

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**OPTIMALIZACE GEOMETRIE PŘÍPRAVKU
PROPROTLAČOVACÍ ZKOUŠKY NA INIATURIZOVANÝCH
VZORCÍCH**

**OPTIMIZATION OF DIE APPARATUS GEOMETRY FOR
PENETRATION TESTS ON MINIATURIZED SAMPLES**

AUTOR: Bc. Marek Augulis

STUDIJNÍ OBOR: Výrobní a materiálové inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Augulis** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **434472**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace geometrie přípravku pro protlačovací zkoušky na miniaturizovaných vzorcích

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of die apparatus geometry for penetration tests on miniaturized samples

Pokyny pro vypracování:

1. Zhodnocení současného stavu znalostí o relativně nové metodě zkoušení materiálu (Small Punch Test).
2. Výběr vhodných přípravků pro následný experimentální program v akreditované zkušební laboratoři Mechanické vlastností, ÚJV Rež, a. s.
3. Realizace penetračních zkoušek na korelačním monitorovacím materiálu Mezinárodní agentury pro atomovou energii – A533B (JRQ).
4. Vyhodnocení získaných parametrů a posouzení jejich korelace s výsledky tahových zkoušek.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ARUNKUMAR, S.: Overview of Small Punch Test. Metals and Materials International (2019).
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00454->
- [2] KOPRIVA, R. - BRUMOVSKÝ, M. - PETELOVA, P.: „Current Status of the Small Punch Test Standardization within the ASTM“. 5th International Small Sample Test Techniques Conference, Swansea, Velká Británie, 2018

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Cejp, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špaterka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Nemám žádný závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu §60 zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorské zákony).

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Diplomová práce se zabývá optimalizací rozměrů a geometrie přípravku pro penetrační neboli protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích (SPT). V teoretické části jsou tyto testy představeny jako perspektivní metoda stanovování aktuálních mechanických vlastností z malého objemu dostupného materiálu, používaná například v oblasti jaderné energetiky. Parametry zjištěné během těchto zkoušek slouží ke korelaci s výsledky získanými standardními postupy, většinou s pevnostními charakteristikami z jednoosých tahových zkoušek. Prezentován je také přehled faktorů, které mají vliv na přesnost a preciznost těchto odhadů, se zaměřením na vliv rozdílné geometrie a rozměrů zkušebního přípravku, především jeho spodní zápustky. Experimentální část se následně zabývá realizací zkoušek a porovnáním výsledných korelací za použití rozdílných zápustek, lišících se ve zmíněném ohledu. Součástí práce je pozorování vzniklého opotřebení hran pod elektronovým mikroskopem.

Klíčová slova

Protlačovací zkouška na miniaturních vzorcích (SPT), pevnostní charakteristiky, rozměry a geometrie přípravku, opotřebení hrany

Annotation

This thesis deals with the optimization of dimensions and geometry of an apparatus used for Small Punch Tests (SPT). Firstly, the theoretical background of these tests, which present a promising method for determining the actual mechanical properties out of a small volume of available material, often used in the field of nuclear energy, is presented. Obtained parameters can then be correlated with the results of standard test methods, e.g. with the strength characteristics measured by uniaxial tensile tests. Secondly, various influences, that affect the accuracy and precision of those estimates, with a focus on the variability in the geometry or dimensions of the test apparatus, most notably its lower die, is summarised. During the experiment, a substantial number of tests is performed while using dies that differ in the above-mentioned regard. The obtained correlations are then evaluated and conclusions drawn. Using electron microscopy, the resulting edge wear for the selected set is also investigated.

Key words

Small Punch Test (SPT), strength characteristics, dimensions and geometry of an apparatus, edge wear

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Cejnovi, CSc. za jeho vstřícnost a věcné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům a vedení laboratoře Mechanické vlastnosti ve společnosti ÚJV Řež, a. s., ve které byla praktická část předkládané práce uskutečněna. Především Ing. Michalu Falcníkovi, Ph.D. za odborný nadhled i rady a Michaelu Rappovi za technické vedení, ochotu a výpomoc při realizaci experimentální části.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	12
2 Protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích (SPT)	14
2.1 Odběr materiálu a jeho příprava.....	14
2.1.1 Metoda mechanického odbrušování.....	14
2.1.2 Metoda elektrojiskrového řezání (EDM)	15
2.1.3 Zkušební tělesa.....	16
2.1.4 A533B (JRQ)	17
2.2 Rozdělení metod zkoušek SPT.....	18
3 Průběh SP testu	19
3.1 Rozbor zatěžovací křivky.....	19
4 Vyhodnocení charakteristik křivky.....	21
4.1 Stanovení mechanických vlastností	23
4.1.1 Korelační vztahy pro odhad pevnostních charakteristik	24
5 Aktuální stav normativní dokumentace.....	25
5.1 Standardizace v rámci CEN	25
5.1.1 CWA 15627:2007	25
5.1.2 FprEN 10371:2020.....	26
5.2 Standardizace v rámci ASTM	26
5.2.1 ASTM E3205-20.....	27
6 Přehled vlivů na průběh zkoušky a požadavky normativní dokumentace	28
6.1 Tloušťka vzorku.....	28
6.2 Průměr vzorku.....	29
6.3 Lubrikace a povrch vzorku.....	30
6.4 Vrchol razníku.....	31
6.5 Způsob měření posuvu	32
6.6 Měření teploty	32
6.7 Upnutí zkušebního tělesa	33
6.8 Preload	33
6.9 Geometrie a rozměry zkušebního přípravku	34
6.9.1 Průměr díry zápustky	35
6.9.2 Hrana díry zápustky	35
6.9.3 Průměr důlku pro uložení ZT	36
6.9.4 Rovnoběžnost důlku pro ZT s rovinou upínací matice	37
7 Úvaha o neřešených oblastech geometrie přípravku	38

7.1	Souosost závitů s dírami zápuštěk a dírou upínací matice	41
7.2	Souosost díry zápuštěky s usazením v závěsu	42
7.3	Souosost stěny důlku pro ZT se závitem.....	42
7.4	Válcovitost díry zápuštěky.....	43
8	Experimentální část	45
8.1	Dokumentace výroby zápuštěk a zkušebních těles	45
8.2	Zhodnocení souladu výroby se zadáním	46
8.3	Volba zájmových geometrických a rozměrových charakteristik	48
8.3.1	Souhrn výchozích hypotéz	48
8.4	Výběr konkrétních zápuštěk.....	49
8.5	Stanovení skutečného vyosení zatěžování	50
8.6	Schéma experimentálního programu.....	53
8.7	Realizace zkoušek	54
8.8	Výsledky protlačovacích zkoušek.....	55
8.9	Korelace s výsledky jednoosých tahových zkoušek	60
8.10	Porovnání korelací	63
8.11	Analýza opotřebení zápuštěk na SEM	65
9	Diskuse výsledků	66
10	Doporučení pro optimalizaci zápuštěk používaných ve společnosti ÚJV Řež, a. s.	67
11	Závěr	69
12	Zdroje.....	70
13	Seznam obrázků	75
14	Seznam tabulek	78
15	Přílohy	79

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky

CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization; Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
CWA	CEN workshop agreement; technická dohoda pro provádění zkoušek SPT
EDSE	Electro-discharge sampling equipment; zařízení pro odběr materiálu metodou elektrojiskrového řezání
ETSI	The European Telecommunications Standards Institute; Evropský výbor pro telekomunikační normy
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
JRQ	Japan Reference Quality; korelační materiál MAAE vyrobený v Japonsku
MDBT	Miniaturized Disk Bend Test
PHK	Polohorká komora
PWR	Pressurized water reactor; tlakovodní reaktor
SP	Small Punch; označení metody SPT pro zkoumání pevnostních a křehkolomových vlastností
SPC	Small Punch Creep; označení metody SPT pro vyhodnocování vlastností v tečení (tzv. creep)
SPT	Small Punch Test; obecné označení penetračních testů neboli protlačovacích zkoušek na miniaturních vzorcích
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
UMHWPE	Ultra-high-molecular-weight polyethylene; Polyethylenové vlákno
ZT	Zkušební těleso

Fyzikální veličiny a jiné symboly

Označení	Jednotka	Význam
A	[%]	tažnost
D_1	[mm]	průměr důlku pro uložení ZT
$DBTT$	[°C]	tranzitní teplota přechodu křehkého a tvárného lomu
D_s	[mm]	průměr zkušební tělesa
E_{sp}	[J]	lomová energie vyhodnocená pod křivkou
$f(u)$	[-]	rovnice bilineární funkce metody dvou tangent
f_a	[-]	proměnná funkce $f(u)$
f_b	[-]	proměnná funkce $f(u)$
F_e	[N]	síla na přechodu z elastické do plastické zóny
F_i	[N]	aktuální hodnota síly zatěžování
F_m	[N]	maximální síla křivky
$F-u$	[N/mm]	křivka síla/deflexe vzorku
$F-v$	[N/mm]	křivka síla/posuv razníku
h_0	[mm]	tloušťka vzorku
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
IT	[-]	označení třídy přesnosti
J_{IC} , (resp. K_{IC})	[MPa*m]	charakteristiky lomové houževnatosti
P_{max}	[N]	síla F_m
P_y	[N]	síla F_e
R	[mm]	poloměr zaoblení hrany
r	[mm]	poloměr razníku
R_a	[μ m]	drsnost povrchu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
T	[°C]	teplota
T_i	[°C]	aktuální teplota
t_o	[mm]	tloušťka vzorku h_0
u_a	[-]	proměnná funkce $f(u)$
u_b	[-]	proměnná funkce $f(u)$

u_e	[mm]	průhyb ZT odpovídající síle F_e
u_f	[mm]	průhyb ZT smluvně odpovídající 20% poklesu síly po F_m
u_i	[mm]	aktuální hodnota deflexe vzorku
u_m	[mm]	průhyb ZT odpovídající síle F_m
Z	[%]	kontrakce
β_{rm}	[-]	koeficient korelační rovnice pro výpočet meze pevnosti
$\beta_{Rp0,2}$	[-]	koeficient korelační rovnice pro výpočet meze kluzu
μ	[-]	koeficient tření
σ	[-]	směrodatná odchylka
σ_{UTS}	[MPa]	označení meze pevnosti
σ_y	[MPa]	označení meze kluzu
\emptyset	[-]	průměr

1 Úvod

Kvalifikované posuzování integrity a zbytkové životnosti dlouhodobě provozovaných zařízení je nezbytné jak pro optimalizaci jejich provozního režimu a intervalu prohlídek, tak pro poskytnutí podkladů, které umožní bezpečné a racionální rozhodnutí o případném prodloužení jejich plánované životnosti. Potenciální finanční úspory, které mohou být touto cestou realizovány, nicméně vyžadují znalost aktuálních mechanických vlastností používaného materiálu. Realizace standardních materiálových zkoušek je však podmíněna, kromě nezbytného odstavení či omezení provozu, také odběrem značného množství materiálu pro výrobu zkušebních těles, během kterého může dojít k poškození hodnoceného dílu. Takové postupy jsou proto rovněž nevhodné pro hodnocení lokalizovaných oblastí, jako jsou návary či svarové spoje. V oblasti jaderné energetiky mohou objemné vzorky přispívat k zvýšeným hodnotám radioaktivního záření, kterým je personál vystaven. Počátkem 80. let minulého století proto začal, především v USA a Japonsku, výzkum v oblasti zkoušek na miniaturizovaných tělesech. Jedním z nejslibnějších způsobů stanovování mechanických vlastností z malého množství materiálů se stala metoda penetračních testů [12].

Small Punch Test (SPT), v české literatuře označovaný jako penetrační test [2, 11] či protlačovací zkouška na miniaturních vzorcích [13, 14] je modifikací Miniaturized Disk Bend Testu (MDBT), představeného M.P. Manahanem [15] na MIT v roce 1981. V principu se jedná o průnik razníku plochým zkušebním tělesem malých rozměrů, standardně ve tvaru disku. Parametry získatelné z výsledné křivky síla-posun lze na základě empirických rovnic korelovat s výsledky standardních zkoušek, za účelem získání aktuálních hodnot creepových či pevnostních a křehkolomových vlastností [4 – 6]. Zkoušku lze rozdělit do několika variant, v závislosti na průběhu zatěžování, podobě razníku či uchycení zkušebního tělesa [11].

Problémem byla donedávna absence mezinárodně používané normy, která by pokrývala široké možnosti aplikací těchto testů. Zkoušky na miniaturních tělesech jsou přitom citlivější na dodržení geometrie zkušební přípravky, podmínek zkoušky a podobně, než je tomu u standardních postupů [16]. Absence normy omezovala jak možnost mezilaboratorního porovnání výsledků, tak ochotu průmyslu začlenit tyto postupy do praxe. Většina v současnosti prováděných zkoušek SPT probíhá stále na základě doporučení poskytnutých v předpisu CWA 15627:2007 [4] z roku 2007. V Evropě, kde se tato metoda rovněž rozšířila na konci 80. let, má být tento předpis již brzy nahrazen evropskou normou, zn. EN 10371:2020 [5]. Ve Spojených státech, kde probíhají tvůrčí aktivity pod záštitou mezinárodní standardizační organizace ASTM, byla v červenci 2020 přijata nová mezinárodní norma pro SPT, označená E3205-20 [6].

Aby tyto normativní dokumenty umožňovaly dosahování přesných, precizních a porovnatelných výsledků, obsahují doporučení týkající se možných vlivů na průběh zkoušky a následnou korelaci.

Vliv mají například rozdíly ve zkušebních podmínkách, způsobu korelace, nebo podobě zkušebního přípravku – především rozměrů a geometrie spodní zápustky. V této zápustce je uloženo zkušební těleso a do její díry je protlačováno. Posouzení relativní důležitosti rozpoznatelných vlivů na průběh zkoušky je nezbytné pro správné používání metody.

Spodní zápustky přípravku, přestože jsou vyrobeny v souladu s požadavky normativní dokumentace, liší se dále v rozměrech i geometrii a vliv této variace na zkoušku by měl být přesně znám. Zatímco mnoho charakteristik je v dostupné literatuře podrobně rozebíráno a jejich tolerance jsou stanoveny, jiným, především geometrickým charakteristikám, je v literatuře věnováno pouze malé množství pozornosti.

Cílem této práce je tedy vyhodnotit vliv vybraných rozměrových a geometrických charakteristik spodní zápustky přípravku na výsledky zkoušky SPT. Na základě rešerše, úvahy a akreditovaného měření rozměrů vyrobených zápustek bude několik vhodně se lišících zápustek vybráno pro experimentální program. Zdrojem materiálu pro výrobu vzorků bude korelační materiálu Mezinárodní agentury pro atomovou energii A533B (JRQ). Korelace výsledků s hodnotami standardních tahových zkoušek a vzájemné porovnání mezi zápustkami může posloužit, při současném rozšíření databáze výsledků těchto zkoušek, také jako zdroj informací pro optimalizaci přípravku používaného v ÚJV Řež, a. s., kde byla experimentální část práce realizována. Shrnuté výstupy práce mohou poskytnout podklady k budoucímu zpřesnění normativních dokumentů v rámci jejich periodické aktualizace.

2 Protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích (SPT)

2.1 Odběr materiálu a jeho příprava

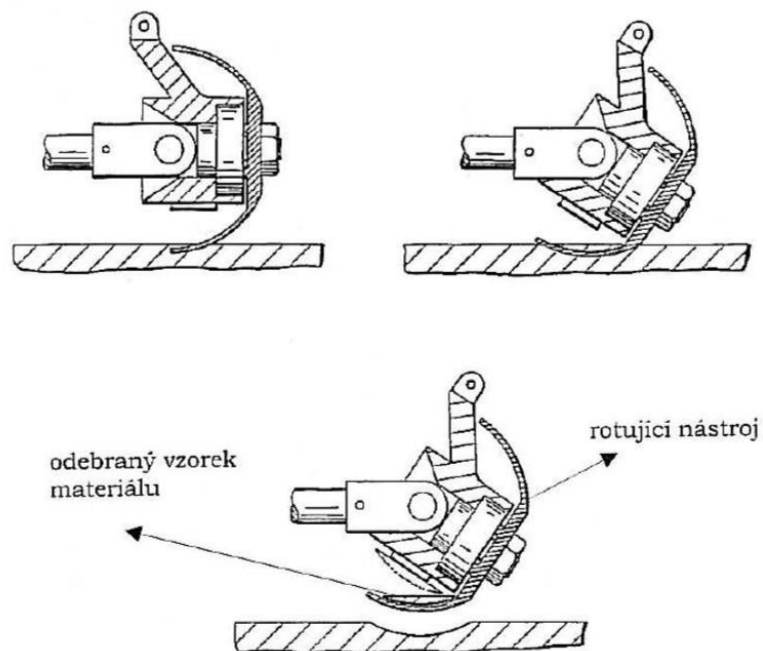
Protlačovací zkoušky miniaturizovaných vzorků jsou z hlediska odebrání materiálu pro přípravu zkušebních těles považovány za kvazi-nedestruktivní metodu [6, 7]. Množství potřebného materiálu je velmi malé, nedochází tedy k zásahu do funkčnosti a integrity hodnocených komponent. Následné opravy, například navařováním, nejsou tedy nutné [4, 18].

V praxi se používají především tyto dva způsoby odběru materiálu:

- mechanické odbrušování
- elektrojiskrové řezání

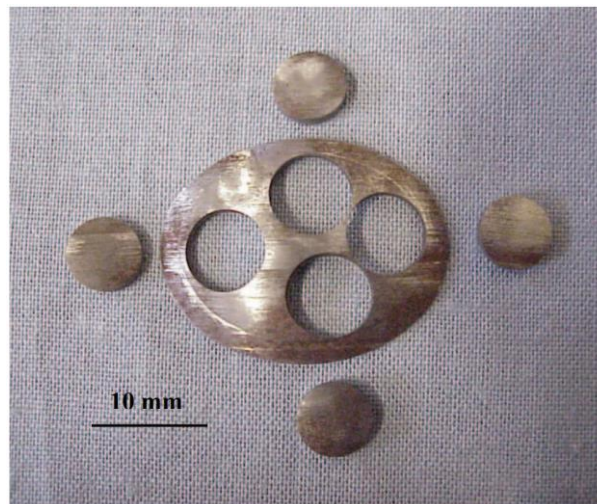
2.1.1 Metoda mechanického odbrušování

Při použití této metody je odběr materiálu dosahováno odbrušováním tenké vrstvy materiálu mezi vzorkem a zdrojové součástí pomocí rotujícího nástroje ve tvaru kloboučku. Tloušťka používaného nástroje, ilustrovaného na Obrázku 1, je přibližně 0,5 mm a průměr je 50 mm.



Obrázek 1: Schéma odběru vzorku mechanickým odbrušováním [11]

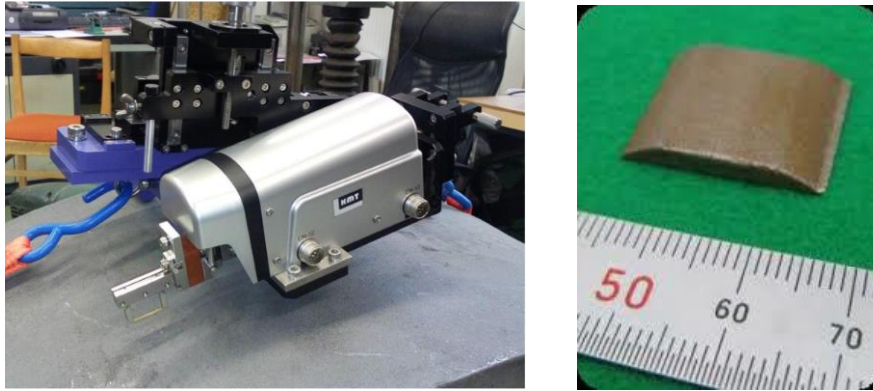
Brusný kotouč je na lemu pokrytý diamantovou drtí a rotuje vysokými otáčkami kolem své osy a za současného pomalého ohybu vniká do povrchu dílu. V kombinaci s intenzivním chlazením dochází pouze k minimálnímu tepelnému a deformačnímu ovlivnění odebíraného i základního materiálu [2, 19]. Výsledkem činnosti je kus materiálu ve tvaru vrchlíku (viz Obrázek 2) o průměru přibližně 25 mm a hloubce 3 až 4 mm. Odebraný materiál lze následně použít k výrobě dvou až pěti miniaturních vzorků pro zkoušku SPT, v závislosti na zvoleném profilu odběru [2, 4, 11, 18, 20].



Obrázek 2: Zkušební tělesa a zbytek vrchlíku odebraného metodou mechanického odbrušování [5]

2.1.2 Metoda elektrojiskrového řezání (EDM)

Alternativně je moderním řešením odběr materiálu pomocí elektrojiskrového řezání, za použití zařízení EDSE (Electro-discharge sampling equipment), zobrazeném na Obrázku 3. Elektroda nástroje, chlazená vodou, je schopna během 1,5 hodiny odebrat materiál ve tvaru charakteristické „lodičky“ o rozměrech 25 x 20 x 3 mm. Získaný materiál lze opět použít k výrobě několika zkušebních vzorků pro SPT. Díky zaobleným hranám elektrody nezůstávají v základním materiálu ostré hrany, které by, jako koncentrátoři napětí, vyžadovaly opravu dutiny. Elektroda je snadno vyměnitelná a celkové náklady jsou nízké [21].

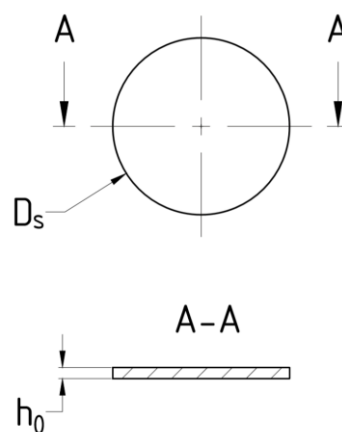


Obrázek 3: Zařízení EDSE a odebraný materiál ve tvaru „lodičky“ [21]

2.1.3 Zkušební tělesa

Příprava a konečná podoba zkušebního tělesa je předepsána normativní dokumentací. Za účelem odstranění vlivu předchozího odběru je nutné materiál nejprve rozdělit na konečnou tloušťku h_0 s přídatkem minimálně $+0,1$ mm. Následně dochází k oboustrannému broušení papíry s hrubostí P320 a P1200 do finálních rozměrů s požadovanou kvalitou povrchu. Pro kontrolu se tloušťka zkušebního tělesa h_0 měří ve střední pozici a 4 polohách po obvodu v 90° intervalech. Průměr D_s je kontrolován ve dvou, vzájemně kolmých směrech [4, 5].

Standardní zkušební těleso má tvar disku, schématicky zobrazeného na Obrázku 4, s rozměry $D_s = 8$ mm a $h_0 = 0,5$ mm. Návrh nové evropské normy FprEN 10371:2020 [5] umožňuje použití vzorků o dále zmenšených rozměrech, přizpůsobených pro držák mikroskopu TEM, tj. $D_s = 3$ mm a $h_0 = 0,25$ mm.



Obrázek 4: Schematická podoba standardního tvaru zkušebního tělesa pro zkoušky SPT

Zkoušky na tělesech jiných tvarů jsou dovoleny, pokud je aktivní část tělesa stále ve tvaru disku a dodatečná plocha, sloužící k upnutí, není menší, než ve výchozím případě [5]. Lze se proto

setkat také s tělesy ve tvaru čtverce [23] či obdélníku [22, 23]. Přehled požadavků jednotlivých normativních dokumentů na rozměry ZT standardního tvaru disku shrnuje Tabulka 1:

Tabulka 1: Rozměry zkušebních těles (disků) podle požadavků jednotlivých dokumentů [4 – 6]

Normativní dokument	D_s [mm]		h_o [mm]		R_a [μ m]
CWA 15627:2007	8	$\pm 0,08$	0,5	$\pm 0,05$	-
ASTM E3205-20	8	$\pm 0,01$	0,5	$\pm 0,005$	<0,25
FprEN 10371:2020	8	- 0,1	0,5	$\pm 0,005$	<0,25
	3	- 0,1	0,5	$\pm 0,0025$	<0,25

2.1.4 A533B (JRQ)

Jedním z nejpoužívanějších materiálů, sloužících k výrobě zkušebních těles pro mezilaboratorní porovnání, je v oblasti jaderné energetiky korelační materiál Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE). Jedná se o feritickou ocel A533B, zn. JRQ (Japan Reference Quality). Ocel je modifikací základního materiálu tlakových nádob (TNR) západních typů tlakovodních reaktorů (PWR), vyznačující se zvýšenou citlivostí na radiační křehnutí. V 80. letech minulého století byl na požádání MAAE vyroben 25tunový odlitek tohoto materiálu v Japonsku, který byl následně rozdělen do 12 dílů (225 mm x 1000 mm x 1000 mm každý) a je od té doby používán v mnoha národních i mezinárodních studiích, zabývajících se radiačním křehnutím nádob reaktorů. Roku 1995 byla část zbývajících materiálu převezena do společnosti ÚJV Řež, a. s. a přivezený materiál byl zdrojem pro výrobu zkušebních těles použitých také v praktické části této práce [24]. Vzhledem k velkým rozměrům původního odlitku a výsledné nehomogenitě jeho vlastností bývají, v souladu s principy odběru zkušebních těles pro svědečné programy, polotovary pro výrobu ZT s tímto účelem odebírány z vnitřní poloviny odlitku.

Rozsah chemického složení a mechanických vlastností ocele JRQ lze nalézt v Tabulkách 2 a 3. Vlastnosti konkrétního bloku, použitého v rámci této práce, jsou součástí experimentální části.

Tabulka 2: Rozsah chemického složení A533B (JRQ)

Obsah [hm. %]	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
min.	0,16	0,25	1,35	0,017	0,003	0,13	0,80	0,12	0,49
max.	0,20	0,26	1,42	0,019	0,004	0,14	0,85	0,12	0,51

Tabulka 3: Rozsah mechanických vlastností A533B (JRQ) při 24 °C [24]

A533B (JRQ)	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
	607-691	455-564	24-27	76

2.2 Rozdělení metod zkoušek SPT

Zkoušky SPT lze tradičně rozdělit, v závislosti na historickém vývoji a průběhu, do 2 hlavních metod, na SPC a SP [4, 11]:

- **SPC** (SPT CF) – jsou časově závislé zkoušky za vysokých teplot. Tyto zkoušky slouží k hodnocení creepových vlastností. V průběhu testu je udržována konstantní síla.
- **SP** (SPT CDR) – jsou zkoušky sloužící k vyhodnocování pevnostních a křehkolomových vlastností za nízkých či zvýšených teplot, během kterých je udržována konstantní rychlost protlačování. Zkoušky jsou časově nezávislé.

V závislosti na podobě zkušebního přípravku a způsobu uchycení ZT můžeme metodu SP dále dělit na:

- stříhový penetrační test (shear punch test)
- ohybový penetrační test (disc bend test)
- kuličkový penetrační test (ball punch test)

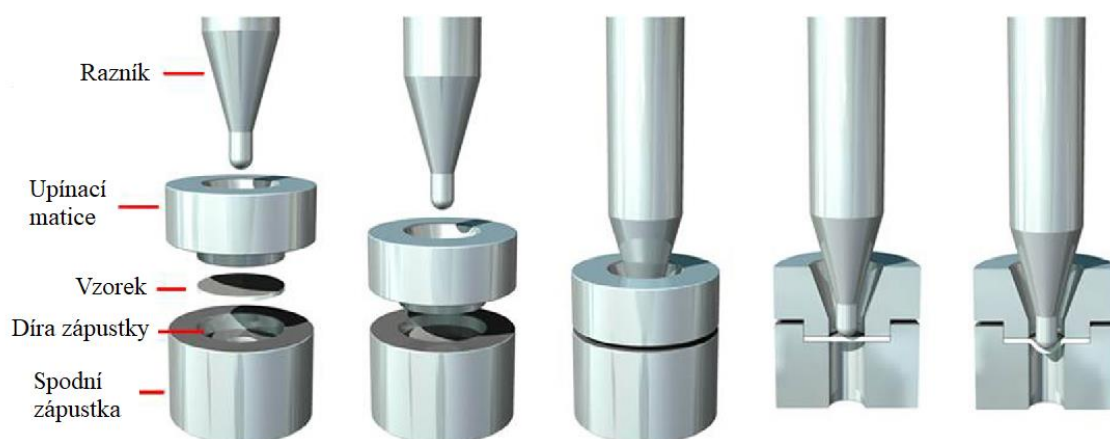
Při kuličkovém penetračním testu, který je zdaleka nejpoužívanější variantou, je vzorek protlačován ocelovou/keramickou kuličkou nebo razníkem zakončeným hemisférickým vrcholem. Je-li zkušební těleso volně uloženo na spodní opěrné matici, jedná se o tzv. „**Punch Drawing**“ Test. Je-li ZT pevně sevřeno mezi spodní zápustkou a horní upínací maticí, mluvíme o tzv. „**Bulge Punch**“ testu [11].

Práce se dále zaměřuje na Bulge Punch metodu SP, běžně používanou při vyhodnocování pevnostních a křehkolomových charakteristik.

3 Průběh SP testu

Před začátkem zkoušky je zkušební těleso uloženo do polohovacího důlku spodní zápustky a následně pevně uchyceno zašroubováním upínací matice. Následně je do vodící díry upínací matice vložen razník a přípravek je umístěn do závěsu zkušebního stroje. Stroj provádí zatěžování konstantní rychlostí, volenou v rozsahu $0,2 \div 2$ mm/min [6], a dochází k protlačování zkušebního tělesa (ZT) do díry spodní zápustky. Hrana díry spodní zápustky může být buď sražená pod úhlem 45° [5], nebo zaoblena [6].

