

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POROVNÁNÍ ANIZOTROPIE VYBRANÝCH OCELÍ PRO TVÁŘENÍ ZA  
STUDENA

COMPARISON OF ANISOTROPY OF SELECTED STEELS FOR COLD  
FORMING

AUTOR: NIKOL KUNCOVÁ

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

PRAHA 2020



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kuncová** Jméno: **Nikol** Osobní číslo: **472982**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Porovnání anizotropie vybraných ocelí pro tváření za studena**

Název bakalářské práce anglicky:

**Comparison of anisotropy of selected steels for cold forming**

Pokyny pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Experimentální část
  - a) Metalografická analýza
  - b) Stanovení součinitele plastické anizotropie
3. Zpracování výsledků, závěry, sepsání BP

Seznam doporučené literatury:

- [1] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II, 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [2] ČÍZMÁROVÁ, E. a J. SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [3] ČSN ISO 10113. Kovové materiály - Plechy a pásy: stanovení součinitele plastické anizotropie. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:

doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústav/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez tíží pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

19.6.2020  
Datum převzetí zadání

Podpis studentky

## Poděkování

Mé poděkování patří Doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Též děkuji Ing. Martinovi Rundovi za spolupráci a pomoc při získávání informací, nejen pro experimentální část práce. Díky patří i kolegovi Václavovi Brunátovi za obětavou pomoc při zpracování experimentu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Anotace

Předložená bakalářská práce se zabývá stanovením součinitele plastické anizotropie, pomocí zkoušky tahem. Práce popisuje vybrané druhy ocelí válcovaných za studena, pro které jsou zkoušky vyhotoveny. Experiment je doplněn měřením tvrdosti a metalografickou analýzou pomocí světelné mikroskopie. Je porovnáno anizotropické chování ocelí s odlišným chemickým složením.

## Annotation

The submitted bachelor's thesis focuses to determining the coefficient of plastic anisotropy, through the tensile test. Further this work describes selected cold rolling steels, for which tensile test are made. The experiment supplemented by hardness measurement and metallographic analysis using light microscopy. It compared the anisotropic behaviour of steels with different chemical composition.

## Klíčová slova

Součinitel plastické anizotropie, zkouška tahem, plechy válcované za studena, tváření za studena, měření tvrdosti, metalografická analýza

## Keywords

Coefficient of plastic anisotropy, tensile test, cold rolled sheets, cold forming, hardness measurement, metallographic analysis

# Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	7
1. Úvod.....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 ANIZOTROPIE.....	11
2.2 ZKOUŠKA TAHEM .....	17
2.3 OCELI PRO TVÁŘENÍ ZA STUDENA.....	20
3. Experimentální část.....	24
3.1 ZKOUŠKA TAHEM .....	25
3.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	30
3.3 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA.....	31
4. Výsledky a jejich diskuze .....	33
5. Závěry.....	41
6. Bibliografie .....	42
Seznam obrázků, tabulek a příloh .....	45
Přílohy:.....	47

## Seznam použitých symbolů a zkratek

SYMBOLY	Význam	Jednotka
$a_0$	Tloušťka zkušebního tělesa po deformaci	[mm]
$a$	Počáteční tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
$A$	Tažnost	[%]
$A_{80}$	Tažnost při $L_0 = 80$ mm	[%]
$b$	Šířka zkušebního tělesa po deformaci na předepsaném prodloužení/rozšíření	[mm]
$b_0$	Počáteční měřená šířka zkušebního tělesa	[mm]
$\Delta b$	Okamžité rozšíření	[mm]
$e_p$	Předepsaná plastická (smluvní) deformace, při které se má stanovit součinitel plastické deformace	[%]
$e_{p\alpha}$	Spodní mez plastické deformace	[%]
$e_{p\beta}$	Horní mez plastické deformace	[%]
$F$	Zatížení	[N]
$F_e, F_{p0,2}$	Zatížení na mezi kluzu	[N]
$F_m$	Maximální zatížení	[N]
HV	Tvrдость podle Vickerse	
$\Delta L$	Okamžité prodloužení/rozšíření	[mm]
$L$	Délka po deformaci na předepsané plastické prodloužení/rozšíření	[mm]
$L_0$	Počáteční délka zkušební tyče	[mm]
$L_u$	Délka zkušební tyče po přetržení	[mm]
$m_\epsilon$	směrnice elastické části závislosti napětí/prodloužení měřené průtahoměrem násobená 100%	[MPa]
$m_r$	Směrnice odpovídající přímky závislosti skutečné plastické deformace šířky versus skutečné plastické deformace délky	[-]
$n, N$	Počet prvků statického souboru	

$r$	Součinitel plastické anizotropie	[-]
$\bar{r}$	Vážený průměr hodnot $r_{x/y}$	[-]
$r_{x/y}$	Součinitel plastické anizotropie (ve stupních) vztažený ke směru válcování při plastické deformaci $\epsilon_p$ /v rozsahu plastických deformací $\epsilon_{p\alpha} - \epsilon_{p\beta}$ v y %	[-]
$\Delta r$	Stupeň plošné anizotropie	[-]
$R$	Napětí	[MPa]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_p, R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$S_0$	Počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče	[mm <sup>2</sup> ]
$T_t$	Teplota tání	[K]
$T_m$	Teplota rekystalizace	[K]
$V$	Objem po deformaci	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$	Počáteční objem	[m <sup>3</sup> ]
$\bar{x}$	Střední hodnota	
$x_i$	Prvek statického souboru o indexu i	
$\epsilon_a$	Skutečná plastická deformace tloušťky	[-]
$\epsilon_b$	Skutečná plastická deformace šířky	[-]
$\epsilon_l$	Skutečná plastická deformace délky	[-]
$\epsilon_p$	Plastická deformace v daném okamžiku zkoušky	[-]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\sigma$	Směrodatná odchylka	



JEDNOTKY	Popis
mm	Milimetr
mm <sup>2</sup>	Milimetr čtvereční
m <sup>3</sup>	Metr krychlový
K	Kelvin
N	Newton
MPa	MegaPascal
%	Procento

PRVKY	Popis
Al	Hliník
B	Bor
C	Uhlík
Cr	Chrom
Cu	Měď
Mn	Mangan
Mo	Molybden
N	Dusík
Nb	Niobium
Ni	Nikl
P	Fosfor
S	Síra
Si	Křemík
Ti	Titan
V	Vanad
Zr	Zirkonium

## 1. Úvod

Kvalitu konečného výrobku zásadním způsobem ovlivňují, kromě jiného, také mechanické a technologické vlastnosti vstupního materiálu. Polotovary mohou být odlévány nebo tvářeny, a to za tepla či za studena.

U plechů válcovaných za studena dochází ke směrové orientaci pevnostních a tvárných charakteristik zpracovávaného materiálu, a to vzhledem ke směru válcování. Popisem tohoto chování se zabývá anizotropie a znalost míry jejího uplatnění při tváření konkrétní oceli je z technologického hlediska velmi důležitá. Ačkoliv je anizotropie důležitým parametrem pro využití plechů v praxi, výrobci o ní neuvádějí žádné údaje.

Zkouška součinitele plastické anizotropie vychází ze zkoušky tahem kovových materiálů a je použita i v předložené práci k hodnocení anizotropie vybraných materiálů pro plechy válcované za studena. Jedná se o nízkouhlíkovou ocel DC01 a mikrolegovanou ocel DP1000. Obecně je vhodné výsledky zkoušky tahem doplnit o zkoušky tvrdosti a metalografickou analýzu, proto byli uvedené experimentální metody zařazeny i v této bakalářské práci.

Cílem práce je porovnání anizotropie vybraných ocelí pro tváření za studena.

## 2. Teoretická část

V této kapitole jsou uvedeny základní teoretické předpoklady týkající se anizotropie a materiálů, které se používají pro plechy válcované za studena.

### 2.1 Anizotropie

Je známo, že anizotropie zásadně ovlivňuje použití materiálu dle jeho mechanických vlastností, neboť jsou tyto vlastnosti nestabilní v průběhu tváření materiálu. Anizotropii je možno vnímat dvojím způsobem. V odborné literatuře lze najít informace o normálové anizotropii, kterou lze popsat jako nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vzhledem k mechanickým vlastnostem v kolmém směru na rovinu plechu, tedy ve směru tloušťky plechu. Normálová anizotropie se odvíjí od metalurgických podmínek výroby plechů, které utváří jejich strukturní a krystalografickou texturu. Předložená práce se však zaměřuje hlavně na součinitel plastické anizotropie nebo dle staršího označení na anizotropii plošnou, která je definována jako nestejnoseměrnost mechanických a fyzikálních vlastností materiálu v rovině tabule plechu vzhledem ke směru válcování. Určení součinitele plastické anizotropie přinese důležité informace o chování materiálu v případě, že je na něj vyvíjen tlak, či napětí a může pomoci ke zlepšení procesu tváření, k lepší využitelnosti materiálu a zajištění delší životnosti, či lepších funkčních vlastností. Součinitel plastické anizotropie se značí malým písmenem  $r$  a popisuje schopnost materiálu odolávat ztenčení při tažení. [1]

K vyhodnocení součinitele plastické anizotropie se používá norma [2], kde se též označuje jako Lankfordův koeficient. Norma uvádí, že součinitel plastické anizotropie se rovná poměru skutečné plastické deformace šířky ( $\epsilon_b$ ) ke skutečné plastické deformaci tloušťky ( $\epsilon_a$ ) zkoušeného tělesa, které je vystaveno napětí v tahu v jedné ose, pro které se využívá zkouška tahem, tedy:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a}, \quad (1)$$

kde:

$\varepsilon_b$  = skutečná plastická deformace tloušťky [-]

$\varepsilon_a$  = skutečná plastická deformace šířky [-].

