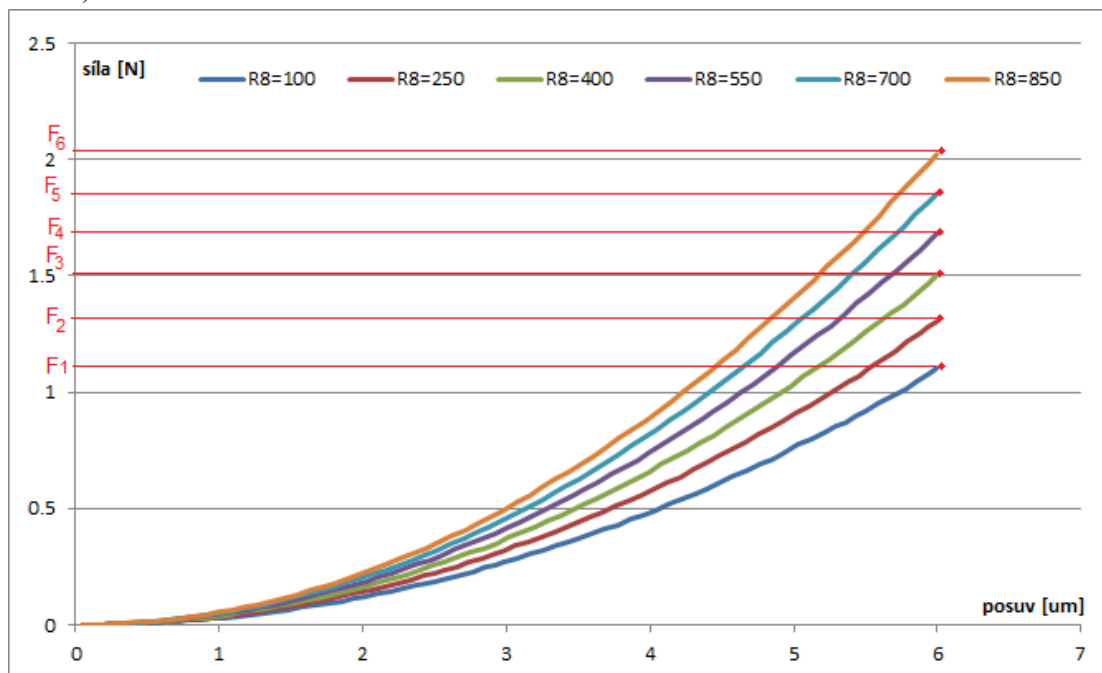
Obr. 6.2.21 - Vliv změny poissonova čísla měřeného vzorku na tvar profilu vtisku indentoru vedený přes stěnu jehlanu ve vzorku po odlehčení při maximální hloubce vtisku 10 μm

Z výsledků citlivostních analýz je vidět, že všechny analyzované materiálové parametry mají určitý vliv na tvary indentační křivky a tvary křivek profilu vtisku. Pro správné nastavení materiálových parametrů numerického modelu jsou důležité výsledky analýzy vlivu Poissonova čísla měřeného vzorku a součinitele smykového tření. Změna Poissonova čísla měřeného vzorku nemá podstatný vliv na tvar indentační křivky (obr. 6.2.19) ani na tvar křivek profilu vtisku, zejména pak pro rozmezí hodnot Poissonova čísla pro ocele (obr. 6.2.20 a obr. 6.2.21). Z výsledků citlivostní analýzy na součinitel smykového tření vyplývá, že jeho změna nemá vliv na tvar indentační křivky (obr. 6.2.16). Pro hodnoty nižší než $f = 0,1$ je u křivek profilu vtisku výraznější pile-up efekt, pro vyšší hodnoty součinitele tření má změna součinitele již menší vliv na tvar křivek profilu vtisku.

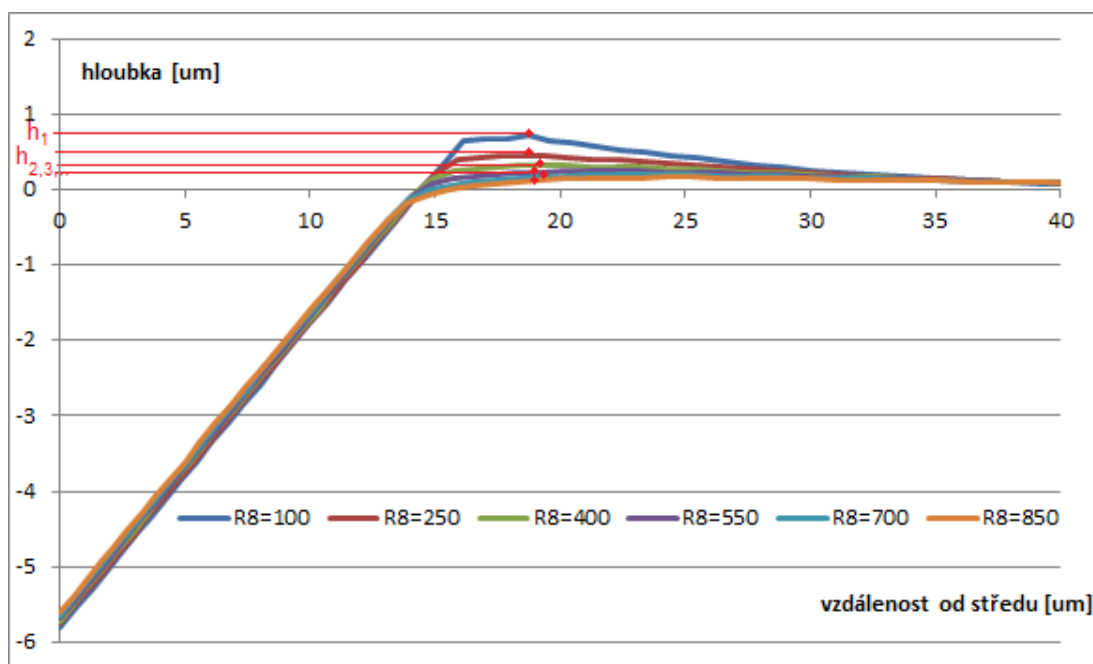
Citlivostní analýza na Youngův modul pružnosti ukazuje, že změna tohoto parametru nemá výrazný vliv na vyhodnocované a porovnávané křivky. Nejpodstatnějším vlivem modulu pružnosti je jeho vliv na sklon odlehčovací indentační křivky. Čím je hodnota modulu pružnosti větší, tím je počáteční odklon odlehčovací indentační křivky od svislé osy menší. Díky tomuto sklonu je v této metodice (práci) určován Youngův modul pružnosti.

Z analýz na změnu parametrů materiálové rovnice vyplývá, že největší vliv na změnu tvaru indentační křivky má parametr mez úměrnosti. Naopak na tvary křivek profilu vtisku tento parametr nemá výrazný vliv oproti parametrům R_0 a R_∞ . Poslední parametr b nemá při dříve specifikovaném základním nastavení ostatních parametrů výrazný vliv ani na tvar indentační křivky ani na křivky profilu vtisku. Záměrně je zde zdůrazněno, že parametr nemá výrazný vliv na tvary křivek při daném nastavení ostatních parametrů materiálové rovnice, protože předešlé grafy znázorňují závislost změny tvarů posuzovaných křivek při změně právě jednoho parametru. Při současné změně více parametrů materiálové rovnice je jejich vliv totiž rozdílný na tvary posuzovaných křivek. Proto je v následujících grafech (obr. 6.2.24 – obr. 6.2.29) znázorněna závislost změny právě dvou parametrů materiálové

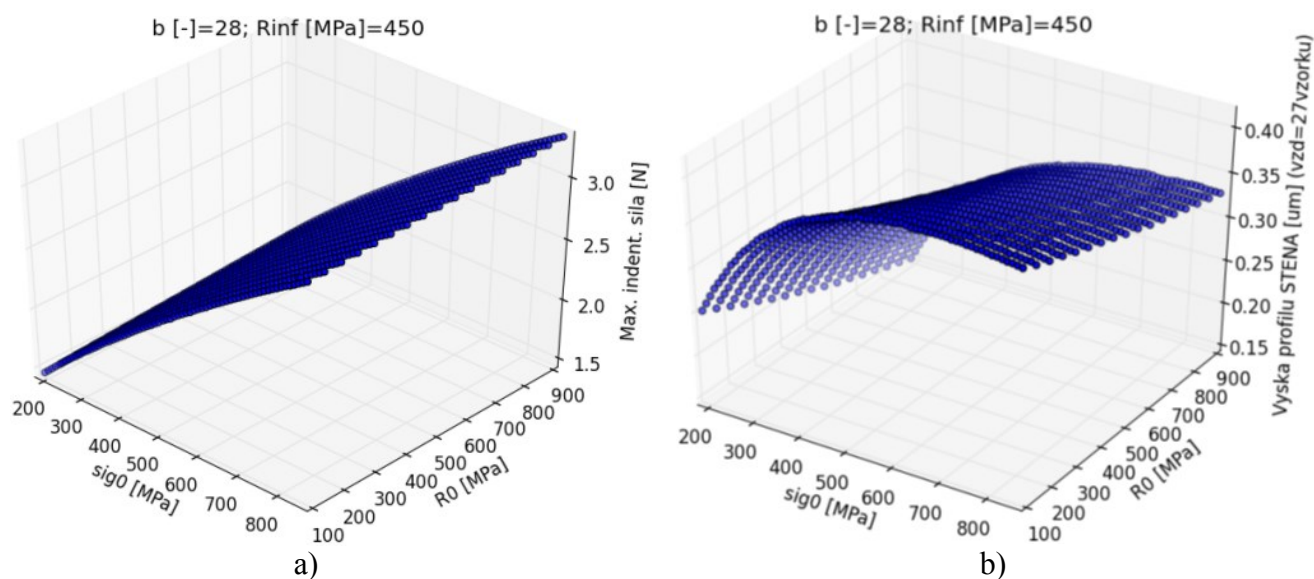
rovnice při daném nastavení ostatních dvou parametrů. Jsou zde vykresleny grafy pro všechny kombinace měnících se parametrů materiálové rovnice. Tato analýza je vyhodnocena na základě vytvořené databáze v metodice porovnávání křivek (indentační křivka a křivky profilu) pro maximální hloubku vtisku 6 μm . Databáze je vytvořena pro vyhodnocení materiálových charakteristik metodou „online“. Při analýze je posuzován vliv změny kombinací dvou parametrů materiálové rovnice na změně hodnoty maximálního zatížení při maximální hloubce vtisku 6 μm (obr. 6.2.22) nebo na změně maximální výšky povrchu měřeného vzorku po odlehčení - pile-up efekt (obr. 6.2.23).



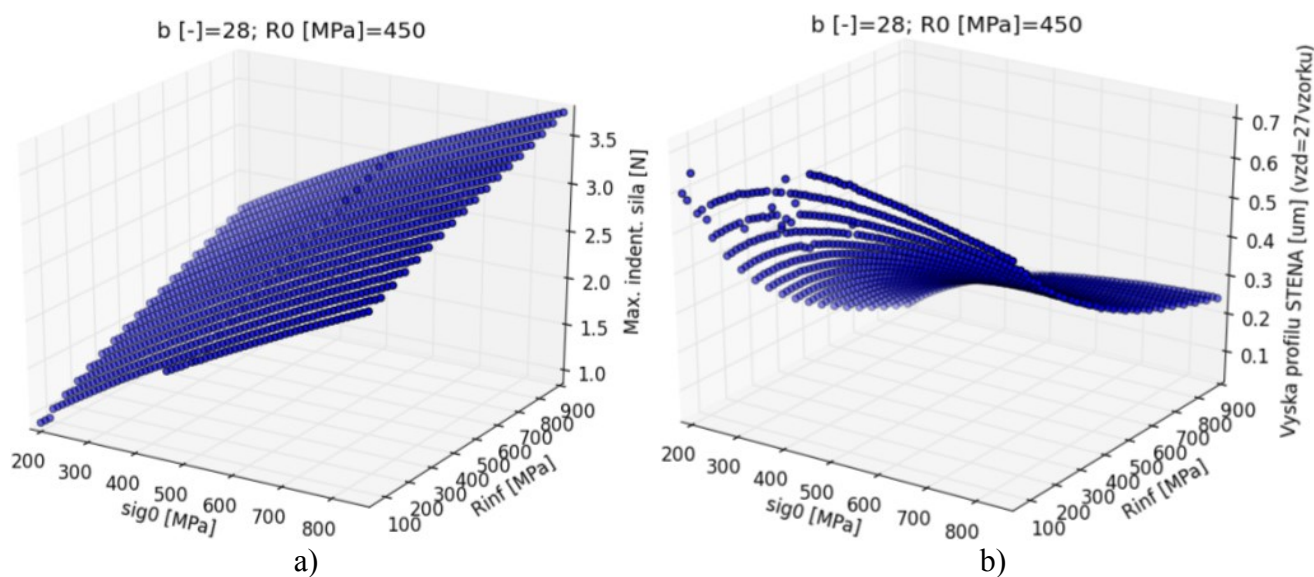
Obr. 6.2.22 - Citlivostní analýza na 1 parametr (R_∞) z Voceho rovnice se znázorněnými vyhodnocovanými parametry - hodnota síly při maximální hodnotě vtisku 6 μm



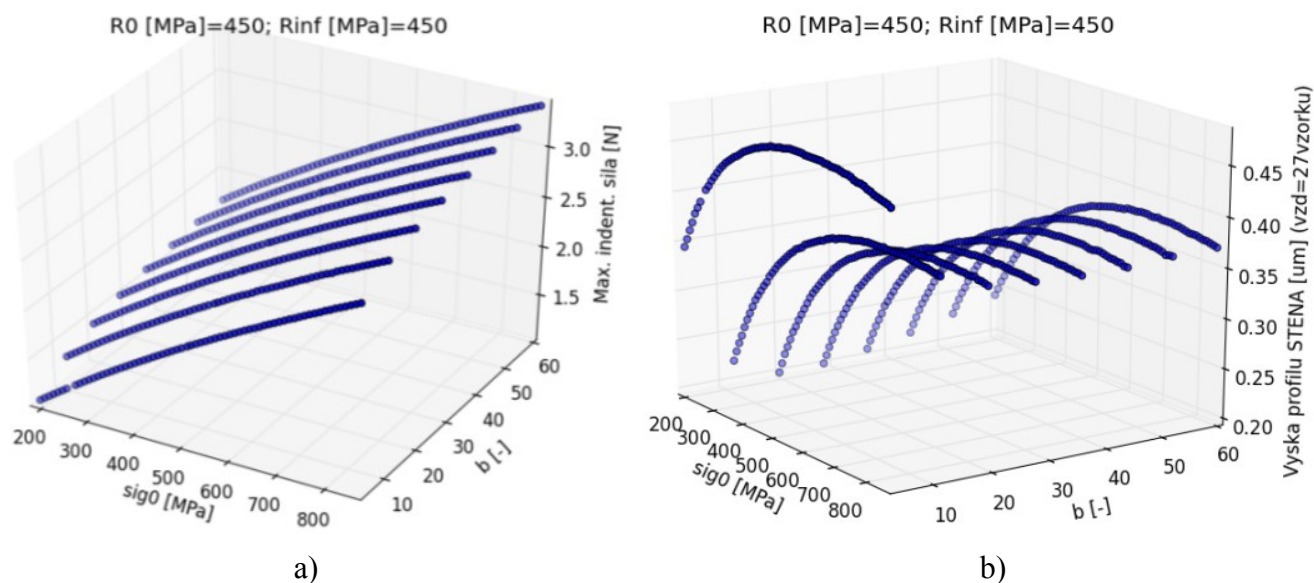
Obr. 6.2.23 - Citlivostní analýza na 1 parametr (R_∞) z Voceho rovnice se znázorněnými vyhodnocovanými parametry - hodnota výšky „pile-up“ efektu



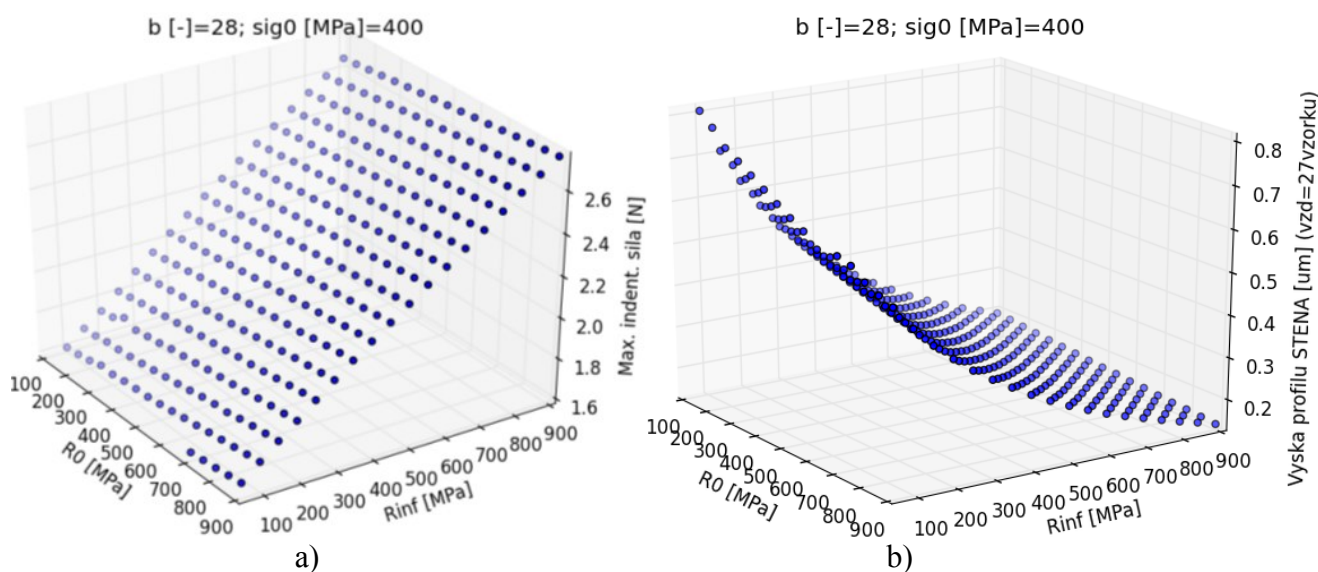
Obr. 6.2.24 – Závislost měnících se parametrů σ_0 a R_0 z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení
b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení



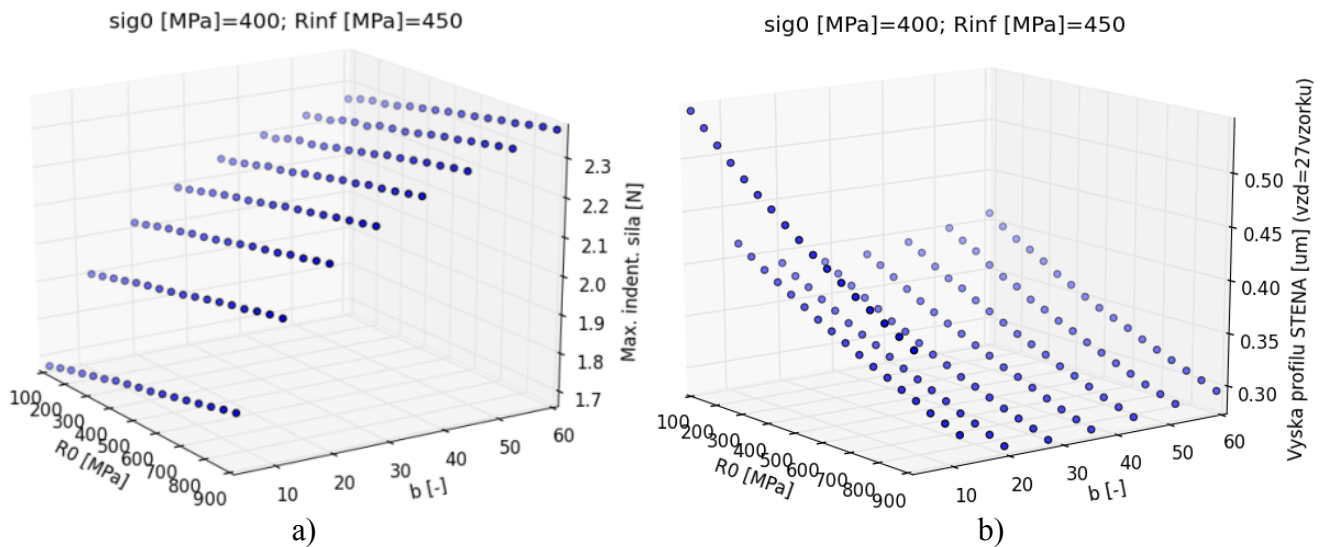
Obr. 6.2.25 – Závislost měnících se parametrů σ_0 a R_0 z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení
b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení



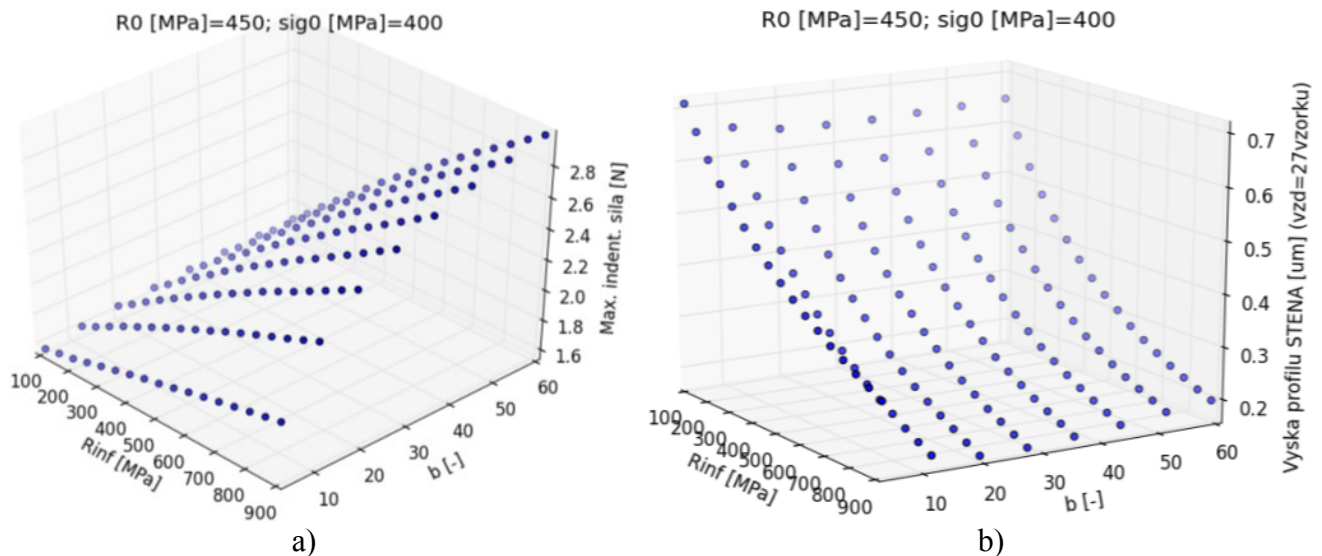
Obr. 6.2.26 – Závislost měnících se parametrů σ_0 a b z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení



Obr. 6.2.27 – Závislost měnících se parametrů R_0 a R_{inf} z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení



Obr. 6.2.28 – Závislost měnících se parametrů R_0 a b z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení
b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení



Obr. 6.2.29 – Závislost měnících se parametrů R_{∞} a b z Voceho rovnice při maximální hloubce vtisku 6 μm a) na hodnotě maximálního zatížení
b) na maximální výšce povrchu měřeného vzorku po odlehčení

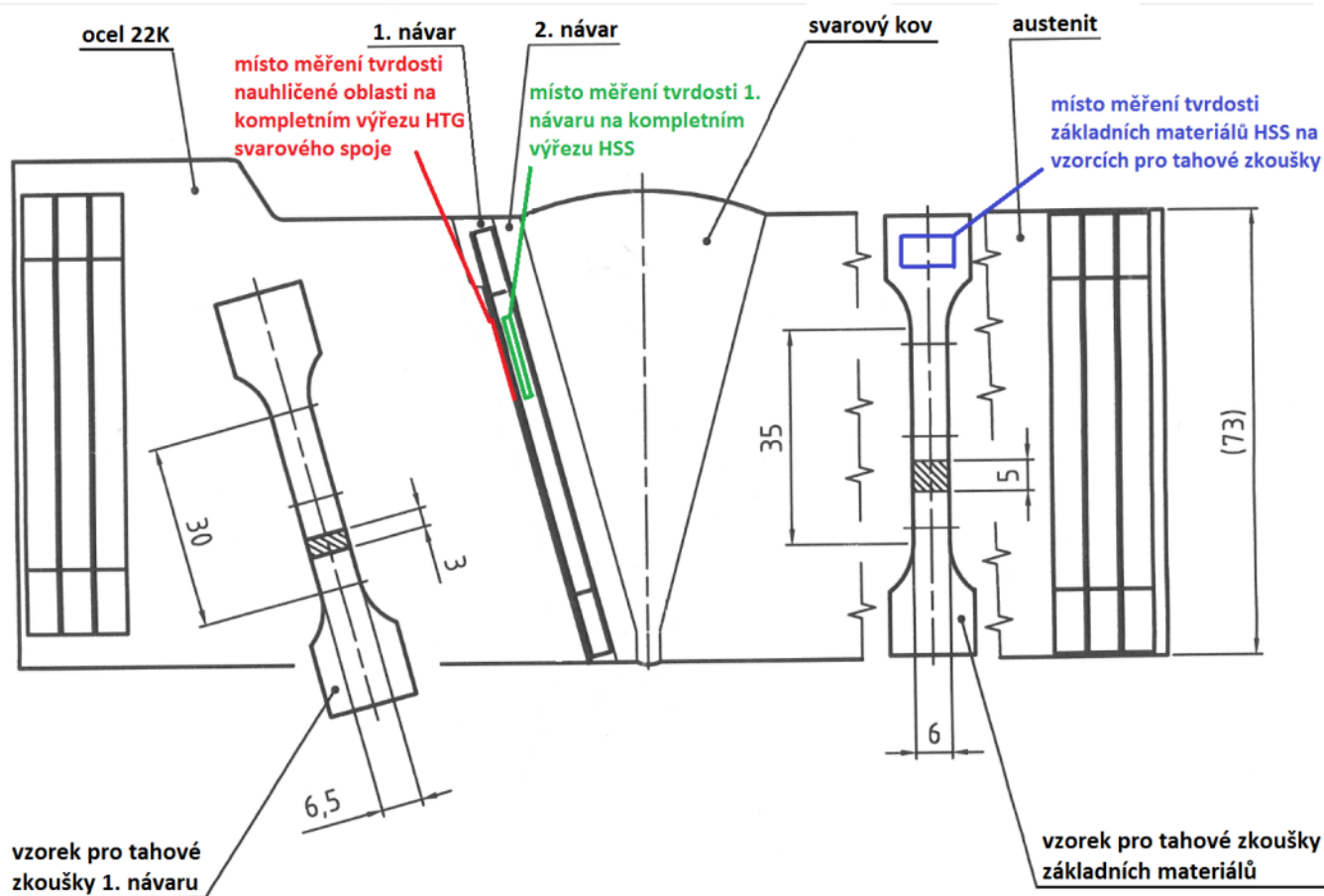
Na základě provedených analýz lze konstatovat, že ne vždy při změně jednoho parametru materiálové rovnice lze zcela přesně určit chování posuzovaných křivek. Vždy záleží na celé kombinaci materiálových parametrů. Proto jako metoda ladění modelu materiálu nebyla použita gradientní metoda postupnou iterací. Tímto přístupem by mohlo dojít pouze k lokálnímu řešení. Výsledkem ladění by nemusela být ta nejvýhodnější kombinace materiálových parametrů ze všech možností, ale pouze z malého intervalu parametrů. Proto je použit při ladění modelu materiálu program OptiSLang a je zvolena metoda “online“. Tyto postupy budou blíže popsány v dalších kapitolách.

6.3. Experimentální měření

Experimentální měření bylo prováděno v podobě tahové zkoušky k ověření výsledků vyvíjené metodiky. Dalšími a hlavními experimentálními měřeními byla měření instrumentované tvrdosti a související měření povrchu vtisku. Všechna experimentální měření v rámci disertační práce probíhala na Ústavu fyziky materiálů, AV ČR.

6.3.1. Tahové zkoušky

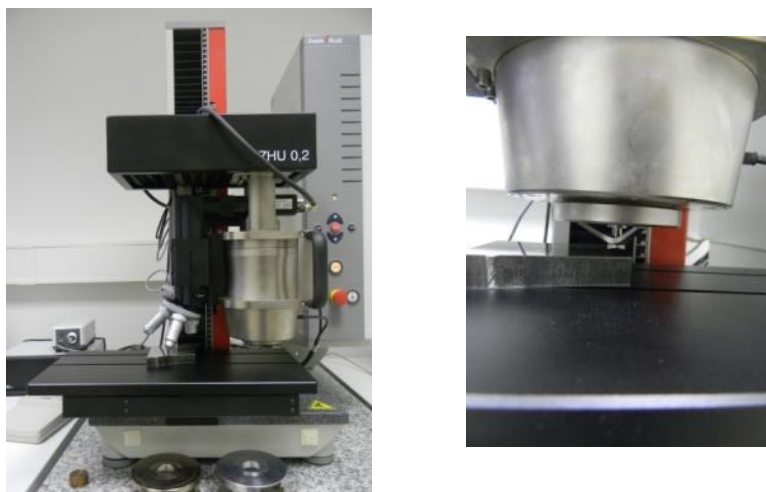
Tahové zkoušky byly prováděny na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z50, vybaveným externím extenzometrem Zwick Multisens. Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušebním tělesem u testovaných homogenních ocelí byly tyče kruhového průřezu o počátečním průměru $d_0 = 6$ mm a počáteční měřené délce $L_0 = 30$ mm se závitovým upnutím do stroje. Zkušební vzorky z heterogenního svarového spoje pro tahové zkoušky byly plochého průřezu (viz obr. 6.3.1). Vzorky ze základních materiálů (22K a austenitická ocel) byly o počátečním měřeném průřezu 6×5 mm a měřené počáteční délce $L_0 = 30$ mm. Vzorek pro tahovou zkoušku 1. návaru HTG svarového spoje byl o počátečním průřezu $6,5 \times 3$ mm a počáteční měřené délce $L_0 = 30$ mm. Tahové zkoušky probíhaly za pokojové teploty. Rychlost zatěžování byla vždy definována posuvem 2 mm za minutu. Pro kontrolní výslednou deformačně-napěťovou křivku základních materiálů HTG svarového spoje byly provedeny 2 tahové zkoušky. Pro ověřující deformačně-napěťovou křivku návaru byla provedena pouze 1 tahová zkouška.