Schematický průběh zkoušky ilustruje Obrázek 5:



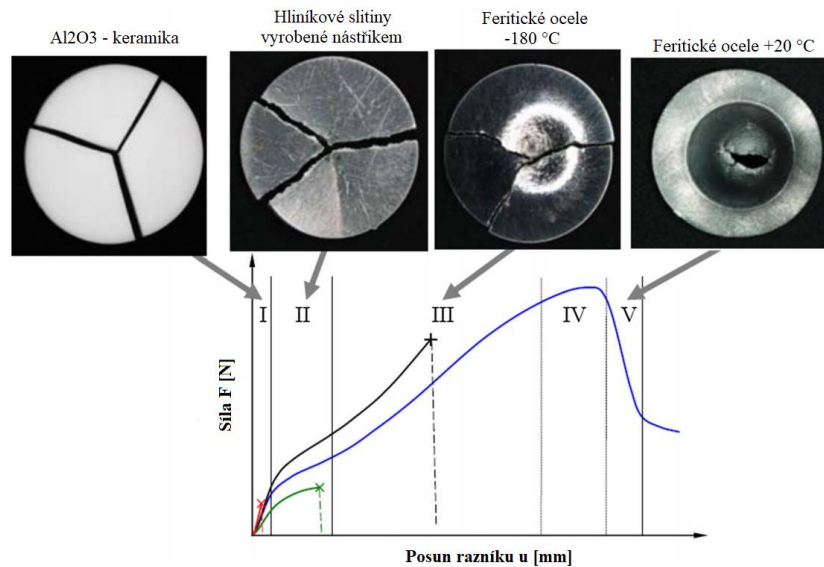
Obrázek 5: Schematický průběh zkoušky SP (přeloženo) [3]

V celém průběhu testu je v ose zatěžování snímána závislost $F-u$ (zatížení – deflexe vzorku), $F-v$ (zatížení – posuv razníku) nebo zatížení – posuv příčnicku. Zkouška končí okamžikem porušení ZT způsobeného vznikem a nestabilním růstem trhliny, indikovaném poklesem síly F o 20 %, který následuje po naměření maximální síly F_m [4 – 6].

3.1 Rozbor zatěžovací křivky

Před počátkem zkoušky lze použít předtížení razníku malou silou, tzv. 'preloadem'. Tato síla, řádově desítky N, pomáhá zachovat vzájemnou polohu dotyku razníku se vzorkem během změn rozměrů soustavy při ohřevu či chlazení a následném vyrovnávání teplot, před samotným začátkem zkoušky. V některých případech může na počátku testu nastat kolísání síly vyšší než 20 %, které by mohlo, v případech bez použití preloadu, vést k automatickému ukončení testu programem [5].

Typický záznam průběhu závislosti F-u (zatížení – deflexe vzorku) pro různé materiály zobrazuje Obrázek 6. Tuto závislost můžeme rozdělit do pěti oblastí (I, II, III, IV a V) [25, 11].



Obrázek 6: Typický průběh závislosti F-u/F-v „Bulge“ testu pro různé druhy materiálů (přeloženo) [26]

V **oblasti I** nejprve probíhá mikro-plastická deformace vzorku v místě bezprostředně pod razníkem, způsobená počátečním kontaktním napětím. Brzy poté začíná dominovat elastická deformace, charakteristická pro tuto oblast. Při případném odtížení během této fáze není zanechána makroskopická plastická (trvalá) deformace zkušebního tělesa [25, 11].

Oblast II je označována také jako oblast plastického ohybu. Charakterizuje se odklonem od lineariry, způsobeným růstem zplastizované zóny z oblasti kontaktu s razníkem napříč tloušťkou ZT a následně také v radiálním směru [25, 11].

Oblast III má počátek v inflexním bodu křivky. Vyznačuje se přechodem od plastického ohybu k tzv. membránovému protahování a je závislá na charakteristikách zpevnění zkoušeného materiálu [25, 11].

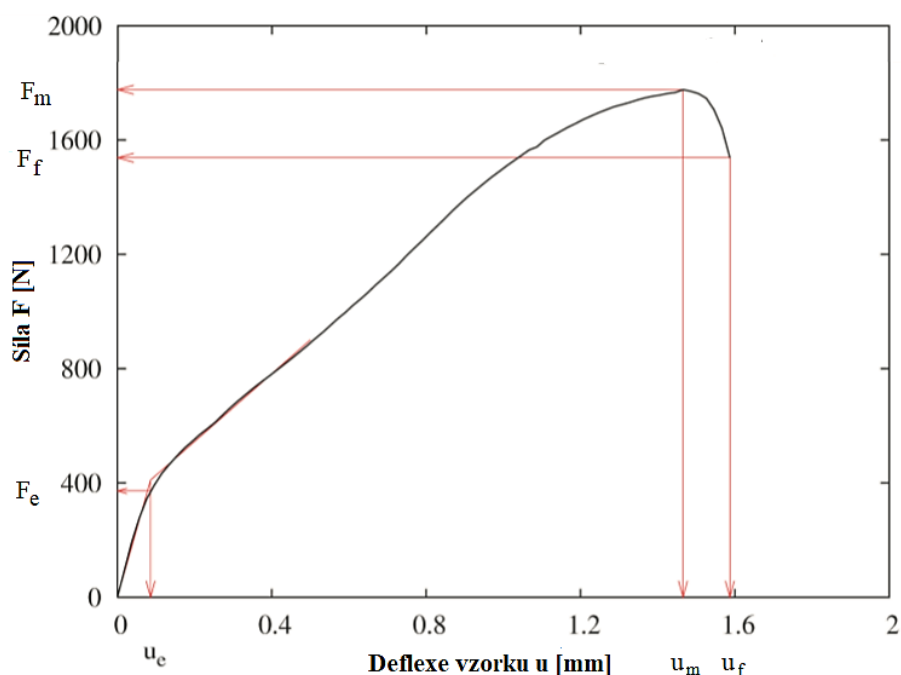
V **oblasti IV** dochází k projevu vzniku hrdla ZT, indikovanému snížením sklonu závislosti síla-posunutí [25, 11].

Oblast V znázorňuje iniciaci trhliny. Brzy dochází, za dvojosého stavu napjatosti, k jejímu růstu po obvodu nebo vrcholu vzorku [25, 11] a následuje ukončení zkoušky.

Průběh křivky je závislý na mnoha faktorech. Například na zkoumaném materiálu, poloměru použitého razníku r , průměru díry zápusťky (D_2) a počáteční tloušťce zkušební vzorku h_0 [11].

4 Vyhodnocení charakteristik křivky

Výsledná křivka $F-v$ (zatížení-posuv razníku) či $F-u$ (zatížení deflexe vzorku) obsahuje informace o průběhu elasticko-plastické deformace zkušebního tělesa. Křivka slouží k vyhodnocení níže uvedených parametrů, indikovaných na Obrázku 7. Charakteristiky je možné pomocí empirických vztahů korelovat s hodnotami pevnostních charakteristik, odpovídajících výsledkům z tradičních jednoosých tahových zkoušek [4 – 6].



Obrázek 7: Charakteristiky vyhodnotitelné ze závislosti $F-u$ (přeloženo) [4]

F_e	[N]	síla přechodu z lineární fáze (I) do zóny plastického ohybu (II)
F_m	[N]	maximální síla naměřená během zkoušky
u_m	[mm]	deflexe vzorku odpovídající maximální síle F_m
u_e	[mm]	deflexe vzorku odpovídající při síle F_e
u_f	[mm]	deflexe vzorku odpovídající 20% poklesu síly následujícímu F_m
E_{sp}	[J]	lomová energie vyhodnocená pod křivkou v průběhu zkoušky

K vyhodnocení hodnoty F_e je možné použít **2 metody**:

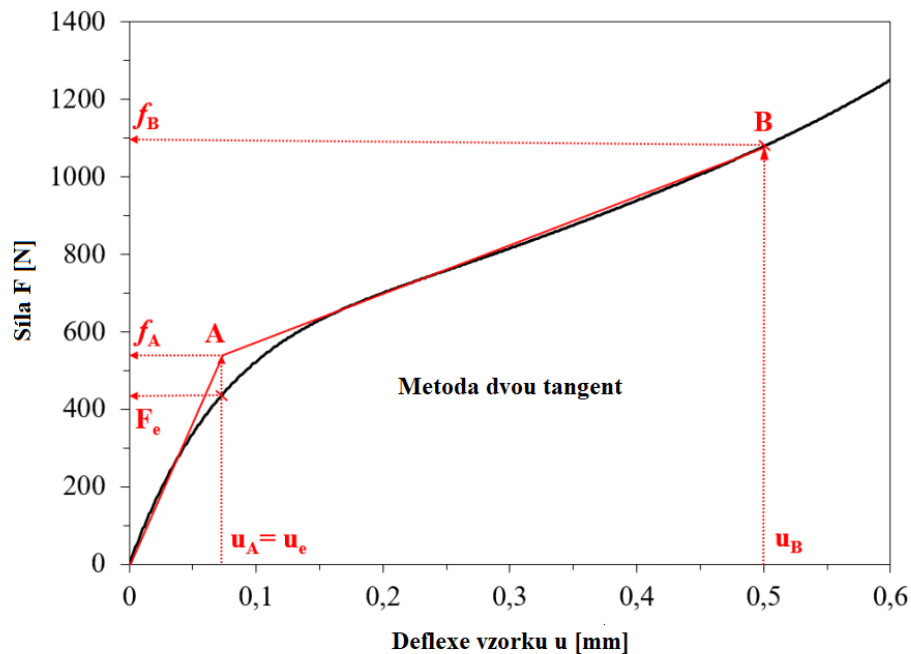
Prvním způsobem je **metoda dvou tangent** (viz Obrázek 8), během které jsou oblasti křivky I a II proloženy přímkami podle následující rovnice (1) funkcí $f(u)$ [6]:

$$f(u) = \begin{cases} \frac{f_A}{u_A} * u & \text{pro } 0 \leq u \leq u_A \\ \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A & \text{pro } u_A \leq u \leq u_B \end{cases} \quad (1)$$

Pro minimalizaci odchylky se používá metody nejmenších čtverců pomocí vztahu (2) [6]:

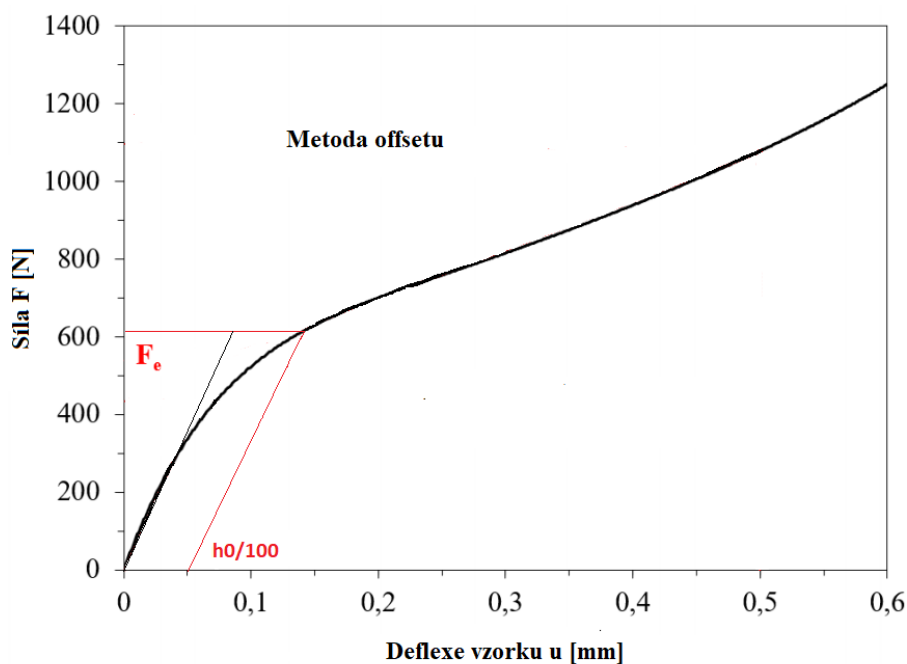
$$err = \int_0^{u_b} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (2)$$

Stanovení proměnných f_a , u_a a f_b regresní analýzou pro maximální hodnotu korelace se základní funkcí $F(u)$ pak ponechává jako jediný volný parametr v optimalizaci hodnotu u_b , kterou je doporučeno volit jako $u_b = h_0$ [7]. F_e se poté odečte z křivky v bodě A [6].



Obrázek 8: Ukázka vyhodnocení hodnoty F_e metodou bilineární funkce $f(u)$ (přeloženo) [6]

Přesto, že vyhodnocování F_e metodou dvou tangent uvádějí normativní dokumenty v rámci ASTM [6] i EN [5], v mnoha odborných článcích se lze setkat také s metodou vyhodnocení bodu F_e , **smluvně, tzv. offsetem** (viz Obrázek 9). K vyhodnocení je použita zkonstruovaná rovnoběžka k elastické části křivky. Počátek rovnoběžky je ve smluvní hodnotě průhybu vzorku $u = h_0/100$ [27], $u = h_0/10$ [28, 29, 66], nebo jiné [30 – 32]. Rozdíl v hodnotě F_e vyhodnocené metodou dvou tangent a metodou offsetu může být v řádu několik desítek N.



Obrázek 9: Ukázka vyhodnocení hodnoty F_e metodou offsetu

4.1 Stanovení mechanických vlastností

Parametry vyhodnocené z průběhu křivky lze použít pro odhad určitých pevnostních a křehkolomových vlastností ekvivalentních k výsledkům standardních zkoušek, jako jsou [5, 7]:

$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$DBTT$	[°C]	Tranzitní teplota přechodu křehkého a tvárného lomu
J_{IC} , (resp. K_{IC})	[MPa m]	Charakteristiky lomové houževnatosti

Ke stanovení charakteristik $R_{p0,2}$, R_m , kterými se bude praktická část práce zabývat, existují dva významně odlišné přístupy [11]:

1. Pomocí **empiricky stanovených korelací** mezi výsledky standardizovaných zkoušek tahem a parametry protlačovacích zkoušek. Tento přístup bude rozebrán v následující kapitole 4.1.1.
2. Metody využívající **matematického modelování** pomocí konečných prvků a neuronových sítí.

4.1.1 Korelační vztahy pro odhad pevnostních charakteristik

První empiricky stanovené rovnice se v literatuře objevují od konce 80. let minulého století. Mao a Takahashi [33] používají pro stanovení meze kluzu ocele, zde značené σ_y , a meze pevnosti, σ_{UTS} , ze zkoušky SPT rovnici (3), respektive (4):

$$\sigma_y = 360 \left(\frac{P_y}{t_0^2} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$\sigma_{UTS} = 130 \left(\frac{P_{max}}{t_0^2} \right) - 320 \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

, kde P_y je síla F_e , P_{max} je síla F_m , a t_0 je tloušťka vzorku h_0 .

Další rovnice uvádějí například [30, 34]. Publikované závislosti nelze nicméně považovat za universálně použitelné. Průběh zkušební křivky, a tedy i charakteristiky z ní vyhodnocené, se liší v závislosti na použitém zkušební stroji, přípravku a zkušebních podmínkách [11]. Jak ukazuje závěr experimentů Němčíkové [37], porovnávající dostupné závislosti, je tedy ve většině situací dosahováno nejlepší shody při odvození vlastních korelačních závislostí a jejich koeficientů. V aktuálních normativních dokumentech [5, 6] se z toho důvodu uvádí obecné rovnice ve tvaru (5) a (6):

$$R_{p0,2SPT} = \beta_{Rp0,2} * \frac{F_e}{h_0^2} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

$$R_{mSPT} = \beta_{rm} * \frac{F_m}{(h_0 * u_m)} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

, kde F_e je síla značící přechod z lineární fáze, F_m je maximální síla, u_m je deflexe vzorku při maximální síle a h_0 je tloušťka vzorku a β_{rm} a $\beta_{Rp0,2}$ jsou materiálově závislé koeficienty.

Návrh normy FprEN 10371:2020 [5] udává pro ocelové materiály a příslušné zkušebních podmínky konkrétní hodnoty koeficientů β_{rm} a $\beta_{Rp0,2}$, zobrazené v Tabulce 4:

Tabulka 4: Korelační koeficienty rovnic pro ocelové materiály udané v FprEN 10371:2020 [5]

Vzorek	Poloměr razníku r [mm]	Díra zápusťky D_2 [mm]	Hrana díry R [mm]	Tloušťka ZT h_0 [mm]	Křivka	β_{Rm} [-]	$\beta_{Rp0,2}$ [-]
Disk 8/0,5	1,25	4,0	Sražení 0,2 x 45	0,5	F(u)	0,1920	0,5100

CWA 15627:2007 [4] a E3205-20 [6] konkrétní hodnoty koeficientů neudávají.

5 Aktuální stav normativní dokumentace

V současné době není rozšířeno mezinárodní používání jakékoli normy sjednocující široké možnosti aplikace zkoušek SP. Nová norma v rámci ASTM E3205-20 [6], která toto může po dlouhé době umožnit, byla schválena teprve v červnu tohoto roku a zatím očekává rozšíření. V Japonsku je již řadu let platná a používaná národní norma [38], která se však zaměřuje pouze na zkoušky creepových vlastností (SPC) a pouze její malá část je z japonštiny přeložena [16]. Většina prováděných zkoušek SPT v současnosti stále probíhá podle doporučení poskytovaných technickou dohodou CWA 15627 [4]. Výsledky dosavadních porovnávacích testů nicméně ukázaly, že je předpis ve stávající podobě nedostatečný a je ho nutno revidovat [2]. Aktivita probíhající ohledně nových normativních dokumentů pro zkoušky SPT lze rozdělit na ty, které probíhají v rámci CEN a sdružených organizací působících v Evropě a na ty, zaštiťované americkou ASTM.

5.1 Standardizace v rámci CEN

CEN, Evropský výbor pro normalizaci, je společenství sdružující normalizační orgány 34 evropských států, včetně České a Slovenské republiky. Společně s CENELEC (Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice) a ETSI (Evropský ústav pro telekomunikační normy) tvoří tři evropské organizace, které jsou oficiálně uznávány Evropskou unií jako odpovědné za vývoj a definování dobrovolných standardů na evropské úrovni [39].

5.1.1 CWA 15627:2007

Výsledkem iniciativy členů CEN, započaté v roce 2004, byla technická dohoda s označením CWA 15627 [4], vydaná v prosinci 2007. Pod názvem „Small Punch Test Method for Metallic Materials“ představuje sdílenou představu organizací ohledně vhodného postupu provádění a vyhodnocování zkoušek SPT. Určená je především pro kovové materiály a „(dohoda CWA) byla vyvinuta s cílem poskytnout vodítko při výběru experimentálních podmínek, vhodných pro získání robustních, reprodukovatelných a přesných výsledků“ [4]. Nejedná se však o normu, ale o nižší úroveň konsenzu [39].

Rozsah dokumentu

Autoři dohody zmiňují, že postavení obou hlavních metod SPT se může v praxi lišit. Například některé subjekty mohou mít, s přihlédnutím ke strategickým a ekonomickým cílům, zájem vyvíjet pouze verzi pro hodnocení creepových vlastností, zatímco jiné se budou specializovat na zkoušky pevnostních charakteristik. Ve snaze o flexibilitu použití a umožnění odděleného vývoje obou variant SPT je dokument CWA 15627:2007 [4] rozdělen do 2 samostatných částí. První část

(PART A) se zabývá doporučeními pro SPC test, zkoumající creepové vlastnosti, druhá část (PART B) popisuje SP zkoušky tahových a lomových vlastností. Každá z částí má své dodatky (ANNEXES), ve kterých jsou, mimo jiné, uvedeny pokyny pro interpretaci výsledků či řešení častých technologických problémů [4].

5.1.2 FprEN 10371:2020

Pod tímto označením je v současné době zpracováván návrh nové EN normy „Metallic materials – Small punch test method“, připravovaný pod záštitou ECISS technickou komisí TC101/WG1 [5]. Obsah vychází ve velké míře z CWA 15627:2007 [4] v doporučeních, které se týkají například zkušebního přípravku a průběhu testu. Přílohy, které poskytují pokyny k vyhodnocování naměřených dat, byly však významně rozšířeny a doporučení, které se týkají zkušebního tělesa, vychází pak převážně z praxe. Po mnoha úpravách je návrh ve fázi připomínkování národních orgánů, očekává se nicméně přijetí normy v blízké době. Po vydání nahradí, především v Evropě, zmiňovanou technickou dohodu CWA 15627:2007.

Rozsah dokumentu

Dokument specifikuje přípravu a průběh zkoušek SP i SPC od kryogenních po vysoké teploty. Specifika pro obě metody rozebírají příslušné kapitoly. V přílohách jsou opět směrnice pro vyhodnocování tažných, lomových i creepových vlastností z naměřených dat. Narozdíl od CWA 15627:2007 [4] již udává pro korelaci s výsledky tahových zkoušek konkrétní rovnice, včetně jejich koeficientů pro některé zkušební podmínky [5].

5.2 Standardizace v rámci ASTM

ASTM International je mezinárodní normalizační organizace se sídlem v USA, v jejímž rámci se vyvíjí a publikují dobrovolné technické standardy ASTM [40]. Z již vydaných norem se metodám podobným SPT věnují například F2183-02 [41] (stažena v 2017) a F2977-13 [42], které se zabývají prováděním SP testů na UHMWPE (polyethylenového vlákno), resp. polymerních biomateriálech za pokojových teplot, používaných při výrobě implantátů ve zdravotnictví. Tyto normy neposkytují nástroje pro odvozování materiálových vlastností a některé charakteristiky, relevantní nejen pro jaderný průmysl, jako je DBTT a creepové chování, nejsou zahrnuty [16]. Protlačovací zkouškou kovových plechů kuličkou, která je velice podobná SPT, se zabývá norma E643-15 [43]. Průměr ZT a průměr razníku je však při této zkoušce přibližně 10x větší a norma je používána pouze pro zkoumání deformovatelnosti plechů, opět tedy nezahrnuje odvození základních mechanických vlastností [16].

Zvýšená pozornost standardizaci SPT zkoušek začala být v rámci ASTM věnována od roku 2014 [12], [64], kdy se v Houstonu, USA, uskutečnilo 6. mezinárodní sympozium pro testování malých vzorků a byla představena první verze návrhu nové normy, pod označením WK47431 [17].

V roce 2017 došlo ke stažení tohoto návrhu a pokračování vývoje pod novým označením WK61832 [7]. Současně s tímto přechodem byly spuštěny několikaměsíční mezilaboratorní zkoušky ILS1408 [44], zahájené za účelem stanovení míry preciznosti navrhovaného postupu. Na těchto zkouškách spolupracovalo 12 světových laboratoří, včetně dvou z České republiky – ÚJV Řež, a. s., které projekt organizovalo, a COMTES FHT. Závěry studie byly zapracovány do návrhu normy. V červnu 2020 byla po dlouhém procesu schvalování norma oficiálně přijata pod označením E3205-20 [6].

5.2.1 ASTM E3205-20

Dokument s názvem „Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials“ představuje výsledek několikaleté činnosti spravované podkomisí E10.02 - Behavior and Use of Nuclear Structural Materials [6]. Opět z velké části vychází z technické dohody CWA 15627:2007 [4], je však přítomno mnoho rozdílů oproti návrhu normy FprEN 10371:2020 [5].

Rozsah dokumentu

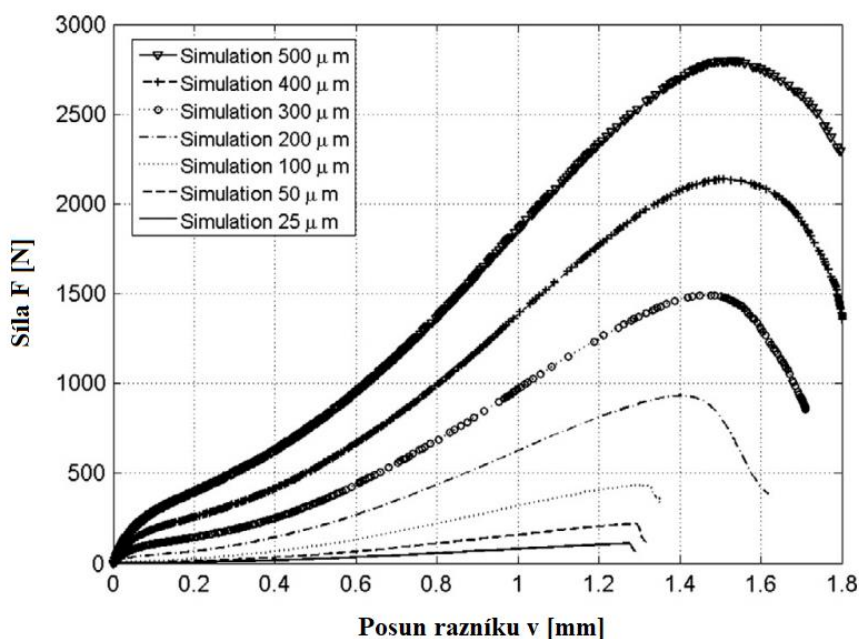
Norma zahrnuje postupy pro provádění SP zkoušek do teplot 450 °C, na jejichž základě lze u kovových materiálů provést odvození hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v tahu. Dále lze také určovat tranzitní teplotu mezi křehkým a houževnatým lomem pomocí „Bulge punch metody, v teplotním rozmezí -193 °C až 350 °C pro materiály na bázi železa, nebo do 0,4 teploty tání pro ostatní kovové materiály. Změnou oproti ostatním normativním dokumentům je, že se dokument již metodou SPC pro zkoušky tečení nezabývá [6].

6 Přehled vlivů na průběh zkoušky a požadavky normativní dokumentace

SPT zkoušky nejsou ekvivalentem jednoosého testování a nemůžou v současné době zkoušky na tělesech standardní velikosti nahradit, nicméně umožňují odhady hodnot pevnostních charakteristik [5]. Na přesnost, preciznost a porovnatelnost těchto odhadů má vliv řada faktorů ovlivňujících průběh křivky získané v průběhu testu a následnou korelaci. Vliv variace těchto faktorů je nutné znát, aby mohlo docházet k racionálním doporučením v rámci normativní dokumentace. V dostupné literatuře a normativních dokumentech v rámci ASTM [6] a EN [4, 5] jsou rozebírány především následující vlivy na průběh zkoušky:

6.1 Tloušťka vzorku

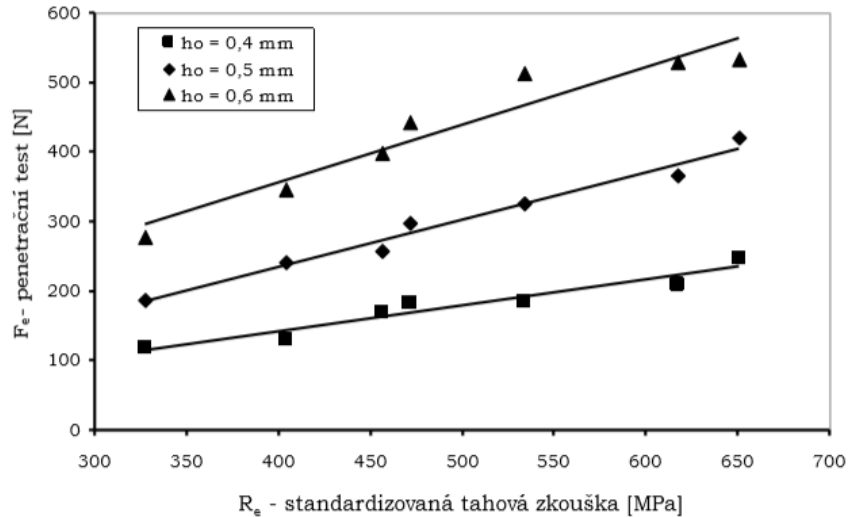
Rozdíly v tloušťce jednotlivých zkušebních těles h_0 mají vliv na průběh $F-u/F-v$ křivky, který znázorňují výsledky S. Haroushe a spol. [45] na Obrázku 10. Vliv malých rozdílů tloušťky pak demonstruje například [46].



Obrázek 10: Vliv tloušťky h_0 zkušebního tělesa na průběh $F-v$ křivky SP (přeloženo) [45]

Z Obrázku 10 je patrné, že při zkouškách na tělesech s nižší tloušťkou h_0 dochází k poklesu sil F , včetně maximálního zatížení F_m [1, 11, 36]. Testy za těchto podmínek také vykazují méně

výrazný průběh elastické část křivky [1]. Vliv tloušťky h_0 na sílu přechodu z elastické fáze F_e , který ilustruje Matocha [11], je zobrazen na Obrázku 11:



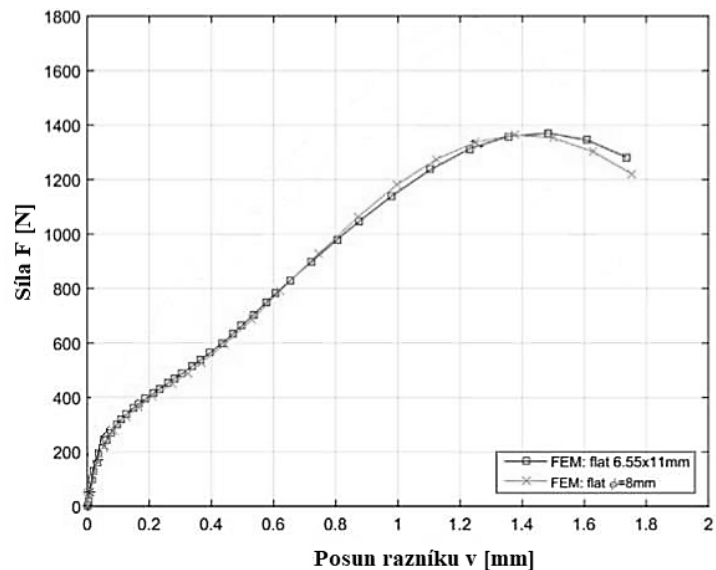
Obrázek 11: Vliv tloušťky zkušebního disku na úroveň síly F_e během „Bulge testu“ oceli 15128 při laboratorní teplotě ($r = 1$ mm, $D_2 = 4$ mm) [11]

Současné normativní dokumenty [4 – 6] z těchto důvodů požadují dodržení tloušťky vzorku s přibližně $\pm 1\%$ přesností.

Empirické korelace pro výpočet meze kluzu (viz rovnice 5) užívají parametru v podobě F_e/h_0^2 , protože v tomto tvaru je vliv tloušťky vzorku na sílu F_e eliminován [46]. Stejně pak parametr $F_m/(u_m \cdot h_0)$, využívaný při korelacích s mezí pevnosti (rovnice 6), eliminuje vliv tloušťky vzorku na F_m a u_m [47].