Vzhledem k tomu, že měření změny tloušťky vzorku během zkoušky může být problematické a výsledek takového měření je velice citlivý na přesnost měření, lze vzorec upravit. Pokud lze vyjít ze zákona o zachování objemu, kde platí:

$$V_0 = V,$$

pak lze tento vzorec zapsat jako:

$$a_0 \cdot b_0 \cdot L_0 = a \cdot b \cdot L,$$

z toho:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{b_0 \cdot L_0}{b \cdot L}$$

a platí:

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0}$$

a platí:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{a}{a_0}$$

Získáme tedy vyjádření:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{b_0 \cdot L_0}{b \cdot L}$$

Ze kterého získáme následující vzorec:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 \cdot b_0}{L \cdot b}\right)}, \quad (2)$$

kde:

$V$  = objem po deformaci [ $\text{m}^3$ ]

$V_0$  = počáteční objem [ $\text{m}^3$ ]

$a$  = tloušťka zkušební tělesa po deformaci [mm]

$a_0$  = počáteční tloušťka zkušební tělesa [mm]

$b$  = šířka zkušební tělesa po deformaci na předepsaném prodloužení [mm]

$b_0$  = počáteční šířka zkušební tělesa [mm]

$L$  = délka po deformaci na předepsané plastické prodloužení [mm]

$L_0$  = počáteční délka [mm]

$r$  = součinitel plastické anizotropie [-]

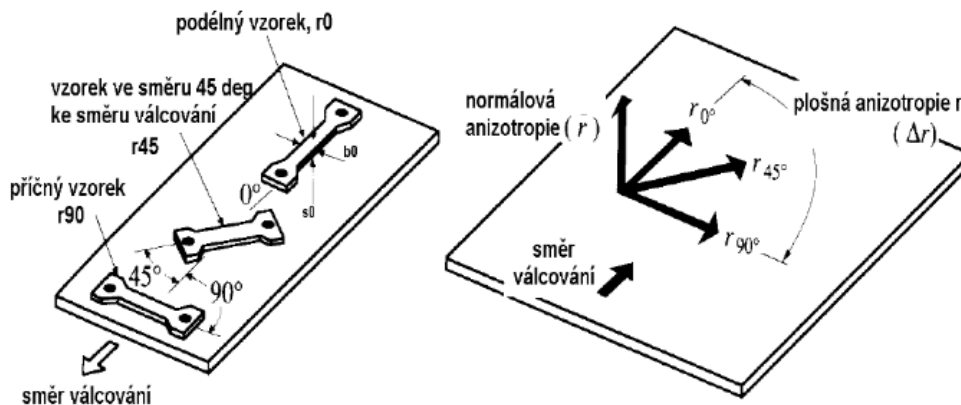
$\varepsilon_a$  = skutečná plastická deformace tloušťky [-]

$\varepsilon_b$  = skutečná plastická deformace šířky [-]. [2]

Za předpokladu, že zkoušený materiál nevykazuje fázové přeměny a lze považovat jeho objem za stálý, je tento vzorec doporučovaný normou [2].

Jak již bylo uvedeno, anizotropie je závislá na směru namáhání (je obvyklé uvažovat orientaci zkušební tělesa vzhledem ke směru válcování). Značku  $r$  je možné doplnit pravým dolním indexem, který říká, v jakém úhlu od směru válcování se těleso zatěžuje. Dále je možné index doplnit o stupně deformace, např.:  $r_{90/10}$ , kde je vzorek vystaven jednoosému napětí v tahu ve sklonu  $90^\circ$  ke směru válcování a při plastické deformaci odpovídající 10 %. [2] Tyto informace jsou nezbytné pro označení a zaznamenání výsledků, díky kterým jsou hodnoty snadno porovnatelné.

Z Obr. 1 je patrná směrová orientace vzorků vzhledem ke směru válcování a je vysvětlen rozdíl mezi plošnou a normálovou anizotropií.



Obr. 1 Rozmístění vzorků měření anizotropie a rozdíl mezi normálovou anizotropií a součinitelem plastické anizotropie [3]

Jak již bylo uvedeno, zkouška součinitele plastické anizotropie vychází ze zkoušky tahem kovových materiálů [4]. Platnost zkoušky součinitele plastické anizotropie je ovšem omezena pouze oblastí homogenní plastické deformace. Stejně jako při zkoušce tahem i při zkoušce součinitele plastické anizotropie je před upnutím vzorku nutné změřit charakteristické rozměry vzorku vhodným měřidlem. Následné upnutí do univerzálního zkušebního stroje musí odpovídat požadavkům ISO 6892, stejně jako zkušební stroj samotný. Zkouška dle automatické metody probíhá do porušení materiálu a v případě manuálního stanovení  $r$  do předem zvoleného stupně deformace. [2]

Proměření zkušebního tělesa po zkoušce je možné provádět manuálně nebo automaticky, kde je nutné použít průtahoměr minimálně třídy 1 podle ISO 9513:1999. Manuální měření se nejčastěji provádí posuvným měřítkem, případně mikrometrem, aby nebyla překročena maximální přípustná chyba měření, kterou norma při měření šířky stanovuje na  $\pm 0,005$  mm. Na měření délky postačí zařízení schopné měřit s přesností  $\pm 0,01$  mm. [4]

V COMTES FHT, kde je experiment vyhotoven, je zvykem měřit tloušťku pomocí mikrometru, díky čemuž se snižuje procento nepřesností. Pro platnost zkoušky je nezbytné, aby zkoušený vzorek nevykazoval prohnutí, jeho plastická deformace byla homogenní a rychlost zkoušení nepřekročila 0,008/s. [2]

Jednotlivé koeficienty anizotropie je možné dále použít pro vypočítání váženého průměru ( $\bar{r}$ ) dle rovnice 3 a pro stupeň plošné anizotropie ( $\Delta r$ ) dle vzorce 4. [2]

$$\bar{r} = \frac{r_{0/20} + r_{90/20} + 2r_{45/20}}{4} \quad (3)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0/20} + r_{90/20} - 2r_{45/20}}{2} \quad (4)$$

Pro materiály s homogenním deformačním chováním lze využít metodu měření dat v jediném bodě. Pro materiály s nehomogenním deformačním chováním je zapotřebí uvést další vztahy, anizotropii v tomto případě ovlivňuje skutečná plastická deformace délky  $\varepsilon_l$  (5), skutečná plastická deformace šířky  $\varepsilon_b$  (6) a plastická deformace v daném okamžiku zkoušky  $\varepsilon_p$  (7).

$$\varepsilon_l = \ln \left[ \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} - \frac{F}{S_0 \cdot m_E} \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b_0 - \Delta b + \frac{b_0 \cdot \mu \cdot F}{S_0 \cdot m_E}}{b_0} \quad (6)$$

$$\varepsilon_p = \left[ \frac{\Delta L}{L_0} - \frac{F}{S_0 \cdot m_E} \right] \times 100\%, \quad (7)$$

kde:

$b_0$  = počáteční šířka zkušebního tělesa [mm]

$\Delta b$  = okamžité rozšíření [mm]

$F$  = zatížení [N]

$L_0$  = počáteční délka [mm]

$\Delta L$  = okamžité prodloužení [mm]

$m_E$  = směrnice elastické části závislosti napětí/prodloužení [MPa]

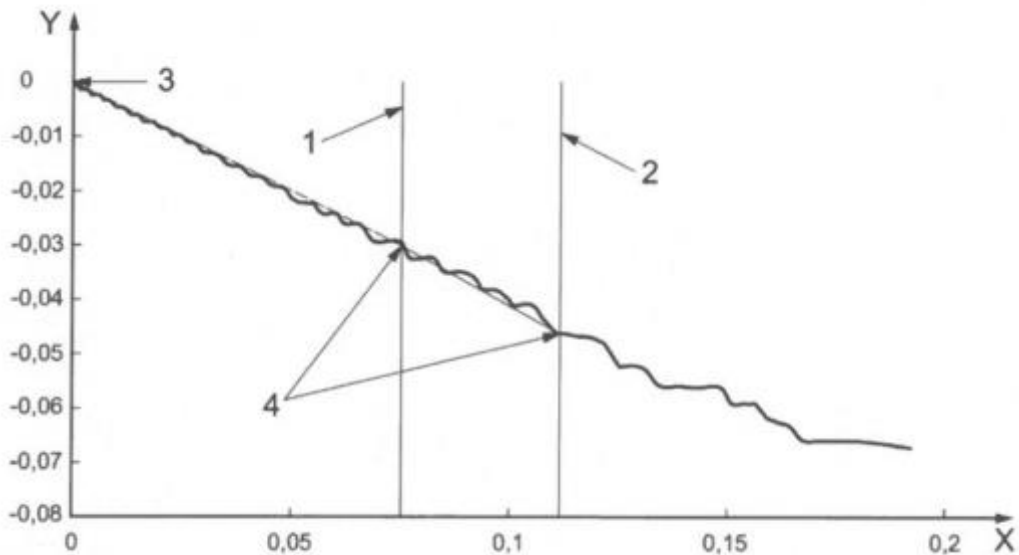
$S_0$  = počáteční plocha průřezu zkoušené délky [mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon_b$  = skutečná plastická deformace šířky [-]

$\varepsilon_l$  = skutečná plastická deformace délky [-]

$\varepsilon_p$  = plastická deformace v daném okamžiku zkoušky [-]

$\mu$  = Poissonovo číslo; pro ocel = 0,30 [-].



Obr. 2 Vztah mezi skutečnou plastickou deformací šířky a délky [2]

Na Obr. 2 je zobrazena závislost Y (skutečná plastická deformace šířky) na X (skutečná plastická deformace délky). Vodorovné přímky s označením 1 a 2 vymezují část grafu, ze které se anizotropie vyhodnotí, číslo jedna určuje spodní mez plastické deformace a číslo 2 určuje horní mez plastické deformace. Předpokládá se, že hodnoty na ose X jsou bez chyb a nejistot, ale ypsilonové souřadnice nesou zatížení náhodou chybou, a proto se tyto body proloží přímkou, jejíž rozmezí charakterizuje vyznačení 4. Lineární regrese se aproximují dané hodnoty. Tato lineární regrese pro rovnice 6 a 7 musí ve zvoleném rozsahu procházet počátkem a platí pro ni vztah: [2]

$$\varepsilon_b = m_r \cdot \varepsilon_l, \quad (8)$$



kde:

$m_r$  = směrnicí odpovídající přímky závislosti skutečné plastické deformace šířky versus skutečné plastické deformace délky [-]

$\epsilon_b$  = skutečná plastická deformace šířky [-]

$\epsilon_l$  = skutečná plastická deformace délky [-].

Výsledkem zkoušky tahem jsou obecně: mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce [4], s tím, že v předložené práci nebude vyhodnocována kontrakce, neboť není v materiálových listech udávána. Z hodnot mechanických vlastností lze sestavit základní hodnocení zkoušeného plechu, ze kterého však nelze dostatečně přesně určit rozdíly mechanických vlastností v různých směrech, které výrazně ovlivňují tvářitelnost. [3]

Z výše uvedených důvodů se proto ze zkoušky tahem pro plechy vyhodnocuje součinitel plastické anizotropie  $r$  - dle *vzorce 1*. Zkouška tahem je popsána v další kapitole.