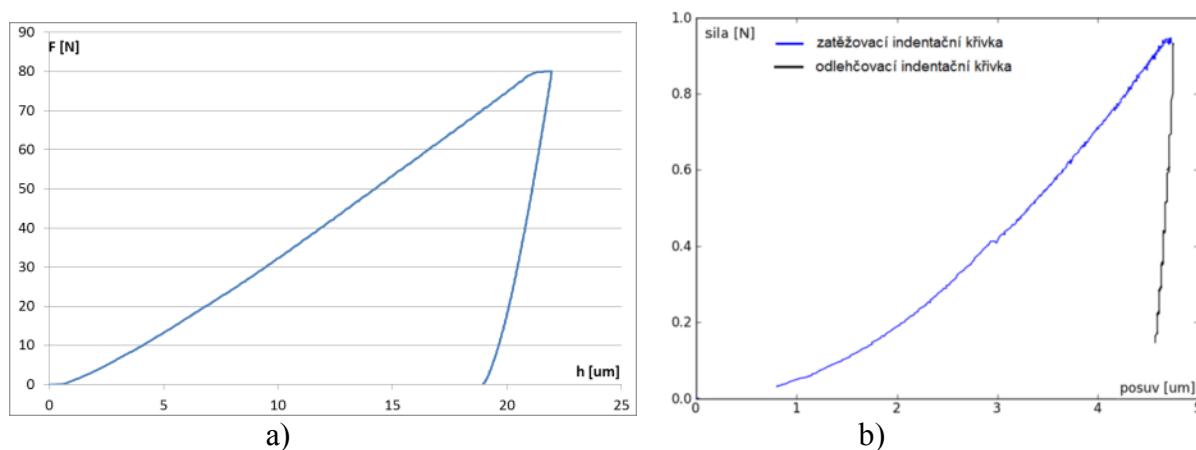
Obr. 6.3.1 – Vyznačená místa měření tvrdosti a odebraných vzorků k experimentální tahové zkoušce na heterogenním svarovém spoji

6.3.2. Zkoušky tvrdosti

Instrumentovaná tvrdost ocelí byla měřena na instrumentovaném tvrdoměru Zwick/Roell Z2,5 opatřeném tvrdoměrnou hlavou ZHU0,2 a optickým měřicím mikroskopem. Jako indenter byl použit hrot Vickers s diamantovým jehlanem o vrcholovém úhlu 136° (obr. 6.3.2). Zatížení bylo definováno vždy podle potřeby zkoušení (HV0,1 – HV0,3). Zatěžovací cyklus byl nejprve prováděn v souladu s ČSN EN ISO 6507 a ČSN EN ISO 14577, tj. rychlost zatěžování a odtěžování byla zvolena tak, aby plné zatížení bylo dosaženo, resp. zcela odstraněno za 8 s a doba výdrže na maximálním zatížení byla mezi 10 až 15 vteřinami. Po zpřesnění za použití numerických analýz byla rychlost zatěžování definována na 0,01 N.s-1 a rychlost odtěžování 0,005 N.s-1. Z důvodu použití elasto-plastického modelu materiálu při numerické simulaci a pro vhodnost porovnávání výstupů z numerické analýzy a experimentu byla výdrž na plné zátěži odstraněna (obr. 6.3.3). Měřením tvrdosti byly získány zatěžovací křivky (závislost síla F [N] – hloubka vtisku h [μm]) s rozlišením síly a hloubky vtisku 0,001 N, resp. 20 nm. Vyhodnocení zátěžných křivek bylo prováděno pomocí softwaru TestXpert (Zwick/Roell).



Obr. 6.3.2 - Instrumentovaný tvrdoměr Zwick/Roell Z2,5 s tvrdoměrnou hlavou ZHU 0,2



Obr. 6.3.3 - Příklady indentačních křivek z instrumentovaného měření tvrdosti

a) s výdrží na maximálním zatížení

b) bez výdrže na maximálním zatížení

Povrchy zkoušených materiálů byly upraveny standardními metalografickými metodami broušením a následným leštěním na kotouči s volným diamantovým brusivem o zrnitosti 1 μm. Měření se vždy provádělo za pokojové teploty.

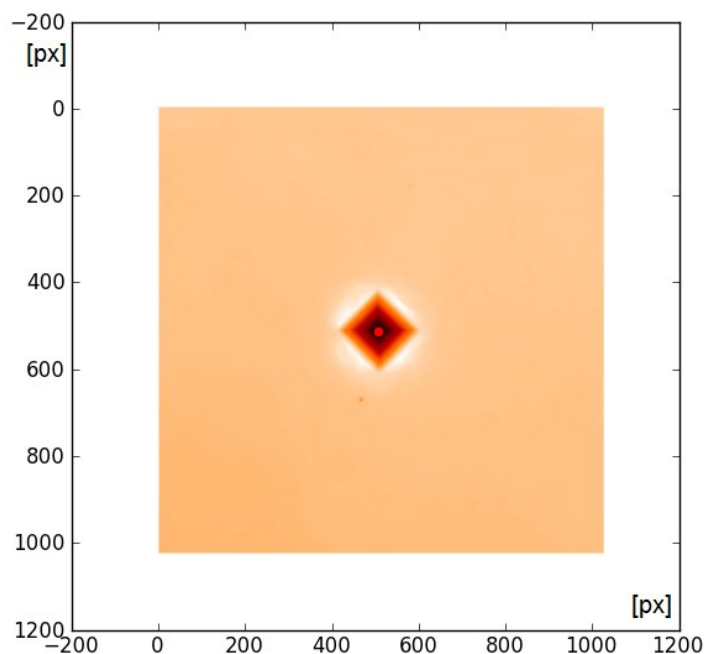
6.3.3. Měření profilu vtisku

Pro správné vyhodnocení mechanických vlastností materiálu na základě instrumentovaného měření tvrdosti je důležitá nejen indentační křivka, ale také profil povrchu vtisku. Proto je pro metodiku s měřením tvrdosti spojeno měření povrchu vtisku. To je prováděno 3-D konfokálním mikroskopem Olympus LEXT 3100.

Princip měření povrchu vtisku konfokálním mikroskopem je založen na velké hloubce ostrosti. Vzhledem k velké hloubce ostrosti mikroskop zachytává zaostřený obraz pouze úzké vrstvy vtisku. Rozostřený obraz povrchu vtisku, který je nad a pod zaostřenou hladinou, mikroskop nezachytává. Při měření konfokálním mikroskopem se tak zadává pouze celkový rozsah hloubky ostrosti a počet kroků v tomto rozsahu (počet zaostřených vrstev měřeného vtisku).

6.4. Obdržená data z měření

Z experimentálního měření instrumentované tvrdosti univerzálním instrumentovaným tvrdoměrem Zwick/Roell ZHU/Z2.5 se získávala výstupní data v podobě indentační křivky (obr. 6.3.3). Další data, která jsou nutná ke správnému určení základních materiálových charakteristik na základě měření tvrdosti u vyvinuté metodiky, jsou data z měření topografie vtisku. Tato data byla získána měřením konfokálním mikroskopem, zpracována a vytvořila se tak barevná mapa vtisku (obr. 6.4.1). Světle červená tečka na obrázku znázorňuje maximální hloubku vtisku po odlehčení.



Obr. 6.4.1 - Snímek topografie vtisku

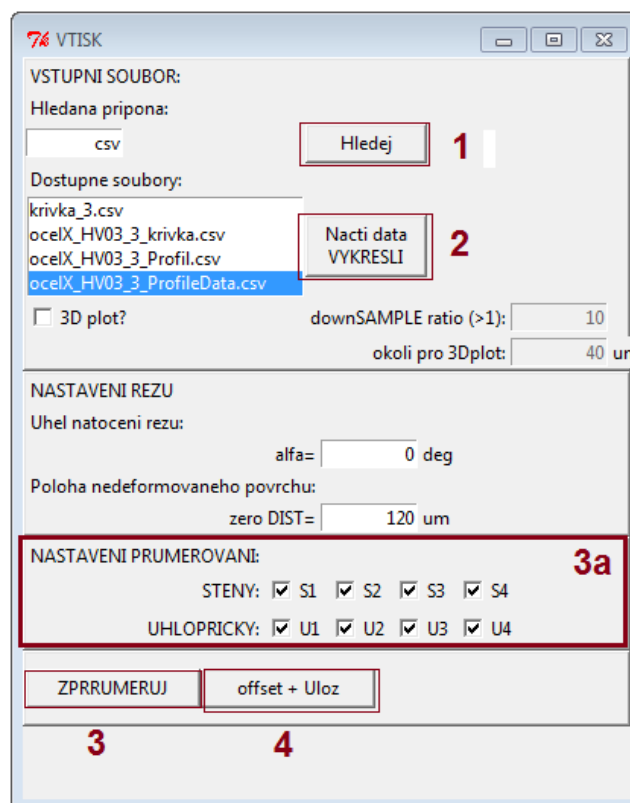
6.4.1. Zpracování naměřených dat

Získaná data je nutné před samotným určováním základních materiálových charakteristik zpracovat, a to ze dvou důvodů. Data získaná z tvrdoměru v podobě indentační křivky nemají přesně definovaný počáteční bod (obr. 6.3.3b). Při měření není jisté (na základě provedeného velkého množství měření), zda tvrdoměr začal měřit posuv opravdu v době prvního kontaktu s měřeným vzorkem. A záznam indentační křivky, vzhledem k citlivosti tvrdoměru, nikdy nezačíná při nulovém zatížení a stejně ani tak nekončí (viz obr. 6.3.3b). Stejně tak data z měření topografie vtisku nemají definovanou nulovou hladinu (výšku) na vzorku.

Z těchto důvodů je nutné získaná data z měření zpracovat tak, aby si vůči sobě odpovídala. Pro toto zpracování se v tomto případě stává referenčním bodem maximální hloubka vtisku po odlehčení (obr. 6.3.3a a obr. 6.4.5 – spline prokládající experimentální odlehčovací křivku - hodnota na ose posuvu, kde odlehčovací křivka tuto osu protíná). U změřené topografie vtisku je to již zmíněné místo na obr. 6.4.1 (světle červená tečka). Pro částečně automatické zpracování dat byly vytvořeny spouštěcí programy v programovacím jazyku Python. Pro zpracování naměřených dat se spouštěcí soubory musí nacházet ve stejném adresáři, jako jsou soubory s daty z měření. Prostředí těchto programů a popsany postup zpracování dat je znázorněno na dalších obrázcích a příslušných komentářích.

Prvním krokem zpracování naměřených dat je **zpracování dat z měření topografie vtisku** pro získání skutečné maximální hloubky vtisku po odlehčení. K tomu byl vytvořen následující spouštěcí program (obr. 6.4.2 – nastavovací panel). Spouštěcí program je přizpůsoben na zpracování dat v takovém formátu, v jakém byl výstup z měřicího konfokálního mikroskopu na UFM, AV ČR. Data z měření jsou v podobě pole čísel, kdy každé číslo představuje výšku jednotlivého pixelu. Tato čísla jsou od sebe oddělena středníkem (;).

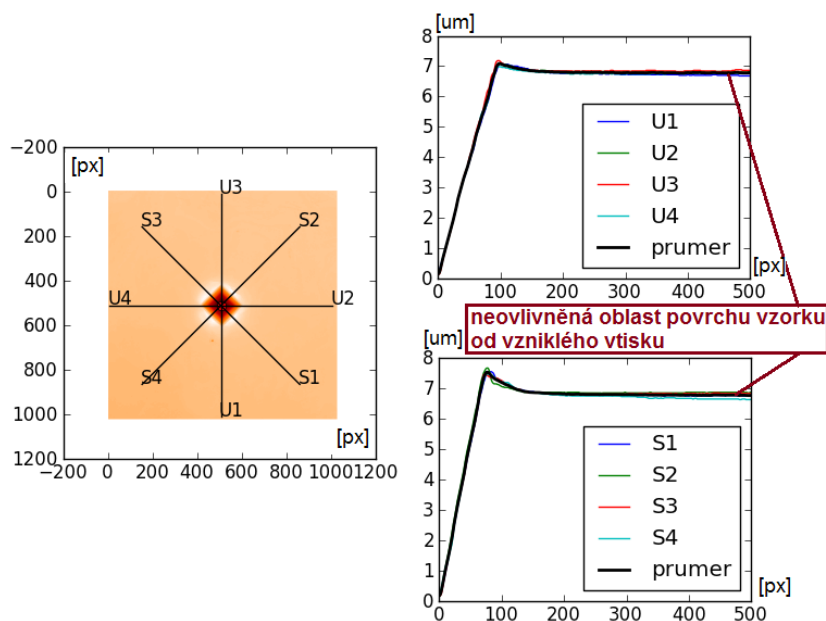
Po vyhledání všech souborů s danou příponou v daném adresáři (obr. 6.4.2 - bod 1) se vybere příslušný soubor s naměřenými daty. Poté se soubor nechá načíst a data vykreslit (obr. 6.4.2 – bod 2 a obr. 6.4.1).



Obr. 6.4.2 - Nastavovací panel pro zpracování experimentálních dat z měření topografie vtisku

Pro porovnávání křivek profilu z numerické simulace a křivek profilu z měření se vyhodnotí průměrná křivka profilu vedená přes stěny (S1-S4 – obr. 6.4.3) a průměrná křivka profilu vedená přes uhlopříčky vtisku (U1-U4 – obr. 6.4.3). V bodě 3a na obr. 6.4.2 se nastavuje, které řezy se mají zahrnout do výpočtu průměrných křivek. To je zavedeno z důvodu příliš nerovnoměrného vtisku, či případných nerovností na povrchu měřeného vzorku. Takové řezy mohou být z průměrování vyloučeny a nevnášejí do vyhodnocení nežádané nepřesnosti. Po vytvoření průměrných křivek

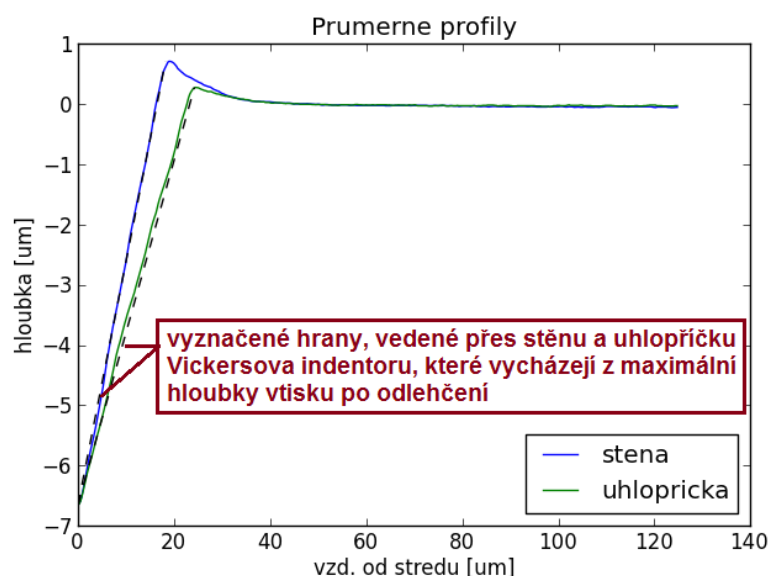
(obr. 6.4.2 - bod 3 a obr. 6.4.3) se volí vzdálenost od středu vtisku (položka zero DIST – obr. 6.4.2), ve které již není povrch měřeného vzorku tímto vtiskem ovlivněn. Tato vzdálenost je od středu vtisku zpravidla minimálně dvojnásobek délky uhlopříčky daného vtisku. Tímto je označena neovlivněná oblast povrchu měřeného vzorku.



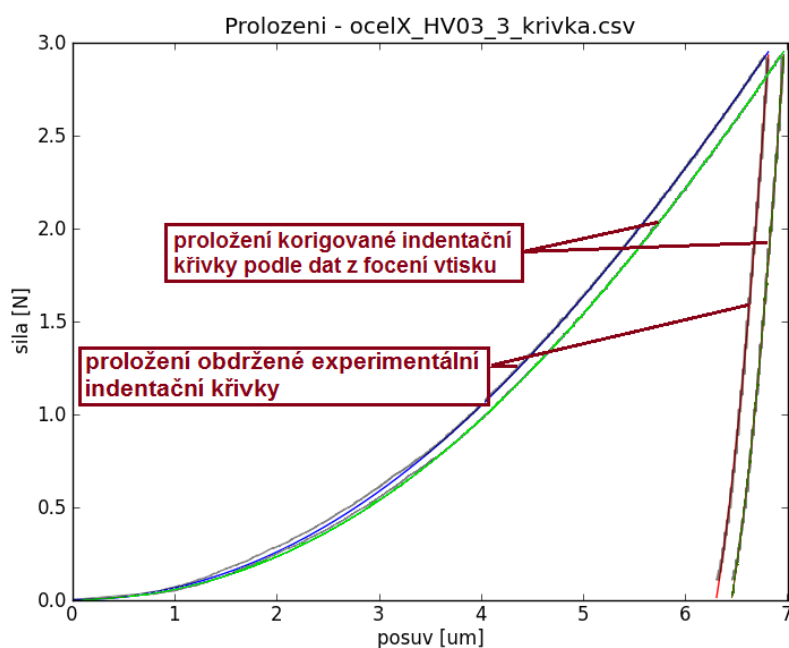
Obr. 6.4.3 – Vyznačené řezy přes stěnu a uhlopříčkou vtisku a vytvoření jejich průměrných křivek

Místo neovlivněné části křivky profilu je posunuto po stisknutí tlačítka (obr. 6.4.2 – bod 4) do nulové hladiny a jsou tak vykreslené průměrné křivky profilu jak přes úhlopříčku, tak přes stěnu vtisku (obr. 6.4.4). Z těchto křivek je možné odečíst maximální hloubku vtisku po odlehčení. Ta je referenční hodnotou pro správné nastavení indentační křivky příslušného vtisku.

Na obrázku 6.4.4 jsou také v grafu vyznačeny hrany Vickersova indentoru, které vedou z místa maximální hloubky vtisku po odlehčení. Tyto čáry jsou v grafu pro případnou korekci hodnoty maximální hloubky vtisku po odlehčení. Pokud se křivky profilu (zelená a modrá křivka – obr. 6.4.4) nacházejí po jejich délce nad znázorněnými hranami indentoru (čárkované čáry – obr. 6.4.4), je nutné o tuto hodnotu zmenšit maximální hloubku vtisku po odlehčení, protože při odlehčování dochází v těchto místech k poslednímu kontaktu mezi indentorem a měřeným vzorkem. Z tohoto důvodu indentační křivka zaznamenává tento okamžik jako maximální posuv indentoru při minimálním zatížení v průběhu odlehčování indentoru. Odlehčovací část indentační křivky (celá indentační křivka) je tak nastavena do takto odvozené hodnoty posuvu (obr. 6.4.5).



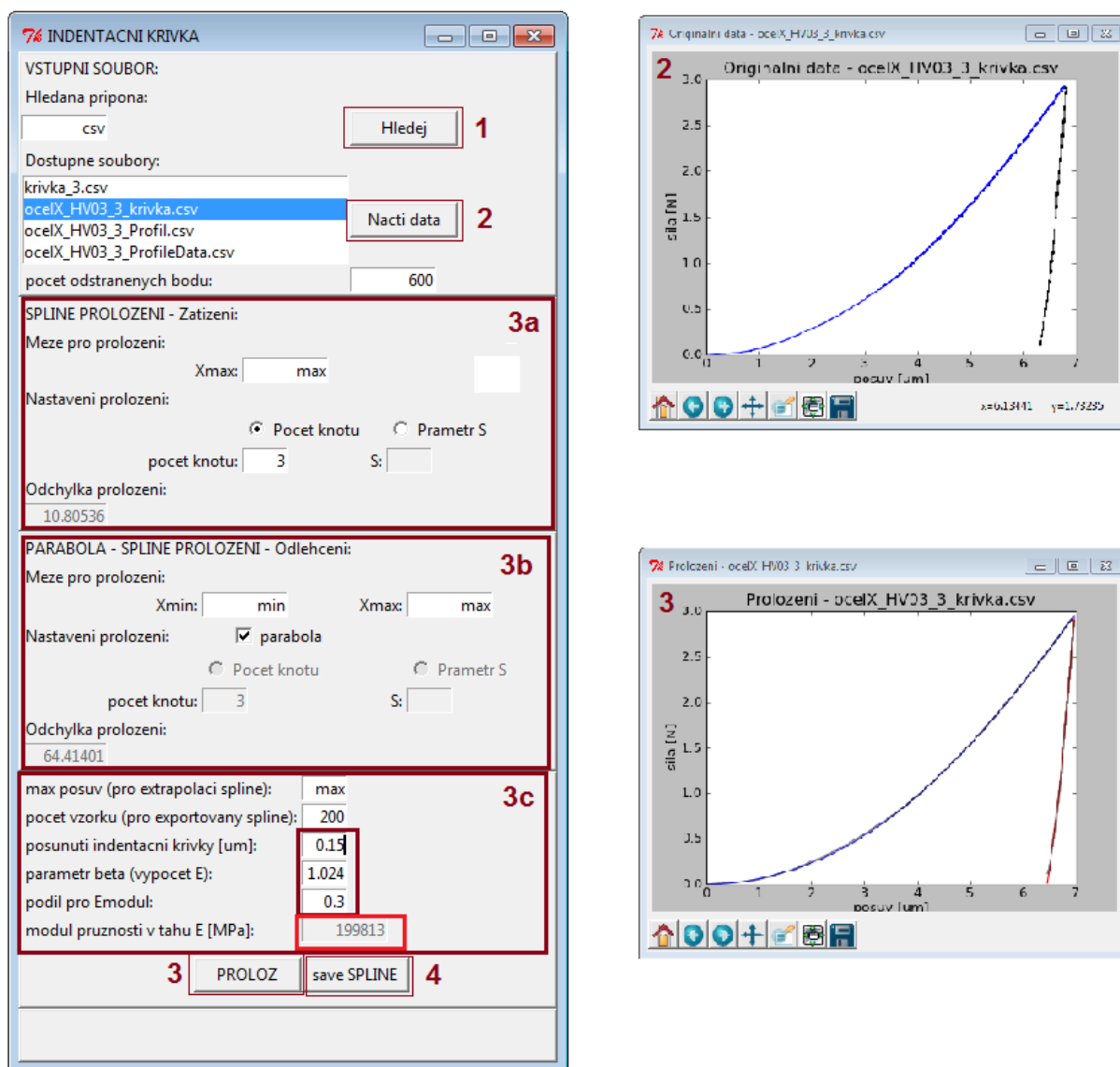
Obr. 6.4.4 - Průměrné křivky profilu vtisku posunuté do nulové polohy



Obr. 6.4.5 - Indentační křivka z naměřených hodnot a korigovaná indentační křivka

Po uzavření spouštěcího programu jsou nově nastavená data uložena do přechodového souboru a připravena pro stanovování základních mechanických vlastností materiálu metodou OptiSLang nebo „online“ metodou.

Prostředí spouštěcího programu (v programovacím jazyku Python) pro **zpracování dat z univerzálního tvrdoměru** je znázorněno na obr. 6.4.6. Program je nastaven na zpracování dat ve formátu, v jakém byl výstup z univerzálního tvrdoměru. Při měření byly zaznamenávány hodnoty síly zatížení indentoru a posuv indentoru v závislosti na čase. Spouštěcí program a soubory se zpracovávanými daty musí být opět v jednom pracovním adresáři. Zpracovaná data pak slouží ke stanovení základních mechanických vlastností materiálu jak pomocí programu OptiSLang, tak i metodou „online“.



Obr. 6.4.6 - Nastavovací panel pro zpracování experimentálních dat (indentační křivky) z měření instrumentované tvrdosti

Postup zpracování dat je obdobný jako u zpracování dat z měření profilu vtisku. Po vyhledání souborů z pracovního adresáře (obr. 6.4.6 – bod 1) se vybere a načte ze seznamu daný soubor. Načtením se nám vykreslí indentační křivka, která je rozdělena na zatěžovací a odlehčovací křivku (obr. 6.4.6 – bod 2). Velikost jejich rozdělení se stanovuje v položce „počet odstraněných bodů“. Počet odstraněných bodů k rozdělení indentační křivky je variabilní. Vždy záleží na hustotě zaznamenávaných bodů při měření instrumentované tvrdosti. Křivka by měla být viditelně rozdělena. V další části se křivky z experimentu prokládají hladkými monotónními křivkami (obr. 6.4.6 – bod 3). Nastavení proložení se definuje zvlášť pro zatěžovací a odlehčovací křivku (obr. 6.4.6 – bod 3a a 3b). Proložená protáhlá odlehčovací křivka (nastavení meze pro proložení) protíná osu posuvu v bodě, kterým je hodnota maximální hloubky vtisku po odlehčení. Tato hodnota musí odpovídat stanovené hodnotě při zpracování profilu vtisku. Pro upravení této hodnoty je na obrázku 6.4.6 v bodě 3c položka „posunutí indentační křivky“ originálních experimentálních dat. Ostatní položky v této části jsou již pro určení Youngova modulu pružnosti, což bude popsáno v další kapitole. Po proložení experimentálních dat vhodnou křivkou se data uloží

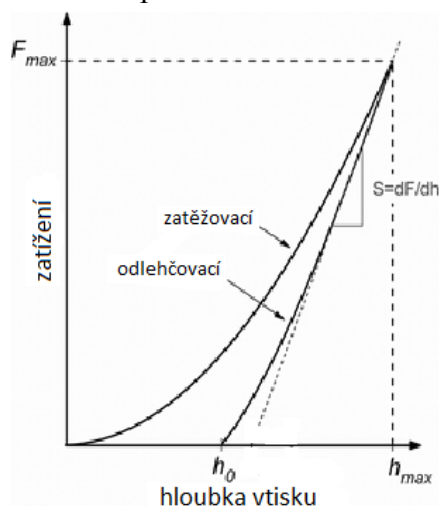
(obr. 6.4.6 – bod 4) a spouštěcí program zavře. Tím se vytvoří soubor s uloženými daty popisující upravenou indentační křivku. Tento soubor se použije při stanovování mechanických vlastností materiálu.

6.5. Stanovení mechanických vlastností

Pomocí vyvinuté metodiky se stanovují základní mechanické vlastnosti. Youngův modul pružnosti je stanovován z odlehčovací indentační křivky a mez kluzu s mezí pevnosti jsou určeny z optimalizované deformačně-napěťové křivky.

6.5.1. Stanovení Youngova modulu pružnosti

Youngův modul pružnosti se stanovuje z počátečního sklonu odlehčovací indentační křivky (obr. 6.5.1) a z níže uvedených vztahů, které byly uvedeny již v kapitole 3.2. Tyto vztahy byly zapracovány do spouštěcího programu zpracovávající experimentální data z měření tvrdosti v podobě indentační křivky. Vyhodnocení Youngova modulu pružnosti je tak při zpracování indentační křivky automatické. Výsledná hodnota Youngova modulu pružnosti je zobrazena v části 3c obr. 6.4.6. V této části je možné nastavit parametr β a podíl proložené odlehčovací indentační křivky pro výpočet její tangenty. Původní nastavení parametru β je 1,024 a podíl odlehčovací křivky, ze kterého se určuje sklon křivky je 3/10. Tyto hodnoty parametrů byly nastaveny na základě studie odborných článků a zkušeností při stanovování modulu pružnosti.



Obr. 6.5.1 - Znáznornění zatěžovací a odlehčovací indentační křivky s vyznačením tangenty odlehčovací křivky

$$E_r = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A_c}} \cdot \frac{dF}{dh} \quad (6.1)$$

$$E_s = (1 - \mu_s^2) \cdot \left(\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \right)^{-1} \quad (6.2)$$

kde E_r – relativní modul pružnosti,

E_s – modul pružnosti měřeného vzorku,

E_i – modul pružnosti indentoru,

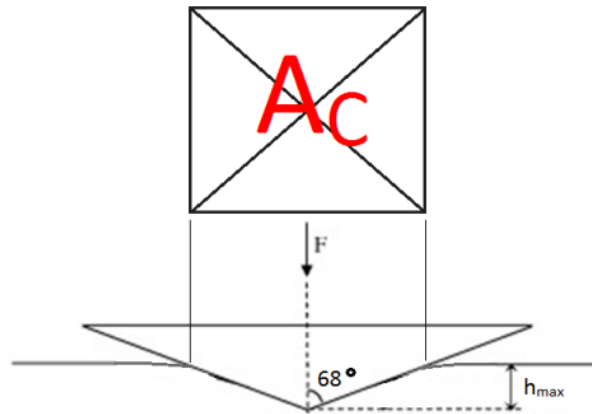
A_c – plocha kolmého průmětu vtisku (obr. 6.5.2),

μ_s – poissonův poměr měřeného vzorku,

μ_i – poissonův poměr indentoru,

β – korekční koeficient závislý na druhu indentoru

($\beta_{\text{kulička}} = 1$, $\beta_{\text{Vickers}} = 1.024$, $\beta_{\text{Berkovič}} = 1.034$) [58].