6.2 Průměr vzorku

Plocha ZT, která přesahuje průměr díry záпустky (ta je standardně $D_2=4$ mm), do které je vzorek protlačován, musí být dostatečná pro jeho pevného uchycení. Po splnění této podmínky, dodatečný materiál ani jeho kontura nemají na průběh zkoušky vliv [48]. Toto demonstrují Dwivedi [22] i Simonovski [23], kteří, při porovnání numerických simulací disku o průměru $D_s = 8$ mm a tělesa ve tvaru obdélníku o rozměrech 6.55 x 11 mm, pozorovali téměř identický průběhy křivky F - v . Jejich zjištění ilustruje Obrázek 12:

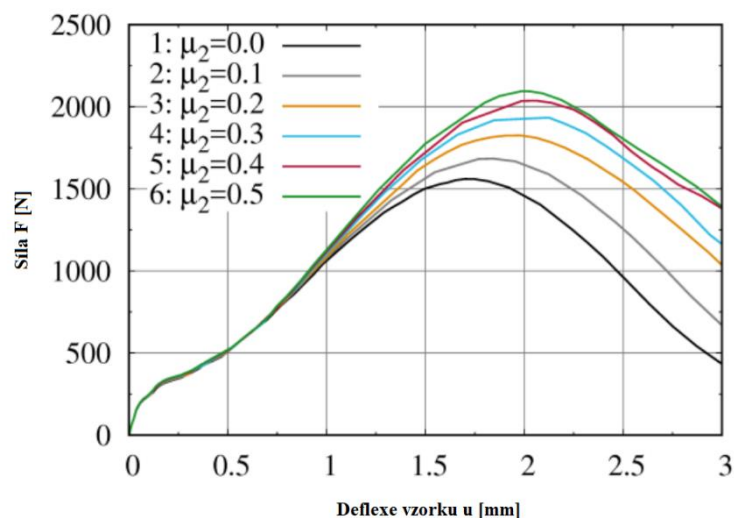


Obrázek 12: Porovnání průběhu F-v křivky pro těleso kruhového a obdélníkového tvaru při použití zápusťky s dírou o průměru 4 mm (upraveno) [23]

Požadavky jednotlivých normativních dokumentací průměr ZT byly rozebrány v kapitole 2.1.3. Stejně jako u tloušťky ZT h_0 , opět je tolerována odchylka přibližně $\pm 1\%$. V praxi je nicméně více pozornosti věnováno dosažení požadované tloušťky ZT, spíše než jeho průměru.

6.3 Lubrikace a povrch vzorku

Numerické simulace [23, 49] naznačují, že v průběhu testu, při aktuálním průhybu vzorku nad hodnotu přibližně 0,6 mm, dochází mezi razníkem a ZT ke vzájemnému tření (viz Obrázek 13), které může mít vliv na následující průběh zkoušky.



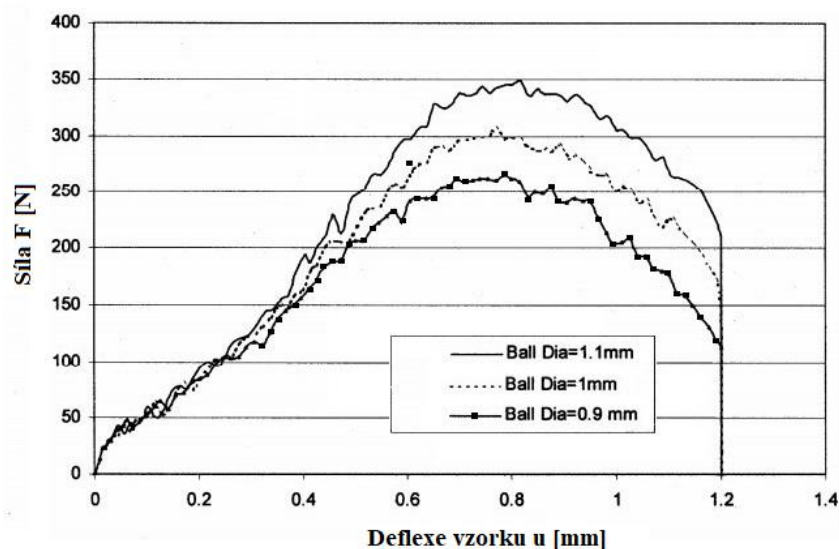
Obrázek 13: Vliv měnícího se koeficientu tření mezi razníkem a ZT na průběh výsledné křivky SPT (přeloženo) [49]

Při změně koeficientu tření μ dochází k posunu křivky $F-u$ směrem k vyšším hodnotám F_m i u_m (oproti $\mu \approx 0$ nárůst F_m až o 30 % při $\mu = 0,5$ [23, 48]). Koeficient tření by měl proto být udržován na známé a konstantní hodnotě. Z dostupné literatury používá lubrikaci razníku a vzorku pro minimalizaci tření například [50], s dosahovanou hodnotou koeficientu $\mu = 0.1$ pro styk ocel/ocel, rozšířené však použití lubrikantu není. Jeho použitím by nicméně mohlo docházet ke snížení opotřebení razníku a hrany zápusky a prodloužení jejich životností. Vzhledem k obecné absenci lubrikantu v kontaktu ZT s razníkem či ZT s hranou zápusky se na tvorbě koeficientu tření podílí velkou měrou materiálové vlastnosti a profil povrchu prvků.

Normativní dokumenty [5, 6] toto adresují stanovením maximální drsnosti povrchu R_a zkušebního vzorku na hodnotu $0,25 \mu\text{m}$. Lubrikace zmiňována není [5, 7].

6.4 Vrchol razníku

K protlačování se používá razník zakončený polokoulí (hemisférický) [50, 10], případně razníkem přitlačovaná kulička [45]. S rostoucím rozměrem obou variant prvku je reportován posunu maximálních sil F_m směrem k vyšším hodnotám [45, 46, 51], jak je ilustrováno na Obrázku 14:



Obrázek 14: Vliv měnícího se průměru kuličky razníku r na průběh zkoušky (část. přeloženo) [51]

Omacht a spol. [2] použití kuličky za vhodné nepovažují. Při jejich výzkumu vznikala během jejího používání deformace razníku a následné vyosení zatěžovací síly touto kuličkou. Zmínění autoři současně doporučují používání razníku o poloměru $r = 2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$. Na druhou

stranu použití kuličky umožňuje její častější výměnu, v porovnání s celým razníkem, a vliv opotřebení na průběh zkoušky může být tedy redukován [16].

Normativní dokumenty [5, 6] umožňují použití hemisférického razníku i kuličky a stanovují standardní velikost rozměr vrcholu na $r = 1,25$ mm. Norma E3205-20 [6] povoluje odchylku $\pm 0,01$ mm, návrh normy FprEN 10371:2020 [5] udává toleranci $H6^{+0,006}$ mm.

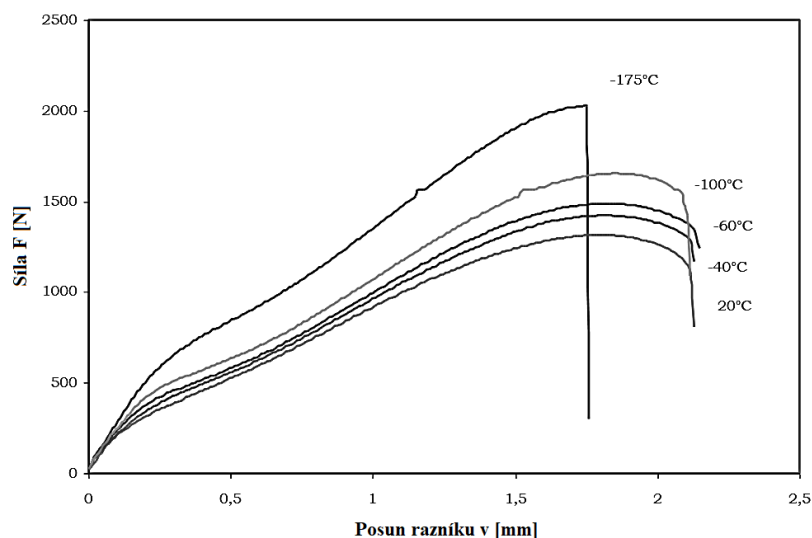
6.5 Způsob měření posuvu

Změnu dráhy v průběhu testu lze měřit třemi hlavními způsoby. V případě zaznamenávání posunu razníku či posunu příčnicku stroje je měření ovlivněno elastickou deformací daného razníku [2, 11], respektive tuhostí zatěžovacího systému [8], kterou je nutné kompenzovat. Tato uspořádání bývají používána často, díky jednoduchosti jejich implementace [52]. Pro potlačení vlivu tuhosti prvků je možné měřit přímo deflexi (průhyb) vzorku extenzometrem přivedeným k jeho spodní straně [2, 46]. Sestava je pak mírně složitější a naměřené hodnoty jsou ovlivněné ztenčováním vzorku, ke kterému během testu dochází. Absorbovaná lomová energie E_{sp} je proto mírně podhodnocena [53], ale celkově se jedná o preferovatelný způsob měření [52].

Dokumenty E3205-20 [6] a FprEN 10371:2020 [5] upřednostňují měření deflexe vzorku, dovolují však alternativně i měření posunu razníku.

6.6 Měření teploty

Při nižších teplotách dochází k posuvu křivky k vyšším hodnotám sil F [11]. Vliv měnící se teploty na průběh testu znázorňuje Obrázek 15:



Obrázek 15: Průběh závislosti síla-posunutí razníku za různých teplot (upraveno) [11]

Teplota by proto měla být během testu udržována konstantní.

E3205-20 [5] dovoluje interval odchylky teploty ± 3 °C, požadavky FprEN 10371:2020 [5] jsou shrnuty v Tabulce 5. Aby docházelo k měření aktuální teploty co nejpřesněji, je doporučeno termočlánek dovést k přímému dotyku se ZT [2], například společně s extenzometrem ze spodní strany vzorku.

Tabulka 5: Povolené odchylky od zkušební teploty podle FprEN 10371:2020 [5]

Zkušební teplota T [°C]	Dovolená odchylka T_i od T [°C]
$T < 600$	± 2
$600 < T \leq 800$	± 3
$800 < T \leq 1000$	± 4
$1000 < T \leq 1100$	± 5

6.7 Upnutí zkušební tělesa

Měření skutečné přítláčné síly působící na ZT není příliš praktické, protože by bylo nutné kalibrovat velikost utahovaného momentu pomocí tenzometrických měření k této síle [46]. Vzhledem k podobné konstrukci zkušebních přípravků bývá proto v praxi upnutí určováno velikostí momentu použitého k utahování upínací matice.

Nedostatečný/měňící se moment utažení může způsobovat rozptyl hodnot F_e [23]. Napětí na vzorku musí být tedy dostatečné pro jeho bezpečné uchycení, přepětí by však mohlo způsobit nechtěnou plastickou deformaci tělesa před začátkem samotného testu [5]. Prakash a Arunkumar [54] demonstrují, že s rostoucím momentem utažení dochází k posunu sil F , včetně F_m , k vyšším hodnotám [1]. Pro zajištění stálého torzního momentu je vhodné použít například momentový klíč.

Návrh normy FprEN 10371:2020 [5] doporučenou velikost utahovacího momentu neudává, norma E3205-20 [6] doporučuje volit hodnoty mezi 5 Nm a 15 Nm. Standardně se volí 10 Nm.

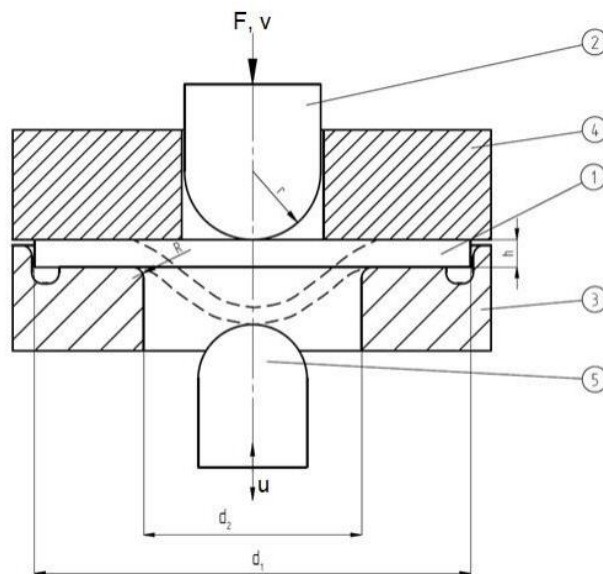
6.8 Preload

Preload je malé zatížení vzorku razníkem před začátkem vlastní zkoušky, popsané v kapitole 3.1. Kopřiva a spol. [10] vhodnost použití preloadu potvrzují a mezi možnostmi bez preloadu/15 N/30 N/60 N po 20 minut vyhodnocují hodnotu 15 N jako nejvhodnější a vykazující nejnížší rozptyl experimentálních dat.

E3205-20 [6] použití preladu nezmiňuje. FprEN 10371:2020 [5] doporučuje volit velikost preladu jako maximálně 10 % síly F_e nebo 25 N, podle toho, která z hodnot je nižší.

6.9 Geometrie a rozměry zkušební přípravku

Obecná podoba přípravku pro SP testy se shoduje napříč jednotlivými normativními dokumentacemi [4 - 6] Přípravek se skládá z částí zobrazených na Obrázku 16. Jeho skutečné rozměry i geometrie hrají důležitou roli při realizaci zkoušky, jak je patrné z požadavků normativních dokumentů, shrnutých v Tabulce 6. Nejdůležitějším prvkem přípravku je spodní zápusťka, u které jsou stanovené tolerance **průměru díry**, **hrany díry** a **průměru důlku** pro uložení ZT. Co se týče geometrie, dokumenty vyžadují pouze **rovnoběžnost důlku s protilehlou plochou matice** [5, 6].



1 = vzorek, 2 = razník, 3= spodní zápusťka, 4= utahovací matice, 5= extenzometr

Obrázek 16: Schéma zkušební přípravku podle E3205-20 [6]

Tabulka 6: Požadavky normativních dokumentů na zkušební přípravek a jeho geometrii [5, 6]

Charakteristika	FprEN 10371:2020 (EN)		E3205-20 (ASTM)	
	Průměr díry zápusťky D_2 [mm]	4,00	H6 ^(+0,008)	4,00
Hrana díry zápusťky R [mm]	0,2 x 45°	H6 ^(+0,006)	R 0,2	± 0,05
Průměr důlku pro uložení ZT D_1 [mm]	8	G6 ^(+0,007 až +0,02)	-	
Rovnoběžnost rovin spodní zápusťky a úchytné matice	(bez konkrét. hodnoty)		± 0.5°	
Tvrdość plochy zápusťky	55 HRC			

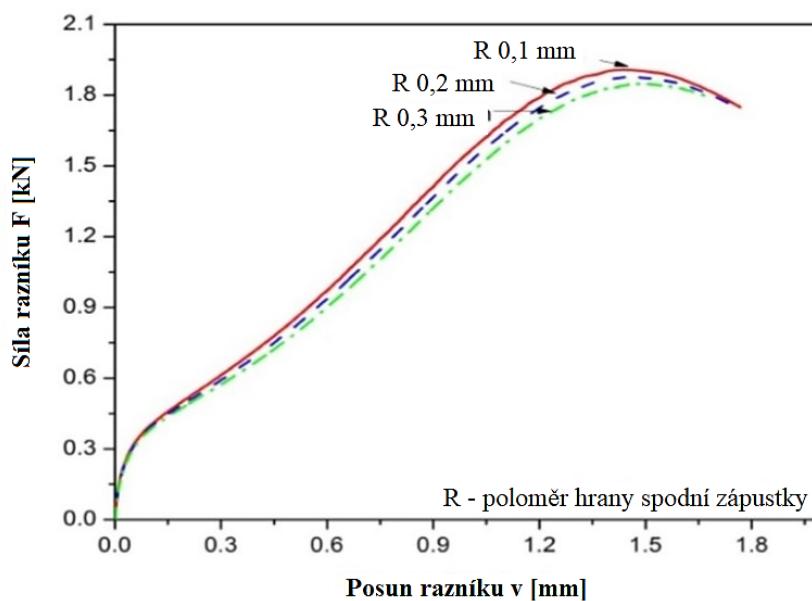
6.9.1 Průměr díry zápustky

Velikost průměru díry spodní zápustky vychází ze závislosti $D_2 > r + 2h_0$ (kde r je průměr hrotu razníku a h_0 je tloušťka vzorku) tak, aby deformace probíhala charakteristickým průběhem protlačování, ale aby nedocházelo ke tření mezi ZT a stěnou díry zápustky [25]. Pokud je díra menší, je protlačování obtížnější a lze očekávat posun sil F k vyšším hodnotám za současného poklesu dosahovaných deflexí vzorku. Tento předpoklad potvrzují Lucas a spol. [55] u zkoušky MDBT, ze které SP vychází. Zmínění autoři reportují s klesajícím průměrem díry D_2 posun inflexního bodu křivky F-u (síla-deflexe) směrem k nižším hodnotám deflexe u_i a vyšším hodnotám síly F_i . Vliv průměru díry zápustky a geometrických parametrů SPT studovali dále například Norris a Parker [56].

Požadavky norem na výrobu díry poukazují na důležitost tohoto prvku předepsáním tolerančního pole řádově 0,01 mm, což představuje pouhých 0,25 % nominálního rozměru. Pro běžný rozměr díry 4 mm toto stále odpovídá třídě přesnosti IT6, které je možné dosáhnout konvenčními metodami obrábění, bez nutnosti použití složitějších a dražších výrobních postupů. Vhodnost tolerančního pole díry H6 potvrzuje také Omacht a spol. [2], bez udání konkrétního důvodu.

6.9.2 Hrana díry zápustky

Hrana díry zápustky může být opatřena sražením 0,2 mm x 45° [např. 53], nebo zaoblením o poloměru R 0,2 mm [57, 58]. Kopriva a spol. [10] naměřili při použití zápustky se sraženou hranou její opotřebení již po 20 zkouškách, v rozsahu přibližně 30 μm . U zápustky se zaoblenou hranou za stejných experimentálních podmínek opotřebení nezaznamenali. Použití zaoblené hrany namísto úkosu doporučuje také Omacht [2] s tím, že se při výrobě sražení nedá definovat ostrost přechodové hrany a hrana může být v průběhu testu deformována a u keramiky občas uštípnuta, což vede k ovlivnění výsledků. Numerické simulace [59] na Obrázku 17 při použití zápustek s různými zaobleními hrany $R = 0,3 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$ a $0,1 \text{ mm}$ reportují s klesajícím zaoblením posun sil křivky F - v k vyšším hodnotám. Celková změna síly F_m činila přibližně 4 %, F_e pozorovatelnou změnu nevykazovala. Tyto závěry potvrzuje také [51].

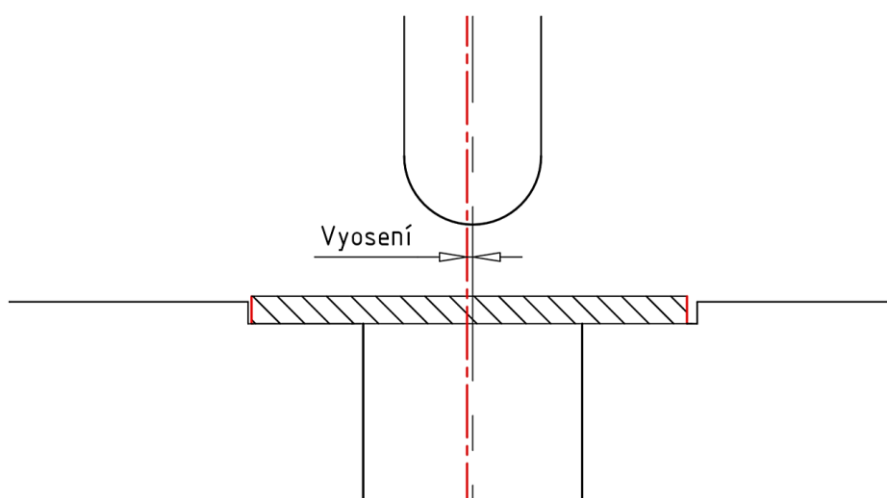


Obrázek 17: Vliv poloměru hrany spodní zápustky na křivku $F-v$ (síla – posun razníku), (upraveno) [59]

Rozdíly v požadavcích normativních dokumentací na tuto hranu byly zobrazeny v Tabulce 6. Norma E3205-20 [6] předpokládá používání zaoblené hrany zápustky (R 0,2), návrh normy FprEN10371:2020 [5] ale počítá se sraženou hranou (0,2 mm x 45°), což představuje jeden z hlavních rozdílů mezi dokumenty.

6.9.3 Průměr důlku pro uložení ZT

Průměr důlku D_l musí umožňovat snadné uložení i následné vyjmutí zkušebního tělesa. Minimální průměr důlku tedy vychází z maximálního průměru zkušebního tělesa D_s . Ilustruje Obrázek 18:



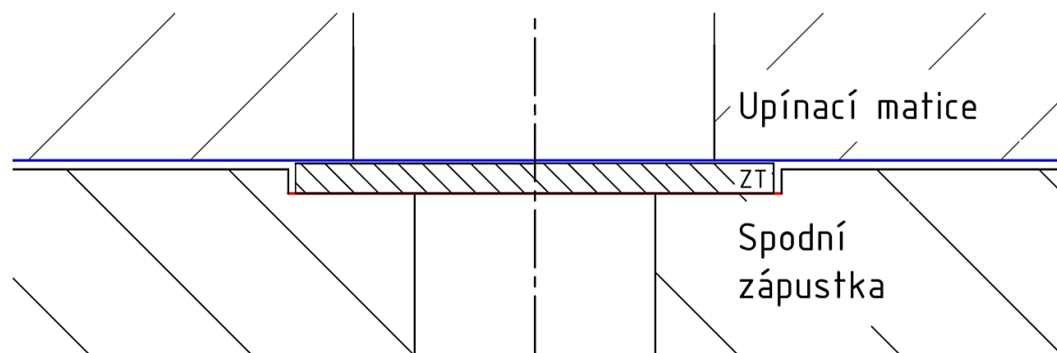
Obrázek 18: Ilustrace možného vyosení středu ZT způsobeného vřlím mezi průměrem ZT a průměrem důlku pro jeho uložení, není v měřítku

Jakákoli vůle tedy umožňuje uložení ZT do poloh s větší hodnotou vyosení jeho středu oproti ose razníku a díry zápusťky. Protože je však průměr ZT výrazně větší než průměr díry zápusťky, a většina materiálu slouží pouze pro pevné uchycení, nelze z důvodů diskutovaných v kapitole 6.2. vliv tohoto vyosení považovat za důležitý.

E3205-20 [6] ani CWA 15627:2007 [4] toleranční pole pro průměr důlku pro ZT nestanovují.

6.9.4 Rovnoběžnost důlku pro ZT s rovinou upínací matice

Rovnoběžnost obou ploch, ilustrovaná na Obrázku 19, se odvíjí od přesnosti výroby zápusťky i matice a způsobu jejich spojení. Spodní matice a utahovací zápusťka mohou být spojeny společným závitem, jak je tomu ve většině případů, nebo třemi [60] či šesti [61] šrouby. Při použití více šroubů je proto vhodné dbát na správný postup jejich utahování [62]. Nízká hodnota rovnoběžnosti ploch by mohla mít za následek nerovnoměrné rozložení upínací síly na ZT, tedy její lokální překročení, či nedosažení.

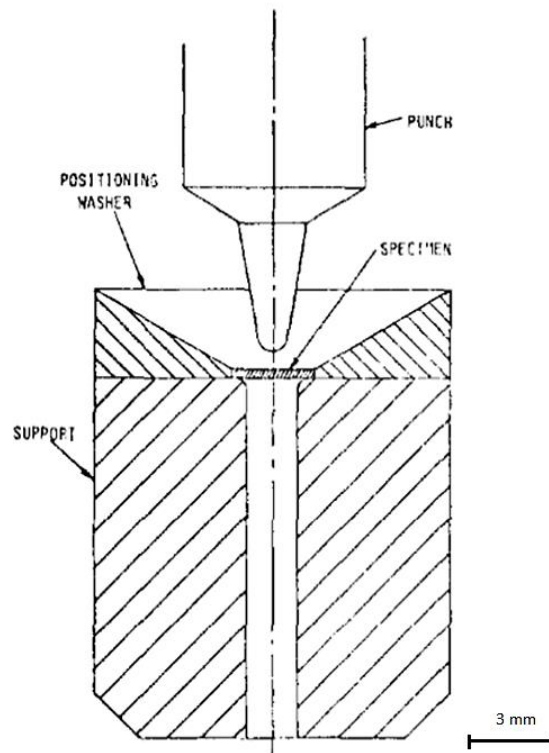


Obrázek 19: Ilustrace k rovnoběžnosti důlku pro uložení ZT (červeně) s plochou upínací matice (modře), není v měřítku

Přestože návrh normy FprEN 10371:2020 [5] udává konkrétní toleranci pro tuto charakteristiku, po vzájemném utažení spodní zápusťky a utahovací matice není prostor pro praktické vyhodnocování její skutečné hodnoty a vyhodnocována nebývá. Tato charakteristika není v dostupné literatuře zmiňována ani považována za důležitou.

7 Úvaha o neřešených oblastech geometrie přípravku

Z předcházející rešerše je patrné, že mnoho prokazatelných vlivů i potenciálních vlivů na průběh zkoušky je v dostupných zdrojích systematicky rozebíráno. Pokud se však jedná o vliv geometrie přípravku, je ve zdrojích k dispozici pouze minimální množství informací. Důležitost vlivu geometrie přípravku při protlačování miniaturních vzorků přitom zmiňuje již Manahan a spol. při diskusích ohledně MDBT zkoušky [63], ze které SPT přímo vychází. Rozdílem je u zkoušky MDBT [15] volné uložení zkušební tělesa (viz Obrázek 20), které má průměr 3 mm, ostatní prvky zkušební přípravku jsou tedy rovněž menší. Za nejdůležitější geometrickou charakteristiku přípravku MDBT je autory považována souosost prvků tvořících osu zatěžování [63]. Tou se rozumí, při pohledu na Obrázek 20, **souosost razníku, vzorku a díry spodní zápustky**.

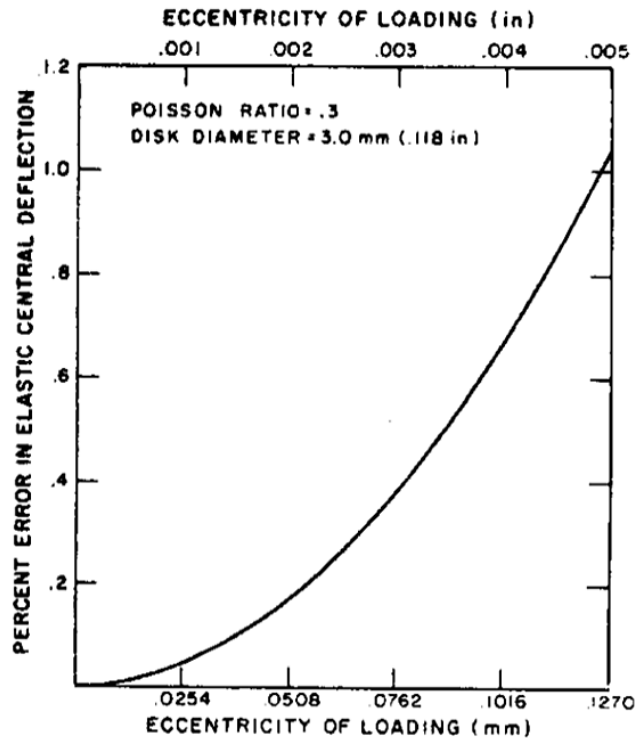


Punch = razník; Specimen = zkušební těleso; Support = zápustka

Obrázek 20: Schéma MDBT zkoušky; upraveno [15]

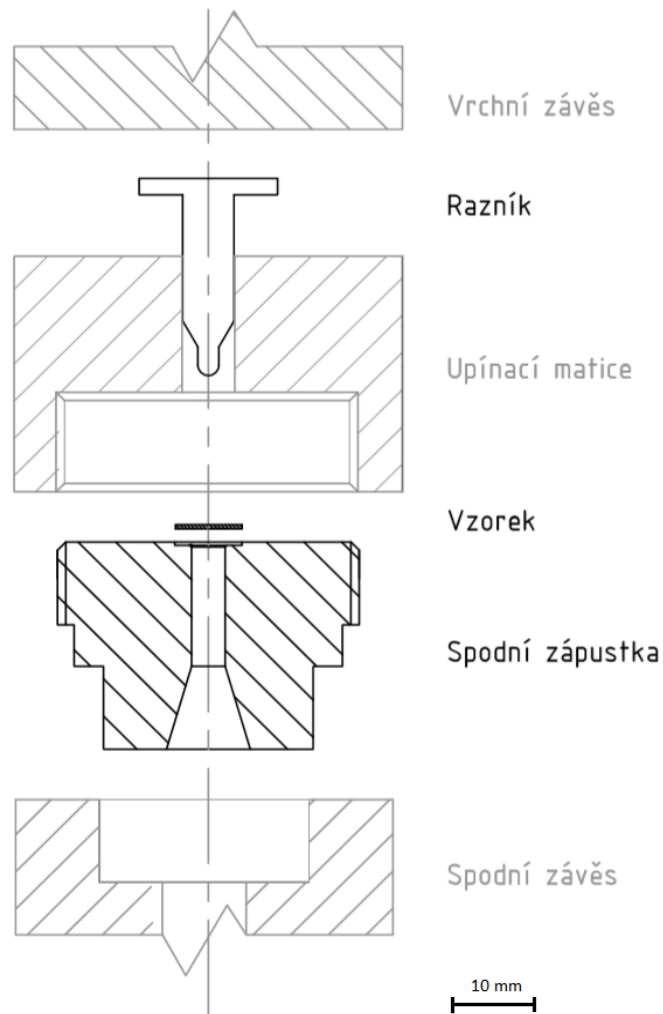
Odpor proti deformaci totiž stoupá s rostoucí hodnotou vyosení zatěžovací síly, tedy, když je vzorek protlačován blíže u stěny zápustky [63]. Také reportovaný rozptyl hodnot je menší pro případy s lepší souosostí [63]. Percentuální chybu elastické deflexe vzorku v závislosti na hodnotě souososti zatěžování odhaduje pro tuto zkoušku Manahan na Obrázku 21. Celková excentricita o

velikosti 0,0178 mm způsobovala během zatěžování odchylku v hodnotě 2,4 % po délce křivky. Vyosení v hodnotě 0,0635 mm způsobovalo odchylku o 4 %. Autory je diskutováno maximální vhodné vyosení zatěžovacích prvků přibližně 0,025 mm [63].



Obrázek 21: Odhad procentuální chyby elastické deflexe vzorku v závislosti na excentricitě zatěžování u zkoušky MDBT [15]

Vzhledem k téměř identické sestavě používané pro zkoušky SPT lze očekávat podobný vliv excentricity také u typického přípravku pro zkoušky SPT, schematicky zobrazeném na Obrázku 22. Takové uspořádání je používáno také ve společnosti ÚJV Řež, a. s. Úměrně s rostoucími rozměry je možné tento přípravek považovat za více odpouštějící konkrétní hodnoty vyosení, než tomu bylo u MDBT.