Literatura [3] dále uvádí možnost praktického vyjádření tvářitelnosti materiálu jako poměr meze kluzu a meze pevnosti, který by měl odpovídat rozmezí hodnot 0,35 až 0,85. Zde se nabízí možnost vyhodnotit parametr tvářitelnosti pro různé směrové orientace vzorku. Materiály s nízkým poměrem těchto napětí mají vysokou tažnost. Pokud materiály vykazují vysoké hodnoty tohoto poměru je tažnost nízká a materiál je tedy obtížně tvářitelný. [3] Pro zjištění v hodnosti materiálu k hlubokému tažení je dobré zjistit průměrnou hodnotu součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ , kterou lze vypočítat dle *vzorce 3*. Čím je tato hodnota  $\bar{r}$  vyšší, tím vhodnější jsou materiály k hlubokému tažení. [5]

## 2.2 Zkouška tahem

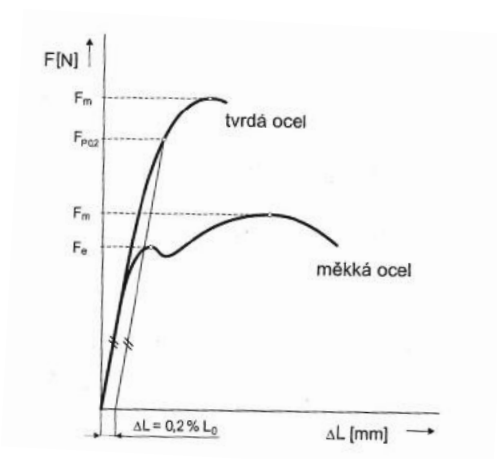
Zkouška tahem ocelí patří mezi nejvyužívanější zkoušky pro hodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Její provedení se řídí normou [4]. Vlastní zkouška začíná proměřením rozměrů zkušebního tělesa, a to minimálně ve třech místech, co nejrovnoměrněji rozložených ve zkoušené délce [4]. Zkouška tahem spočívá v deformaci zkoušeného tělesa jednoosým namáháním v univerzálním zkušebním stroji, předepsanou rychlostí, obvykle do lomu. Teplota, při které se tahová zkouška provádí je dle normy kategorizovaná na zkoušky při teplotách pokojových, zkoušky za snížené teploty a zkoušky za zvýšené teploty. Experiment představené práce se řídí normou [4] a zkoušky jsou provedeny za pokojových teplot, tedy

v rozmezí +10 až +35 °C. Během zkoušky je zaznamenáván pracovní diagram, který vyjadřuje závislost zatěžující síly na absolutním prodloužení zkušební tyče: [6]

$$F = f(\Delta L) \quad (9)$$

Z hlediska plastické deformace je důležitá hodnota meze kluzu. Pro výraznou mez kluzu je to hodnota napětí, při které dochází k plastické deformaci bez přírůstku zatížení. V případě, že je mez kluzu nevýrazná, je zapotřebí vyhodnotit tzv. smluvní mez kluzu, což je napětí, při kterém bylo dosaženo předepsané smluvní hodnoty prodloužení. Je obvyklé využívat hodnotu 0,2 % plastické deformace a smluvní mez kluzu poté označit jako  $R_{p0,2}$ . [4] [6]

Na Obr. 3 je příklad pracovního diagramu pro tzv. měkkou a tvrdou ocel. Je patrné, že výraznou mez kluzu vykazuje jen měkká ocel a je vidět způsob stanovení síly na mezi kluzu pro obě oceli.



Obr. 3 Pracovní tahový diagram pro měkkou a tvrdou ocel [6],

Kde:

$F_m$  = maximální dosažená síla při zkoušce [N]

$F_e, F_{p0,2}$  = síla na mezi kluzu [N]

Jak již bylo uvedeno, výstupem tahové zkoušky je závislost  $F = f(\Delta L)$ , která se dále přepočítává na  $R = f(\epsilon)$ . Pro grafické znázornění se využívá výraz smluvní diagram.

$$R = \frac{F}{S_o}, \quad (10)$$

kde:

R = smluvní napětí [MPa]

F = působící síla [N]

S<sub>o</sub> = počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče. [mm<sup>2</sup>] [6]

Pro poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (11)$$

Výpočet meze kluzu se řídí vzorcem:

$$R_e = \frac{F_e}{S_o} \quad (12)$$

Smluvní mez kluzu se stanoví pomocí vzorce:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_o} \quad (13)$$

Vzorec pro mez pevnosti v tahu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_o}, \quad (14)$$

kde:

ε = poměrné prodloužení [-]

ΔL = okamžité prodloužení [mm]

L<sub>o</sub> = počáteční délka zkušební tyče [mm]

R<sub>e</sub> = mez kluzu [MPa]

F<sub>e</sub>, F<sub>p0,2</sub> = síla na mezi kluzu [N]

S<sub>o</sub> = počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče [mm<sup>2</sup>]

R<sub>p0,2</sub> = smluvní mez kluzu [MPa]

R<sub>m</sub> = mez pevnosti v tahu [MPa]

F<sub>m</sub> = nejvyšší dosažená síla, před přetržením zkušební tyče [N]. [4] [6]

## 2.3 Oceli pro tváření za studena

Tváření za studena probíhá pod rekryalizační teplotou tvářeného materiálu, která je dána teplotou tavení tvářeného materiálu dle vzorce: [1]

$$T_r = 0,4 \cdot T_m, \quad (15)$$

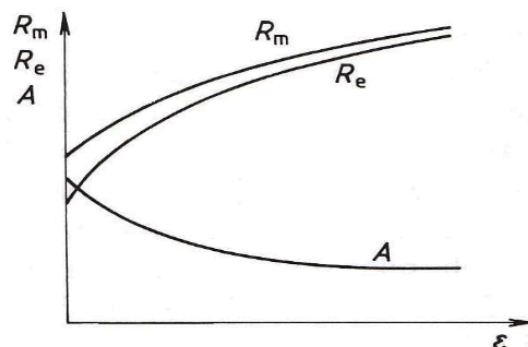
kde:

$T_r$  = teplota rekrytalizace [K]

$T_m$  = teplota tavení [K] [1]

Při tváření za studena dochází ke zpevňování materiálu (dislokačním zpevňením) a deformaci zrn ve směru tváření, díky čemuž materiály tvářené za studena vykazují vyšší mez kluzu a mez pevnosti, než materiály tvářené za tepla. [7] Tato skutečnost je dána paralelně probíhajícími, dynamickými odpevňovacími pochody při tváření za tepla.

Předložená práce se věnuje tváření mikrolegovaných a nízkouhlíkových ocelí, o kterých je známo, že jsou vhodné ke svařování běžnými postupy. [8] Z technologického hlediska jsou určeny pro tváření za studena. Jak již bylo uvedeno, při tváření za studena dochází u kovových materiálu ke zpevňení plastickou deformací s tím, že intenzita zpevňení v závislosti na rostoucí velikosti deformace narůstá, jak je vidět na *Obr. 4*. [3] [9] Současně dochází k poklesu tvárných vlastností, které jsou v obrázku zastoupeny tažností  $A$ . Tyto skutečnosti jsou dány narůstající hustotou dislokací a jejich vzájemnou interakcí. [9]



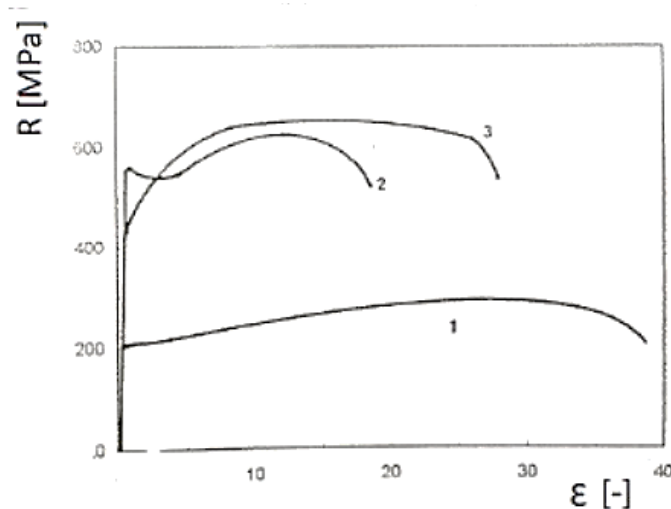
Obr. 4 Závislost mechanických vlastností materiálu na velikosti deformace [10]

Do skupiny ocelí pro tváření za studena lze zařadit oceli nízkouhlíkové a oceli mikrolegované. Mikrolegování materiálu se provádí přidáním legujících prvků, které mají

vysokou afinitu ke kyslíku, zejména Ti, V, Nb, Zr, Al a to v rozmezí 0,01-0,1 % z celkového obsahu chemického složení materiálu. Zároveň nesmí celkový obsah mikrolegujících prvků přesáhnout 0,15 %. V případě mikrolegování se prakticky nemění vlastnosti matrice. Uvedeným legováním vznikají ve struktuře precipitáty, které brání volnému pohybu dislokací a v důsledku toho dochází ke zpevňování materiálu. [11] Je známo, že s narůstajícími pevnostními charakteristikami vždy klesají tvárné charakteristiky.

Již zmíněné prvky většinou tvoří stabilní nitridy a disperze sloučenin uhlíku a dusíku s těmito prvky brání hrubnutí austenitického zrna při teplotách tváření. Mikrolegované oceli mají tedy zvýšenou mez kluzu a obecně vyšší hodnoty pevnosti. [8]

Porovnání smluvních tahových diagramů pro nelegovanou a mikrolegovanou ocel s vyšší mezí kluzu je patrné z Obr. 5.



Obr. 5 Tahový diagram pro: 1 - nelegovanou ocel; 2 - mikrolegovaná svařitelná ocel s vyšší mezí kluzu; 3 – dvoufázová feriticko-martenzitická ocel [11], upraveno pro účely BP

V Tabulce 1 jsou uvedeny mechanické vlastnosti vybraných ocelí pro plechy válcované za studena tak, jak je uvádí výrobci. Je vidět, že vybrané oceli mají široké rozmezí pevnostních i tvárných charakteristik, které jsou dané chemickým složením viz Tabulka 2. Zatímco oceli s označením DC01-DC05 jsou oceli nízkouhlíkové s nevýraznou mezí kluzu, zbývající oceli patří mezi mikrolegované oceli s taktéž nevýraznou mezí kluzu, ovšem s vyššími pevnostními charakteristikami. Pevnost vybraných ocelí je v širokém rozmezí 270-1074 MPa a úměrně tomu bude široký aplikační potenciál těchto materiálů. Z označení hodnot tažností je zřejmé, že výrobci používají zkušební vzorky s délkou činné části minimálně 80 mm.