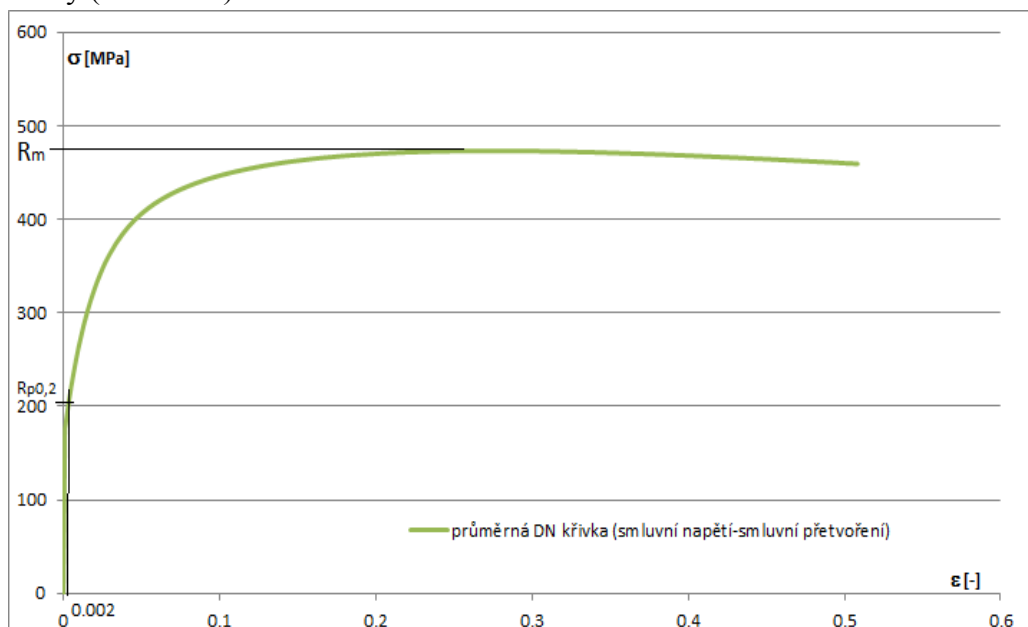


Obr. 6.5.2 - Znázornění plochy kolmého průmětu vtisku

$$A_C = (2 \cdot h_{max} \cdot \tan 68^\circ)^2 \quad (6.3)$$

6.5.2. Stanovení meze pevnosti a meze kluzu

Základní materiálové vlastnosti (smluvní mez kluzu - $R_{p0,2}$ a mez pevnosti - R_m) se stanovují z naladěné deformačně-napěťové křivky. Skutečná deformačně-napěťová křivka je vytvořena vhodnou kombinací materiálových parametrů (σ_0 , R_0 , R_∞ a b) materiálové konstitutivní rovnice dle Voce ($\sigma = \sigma_0 + R_0 \cdot \varepsilon_{pl} + R_\infty \cdot (1 - e^{-b\varepsilon_{pl}})$). Jedna z metod, používaná v této metodice ke stanovení vhodné kombinace materiálových parametrů, je optimalizace pomocí programu OptiSLang. Druhá metoda, která je nazývána „online“ metoda, je založena na sérii provedených MKP simulací instrumentovaného měření tvrdosti. Ze stanovené skutečné deformačně-napěťové křivky je odvozena dle vztahů 6.4 a 6.5 smluvní deformačně-napěťová křivka v závislosti smluvního napětí na smluvním přetvoření. Smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) a mez pevnosti (R_m) jsou poté určeny ze smluvní deformačně-napěťové křivky (obr. 6.5.3).



Obr. 6.5.3 - Znázornění meze pevnosti a smluvní meze kluzu ze smluvní deformačně-napěťové křivky

$$R = \frac{\sigma}{1+\varepsilon} \quad (6.4)$$

$$\varepsilon = e^{\bar{\varepsilon}} - 1 \quad (6.5)$$

kde R – smluvní napětí,

ε – smluvní přetvoření

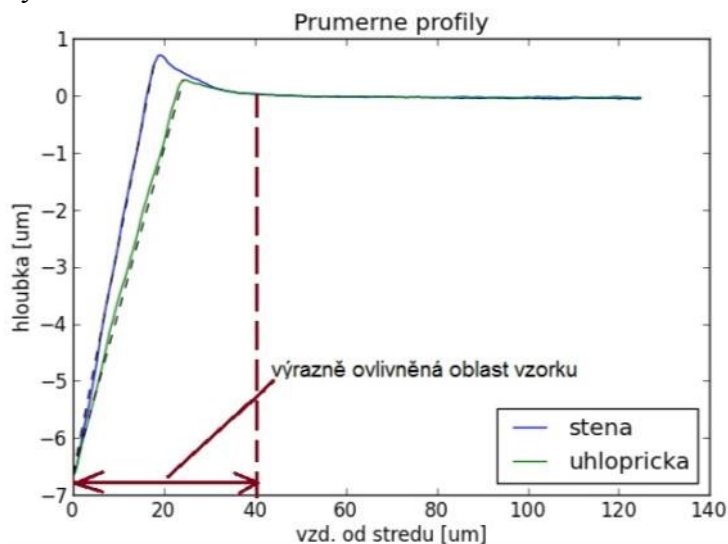
σ – skutečné napětí

$\bar{\varepsilon}$ – skutečné přetvoření

6.5.2.1. Metoda OptiSLang

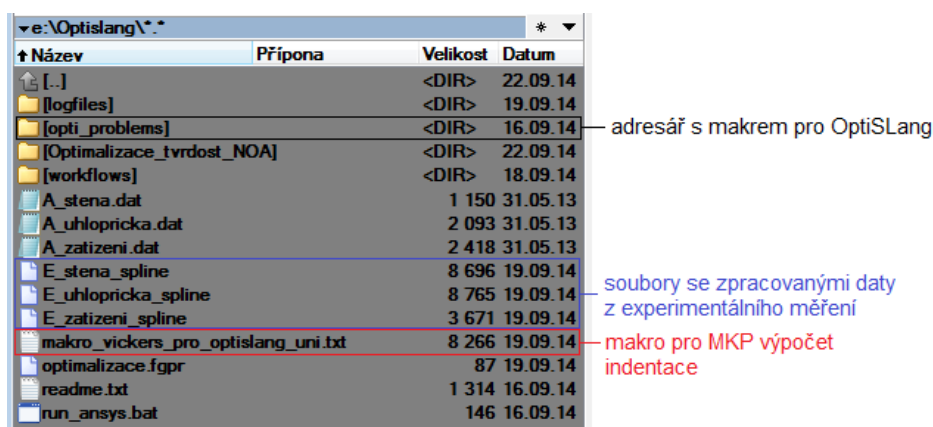
Optimalizace pomocí programu OptiSLang je založena na průběžných MKP výpočtech simulace instrumentovaného měření tvrdosti. Zpracovaná data z měření instrumentovaného měření tvrdosti (indentační křivka a křivky profilu) jsou načtena (vložená do pracovního adresáře) a jsou porovnávána s daty z jednotlivých probíhajících numerických výpočtů simulace indentace.

V makru je nutné při provádění simulace instrumentovaného měření tvrdosti v programu ANSYS definovat maximální hloubku vtisku při maximálním zatížení dle hodnot z experimentálního měření a stanovený Youngův modul pružnosti. Pro rozdílné hloubky vtisku je nutné v přednastaveném makru pro program OptiSLang v adresáři „opti_problems“ stanovit hranice ladění profilu uhlopříčky a stěny vtisku. Tyto hranice je nutné stanovit tak, aby označovaly pouze ovlivněný povrch vzorku vtiskem (obr. 6.5.4). Tím se ladění stane efektivnější. Tyto všechny úpravy a nastavení je nutné provést před zahájením optimalizace modelu materiálu a stanovením hodnot jednotlivých parametrů konstitutivní rovnice. Dále je také možné před optimalizací v makru pro OptiSLang definovat intervaly hodnot jednotlivých parametrů konstitutivní rovnice dle Voce ($\sigma = \sigma_0 + R_0 \cdot \varepsilon_{pl} + R_\infty \cdot (1 - e^{-b\varepsilon_{pl}})$), v jakém rozsahu mají být použity k ladění modelu materiálu. V makru jsou ovšem přednastavené hodnoty pro široké pokrytí druhů ocelí.



Obr. 6.5.4 - Znázornění výrazně ovlivněné oblasti povrchu vtisku

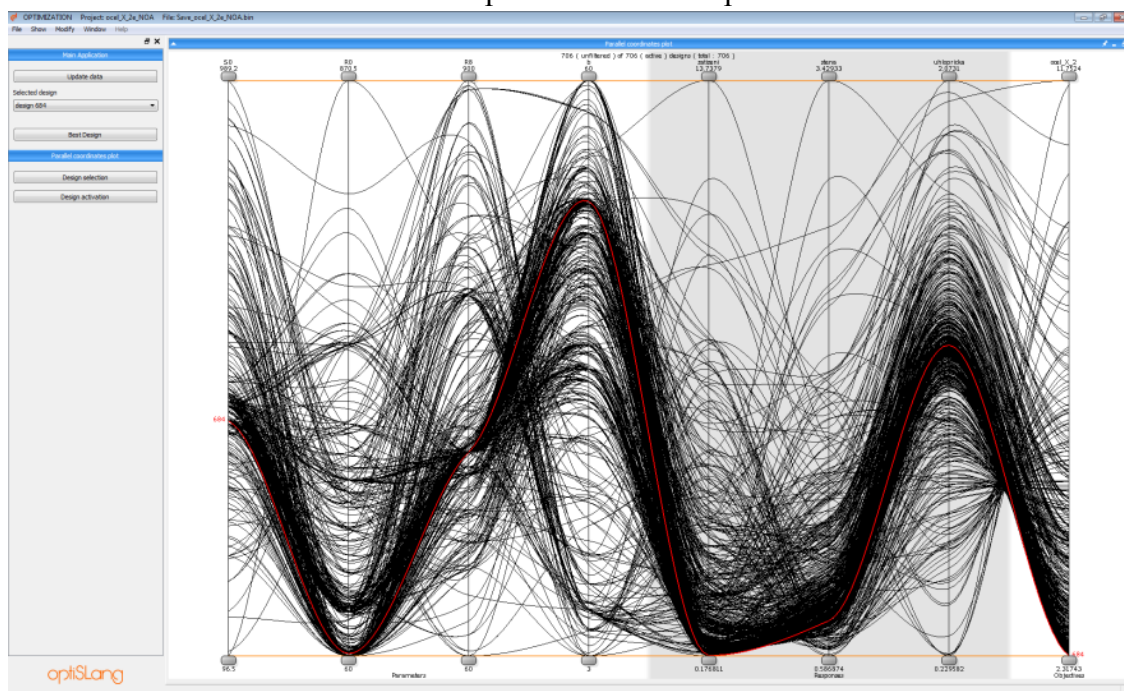
Na obr. 6.5.5 je znázorněna struktura pracovního adresáře pro optimalizaci pomocí OptiSLangu s vyznačenými a dříve popsány soubory a adresáři.



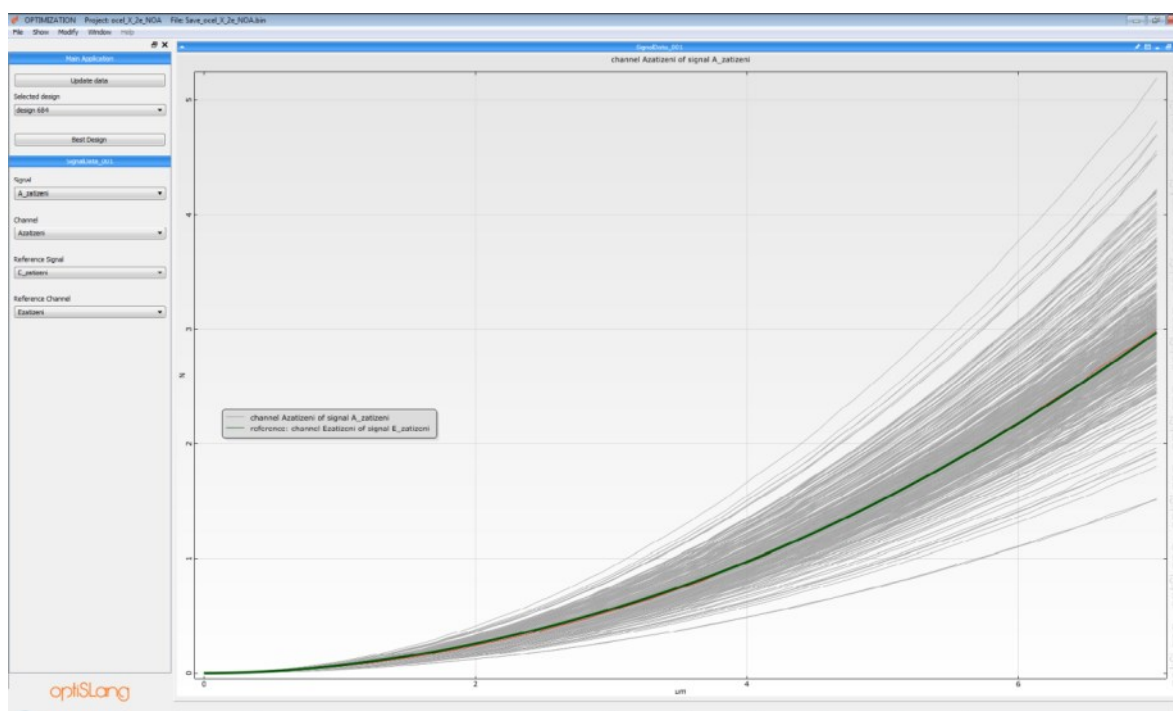
Obr. 6.5.5 - Pracovní adresář pro ladění modelu materiálu pomocí programu OptiSlang

Po provedených úpravách souborů v pracovním adresáři je možné přednastavený projekt programu OptiSlang načíst (soubor optimalizace.fgpr) a spustit výpočet (optimalizaci).

Tento software pracuje na základě populací a jedinců, které mezi sebou kombinuje. Program si určí zástupce („jedince“) z nastavených intervalů a postupně je všechny mezi sebou (obr. 6.5.6) kombinuje a porovnává (obr. 6.5.7) vstupní hodnoty (experimentální křivky) s výstupními hodnotami (výpočtové křivky). Následně vyhodnocuje nejlepší kombinace. Výsledkem optimalizace je pak nejvhodnější kombinace parametrů konstitutivní rovnice, která definuje skutečnou deformačně-napěťovou křivku v závislosti skutečného napětí na skutečném přetvoření.



Obr. 6.5.6 - Ukázka prostředí softwaru OptiSlang - znázornění vytvořených kombinací a vyhodnocení na porovnávaná kritéria



Obr. 6.5.7 - Ukázka prostředí softwaru OptiSLang - znázornění porovnávání jednoho z kritérií – zatěžovací indentační křivka

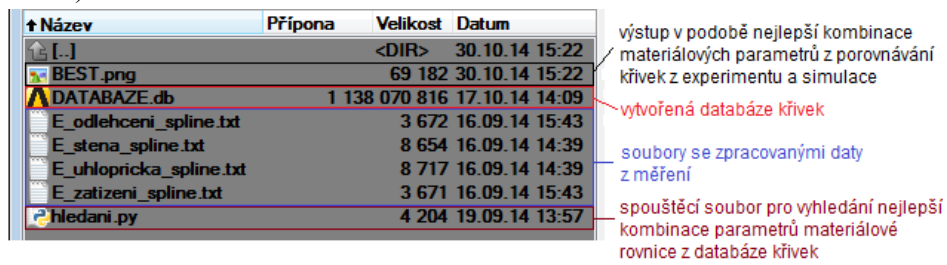
Hlavní výhodou této metody optimalizace modelu materiálu je použití pro jakékoli instrumentované měření tvrdosti. Lze zde použít libovolný druh indentoru (dle Brinella nebo Vickerse). Měření může být provedeno libovolným zatížením či maximálním posuvem indentoru. Vyhodnocení mechanických vlastností materiálu na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti je vždy zhruba stejně časově náročné. S uvedeným nastavením programu OptiSLang (viz pracovní adresář) trvá vyhodnocení mechanických vlastností na základě jednoho provedeného vtisku až dva dny. Toto může být považováno jako jedna z nevýhod metody optimalizace. Další nevýhodou je pak nutnost vlastnění softwaru OptiSLang a MKP softwaru Ansys.

6.5.2.2. „Online“ metoda

„Online“ metoda stanovení mechanických vlastností je založená na **předběžně provedených MKP výpočtech** pro různé materiály (různé kombinace parametrů materiálové rovnice). Z tohoto důvodu je proveden velký počet předběžných výpočtů pro pokrytí široké škály materiálů. Provedenými výpočty se vytvoří databáze výstupů z MKP simulace instrumentovaného měření tvrdosti v podobě indentačních křivek a křivek profilů vtisku. Tato databáze je ovšem určena pouze pro stanovení mechanických vlastností na základě měření instrumentované tvrdosti Vickersovým indentorem, a to do maximální hloubky vtisku 6 μm . To vše lze zařadit mezi *nevýhody* metody (časově náročná příprava databáze křivek, pouze měření dle Vickerse, měření musí být prováděno přesně do maximální hloubky vtisku podle vytvořené databáze). Naopak jako velká *výhoda* oproti optimalizaci pomocí programu OptiSLang je, že je možné při dodržení přesnosti měření stanovit materiálové vlastnosti hned na místě měření.

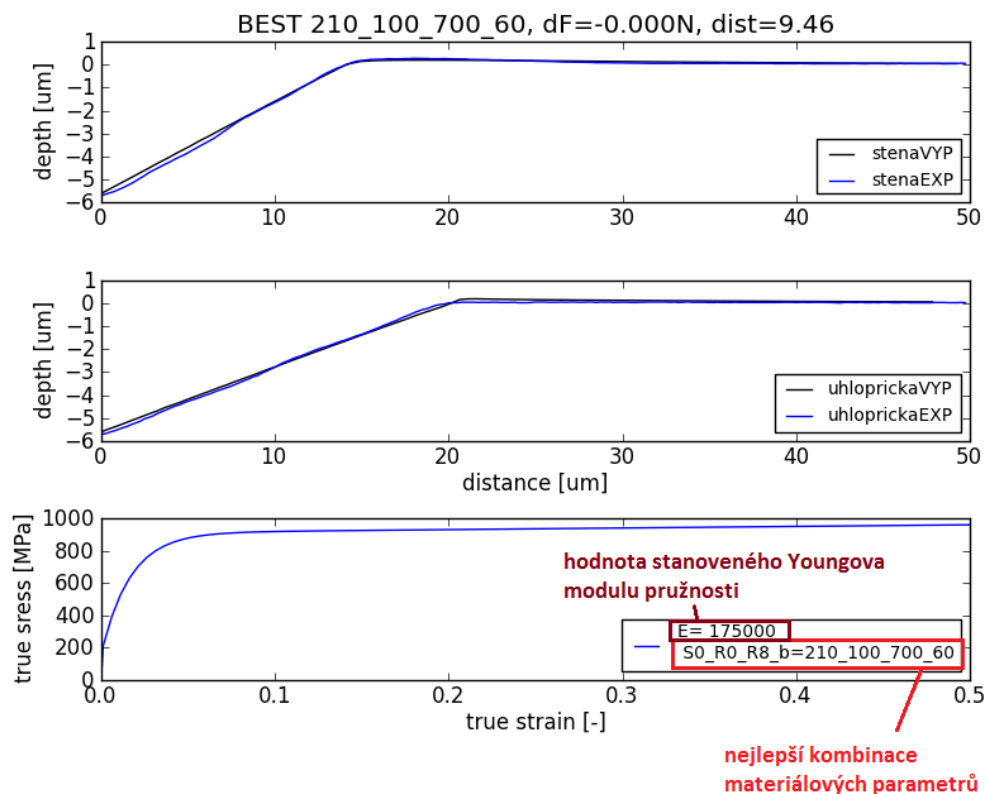
Pro každé měření (s jinou hodnotou maximální hloubky vtisku, než jak je přednastaveno) je nutné vytvořit novou databázi křivek. Tvorba databáze je časově náročná, v řádech několika měsíců. Naopak jako další výhodu u této metody můžeme označit to, že není nutné upravovat žádná makra. Po zpracování a uložení naměřených dat (viz kap. 6.4) je pouze nutné soubory se zpracovanými daty

nahrát do pracovního adresáře, určeného pro stanovení mechanických vlastností materiálu touto metodou (obr. 6.5.8).



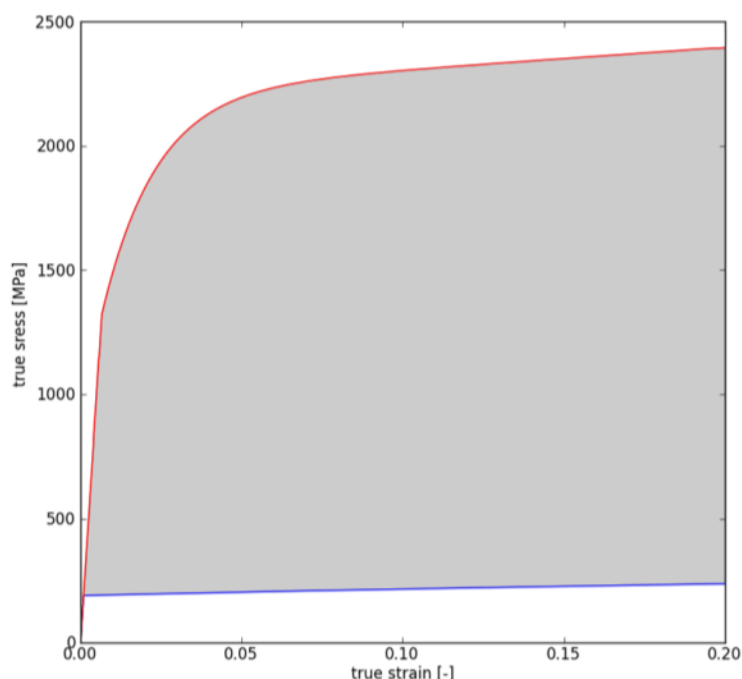
Obr. 6.5.8 - Pracovní adresář pro stanovení materiálových parametrů pomocí „online“ metody

Po nahrání uvedených souborů do pracovního adresáře, kde se také nachází vytvořená databáze indentačních křivek a křivek profilů, se spustí spouštěcí program vytvořený v programovacím jazyku Python. Program vyhledá nejlepší kombinaci přidružených křivek v porovnání s experimentálními upravenými daty z dané databáze. Po vyhledání je nutné doplnit dříve stanovený Youngův modul pružnosti. Výstupem z tohoto vyhledávání je soubor v podobě obrázku (obr. 6.5.9), který znázorňuje porovnání křivek profilů z měření a nejlepší kombinace z databáze a stanovenou skutečnou deformačně-napěťovou křivku na základě vybraných materiálových parametrů.



Obr. 6.5.9 - Výstupní soubor ze stanovení nejvhodnější kombinace materiálových parametrů pomocí „online“ metody

Pro stanovení mechanických vlastností materiálu „online“ metodou byla v rámci disertační práce vytvořena databáze křivek pro různé materiály, které jsou charakterizovány skutečnými deformačně-napěťovými křivkami v rozsahu dle obr. 6.5.10. Tato databáze byla použita ke stanovení mechanických vlastností neznámé oceli a jednotlivých struktur heterogenního svarového spoje.



Obr. 6.5.10 - Znárodněné rozpětí deformačně-napěťových charakteristik materiálů vyskytujících se v databázi indentačních křivek a křivek profilů v podobě výstupů z MKP simulace instrumentovaného měření tvrdosti

Na základě stanovené nejvhodnější kombinace parametrů materiálové rovnice (ať už metodou pomocí OptiSLangu nebo „online“ metodou) a dříve určeného Youngova modulu pružnosti pro každý vtisk je poté vyhodnocena celková skutečná a smluvní deformačně-napěťová křivka a z ní výsledné materiálové charakteristiky (smluvní mez kluzu, mez pevnosti a Youngův modul pružnosti). Pro automatické vyhodnocení těchto hodnot byl opět vytvořen spouštěcí program v programovacím jazyku Python (obr. 6.5.11).

Prumerování namerených charakteristik

Vysledky mereni:

cislo_mereni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S0 [MPa]	210	280	170	481.5						
R0 [MPa]	100	100	200	1000						
1 Rinf [MPa]	700	600	800	112.2						
b [-]	35	45	43	32.4						
E [MPa]	190000	187980	183659	167432						

Zakl. mech. char.:

2 Rm [MPa]	812.5	803.4	886.9	664.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rp02 [MPa]	257.5	331.8	236.3	490.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

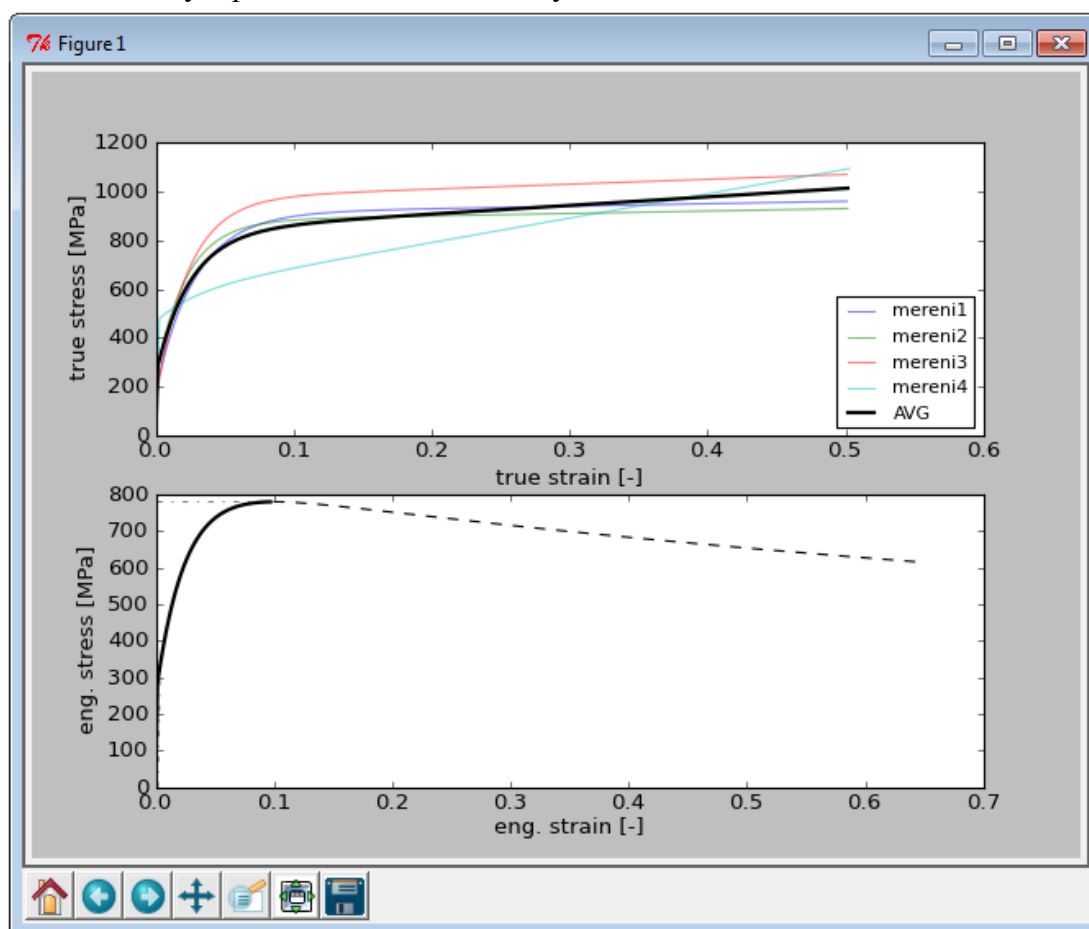
Prumerne mechanicke charakteristiky:

3 Rm_avg: 779.6 MPa
 Rp02_avg: 329.1 MPa
 E_avg: 182267.8 MPa

4 Vykresli **5** Uloz

Obr. 6.5.11 - Panel pro vytvoření průměrných materiálových charakteristik z jednotlivých optimalizovaných experimentálních měření

Panel pro vyhodnocení průměrných hodnot materiálových charakteristik je rozdělen na několik částí (obr. 6.5.11). V první části (obr. 6.5.11 – 1) jsou zadávány materiálové parametry z optimalizací pro jednotlivá měření. V další části panelu (obr. 6.5.11 – 2) jsou vyhodnoceny základní materiálové charakteristiky (smluvní mez kluzu a mez pevnosti) pro jednotlivé měření. Nakonec je vyhodnocena průměrná smluvní mez kluzu, průměrná mez pevnosti a průměrný Youngův modul pružnosti pro všechna definovaná a optimalizovaná měření (obr. 6.5.11 – 3). V této verzi je možno definovat parametry až pro 10 měření. Tlačítkem „Vykresli“ se zobrazí a uloží obrázek se všemi skutečnými D-N křivkami pro jednotlivá měření a jejich průměrná skutečná D-N křivka a současně obrázek s průměrnou smluvní D-N křivkou, ze které jsou stanoveny základní materiálové charakteristiky (obr. 6.5.12). Tlačítkem „Ulož“ se uloží všechny D-N křivky jak z jednotlivých měření, tak i z průměrné D-N křivky v podobě souřadnic uložených v textovém souboru.



Obr. 6.5.12 - Panel pro vytvoření průměrných materiálových charakteristik z jednotlivých optimalizovaných experimentálních měření

Pro ujasnění celého postupu metodiky je na následujícím obrázku zobrazeno blokové schéma postupu řešení stanovení mechanických vlastností na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti, který uvedená metodika používá.



Obr. 6.5.13 - Schéma postupu metodiky pro stanovení mechanických vlastností materiálu na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti

7. Prezentace a analýza výsledků řešení problému

Během tvorby disertační práce byly použity 3 metody optimalizace modelu materiálu. Výsledky z optimalizace postupnou iterací na základě provedení citlivostní analýzy byly prezentovány v [80]. Následně bylo přistoupeno k optimalizaci pomocí programu OptiSLang. S tímto programem byly stanovovány mechanické vlastnosti několika materiálů. V této práci jsou prezentovány výsledky pouze těch optimalizací, při kterých byla použita finální podoba metodiky stanovení mechanických vlastností materiálu na základě instrumentovaného měření tvrdosti. Finální podoba se týká hlavně způsobu zpracování naměřených hodnot a nastavení programu OptiSLang. Jsou zde tak prezentovány výsledky optimalizace z instrumentovaného měření tvrdosti HV0.1, HV0.3 a HV0.5 ocelí 22K a 10Ch2MFA. Po těchto výpočtech na proměřených a známých ocelí bylo přistoupeno k odzkoušení metodiky na neznámé oceli „X“. U této oceli bylo provedeno instrumentované měření tvrdosti HV0.3 a instrumentované měření tvrdosti s maximální hloubkou vtisku 6 μm . Podmínky měření byly popsány v kapitole 6.3. Tato dvojí měření byla provedena pro použití obou konečných, dříve uvedených metodik optimalizace (OptiSLang a metoda „online“). Výsledky těchto výpočtů jsou také prezentovány v této kapitole.