Obrázek 22: Schéma hlavních prvků přípravku a stroje pro zkoušky SPT používaného v ÚJV Řež, a. s.

Hlavní příspěvky k hodnotě nesouososti (excentricity) zatěžování u SPT, které lze rozlišit, jsou:

1. Souosost závěsů stroje
2. Vycentrování vzorku v zápustce
3. Výrobní tolerance spodní zápustky, ZT, razníku a upínací matice
4. Souosost díry spodní zápustky a osy razníku

První příspěvek je odstraněn oddělením razníku od vrchního závěsu stroje. Vrchní závěs přenáší sílu zatěžování na hlavu razníku, toho vedení je ale zajištěno dírou upínací matice, která navazuje pouze na spodní zápustku společným závitem.

Druhý příspěvek je zanedbatelný, protože narozdíl od MDBT jsou u SP zkoušky vzorky pevně uchyceny. To je výhodné, protože ty mohou být poté výrazně větší, než průměr díry spodní

zápustky – zarovnání vzorku vzhledem k ose symetrie zkušebního zatížení tedy již není důležité [61].

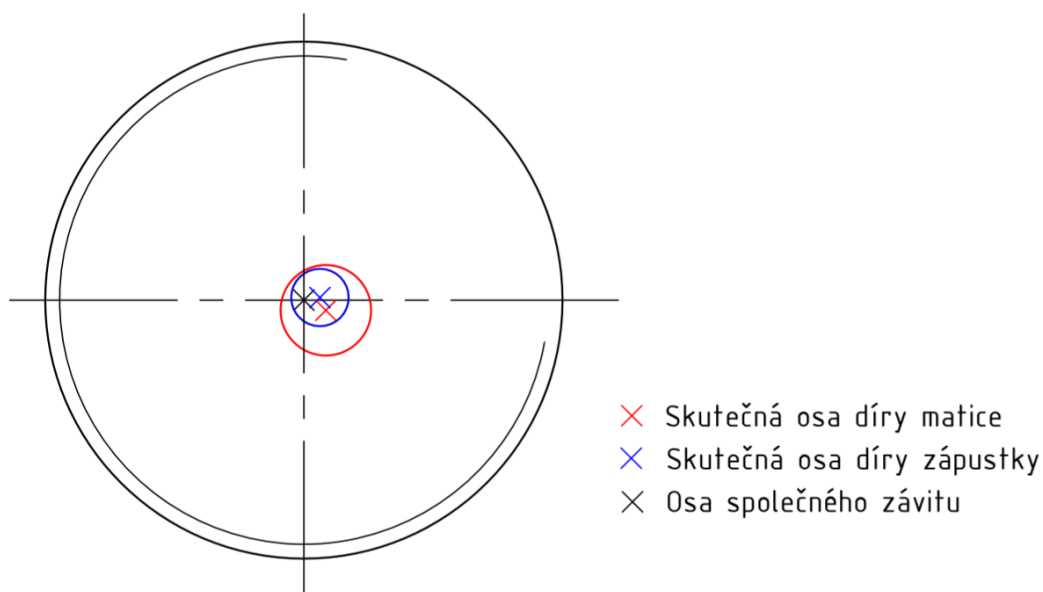
Třetí příspěvek je nutné redukovat přesnou výrobou a důkladnou kontrolou vyrobených dílů, jak zmiňuje Manahan u své zkoušky MDBT [63].

Nejvýraznější vliv má proto **čtvrtý** příspěvek – souosost razníku a díry spodní zápustky [63]. Protože je razník veden dírou utahovací matice, která je spojena společným závitem se spodní zápustkou je tento příspěvek **po sešroubování** dán:

- Souosostí závitu upínací matice s její dírou.
- Souosostí závitem zápustky s její dírou.

7.1 Souosost závitu s dírami zápustek a dírou upínací matice

Po založení ZT a sešroubování upínací matice a zápustky může skutečná situace vypadat například následovně (viz Obrázek 23):



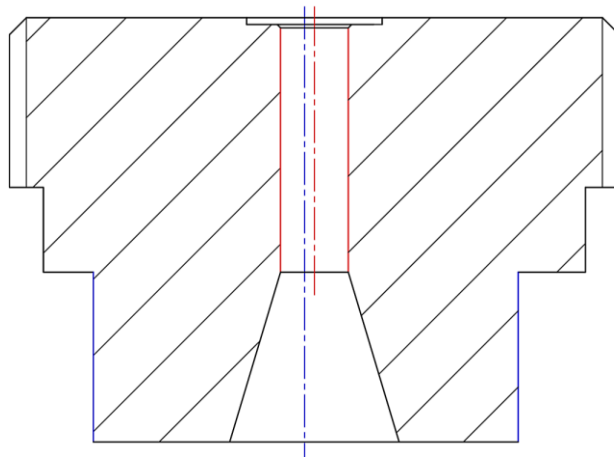
Obrázek 23: Ilustrace skutečné polohy prvků po sešroubování matice a zápustky, není v měřítku, pohled z vrchu

Obrázek 23 ilustruje, že skutečná velikost vyosení je závislá jak na hodnotě souososti obou děr a závitu, tak na vzájemném směru jejich polohy po sešroubování. Za předpokladu vkládání zkušebních těles o stejné tloušťce h_o a použití konstantního utahovacího momentu dojde vždy ke zašroubování do stejné vzdálenosti. Tedy, vzájemná poloha osy zápustky a osy upínací matice je unikátní pro každou kombinaci a stejná pro libovolný počet provedených zkoušek.

Výchozí hypotézou pro vyšší hodnoty skutečného vyosení os díry zápusťky a díry matice je, analogicky k MDBT testu, očekávaný posun deformačních sil křivky $F-u$ k vyšším hodnotám, protože protlačování může probíhat blíže u stěny díry a může tedy být silově náročnější [63]. Pravděpodobný je také větší rozptyl měřených hodnot [63] a může docházet k nerovnoměrnému opotřebení hrany. Opotřebení hrany zápusťky by mělo být výraznější v tom směru, ve kterém se nachází skutečná poloha středu díry upínací matice, z pohledu středu díry zápusťky.

7.2 Souosost díry zápusťky s usazením v závěsu

Protože jsou upínací matice i razník nezávislé na závěsech stroje a jsou spojené s dírou zápusťky pouze společným závitem, pro samotné uložení zápusťky do závěsů stroje není zřejmý vliv na osu zatěžování, a tedy průběh testu.



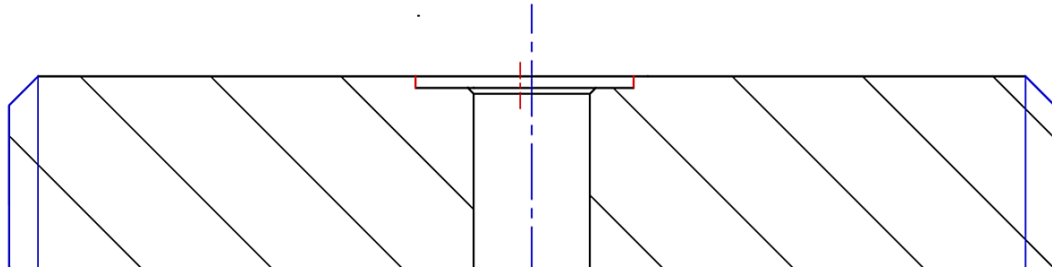
Obrázek 24: Ilustrace k souososti díry zápusťky a její části usazené v závěsu, není v měřítku

Výchozí hypotézou je, že rostoucí hodnota této charakteristiky na vyhodnocenou zkušební křivku nemá vliv.

7.3 Souosost stěny důlku pro ZT se závitem

Tato charakteristika je ilustrována na Obrázku 25. Při uvažování maximální přípustné hodnoty vyosení v hodnotě 0,1 mm, které připouští norma ČSN ISO 2768-2 [65] nepředepsaných tolerancí pro tyto rozměry, jedná se pouze o 1,25 % průměru ZT. Opět, jak bylo stanoveno v kapitole 6.9.3: *Průměr důlku pro uložení ZT*, protože je průměr ZT výrazně větší než průměr díry zápusťky a většina jeho materiálu slouží pouze pro pevné uchycení vzorku, nelze malé změny v uložení vzorku považovat za důležité [61].

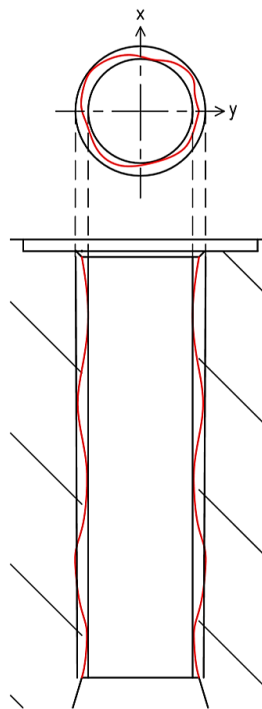
Výchozí hypotézou je, že mění se hodnota této charakteristiky nezpůsobuje vyhodnotitelné změny v průběhu zkušební křivky.



Obrázek 25: Ilustrace k vyosení dílku pro ZT vzhledem k závitě spodní zápusťky; není v měřítku

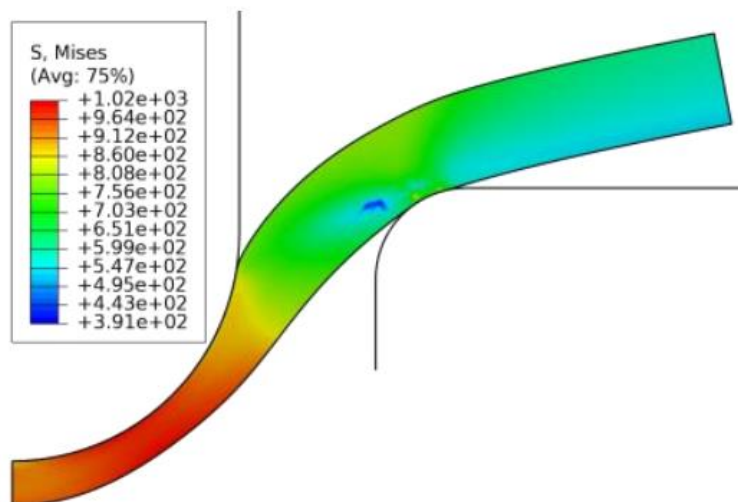
7.4 Válcovitost díry zápusťky

S rostoucí hodnotou válcovitosti lze uvažovat “vrcholy“ v rovině XY, ilustrované na Obrázku 26. Mezi těmito ‘vrcholy’ je prostor díry pro průchod ZT užší, potřebná síla pro protlačování ZT tedy vyšší a může vést místy k vyššímu opotřebení hrany.



Obrázek 26: Ilustrace válcovitosti díry zápusťky, není v měřítku

Vzorek se však nedotýká stěn celého válce, ale pouze bezprostřední blízkosti hrany zápusťky, jak ilustruje numerická simulace na Obrázku 27. Bylo by proto možné hodnotit pouze kruhovitosť otvoru díry.



Obrázek 27: Simulovaný dotyk ZT a zápustky, $\mu=0.2$ [49]

Hypotézu pro celkový vliv této charakteristiky na průběh křivek $F-u/F-v$ je obtížné stanovit, protože opačně musím uvažovat také směry, ve kterých vznikají „údolí“, s obrácenou silovou situací. Zde by mohla být zajímavá analýza metodou konečných prvků, protože osové díry bývají v praxi vyrobené přesně a vzájemné rozdíly v této charakteristice by se mohly mezi jednotlivými zápustkami (při uvažování nejistoty měření) překrývat.

8 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce navazuje na část teoretickou, ze které čerpá a na jejíž vztahy a úvahy se odkazuje. Cílem bylo, na základě vykonané rešerše, zhodnotit vliv vybraných geometrických či rozměrových charakteristik přípravku pro SP test na průběh zkoušky. Ten se projevuje například ve změně proměnné lineární korelační rovnice a jejího koeficientu korelace R . Během experimentu byly použity pouze nové zápustky, s doloženým materiálovým listem a ověřenými mechanickými vlastnostmi. Skutečné hodnoty rozměrových a geometrických charakteristik přípravku, změřené jak v externí akreditované laboratoři, tak interně, v rámci laboratoře, byly použity k výběru konkrétních zájmových charakteristik. Následně byl zvolen užší výběr zápustek, vhodných k dosažení vytyčených cílů. Experimentální část byla realizována ve společnosti ÚJV Řež, a. s.

8.1 Dokumentace výroby zápustek a zkušebních těles

Před počátkem praktické části předložené práce bylo u externího výrobce bylo objednáno zhotovení 10 nových spodních zápustek (viz *Příloha 1: Výrobní výkres zápustek*), na základě zkušebního přípravku používaného pro zkoušky SPT v akreditované zkušební laboratoři Mechanické vlastnosti v rámci společnosti ÚJV Řež, a. s. Laboratoř tohoto oddělení se věnuje široké škále akreditovaných zkoušek mechanických vlastností ozářených a neozářených materiálů, včetně následných vyhodnocení, prováděných zejména pro sektor jaderné energetiky.

Všechny zápustky byly opatřeny zaoblenou hranu díry $R = 0,2$ mm, z důvodu výhod zmiňovaných v kapitole 6.9.2. Zápustky svým návrhem odpovídaly požadavkům normy E3205-20 [6]. Materiálem byla kalená nerezová ocel X105CrMo17 (1.4125) s ověřenou hodnotou tvrdosti minimálně 55 HRC.

Zvolenými zkušebními tělesy byly disky o standardních rozměrech $D_s = 8$ mm a tloušťce $h_0 = 0,5$ mm. ZT byla zhotovena z bloku 7JRQ52 referenční oceli A533B. Chemické složení daného bloku a mechanické vlastnosti stanovené jednoosými zkouškami ve společnosti ÚJV Řež, a. s. udávají Tabulky 7 a 8:

Tabulka 7: Chemické složení bloku 7JRQ materiálu A533B (JRQ) [24]

Obsah [hm. %]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
	0,18	0,20	1,42	0,020	0,017	0,012	0,84	0,51	0,14

Testy proběhly na materiálu ve výchozím, neozářeném stavu.

Tabulka 8: Hodnoty pevnostních charakteristik stanovené z jednoosých tahových zkoušek A533B (JRQ) v ÚJV Řež, a. s. [Protokol o zkouškách, interní dokument ÚJV Řež, a. s.]

Výsledky jednoosých tahových zkoušek	T [°C]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
	24	479,77	618,91
	50	473,70	607,47
	90	456,90	583,10

Vzorky byly vyrobeny elektroerozivním dělením a následným jemným broušením a leštěním dle požadavků. Ukázka dvou z vyrobených zápustek a jednoho zkušebního tělesa je na Obrázku 28 (zápustka na levé straně obrázku je orientována tak, jak bývá usazena do závěsu stroje a je patrný důlek pro uložení zkušebního tělesa).



Obrázek 28: Ukázka vyrobených zápustek a zkušebního tělesa

8.2 Zhodnocení souladu výroby se zadáním

S dvojitým cílem bylo poptáno přeměření všech 10 zápustek v akreditované kalibrační laboratoři M&B Calibr, spol. s r.o. v definovaných oblastech, viz *Příloha 2: Zadání akreditovaného měření rozměrů*. Prvním cílem byla potřeba zhodnocení souladu skutečných hodnot některých charakteristik se zadáním výkresové dokumentace, vycházející z požadavků normativní dokumentace. Těmito charakteristikami byly:

- Průměr díry zápustky (\varnothing 4H5)
- Poloměr zaoblání hrany díry zápustky (R 0,2)
- Rovnoběžnost důlku pro ZT plochou usazení v závěsu

Druhý cílem bylo získání informací o skutečných hodnotách některých dalších geometrických charakteristik, které nejsou součástí výrobního výkresu ani normativních dokumentů, ale mohly by mít vliv na průběh zkoušky. Znalost jejich skutečných rozměrů byla tedy důležitá při snaze o potvrzení či vyvrácení hypotéz stanovených v teoretické části práce. Tyto charakteristiky byly:

- Souosost díry zápustky (\varnothing 4H5) se závitem (M36 x 2)
- Souosost díry zápustky (\varnothing 4H5) s částí uloženou v závěsu (\varnothing 25h6)
- Souosost důlku (\varnothing 8,1) pro ZT se závitem (M36 x 2)
- Válcovitost díry zápustky (\varnothing 4H5)

Výsledky protokolů akreditovaného měření jednotlivých zápustek¹ shrnuje Tabulka 9:

Tabulka 9: Přehled výsledků kalibračního měření zápustek

Zápustka	\varnothing 4H5 [mm]	R 0,2 [mm]	Rovnoběžnost důlku s rovinou A [mm]	Souosost \varnothing 4H5:M36 x 2 [mm]	Souosost \varnothing 4H5: \varnothing 25h6 [mm]	Soustřednost* \varnothing 8,1: M36 x 2 [mm]	Válcovitost \varnothing 4H5 [mm]
R02-1	4,004	0,193	0,017	0,012	0,025	0,031	0,005
R02-2	4,004	0,231	0,016	0,026	0,023	0,037	0,003
R02-3	4,005	0,203	0,015	0,020	0,032	0,011	0,006
R02-4	4,004	0,192	0,011	0,037	0,030	0,013	0,005
R02-5	4,003	0,183	0,015	0,019	0,037	0,021	0,004
R02-6	4,002	0,189	0,014	0,028	0,042	0,032	0,005
R02-7	4,002	0,171	0,010	0,024	0,027	0,028	0,006
R02-8	4,001	0,194	0,011	0,033	0,038	0,012	0,007
R02-9	4,001	0,176	0,016	0,031	0,015	0,008	0,006
R02-10	4,002	0,212	0,013	0,038	0,026	0,040	0,007
Průměr	4,003	0,194	0,014	0,028	0,029	0,022	0,005
Sm. odch.	0,0014	0,0176	0,0024	0,0085	0,0082	0,0123	0,0013

*V důsledku nedostatečného počtu bodů dostupných pro vyhodnocení válce byly akreditovanou laboratoří charakteristiky souososti č. 4 a 5 vyhodnoceny jako soustřednost

** Rozšířená nejistota měření je $\pm (1,7 + 6L) \mu\text{m}$, kde L je měřená délka v metrech. s pravděpodobnostním pokrytím 95 %. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což při normální rozdělení odpovídá pravděpodobnostnímu pokrytí přibližně 95 %.

Na základě hodnot dodaných externí laboratoří bylo možné konstatovat, že vyrobené zápustky splnily požadavky zadávacího výkresu a všechny je proto bylo možné uvažovat při volbě konkrétních kusů pro realizaci experimentálního programu.

¹ Viz Přílohy 3-7: Kalibrační listy zápustek R02-1, R02-2, R02-7 a R02-8

8.3 Volba zájmových geometrických a rozměrových charakteristik

V rámci systematického přístupu by bylo správné pokusit se potvrdit či vyvrátit všechny dostupné hypotézy týkající se vlivu neřešených oblastí geometrie přípravku, stanovené v teoretické části. Z kapacitních důvodů však bylo možné, v rámci této práce, navrhnout program omezený na přibližně 60 vzorků. Aby byla korelace reprezentativní, je vhodné provést zkoušky minimálně na 3 různých teplotách. Při průměrování hodnot z 5 vzorků pro každou z kombinací zápusťky a teploty tato omezení umožnila provedení smysluplného počtu testu pro čtyři zápusťky. Takový počet zápusťek byl dostatečný k prozkoumání dvou rozdílných charakteristik. Volba dvou zájmových charakteristik byla následující:

1. Jako první oblast zájmu byl zvolen, na základě rozboru v teoretické části, vliv **geometrické charakteristiky sousostí díry zápusťky s jejím závitem** (= Souosost Ø 4H5: M36 x 2), která měla z neřešených oblastí geometrie předpokládaný nejvýznamnější a také jediné ovlivnění průběhu křivky $f-u$ a následné korelace. Důvody byly dále:

- Přítomnost dostatečně širokého intervalu hodnot, nad rámec rozšířené nejistoty měření, v souboru vyrobených zápusťek.
- Existence **výchozí hypotézy**.

2. Jako druhá charakteristika, jejíž vliv byl zkoumán, byl, s přihlédnutím k výsledkům kalibračního měření v Tabulce 9, zvolen **poloměr zaoblení hrany díry zápusťky** (R 0,2). Důvody byly:

- Široký interval hodnot poloměru zaoblení (0,6 mm) přítomný v souboru vyrobených zápusťek, který pokrýval 60 % povoleného tolerančního pole podle normy E3205-20 [6].
- Charakteristika je v rámci komunity považována za důležitou a přesto, že je její vliv na průběh zkoušky znám, průběh křivky je specifický pro každý stroj a zkušební podmínky, bylo tedy přínosné pokusit se stanovit její vliv za podmínek používaných v ÚJV, a. s.
- Existence **výchozí hypotézy**.

8.3.1 Souhrn výchozích hypotéz

1. **Souosost Ø 4H5:M36 x 2:** vyšší hodnotou skutečné sousostí díry zápusťky se závitem dochází k nárůstu deformačních sil křivky $F-u$, nejvýrazněji F_m . Během korelace je tato skutečnost indikována vyššími hodnotami parametrů $F_\phi/(h_0)^2$ a $F_m/(u_m \cdot h_0)$ a přeneseně nižšími hodnotami korelačních koeficientů $\beta_{Rp0,2}$ a β_{Rm} rovnic (5) a (6). Může docházet k vyššímu rozptylu měřených hodnot, indikovanému nižší hodnotou koeficientu lineární korelace R a k

nerovnoměrnému nárůstu opotřebení hrany díry zápustky ve směru skutečné polohy osy díry upínací matice.

2. **R 0,2:** Nižší hodnota zaoblení vnitřní hrany zápustky R 0,2 způsobuje posun sil testovací křivky $F-u$ k vyšším hodnotám sil F , především F_m . Během korelace je tato skutečnost indikována vyššími hodnotami parametrů $F_e/(h_0)^2$ a $F_m/(u_m \cdot h_0)$ a přeneseně nižšími hodnotami korelačních koeficientů $\beta_{Rp0,2}$ a β_{Rm} rovnic (5) a (6).

8.4 Výběr konkrétních zápustek

Přehled zvolených zápustek a barevné schéma jejich porovnání je shrnuté v Tabulce 10. U charakteristik bez tučného vyznačení nebyl předpokládán, s přihlédnutím k teoretické části a konkrétním hodnotám, vliv na průběh zkoušky.

Tabulka 10: Zápustky vybrané pro experimentální program

Zápustka	Ø 4H5 [mm]	R 0,2 [mm]	Rovnoběžnost důlku s rovinou A [mm]	Souosost Ø 4H5: M36 x 2 [mm]	Souosost Ø 4H5: Ø 25h6 [mm]	Soustřednost* Ø 8,1: M36 x 2 [mm]	Válcovitost Ø 4H5 [mm]
R02-1	4,004	0,193	0,017	0,012	0,025	0,031	0,005
R02-2	4,004	0,231	0,016	0,026	0,023	0,037	0,003
R02-7	4,002	0,171	0,010	0,024	0,027	0,028	0,006
R02-8	4,001	0,194	0,011	0,033	0,038	0,012	0,007

Hodnocení vlivu Ø 4H5: M36 x 2

Hodnocení vlivu R 0,2

Volba konkrétních zápustek proběhla podle následující úvahy:

Zápustka R02-1 má nejbližší k ideálním rozměrům a tvaru. Hodnotu zaoblení hrany je $[R 0,2] = 0,193$ a zápustka vykazovala nejnižší hodnotu souososti díry se závitem. Zápustka R02-8 má stejný poloměr zaoblení hrany, ale vyhodnocená hodnota souososti díry a závitu byla výrazně vyšší.

1. Porovnání průběhu zkušební křivky a korelace při použití zápustky **R02-8** oproti **R02-1** umožňuje posouzení případného vlivu rozdílné hodnoty **souososti díry zápustky s jejím závitem** (Ø 4H5:M36 x 2).

Zápustky R02-2 a R02-7 byly minimem, respektive maximem v hodnotě zaoblení hrany, hodnotu souososti měly, s přičtením rozšířené nejistoty měření, relativně podobnou se zápustkou R02-8 a její případný vliv byl tedy do maximální možné míry omezen.

2. Porovnání korelací získaných na zápustkách **R02-2** a **R02-7** s **R02-8** může posloužit k vyhodnocení případného vlivu rozdílné velikosti **zaoblení hrany R 0,2**.

U zvolených zápustek byly před začátkem experimentálního programu pořízeny snímky výchozího stavu povrchu a hrany díry na řádkovací elektronovém mikroskopu ASPEX eXplorer split systém, umístěném v polohorké komoře (PHK) 7 v prostorech laboratoře. Výsledky měření jsou použity při hodnocení vzniklého opotřebení v *kapitole 10.1*, společně se snímky koncových stavů.

8.5 Stanovení skutečného vyosení zatěžování

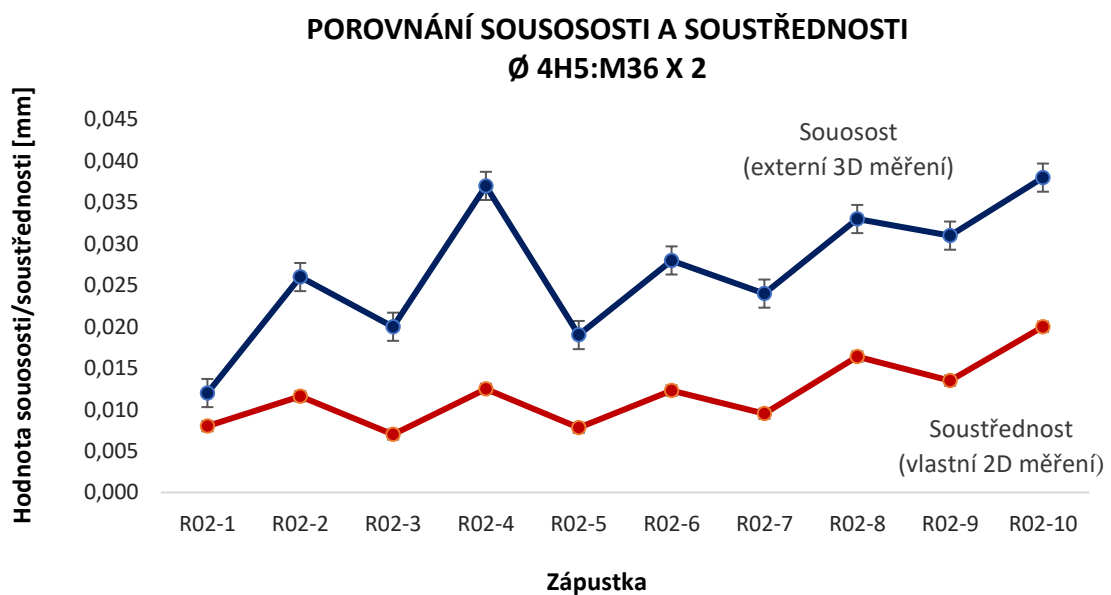
Před počátkem experimentu bylo potřebné vyhodnotit skutečné vyosení díry zápušky a vodící díry utahovací matice, po společném sešroubování. Za tímto účelem byl analyzován **směr** vyosení **zápustek**, a **velikost** i **směr** vyosení díry utahovací **matice**, vzhledem ke společnému závitu obou prvků. Upínací matice R0.1 byla společná pro všechny zápušky. Měření hodnot probíhalo na optickém měřicím stroji VERTEX², nacházejícím se v prostorech laboratoře. Stroj je zobrazený na Obrázku 29:



Obrázek 29: Optický měřicí stroj VERTEX

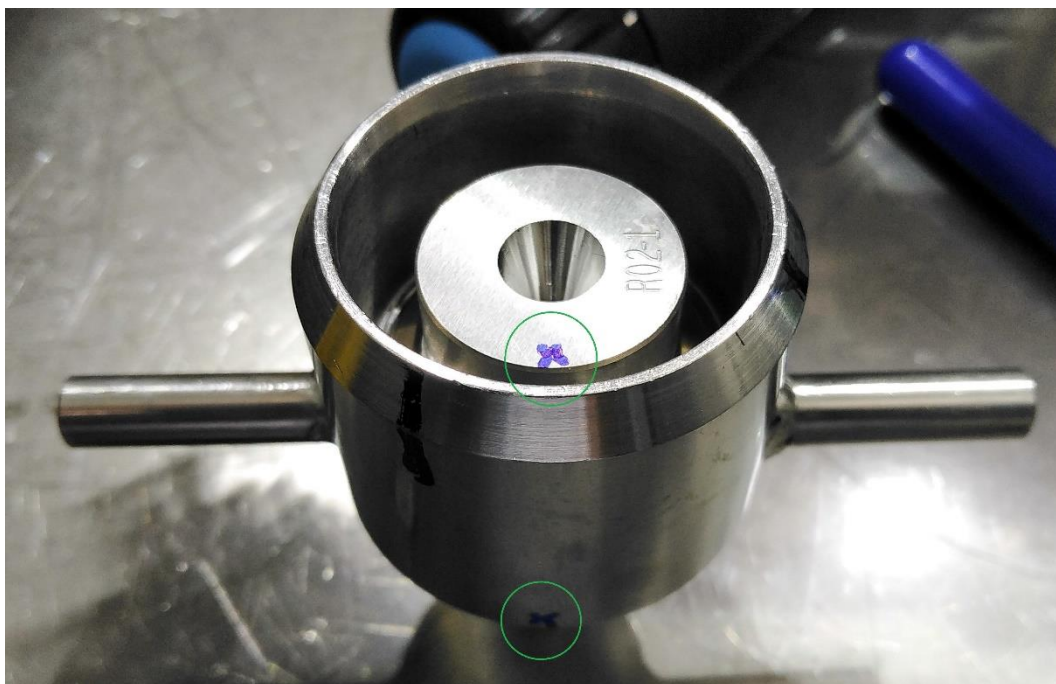
² Kalibrační list měřidla viz *Příloha 7: Kalibrační list měřidla VERTEX 251 HM*

Vzhledem k 2D povaze metody byla dodatečná měření sousososti vyhodnocena zjednodušeně jako soustřednost, pro odhad přibližného směru vyosení zápustek i rozměrů matice je to však dostačující, jak vyplývá z výsledného grafu na Obrázku 30. Trend mezi jednotlivými zápustkami byl podobný, rozdíl je v absolutních hodnotách a je způsoben, po zvážení rozšířené nejistoty měření, rozdílnou podstatou charakteristik sousososti (3D) a soustřednosti (2D), kdy u soustřednosti se vyhodnocují pouze středy kružnic obou prvků, nikoli osy celých válců a dochází k zanedbání bodů v hloubce.