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných ocelí pro plechy válcované za studena.

Materiál	Re [MPa]	Rm [MPa]	A80-min [%]	Zdroj:
DC01	280	270-410	28	[12]
DC03	140-240	270-370	34	[13]
DC05	180	270-350	40	[12]
Materiál	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80-min [%]	Zdroj:
HC300LA	300-380	380-480	23	[14]
DP1000	821	1074	9,5	[15]

Tabulka 2 uvádí chemické složení ocelí, jejichž vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 2 Chemické složení vybraných ocelí pro plechy válcované za studena.

Prvek v % [max]	DC01	DC03	DC05	HC300LA	DP1000
C	0,12	0,080	0,06	0,1	0,132
Si	-	0,040	-	0,5	0,19
Mn	0,60	0,40	0,35	1,0	1,50
P	0,045	0,030	0,025	0,025	0,010
S	0,045	0,030	0,025	0,025	0,003
Al	-	0,015	-	0,015	0,041
Cr	-	-	-	-	0,03
Ni	-	-	-	-	0,03
V	-	-	-	*	0,01
Nb	-	-	-	0,09	0,014
N	-	-	-	-	0,004
Cu	-	-	-	-	0,01
B	-	-	-	-	0,0002
Ti	-	-	-	0,15	-
Nb + Ti	-	0,040	-	*	-
Cr + Mo	-	-	-	-	-
Zdroje:	[12]	[13]	[12]	[14]	[15]

\*Mohou být přidány samostatně, nebo dohromady, ovšem součet obsahů těchto tří prvků musí být v rozsahu 0 - 0.22%

Jak již bylo uvedeno, anizotropie je důležitým parametrem pro aplikaci těchto materiálů, přesto o ní výrobci neuvádějí žádné údaje, i když je to zásadní parametr pro simulaci tvářecích procesů. Je sice možné brát tabelované, nebo pro daný typ ocelí typické hodnoty, ale jejich nepřesnost může vést ke zcela odlišným výsledkům simulace jako takové. [16]

Norma ČSN EN 10027-1 uvádí způsob označení pro ploché výrobky k tváření za studena. Podle této normy jsou označeny první tři materiály v *Tabulce 1*. Vysvětlení těchto značek je uvedeno v *Tabulce 3*. [17]

*Tabulka 3 značení ocelí pro ploché vzorky k tváření za studena [17]*

Základní písmeno označující oceli na ploché výrobky k tváření za studena.	D
Následující písmeno určující způsob válcování	C = válcováno za studena*
	D = válcováno za tepla*
	X = způsob válcování není předepsán*

*\*Následují dva symboly, které charakterizují jejich pořadí*

### 3. Experimentální část

Pro studium anizotropie byly vybrány následující dva materiály: DC01 a DP1000. DC01 je nízkouhlíková ocel a DP1000 je představitelem mikrolegované oceli. Jejich chemické složení je v *Tabulce 2*. Sledované oceli mají srovnatelný obsah uhlíku. Z *Tabulky 1* je patrné, že mikrolegování je důvodem přibližně 3x vyšších pevnostních charakteristik u oceli DP1000 ve srovnání s ocelí DC01, proto lze předpokládat, že v dosažených výsledcích zkoušky součinitele plastické anizotropie budou prokazatelné rozdíly.

Výrobce udává, že plech z oceli DC01 je velmi měkký materiál s hladkým povrchem, vyráběný válcováním za studena. Vzhledem k tomu, že výrobce neudává informace o dalším tepelném zpracování, předpokládá se, že nebylo provedeno. Dále se při výrobě plechů z tohoto materiálu dosahuje nižších rozměrových tolerancí a je možné vyrábět plechy tloušťek 0,6 - 3 mm. Materiál se hodí na další povrchové úpravy jako např. lakování, pokovování, nebo smaltování. Obecně se plechy tvářené za studena využívají v oblastech stavebního průmyslu, pro výrobky sanitárních zařízení, nebo ve strojírenství, například v automobilovém průmyslu. [12]

Ocel DP1000 dle výrobce [18] vykazuje velmi jemnozrnnou strukturu. Byla navržena hlavně pro karosářské potřeby, kde zaručuje vyšší bezpečnost v automobilech. Oproti oceli DC01 je tato ocel tvrdší. Tloušťka plechů vyráběných z tohoto materiálu je v rozmezí 0,5 - 2 mm. Ocel se zpracovává válcováním za studena a kontinuálním žíháním<sup>1</sup>, díky čemuž získá dvoufázovou strukturu – feritu, která zajišťuje dobré tvářecí vlastnosti, a martenzitu, jenž odpovídá za pevnost. Tento plech odpovídá normě EN10131 [18]

Lze předpokládat, že porovnání smluvních tahových diagramů získaných v bakalářské práci bude odpovídat průběhu 1 a 3 v *Obr. 5*.

---

<sup>1</sup> Kontinuální žíhání se provádí po válcování za studena pro snížení křehkosti. Spočívá v zahřátí na žíhací teplotu výdrži na této teplotě a ochlazení požadovanou rychlostí, to vše při neustálé cirkulaci materiálu přes pec, kde se část ohřívá a zase chladne. Výhodou je zkrácený výrobní cyklus a vysoká produktivita práce. [19]



### 3.1 Zkouška tahem

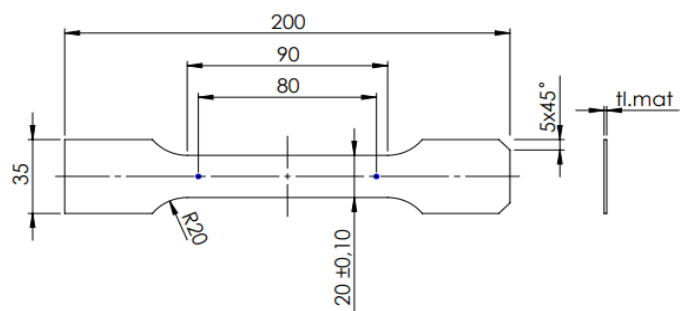
Na vybraných ocelích je provedena zkouška tahem směrově orientovaných vzorků. Jsou použity jak normované, běžné velikosti vzorků, tak mikrovzorky. Porovnání výsledků dosažených na vzorcích s různou velikostí by mohlo přispět k predikci výsledků na normovaných vzorcích na základě výsledku zkoušek na mikrovzorcích. *Tabulka 4* dokumentuje plán experimentu z hlediska množství vzorků při zkoušce tahem. Pouze na vybraných vzorcích bude provedena metalografická analýza a měření tvrdosti.

*Tabulka 4 Plánovaný rozsah tahových zkoušek*

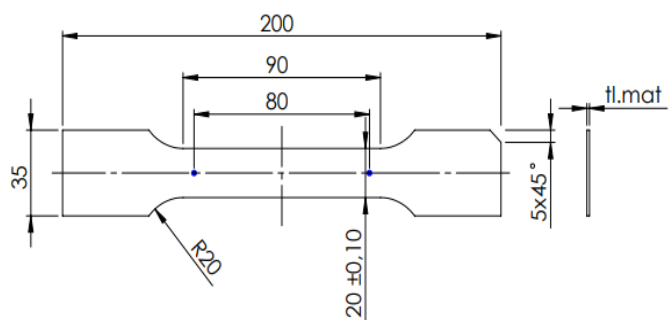
Směr	Normované velikosti vzorků			Mikrovzorky		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
DC01	3x	3x	3x	3x	3x	3x
DP1000	3x	3x	3x	3x	3x	3x

Plechý z již zmíněných materiálů DC01 a DP1000 dodal dodavatel PWO Czech Republic, a.s.. Z těchto plechů byl pomocí laserového paprsku vyřezán polotovár, který byl dále drátořezem obroben na zkušební těleso s přesně danou geometrií. Velikost a tolerance vzorků popisuje *Obr. 6 A,-D*.

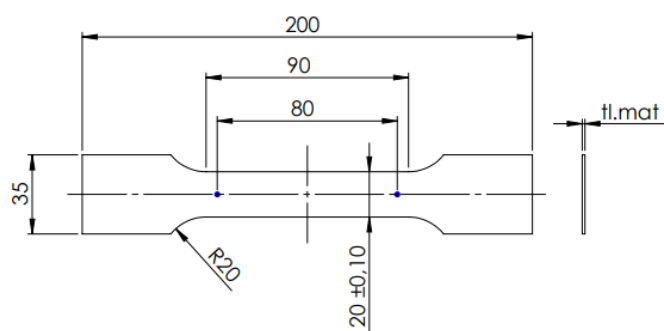
Vzorky normované velikosti mají velikost a geometrii dle normy [4], jsou pouze doplněny sraženými hranami pro odlišení směru ve kterém byly vyříznuty. Zkosení na obou stranách je pro vzorky vyříznuté ve směru 0°, tedy pro vzorky vyříznuté ve směru válcování daného materiálu. Zkosení z jedné strany mají vzorky ve směru 45° a vzorky ze směru 90° jsou bez sražení. Tvar vzorků pro mikrotahové zkoušky vychází z předchozích zkoušek ve firmě COMTES FHT.