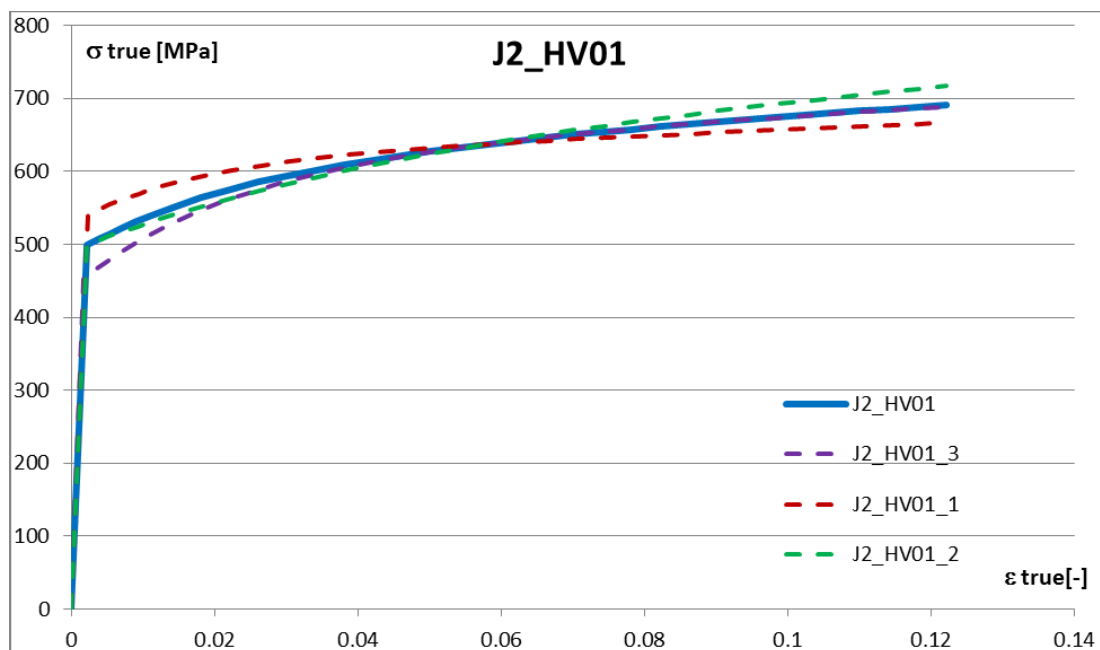
Na závěr této kapitoly jsou prezentovány výsledky ze stanovení mechanických vlastností struktur heterogenního svarového spoje na základě instrumentovaného měření tvrdosti. Jsou zde prezentovány výsledky z optimalizací oběma metodami. Proto bylo provedeno instrumentované měření tvrdosti dle Vickerse do maximální hloubky vtisku 6 μm s dalšími podmínkami měření uvedené v kapitole 6.3.

7.1. Vyhodnocení výsledků z ladění modelu materiálu oceli 10Ch2MFA

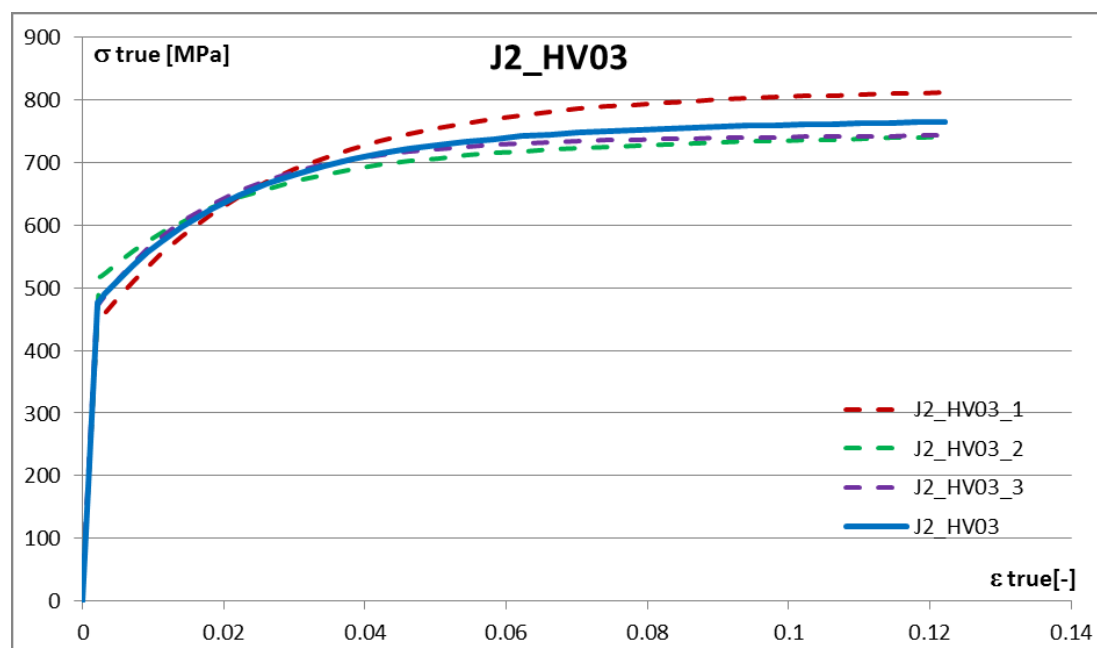
Na obrázcích 7.1.1 – 7.1.3 jsou zobrazeny výsledky optimalizací modelu materiálu provedené na základě jednotlivých měření instrumentované tvrdosti oceli 10Ch2MFA. Na obr. 7.1.1 jsou výsledky ze tří měření HV0.1 a vyhodnocená průměrná skutečná D-N křivka provedených třech vtisků. Na obr. 7.1.2 jsou obdobně stejné křivky z měření HV0.3 na oceli 10Ch2MFA a na obr. 7.1.3 jsou skutečné D-N křivky z měření tvrdosti HV0.5.

Tyto všechny průměrné D-N křivky z jednotlivých sad měření s různými zatíženími jsou spolu s celkovou průměrnou skutečnou D-N křivkou z měření tvrdosti na oceli 10Ch2MFA (J2) zobrazeny na obr. 7.1.4 a jsou zde porovnávány s experimentální skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky (tahová zkouška).

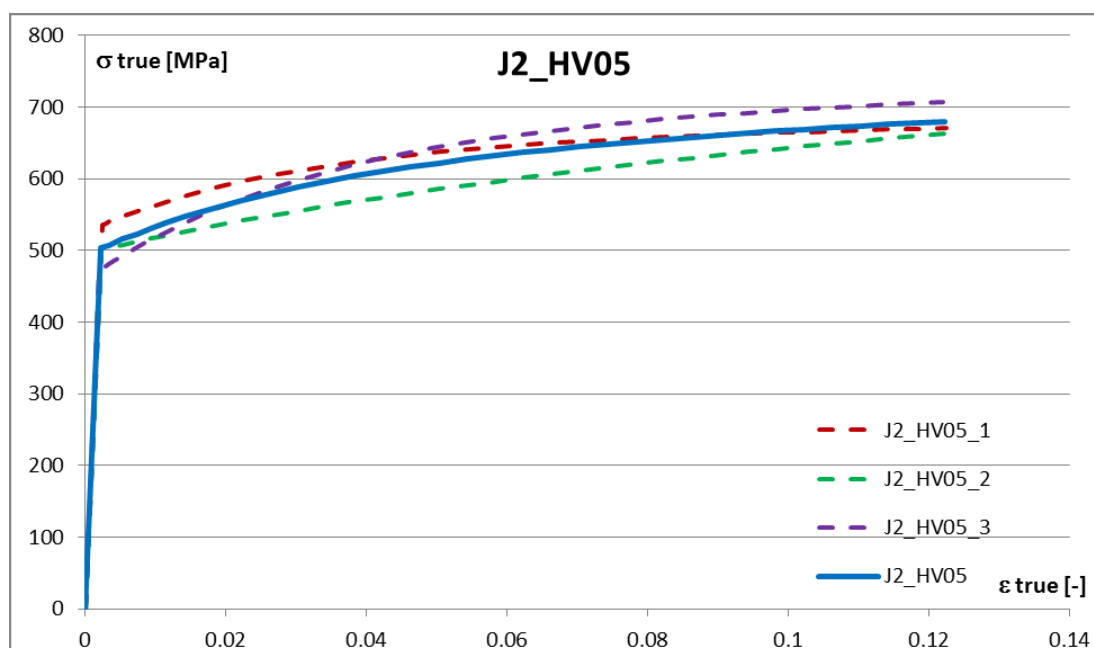
Na obrázku 7.1.4 jsou znázorněny skutečné deformačně-napětové křivky, které byly získány laděním modelu materiálu na základě měření tvrdosti postupně HV0.1, HV0.3 a HV0.5. Dále je na tomto obrázku výsledná naladěná deformačně-napětová křivka oceli 10Ch2MFA, která vznikla zprůměrováním naladěných deformačně-napětových křivek z měření tvrdosti různým zatížením. Výsledná skutečná deformačně-napětová křivka (J2) je na tomto obrázku porovnávána se skutečnou deformačně-napětovou křivkou získanou experimentální tahovou zkouškou (tahová zkouška).



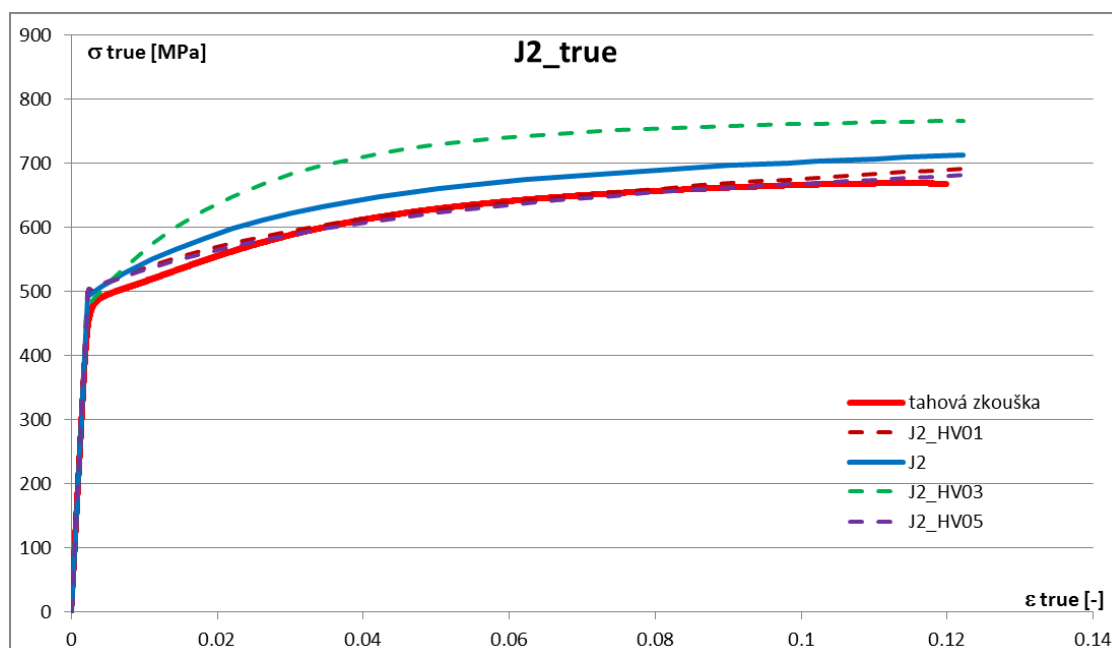
Obr. 7.1.1 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.1 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.1 oceli 10Ch2MFA



Obr. 7.1.2 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.3 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.3 oceli 10Ch2MFA

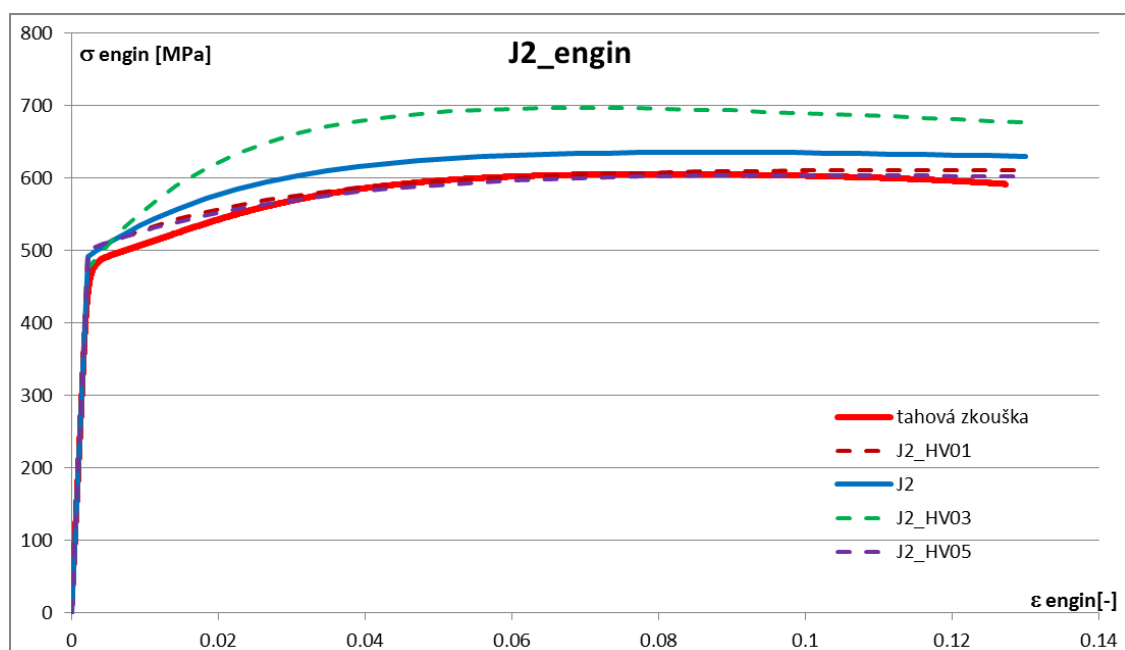


Obr. 7.1.3 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.5 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.5 oceli 10Ch2MFA



Obr. 7.1.4 - Porovnání výsledné průměrné skutečné deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 10Ch2MFA

Na následujícím obrázku 7.1.5 jsou znázorněny smluvní deformačně-napěťové křivky, které byly získány přepočtem (rovnice 6.4 a 6.5) naladěných skutečných deformačně-napěťových křivek uvedených na obr. 7.1.4. Je zde porovnávána výsledná naladěná smluvní deformačně-napěťová křivka (J2) se smluvní deformačně-napěťovou křivkou získanou experimentální tahovou zkouškou (tahová zkouška).



Obr. 7.1.5 - Porovnání výsledné průměrné smluvní deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 10Ch2MFA

Následující tabulka ukazuje hodnoty základních materiálových charakteristik oceli 10Ch2MFA získané z ladění modelu materiálu numerickým výpočtem pomocí programu OptiSLang na základě provedeného měření tvrdosti HV0.1, HV0.3 a HV0.5.

Tab. 7.1.1. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik oceli 10Ch2MFA získaných z optimalizace modelu materiálu na základě měření instrumentované tvrdosti HV0.1, HV0.3 a HV0.5 s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

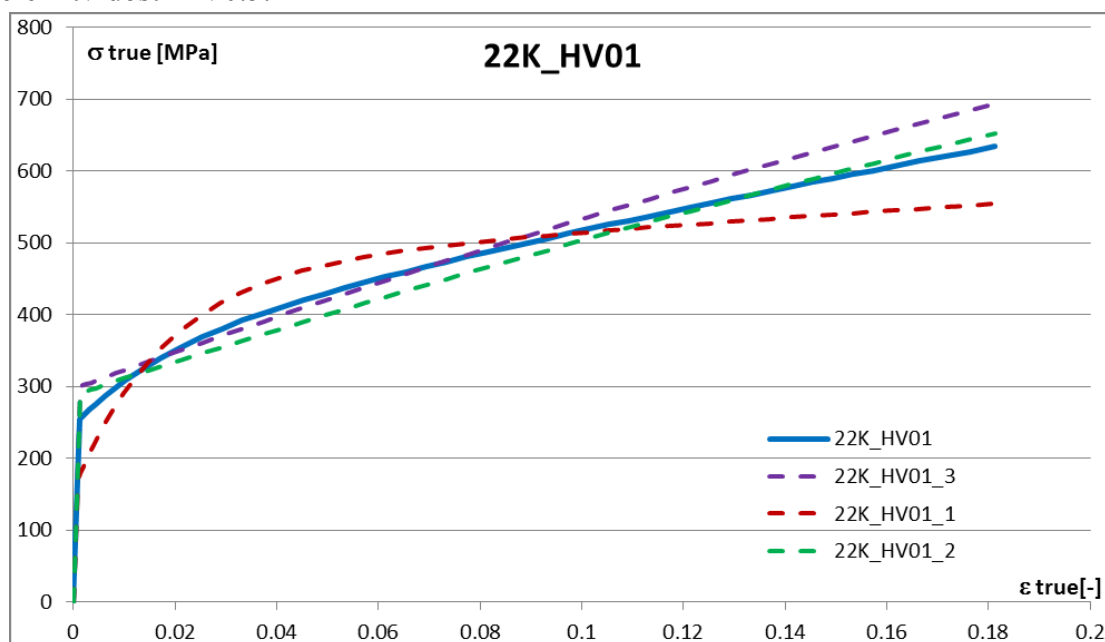
		HV0.1	HV0.3	HV0.5	Celkové hodnocení	Experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	506,5 (+2,9%)	500,1 (+1,6%)	509,5 (+3,5%)	505,4 (+2,7%)	492
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	611,6 (+0,7%)	697,4 (+14,9%)	604,4 (-0,4%)	635,9 (+4,7%)	607
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	238 159 (+8,5%)	226 455 (+3,1%)	217 972 (-0,7%)	227 528 (+3,6%)	219 569

Optimalizace modelu materiálu oceli 10Ch2MFA pomocí programu OptiSLang dle výsledků uvedených na obrázku 7.1.5 a v tabulce 7.1.1 se jeví jako vhodná metoda pro určení materiálových charakteristik oceli na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti. Deformačně-napěťové křivky stanovené na základě měření tvrdosti HV0.1 a HV0.5 jsou v dobré shodě s deformačně-napěťovou křivkou z tahové zkoušky. Stejně tak můžeme mluvit i o dobré shodě, co se týká meze pevnosti a meze kluzu určené z těchto křivek. Deformačně-napěťová křivka stanovená na základě měření tvrdosti HV0,3 je oproti deformačně-napěťové křivce nadhodnocená a stejně tak

mez pevnosti určená z této křivky. Pokud vyhodnocujeme deformačně-napěťovou křivku a materiálové charakteristiky na základě všech devíti měření HV0.1, HV0.3 a HV0.5, tak všechny stanovené materiálové charakteristiky jsou nepatrně nadhodnoceny, stejně tak vychází porovnání stanovené průměrné deformačně-napěťové křivky oproti deformačně-napěťové křivce z tahové zkoušky. Tyto rozdíly zapříčiňují právě výsledky z ladění modelu materiálu na základě měření tvrdosti HV0.3. Každé měření tvrdosti o různém zatížení (HV0.1, HV0.3 a HV0.5) bylo prováděno na malé oblasti materiálu. Byly provedeny vždy 3 vpichy těsně vedle sebe, jak to povolují normy pro měření tvrdosti. Tyto 3 vpichy vždy postihují malou oblast v řádech stovek mikrometrů. Oblasti pro měření tvrdosti různým zatížením jsou ovšem od sebe více vzdáleny. Proto se lze domnívat, že vzhledem k malému zatížení při měření tvrdosti HV0.3 oceli 10Ch2MFA se mohlo natrefit na pevnější oblast oproti pevnosti většího vzorku oceli, který byl měřen při experimentální tahové zkoušce.

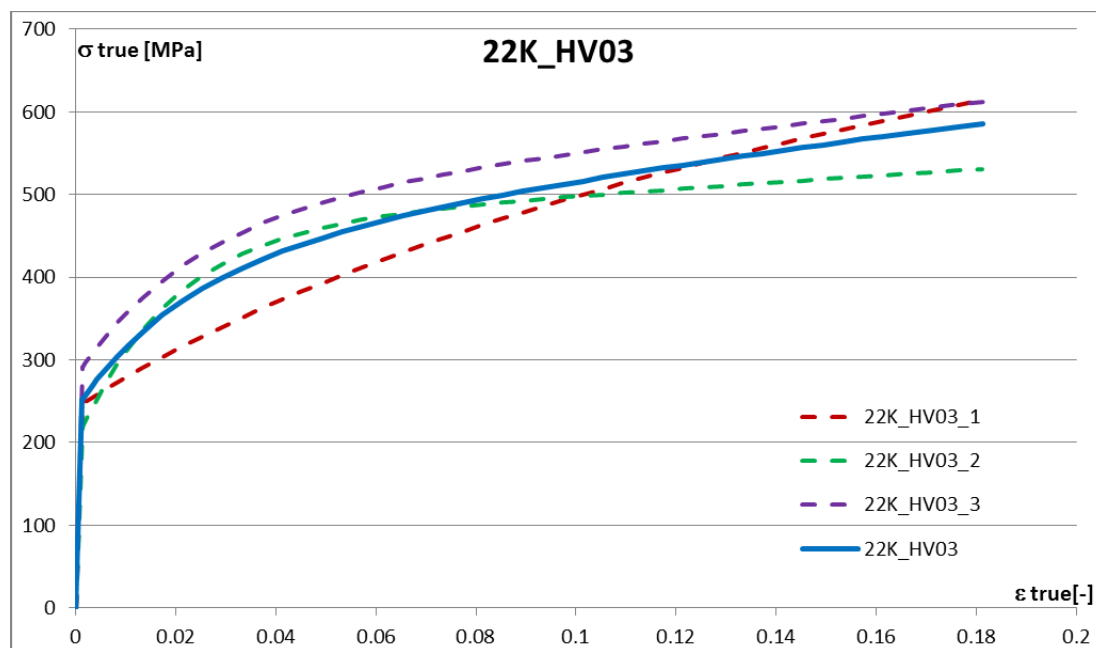
7.2. Vyhodnocení výsledků z ladění modelu materiálu oceli 22K

Na obrázcích 7.2.1 – 7.2.3 jsou zobrazeny výsledky optimalizací modelu materiálu provedené na základě jednotlivých měření instrumentované tvrdosti oceli 22K. Na obr. 7.2.1 jsou výsledky ze tří měření HV0.1 a vyhodnocená průměrná skutečná D-N křivka provedených třech vtisků. Na obr. 7.2.2 jsou obdobně stejné křivky z měření HV0.3 na oceli 22K a na obr. 7.2.3 jsou skutečné D-N křivky z měření tvrdosti HV0.5.

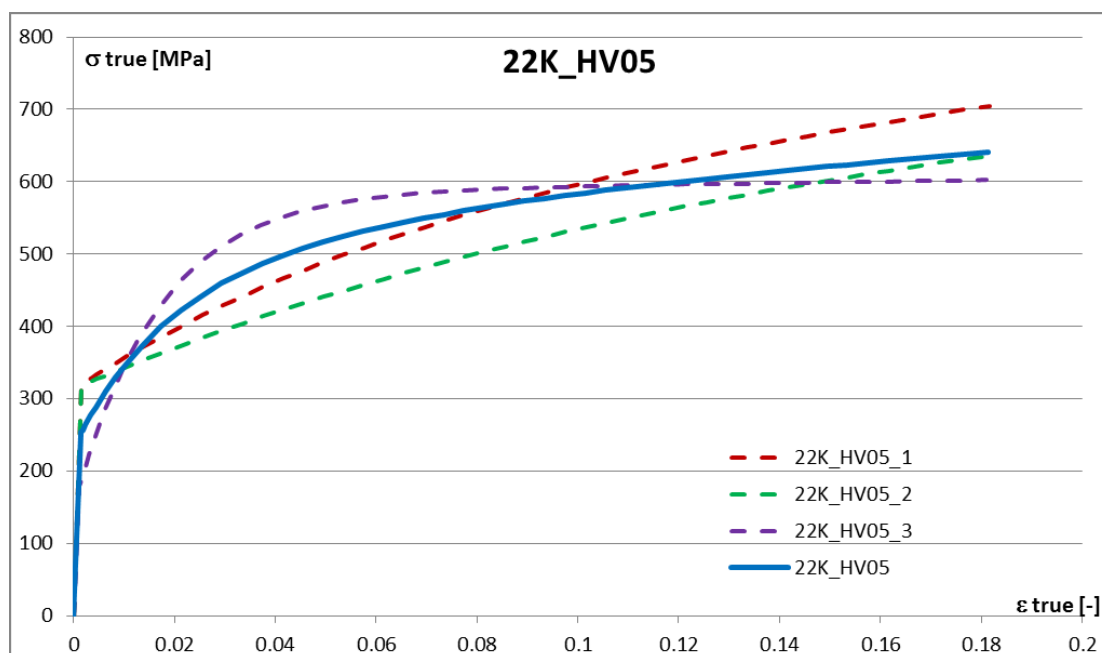


Obr. 7.2.1 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.1 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.1 oceli 22K

Tyto všechny průměrné D-N křivky z jednotlivých sad měření s různými zatíženími jsou spolu s celkovou průměrnou skutečnou D-N křivkou z měření tvrdosti na oceli 22K (22K) zobrazeny na obr. 7.2.4 a jsou zde porovnávány s experimentální skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky (tahová zkouška).



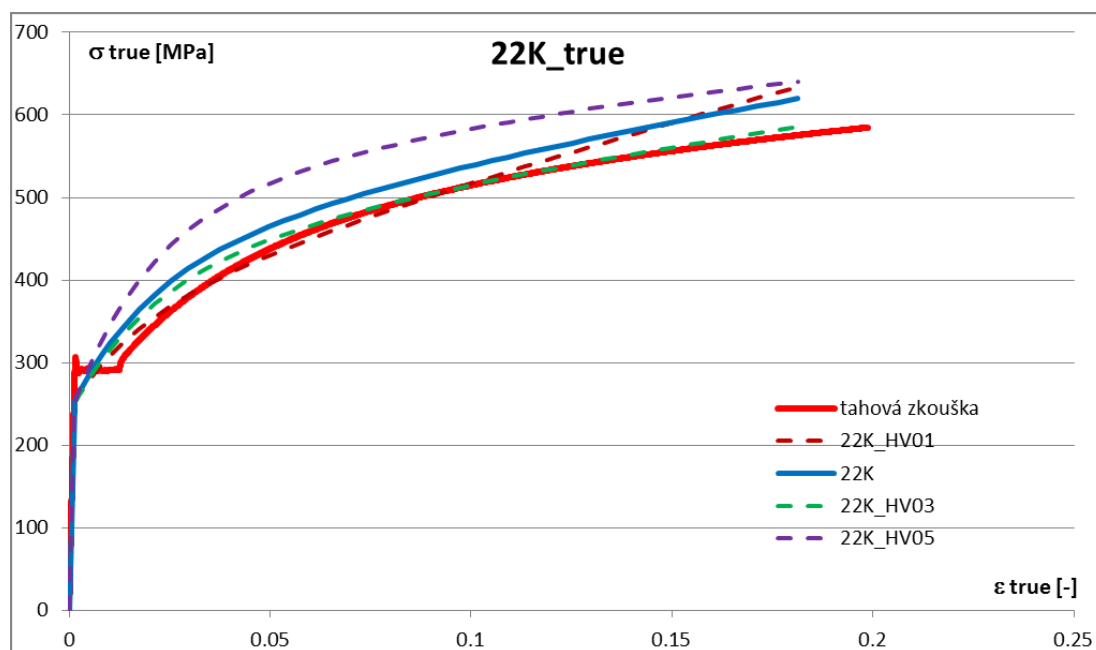
Obr. 7.2.2 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.3 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.3 oceli 22K



Obr. 7.2.3 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.5 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti HV0.5 oceli 22K

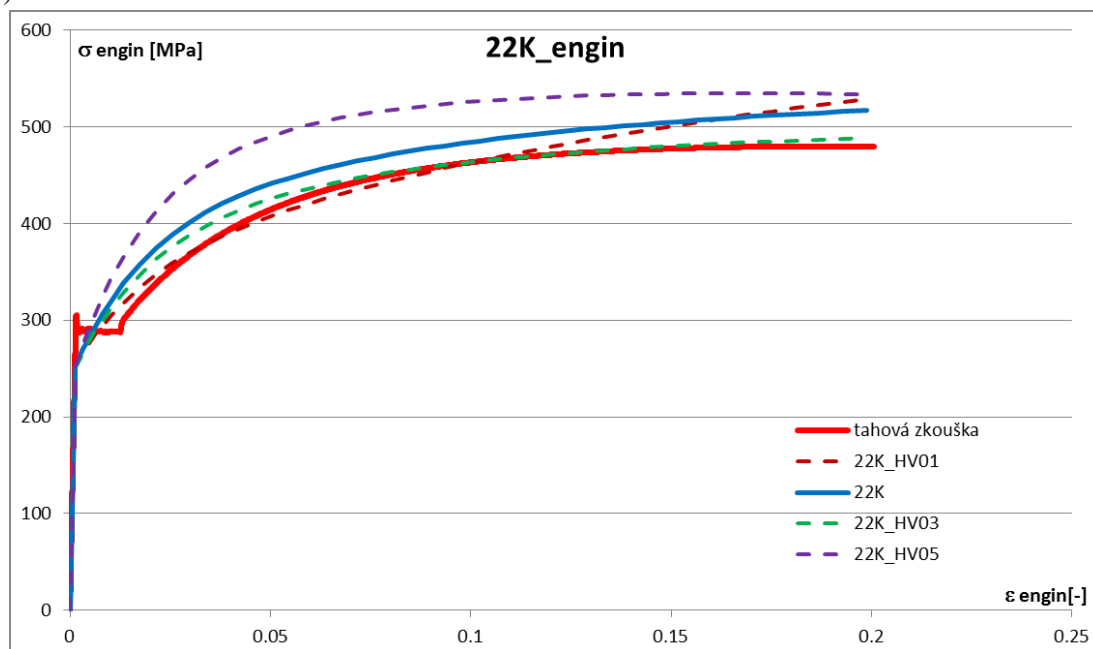
Na obrázku 7.2.4 jsou znázorněny skutečné deformačně-napěťové křivky, které byly získány laděním modelu materiálu na základě měření tvrdosti postupně HV0.1, HV0.3 a HV0.5. Dále je na tomto obrázku výsledná naladěná deformačně-napěťová křivka oceli 22K, která vznikla zprůměrováním naladěných deformačně-napěťových křivek z měření tvrdosti různým zatížením.

Výsledná skutečná deformačně-napěťová křivka (22K) je na tomto obrázku porovnávána se skutečnou deformačně-napěťovou křivkou získanou experimentální tahovou zkouškou (tahová zkouška).



Obr. 7.2.4 - Porovnání výsledné průměrné skutečné deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 22K

Na následujícím obrázku 7.2.5 jsou znázorněny smluvní deformačně-napěťové křivky, které byly získány přepočtem (rovnice 6.4 a 6.5) naladěných skutečných deformačně-napěťových křivek uvedených na obr. 7.2.4. Je zde porovnávána výsledná naladěná smluvní deformačně-napěťová křivka (22K) se smluvní deformačně-napěťovou křivkou získanou experimentální tahovou zkouškou (tahová zkouška).