Obrázek 30: Porovnání externího měření sousososti a interní měření soustřednosti Ø 4H5:M36 x 2

Při sešroubování zápustky a matice stálým momentem dochází k zastavení vzájemného pohybu ve stejné poloze, vyznačené v tomto případě modrými písmeny x na obou dílech přípravku, viz Obrázek 31 (na obrázku je přípravek obrácený, jedná se o pohled ze spodní strany).



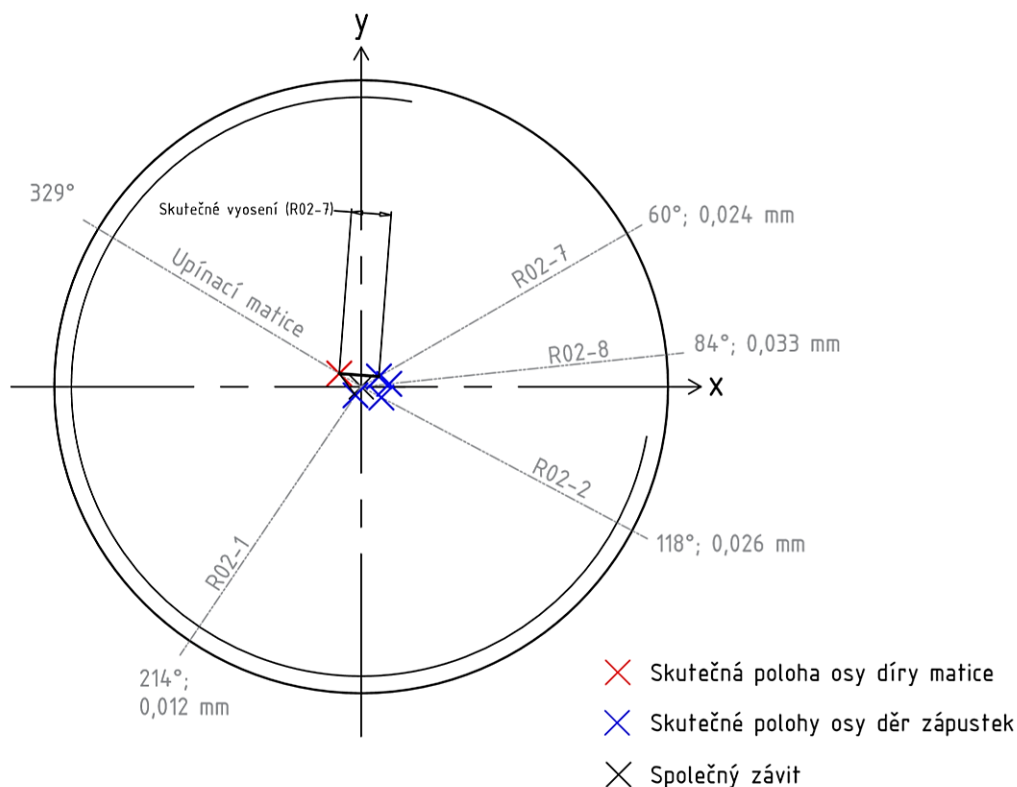
Obrázek 31: Ustálená poloha zápusky a matice po sešroubování

Tato skutečnost umožňuje odhad hodnoty skutečného vyosení děr obou prvků po sešroubování. To je důležité, protože v závislosti na směru vyosení děr matice a zápusky může docházet k zvětšení či zmenšení skutečné vzdálenosti os prvků. Hodnoty skutečného vyosení jsou zobrazeny v Tabulce 11. Vlastní hodnoty, měřené interně na stroji VERTEX, jsou indikovány symbolem ~, ostatní hodnoty byly součástí protokolů dodaných externí laboratoří.

Tabulka 11: Přehled externích a interních vyhodnocení

Upínací matice	Soustřednost díry matice se závitem [mm]	Směr vyosení [°]	Skutečné vyosení [mm]
R0.1	~0,0301	~329°	
Zápuska	Souosost Díry zápusky se závitem [mm]		
R02-1	0,012	~214°	~0,032
R02-8	0,033	~84°	~0,060
R02-2	0,026	~118°	~0,057
R02-7	0,024	~60°	~0,047

Grafická ilustrace výsledků měření je na Obrázku 32. Pro lepší přehlednost jsou velikosti vyosení umocněné 50x, směr vyosení je dodržen. Obrázek ilustruje skutečný pohled shora, tak, jak je přípravek umístěn do závěsu stroje a jak je zakládán razník:



Obrázek 32: Vyměřování skutečného vyosení díry matice a děr zápusťek; vzdálenosti 50x umocněny, pohled shora

Závěrem tohoto měření bylo, že i při uvažování směrů skutečného vyosení děr utahovací matice a zápusťky po společném zašroubování, zápusťka R02-1 stále vykazovala nejnižší hodnotu vyosení, a zápusťka R02-8 vykazuje maximum ze zvolených zápusťek.

8.6 Schéma experimentálního programu

Zkušební program probíhal na 4 vybraných zápusťkách za 3 různých teplot - 24 °C, 50³ °C a 90 °C. Pro každou kombinaci zápusťky a teploty bylo provedeno 5 testů a získané hodnoty byly průměrovány. Celkem se realizovalo 60 testů. Zkoušky byly provedené v souladu s předpisem CWA 15627:2007, na který je laboratoř akreditována. Přesný program udává Tabulka 12:

Tabulka 12: Přehled experimentálního programu

Teplota [°C]	Zápusťka			
	R02-01	R02-02	R02-07	R02-8
24	5 ZT	5 ZT	5 ZT	5 ZT
50	5 ZT	5 ZT	5 ZT	5 ZT
90	5 ZT	5 ZT	5 ZT	5 ZT

³ Původně byla zamýšlena teplota -80 °C, docházelo však k zamrznání zkušební přípravku.

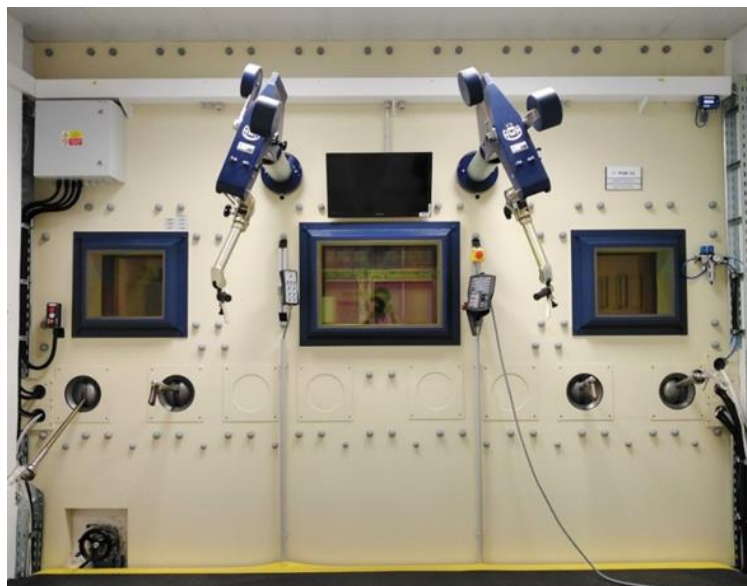
Zkušební podmínky shrnuje Tabulka 13:

Tabulka 13: Přehled zkušebních podmínek

Poloměr razníku (skut.)	1,252 mm
Preload	15 N (60 min)
Posuv razníku	0,5 mm/min
Teplotní rozptyl	± 3 °C
Měření průhybu vzorku	LVDT snímač (LIN56A) ⁴
Atmosféra	vzduch
Vlhkost (měrná)	45-65 % při 24 °C
Vzorkovací interval	250 ms
Utahovací moment	10 Nm ⁵

8.7 Realizace zkoušek

Zkoušky probíhaly na elektromechanickém trhacím stroji INSTRON 5967⁶ se siloměrnou hlavou o kapacitě 10 kN. Zařízení je umístěné uvnitř polohorké komory (PHK) 12, zobrazené na Obrázku 33, v prostorech nízkoaktivní laboratoře společnosti ÚJV Řež, a s. Pro dodržení správného utahovacího momentu matice a zakládání přípravku byly tyto činnosti vždy provedeny ručně. V případě potřeby probíhala dodatečná manipulace pomocí master/slave manipulátorů.



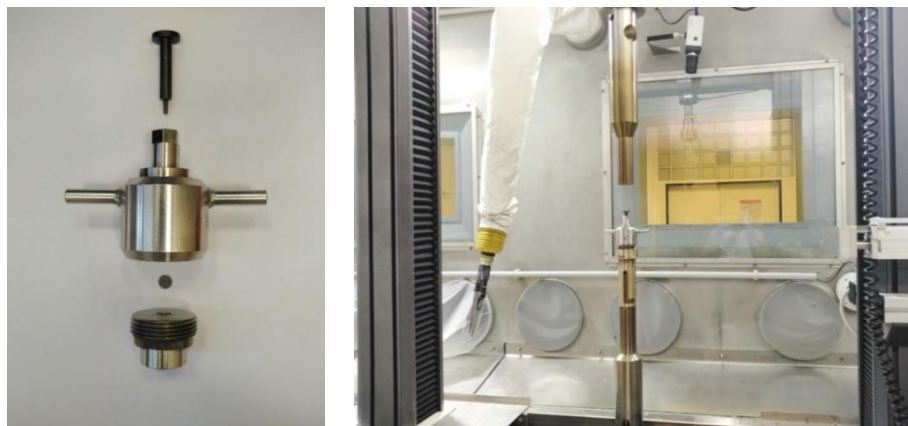
Obrázek 33: Polohorká komora (PHK) 12 při pohledu z operátorovny

⁴ Kalibrační list viz Příloha 8: Kalibrační list LVDT snímače LIN56A (1-3)

⁵ Kalibrační list viz Příloha 9: Kalibrační list momentového klíče Narex 25

⁶ Kalibrační list stroje a siloměrné hlavy 10kN viz Příloha 10: kalibrační list INSTRON 5967 (1-3)

Rozložený zkušební přípravek a složený zkušební přípravek vložený do závěsů stroje INSTRON 5967 je zobrazen na Obrázku 34:

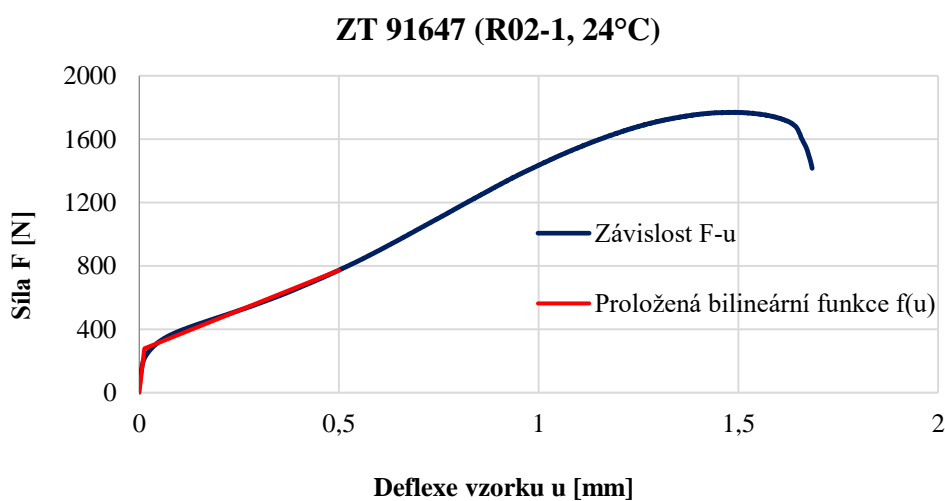


Obrázek 34: Zkušební přípravek a jeho uložení v závěsu stroje INSTRON 5967 uvnitř komory PHK 12

Při zkouškách na jiné než pokojové teplotě, probíhalo chlazení či ohřev pomocí pece INSTRON EC1657⁷ s regulátorem Eurotherm 2408c. Za dodržování hodnoty preloadu byla po ohřevu na zkušební teplotu nastavena výdrž 60 minut, aby soustava dosáhla teplotní rovnováhy. V průběhu protlačovacích zkoušek byly snímány závislosti síla – deflexe vzorku ($F-u$).

8.8 Výsledky protlačovacích zkoušek

Typickou naměřenou křivku $F-u$, včetně proložené bilineární funkce po stanovení charakteristik F_e a u_e , znázorňuje Obrázek 35:

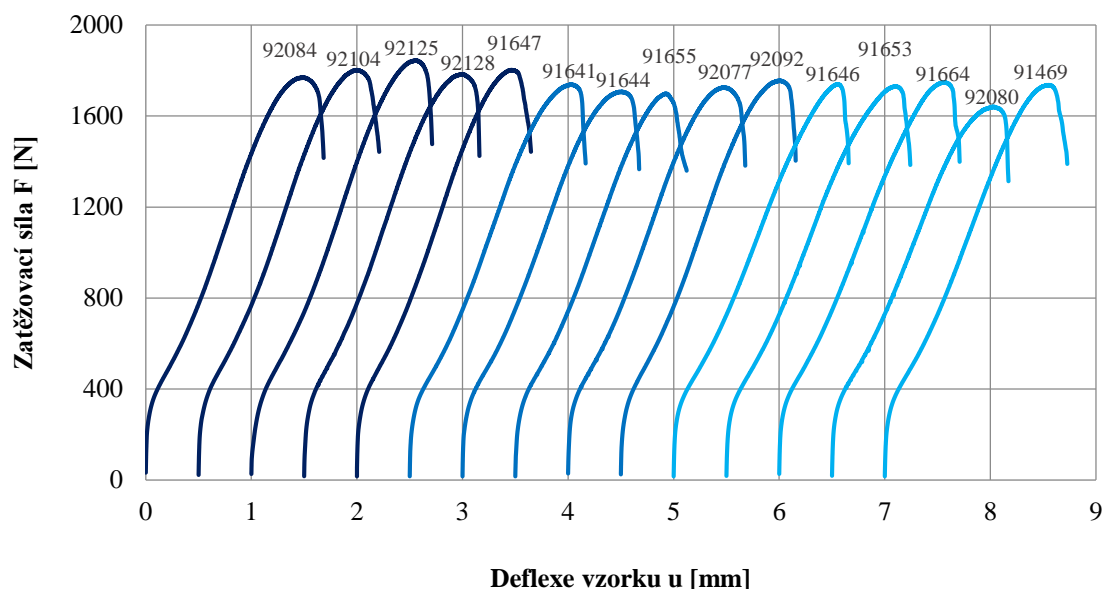


Obrázek 35: Závislost síla – deflexe vzorku a její vyhodnocení na ukázkovém vzorku č. 91647 (R02-1, 24 °C)

⁷ Kalibrační list viz Příloha 11: Kalibrační list teplotního řetězce, Eurotherm 2408 (1-3)

Přehled všech zatěžovacích křivek, naměřených při použití zápustky R02-1, zobrazuje Obrázek 36 a souhrn charakteristik vyhodnocených z těchto křivek, včetně průměrné hodnoty a směrodatné odchylky pro jednotlivé zkušební varianty, je shrnutý v Tabulce 14:

VÝLEDNÉ KŘIVKY R02-1



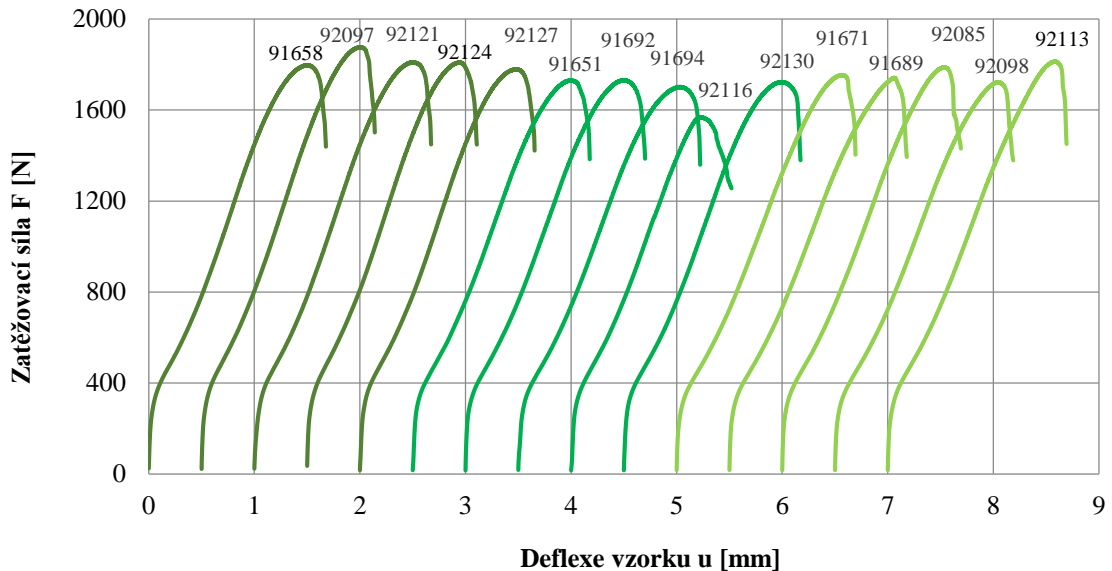
Obrázek 36: Křivky $F-u$ naměřené na zápustce R02-1, tmavě modrá = 24 °C, modrá = 50 °C, světle modrá = 90 °C

Tabulka 14: Výsledné charakteristiky $F-u$ křivek získaných za použití zápustky R02-1

Zápustka	T [°C]	Vzorek	F_e [N]	F_m [N]	u_m [mm]	$F_e/(h_0)^2$ [MPa]	$F_m/(u_m \cdot h_0)$ [MPa]
R02-1	24	91647	211,83	1770,57	1,493	845,62	2369,34
		92084	217,14	1803,33	1,500	865,08	2399,58
		92104	223,17	1845,33	1,551	882,07	2365,57
		92125	230,86	1784,85	1,501	916,11	2369,22
		92128	212,98	1803,58	1,462	845,16	2456,87
	$\mu (\pm\sigma)$		219,20	1801,53	1,50	870,81 ± 29,60	2392,12 ± 38,72
	50	91641	204,94	1738,87	1,523	833,05	2301,65
		91644	205,82	1708,13	1,499	829,91	2288,89
		91655	222,39	1699,54	1,42	882,48	2384,35
		92077	230,16	1727,14	1,477	911,50	2327,87
		92092	213,36	1757,14	1,499	853,45	2344,56
	$\mu (\pm\sigma)$		215,34	1726,17	1,48	862,08 ± 34,68	2329,46 ± 37,63
	90	91646	215,59	1740,60	1,562	869,30	2237,22
		91649	218,98	1731,22	1,601	888,33	2178,34
		91653	217,17	1748,57	1,571	866,96	2223,58
		91664	222,49	1641,77	1,521	891,74	2161,26
		92080	218,31	1737,28	1,552	871,48	2235,99
	$\mu (\pm\sigma)$		218,51	1719,89	1,56	877,56 ± 11,56	2207,28 ± 35,15

Přehled zatěžovacích křivek naměřených při použití zápustky R02-1 zobrazuje Obrázek 37 a souhrn charakteristik vyhodnocených z těchto křivek, včetně průměrné hodnoty a směrodatné odchylky pro jednotlivé zkušební varianty, je shrnutý v Tabulce 15:

VÝSLEDNÉ KŘIVKY R02-2

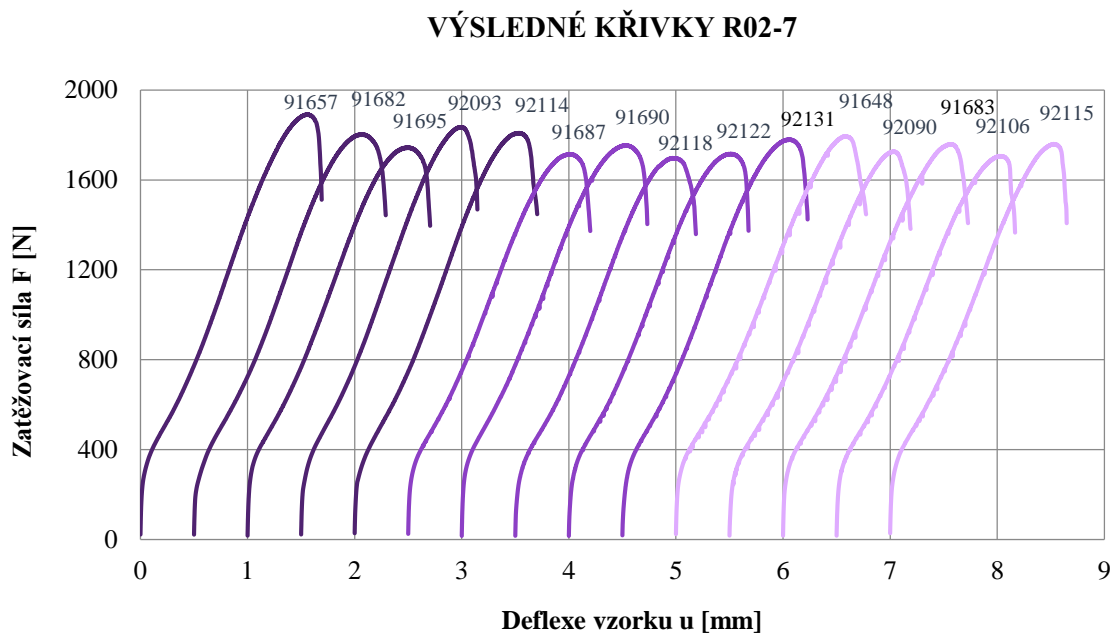


Obrázek 37: Křivky $F-u$ naměřené na zápustce R02-2, tmavě zelená = 24 °C, zelená = 50 °C, světle zelená = 90 °C

Tabulka 15: Výsledné charakteristiky $F-u$ křivek získaných za použití zápustky R02-2

Zápustka	T [°C]	Vzorek	F_e [N]	F_m [N]	u_m [mm]	$F_e/(h_0)^2$ [MPa]	$F_m/(u_m \cdot h_0)$ [MPa]
R02-2	24	91658	235,10	1798,69	1,507	944,18	2391,64
		92097	235,63	1877,48	1,504	936,90	2488,87
		92121	288,57	1810,81	1,516	1140,55	2375,07
		92124	238,39	1810,31	1,439	953,55	2515,59
		92127	257,31	1780,28	1,487	1021,07	2384,34
		$\mu (\pm\sigma)$	251,00	1815,51	1,49	999,25 ± 85,81	2431,10 ± 65,87
	50	91651	261,64	1731,56	1,509	1038,24	2285,89
		91692	234,08	1732,93	1,509	925,20	2283,21
		91694	282,34	1702,57	1,515	1123,38	2241,36
		92116	270,55	1569,74	1,233	1086,52	2551,63
		92130	274,18	1724,20	1,493	1085,84	2297,81
		$\mu (\pm\sigma)$	264,56	1692,20	1,45	1051,84 ± 76,97	2331,98 ± 124,63
	90	91671	215,22	1754,91	1,566	852,32	2230,66
		91689	220,97	1742,43	1,555	871,62	2225,72
		92085	224,49	1788,84	1,535	887,30	2316,48
		92098	219,07	1723,29	1,537	864,14	2226,83
		92113	220,65	1814,07	1,580	879,09	2292,10
		$\mu (\pm\sigma)$	220,08	1764,71	1,55	870,90 ± 13,49	2258,36 ± 42,85

Přehled zatěžovacích křivek naměřených při použití zápustky R02-7 zobrazuje Obrázek 38 a souhrn charakteristik vyhodnocených z těchto křivek, včetně průměrné hodnoty a směrodatné odchylky pro jednotlivé zkušební varianty, je shrnutý v Tabulce 16:



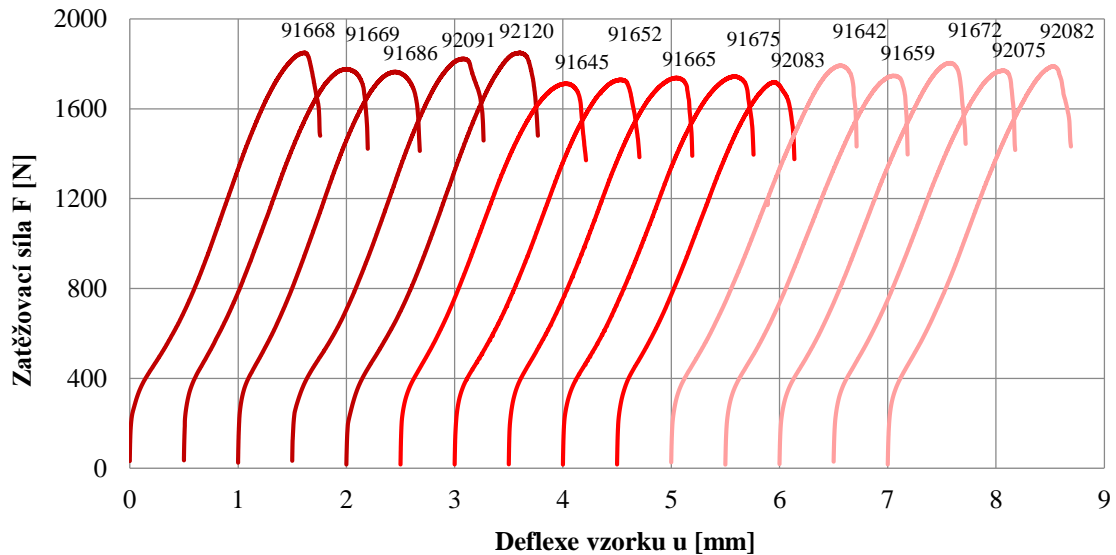
Obrázek 38: Křivky F-u naměřené na zápustce R02-7, tmavě fialová = 24 °C, fialová = 50 °C, světle fialová = 90 °C

Tabulka 16: Výsledné charakteristiky F-u křivek získaných za použití zápustky R02-7

Zápustka	T [°C]	Vzorek	F _e [N]	F _m [N]	u _m [mm]	F _e /(h ₀) ² [MPa]	F _m /(u _m *h ₀) [MPa]
R02-7	24	91657	222,65		1,569	885,27	2404,25
		91682	200,58	1803,42	1,567	797,52	2295,54
		91695	238,18	1744,87	1,511	943,28	2298,73
		92093	220,08	1835,45	1,499	880,32	2449,08
		92114	221,18	1809,18	1,537	875,93	2342,35
		μ (±σ)	220,53	1817,01	1,54	876,46 ± 51,94	2357,99 ± 67,26
	50	91687	219,57	1715,66	1,515	869,57	2254,22
		91690	239,68	1754,44	1,517	947,32	2298,60
		92118	216,22	1698,04	1,470	859,70	2303,19
		92122	228,91	1717,27	1,510	906,56	2262,63
		92131	232,47	1780,31	1,565	922,49	2266,33
		μ (±σ)	227,37	1733,14	1,52	901,13 ± 36,51	2277,00 ± 22,31
	90	91648	224,73	1794,93	1,575	913,47	2297,41
		91683	227,73	1727,24	1,531	900,08	2242,28
		92090	217,16	1759,32	1,578	858,32	2216,64
		92106	230,29	1707,06	1,524	913,82	2231,75
		92115	232,79	1760,50	1,528	931,14	2305,01
		μ (±σ)	226,54	1749,81	1,55	903,37 ± 27,49	2258,62 ± 40,01

Přehled zatěžovacích křivek naměřených při použití zápustky R02-8 zobrazuje Obrázek 39 a souhrn charakteristik vyhodnocených z těchto křivek, včetně průměrné hodnoty a směrodatné odchylky pro jednotlivé zkušební varianty, je shrnutý v Tabulce 17:

VÝSLEDNÉ KŘIVKY R02-8



Obrázek 39: Křivky $F-u$ naměřené na zápustce R02-7, tmavě červená = 24 °C, červená = 50 °C, světle červená = 90 °C

Tabulka 17: Výsledné charakteristiky $F-u$ křivek získaných za použití zápustky R02-8

Zápustka	T [°C]	Vzorek	F_e [N]	F_m [N]	u_m [mm]	$F_e/(h_0)^2$ [MPa]	$F_m/(u_m \cdot h_0)$ [MPa]
R02-8	24	91668	195,86	1850,56	1,607	777,20	2294,29
		91669	227,58	1777,82	1,505	901,29	2350,28
		91686	237,59	1765,81	1,450	946,58	2431,14
		92091	208,54	1823,62	1,564	844,27	2345,72
		92120	198,14	1850,64	1,606	780,01	2285,79
	$\mu (\pm\sigma)$		213,54	1813,69	1,55	849,87 ± 74,48	2341,44 ± 58,01
	50	91645	210,84	1713,62	1,523	860,48	2272,56
		91652	224,17	1730,87	1,535	894,88	2253,5
		91665	210,64	1738,89	1,552	834,75	2229,85
		91675	215,87	1745,02	1,589	857,98	2190,02
		92083	219,43	1719,81	1,452	867,28	2355,27
	$\mu (\pm\sigma)$		216,19	1729,64	1,53	863,07 ± 21,59	2260,24 ± 61,41
	90	91642	217,01	1792,91	1,563	857,73	2280,78
		91659	217,79	1747,70	1,560	864,24	2232,07
		91672	210,72	1804,85	1,580	846,25	2289,41
		92075	214,69	1770,80	1,569	848,53	2243,73
		92082	228,60	1790,53	1,523	903,53	2336,73
	$\mu (\pm\sigma)$		217,76	1781,36	1,56	864,06 ± 23,22	2276,54 ± 42,41