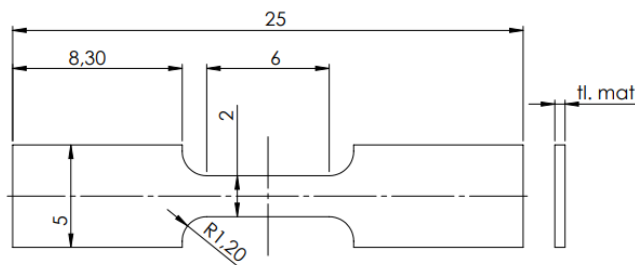
A,



B,



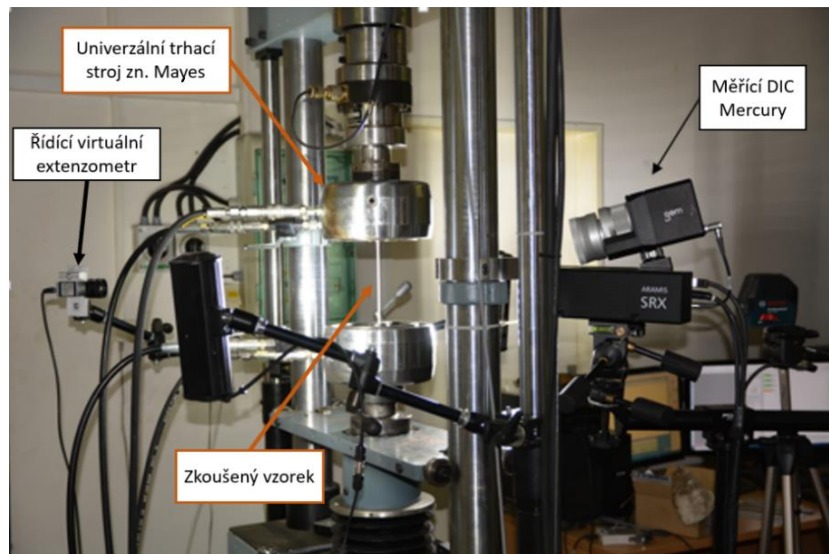
C,



D,

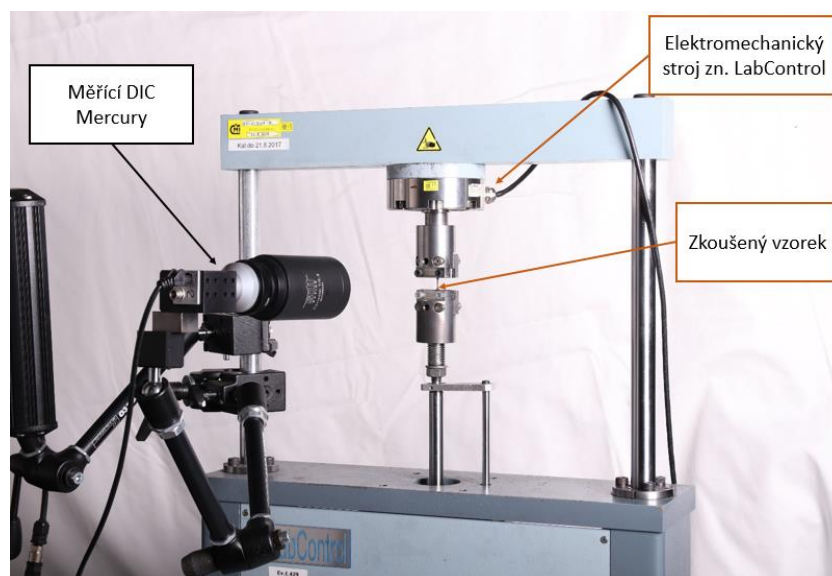
Obr. 6 Rozměry a geometrie vzorků pro zkoušku tahem; A, Normovaný vzorek ve směru 0°; B, Normovaný vzorek ve směru 45°; C, Normovaný vzorek ve směru 90°; D, Mikrovzorek

Zkušební tělesa pro sledované materiály mají identický tvar a liší se pouze v tloušťce  $b$ , která je pro DP1000 rovna 0,80 mm a pro DC01 rovna 1,5 mm. Proměření zkušebních vzorků normované velikosti bylo provedeno pomocí posuvného měřítka, mikrovzorky byly měřeny mikrometrem. Provedení tahové zkoušky vzorků normované velikosti bylo realizováno pomocí elektromechanického stroje značky Mayes, se silovou kapacitou 100 kN, který je vybavený hydraulickými čelistmi. Univerzální trhací stroj použitý pro zkoušky vzorků normované velikosti je zachycen na *Obr. 7*.



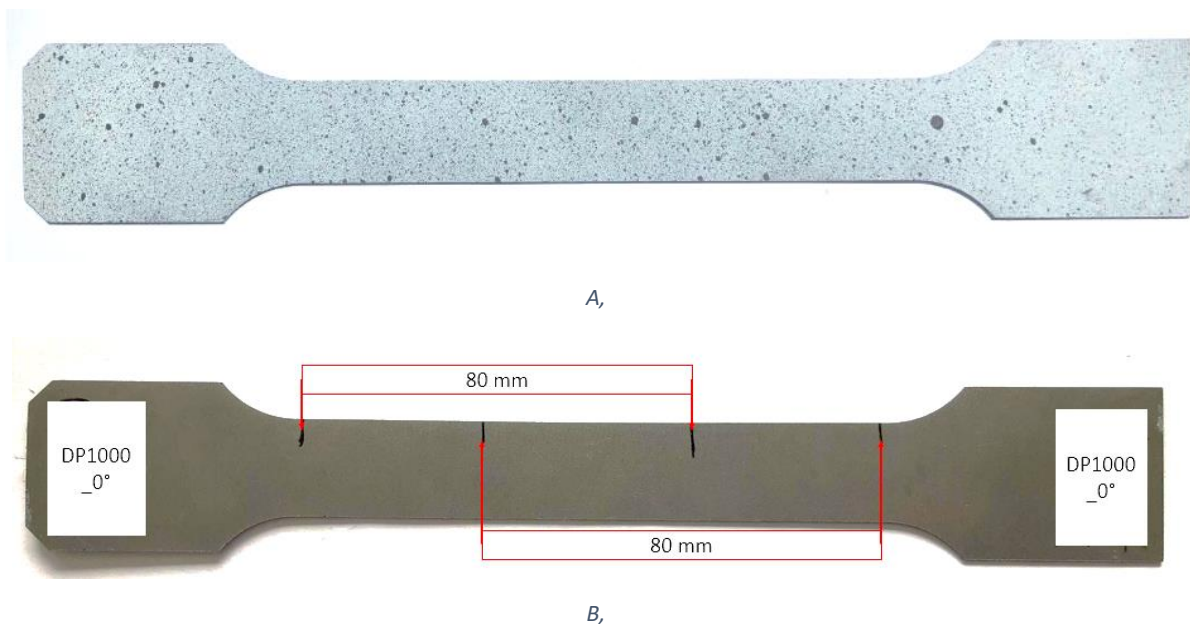
*Obr. 7 Univerzální trhací stroj, měřící systémy*

Pro mikrovzorky je využit elektromechanický stroj LabControl se silovou kapacitou 5 kN zobrazený na *Obr. 8*.



*Obr. 8 Elektromechanický stroj pro mikrovzorky, měřící systém*

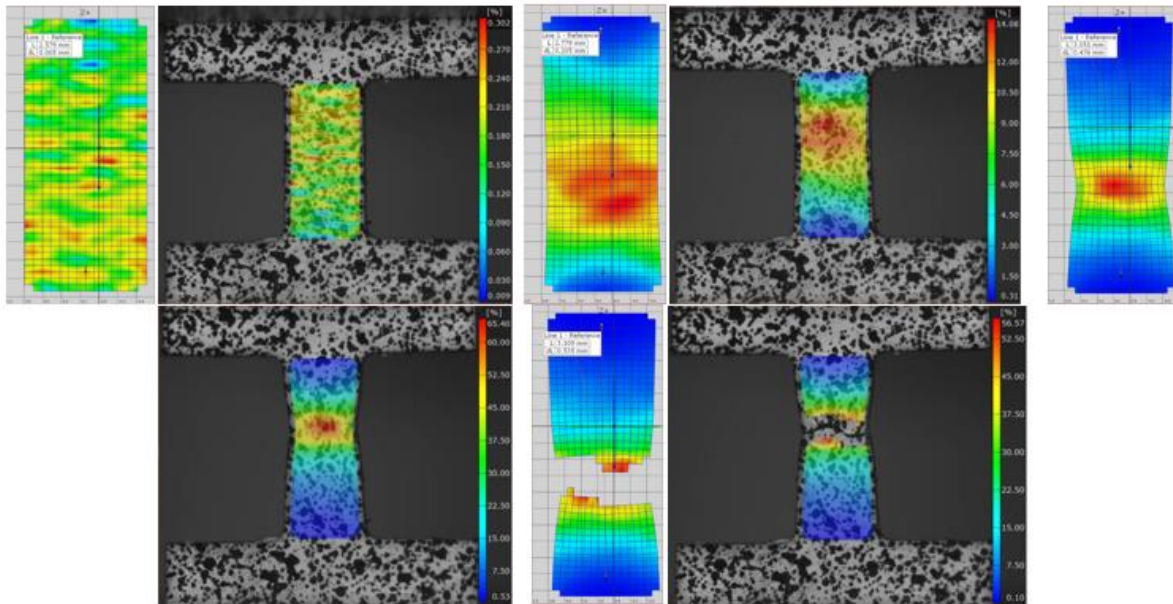
Pro snímání deformace byl v obou případech použit optický systém Mercury RT. Pro zaznamenávání průběhu zkoušky je použit program Aramis professional. 2D systém měření funguje na principu snímání jednotlivých elementů, které zachytí senzor v počáteční pozici a dále sleduje jejich pohyb. Díky softwaru GOM Correlate (digitální korelaci obrazu = DIC) jsou bezkontaktní optickou metodou měřeny souřadnice, ze kterých se dále vyhodnocují hodnoty jako například deformace, posunutí a další. Díky statické závislosti dvou kvantitativních veličin (čas-posunutí) je základem pro použití takového softwaru vytvoření vzoru, většinou stochastického, tzv. patternu, ten se vytváří přímo na vzorek nanesením bílé barvy po celém objemu a následnému nanesení černé barvy ve formě kapiček, viz *Obr. 9A*. Díky integrovanému prvku časové osy je možné velmi snadno promítat datový záznam, popsat deformační stav v určitém čase a provést vyhodnocení. [20]



*Obr. 9 Vzorek pro zkoušku tahem. A, strana s patternem; B, strana s vyznačením  $L_0$*

Na *Obr. 9B*, je obrácená strana vzorku z *Obr. 9A*, je vidět zaznamenaná počáteční délka ( $L_0$ ). Takto vyznačená vzdálenost je snadno změřitelná před i po provedení zkoušky, a tím lze i snadno vyhodnotit tažnost. U mikrovzorku je oproti normovaným vzorkům obtížné vyznačit  $L_0$  a zaznamenat její prodloužení, proto je u mikrotahových zkoušek, pro vyhodnocení tažnosti, využít virtuální extenzometr.

Na Obr. 10 je ve čtyřech sekvencích znázorněn průběh zkoušky tahem na mikrovzorku za současného využití systému DIC. Na ose y je prodloužení a barevná škála odpovídá velikosti napětí.



Obr. 10 Příklad metody DIC na mikrovzorku

V obou případech jsou z naměřených dat (pracovních diagramů) vyhodnoceny smluvní diagramy pomocí tabulkového editoru (MS Excel). Z vypočtených hodnot byl spočítán aritmetický průměr ( $\bar{x}$ ) [21] a směrodatná odchylka ( $\sigma$ ) [22] dle vzorců 16 a 17.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (17)$$

kde:

$\bar{x}$  = aritmetický průměr (střední hodnota)

$n, N$  = počet prvků statického souboru

$\sigma$  = směrodatná odchylka

$x_i$  = prvek statického souboru o indexu  $i$ .