Obr. 7.2.5 - Porovnání výsledné průměrné smluvní deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 22K

Následující tabulka ukazuje hodnoty základních materiálových charakteristik oceli 22K získané z ladění modelu materiálu numerickým výpočtem pomocí programu OptiSLang na základě provedeného měření tvrdosti HV0.1, HV0.3 a HV0.5 v porovnání s hodnotami získanými z experimentální tahové zkoušky.

Tab. 7.2.1. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik oceli 22K získaných z optimalizace modelu materiálu na základě měření instrumentované tvrdosti HV0.1, HV0.3 a HV0.5 s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		HV0.1	HV0.3	HV0.5	Celkové hodnocení	Experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	267,5 (-6,8%)	267,4 (-6,8%)	275,9 (-3,9%)	270,3 (-5,8%)	R_{eH} =305,1 R_{eL} =286,9
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	597,5 (+24,4%)	496,0 (+3,3%)	534,9 (+11,4%)	529,6 (+10,3%)	480,1
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	204 890 (-0,3%)	202 685 (-1,4%)	201 955 (-1,7%)	203 176 (-1,2%)	205 602

Optimalizace modelu materiálu pomocí programu OptiSLang u oceli 22K je opět mírně nadhodnocená v porovnání s hodnotami materiálových charakteristik a deformačně-napěťových křivek získaných z tahových zkoušek. Jedním z důvodů může být opět nalezení pevnější struktury oceli (u měření tvrdosti HV0.5) oproti pevnosti globálnějšího vzorku oceli (viz kap. 7.1). Výsledky celkové průměrné deformačně-napěťové a celkových materiálových charakteristik jsou v přijatelné shodě s hodnotami a křivkami z tahové zkoušky. Pouze hodnota meze pevnosti je v mírně větší odchylce (+10,3%).

7.3. Vyhodnocení výsledků z ladění modelu materiálu neznámé oceli „X“

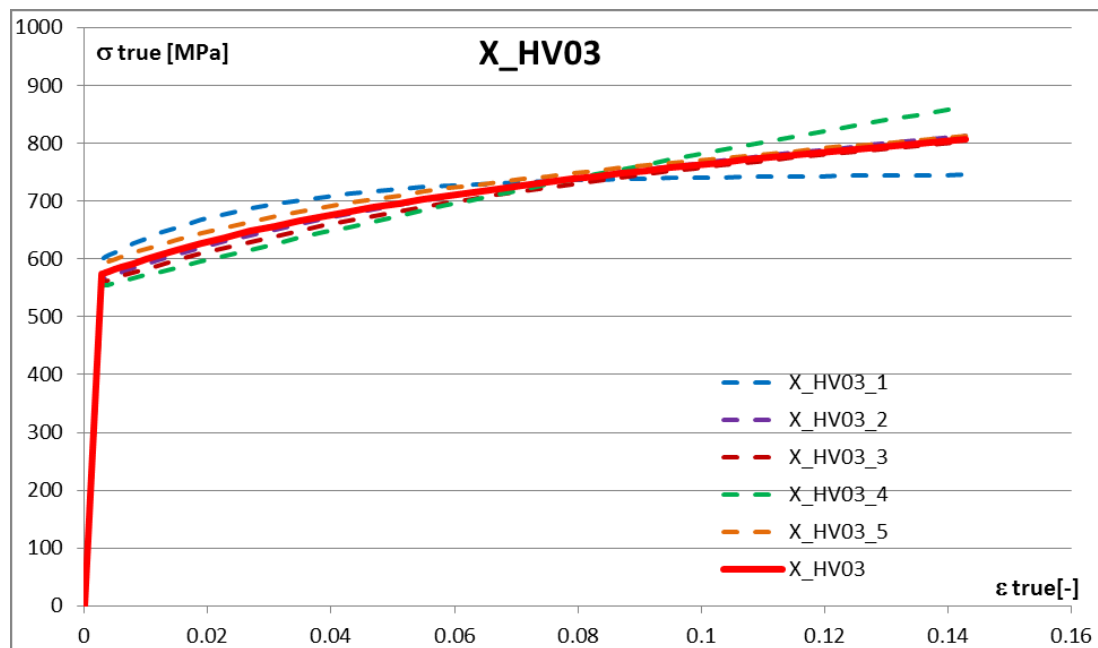
Při stanovování mechanických vlastností ocelí 10Ch2MFA a oceli 22K na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti byly zpřesněny detaily metodiky pro stanovení mechanických vlastností (přesný postup zpracování naměřených dat, nastavení programu OptiSLang).

Pro konečné ověření přesnosti zvolené metodiky stanovení materiálových vlastností materiálu na základě provedeného instrumentálního měření tvrdosti byla vybrána na AV ČR v Brně, ÚMVI předem neznámá ocel, na které bylo provedeno 5 měření instrumentované tvrdosti HV0.3 pro ověření metodiky s použitím softwaru OptiSLang a 5 měření instrumentované tvrdosti s maximální hloubkou vtisku 6 μm pro ověření metodiky s použitím optimalizace metodou „online“. Data z tohoto měření byla použita ke stanovení mechanických vlastností této oceli, pracovníě označená jako ocel „X“. Materiálové vlastnosti stanovené danou metodikou (a oběma metodami optimalizace) oceli „X“ byly následně porovnány s materiálovými vlastnostmi určenými z experimentální tahové zkoušky následně provedené na této oceli.

7.3.1. Využití programu OptiSLang

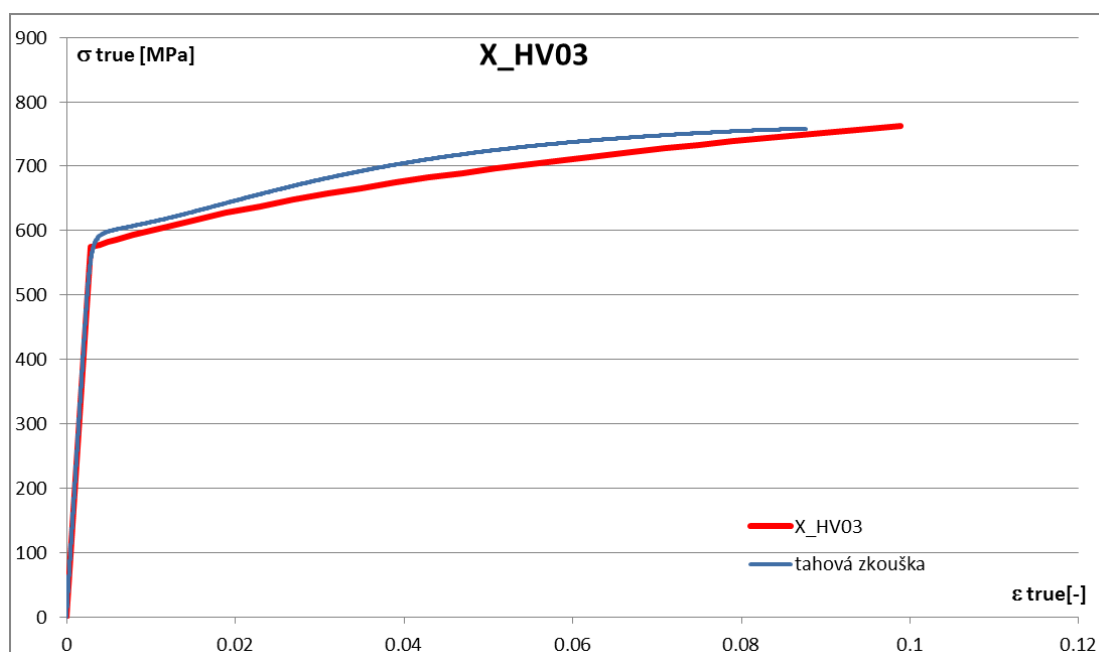
Z naladěných deformačně-napěťových křivek z jednotlivých vtisků byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka (obr. 7.3.1). Jak již bylo uvedeno, výsledkem optimalizace

simulovaného měření tvrdosti je nejen stanovit základní mechanické vlastnosti materiálu, ale také dostat správnou deformačně-napětovou křivku, a to pouze v oblasti plastické stability (do meze pevnosti), která je odečtena ze smluvní deformačně-napětové křivky (obr. 7.3.3). Proto na následujícím obrázku (obr. 7.3.1) jsou všechny deformačně-napětové křivky zobrazeny pouze po tuto oblast.



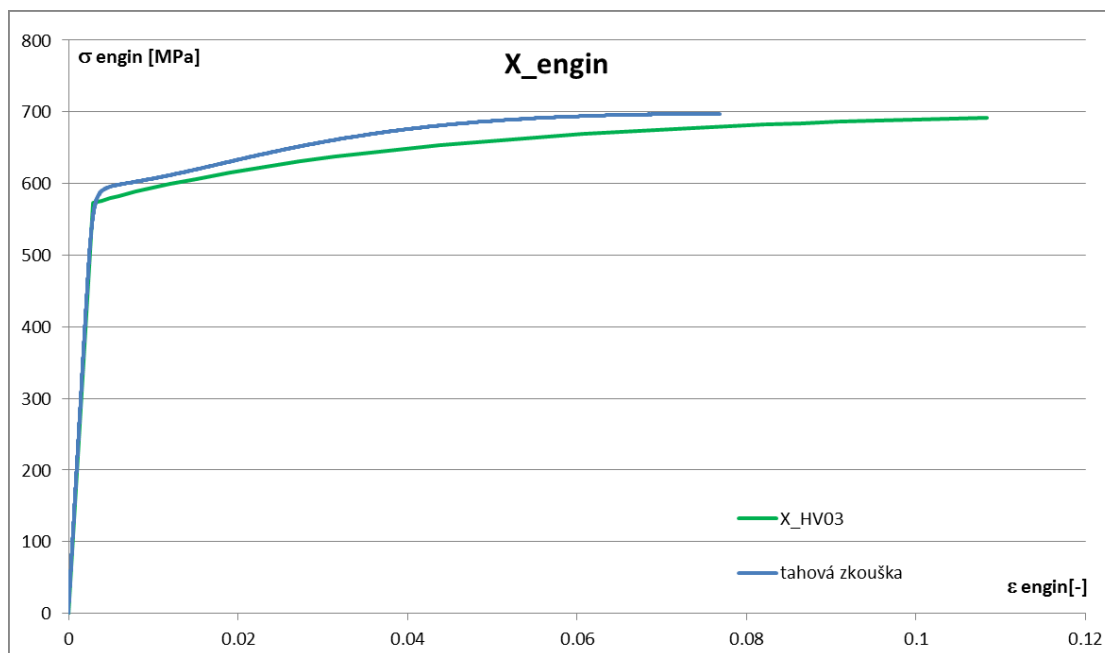
Obr. 7.3.1 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků HV0.3 a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (X_HV03) z měření instrumentované tvrdosti HV0.3 neznámé oceli „X“

Po naladění modelu materiálu na základě provedeného měření tvrdosti HV0.3 na neznámé oceli „X“ byla dodána experimentální tahová křivka této oceli. Následně tak bylo provedeno porovnání naladěných křivek s obdrženou experimentální křivkou (obr. 7.3.2).



Obr. 7.3.2 - Porovnání výsledné průměrné skutečné deformačně-napětové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky u neznámé oceli „X“

Na následujícím obrázku 7.3.3 je znázorněna smluvní deformačně-napětová křivka, která byla získána přepočtem (rovnice 6.4 a 6.5) nalaďené skutečné deformačně-napětové křivky uvedené na obr. 7.3.2. Je zde porovnávána výsledná nalaďená smluvní deformačně-napětová křivka (X_HV03) se smluvní deformačně-napětovou křivkou získanou experimentální tahovou zkouškou (tahová zkouška). Z této nalaďené smluvní D-N křivky byly stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti oceli „X“.



Obr. 7.3.3 - Porovnání výsledné průměrné smluvní deformačně-napětové křivky s optimalizací modelu materiálu pomocí MKP výpočtu programem OptiSLang se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u neznámé oceli „X“

Následující tabulka ukazuje hodnoty základních materiálových charakteristik neznámé oceli „X“ získanými z ladění modelu materiálu numerickým výpočtem pomocí programu OptiSLang na základě provedeního měření tvrdosti HV0.3 v porovnání s hodnotami získanými z experimentální tahové zkoušky.

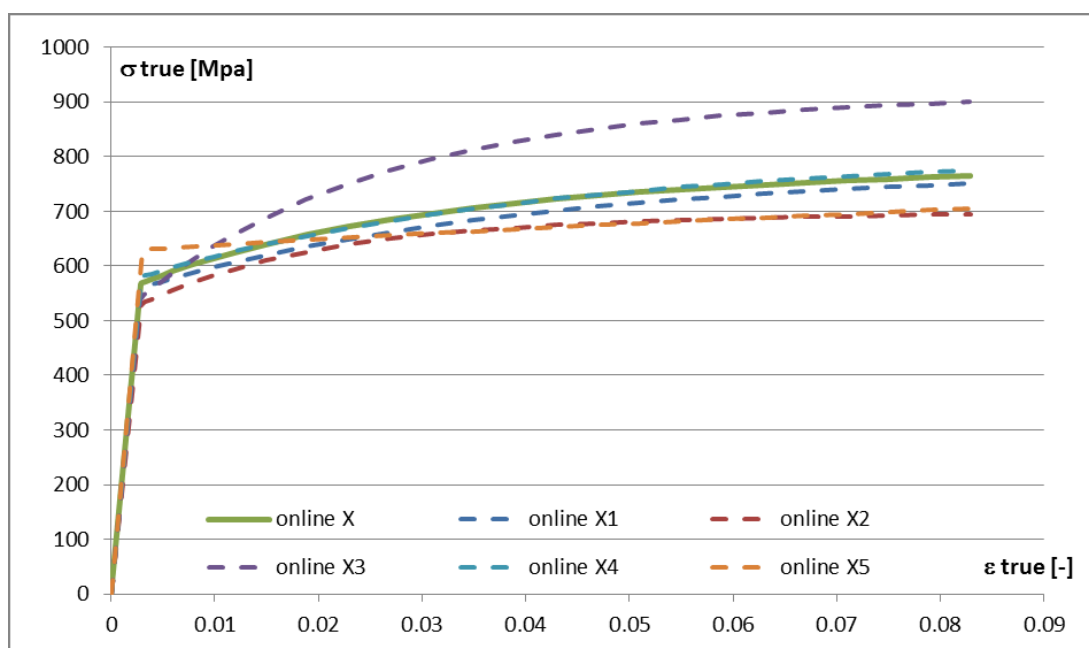
Tab. 7.3.1. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik neznámé oceli „X“ získaných z optimalizace modelu materiálu na základě měření instrumentované tvrdosti HV0.3 s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	579 (-2,8%)	595,4
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	703 (+0,8%)	697,2
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	205 573 (+0,6%)	204 200

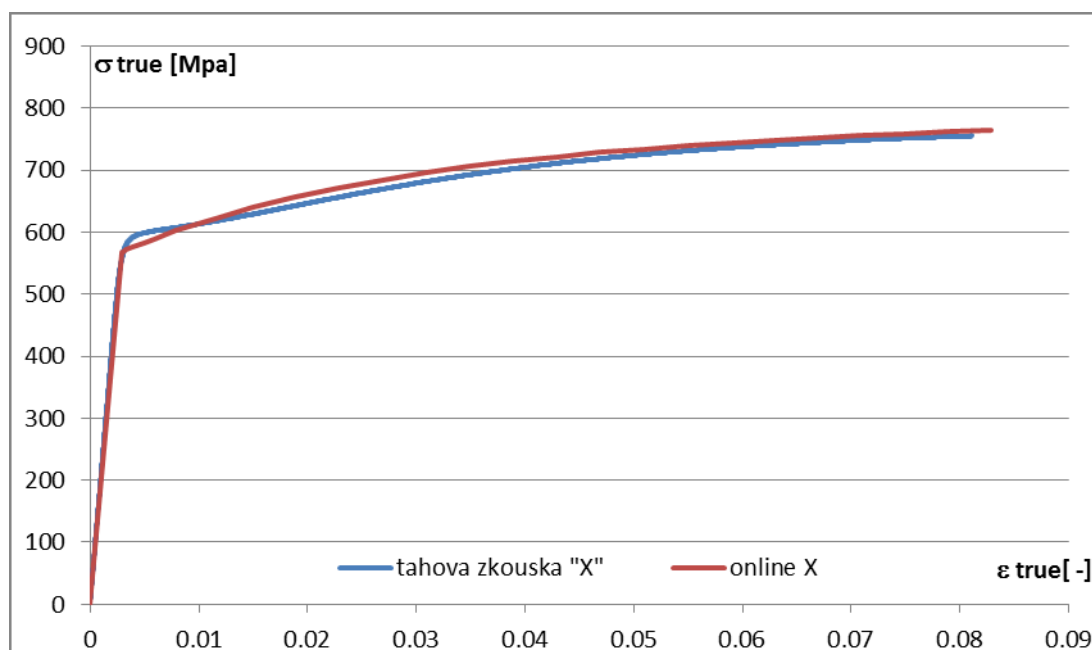
Při optimalizaci modelu materiálu oceli „X“ pomocí programu OptiSLang bylo dosaženo vynikající shody. Optimalizovaná deformačně-napěťová křivka je nepatrně podhodnocena v její zpevňovací části v porovnání s experimentální tahovou zkouškou. Hodnoty materiálových charakteristik z optimalizace modelu materiálu se liší v porovnání s hodnotami z tahové zkoušky maximálně o 2,8%, kdy je o tuto hodnotu podhodnocena mez kluzu.

7.3.2. Využití metody „online“

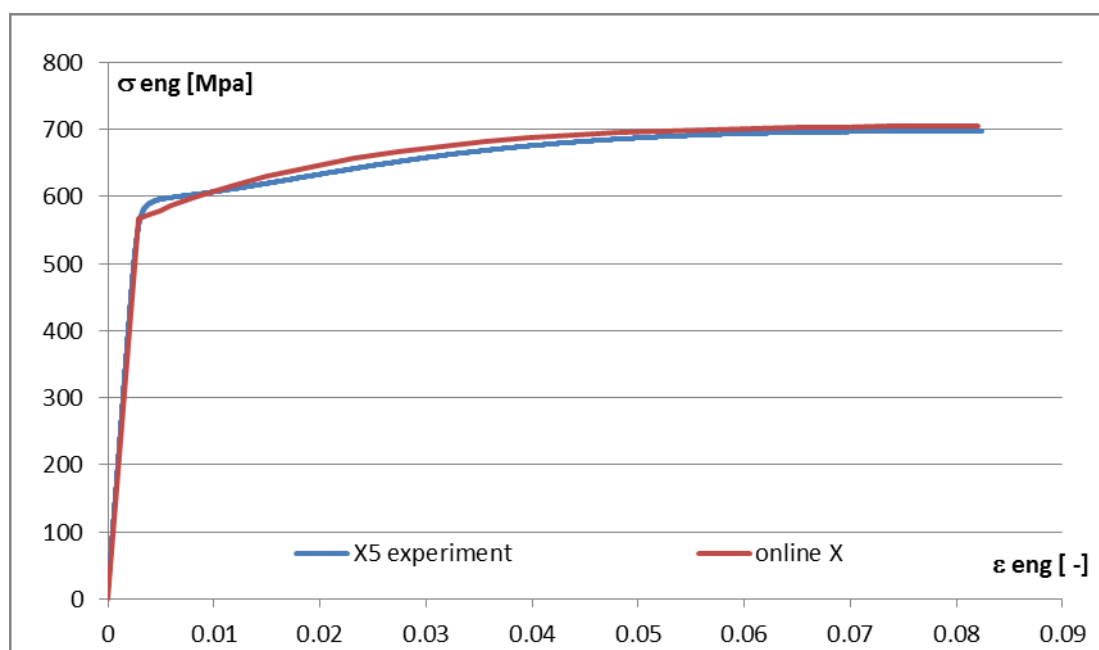
Při využití metody „online“ byly výsledky vyhodnocovány na základě provedených pěti měření instrumentované tvrdosti do maximální hloubky vtisku 6 μm . Z naladěných deformačně-napěťových křivek z jednotlivých vtisků byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka (obr. 7.3.4 – online X). Tato křivka byla opět porovnána s experimentální křivkou z tahové zkoušky (obr. 7.3.5) a byla tak ověřena přesnost metodiky stanovení mechanických vlastností s použitím optimalizace metodou „online“. Na obr. 7.3.6 je zobrazena optimalizovaná smluvní D-N křivka, ze které jsou opět stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Je zde také porovnána s experimentální smluvní D-N křivkou.



Obr. 7.3.4 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu z jednotlivých vtisků metodou „online“ a výsledná průměrná skutečná D-N křivka z měření instrumentované tvrdosti neznámé oceli „X“



Obr. 7.3.5 - Porovnání výsledné průměrné skutečné deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu metodou „online“ se skutečnou D-N křivkou z tahové zkoušky u neznámé oceli „X“



Obr. 7.3.6 - Porovnání výsledné průměrné smluvní deformačně-napěťové křivky s optimalizací modelu materiálu metodou „online“ se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u neznámé oceli „X“

Následující tabulka ukazuje hodnoty základních materiálových charakteristik neznámé oceli „X“ získanými z ladění modelu materiálu metodou „online“ na základě provedeného měření tvrdosti do maximální hloubky vtisku 6 μm v porovnání s hodnotami získanými z experimentální tahové zkoušky.

Tab. 7.3.2. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik neznámé oceli „X“ získaných z optimalizace modelu materiálu pomocí metody „online“ s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		metoda „online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	579 (-2,8%)	595,4
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	704 (+1%)	697,2
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	207 846 (+1,8%)	204 200

Při optimalizaci modelu materiálu oceli „X“ pomocí metody „online“ bylo dosaženo vynikající shody (obdobně jako u metody s programem OptiSLang). Optimalizovaná deformačně-napěťová křivka je nepatrně podhodnocena pouze v oblasti smluvní meze kluzu. Mez kluzu je zde podhodnocena také o 2,8% jako tomu bylo u metody s programem OptiSLang. Ve zbývajících částech D-N křivky již optimalizovaná D-N křivka celkem věrně kopíruje experimentální D-N křivku.

Z výsledků uvedených v kapitole 7.3 se dá říci, že obě metody optimalizace v rámci metodiky stanovení základních mechanických vlastností materiálu na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti jsou věrohodné a použitelné.

7.4. Vyhodnocení výsledků stanovení mechanických vlastností struktur heterogenního svarového spoje

Předchozí výsledky metodiky použité na homogenních ocelích ukazují, že postup celé metodiky byl vhodně zvolen a lze s ní stanovovat základní mechanické vlastnosti na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti. S touto metodikou tak bylo přistoupeno k hlavnímu cíli disertační práce, a to ke stanovení základních mechanických vlastností jednotlivých struktur heterogenního svarového spoje vyrobeného dle vítkovické metody (obr. 7.4.1). Metodika byla použita pro ocel 22K ve svarovém spoji, první austenitický návar, který je navařen k oceli 22K a slouží ke zjemnění přechodů (strukturní a chemické složení) mezi ocelí 22K a austenitickou ocelí HTG svaru. Poslední strukturou HTG svaru, na které byla měřena tvrdost a u kterých byla metodika ověřena provedením experimentální tahové zkoušky na stejném vzorku jako měření tvrdosti, byla austenitická ocel. Místa získání vzorků pro ověřovací tahové zkoušky z heterogenního svarového spoje jsou patrná z obr. 6.3.1. Dále byla metodika použita na nauhličenou oblast mezi prvním návarem a ocelí 22K na heterogenním svarovém spoji. Tyto výsledky již nebylo možné porovnávat s experimentální tahovou zkouškou. Tato všechna uvedená měření byla provedena jak na heterogenním svaru v počátečním stavu, tak také na heterogenním svaru, který byl žíháním simulačně zestárnut (viz kap. 4.5.1, obr. 4.5.3). To bylo provedeno z důvodu sledování případné změny mechanických vlastností materiálu v čase. Pro každý druh materiálu (rozlišujeme druh ocele a simulační stárnutí) byly pro použití metodiky provedeny vždy tři vtisky a na základě těchto vtisků byly stanoveny základní mechanické vlastnosti.

Všechny výsledky ze stanovení mechanických vlastností uvedených materiálů na základě provedeného instrumentovaného měření jsou postupně uvedeny v této kapitole. Jsou zde uvedeny výsledky stanovených materiálových charakteristik a tyto hodnoty porovnávány s hodnotami získaných z experimentálních tahových zkoušek stejně jako tomu bylo v kapitolách 7.1-7.3. Pouze stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti není ověřeno tahovou zkouškou, protože tuto zkoušku pro reálné ověření nešlo provést.

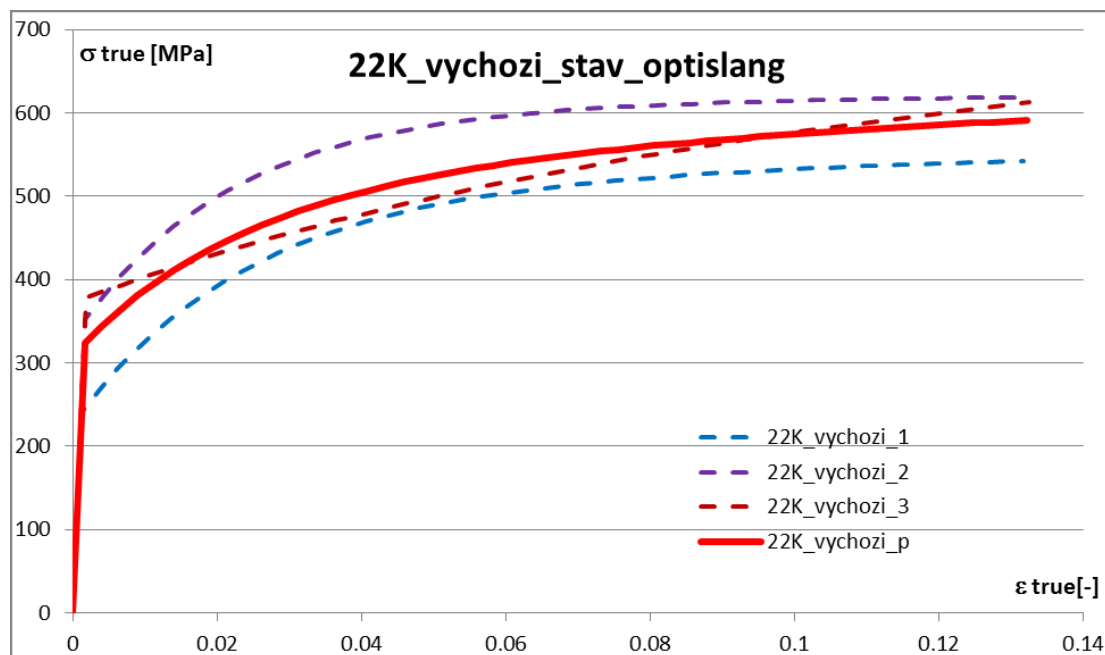


Obr. 7.4.1 – Heterogenní svarový spoj před řezným procesem pro výrobu vzorků k experimentálnímu měření tvrdosti a tahovým zkouškám

7.4.1. Stanovení mechanických vlastností oceli 22K u heterogenního svarového spoje

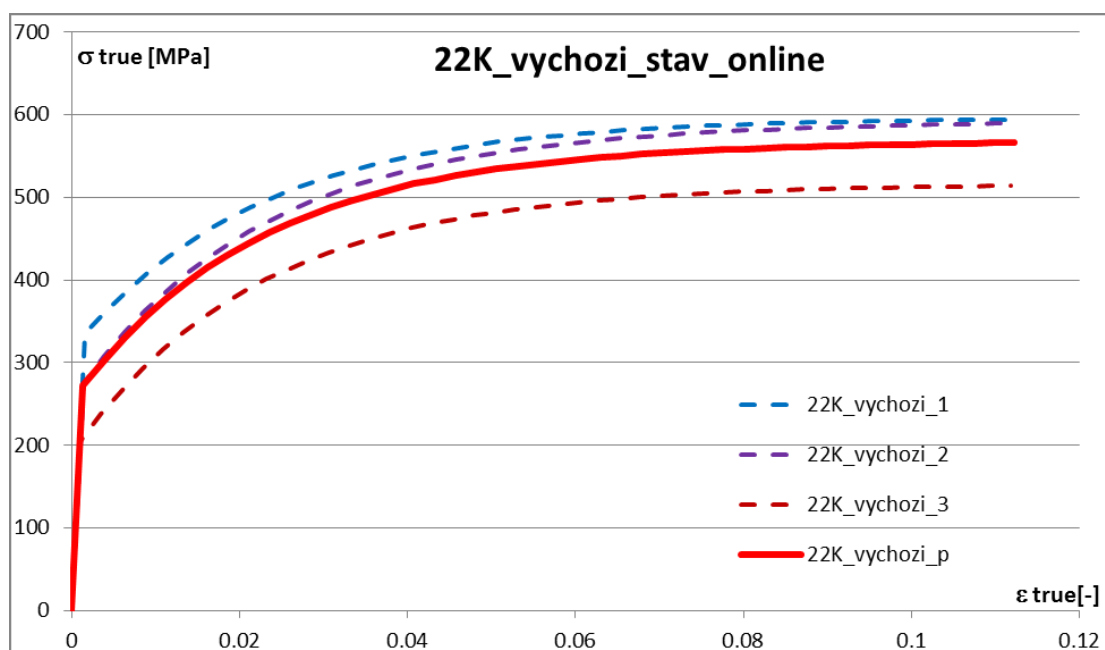
7.4.1.1. Stanovení mechanických vlastností oceli 22K v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.2 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka (22K_vychozi_p), která je zobrazena také na obr. 7.4.2.