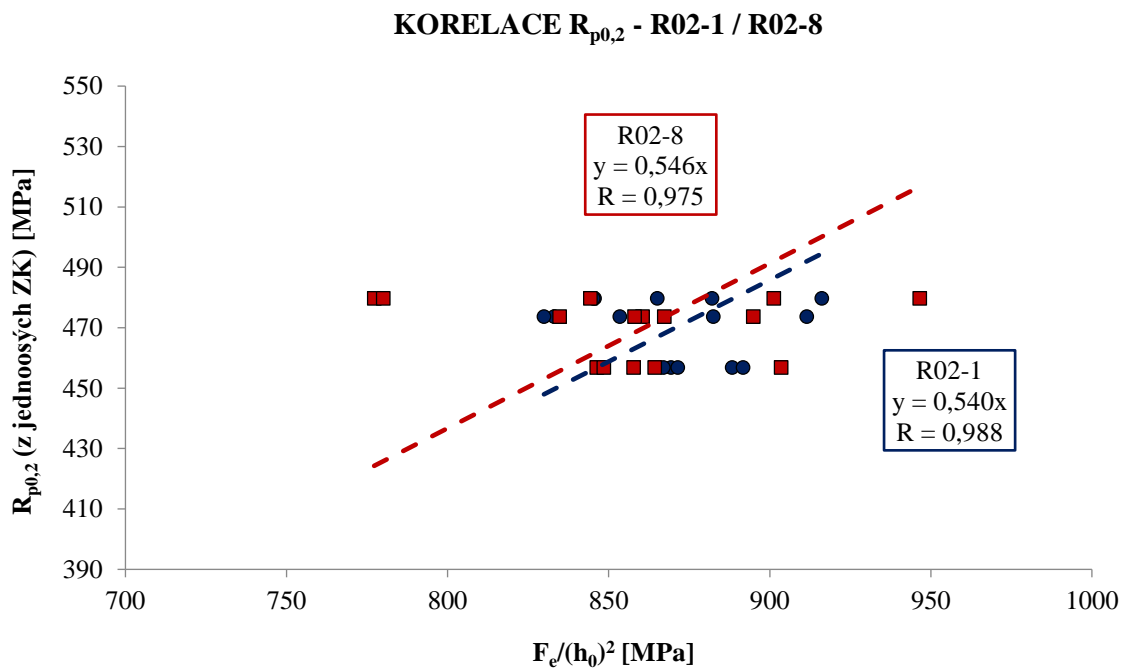
Vyhodnocené parametry $F_e/(h_0)^2$ a $F_m/(u_m \cdot h_0)$ byly korelovány k výsledkům tahových zkoušek pomocí rovnic (5), respektive (6):

$$R_{p0,2} = \beta_{Rp0,2} * \frac{F_e}{h_0^2} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

$$R_m = \beta_{Rm} * \frac{F_m}{(h_0 \cdot u_m)} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

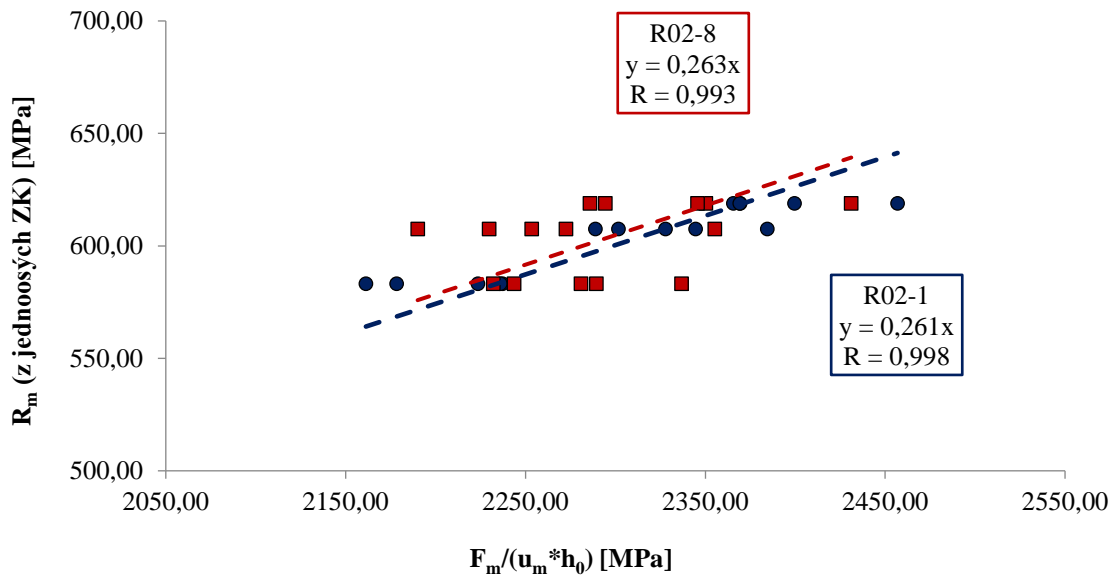
8.9 Korelace s výsledky jednoosých tahových zkoušek

Výsledky korelací s mezí kluzu a mezí pevnosti u zápustek R02-1 a R02-8, pro hodnocení vlivu rozdílné hodnoty sousosti \emptyset 4H5: M36 x 2, udávají Obrázky 40 a 41:



Obrázek 40: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-1 a R02-8

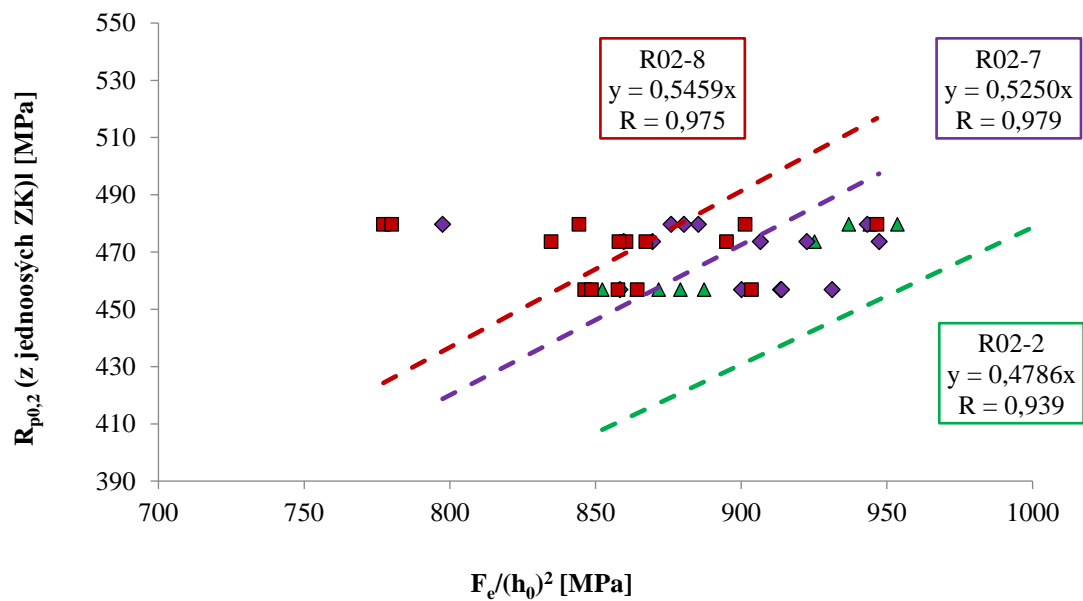
KORELACE R_m - R02-1 / R02-8



Obrázek 41: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze pevnosti stanovených použitím zápustek R02-1 a R02-8

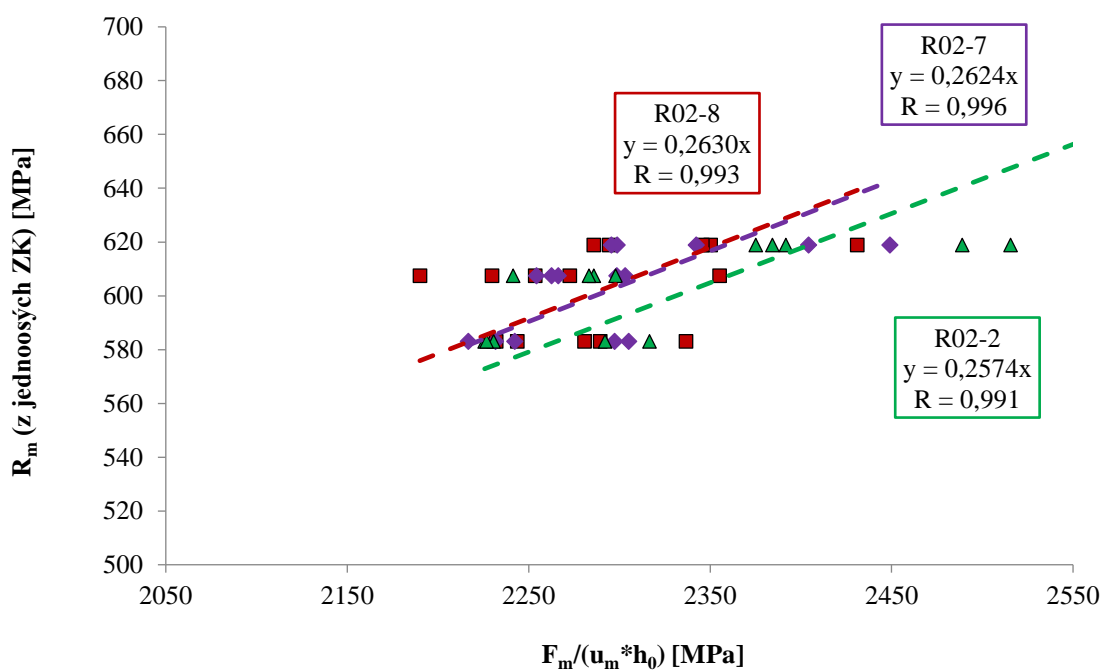
Výsledky korelací s mezí kluzu a mezí pevnosti za použití zápustek R02-2, R02-7 a R02-8, pro hodnocení vlivu rozdílné hodnoty poloměru hrany R 0,2, udávají Obrázky 42 a 43:

KORELACE $R_{p0,2}$ - R02-2 / R02-7 / R02-8



Obrázek 42: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-2, R02-7 a R02-8

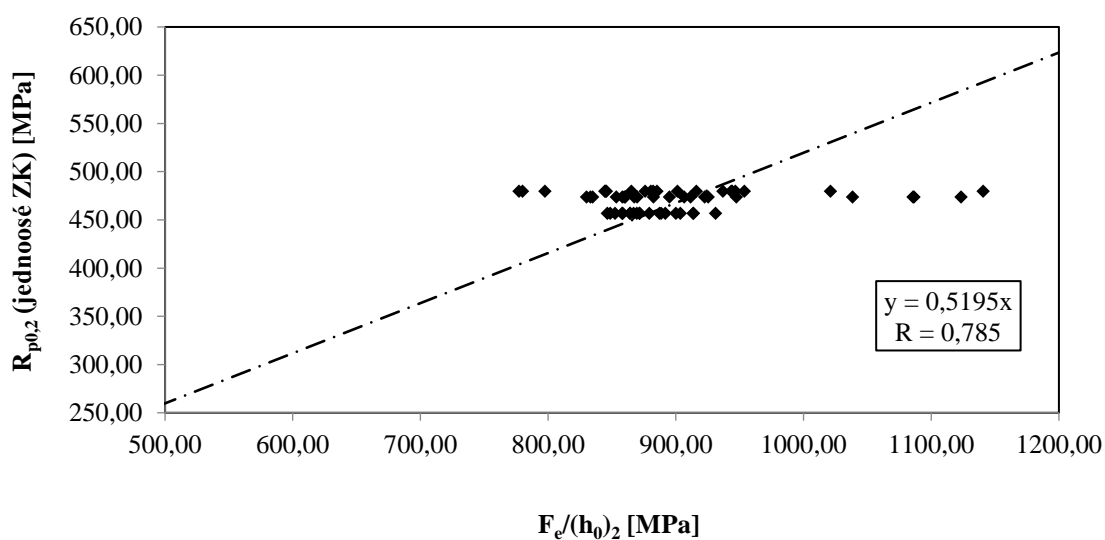
KORELACE R_m - R02-2 / R02-7 / R02-8



Obrázek 43: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-2, R02-7 a R02-8

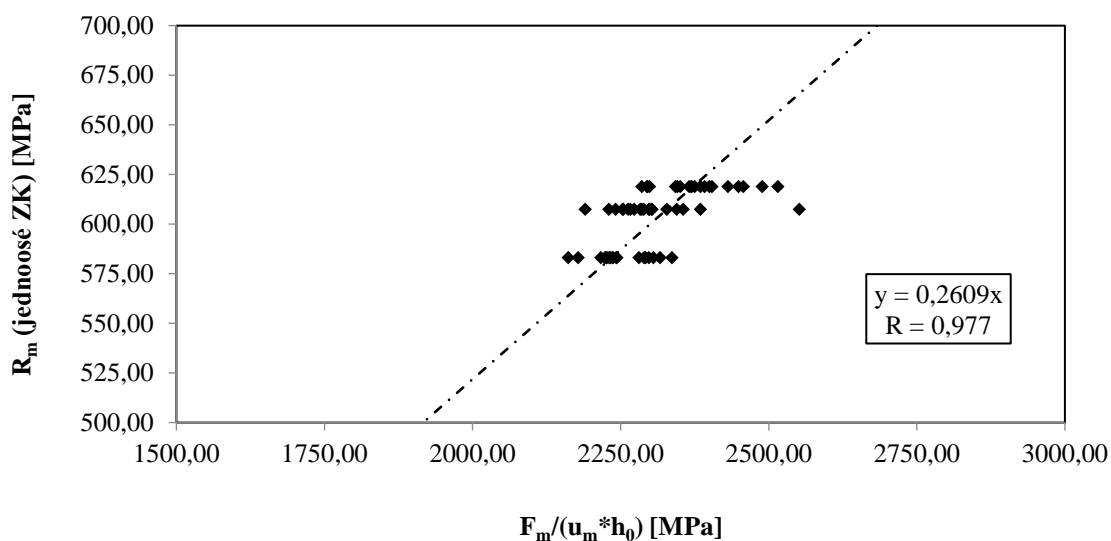
Výsledky korelací s mezí kluzu a mezí pevnosti za použití zápustek všech zápustek společně udávají Obrázky 44 a 45:

KORELACE $R_{p0,2}$ - DOHROMADY



Obrázek 44: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím všech vybraných zápustek společně

KORELACE R_m - DOHROMADY



Obrázek 45: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím všech vybraných zápuštěk společně

8.10 Porovnání korelací

Přehled vyhodnocených korelací, včetně dalších dostupných koeficientů, nabízí Tabulka 18. Proměnné korelačního vztahu β jsou rovny směrnici vyhodnocených rovnic.

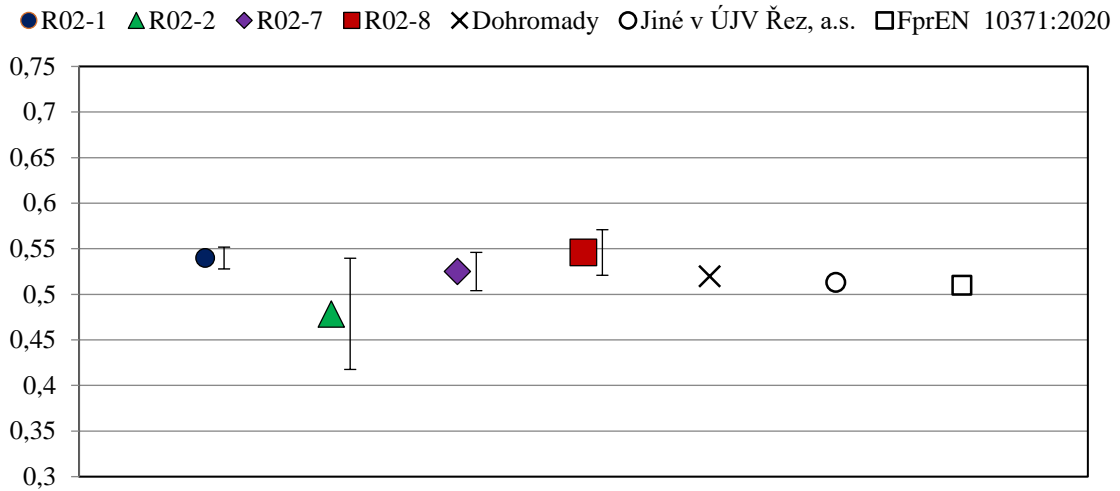
Tabulka 18: Hodnoty vyhodnocených a dalších dostupných korelací

	Původ korelačních koeficientů	Hodnota charakteristiky [mm]	$\beta_{Rp0,2}$ [-]	Korelační koeficient R	β_{Rm} [-]	Korelační koeficient R
Rozdílná sousost \emptyset 4H5:M36 x 2	R02-1	0,012	0,5398	0,988	0,2610	0,998
	R02-8	0,033	0,5459	0,975	0,2630	0,993
Rozdílný poloměr hrany R 0,2	R02-2	0,231	0,4786	0,939	0,2574	0,991
	R02-7	0,171	0,5250	0,979	0,2624	0,996
	R02-8	0,194	0,5459	0,975	0,2630	0,993
	Společně	-	0,5200	0,785	0,2610	0,977
Ostatní dostupné koeficienty	Databáze ÚJV Řez, a. s.*	-	0,5131		0,2537	
	FprEN 10371:2020 [5]	-	0,5100		0,1920	

* - zdroj: [Protokol o zkouškách, interní dokument ÚJV Řez, a. s.]

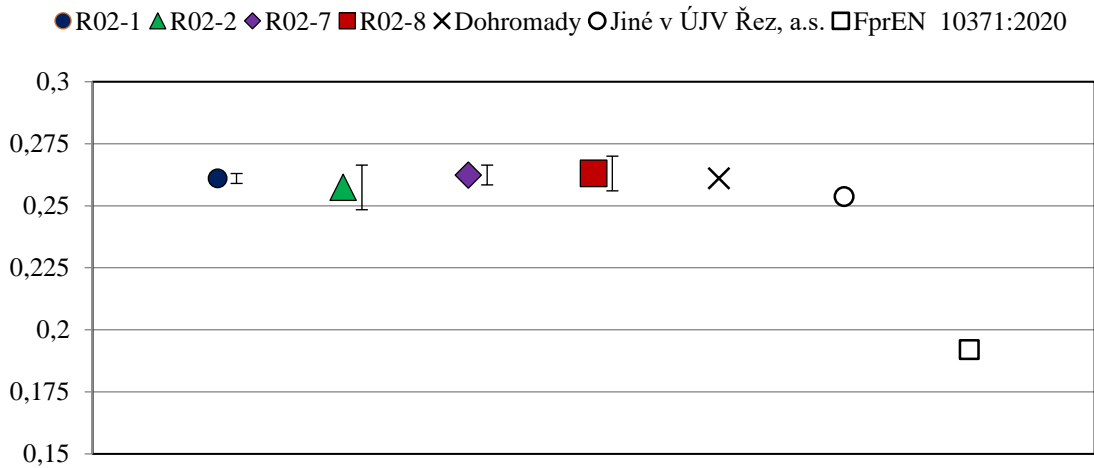
Grafické znázornění výsledků pro korelace smluvní meze kluzu zobrazuje Obrázek 46 a pro korelace meze pevnosti Obrázek 47. Intervaly uvnitř grafu na pravé straně od znaku zápusťky značí velikost odchýlení od ideální hodnoty korelačního koeficientu $R = 1$.

POROVNÁNÍ $\beta_{Rp0,2}$; R



Obrázek 46: Porovnání korelací $\beta_{Rp0,2}$; R

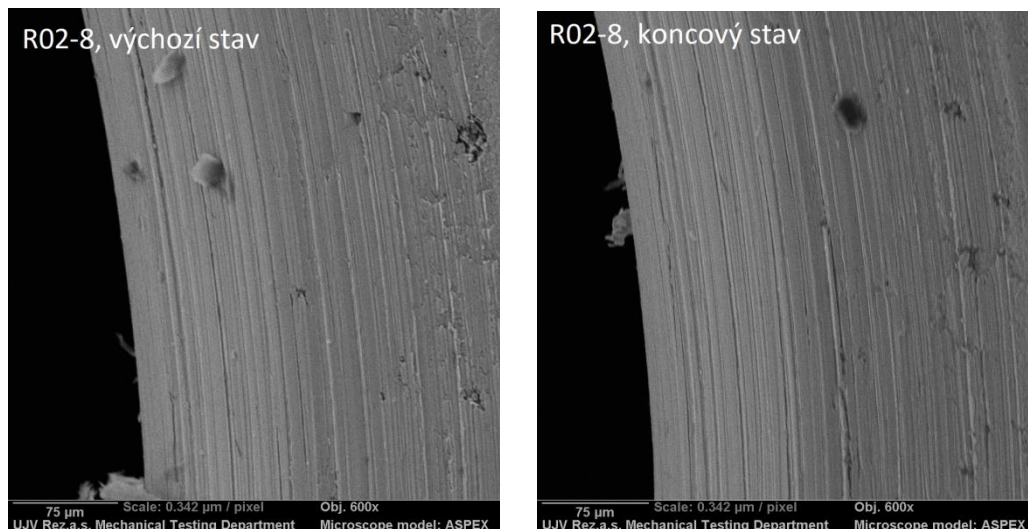
POROVNÁNÍ β_{Rm} ; R



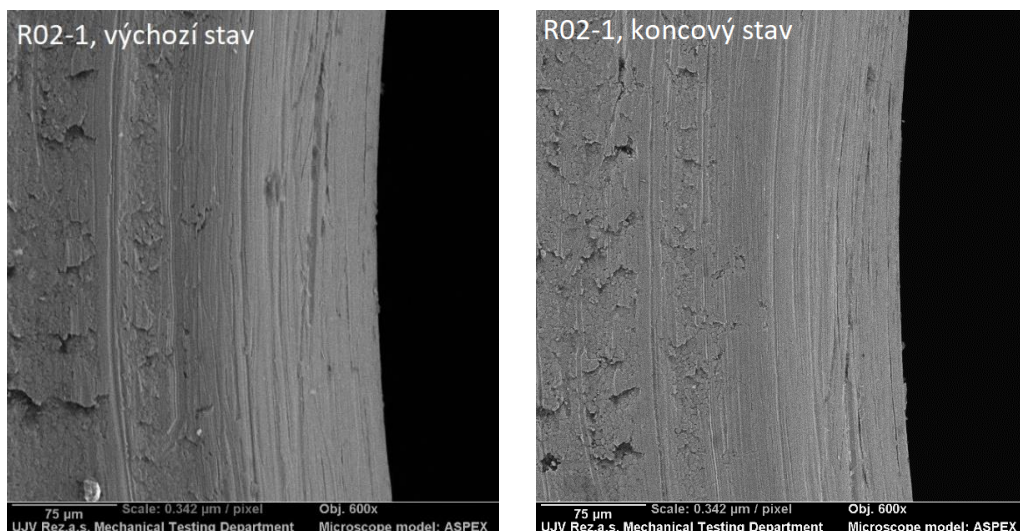
Obrázek 47: Porovnání korelací β_{Rm} ; R

8.11 Analýza opotřebení zápustek na SEM

Po dokončení experimentálního programu podstoupily zápustky opět zhodnocení stavu hrany pod elektronovým mikroskopem. Výsledky ilustruje porovnání výchozího a koncového stavu na snímcích SEM na Obrázcích 48 a 49. Pozorování bylo provedeno za účelem poskytnutí informací umožňujících potvrzení či vyvrácení hypotézy o rozdílech v opotřebení mezi zápustkami. Z porovnání obou stavů nebyla patrná u žádné zápustky vyhodnotitelná změna povrchu hrany ani její opotřebení a toto zjištění poskytlo dodatečné informace pro diskusi v následující kapitole.



Obrázek 48: Snímky výchozího a koncového stavu hrany zápustky R02-8, SEM, 600x zvětšeno



Obrázek 49: Snímky výchozího a koncového stavu hrany zápustky R02-1, SEM, 600x zvětšeno

9 Diskuse výsledků

Na základě měření vyrobených zápustek lze předpokládat, že budou ve většině případů splňovat požadavky stanovované normativní dokumentací s malou zmetkovitostí. Akreditované měření skutečných hodnot některých jejich charakteristik však má i přesto smysl, jak vyplývá z výsledků tohoto experimentu. Ačkoli všechny zápustky splňovaly požadavky norem, rozdíly ve skutečné hodnotě sousosti díry zápustky se závitem a ve velikosti zaoblení její hrany měly za následek vyhodnotitelný vliv na průběh zkoušky a následnou korelaci.

Ohledně sousosti díry zápustky se závitem je nasnadě otázka, zda byl vyhodnocené skutečnosti dostatečně významné na to, aby na jejich základě mohlo být uvažováno o zahrnutí této charakteristiky v rámci doporučení normativních dokumentací. Například stanovením její tolerance.

Vyhodnoceny byly korelace na zápustkách R02-1 / R02-8, s rozdílnou hodnotou této sousosti v hodnotě 0,012 mm / 0,033 mm. Způsobený nárůst korelačního koeficientu $\beta_{Rp0,2}$ z 0,5398 na 0,5459 a β_{Rm} z 0,2610 na 0,2630 při porovnání zápustek indikuje nižší hodnoty parametru $F_e/(h_0)^2$ $F_m/(u_m * h_0)$ a tedy nižší testovací síly F pro zápustku vyšší hodnotou sousostí (R02-8). Toto je v rozporu s výchozí hypotézou, očekáván byl totiž nárůst testovacích sil F při zhoršené sousosti. Tato změna znamená v praxi u obou charakteristik rozdíl korelovaných hodnot přibližně 5 N. To představuje rozdíl řádově pouze 1 %. Hypotéza pro tuto charakteristiku potvrzena byla v části o rozptylu korelovaných hodnot. Se zhoršením sousosti došlo ke zhoršení koeficientu korelace R z 0,988 na 0,975 pro mez kluzu a z 0,998 na 0,993 pro mez pevnosti. Část hypotézy o nerovnoměrném opotřebením hrany prozatím nemohla být potvrzena ani vyvrácena. Provedených 20 zkoušek na jedné zápustce je malé množství, pro které by zápustka se zaoblenou hranou viditelné opotřebením projevovat neměla, jak bylo stanoveno v teoretické části.

Tyto výsledky proto v současné podobě důvod k zásahu do doporučení stanovených v normativní dokumentaci neposkytují. Věnované množství zkoušek (30) a počet zápustek (2) je statisticky málo významný soubor a vzešlé závěry nelze považovat za hotové. Lze nicméně předpokládat, že tato charakteristika vliv na průběh zkoušky opravdu má a pokračování experimentálního programu s tímto zaměřením se zdá být opodstatněné. Zápustky použité v této práci byly vyrobené velice přesně, pro budoucí program by bylo vhodné popsat výrobu zápustky se záměrně špatnou hodnotou této sousosti, která by však stále vyhovovala požadavkům nepředepsaných geometrických tolerancí dle ČSN ISO 2768 [65]. Pro představu, střední třída K dovoluje maximální vyosení 0,2 mm (v rámci této práce byl rozdíl v zápustkách 0,021 mm, tedy 10 % rozsahu). Snaha o nižší hodnotu sousosti zápustky samotné je sama o sobě polovičatým řešením. Jak bylo stanoveno, na hodnotě skutečné excentricity zatěžování se navíc k sousosti díry

zápustky se závitem podílí také souosost zmíněného závitu s dírou upínací matice a skutečný směr obou hodnot až po společném sešroubování. Bude tedy nutné zaměřit se na analýzu geometrické konfigurace obou hlavních částí přípravku společně.

Co se týče rozdílných hodnot zaoblení hrany, porovnání zápustek R02-8 ($R = 0,194$ mm) a R02-7 ($R = 0,171$ mm) potvrdilo předpokládané snížení koeficientů, konkrétně $\beta_{Rp0,2}$ z 0,5459 na 0,5250 a β_{Rm} z 0,2630 na 0,2640, které indikuje nárůst sil F během testu k vyšším hodnotám. To je v souladu s výchozí hypotézou. Se sníženým poloměrem hrany také došlo ke snížení (zlepšení) rozptylu, indikovanému nárůstem koeficientu korelace R z 0,975 na 0,979 pro mez kluzu a z 0,993 na 0,996 pro mez pevnosti. Je vidět, že výsledky z obou zápustek jsou velice podobné, ale R02-7 s $[R 0,2] = 0,171$ mm by měla být preferována díky nižšímu rozptylu a vyšší shodě s ostatními dostupnými koeficienty. Zápustka R02-2 ($R = 0,231$ mm) poté, navzdory hypotéze, projevila velice nízké hodnoty koeficientů $\beta_{Rp0,2} = 0,4786$ a $\beta_{Rm} = 0,2574$, značící nárůst sil F během testů. Dále také výrazně horší koeficient lineární korelace $R = 0,939$ pro mez kluzu a $R = 0,991$. Je možné, že s touto zápustkou nebylo v pořádku něco, co se během provedených kontrol a analýz neprojevilo. Hrana zápustky je již v současnosti předepisována teoreticky přesným rozměrem $[R 0,2]$ a o zpřísnění požadavku se tedy, s přihlédnutím k obtížnosti výroby, neuvažuje.

10 Doporučení pro optimalizaci zápustek používaných ve společnosti ÚJV Řež, a. s.

Ohledně souososti díry zápustky díry matice doporučuji pro budoucí zápustky zvážit domluvu s výrobcem ohledně vyvrtání děr v jedné operaci, po společném sešroubování obou částí. Tímto by mohla být nesouosost děr prakticky eliminována. Pokud by toto nebylo možné, doporučuji popsat akreditované měření upínací matice a způsobem předvedeným v této práci stanovit skutečnou polohu osy díry upínací matice a děr zvažovaných zápustek, a skutečnou vzdálenost těchto os poté zohlednit při volbě konkrétních kusů. Současně doporučuji neustupovat od používání závitu s jemnou roztečí, protože jeho výhody, jako je vyšší přesnost polohování a vyšší odolnost vůči uvolnění při působení vibrací jsou pro zamýšlené použití přínosné. Pro již vyrobené zápustky doporučuji pečlivé dodržování utahovacího momentu a vkládaných tlouštěk vzorků. Následkem bude ustálená vzájemná poloha díry dané zápustky a upínací matice, která povede ke snížení rozptylu měřených hodnot, i kdyby malému.

Ohledně poloměru hrany zápustky lze v podmínkách laboratoře společnosti doporučit používání zápustek s nízkou či jmenovitou hodnotou zaoblení. Předpis teoreticky přesné hodnoty

[R 0,2] je vhodné ponechat a při možnosti výběru z více zápusťek vždy provést měření poloměru hrany a preferovat zápusťky s výše doporučenými hodnotami zaoblení.

11 Závěr

Praktická část práce demonstrovala vliv vybraných charakteristik přípravku pro SPT na průběh těchto zkoušek v prostředí laboratoře Mechanické vlastnosti společnosti ÚJV Řež, a. s., První zvolenou charakteristikou byla souosost díry zápusťky se závitem, druhou byl poloměr zaoblení její hrany.