## 3.2 Zkouška tvrdosti

Tvrlost byla měřena metodou podle Vickerse dle normy [23], a to na tvrdoměru „Wilson W wolpert vickers 430SVD“.

Při zkoušce je jako indentor použit diamantový, pravidelný, čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou, s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Měří se délka úhlopříček vtisku. Z průměrné hodnoty této délky a zátěžné síly se dále vyhodnocuje hodnota tvrdosti. Při měření byla použita nominální hodnota zkušebního zatížení = 294,2 N, což odpovídá 30 kp a označení tvrdosti HV30. Pro oceli platí, že vzdálenost mezi vtisky musí být alespoň 3násobek délky uhlopříčky a vtisk musí být minimálně 2,5násobku od okraje. [23]

Měření tvrdosti bylo provedeno na upínací části vybraných vzorků, které nebyly vystaveny plastické deformaci. Bylo provedeno vždy pět měření, spočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Obr. 11 dokumentuje vzorky na kterých byla měřena tvrdost.

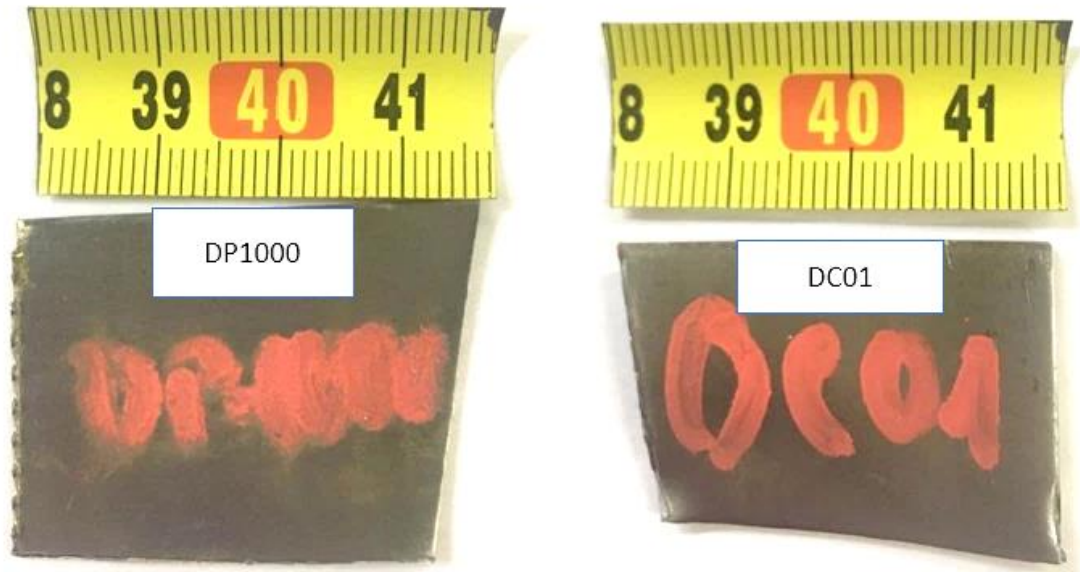


Obr. 11 Vybrané vzorky s provedenými zkouškami tvrdosti



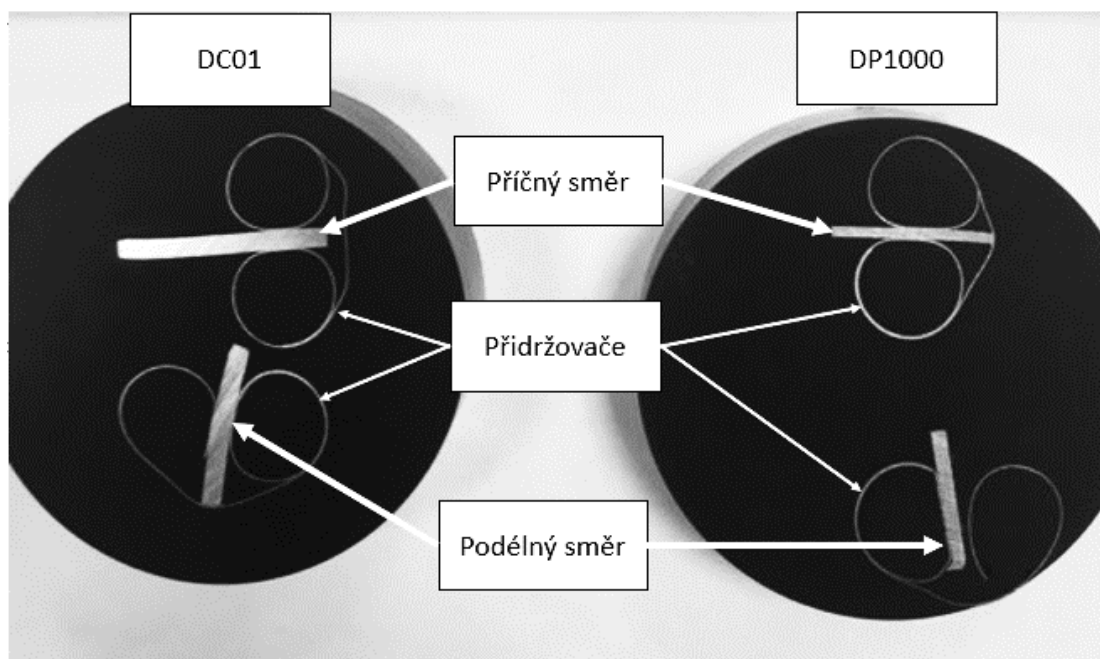
### 3.3 Metalografická analýza

Na materiálu DC01 a DP1000 byla provedena metalografická analýza v podélném i v příčném směru. Metalografická analýza v podélném směru je vyhotovena pro zjištění velikosti a deformace zrn, zatímco analýza v příčném směru pomáhá k popsání povrchové vrstvy. K dispozici byl od každého materiálu jeden plíšek cca o velikosti 30x20 mm, plechy jsou vidět na *Obr. 12*



*Obr. 12 Plechy pro metalografickou analýzu*

Pro přípravu vzorku byla použita řezačka „STRUERS –DISCOTOM-6“, kterou byl materiál rozříznut na dvě části pro možnost výbrusu v obou směrech. Vzorky byly uchyceny do kovového přidržovače a vloženy do silikonové mističky, kde byly vzorky zasypány práškem multifastblack a následně upěchovány a zataveny ve stroji „STRUERS-citopreso20“. Takto připravený vzorek je vidět na *Obr. 13*.



Obr. 13 Připravené vzorky k naleptání

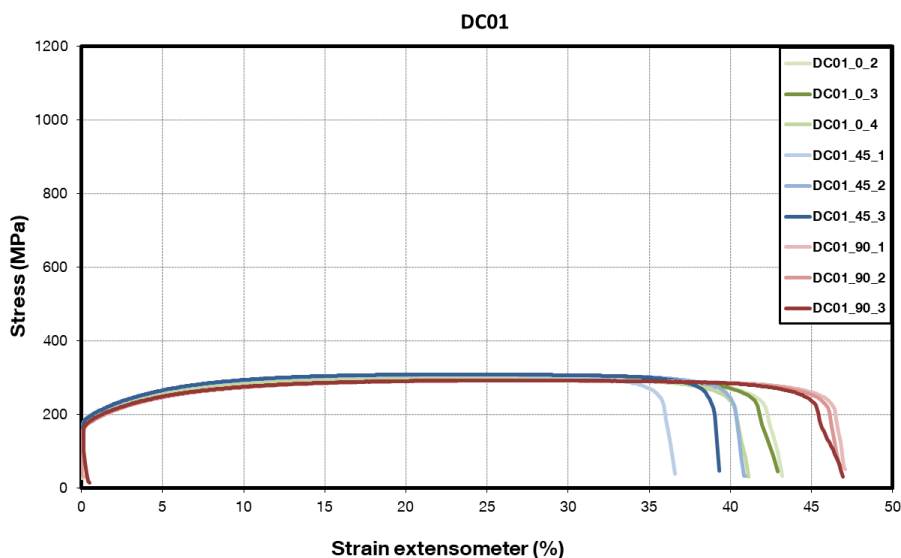
Dále následovalo broušení na brusných papírech s klesající zrnitostí, při přechodu na papír s nižší zrnitostí byl vzorek pečlivě opláchnut vodou. Po broušení následovalo leštění a dále leptání leptadlem Nital<sup>2</sup>, který působil na vzorek přibližně 5 vteřin, poté je vzorek opláchnut lihem a vysušen fénem. Takto připravený vzorek je vložen do mikroskopu Nikon Eclipse MA200, ze kterého jsou pořízeny fotografie při různém zvětšení. Fotografie jsou vidět v kapitole 4 na Obr. 18 A,-D,.

<sup>2</sup> Nital je 3% roztok kyseliny dusičné v lihu

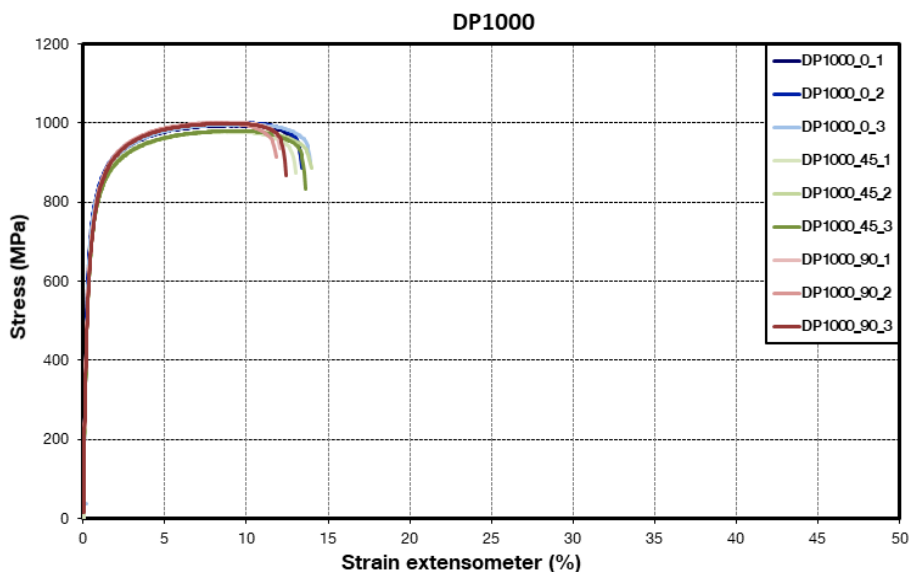


## 4. Výsledky a jejich diskuze

Na Obr. 14 a 15 jsou smluvní diagramy vzorků normovaných velikostí pro materiál DC01 a DP1000. Z obrázků je patrné, že předpoklad uvedený v kapitole 3 je správný, oba materiály vykazují nevýraznou mez kluzu. Dle očekávání má nízkouhlíková ocel v porovnání s ocelí mikrolegovanou výrazně menší pevnostní charakteristiky a úměrně tomu větší tažnost. Je možno konstatovat, že pevnostní charakteristiky se v závislosti na směrové orientaci vzorku výrazně neliší, stejně tak hodnoty tažnosti.