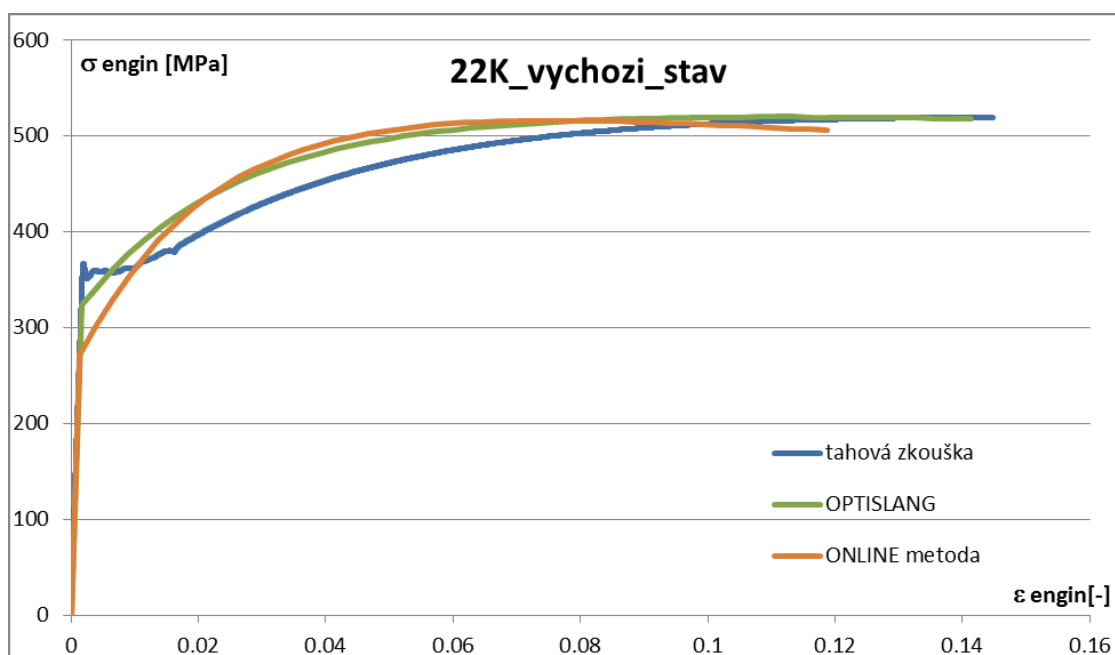
Obr. 7.4.2 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (22K_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti oceli 22K v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.3 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.3.



Obr. 7.4.3 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (22K_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti oceli 22K v počátečním stavu

Vytvořené průměrné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.4 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.1.



Obr. 7.4.4 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napětových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 22K v počátečním stavu

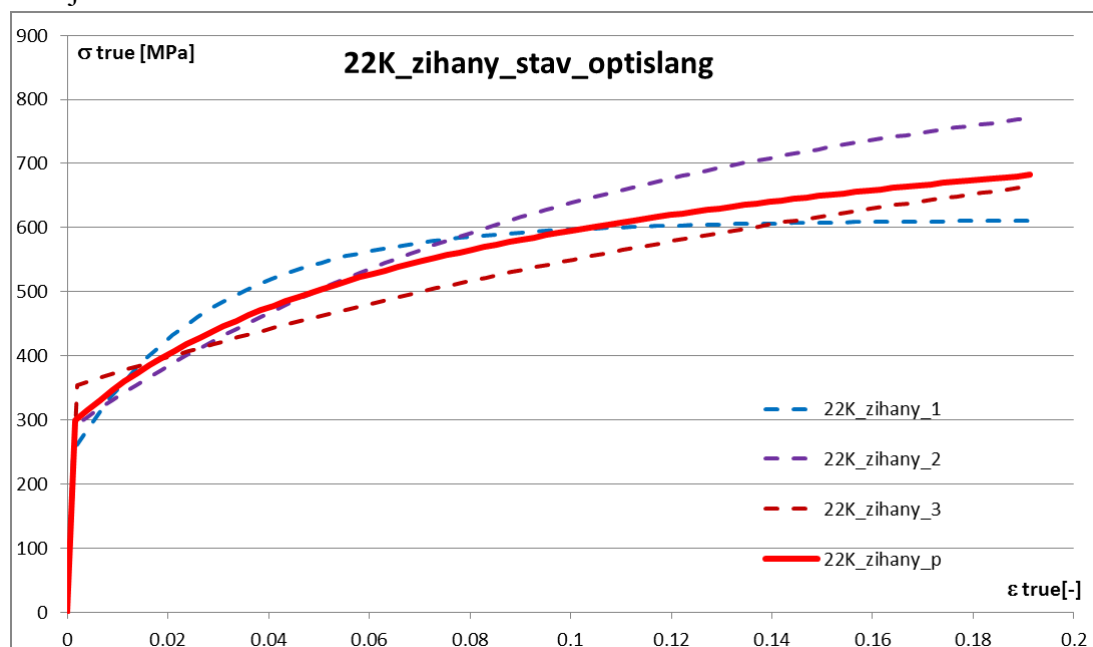
Tab. 7.4.1. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik oceli 22K v počátečním stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	339,6 (-4,7%)	297 (-16,6%)	R_{eH} =368,0 ± 1,3 R_{eL} =356,4 ± 0,4
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	519,9 (+0,0%)	516,1 (-0,7%)	519,8 ± 0,2
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	187 924 (-5,5%)	187 924 (-5,5%)	198 800 ± 1 200

Při optimalizaci modelu materiálu oceli 22K v počátečním stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo dobré shody. Optimalizované D-N křivky jsou v jejich počátku (v oblasti Lüdersovy deformace experimentální D-N křivky) nepatrně podhodnoceny. Ve zpevňovací oblasti jsou pak mírně nadhodnoceny v porovnání s experimentální tahovou zkouškou a meze pevnosti dosahují přibližně ve stejně velkém přetvoření (0.1 - 0.14). Hodnoty materiálových charakteristik z optimalizace modelu materiálu se liší v porovnání s hodnotami z tahové zkoušky nejvíce u meze kluzu vůči dolní mezi kluzu a to až o 16.6% u optimalizace metodou „online“. Tento větší rozdíl v hodnotě meze kluzu lze odůvodnit výskytem Lüdersovy deformace u experimentální křivky. Ostatní hodnoty stanovených materiálových charakteristik jsou už v přijatelném rozmezí.

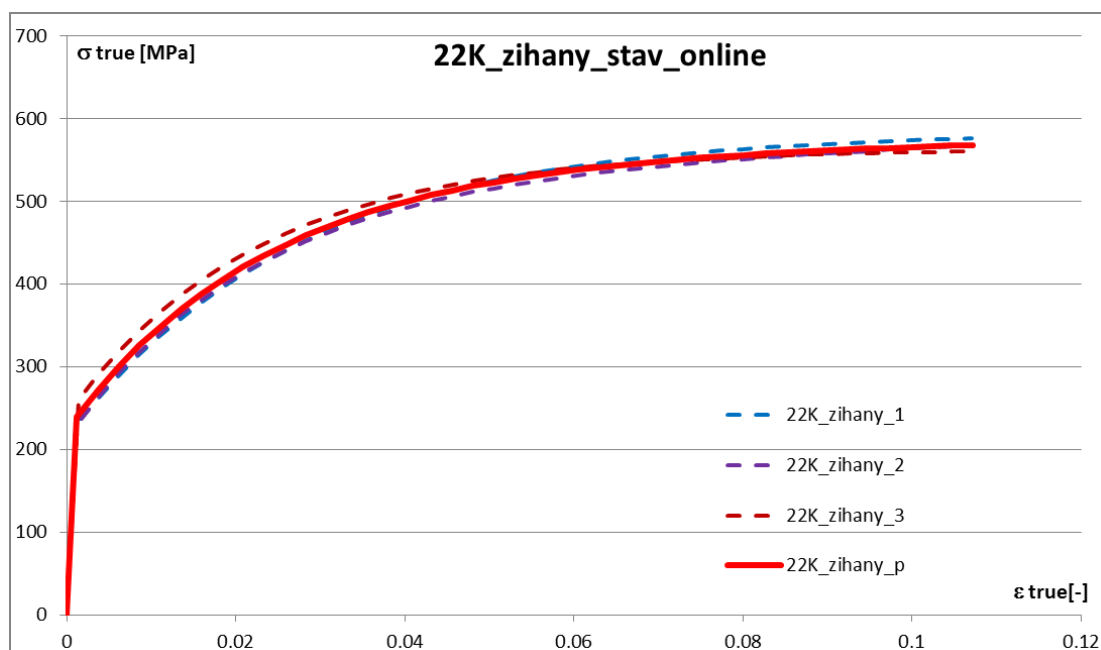
7.4.1.2. Stanovení mechanických vlastností oceli 22K v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.5 jsou zobrazeny D-N křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napět'ová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.5.



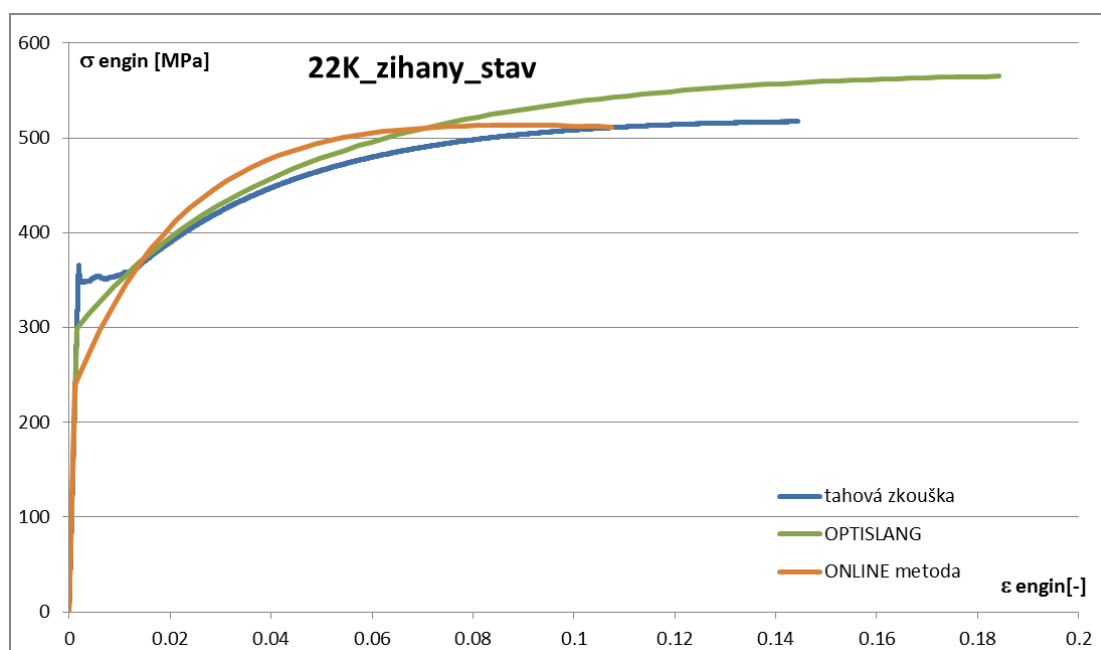
Obr. 7.4.5 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (22K_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti oceli 22K v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.6 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.6.



Obr. 7.4.6 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (22K_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti oceli 22K v zestárnutém stavu

Vytvořené výsledné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.7 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.2.



Obr. 7.4.7 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napětových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u oceli 22K v zestárnutém stavu

Tab. 7.4.2. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik oceli 22K v zestárnutém stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	312,7 (-10,7%)	265,8 (-24,1%)	R_{eH} =366,1 ± 0,7 R_{eL} =350,1 ± 2,1
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	563,3 (+8,6%)	513,5 (-1,0%)	518,7 ± 0,9
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	200 017 (-1,4%)	200 017 (-1,4%)	202 900 ± 5 150

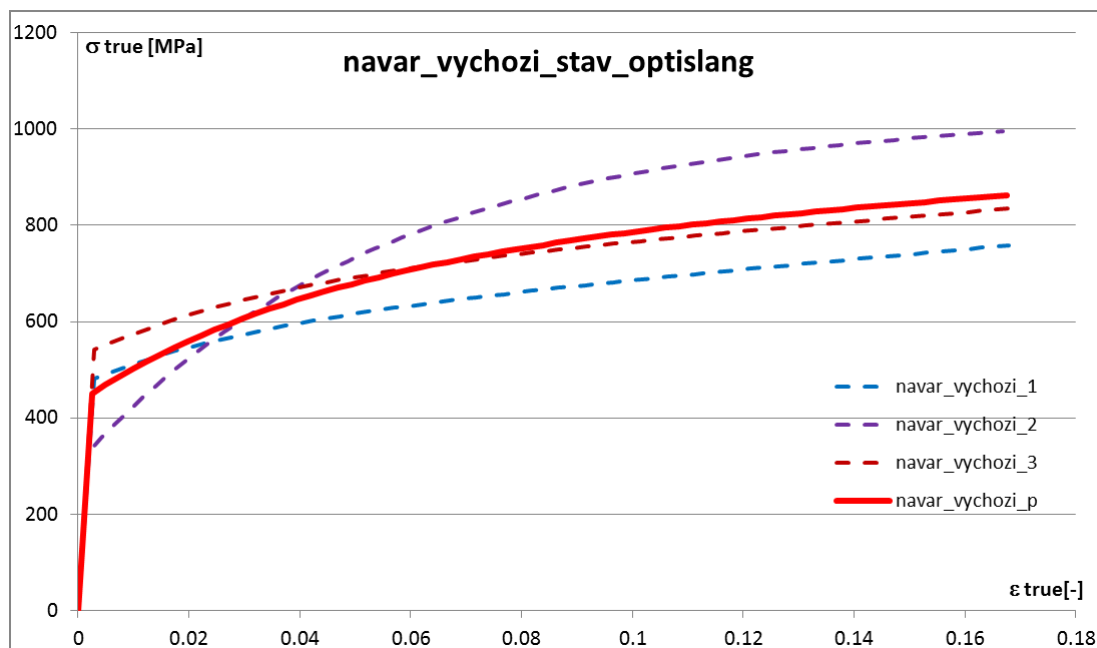
Při optimalizaci modelu materiálu oceli 22K v zestárnutém stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo dobré shody. Optimalizované D-N křivky jsou v počátku oblasti zpevnění (v oblasti Lüdersovy deformace experimentální D-N křivky) nepatrně podhodnoceny. Ve zpevňovací oblasti jsou pak mírně nadhodnoceny v porovnání s experimentální tahovou zkouškou. Křivka, získaná pomocí OptiSLangu, dosahuje vyšší hodnoty meze pevnosti v porovnání s křivkou z tahové zkoušky a dosahuje ji ve větší hodnotě přetvoření (0,18) než křivka z tahové zkoušky (0,14). D-N křivka získaná pomocí metody online dosahuje téměř totožné meze pevnosti za menší hodnoty přetvoření (0,11) než D-N křivka z tahové zkoušky. Větší odchylky materiálových charakteristik u vyhodnocování oceli 22K v zestárnutém stavu je opět u stanovení meze kluzu stejně jako u oceli 22K v počátečním stavu. Hodnoty stanovené meze kluzu jsou menší než dolní mez kluzu z tahové zkoušky až o 24,1% u optimalizace metodou „online“. Tento větší rozdíl v hodnotě meze kluzu lze odůvodnit výskytem Lüdersovy deformace u experimentální křivky. Ostatní hodnoty stanovených materiálových charakteristik jsou už v přijatelném rozmezí.

Na základě provedených jak tahových zkoušek, tak i instrumentovaném měření tvrdosti lze říci, že materiál 22K ve zkoumaném HTG svarovém spoji nevykazuje významné změny mechanických vlastností v závislosti na čase.

7.4.2. Stanovení mechanických vlastností 1. návaru heterogenního svarového spoje

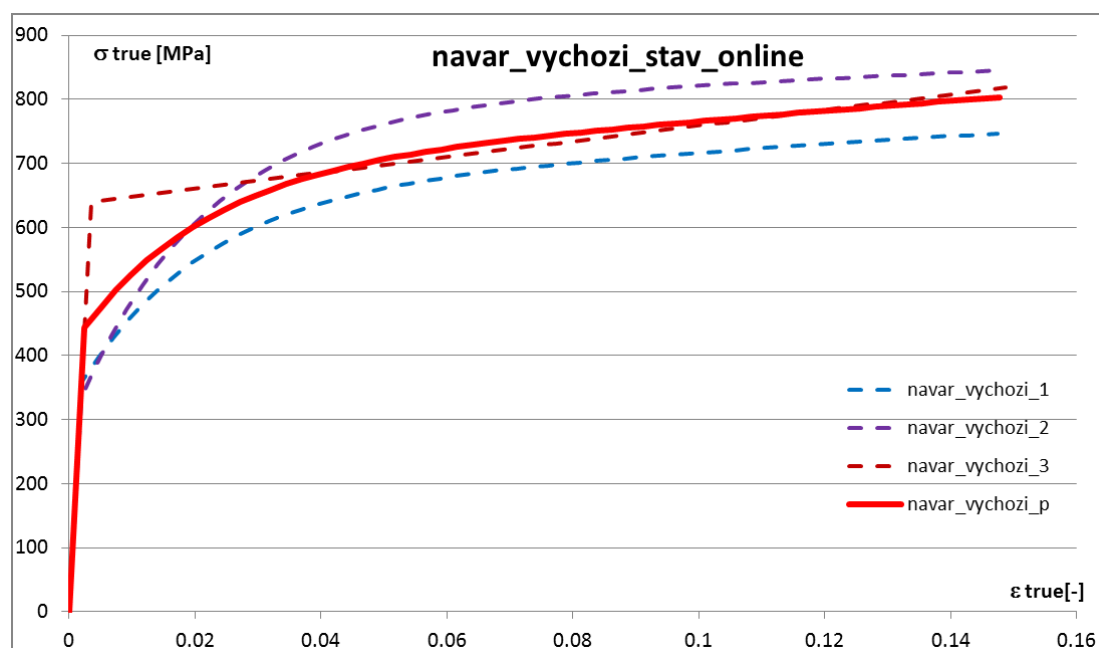
7.4.2.1. Stanovení mechanických vlastností 1. návaru v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.8 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.8.



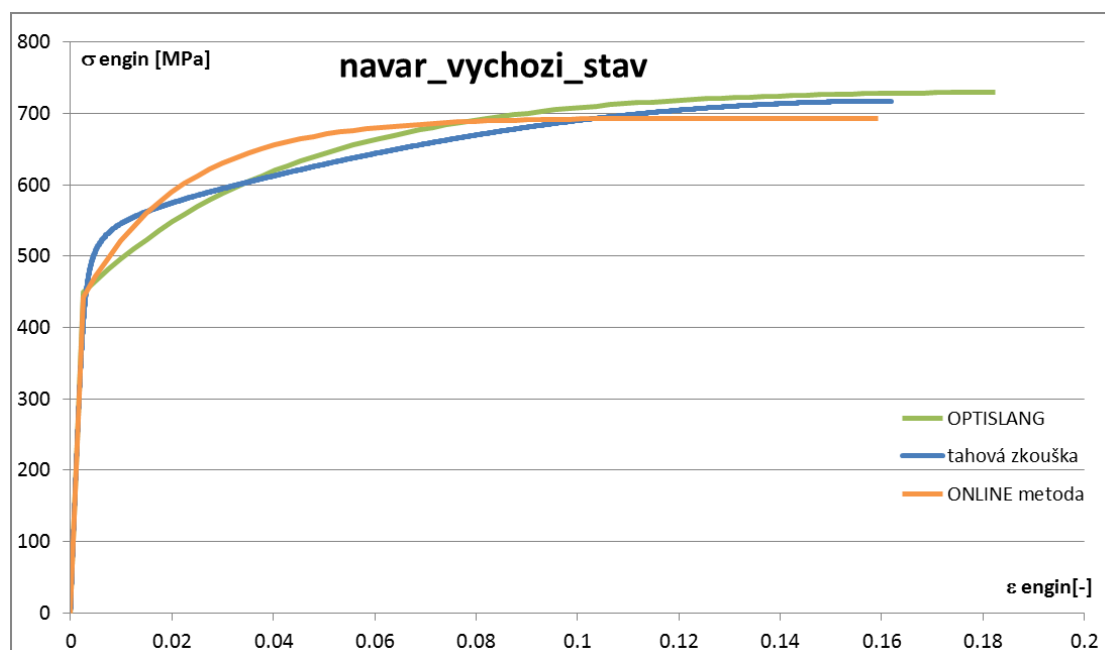
Obr. 7.4.8 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (navar_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti 1. návaru v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.9 jsou zobrazeny optimalizované deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.9.



Obr. 7.4.9 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (navar_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti 1. návaru v počátečním stavu

Vytvořené průměrné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.10 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.3.



Obr. 7.4.10 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napěťových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u 1. návaru v počátečním stavu

Tab. 7.4.3. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik 1. návaru v počátečním stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

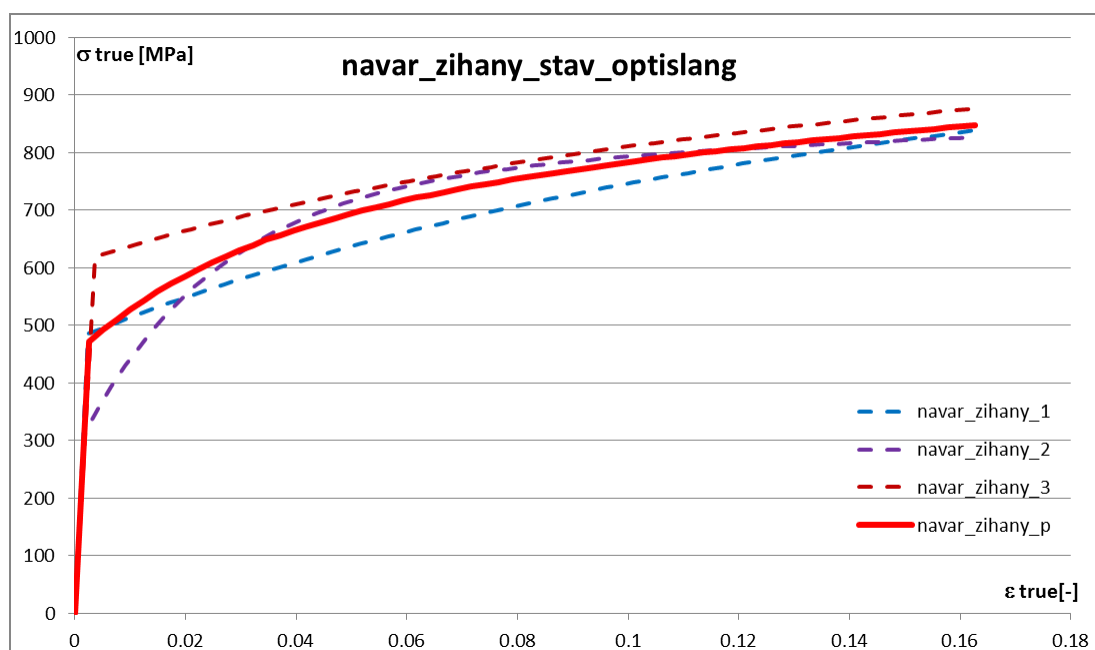
		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	465 (-6,4%)	468,7 (-5,6%)	496,6
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	729,6 (+1,7%)	693,5 (-3,3%)	717,3
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	174 591 (+14,7%)	174 591 (+14,7%)	152 200

Při optimalizaci modelu materiálu austenitického návaru ve výchozím stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo dobré shody. Při porovnání výsledných optimalizovaných D-N křivek s experimentální tahovou křivkou je dosaženo maximální odchylky 10% u optimalizované D-N křivky získané pomocí programu OptiSLang. Křivka získaná pomocí OptiSLangu dosahuje vyšší hodnoty meze pevnosti v porovnání s křivkou z tahové zkoušky a dosahuje ji v nepatrně větší hodnotě přetvoření (0,18) než křivka z tahové zkoušky (0,16). D-N křivka získaná pomocí metody online dosahuje menší hodnoty pevnosti v téměř totožné hodnotě přetvoření. Hodnoty materiálových charakteristik u vyhodnocování austenitického návaru v počátečním stavu jsou v dobré shodě s hodnotami z experimentální tahové zkoušky v podání meze kluzu a meze pevnosti. Youngův modul pružnosti je v tomto případě více nadhodnocen, a to o 14,7% oproti experimentální tahové zkoušce. Takto velká odchylka se může vyskytovat z důvodu provedené pouze jedné tahové zkoušky na návaru ve výchozím stavu.

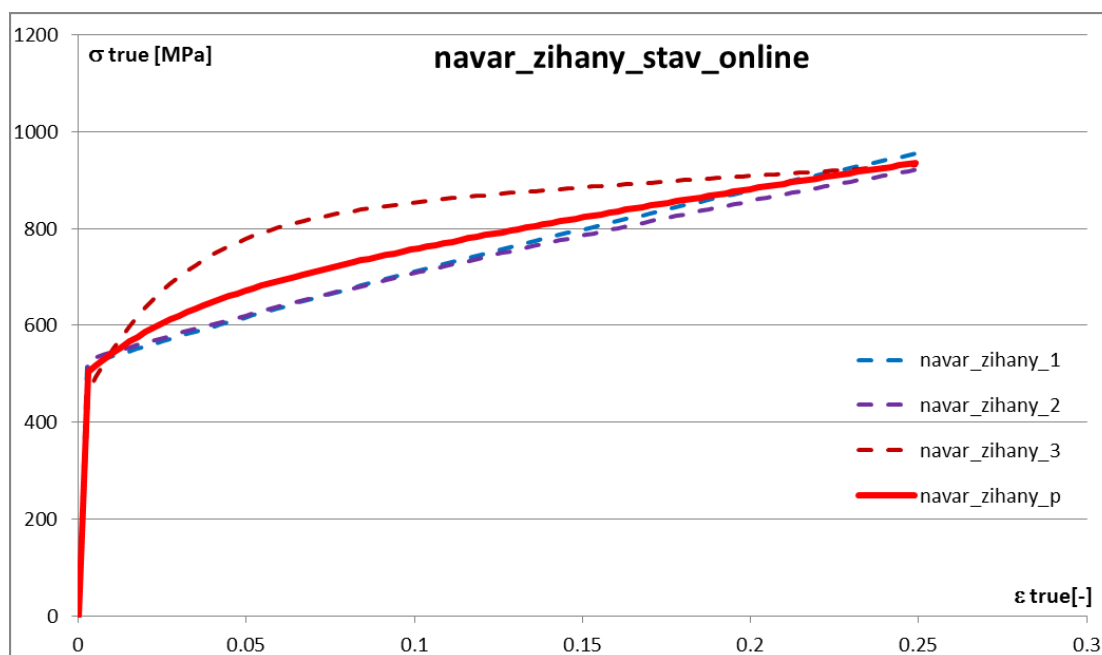
7.4.2.2. Stanovení mechanických vlastností 1. návaru v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.11 jsou zobrazeny D-N křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná D-N křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.11.

Na obrázku 7.4.12 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.12.

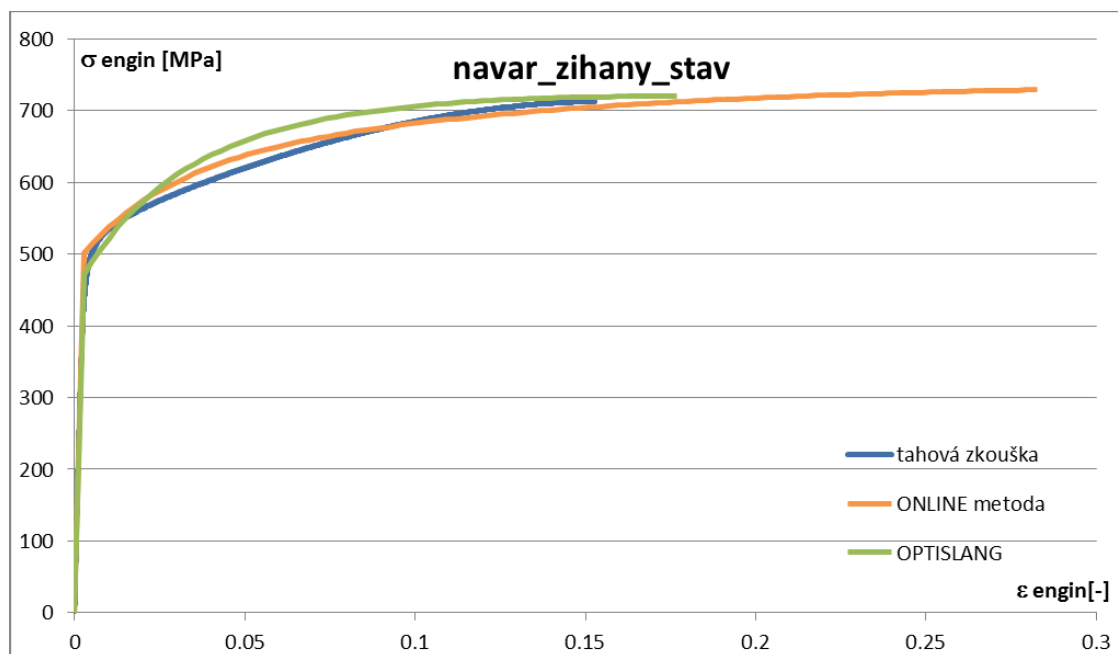


Obr. 7.4.11 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (navar_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti 1. návaru v zestárnutém stavu



Obr. 7.4.12 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (navar_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti 1. návaru v zestárnutém stavu

Vytvořené výsledné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.13 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.4.



Obr. 7.4.13 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napěťových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u 1. návaru v zestárnutém stavu

Tab. 7.4.4. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik 1. návaru v zestárnutém stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	490,8 (+1,5%)	515,0 (+6,5%)	483,5
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	722,3 (+1,3%)	732,3 (+2,7%)	712,7
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	180 361 (+5,0%)	180 361 (+5,0%)	171 700

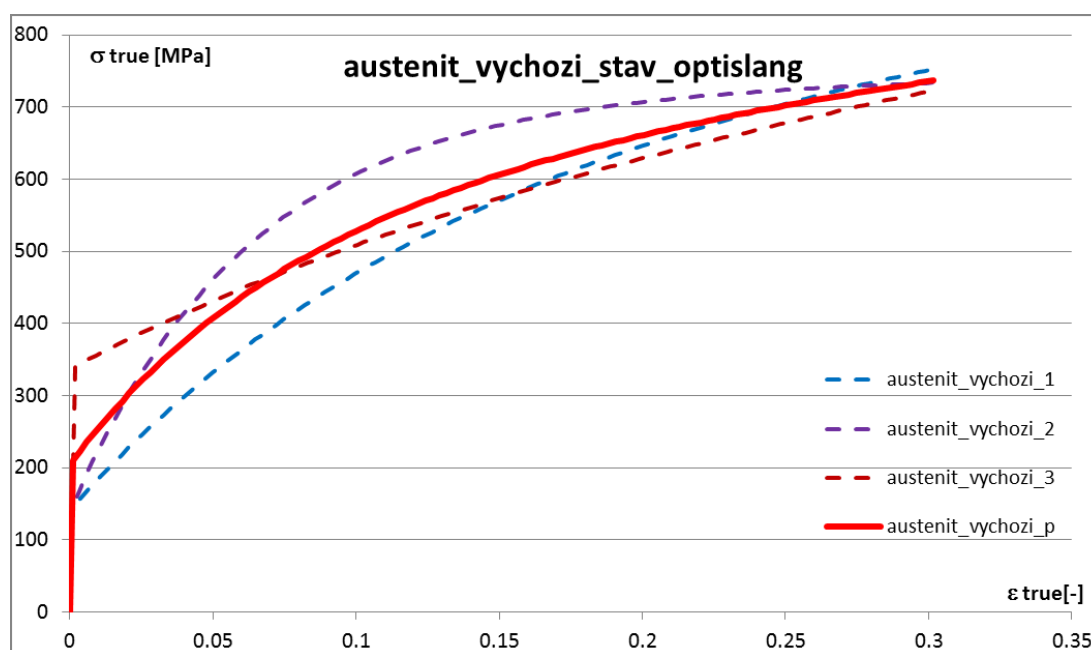
Při optimalizaci modelu materiálu austenitického návaru v simulačně zestárnutém stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo dobré shody. Při porovnání výsledných optimalizovaných D-N křivek s experimentální tahovou křivkou je dosaženo maximální odchylky 6% u optimalizované D-N křivky získané pomocí programu OptiSLang. Obě získané D-N křivky dosahují vyšší hodnoty meze pevnosti v porovnání s křivkou z tahové zkoušky. Křivka získaná pomocí programu OptiSLang dosahuje meze pevnosti při téměř totožné hodnotě přetvoření. Křivka získaná pomocí online metody dosahuje meze pevnosti při větší hodnotě přetvoření (0,28) než D-N křivka získaná při experimentální tahové zkoušce (0,15). Hodnoty materiálových charakteristik u vyhodnocování austenitického návaru v zestárnutém stavu jsou v dobré shodě s hodnotami z experimentální tahové zkoušky, kdy největší odchylka je 6,5%.