Pro vyšší hodnoty souososti díry zápusťky s jejím závitem byl zjištěn pokles sil F během testu a větší rozptyl korelovaných hodnot. Při provedeném množství zkoušek nejevily zápusťky známky opotřebení. Rozdíl korelovaných hodnot byl pro testovaný interval souososti přibližně 1 %. Důležitý byl stanovený poznatek, že hodnota zmíněné souososti zápusťky představuje pouze část příspěvku k celkové excentricitě zatěžování a je nutné se zaměřit na analýzu geometrické konfigurace obou částí přípravku, tedy spodní zápusťky i upínací matice. Výsledky proto v současné době neposkytují důvod k zásahu do doporučení stanovených v rámci normativní dokumentace, ale poukazují na smysluplnost pokračování experimentálního programu.

Pro vysoké hodnoty poloměru hrany $R\ 0,2$ bylo vyhodnoceno snížení korelačních koeficientů a vysoký rozptyl hodnot. Jmenovité a nižší hodnoty zaoblení $R0,2$ vykazovaly navzájem podobné výsledky s dobrým rozptylem a tyto zápusťky by měli být preferovány.

Zjištěné skutečnosti podložily doporučení k požadavkům výrobního výkresu zápusťek, způsobu jejich výroby a výběru konkrétních kusů během budoucího rozhodování. Byly položeny základy pro možný navazující experimentální program, který by byl založen na analýze geometrické konfigurace přípravku a proběhl by na statisticky významnějším souboru zkušebních těles. Výsledky provedeného experimentálního programu, společně dalšími s poznatky získanými během jeho realizace, mohou již v současnosti přispět ke zlepšení přesnosti a preciznosti výsledků zkoušek SPT realizovaných v laboratoři Mechanické vlastnosti společnosti ÚJV Řež, a. s.

12 Zdroje

- [1] ARUNKUMAR, S., *Overview of Small Punch Test, Metals nad Materials International*, 26, 719–738, 2020
- [2] OMACHT, D.; KUBANEK, Z.; DOLEŽAL, R. et al., *Development of Testing Machines and Equipment for Small Punch Testing*, Proposals for Improvement of CWA 15627. Key Engineering Materials. 734. Pages 237-248, 2017
- [3] BRUCHHAUSEN, M.; ALTSTADT, E.; AUSTIN, T. et al., *European standard on small punch testing of metallic materials*. Ubiquity Proceedings. 1. 11. 10.5334/uproc.11, 2018
- [4] CWA 15627 - *CEN Workshop Agreement, Small Punch Test Method for Metallic Materials*, CWA 15627:2007 D/E/F, European Committee for Standardization, Belgium, 2007
- [5] FprEN 10371:2020, *Metallic materials — Small punch test method, European Committee for Standardization*, version 7 Jan 2020
- [6] E3205-20, *Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials*, ASTM International, 2020
- [7] ASTM Working Item WK61832, *Standard Practice for Small Punch Test Method for Metallic Materials*, ASTM International, version 4 Jan 2020
- [8] LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J.; CICERO, S. et al., *From archeology to precious metals: four applications of small punch test*, Metallurgical Journal. 63. 1-10, 2010
- [9] MATOCHA, K., *Porovnání zkušebních postupů pro stanovení mechanických vlastností pomocí penetračních testů mezi EU a Čínou: MVV s.r.o., Závěrečná zpráva projektu LH 12199*, Ostrava, 2014
- [10] KOPŘIVA, R.; KLATOVSKÁ, P.; RUSŇÁKOVÁ, K. et al., *Optimization of selected parameters and procedures in small punch test methodology*, Proceedings of the ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2020-21024
- [11] MATOCHA, K., *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Vyd. 1. Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, 2010, s. 73, ISBN 978-80-248-2223-5
- [12] KOPŘIVA, R.; BRUMOVSKÝ, M.; PETELOVÁ, P., *Current status of the small punch test standardization within the ASTM* [online], 10-12 July 2018 Swansea University Bay Campus, Wales: 5th International Small Sample Test Techniques Conference – SSTT2018
- [13] CHVOSTOVÁ, E., *Aplikace miniaturizovaných zkušebních těles při hodnocení mechanických vlastností a odolnosti proti křehkému lomu*, Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. 2016

- [14] DOBEŠ, F.; MILIČKA, K., *Studium lokálních creepových vlastností kolena vysokotlakého parovodu po dlouhodobém provozu*, Ústav fyziky materiálů AV ČR
- [15] MANAHAN, M. P. et al., *The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post irradiation mechanical properties*, Journal of Nuclear Materials, 1981, vol. 104, p. 1545-1550
- [16] BRUCHHAUSEN, M.; HOLSTROM, S.; SIMONOVSKI, I. et al., *Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 86, Part A, 2016, Pages 2-10, ISSN 0167-8442
- [17] ASTM Working item WK47431, *New practice for Small Punch test method for metallic materials*, ASTM International, 2014
- [18] BŘEZINA, M.; KUPČA, L.; PETZOVÁ, J. et al., *Applying of small punch technique for evaluation of mechanical properties of primary circuit components after long-term operation*, Russian Federation: Isdatel'stvo AO OKB GIDROPRESS, 2015
- [19] *Low Torque Material Sampling: Special purpose in-situ sampling machines*, Rolls-Royce [online]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/so-lowtorquematerialsampling-final-tcm92-50924.pdf>
- [20] *Hutnické listy: Metallurgical journal* [online]. ISSN 0018-8069, 2016, 69. Dostupné z: <https://www.hutnickelisty.cz/wp-content/uploads/2019/10/HL3-2016www.pdf>
- [21] *Boat Sampling: ETD's Electrical Discharge Sampling Equipment (EDSE)* [online]. Fountain House, Cleeve Road, Leatherhead, Surrey, KT22 7LX, UK: European Technology Development. Dostupné z: <https://static1.squarespace.com/static/5304e62de4b00674c06afd5c/t/560a9708e4b0935e231e5b0c/1443534600701/EDSE+Flyer.pdf>
- [22] DWIVEDI, K.K.; PATHAK, K.K.; PANDAY, M. et al., *Influence of material properties on small punch test using curved specimens*. Arch. Appl. Sci. Res. 2(6), 211–218, 2010
- [23] SIMONOVSKI, I.; HOLMSTRÖM, S.; BRUCHHAUSEN M., *Small punch tensile testing of curved specimens: Finite element analysis and experiment*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 120, 2016
- [24] *IAEA TECDOC 1230 - Reference Manual on the IAEA JRQ Correlation Monitor Steel for Irradiation Damage Studies*, IAEA, Vienna, Austria, 2001, ISSN 1011–4289
- [25] KARTHIK, V., *Miniaturized Testing of Engineering Materials*, Taylor & Francis, CRC Press, 2016, ISBN 9781315335797
- [26] RASCHE, S.; KUNA M., *Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials*. Int. J. Press. Vessels Pip. 125, 23–34, 2015
- [27] CHEON, J.; KIM, I., *Initial Deformation During Small Punch Testing*, Journal of Testing and Evaluation 24, no. 4: 255-262, 1996

- [28] CONTRERAS, M.A.; RODRIGUEZ, C.; BELZUNCE F.J. et al., *Use of small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 31, 727–737, 2008
- [29] MATOCHA, K., *Small-Punch Testing for Tensile and Fracture Behavior*, Experiences and Way Forward. ASTM Special Technical Publication. 145-159. 10.1520/STP157620140005, 2015
- [30] LEE, J.S.; KIM, I.S., *Evaluation of mechanical properties of RPV clad by small punch tests*, J. Korean Nucl. Soc. 34, 574–585, 2002
- [31] ESKNER, M.; SANDSTROM, R.; *Mechanical property evaluation using the small punch test*, J. Test. Eval. 31(4), 1–8, 2004
- [32] HURST, R.; MATOCHA, K.; *A Renaissance in the Use of the Small Punch Testing Technique*, V01BT01A048. 10.1115/PVP2015-45095, 2015
- [33] MAO, X.; TAKAHASHI, H., *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk (Ø 3 mm) small punch tests*, Journal of Nuclear Materials. 1987, roč. 150, č. 1, s. 42-52. ISSN 00223115
- [34] RUAN, Y.; SPÄTIG, P.; VICTORIA, M., *Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests*, J. Nucl. Mater. 307, Part 1, 236–239, 2002
- [35] *Vývoj metodiky hodnocení degradace vlastností ozářených materiálů obtížně vyměnitelných komponent jaderných elektráren pomocí penetračních zkoušek*, Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2012, projekt TA0202811
- [36] *Vývoj metodiky hodnocení degradace vlastností ozářených materiálů obtížně vyměnitelných komponent jaderných elektráren pomocí penetračních zkoušek*, Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013, projekt TA0202811
- [37] NĚMČÍKOVÁ, E., *Protlačovací zkouška konstrukčních ocelí za snížených teplot*, Brno, 2013, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [38] *The Society of Materials Science, Japan (Ed.)*, Standard for Small Punch Creep Test – Estimation of Residual Life for High Temperature Component, vol. ISBN 978-4-901381-38-3, 2012
- [39] *Who we are*, European Committee for Standardization [online]. Dostupné z: <https://www.cen.eu/about/Pages/default.aspx>
- [40] *Frequently Asked Questions*, ASTM INTERNATIONAL [online]. Dostupné z: <https://www.astm.org/ABOUT/faqs.html>
- [41] ASTM F2183-02(2008), *Standard Test Method for Small Punch Testing of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Used in Surgical Implants (Withdrawn 2017)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008

- [42] ASTM F2977-13e1, *Standard Test Method for Small Punch Testing of Polymeric Biomaterials Used in Surgical Implants*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
- [43] ASTM E643-15, *Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015
- [44] *Interlaboratory Study ILS #1408 to Establish Precision Statements for ASTM E3205, Test Method for Small Punch Test for Metallic Materials*: Research Report: E10-1001, Committee E10 on Nuclear Technology and Applications, Subcommittee E10.02 on Behavior and Use of Nuclear Structural Materials, červenec 2020
- [45] HAROUSH, S.; PRIEL, E.; MORENO, D. et al., *Evaluation of the mechanical properties of SS-316L thin foils by small punch testing and finite element analysis*, *Materials & Design*, Volume 83, 2015, Pages 75-84, ISSN 0264-1275
- [46] *Vývoj metodiky hodnocení degradace vlastností ozářených materiálů obtížně vyměnitelných komponent jaderných elektráren pomocí penetračních zkoušek*, Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2014, projekt TA0202811
- [47] HURST R.C.; MATOCHA K., *Where are we now with the European Code of Practice for Small Punch Testing?*, Proc. 2nd Int. Conf. SSTT, Determination of Mechanical Properties by Small Punch and other Miniature Testing Techniques, Ostrava 2012
- [48] ALTSTADT, E.; GE, H.E.; KUKSENKO, V. et al., *Critical evaluation of the small punch test as a screening procedure for mechanical properties*, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 472, 2016, Pages 186-195, ISSN 0022-3115
- [49] BENDROTH, M.; ZIELKE, H., *Numerical investigation of the influence of friction in SPT experiments*, *Ubiquity Proceedings*, 1(S1), p.1., 2018
- [50] GARCÍA, T.E.; RODRÍGUEZ C.; BELZUNCE F.J. et al., *Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test*, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 582, 2014, Pages 708-717, ISSN 0925-8388
- [51] Pathak, K.K.; Dwivedi, K.K.; Shukla, M. et al., *Influence of key test parameters on SPT results*. *Indian journal of engineering and material sciences*, 2009
- [52] GÜLÇİMEN ÇAKAN, B.; HÄHNER, P.; SOYARSLAN, C. et al., *An Enhanced Method to Evaluate Tensile Yield Stress by Small Punch Tests Using Deflection Curves*. *Materials* 2020, 13, 2840
- [53] BRUCHHAUSEN, M.; LAPETITE, J.M.; RIPPLINGER, S. et al., *Small punch tensile/fracture test data and 3D specimen surface data on Grade 91 ferritic/martensitic steel from cryogenic to room temperature*, *Data in Brief*, Volume 9, 2016, Pages 245-251, ISSN 2352-3409
- [54] PRAKASH, R.V.; ARUNKUMAR S., *Evaluation of damage in materials due to fatigue cycling through static and cyclic small punch testing*, in *Small Specimen Test*

- Techniques, ed. by M.A. Sokolov, E. Lucon, West Conshohocken, ASTM International, 2014, pp. 168–186
- [55] LUCAS, G.E.; OKADA, A.; KIRITANI, M., *Parametric analysis of the disc bend test*, Journal of Nuclear Materials, Volumes 141–143, Part 1, 1986, Pages 532-535, ISSN 0022-3115
- [56] NORRIS, S.D.; PARKER, J.D., *Deformation processes during disc bend loading*, Materials Science and Technology, 12:2, 163-170, 1996
- [57] CAMPITELLI, N.; SPÄTIG P.; BONADÉ, R. et al., *Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling*, Journal of Nuclear Materials, Volume 335, Issue 3, 2004, Pages 366-378, ISSN 0022-3115
- [58] JIA, X.; DAI, Y., *Small punch tests on martensitic/ferritic steels F82H, T91 and Optimax-A irradiated in SINQ Target-3*, Journal of Nuclear Materials, Volume 323, Issues 2–3, 2003, Pages 360-367, ISSN 0022-3115
- [59] RAHMAN, A.; KOLHATKAR, A.; SHARMA, V. et al., *Investigations into Effect of Specimen Diameter and Die Curvature on Small Punch Testing of Mod 9Cr–1Mo Steel*, Transactions of the Indian Institute of Metals. 10.1007/s12666-019-01711-2., 2019
- [60] *Small Punch Test Method for in-service material characterisation* [online]. eNtsa, Nelson Mandela Metropolitan University (NMMU), in Port Elizabeth, South Africa. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=W5Fsfrz6unw&t>
- [61] HUSAIN, A.; SEHGAL, D.K.; PANDEY, R.K., *Design of a simple, versatile, small-specimen punch test setup for determination of the mechanical behavior of materials*, Experimental Techniques, 2006
- [62] *Tightening Sequences: The Appropriate Sequence to Tighten a Joint*. BOLT SCIENCE [online]. Dostupné z: <https://www.boltscience.com/pages/tsequence.htm>
- [63] CORWIN, W.R.; GLEN, E.; LUCAS, *The Use of Small-scale Specimens for Testing Irradiated Material*, A Symposium Sponsored by ASTM Committee E-10 on Nuclear Technology and Applications, Albuquerque, N.M., 23 Sept. 1983
- [64] KOPŘIVA, R.; BRUMOVSKÝ. M.; PETELOVÁ, P., *Current status of the small punch test standardization within the ASTM*. Ubiquity Proceedings. 1. 34. 10.5334/uproc.34, 2018
- [65] ČSN ISO 2768-2 (014406), *Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance*, 1994, třídicí znak 014406
- [66] RODRÍGUEZ, C.; GARCÍA, J.; CÁRDENAS, E. et al., *Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test*, Welding Research 2009, 88, 188-192, 2010

13 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma odběru vzorku mechanickým odbrušováním [11]	14
Obrázek 2: Zkušební tělesa a zbytek vrchlíku odebraného metodou mechanického odbrušování [5].....	15
Obrázek 3: Zařízení EDSE a odebraný materiál ve tvaru „lodičky“ [21]	16
Obrázek 4: Schematická podoba standardního tvaru zkušební tělesa pro zkoušky SPT	16
Obrázek 5: Schematický průběh zkoušky SP (přeloženo) [3]	19
Obrázek 6: Typický průběh závislosti F-u/F-v „Bulge“ testu pro různé druhy materiálů (přeloženo) [26].....	20
Obrázek 7: Charakteristiky vyhodnitelné ze závislosti F-u (přeloženo) [4].....	21
Obrázek 8: Ukázka vyhodnocení hodnoty F_e metodou bilineární funkce $f(u)$ (přeloženo) [6].	22
Obrázek 9: Ukázka vyhodnocení hodnoty F_e metodou offsetu	23
Obrázek 10: Vliv tloušťky h_0 zkušební tělesa na průběh F-v křivky SP (přeloženo) [45]	28
Obrázek 11: Vliv tloušťky zkušební disku na úroveň síly F_e během „Bulge testu“ oceli 15128 při laboratorní teplotě ($r = 1$ mm, $D_2 = 4$ mm) [11]	29
Obrázek 12: Porovnání průběhu F-v křivky pro těleso kruhového a obdélníkového tvaru při použití zápustky s dírou o průměru 4 mm (upraveno) [23].....	30
Obrázek 13: Vliv měnícího se koeficientu tření mezi razníkem a ZT na průběh výsledné křivky SPT (přeloženo) [49].....	30
Obrázek 14: Vliv měnícího se průměru kuličky razníku r na průběh zkoušky (část. přeloženo) [51].....	31
Obrázek 15: Průběh závislosti síla-posunutí razníku za různých teplot (upraveno) [11]	32
Obrázek 16: Schéma zkušební přípravku podle E3205-20 [6]	34
Obrázek 17: Vliv poloměru hrany spodní zápustky na křivku F-v (síla – posun razníku), (upraveno) [59]	36
Obrázek 18: Ilustrace možného vyosení středu ZT způsobeného vůlí mezi průměrem ZT a průměrem dŮlku pro jeho uložení, není v měřítku	36
Obrázek 19: Ilustrace k rovnoběžnosti dŮlku pro uložení ZT (červeně) s plochou upínací matice (modře), není v měřítku	37
Obrázek 20: Schéma MDBT zkoušky; upraveno [15]	38
Obrázek 21: Odhad procentuální chyby elastické deflexe vzorku v závislosti na excentricitě zatěžování u zkoušky MDBT [15]	39
Obrázek 22: Schéma hlavních prvků přípravku a stroje pro zkoušky SPT používaného v ÚJV Řež, a. s.	40

Obrázek 23: Ilustrace skutečné polohy prvků po sešroubování matice a zápustky, není v měřítku, pohled z vrchu.....	41
Obrázek 24: Ilustrace k souososti díry zápustky a její části usazené v závěsu, není v měřítku	42
Obrázek 25: Ilustrace k vyosení důlku pro ZT vzhledem k závitu spodní zápustky; není v měřítku	43
Obrázek 26: Ilustrace válcovitosti díry zápustky, není v měřítku.....	43
Obrázek 27: Simulovaný dotyk ZT a zápustky, $\mu= 0.2$ [49]	44
Obrázek 28: Ukázka vyrobených zápustek a zkušební tělesa.....	46
Obrázek 29: Optický měřicí stroj VERTEX.....	50
Obrázek 30: Porovnání externího měření souososti a interní měření soustřednosti $\varnothing 4H5:M36 \times 2$	51
Obrázek 31: Ustálená poloha zápustky a matice po sešroubování	52
Obrázek 32: Vyměřování skutečného vyosení díry matice a děr zápustek; vzdálenosti 50x umocněny, pohled shora	53
Obrázek 33: Polohorká komora (PHK) 12 při pohledu z operátorovny	54
Obrázek 34: Zkušební přípravek a jeho uložení v závěsu stroje INSTRON 5967 uvnitř komory PHK 12.....	55
Obrázek 35: Závislost síla – deflexe vzorku a její vyhodnocení na ukázkovém vzorku č. 91647 (R02-1, 24 °C)	55
Obrázek 36: Křivky F-u naměřené na zápustce R02-1, tmavě modrá = 24 °C, modrá = 50 °C, světle modrá = 90 °C.....	56
Obrázek 37: Křivky F-u naměřené na zápustce R02-2, tmavě zelená = 24 °C, zelená = 50 °C, světle zelená = 90 °C.....	57
Obrázek 38: Křivky F-u naměřené na zápustce R02-7, tmavě fialová = 24 °C, fialová = 50 °C, světle fialová = 90 °C.....	58
Obrázek 39: Křivky F-u naměřené na zápustce R02-7, tmavě červená = 24 °C, červená = 50 °C, světle červená = 90 °C	59
Obrázek 40: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-1 a R02-8.....	60
Obrázek 41: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze pevnosti stanovených použitím zápustek R02-1 a R02-8.....	61
Obrázek 42: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-2, R02-7 a R02-8	61
Obrázek 43: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím zápustek R02-2, R02-7 a R02-8.....	62
Obrázek 44: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím všech vybraných zápustek společně.....	62

Obrázek 45: Porovnání empirických korelací pro výpočet meze kluzu stanovených použitím všech vybraných zápuštěk společně.....	63
Obrázek 46: Porovnání korelací $\beta_{Rp0,2}$; R	64
Obrázek 47: Porovnání korelací β_{Rm} ; R.....	64
Obrázek 48: Snímky výchozího a koncového stavu hrany zápuštěky R02-8, SEM, 600x zvětšeno.....	65
Obrázek 49: Snímky výchozího a koncového stavu hrany zápuštěky R02-1, SEM, 600x zvětšeno.....	65

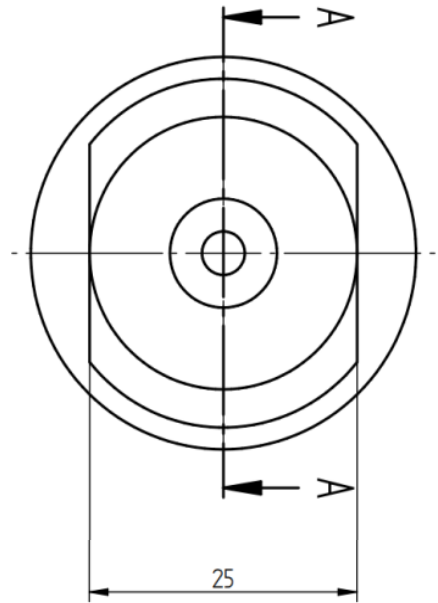
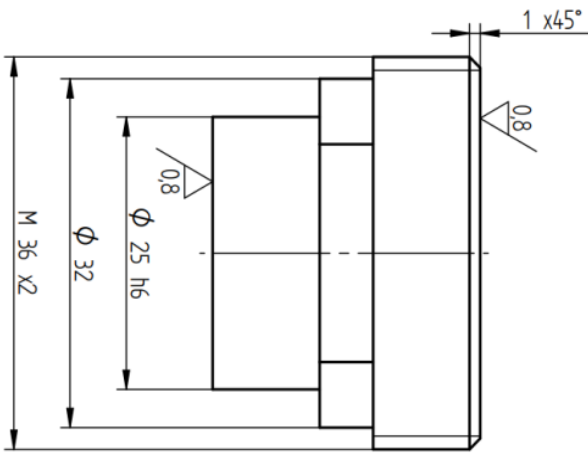
14 Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozměry zkušebních těles (disků) podle požadavků jednotlivých dokumentů [4 - 6]	17
Tabulka 2: Rozsah chemického složení A533B (JRQ)	17
Tabulka 3: Rozsah mechanických vlastností A533B (JRQ) při 24 °C [24]	17
Tabulka 4: Korelační koeficienty rovnic pro ocelové materiály udané v FprEN 10371:2020 [5]	24
Tabulka 5: Povolené odchylky od zkušební teploty podle FprEN 10371:2020 [5].....	33
Tabulka 6: Požadavky normativních dokumentů na zkušební přípravek a jeho geometrii [5, 6]	34
Tabulka 7: Chemické složení bloku 7JRQ materiálu A533B (JRQ) [24]	45
Tabulka 8: Hodnoty pevnostních charakteristik stanovené z jednoosých tahových zkoušek A533B (JRQ) v	46
Tabulka 9: Přehled výsledků kalibračního měření zápustek	47
Tabulka 10: Zápustky vybrané pro experimentální program	49
Tabulka 11: Přehled externích a interních vyhodnocení	52
Tabulka 12: Přehled experimentálního programu	53
Tabulka 13: Přehled zkušebních podmínek.....	54
Tabulka 14: Výsledné charakteristiky F-u křivek získaných za použití zápustky R02-1.....	56
Tabulka 15: Výsledné charakteristiky F-u křivek získaných za použití zápustky R02-2.....	57
Tabulka 16: Výsledné charakteristiky F-u křivek získaných za použití zápustky R02-7.....	58
Tabulka 17: Výsledné charakteristiky F-u křivek získaných za použití zápustky R02-8.....	59
Tabulka 18: Hodnoty vyhodnocených a dalších dostupných korelací	63

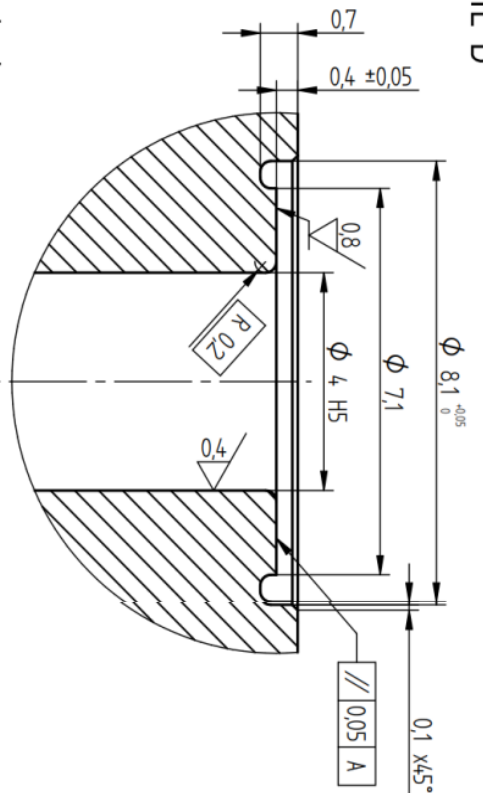
15 Přílohy

Příloha 1: Výrobní výkres zápustek	80
Příloha 2: Zadání akreditovaného měření rozměrů	81
Příloha 3: Kalibrační list zápustky R02-1	82
Příloha 4: Kalibrační list zápustky R02-2	83
Příloha 5: Kalibrační list zápustky R02-7	84
Příloha 6: Kalibrační list zápustky R02-8	85
Příloha 7: Kalibrační list měřidla VERTEX 251 HM	86
Příloha 8: Kalibrační list LVDT snímače LIN56A (1/3)	87
Příloha 8: Kalibrační list LVDT snímače LIN56A (2/3)	88
Příloha 8: Kalibrační list LVDT snímače LIN56A (3/3)	89
Příloha 9: Kalibrační list momentového klíče Narex 25	90
Příloha 10: Kalibrační list stroje INSTRON 5967 (1/3)	91
Příloha 10: Kalibrační list stroje INSTRON 5967 (2/3)	92
Příloha 10: Kalibrační list stroje INSTRON 5967 (3/3)	93
Příloha 11: Kalibrační list teplotního řetězce, Eurotherm 2408 (1/3)	94
Příloha 11: Kalibrační list teplotního řetězce, Eurotherm 2408 (2/3)	95
Příloha 11: Kalibrační list teplotního řetězce, Eurotherm 2408 (3/3)	96

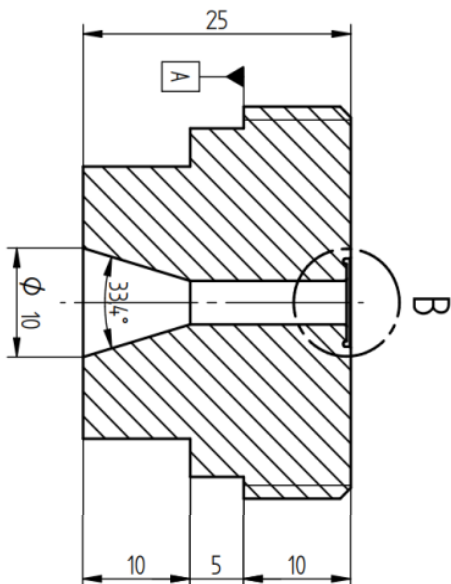
Příloha 1: Výrobní výkres zápustek



DETAIL B



ŘEZ A-A



KALIT NA 58-62 HRC
NEOZNAČENÉ HRANY SRAZIT 0.3x45°

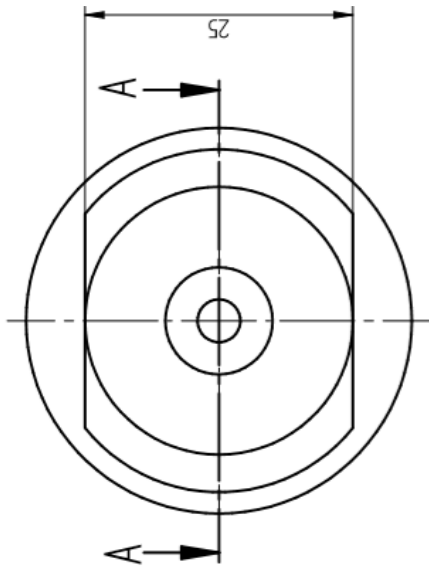
ÚJV Řež a. s.