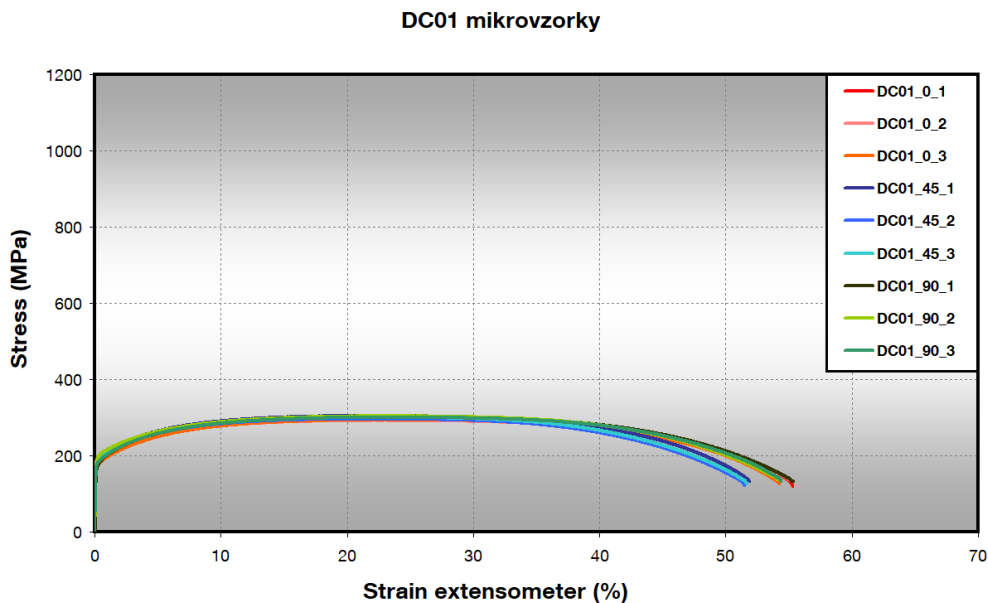


Obr. 14 Smluvní tahové diagramy pro normované vzorky z materiálu DC01

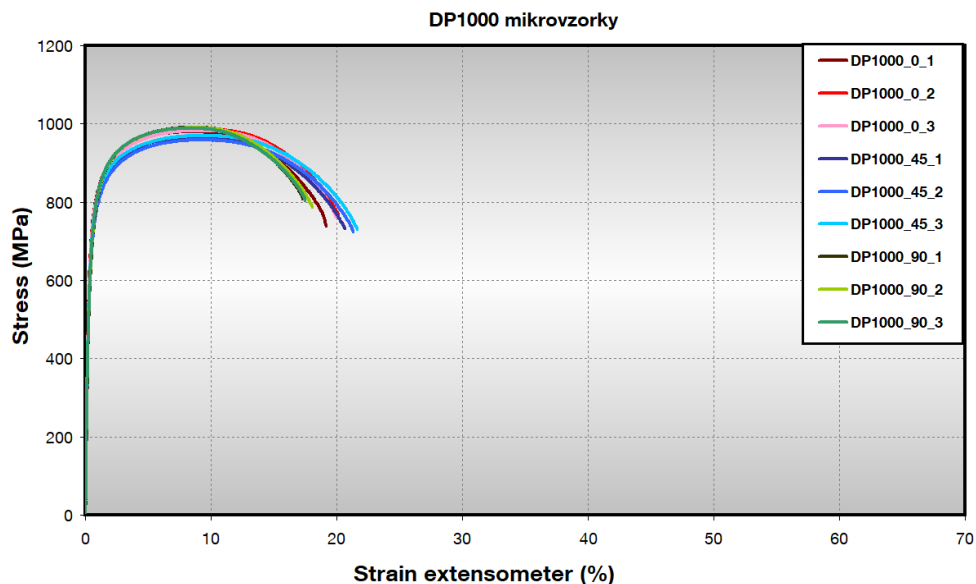


Obr. 15 Smluvní tahové diagramy pro normované vzorky z materiálu DP1000

Obr. 16 a 17 ukazují smluvní tahové diagramy mikrovzorků obou materiálů, tedy DC01 a DP1000. Stejně jako u normovaných vzorků se hodnoty pevnostních charakteristik ani hodnoty tažnosti významně neliší v závislosti na směrové orientaci. Stejná je i rozdílnost hodnot mezi materiálem DC01, který vykazuje vyšší hodnoty tažnosti a materiálem DP1000, který dosahuje vyšších hodnot pevnostních charakteristik.



Obr. 16 Smluvní tahové diagramy mikrovzorků pro materiál DC01



Obr. 17 Smluvní tahové diagramy mikrovzorků pro materiál DP1000

Na základě porovnání smluvních diagramů vzorků normovaných velikostí a mikrovzorků lze předpokládat, že použití odlišných vzorků je možné pro vzájemné porovnání pevnostních charakteristik sledovaných materiálů. Z hlediska tažnosti jsou výsledky v absolutních hodnotách pro mikrovzorky mírně vyšší.

Porovnání výsledků tahových zkoušek a měření tvrdosti sledovaných ocelí v závislosti na směrové orientaci vzorků uvádí *Tabulka 5*. Pro potřebu diskuze jsou v *Tabulce 5* uvedeny pouze průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami a pro přehlednost je tabulka hodnot pro mikrovzorky podbarvena světle šedivou barvou. Kompletní výsledky, tedy hodnoty získané ze zkoušek tahem a zkoušek tvrdosti, jsou uvedeny v příloze.

*Tabulka 5 Výsledky zkoušek tahem*

Materiál	DC01				DP1000				Typ vzorku
	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	$\frac{R_{p0,2}}{R_m}$	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	$\frac{R_{p0,2}}{R_m}$	
0°	186 ± 1	297 ± 3	42 ± 1	0,63	741 ± 6	997 ± 4	13 ± 0	0,74	N
45°	188 ± 1	308 ± 1	40 ± 1	0,63	704 ± 10	980 ± 1	13 ± 0	0,72	
90°	174 ± 7	292 ± 1	46 ± 1	0,60	690 ± 1	1001 ± 2	12 ± 0	0,69	
0°	187 ± 11	294 ± 1	55 ± 1	0,64	739 ± 6	984 ± 3	19 ± 1	0,75	M
45°	191 ± 4	301 ± 4	52 ± 0	0,63	695 ± 13	966 ± 6	21 ± 1	0,72	
90°	188 ± 12	302 ± 2	55 ± 1	0,62	688 ± 13	991 ± 1	17 ± 0	0,70	
Tvrdost (HV30)	DC01				DP1000				N
Průměr	95 ± 2				317 ± 3				

Dle očekávání jsou u normovaných zkušebních těles pevnostní charakteristiky nižší u uhlíkové oceli DC01, než u mikrolegované oceli DP1000 a odpovídajícím způsobem se mění hodnoty tažnosti. Obecně je možné konstatovat, že nebyla prokázána zásadní rozdílnost ve výsledcích v závislosti na směrové orientaci vzorku, a to u obou materiálů v rámci směrodatných odchylek sledovaných charakteristik. Nicméně, je možné konstatovat, že pro nízkouhlíkovou ocel DC01 jsou nejnižší pevnostní charakteristiky pro normované vzorky ve směru 90°. Tato skutečnost nebyla z hlediska pevnosti prokázána u oceli DP1000. V budoucí práci by bylo vhodné výsledek ověřit na dalších vzorcích.

Pro mikrovzorky z nízkouhlíkové oceli DC01 byly nejnižší pevnostní charakteristiky zjištěny pro 0° a pro ocel DP1000 ve směru 45°. Nelze však předpokládat, že by se jednalo o jednoznačné chování, které lze přiřadit jednotlivým materiálům. Z *Tabulky 5* je patrné, že materiál DC01 vykazuje tvrdost 95 HV30, zatímco materiál DP1000 313 HV30, tedy zhruba 3x vyšší. Z hlediska porovnání absolutních hodnot pro normované vzorky a mikrovzorky je možno říci, že hodnoty pevnostních charakteristik si přibližně odpovídají, ale tažnost je v případě mikrovzorků větší přibližně o 25 %.

V *Tabulce 5* je doplněn i poměr meze kluzu k mezi pevnosti, který, jak uvádí literatura, [24] je vhodný pro posouzení vhodnosti materiálu na hlubokotažné aplikace. Kritériem je velikost tohoto poměru 0,65. Z tohoto hlediska hlubokotažným operacím odpovídá materiál DC01.

V *Tabulce 6* jsou uvedeny výsledky součinitele plastické anizotropie  $r$  vyhodnocené z celé oblasti homogenní deformace, opět pro směrové orientované vzorky obou velikostí. V příloze je uvedena tabulka s kompletními daty, kde je navíc anizotropie v oblasti homogenní deformace rozdělena na dva úseky pro zpřesnění výsledků.