Na základě provedených tahových zkoušek lze říci, že materiál 1. návaru ve zkoumaném HTG svarovém spoji vykazuje mírné snížení hodnot meze kluzu a meze pevnosti, naopak navýšení hodnoty Youngova modulu pružnosti. Tyto změny jsou ovšem v řádech jednotkách procent. Vzhledem k počtu provedených tahových zkoušek na vzorcích 1. návaru je tato změna zanedbatelná a nelze ji považovat za směrodatnou.

7.4.3. Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli heterogenního svarového spoje

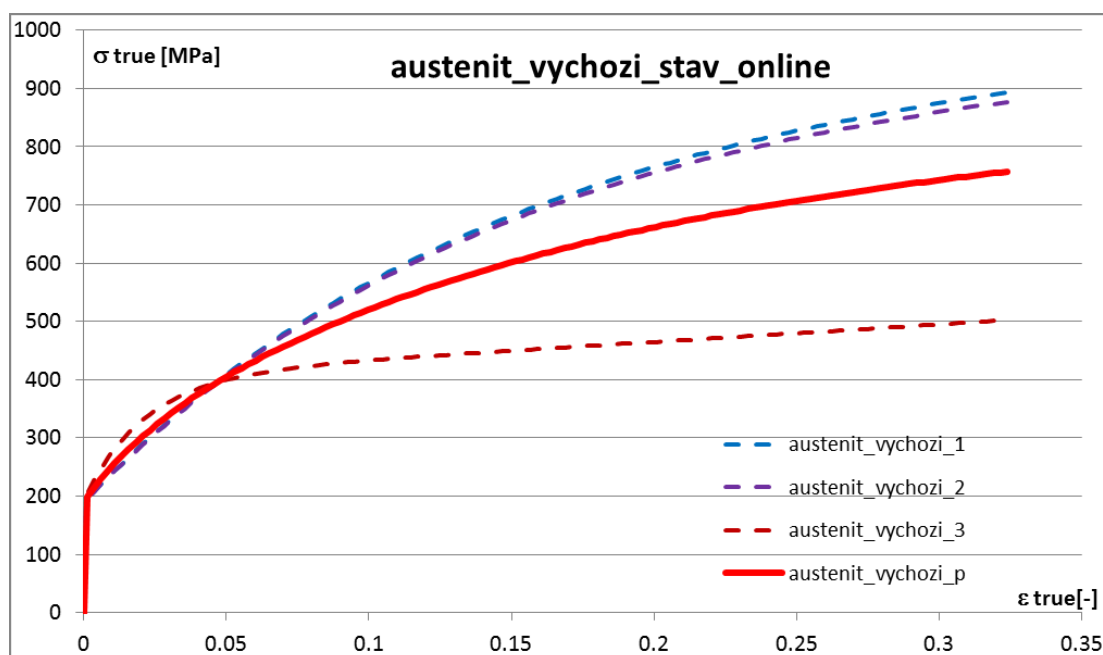
7.4.3.1. Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.14 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.14.



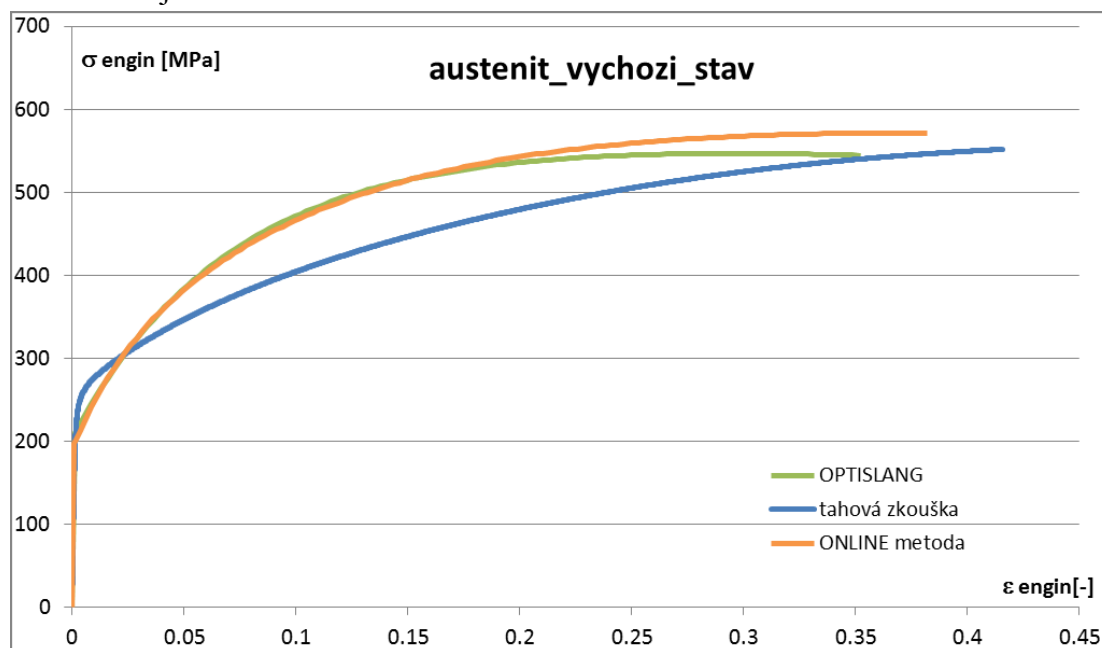
Obr. 7.4.14 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (austenit_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti austenitické oceli v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.15 jsou zobrazeny optimalizované deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.15.



Obr. 7.4.15 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (austenit_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti austenitické oceli v počátečním stavu

Vytvořené průměrné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.16 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.5.



Obr. 7.4.16 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napěťových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u austenitické oceli v počátečním stavu

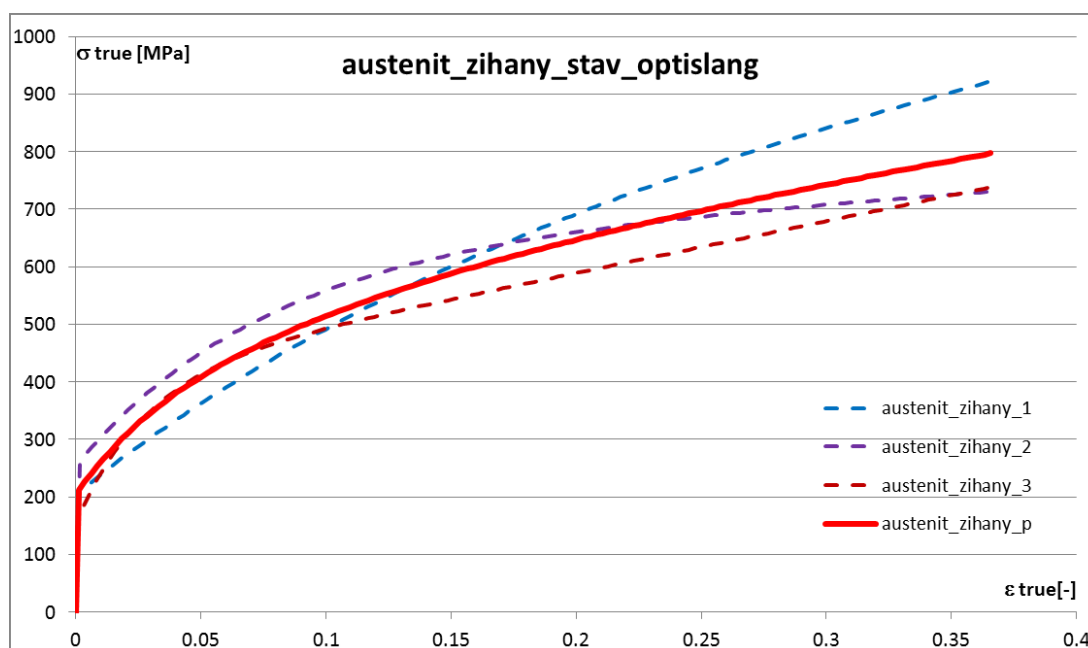
Tab. 7.4.5. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik austenitické oceli v počátečním stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	220,6 (-10,3%)	211,3 (-14,0%)	245,8 ± 2,2
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	547 (-1,7%)	551,5 (-1,0%)	556,6 ± 0,3
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	186 621 (-1,5%)	186 621 (-1,5%)	189 400 ± 4 600

Při optimalizaci modelu materiálu austenitické oceli v počátečním stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo uspokojivé shody. Shoda optimalizovaných D-N křivek s experimentální tahovou křivkou je v tomto případě nejmenší ze všech optimalizací posuzovaných ocelí. Při porovnání výsledných optimalizovaných D-N křivek s experimentální tahovou křivkou je dosaženo maximální odchylky až 16% u optimalizované D-N křivky získané pomocí programu OptiSLang. Obě získané D-N křivky dosahují nižších hodnot meze kluzu a meze pevnosti v porovnání s křivkou z tahové zkoušky, ale v oblasti jejich zpevnění jsou nadhodnoceny oproti experimentální tahové křivce. Optimalizované křivky dosahují téměř stejné meze pevnosti jako experimentální křivka, jen se liší, při jaké hodnotě přetvoření jí dosahují. Křivka získaná pomocí programu OptiSLang dosahuje meze pevnosti při přetvoření 0,35, křivka získaná pomocí online metody dosahuje meze pevnosti při hodnotě přetvoření 0,38 a D-N křivka získaná při experimentální tahové zkoušce dosahuje meze pevnosti při přetvoření 0,42. Hodnoty meze kluzu jsou mírně podhodnoceny u obou metodik oproti smluvní mezi kluzu z experimentální zkoušky.

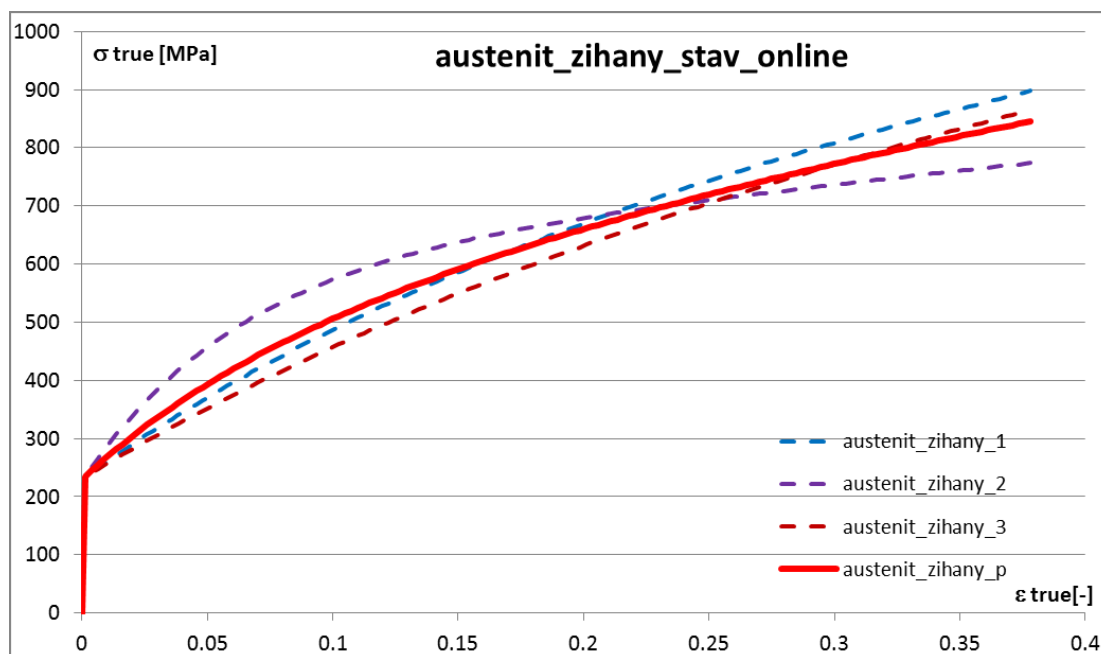
7.4.3.2. Stanovení mechanických vlastností austenitické oceli v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.17 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.17.



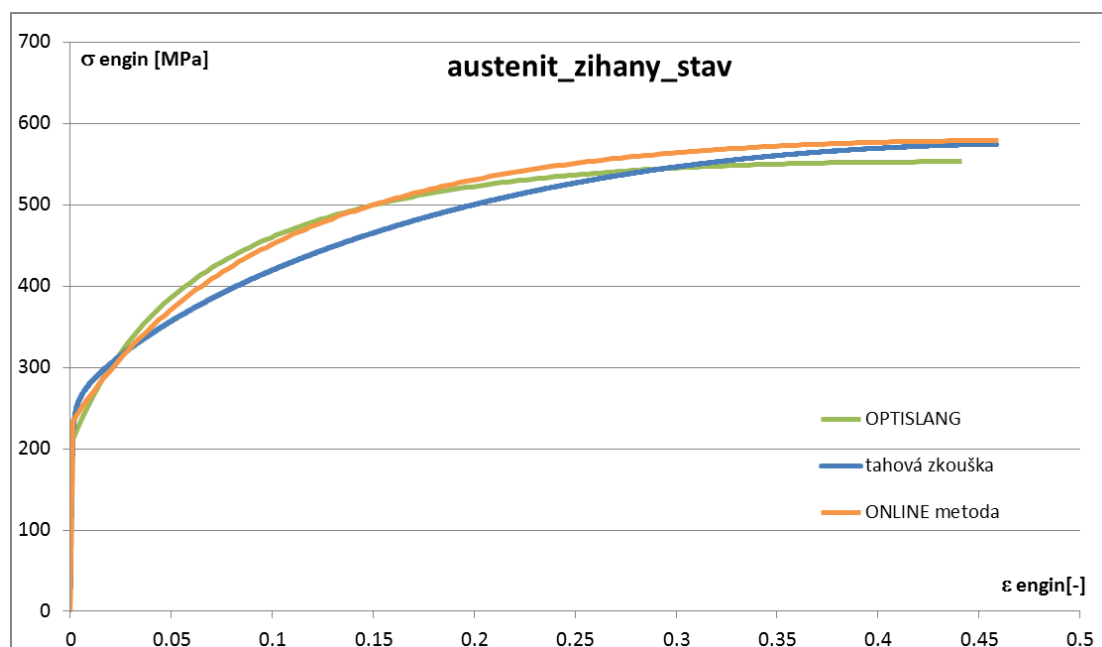
Obr. 7.4.17 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (austenit_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti austenitické oceli v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.18 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.18.



Obr. 7.4.18 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (austenit_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti austenitické oceli v zestárnutém stavu

Vytvořené výsledné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Tyto hodnoty a výsledné smluvní D-N křivky, získané oběma metodami optimalizace (OPTISLANG a ONLINE metoda), byly porovnány s hodnotami a smluvní D-N křivkou (tahová zkouška) z provedené experimentální tahové zkoušky. Porovnání křivek je znázorněno na obr. 7.4.19 a porovnání hodnot je uvedeno v tabulce 7.4.6.



Obr. 7.4.19 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napěťových křivek získaných oběma metodami optimalizace se smluvní D-N křivkou z tahové zkoušky u austenitické oceli v zestárnutém stavu

Tab. 7.4.6. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik austenitické oceli v zestárnutém stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami s hodnotami získanými experimentální tahovou zkouškou

		OptiSLang	„online“	experiment
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	223,9 (-11,3%)	242,9 (-3,8%)	252,4 ± 0,5
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	552,8 (-3,7%)	579,3 (+0,9%)	573,9 ± 0,7
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	173 220 (-3,4%)	173 220 (-3,4%)	179 300 ± 3 200

Při optimalizaci modelu materiálu austenitické oceli v simulačně zestárnutém stavu HTG svarového spoje oběma metodami bylo dosaženo dobré shody. Při porovnání výsledných optimalizovaných D-N křivek s experimentální tahovou křivkou je dosaženo maximální odchylky 9,8% u optimalizované D-N křivky získané pomocí programu OptiSLang. Obě získané D-N křivky dosahují meze pevnosti při téměř stejném přetvoření jako experimentální tahová křivka. Obě křivky

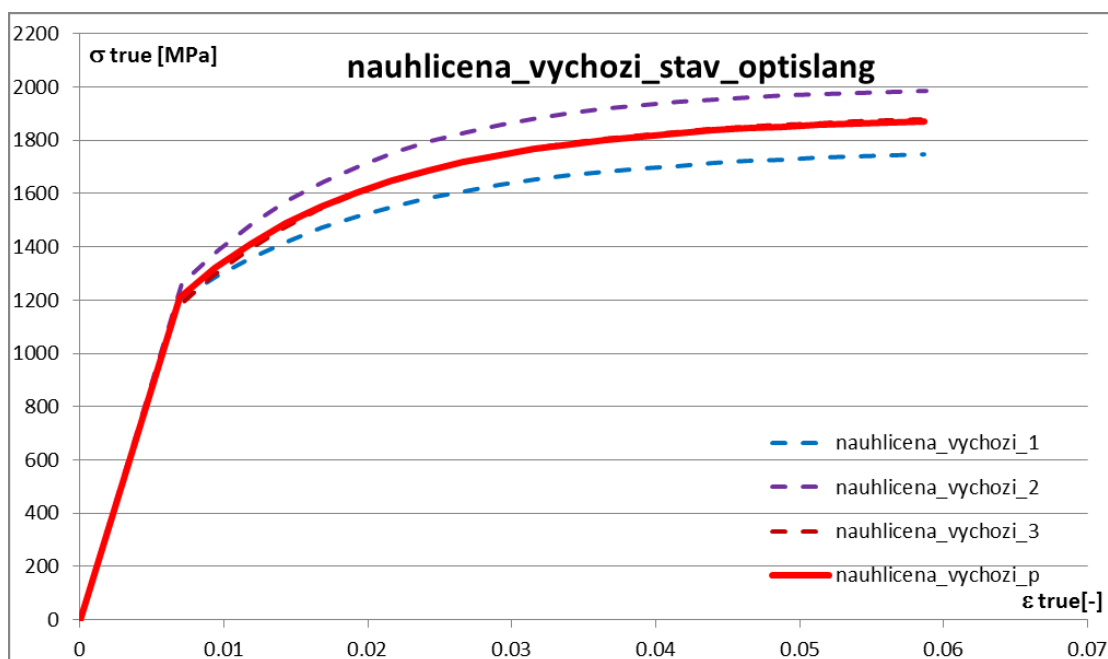
jsou v jejich zpevňovací části mírně nadhodnocené oproti experimentální tahové křivce. Materiálové charakteristiky získané oběma metodami jsou v dobré shodě při porovnání s hodnotami získaných z tahových zkoušek. Pouze mez kluzu získaná pomocí programu OptiSLang je více podhodnocená (11,3%).

Na základě provedených tahových zkoušek lze říci, že austenitická ocel ve zkoumaném HTG svarovém spoji vykazuje mírné zvýšení hodnot meze kluzu a zejména pak meze pevnosti. Navýšení materiálových charakteristik vychází také z optimalizovaných D-N křivek. Lze tak říci, že materiál se vlivem času zpevňuje. Toto zpevnění je ovšem odvozené z provedených 4 experimentálních tahových zkoušek a je opět pouze v řádech jednotek procent.

7.4.4. Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti heterogenního svarového spoje

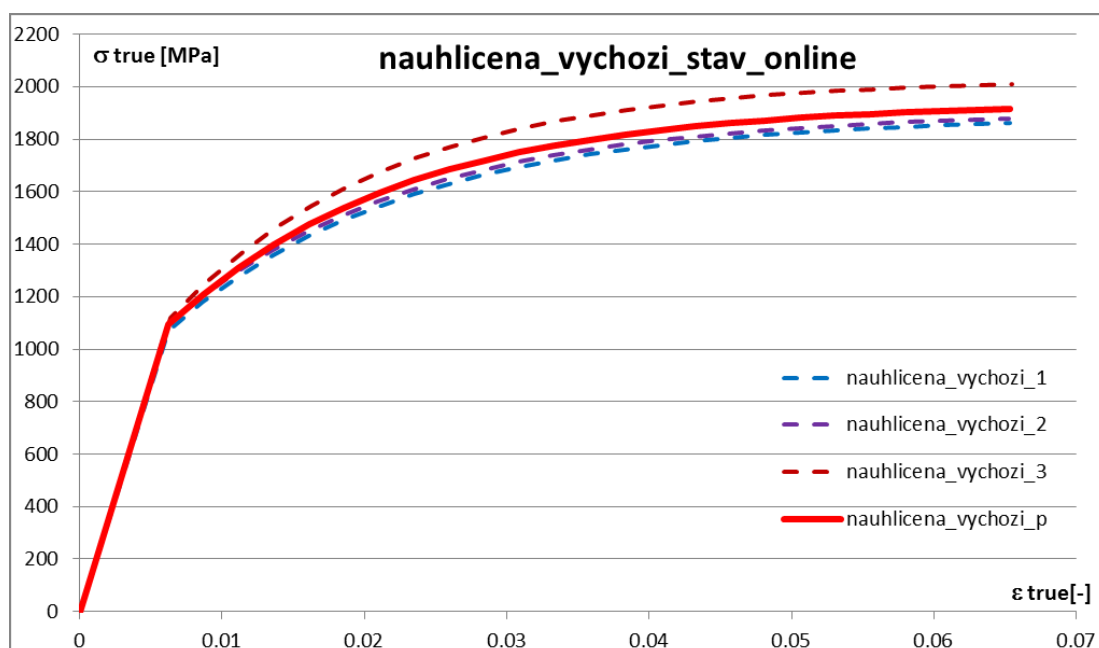
7.4.4.1. Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.20 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.20.



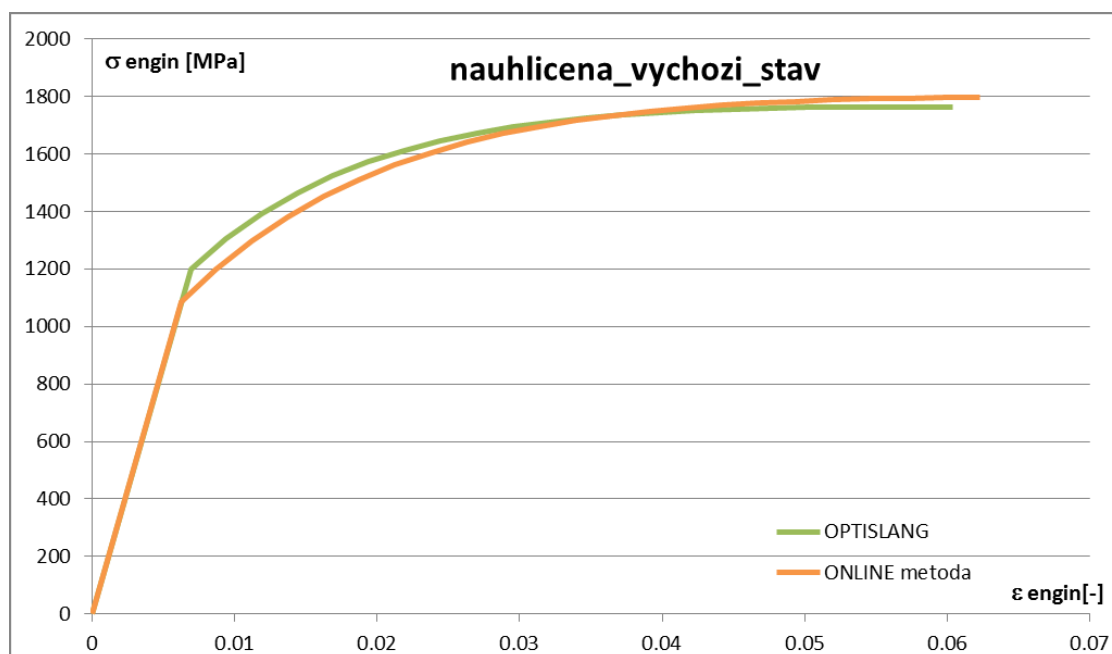
Obr. 7.4.20 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (nauhlicena_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti nauhličené oblasti v počátečním stavu

Na obrázku 7.4.21 jsou zobrazeny optimalizované deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.21.



Obr. 7.4.21 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (nauhlicena_vychozi_p) z měření instrumentované tvrdosti nauhličené oblasti v počátečním stavu

Vytvořené průměrné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Výsledky stanovení mechanických vlastností na základě měření instrumentované tvrdosti za použití metody optimalizace modelu materiálu s programem OptiSLang a metodou „online“ jsou porovnávány na obr. 7.4.22 a v tabulce 7.4.7.



Obr. 7.4.22 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napětíových křivek získaných oběma metodami optimalizace u nauhličené oblasti v počátečním stavu

Tab. 7.4.7. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik nauhličené oblasti v počátečním stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami

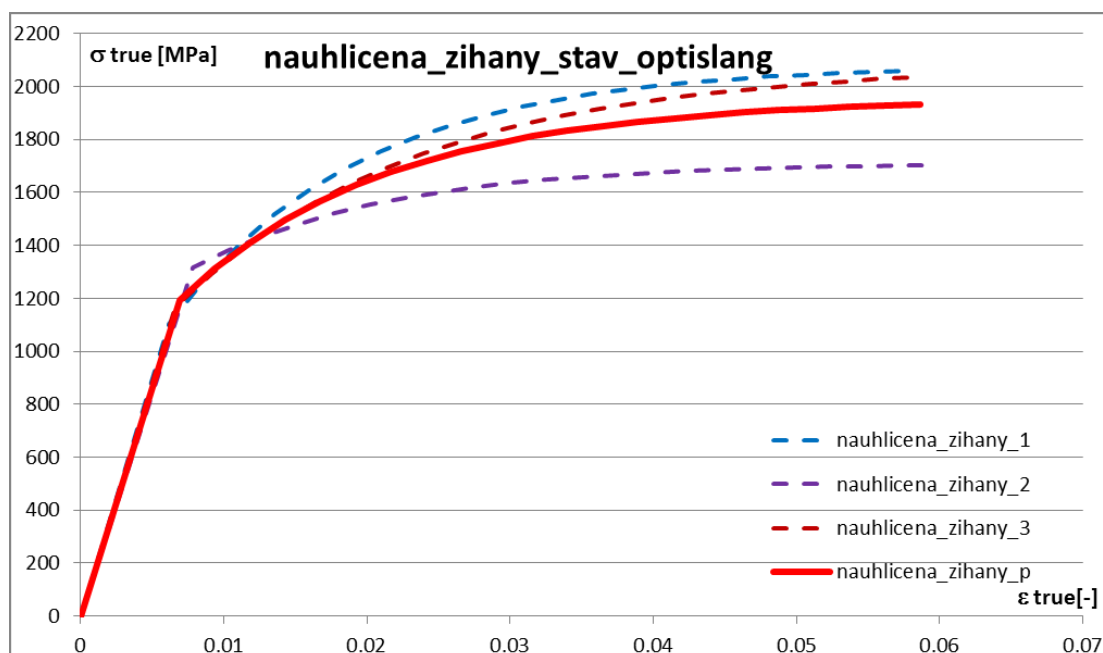
		OptiSLang	„online“
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu)	[MPa]	1300	1190,6
R_m (mez pevnosti)	[MPa]	1764,9	1796,1
E (modul pružnosti)	[MPa]	175 068	175 068

U nauhličené vrstvy se již neporovnávají optimalizované D-N křivky s experimentálními křivkami z tahových zkoušek. U nauhličené vrstvy byly stanoveny mechanické vlastnosti pouze instrumentovanou zkouškou tvrdosti.

U nauhličené vrstvy v počátečním stavu heterogenního svarového spoje bylo dosaženo oběma metodami optimalizace velmi podobných výsledků v podobě D-N křivky a následovně materiálových charakteristik. D-N křivka získaná metodou online je v počátku mírně podhodnocená v porovnání s D-N křivkou získanou pomocí programu OptiSLang. Z toho vyplývá i nižší výsledná mez kluzu o 8,4 %. V mezi pevnosti se obě metody již téměř shodují na hodnotě 1764,9 MPa (OptiSLang), případně 1796,1 MPa (online), viz tab. 7.4.7.