ZÁPUSTKA 8, zaoblení

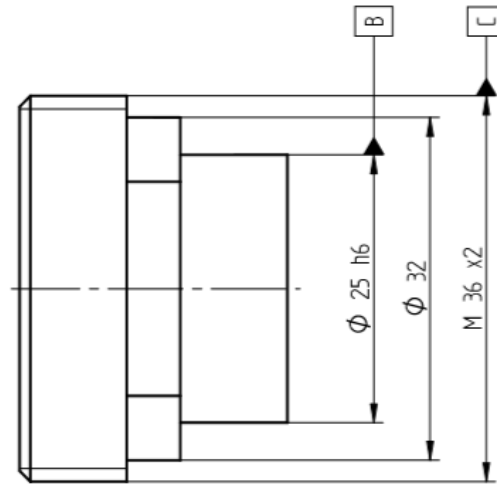
KRESLIL	GOIHARD	12.9.2018	JMÉNO	DATUM
KONTROLOVAL	KOPŘIVA	12.9.2018		
SKVALIL				
OVĚŘIL				
POKUD NEJÍ SPECIFIKOVÁNO JINAK KOTY JSOU V MILIMETRECH ÚHLY ±XX° Z PL ±.XX 3 PL ±.XXXX				
FORMÁT	ČÍSLO VÝKRESU	REVIZE		
A3	00010_054	0		
MĚŘÍTKO: 2:1	MOTIVNOST:	PŘESNOST: ISO 2768		

Příloha 2: Zadání akreditovaného měření rozměrů

DETAIL B



ŘEZ A-A



Vyhodnotit:

① Díra $\phi 4H5$

② Radius R0,2

③ Souosost B

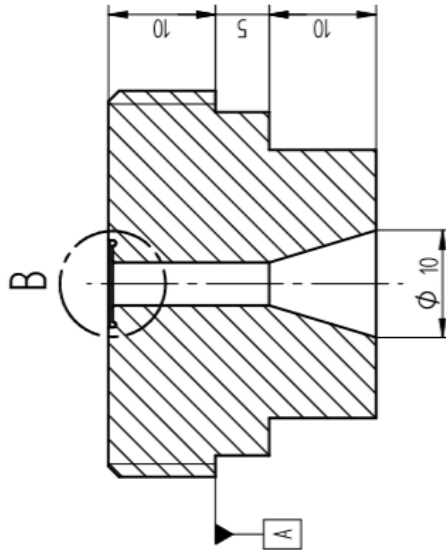
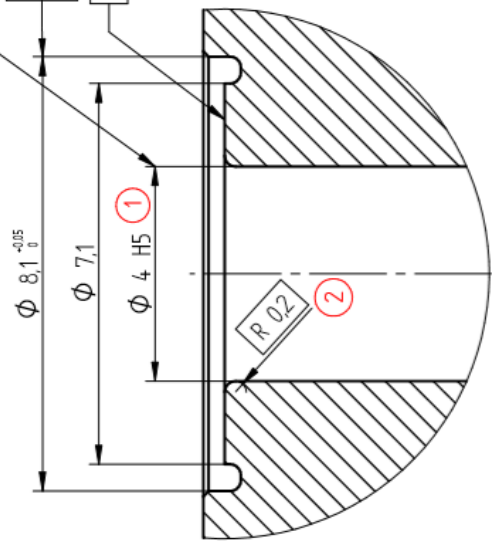
④ Souosost C

⑤ Souosost B

⑥ Souosost C




⑦ Rovnoběžnost 0,05 A

③	<input type="checkbox"/>	B
④	<input type="checkbox"/>	C
⑤	<input type="checkbox"/>	B
⑥	<input type="checkbox"/>	C
⑦	<input type="checkbox"/>	A



JMÉNO	DATUM
GOTHARD	12.9.2018
KONTROLOVAL	KOPŘIVA
SCHVÁLIL	
OVĚŘIL	
POKUD NEJÍ SPECIFIKOVÁNO JINAK KÓTY JSOU V MILIMETRECH ÚHLY ±XX° 2 PL ±XXX 3 PL ±X.XXX	
JMÉNO	ÚJV Řež a. s.
NAZEV	ZÁPUSTKA 8, zaoblení
FORMÁT	ČÍSLO VÝKRESU
A3	00010_054
REVIZE	0
MATERIAL	KALITELNÁ NEREZ (např. 17029, 17151, 17255)
MĚŘÍTKO	2:1
HMOTNOST	PŘESNOST: ISO 2768

Příloha 3: Kalibrační list zápustky R02-1

 M&B Calibr	M & B Calibr, spol.s r.o. Ke Karlovu 62/10 66491 Ivančice, Němčice	mbealibr@mbealibr.cz tel.: 546 451 998 www.mbealibr.cz	 
	Zkušební laboratoř č. 1746 akreditovaná ČIA dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018		

PROTOKOL č.: KL2003Z0028N

Datum vystavení 31.03.2020

Tento kalibrační list nahrazuje kalibrační list KL2003Z0028 ze dne 25.3.2020 - doplnění měřených hodnot.

Zákazník: ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, 250 68 Husinec

Vzorek: Zápustka 8, zaoblení
Identifikační č.: R02-1
Zadání měření:

Výkres: -

Podmínky měření:

Měřeno podle zkušební postupu: ZP - 01
Použité měřidlo : ME D15 3D SMS CRYSTA-APEX S574
Tento protokol potvrzuje návaznost použitých etalonů na národní etalony, které realizují jednotky fyzikálních veličin podle Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités).
Teplota vzduchu v laboratoři: (20 ± 2) °C
Místo provedení měření: V laboratoři

Výsledky měření v: mm

Pozice	Jmenovitá hodnota	Tolerance	Naměřená hodnota
1	Ø 4 H5	0,006	4,004
1	Válcovitost	-	0,005
2	R 0,2	-	0,193
3	Souosost	B	0,025
4	Souosost	C	0,012
5	Soustřednost	B	0,018
6	Soustřednost	C	0,031
7	Rovnoběžnost	0,05 A	0,017

Rozšířená nejistota měření: (1,7 + 6L) µm, kde L je měřená délka v (m)

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k = 2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%. Standardní nejistota byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.




Datum měření: 25.03.2020
Měření provedl: Michal Soukup

Zkontroloval a schválil:
Milan Řezáč
Vedoucí laboratoře



Protokol nesmí být rozmnožován bez písemného souhlasu laboratoře, která jej vystavila, jinak než celý.
Výsledky se týkají pouze uvedeného vzorku a vztahují se k době a místu provedených měření.

Příloha 4: Kalibrační list zápustky R02-2

 M&B Calibr	M & B Calibr, spol.s r.o.	mcalibr@mcalibr.cz	 
	Ke Karlovu 62/10 66491 Ivančice, Němčice	tel.: 546 451 998 www.mcalibr.cz	

PROTOKOL č.: KL2003Z0037N

Datum vystavení 31.03.2020

Tento kalibrační list nahrazuje kalibrační list KL2003Z0037 ze dne 25.3.2020 - doplnění měřených hodnot.

Zákazník: ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, 250 68 Husinec

Vzorek: Zápustka 8, zaobljeni
Identifikační č.: R02-2
Zadání měření:

Výkres: -

Podmínky měření:

Měřeno podle zkušební postupu: ZP - 01
Použité měřidlo : ME D15 3D SMS CRYSTA-APEX S574
Tento protkol potvrzuje návaznost použitých etalonů na národní etalony, které realizují jednotky fyzikálních veličin podle Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités).
Teplota vzduchu v laboratoři: (20 ± 2) °C
Místo provedení měření: V laboratoři

Výsledky měření v: mm

Pozice	Jmenovitá hodnota	Tolerance	Naměřená hodnota
1	Ø 4 H5	0,006	4,004
1	Válcovitost	-	0,003
2	R 0,2	-	0,231
3	Souosost	B	0,023
4	Souosost	C	0,026
5	Soustřednost	B	0,037
6	Soustřednost	C	0,037
7	Rovnoběžnost	0,05 A	0,016

Rozšířená nejistota měření: (1,7 + 6L) µm, kde L je měřená délka v (m)

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k = 2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%. Standardní nejistota byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.




Datum měření: 25.03.2020
Měření provedl: Michal Soukup

Zkontroloval a schválil:
Milan Řezáč
Vedoucí laboratoře



Protokol nesmí být rozmnožován bez písemného souhlasu laboratoře, která jej vystavila, jinak než celý.
Výsledky se týkají pouze uvedeného vzorku a vztahují se k době a místu provedených měření.

Příloha 5: Kalibrační list zápustky R02-7

 M&B Calibr	M & B Calibr, spol.s r.o. Ke Karlovu 62/10 66491 Ivančice, Němčice	mbcalibr@mbcalibr.cz tel.: 546 451 998 www.mbcalibr.cz	 
	Zkušební laboratoř č. 1746 akreditovaná ČIA dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018		

PROTOKOL č.: KL2003Z0030N

Datum vystavení 31.03.2020

Tento kalibrační list nahrazuje kalibrační list KL2003Z0030 ze dne 25.3.2020 - doplnění měřených hodnot.

Zákazník: ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, 250 68 Husinec

Vzorek: Zápustka 8, zaoblení
Identifikační č.: R02-7
Zadání měření:

Výkres: -

Podmínky měření:

Měřeno podle zkušební postupu: ZP - 01
 Použité měřidlo: ME D15 3D SMS CRYSTA-APEX S574
 Tento protokol potvrzuje návaznost použitých etalonů na národní etalony, které realizují jednotky fyzikálních veličin podle Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités).
 Teplota vzduchu v laboratoři: (20 ± 2) °C
 Místo provedení měření: V laboratoři

Datum měření: 25.03.2020
Měření provedl: Michal Soukup

Zkontroloval a schválil:
Milan Rezáč
Vedoucí laboratoře



Protokol nesmí být rozmnožován bez písemného souhlasu laboratoře, která jej vystavila, jinak než celý.
 Výsledky se týkají pouze uvedeného vzorku a vztahují se k době a místu provedených měření.




Výsledky měření v: mm

Pozice	Jmenovitá hodnota	Tolerance	Naměřená hodnota
1	Ø 4 H5	0,006	4,002
1	Válcovitost	-	0,006
2	R 0,2	-	0,171
3	Souosost	B	0,017
4	Souosost	C	0,024
5	Soustřednost	B	0,034
6	Soustřednost	C	0,028
7	Rovnoběžnost	0,05 A	0,010

Rozšířená nejistota měření: (1,7 + 6L) µm, kde L je měřená délka v (m)

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k = 2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%. Standardní nejistota byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

Příloha 6: Kalibrační list zápustky R02-8

 M&B Calibr	M & B Calibr, spol.s r.o. Ke Karlovu 62/10 66491 Ivančice, Němčice	mbcalibr@mbcalibr.cz tel.: 546 451 998 www.mbcalibr.cz	 
	Zkušební laboratoř č. 1746 akreditovaná ČIA dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018		

PROTOKOL č.: KL2003Z0031N

Datum vystavení 31.03.2020

Tento kalibrační list nahrazuje kalibrační list KL2003Z0031 ze dne 25.3.2020 - doplnění měřených hodnot.

Zákazník: ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, 250 68 Husinec

Vzorek: Zápustka 8, zaoblení
Identifikační č.: R02-8
Zadání měření:

Výkres: -

Podmínky měření:

Měřeno podle zkušební postupu: ZP - 01
Použité měřidlo : ME D15 3D SMS CRYSTA-APEX S574

Tento protokol potvrzuje návaznost použitých etalonů na národní etalony, které realizují jednotky fyzikálních veličin podle Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités).

Teplota vzduchu v laboratoři: (20 ± 2) °C
Místo provedení měření: V laboratoři

Výsledky měření v: mm

Pozice	Jmenovitá hodnota	Tolerance	Naměřená hodnota
1	Ø 4 H5	0,006	4,001
1	Válcovitost	-	0,007
2	R 0,2	-	0,194
3	Souosost	B	0,038
4	Souosost	C	0,033
5	Soustřednost	B	0,043
6	Soustřednost	C	0,012
7	Rovnoběžnost	0,05 A	0,011

Rozšířená nejistota měření: (1,7 + 6L) µm, kde L je měřená délka v (m)

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k = 2, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%. Standardní nejistota byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

Datum měření: 25.03.2020
Měření provedl: Michal Soukup

Zkontroloval a schválil:
Milan Řezáč
Vedoucí laboratoře



Protokol nesmí být rozmnožován bez písemného souhlasu laboratoře, která jej vystavila, jinak než celý.
Výsledky se týkají pouze uvedeného vzorku a vztahují se k době a místu provedených měření.

Příloha 7: Kalibrační list měřidla VERTEX 251 HM

..

3-43

KALIBRAČNÍ LIST

DEOM

Číslo kalibračního listu: **KL - R011 - 20**
Datum vystavení: 24.02.2020
Vystavil: DEOM s.r.o., kalibrační laboratoř
Kalibrační laboratoř č. 2407 akreditovaná Českým institutem
pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018
Schválil: Ing. Václav Keller



Zákazník: ÚJV ŘEŽ, a.s.
čp. 130, 250 68 Husinec - Řež

Měřidlo: **Název:** VERTEX 251 HM **Výrobce:** MicroVu Corp. (USA) **S/N:** VX251HMO1048
Umístění stroje (místo provedení kalibrace): čp. 130, 250 68 Husinec - Řež

Použité etalony: Etalonové skleněné měřítka: P300-2
Sada koncových měrek: č. II
Kalibrační list(y): 8015-KL-S0021-19
6014-KL-Do234-19

Použité etalony mají metrologickou návaznost na etalony akreditovaných laboratoří.

Podmínky měření: Teplota: (23,7 ± 23,8) °C

Datum měření: 21.02.2020

Výsledky kalibrace byly získány za podmínky a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listu a vztahují se pouze k uvedenému kalibrovanému měřidlu, době a místu provedení kalibrace.

Použitá metoda: Měření se uskutečnilo podle kalibračního postupu KP1

Výsledky měření: Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č.1.

Naměřené odchylky jsou menší než:

$$E_{UXY} \leq (2,0 + L/250) \mu\text{m}$$

$$E_{UZ} \leq (2,0 + L/200) \mu\text{m}$$

Kde L je vzdálenost v milimetrech.

Osa Z nebyla měřena z důvodu velkých vibrací (Osa Z není na měřidle odměřována).

Nejistota měření: $U_{XY} = (0,6 + L/190) \mu\text{m}$
 $U_Z = (1,1 + L/190) \mu\text{m}$
Kde L je vzdálenost v milimetrech.

Rozšířená standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření k, který odpovídá pokrytí asi 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu k=2.

Kalibraci provedl: 
Richard Mikyska

Kalibrační list může být rozšiřován pouze v celkovém počtu stran a příloh beze změn. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze laboratoří, která dokument vystavila.

DEOM s.r.o., kalibrační laboratoř
Jinonická 804/80, 158 00, Praha 5
T: +420 273 160 600
E: deom@deom.cz
www.deom.cz

IČO: 271 83 521
DIČ: CZ 271 83 521

Společnost zapsaná v obchodním rejstříku vedeném
Městským soudem v Praze oddíl C, vložka 102651

Strana: 1/1

7/3/20 kontroloval 

	Český metrologický institut Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmf.cz		
Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005			
Pracoviště:	Oblastní inspektorát Praha, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10 Oddělení mechanických zkoušek materiálu, tel. +420 266020111, fax. +420 266020169		
KALIBRAČNÍ LIST			
1051-KL-10118-20			
Datum vystavení:	19.2.2020	List 1 ze 3 listů	
Zákazník:	ÚJV Řež a.s. Hlavní č.p. 130 Řež, 250 68 Husinec		
Měřidlo:	Přídavné zařízení zkušebního stroje pro stanovení deformace materiálu v tahu . Největší rozsah : (0 až 10) mm Zkoušené rozsahy stroje: (0 až 3) mm Rok výroby : 2010 Počáteční měřená délka průtahoměru : nastavitelná Rozlišitelnost : $\pm 1,0 \mu\text{m}$		
Výrobce:	RDP		
Typ:	Indukční		
Výrobní číslo:	847(SD – NAL-12)		
Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupu uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.			
Datum kalibrace:	19.2.2020		
Kalibraci provedl:	 Jaroslav Městka		Ředitel oblastního inspektorátu:  Ing. Zdeněk Jiráček zástupce ředitele OI Praha
		Ing. Vladimír Persl	
<i>Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.</i>			

KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10118-20

List 2 ze 3 listů

Použité etalony: Lineární snímač Mitutoyo v.č.000596, Pracovní etalon 3.řádu, kalibrován ČMI OI Brno. Kalibrační list č.6014-KL-D0444-19. Platí do 23.10.2023

Kalibrační postup: 151-MP-C003

Místo kalibrace: Laboratoř ÚJV Řež, Instron 5967

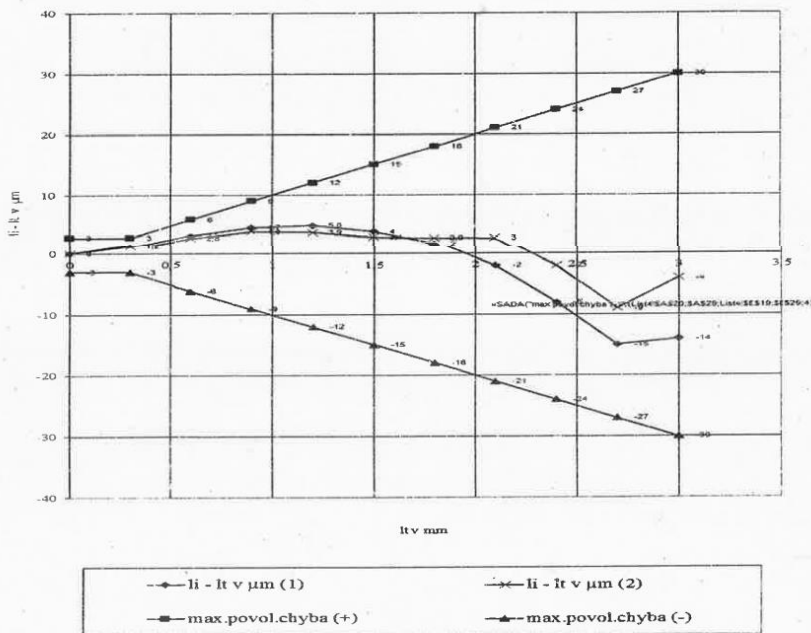
Podmínky prostředí: změřená teplota vzduchu ($23,2 \pm 1,0$) °C, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

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

Výsledky kalibrace:

Stroj nebyl seřizován

Graf naměřených hodnot podle ČSN EN ISO 9513
třída přesnosti 1



Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Praha
Radiová 3
102 00 Praha

Tabulka naměřených hodnot							
l_t v mm	l_i v mm (1)	$l_i - l_t$ v μm (1)	q v % (1)	l_i v mm (2)	$l_i - l_t$ v μm (2)	q v % (2)	U v μm
0	0	0	0	0	0	0	1,5
0,3	0,3029	2,9	0,97	0,3028	2,8	0,93	1,5
0,6	0,6058	5,8	0,97	0,6056	5,6	0,93	1,5
0,9	0,9077	7,7	0,86	0,9076	7,6	0,84	1,5
1,2	1,208	8,0	0,67	1,206	6	0,5	1,5
1,5	1,506	6	0,4	1,506	6	0,4	1,5
1,8	1,804	4	0,22	1,806	6	0,33	1,5
2,1	2,101	1	0,05	2,102	2	0,1	1,5
2,4	2,396	-4	-0,17	2,398	-2	-0,08	1,5
2,7	2,689	-11	-0,41	2,688	-12	-0,44	1,5
3	2,98	-20	-0,67	2,986	-14	-0,47	1,5

l_t = skutečné prodloužení nastavené na kalibračním přístroji

l_i = prodloužení udávané průtahoměrem

(1), (2) = první a druhá řada měření

q = relativní systematická chyba průtahoměru

$l_i - l_t$ = absolutní systematická chyba průtahoměru

U = nejistota měření

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02,M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Vyjádření o plnění **Stroj splňuje podmínky ČSN EN ISO 9513 třída přesnosti 1**
v rozsahu: (0 až 3) mm od 0,3 do 3 mm , kde $q = (\pm 1\%)$

Konec kalibračního listu

Český metrologický institut
 Oblastní inspektorát Praha
 Radiová 3
 102 00 Praha

-4-

Příloha 9: Kalibrační list momentového klíče Narex 25



Kalibrační laboratoř č. 2246 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

Kalibrační list

č.: VYZ-1956K-0058-01A

Zákazník: Jméno: ÚJV Řež, a.s.
Adresa: Hlavní 130
250 68 Husinec - Řež
Česká republika

Předmět kalibrace: Název: Momentový klíč Narex 25
Evidenční číslo: - Typ: 5 - 25 N.m
Výrobní číslo: 170815005078 Maximální moment : 25 N.m

Datum přijetí předmětu kalibrace: 10.4.2019 Kalibroval: Ladislav Lopatka
Datum kalibrace: 10.4.2019
Číslo zakázky: 1956EK055

Způsob kalibrace: Metodický předpis : KALP-KL/56/003 vyd. 3
Použité etalony : E25
Typ zkušebního zařízení : Norbar ProTest 43218 - 60 N.m
Výrobní číslo : 92199
Kalibrační list : 8011-KL-M0130-18

Místo provedení kalibrace: Kalibrační laboratoř – Laboratoř vibrací a momentů, Orlík 266, 316 06 Plzeň

Kalibrace byla provedena pro pravotočivý směr.

Podmínky kalibrace: Teplota prostředí: (23,3 ± 0,5) °C

Jmenovitý moment [N.m]	Minimum [N.m]	Maximum [N.m]	Odečtený moment [N.m]					Průměr
			Odchylka [%]					
5	4,81	5,21	5,12	5,12	5,10	5,09	5,07	5,10
			-2,31 %	-2,31 %	-2,04 %	-1,69 %	-1,36 %	
15	14,42	15,63	14,83	14,67	14,69	14,66	14,63	14,70
			1,13 %	2,26 %	2,1 %	2,34 %	2,56 %	
25	24,04	26,04	24,33	24,27	24,20	24,17	24,34	24,26
			2,76 %	3,02 %	3,29 %	3,43 %	2,73 %	

σ = výběrová směrodatná odchylka

Předložený momentový klíč odpovídá třídě přesnosti ± 4 %

Nejistoty měření: Rozšířená nejistota kalibrace byla stanovena na 0,91 %.

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

Kalibraci schválil: Ing. Miroslav Chmeliček
Vedoucí Laboratoře vibrací a momentů

Datum vystavení: 10.4.2019
Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.
Kalibrační list je vydáván pro zákazníka v 1 vyhotovení.
Bez souhlasu lze kalibrační list reprodukovat výhradně jen jako celek.

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
Kalibrační laboratoř – Laboratoř vibrací a momentů, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň, Česká republika
tel.: +420 371 430 790, mobil: +420 737 237 996, e-mail: chmelicek@vzuplzen.cz, www.vzuplzen.cz

PRO-AS605-5/S10





Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno
tel. +420 545 555 111
www.cmi.cz



**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.
podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2020**

Pracoviště: Oblastní inspektorát Praha, Radiová 3, 102 00 Praha 10
Oddělení mechanických zkoušek materiálu, tel. +420 266020111, fax. +420 266020169

KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10090-20

Datum vystavení: 17.2.2020

List 1 ze 3 listů

Zákazník: ÚJV Řež a.s.,
Hlavní 130 Řež, 250 68 Husinec

Měřidlo: Zkušební stroj pro stanovení pevnosti materiálu v tahu a tlaku.
Nejvyšší zatížení: 30 kN
Zkoušené snímače síly: 10 kN, v.č.106310 (SH-NAL-10)
2 kN, v.č.202435 (SH-NAL-12)

Rok výroby: 2011
Měřicí ústrojí : tenzometrický snímač síly

Výrobce: INSTRON

Typ: Elektromechanický

Výrobní číslo: 5967-2391

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


Datum kalibrace: 17.2.2020


Kalibraci provedl:

Ředitel oblastního inspektorátu:




Jaroslav Měška


Ing. Zdeněk Jiráček
zástupce ředitele OI Praha

Ing. Vladimír Peršl


KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10090-20

List 2 ze 3 listů

Použité etalony:	Typ a výrobní č.	Nejistota měření	Kalibrační list	Platnost do:
	Inkrementální snímač délky (0 až 1000) mm/4011-KL-D1122-17			15.9.2020
	S9M/30971274/10 kN	$W_{\max} = 0,11\%$	8011-KL-F0128-18	22.10.2020
	S2M/03637427 / 1kN	$W_{\max} = 0,11\%$	8011-KL-F0062-18	22.6.2020
	Sada etal.závaží č:II/6	$W_{\max} = 0,11\%$	1053-KL-30419-19	16.8.2022
	S9/590392A 5kN	$W_{\max} = 0,11\%$	8011-KL-F0021-18	22.2.2020

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

Místo kalibrace: Laboratoř NAL PHK12, ÚJV Řež a.s.

Podmínky prostředí: změněná teplota vzduchu ($23,2 \pm 1,0$) °C, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.Podmínky kalibrace: teplota vzduchu (23 ± 10) °C, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Výsledky kalibrace:

Stroj nebyl seřizován. Tabulky naměřených hodnot

rozsah: (0 - 2) kN TAH		rozšířená nejistota měření W %
stupnice Stroje kN	chyba q %	W %
2	-0,11	0,3
1,6	-0,09	0,3
1,2	-0,09	0,3
0,8	-0,02	0,3
0,4	0,04	0,3
0,2	0,08	0,3
0,1	0,13	0,3
0,05	0,16	0,3
0,02	0,18	0,3
0,01	0,23	0,3

rozsah: (0 - 2) kN TLAK		rozšířená nejistota měření W %
stupnice stroje kN	chyba q %	W %
2	-0,04	0,3
1,6	-0,04	0,3
1,2	-0,02	0,3
0,8	0,09	0,3
0,4	0,13	0,3
0,2	0,16	0,3
0,1	0,19	0,3
0,05	0,28	0,3
0,02	0,28	0,3
0,01	0,27	0,3

rozsah: (0 - 10) kN TAH		rozšířená nejistota měření W %
stupnice stroje kN	chyba q %	W %
10	-0,15	0,3
8	-0,07	0,3
6	0,04	0,3
4	0,14	0,3
2	0,12	0,3
1	0,12	0,3
0,5	0,27	0,3
0,3	0,27	0,3
0,2	0,26	0,3
0,1	0,32	0,3

rozsah: (0 - 10) kN TLAK		rozšířená nejistota měření W %
stupnice stroje kN	chyba q %	W %
10	-0,05	0,3
8	-0,01	0,3
6	0,02	0,3
4	-0,04	0,3
2	-0,10	0,3
1	-0,18	0,3
0,5	-0,24	0,3
0,3	-0,31	0,3
0,2	-0,33	0,3
0,1	-0,37	0,3

Cesky metrologický institut
Oblasní inspektorát Praha
Radiová 3
100 00 Praha 10

KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10090-20

List 3 ze 3 listů

Kontrola posuvu pístu, 0 ... dolní poloha

Naměřené hodnoty

Měřená hodnota mm	Průměrná chyba q (μm)	Průměrná chyba q (%)	Rozšířená nejistota měření W (%)
0	0	0	0,22
10	31	0,04	0,22
20	35	0,03	0,22
30	52	0,03	0,22
40	82	0,03	0,22
50	69	0,03	0,22
60	78	0,03	0,22
70	88	0,02	0,22
80	98	0,02	0,22
90	127	0,03	0,22
100	0	0,00	0,22

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02,M:2013. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Vyjádření o plnění specifikace:

Stroj splňuje podmínky ČSN EN ISO 7500-1 v rozsahu:

(0 až 10) kN od 0,15 kN do 10 kN tah + tlak třída přesnosti 1, kde $q = (\pm 1\%)$ (0 až 2) kN od 0,01 kN do 2 kN tah + tlak třída přesnosti 1, kde $q = (\pm 1\%)$

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Praha
Radiová 3
102 00 Praha
-4-



ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec
divize Integrita a technický inženýring
Kalibrační laboratoř



Strana 1 / 3

KALIBRAČNÍ LIST č. 0048-20 T

Zadavatel: Ing. Radim Kopřiva, oddělení 2303, ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec

Předmět kalibrace: Měřicí teplotní řetězec trhačích stroje INSTRON v PHK 12 (punch test)

Trhač stroj: INSTRON 5967
Výrobní číslo: 5967-2391
Zkušební těleso: CAL_T14
Regulátor: Eurotherm 2408 (R-NEL-3)
Regulační termočlánek: K 584-2
Dělení indikátoru teploměru: 1 °C Dělení nastavení regulátoru: 1 °C
Kalibrováno u zákazníka.

Popis regulátoru:

Regulační zařízení sestává z izolované komory, v níž jsou umístěny závěsy trhačích stroje a která umožňuje jejich vytápění i chlazení. Skříňka má zabudovaný ventilátor pro nucenou cirkulaci média, před nímž je umístěn termočlánek typu K, sloužící jako čidlo regulátoru, kterým lze v rozsahu -150 °C až 350 °C nastavit teplotu po 1 °C. Topení je realizováno infrazářiči, chlazení kapalným dusíkem.

Podmínky měření:

Kalibrační postup: ÚJV PP_2306 087

Zkušební těleso bylo ve středu komory pece PEC-NAL-7 vloženo do závěsů Z-NAL-14/1 a 14/; určených pro punch testy. Kalibrační termočlánek byl přitisknut pomocí trubičky k tělesu tak, aby byl zajištěn podmínky ČSN EN 10002-5. Při kalibraci byla porovnávána teplota nastavená na regulátor s teplotou kalibračního termočláneku po ustálení teploty soustavy, tj. zhruba po 30 minutách. Kalibrace byla prováděna ve dvou fázích: v teplé od 70 °C do 350 °C a ve studené od 10 °C do -150 °C. Teplotní kroky byly realizovány po 20 °C. Naměřené hodnoty byly zkorigovány podle kalibračního listu termočláneku (0024-20 T) a vyneseny do tabulky pro nastavení optimální teploty v dané sestavě.

Použité etalony: Digitální kalibrátor AOIP, typ PJ 6301, v. č. D53936-30 1 E6
Teplotní snímač: Typ J (Fe/CuNi), v. č. J13-03, kalibrační list 0024-20 T

Teplota okolí: (22 ± 2) °C **Relativní vlhkost:** (32 ± 10) %

Kalibrační list č. 0048-20 T

Strana 2 / 3

Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot:

Teplota požadovaná	Teplota nastavená	Údaj teploměru regulátoru	Konvenčně pravá teplota	Kolísání teploty	Nejistota U	Poznámka
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	±[°C]	±[°C]	1)
-150	-145	-145	-154	0	0,8	
-130	-128	-128	-134	0	0,8	
-110	-111	-111	-113	0	0,8	
-90	-92	-92	-95	0	0,7	
-70	-72	-72	-70	0	0,7	
-50	-51	-51	-50	0	0,7	
-30	-30	-30	-29	0	0,7	
-10	-10	-10	-11	0	0,7	
10	10	10	10	0	0,7	
50	51	51	50	0	0,7	
70	71	71	70	0	0,7	
90	91	91	89	0	0,7	
110	112	112	110	0	0,7	
130	132	132	129	0	0,7	
150	152	152	148	0	0,7	
170	172	172	167	0	0,7	
190	193	193	188	0	0,8	
210	215	215	209	0	0,8	
230	235	235	228	0	0,8	
250	256	256	249	0	0,8	
270	276	276	268	0	0,8	
290	298	298	291	0	0,8	
310	317	317	309	0	0,8	
330	338	338	330	0	0,8	
350	358	358	349	0	0,8	

Poznámka:

1) Nejnižší teplota realizovatelná pro danou sestavu

Uvedené rozšířené nejistoty měření jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí cca 95%.
Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.

Kalibrační list č. 0048-20 T

Strana 3 / 3

Tabulka pro nastavení požadované teploty

Teplota požadovaná [°C]	Teplota nastavená [°C]	Nejistota U [°C]
-150	-142	0,8
-130	-125	0,8
-110	-108	0,8
-90	-88	0,7
-70	-72	0,7
-50	-52	0,7
-30	-32	0,7
-10	-9	0,7
10	11	0,7
50	51	0,7
70	72	0,7
90	92	0,7
110	112	0,7
130	133	0,7
150	154	0,7
170	175	0,7
190	195	0,8
210	216	0,8
230	237	0,8
250	257	0,8
270	278	0,8
290	297	0,8
310	318	0,8
330	338	0,8
350	360	0,8

Datum kalibrace: 24. a 25. 02. 2020

Datum vydání: 02. 03. 2020

Kalibraci provedl: Bc. Tomáš Veselý




Bc. Tomáš Veselý
vedoucí kalibrační laboratoře

Konec kalibračního listu.