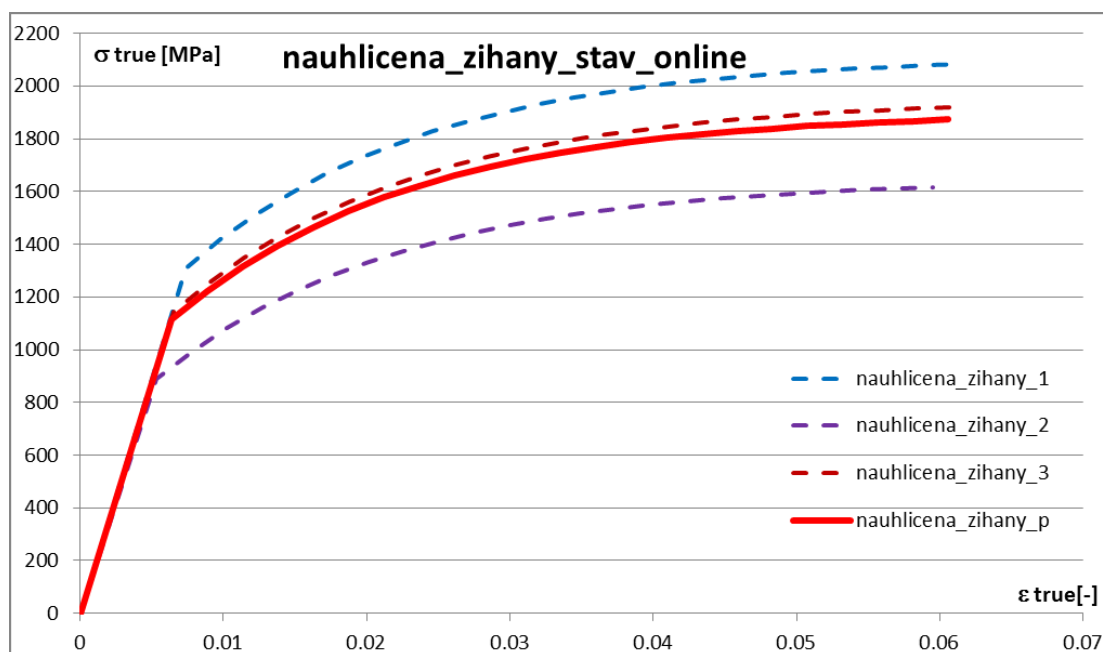
7.4.4.2. Stanovení mechanických vlastností nauhličené oblasti v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.23 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované programem OptiSLang. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.23.



Obr. 7.4.23 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu programem OptiSLang z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (nauhlicena_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti nauhličené oblasti v zestárnutém stavu

Na obrázku 7.4.24 jsou zobrazeny deformačně-napěťové křivky z jednotlivých vtisků optimalizované metodou „online“. Z jednotlivých křivek pak byla vytvořena průměrná skutečná deformačně-napěťová křivka, která je zobrazena také na obr. 7.4.24.

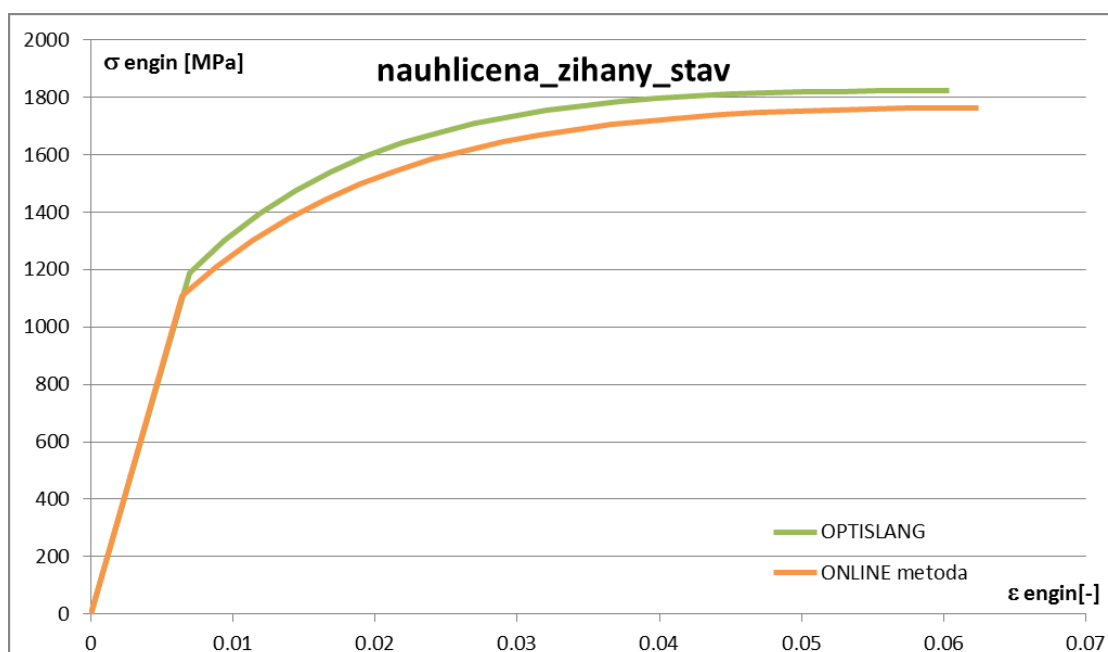


Obr. 7.4.24 – Zobrazení skutečných D-N křivek, které jsou výsledkem optimalizace modelu materiálu metodou „online“ z jednotlivých vtisků a výsledná průměrná skutečná D-N křivka (nauhlicena_zihany_p) z měření instrumentované tvrdosti nauhličené oblasti v zestárnutém stavu

Vytvořené průměrné optimalizované skutečné D-N křivky byly převedeny pomocí vztahů 6.4 a 6.5 na smluvní D-N křivky. Z těchto křivek byly následně stanoveny smluvní mez kluzu a mez pevnosti. Výsledky stanovení mechanických vlastností na základě měření instrumentované tvrdosti za použití metody optimalizace modelu materiálu s programem OptiSLang a metodou „online“ jsou porovnávány na obr. 7.4.25 a v tabulce 7.4.8.

Tab. 7.4.8. Porovnání hodnot základních materiálových charakteristik nauhličené oblasti v zestárnutém stavu heterogenního svarového spoje získaných z optimalizace modelu materiálu oběma metodami

		OptiSLang	„online“
R_{p0,2} (smluvní mez kluzu) (odchylka v %)	[MPa]	1316,3	1203,8
R_m (mez pevnosti) (odchylka v %)	[MPa]	1821,1	1763,3
E (modul pružnosti) (odchylka v %)	[MPa]	173 525	173 525



Obr. 7.4.25 - Porovnání výsledných smluvních deformačně-napěťových křivek získaných oběma metodami optimalizace u nauhličené oblasti v zestárnutém stavu

U nauhličené vrstvy heterogenního svarového spoje simulačně zestárnutého žíháním byly stanoveny základní mechanické vlastnosti také pouze instrumentovanou zkouškou tvrdosti.

U nauhličené vrstvy v zestárnutém stavu heterogenního svarového spoje je D-N křivka získaná metodou online mírně podhodnocená v porovnání s D-N křivkou získanou pomocí programu OptiSLang. Největší rozdíl mezi křivkami je v počáteční fázi křivek, kdy rozdíl mezi hodnotami mezi kluzu je až 8,5%. Tento rozdíl se postupně k mezi pevnosti snižuje až na 3,2%. Obě metody optimalizace modelu materiálu tak dosahují opět velmi podobných výsledků.

Pokud se porovnají výsledky nauhličené vrstvy heterogenního svarového spoje ve výchozím a zestárnutém stavu, tak lze říci, že změna základních mechanických vlastností po simulovaném zestárnutí není nějak výrazná a směrodatná, protože rozdíly v hodnotách mechanických vlastností jsou do 3%. Navíc hodnoty stejných základních mechanických vlastností se u zestárnutého materiálu zvyšují i snižují u každého způsobu optimalizace jinak. Toto lze konstatovat především na základě porovnání výsledků optimalizace z jednotlivých měření tvrdosti nauhličené vrstvy.

Z výsledků uvedených v kapitole 7.3 se dá říci, že obě metody optimalizace v rámci metodiky stanovení základních mechanických vlastností materiálu na základě provedení instrumentovaného měření tvrdosti jsou použitelné. Hodnoty základních mechanických vlastností posuzovaných materiálů se liší od hodnot stanovených na základě provedených tahových zkoušek převážně v řádech jednotek procent. Přitom výsledky obou metod optimalizace modelu materiálu se od sebe také významně neliší. Jak již bylo zmiňováno, metodika byla vyvíjena pro vyhodnocení velmi malých oblastí materiálových struktur jako je nauhličená vrstva heterogenního svaru. Proto byla zvolena pro vyhodnocování maximální hloubka vtisku 6 μm . Při tomto měření tvrdosti se postihuje pouze velmi malá oblast oproti experimentální tahové zkoušce. Proto je vhodné pro další vývoj a zavedení metodiky do praxe doporučeno provádět měření tvrdosti do větší maximální hloubky vtisku (větším zatížením).

8. Požadavky na vhodný tvrdoměr

V kapitole 3.1.2.3 byly uvedeny vhodné tvrdoměry, které by byly použitelné pro v této disertační práci popsanou metodiku. Jako nejvhodnější tvrdoměr pro měření v praxi, bohužel pouze na základě literární rešerše, bych označil tvrdoměr od korejské firmy Frontics. Je z uvedených tvrdoměrů nejlehčí a tudíž nejmobilitnější. Přístupnost k ne zcela dostupným místům je dle obrázků také celkem dobrá. Ovšem jako vhodnější varianta by mohla být sestrojít vlastní přenosný instrumentovaný tvrdoměr, pro který by byly vyjmenované tvrdoměry inspirací. Sestrojení vlastního tvrdoměru by bylo vhodnější vzhledem k požadavkům, které jsou ke stanovování mechanických vlastností oblastí heterogenních svarových spojů.

Zde jsou uvedeny požadavky pro vhodný tvrdoměr využívající uvedenou metodiku:

- Tvrdoměr by měl mít dostatečně pevný upínací mechanismus k měřenému zařízení. (Na druhu a velikosti záleží na požadavcích měřených zařízení.)
- Tvrdoměr by měl obsahovat optické měření pro měření povrchu vtisku. (Pro hodnocení oblastí HTG svaru a měření zatížením cca 3N by optika měla mít rozlišení 0,05 μm .)
- Pro uvedenou metodiku by měl tvrdoměr mít rozsah zatížení 1-10 N s přesností odečtu minimálně 0,01 N.
- Tvrdoměr by měl obsahovat laserové ukazovátko na místo vtisku. (Po upnutí tvrdoměru k měřenému zařízení laserové ukazovátko označuje místo vpichu.)
- U tvrdoměru by měla být možnost výměny indentoru.
- Tvrdoměr musí obsahovat zařízení pro kompenzaci tuhosti přístroje.
- Tvrdoměr by měl mít možnost vodorovného posuvu s měřeným povrchem po upnutí k měřenému zařízení (rozsah ± 5 mm v obou směrech s přesností kroku 0,01 mm).
- Tvrdoměr by měl mít možnost řízení posuvem i zatížením.

Za tímto účelem během práce na disertační práci byl navázán kontakt s firmou zabývající se výrobou přesných strojních součástí, kdy byly projednávány možnosti výroby vhodného přístroje. Dále během konference ve Staré Lesné byl také navázán kontakt s panem Thomasem Chudobou z firmy Zwick. Byly zde diskutovány možnosti spolupráce na vývoji měřicího přístroje, který by splňoval výše uvedené podmínky a byl by vhodný pro prezentovanou metodiku. V neposlední řadě byl také navázán kontakt s panem profesorem Matochou z MMV, s.r.o. Proto možností jak uvedenou metodiku zavést do praxe je několik a toto by mělo být jako jedním z dalších kroků pro využití metodiky v praxi.

9. Závěry a cíle dalšího výzkumu

Cílem disertační práce bylo stanovení mechanických vlastností materiálů svarového spoje (stanovení deformačně-napětových křivek) na základě znalosti indentační křivky materiálu, získanou při instrumentovaném měření tvrdosti.

Po rozboru problematiky byla vybrána metoda plně využívající metodu konečných prvků „*Inverzní MKP modelování indentace*“. Vzhledem k běžnému užívání MKP softwaru jak na Ústavu mechaniky, tak na pracovišti ÚAM Brno, s.r.o. lze považovat tuto metodu za nejvhodnější. K této metodě byly zohledněny další parametry ovlivňující přesnost stanovení mechanických vlastností a byla tak definována zvolená metodika stanovení mechanických vlastností na základě instrumentovaného měření tvrdosti. Metodika spočívá v porovnávání křivek získaných z experimentálního měření instrumentované tvrdosti, kterými jsou indentační křivka a křivky povrchu vtisku, se stejnými křivkami z MKP simulace instrumentované zkoušky tvrdosti. Experimentální data z měření jsou zpracovávána a upravená data jsou používána k optimalizaci modelu materiálu. Pro částečně automatické zpracování naměřených dat byly vytvořeny spouštěcí programy v programovacím jazyku Python. Pro optimalizaci modelu materiálu byly zvoleny 2 metody. První pomocí optimalizačního softwaru OptiSLang, u kterého bylo voleno nejvhodnější nastavení programu. Touto optimalizací není možné stanovit základní materiálové charakteristiky přímo „v čase“ měření. Z toho důvodu byla zvolena také druhá metoda tzv. „online“ metoda, kdy je možné stanovit základní mechanické vlastnosti materiálu přímo „v čase“ a na místě měření. Pro tuto metodu byly opět vytvořeny spouštěcí programy v programovacím jazyku Python a byla vytvořena databáze výstupních křivek z instrumentálního měření tvrdosti. Celá metodika v této práci popsána je zaměřena na stanovení základních mechanických vlastností materiálu na velmi malé oblasti jako je nauhličená oblast heterogenního svarového spoje mezi ocelí 22K a 1. austenitickým návarem. Všechny klady a zápory těchto metod jsou vyjmenovány v této disertační práci.

V rámci disertační práce bylo pracováno na vývoji metodiky s více homogenními oceli. V této disertační práci jsou uvedeny výsledky ze stanovování mechanických vlastností homogenních ocelí 22K a 10Ch2MFA, na kterých byla vyvíjena metodika. Poté byla ověřena použitelnost metodiky na neznámé oceli. Na základě těchto výsledků bylo přistoupeno k určování mechanických vlastností jednotlivých struktur heterogenního svarového spoje na základě provedeného instrumentovaného měření tvrdosti a jsou zde tyto výsledky prezentovány.

Výsledky ze stanovení mechanických vlastností materiálu na základě instrumentovaného měření tvrdosti jak homogenních ocelí, tak heterogenního svarového spoje dosahují dostatečné přesnosti v porovnání s provedenými tahovými zkouškami na stejných vzorcích. Navíc, jak již bylo uvedeno, výsledky optimalizací oběma metodami v podobě D-N křivek jsou velmi podobné, což vypovídá o věrohodnosti optimalizačních metod. Tímto jsou všechny vytčené cíle disertační práce splněny.

Metodika uvedená v této disertační práci byla vyvíjena tak, aby byla použitelná v praxi. To byl hlavní důvod vzniku této práce. Během práce bylo ale dosaženo poznatku, že přesně popsána metodika v této práci, co se týká maximální hloubky vtisku, či maximálního zatížení indentoru je v provozu obtížně aplikovatelná. Zvolené zatížení a maximální hloubka vtisku byly zvoleny pro možnost postihnout nauhličenou vrstvu heterogenního svarového spoje.

Měření v rámci disertační práce probíhalo v laboratorních podmínkách, proto dané požadavky pro měření bylo možné splnit. Měření v provozu je ovšem velmi obtížné provádět s takovou přesností.

Proto pro zavedení metodiky do praxe by bylo vhodné uvažovat s větším zatížením či maximální hloubkou vtisku. S tím je nutné také počítat při konstrukci a požadavky na vhodný tvrdoměr, které byly uvedeny v této práci. Hlavní úprava metodiky by spočívala ve vytvoření nové databáze křivek pro porovnávání experimentálních křivek s vypočtenými v rámci optimalizace metodou online. V rámci optimalizace pomocí programu OptiSLang se nemění nic, než je uvedeno v této disertační práci (kap. 6.5.2.1).

Tento základní bod v podobě metodiky stanovení základních mechanických vlastností materiálu na základě instrumentální zkoušky tvrdosti by bylo vhodné rozvinout do dvou směrů. První směr v podobě používání metodiky byl již výše zmíněn. Druhým směrem pro další vývoj je možnost postihnout a změřit instrumentovanou zkouškou tvrdosti zbytkové napětí v materiálu. Toto by bylo samozřejmě vhodné provádět v laboratorním prostředí. To ovšem představuje veliké množství experimentů.

LITERATURA

- [1] *Česká technická norma: Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse*, ČSN EN ISO 6507
- [2] *Česká technická norma: Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů*, ČSN EN ISO 14577
- [3] http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf [22. 10. 2012]
- [4] <http://www.converter.cz> [22. 10. 2012]
- [5] <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article873> [2. 9. 2013]
- [6] http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf [22. 10. 2012]
- [7] <http://www.hanyko-praha.cz/zkouseni-kovu> [23. 10. 2012]
- [8] www.testsysteme.cz [2. 9. 2013]
- [9] www.tsisystem.cz [23. 10. 2012]
- [10] <http://abiservices-usa.com/> [10. 7. 2015]
- [11] www.testima.eu [23. 10. 2012]
- [12] <http://pioneeringcreativity.com/ducom/Products/Portable-Automated-Ball-Indenter-SC-07.html> [27. 10. 2012]
- [13] <http://www.frontics.com> [27. 10. 2012]
- [14] *Metallic materials - Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test - Indentation tensile properties*, ISO/TR 29381:2008
- [15] *Hardness of Metals*, Clarendon Press 1951 also Proc Roy Soc A192 (1948) 247
- [16] <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/index.htm> [22. 10. 2012]
- [17] Ptáček, L. et al.: *Nauka o materiálu 2. opravené a rozšířené vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-7204-283-1
- [18] Ahn, J.-H., Kwon, D.: *Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pile-up effect*, J. Mater. Res. 16, 3170 (2001)
- [19] Jeon, E.-c., Park, J.-S., Kwon, D.: *Statistical analysis of experimental parameters in continuous indentation tests using Taguchi method*, ASME J. Eng. Mater. Technol. 125, 406 (2003)
- [20] Choi, Y., Jang, J.-i., Kim, K.-H., Kwon, D., Park, S.-K.: *Applications of advanced indentation technique to pre-qualification and periodic monitoring of strength performance of industrial structures*, Key Eng. Mater. 270-273, 1694 (2004)
- [21] Kim, S. H., Lee, B. W., Choi, Y., Kwon, D.: *Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials*, Mater. Sci. Eng. A. 415, 59 (2006)
- [22] Cheng, Y. T., Cheng, C. M.: *Can stress-strain relationships be obtained from indentation curves using conical and pyramidal indenters?*, J. Mater. Res. 14, 3493 (1999)

- [23] Bouzakis, K. D., Michailidis, N., Erkens, G.: *Thin hard coating stress-strain curve determination through a FEM supported evaluation of nanoindentation test results*, Surf. Coat. Tech. 142-144, 102 (2001)
- [24] Dao, M., Chollacoop, N., Van Vliet, K. J., Venkatesh, T. A., Suresh, S.: *Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation*, Acta Mater. 49, 3899 (2001)
- [25] Bucaille, J. L., Stauss, S., Felder, E., Michler, J.: *Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters*, Acta Mater. 51, 1663 (2003)
- [26] Spary, I., Bushby, A. J., Jennett, N. M.: *On indentation size effect in spherical indentation*, Phil. Mag. 83, no. 33-35, 5581 (2006)
- [27] Bouzakis, K. D., Michailidis, N.: *Indenter surface area and hardness determination by means of a FEM-supported simulation of nanoindentation*, Thin Solid Films 494, 155 (2006)
- [28] Huber, N., Tyulyukovskiy, E.: *A new loading history for identification of viscoplastic properties by spherical indentation*, J. Mater. Res. 19, 101 (2004)
- [29] Huber, N., Tyulyukovskiy, E.: *Identification of viscoplastic material parameters from spherical indentation data: Part I. Neural networks*, J. Mater. Res. 21, 664 (2006)
- [30] Klötzer, D., Ullner, Ch., Tyulyukovskiy, E., Huber, N.: *Identification of viscoplastic material parameters from spherical indentation data: Part II. Experimental validation of the method*, J. Mater. Res. 21, 677 (2006)
- [31] Stodola, M.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na je a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav – 4. etapa - Vývoj metodiky hodnocení postupné degradace materiálů HTG svarů a zpracování poznatků do NTD A.S.I. - část a1 - Rešeršní studie tvrdoměrů za účelem měření tvrdosti svarového materiálu na zařízení v JE, ÚAM Brno, duben 2012, arch. č. 5000/12*
- [32] Lee, J. H., Kim, T., Lee, H.: *A study on robust indentation techniques to evaluate elastic-plastic properties of metals*, International Journal of Solids and Structures 47 (2010) 647-664
- [33] Lee, H., Lee, J. H., Pharr, G. M.: *A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 53 (2005) 2037-2069
- [34] Beghini, M., Bertini, L., Fontanari, V.: *Evaluation of the stress-strain curve of metallic materials by spherical indentation*, International Journal of Solids and Structures 43 (2006) 2441-2459
- [35] Farrissey, L. M., McHugh, P. E.: *Determination of elastic and plastic material properties using indentation: Development of method and application to a thin surface coating*, Materials Science and Engineering A 399 (2005) 256-266
- [36] Kucharski, S., Mróz, Z.: *Identification of yield stress and plastic hardening parameters from a spherical indentation test*, International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007) 1238-1250
- [37] Nayebi, A., El Abdi, R., Bartier, O., Mauvoisin, G.: *New procedure to determine steel mechanical parameters from spherical indentation technique*, Mechanics of Materials 34 (2002) 243-254

- [38] Jang, J.-i., Choi, Y., Lee, Y.-H., Kwon, D.: *Instrumented microindentation studies on long-term aged materials: work-hardening exponent and yield ratio as new degradation indicators*, Materials Science and Engineering A 395 (2005) 295-300
- [39] Hasanov, A., Muradoglu, Z.: *Fast inversion algorithm for identification of elastoplastic properties of power hardening materials from limited spherical indentation tests*, International Journal of Non-Linear Mechanics 47 (2012) 526-536
- [40] Collin, J.-M., Mauvoisin, G., Pilvin, P.: *Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches*, Materials and Design 31 (2010) 636-640
- [41] Brumek, J., Strnadel, B., Dlouhý, I.: *Využití instrumentované indentační zkoušky při hodnocení mechanických vlastností*, Křehký lom 2007, Brno
- [42] Le, M.-Q.: *Material characterization by instrumented spherical indentation*, Mechanics of Materials 46 (2012) 42-56
- [43] Hasanov, A., Muradoglu, Z.: *FE analysis and remeshing algorithm for an axisymmetric elastoplastic contact problem related to indentation measurements*, Materials and Design 28 (2007) 62-70
- [44] Sharma, K., Bhasin, V., Ghosh, A. K.: *Property estimation with automated ball indentation using artificial neural network and FE simulation*, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Volume 4, Number 4, September 2010, ISSN 1995-6665, 503-506
- [45] Brammer, P., Bartier, O., Hernot, X., Mauvoisin, G., Sablin, S.-S.: *An alternative to the determination of the effective zero point in instrumented indentation: Use of the slope of the indentation curve at indentation load values*, Materials and Design 40 (2012) 356-363
- [46] Kang, J. J., Becker, A. A., Sun, W.: *Determining elastic-plastic properties from indentation data obtained from FE simulations and experimental results*, International Journal of Mechanical Sciences 62 (2012) 34-46
- [47] Attaf, M. T.: *Connection between the loading curve models in elastoplastic indentation*, Materials Letters 58 (2004) 3491-3498
- [48] Bartier, O., Hernot, X., Mauvoisin, G.: *Theoretical and experimental analysis of contact radius for spherical indentation*, Mechanics of Materials 42 (2010) 640-656
- [49] Hernot, X., Bartier, O., Bekouche, Y., El Abdi, R., Mauvoisin, G.: *Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation*, International Journal of Solids and Structures 43 (2006) 4136-4153
- [50] Harsono, E., Swaddiwudhipong, S., Liu, Z. S., Shen, L.: *Numerical and experimental indentation tests considering size effects*, International Journal of Solids and Structures 48 (2011) 972-978
- [51] Karthik, V., Visweswaran, P., Bhushan, A., Pawaskar, D. N., Kasiviswanathan, K. V., Jayakumar, T., Raj, B.: *FE analysis of spherical indentation to study pile-up/sink-in phenomena in steels and experimental validation*, International Journal of Mechanical Sciences 54 (2012) 74-83
- [52] Taljat, B., Pharr, G. M.: *Development of pile-up during spherical indentation of elastic-plastic*

- solids*, International Journal of Solids and Structures 41 (2004) 3891-3904
- [53]Rodriguez, J., Garrido Maneiro, M. A.: *A procedure to prevent pile-up effects on the analysis of spherical indentation data in elastic-plastic materials*, Mechanics of Materials 39 (2007) 987-997
- [54]Swadener, J. G., George, E. P., Pharr, G. M.: *The correlation of the indentation size effect measured with indenters of various shapes*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 50 (2002) 681-694
- [55]Phadikar, J. K., Bogetti, T. A., Karlsson, A. M.: *On establishing elastic-plastic properties of a sphere by indentation testing*, International Journal of Solids and Structures 49 (2012) 1961-1972
- [56]Murty, K. L., Miragli, P. Q., Mathew, M. D., Shah, V. N., Haggag F. M.: *Characterization of gradients in mechanical properties of SA-533B steel welds using ball indentation*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 76 (1999) 361-369
- [57]Song, Y., Hua, L., Chu, D., Lan, J.: *Characterization of the inhomogenous constitutive properties of laser welding beams by the micro-Vickers hardness test and the rule of mixture*, Materials and Design 37 (2012) 19-27
- [58]Shakharova, N. A., Fernandes, J. V., Antunes, J. M., Oliveira, M. C.: *Comparison between Berkovich, Vickers and conical indentation tests: A three-dimensional numerical simulation study*, International Journal of Solids and Structures 46 (2009) 1095-1104
- [59]Rao, D., Heerens, J., Alves Pinheiro, G., Dos Santos, J. F., Huber, N.: *On characterisation of local stress-strain properties in friction stir welded aluminium AA5083 sheets using micro-tensile specimen testing and instrumented indentation technique*, Materials Science and Engineering A 527 (2010) 5018-5025
- [60]Siegl, J. a kol.: *Analýza vad heterogenního svarového spoje PG46*, zpráva ČVUT, číslo zprávy E-KMAT-878/13, Praha, březen 2013
- [61]Stodola, M.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*, zpráva ÚAM Brno, archivní číslo 5235/13, červen 2013
- [62]Ernestová, M. a kol.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*, zpráva ÚJV Řež, evidenční číslo DITI 2302/164, ÚJV Řež, červen 2013
- [63]Ernestová, M. a kol.: *Experimentální program pro hodnocení heterogenního svarového spoje PG46 s vadou*, Výsledky experimentálního programu, zpráva ÚJV Řež, evidenční číslo DITI 2302/152, ÚJV Řež, březen 2013
- [64]Diviš, V., Jarý, M.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*, zpráva ÚAM Brno, archivní číslo 4880, září 2011
- [65]Říha, T.: *Studium radiačního poškození nádoby reaktoru VVER-440 jaderné elektrárny Dukovany*, diplomová práce, FSI Brno, Energetický ústav, Brno 2011
- [66]<http://www.lincolnelectric.com/en-us/consumables/mig-wires-and-tig-cut-lengths>
[2. 7. 2013]

- [67] Růžek, L., Diviš, V.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*, zpráva ÚAM Brno, archivní číslo 5005/12, červen 2012
- [68] <http://www.lookchem.com> [14.6.2013]
- [69] NTD A.S.I. Sekce II., *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, identifikační číslo NTD ASI-II-Z-5/07
- [70] <http://arcsel.com.ua/> [20.6.2013]
- [71] Vrbenský, J.: *Zváracie materiály na zváranie strojno – technologických komponentov vybraných zariadení jadrových zariadení. Technické požiadavky a pravidlá výberu*, Úrad jadrového dozoru slovenskej republiky, ISBN 978-80-88806-85-1, Bratislava, květen 2011
- [72] Stodola, M.: *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*, zpráva ÚAM Brno, archivní číslo 5235/13, červen 2013
- [73] Dlouhý, I., Hadraba, H., Stodola, M., Čupera, P.: *Hodnocení stárnutí heterogenního svaru na základě instrumentované indentace*, Ústav fyziky materiálů AV ČR, září 2014
- [74] *Koroze a ochrana materiálů*, učební text určený pro prezenční studium, Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2008
- [75] Macháč, P.: *Pasivace hliníku a hliníkových slitin v pasivačních lázních bez sloučenin chromu*, diplomová práce, FSI Brno, Ústav materiálových věd a inženýrství, Brno 2010
- [76] Junek, L.: *Závěrečná zpráva k výsledkům z experimentálního programu na odřezaném vzorku s vadou z heterogenního svarového spoje z PG46*, zpráva ÚAM Brno (archivační číslo 5158/13), ÚAM Brno, 2013
- [77] Pluhař, J. et. al.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, 1. vydání Praha: SNTL, 1987
- [78] Havlík, P.: *Strukturní stabilita svarového spoje uhlíková/austenitická ocel*, diplomová práce, FSI Brno, Ústav materiálových věd a inženýrství, Brno 2012
- [79] <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarove-spoje-zaropevnych-materialu-pouzivanych-v-energetice/> [22.6.2013]
- [80] Stodola, M.: *Stanovení změny mechanických vlastností materiálů svarového spoje na základě měření tvrdosti*, pojednání ke státní doktorské zkoušce, FSI Brno, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Brno 2013

Seznam použitých symbolů a zkratek

ÚAM Brno	Ústav aplikované mechaniky Brno, s. r. o.
IAM Brno	Institute of Applied Mechanics Brno, Ltd.
ČEZ	České energetické závody, a.s.
NDT	Non destructive test (nedestruktivní zkouška)
TIV	Through indenter view (pohled skrz indenter)
CCD	Charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji)
ATC	Advanced technology corporation (název firmy)
AV	Akademie věd
NML	National metallurgical laboratory (název vědecké firmy)
HB	Tvrdost dle Brinella
HV	Tvrdost dle Vickerse
HR	Tvrdost dle Rockwella
HK	Tvrdost dle Knoop
R_m	Mez pevnosti
MKP	Metoda konečných prvků
HSS	Heterogenní svarový spoj
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
EDS	Energiově disperzní spektroskopie
ZM	Základní materiál
VS	Výchozí stav
TEM	Transmisní elektronové mikroskopie
PG	Parogenerátor
KO	Kompenzátor objemu
HA	Hydroakumulátor
RE	Reaktor
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu
A	Tažnost
Z	Kontrakce
RM	Vrubová houževnatost
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
ÚFM	Ústav fyziky materiálů
MKK	Mezikrystalická koroze
SCC	Korozní praskání pod napětím
D-N	Deformačně - napět'ová
JE	Jaderná elektrárna

Seznam použitého softwaru

ANSYS 14.0 - 15.0

OptiSLang 3.2.3

Microsoft Office 2007

Python 2.7