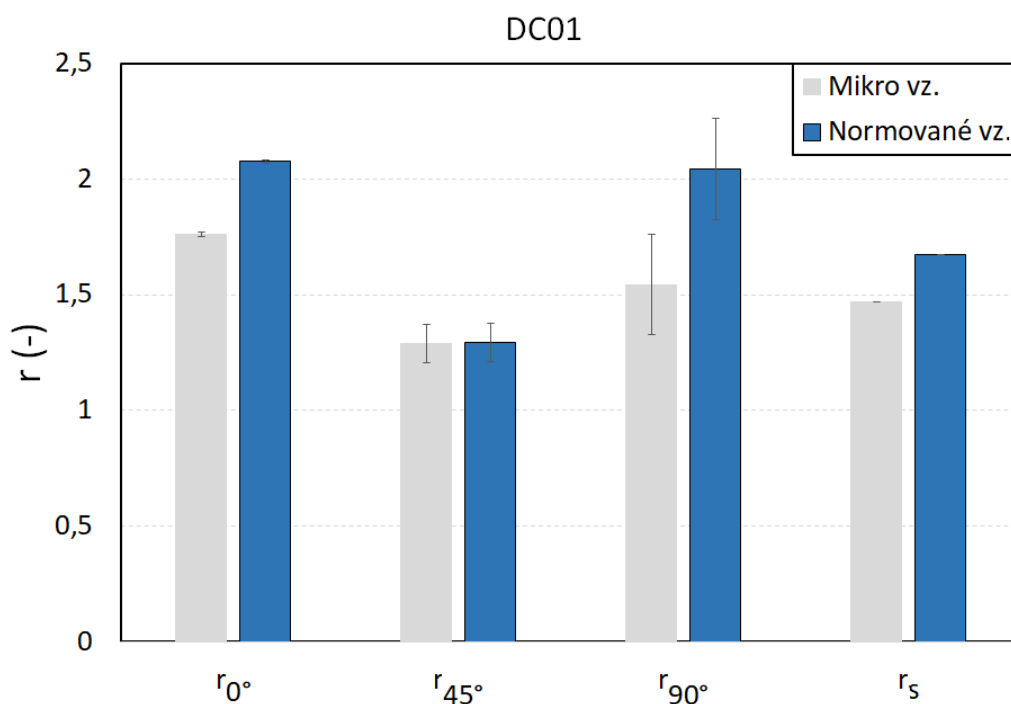
Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat, že hodnoty součinitele plastické anizotropie jsou ve všech ohledech vyšší u oceli DC01, což je dle očekávání v dobrém souladu s výsledky zkoušky tahem. Pro ocel DC01 je součinitel plastické anizotropie  $r_{0^\circ}$  největší pro normované i mikrovzorky. Pro DP1000 je pak největší  $r_{45^\circ}$  opět pro normované i mikrovzorky. Obdobně tato skutečnost platí i pro další směry. Rozdíly hodnot součinitele plastické anizotropie u oceli DC01 dosahují až 24 % a u oceli DP1000 je standardní chyba 12 %. Je tedy možno konstatovat, že použití normovaných a mikrovzorků je variabilní, ale hodnoty nejsou z hlediska absolutních velikostí porovnatelné. U oceli DP1000 vykazují mikrovzorky stejný trend (viz *Obr. 19*) jako vzorky normované, ale absolutní hodnoty jsou u mikrovzorků nižší. V *Tabulce 6* je doplněna průměrná hodnota součinitele plastické anizotropie  $\bar{r}$ . Tyto průměrné hodnoty jsou v dobrém souladu s poměry meze kluzu k mezi pevnosti k *Tabulce 5*. Jak již bylo uvedeno, čím vyšší je hodnota  $\bar{r}$ , tím vhodnější jsou materiály pro hluboké tažení.

*Tabulka 6 Hodnoty součinitele plastické anizotropie*

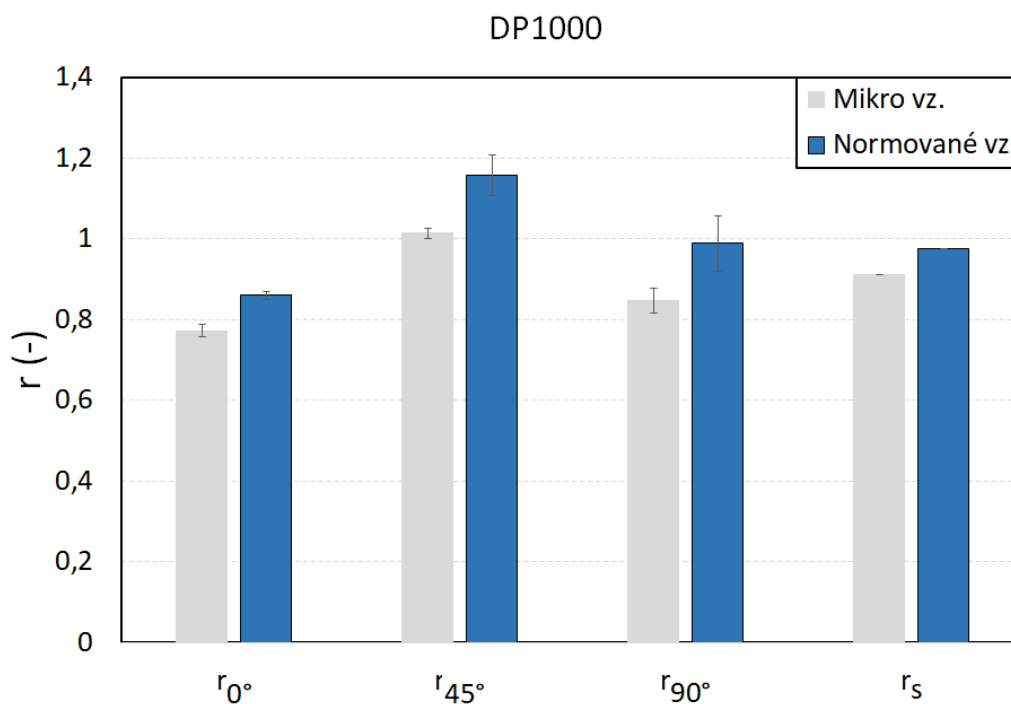
Směrová orientace	DC01	DP1000	Typ vzorku
$r_{0^\circ}$	$2,075 \pm 0,097$	$0,860 \pm 0,010$	Normované
$r_{45^\circ}$	$1,292 \pm 0,083$	$1,158 \pm 0,050$	
$r_{90^\circ}$	$2,043 \pm 0,218$	$0,989 \pm 0,068$	
$r_s$	1,6755	0,976	
$r_{0^\circ}$	$1,759 \pm 0,076$	$0,773 \pm 0,015$	Mikro
$r_{45^\circ}$	$1,287 \pm 0,104$	$1,014 \pm 0,013$	
$r_{90^\circ}$	$1,544 \pm 0,032$	$0,847 \pm 0,031$	
$r_s$	1,469	0,912	

V *Tabulce 6* jsou uvedené hodnoty  $r$  stanovené v oblasti homogenní plastické deformace.

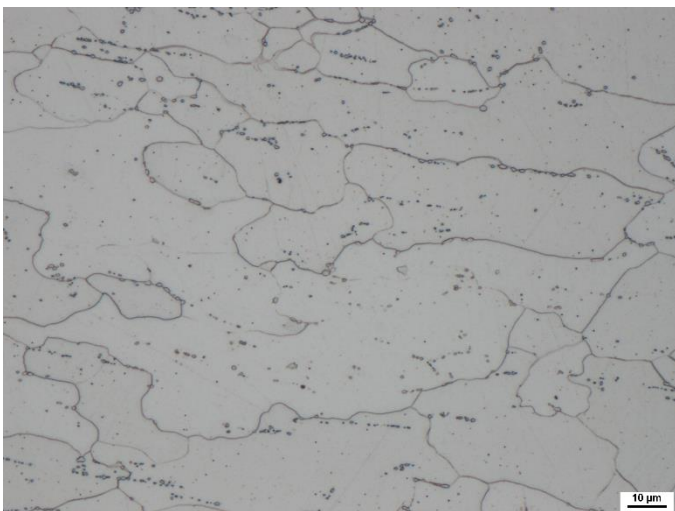
Obr. 18 a 19 ukazují průměrné hodnoty součinitele plastické anizotropie a rozdíly mezi vzorky normovaných a mikro velikostí. Směrodatné odchytky jednotlivých měření jsou znázorněny chybovými úsečkami.



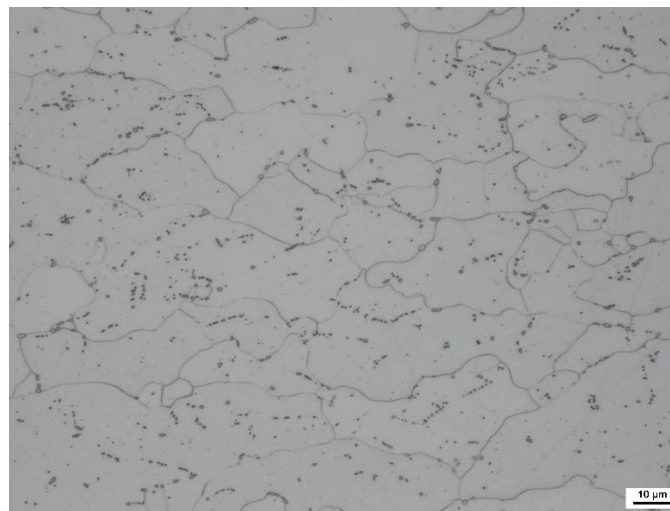
Obr. 18 Hodnoty součinitele plastické anizotropie pro materiál DC01



Obr. 19 Hodnoty součinitele plastické anizotropie pro materiál DP1000



A,



B,



C,



D,

Obr. 20 Metalografické výbrusy při 500x zvětšení z materiálu: A, DC01 v podélném směru; B, DC01 v příčném směru; C, DP1000 v podélném směru; D, DP1000 v příčném směru



Z *Obr. 20* lze vidět, že plech z materiálu DC01 vykazuje dle očekávání feritickou strukturu, je zde patrný i předpokládaný rozdíl mezi příčným a podélným směrem. Ve struktuře jsou přítomny drobné vměstky. Struktura DP1000 je dle předpokladu výrazně jemnější než struktura oceli DC01 a při zvětšení 500x je identifikace jednotlivých strukturních složek obtížná. Proto je na *Obr. 21* uvedené porovnání příčného a podélného řezu oceli DP1000 při 1000násobném zvětšení. Nicméně i při tomto zvětšení je struktura velmi jemná, přesto lze identifikovat světlé části jako oblasti feritu. V tmavých oblastech jsou patrné velmi jemné jehlice martenzitu. Pro podrobnější analýzu této struktury by bylo vhodné například doplnit měření mikrotvrdomosti feritických a martenzitických oblastí, případně analýzu při větším zvětšení na řádkovacím elektronovém mikroskopu.



A,



B,

*Obr. 21* Metalografické výbrusu při zvětšení 1000x z materiálu DP1000 v: A, podélném směru; B, příčném směru



## 5. Závěry

Bylo provedeno stanovení součinitele plastické anizotropie pro uhlíkovou ocel DC01 a mikrolegovanou ocel DP1000. Byly použity normované a mikrovzorky. Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat:

1. Oba materiály vykazují nevýraznou mez kluzu.
2. Dle očekávání DC01 v porovnání s DP1000 vykazuje nižší pevnostní charakteristiky a vyšší tažnost.
3. Obě sledované oceli se výsledky zkoušky tahem v závislosti na směrové orientaci vzorku výrazně neliší.
4. Hodnoty součinitelé plastické anizotropie jsou dle očekávání vyšší u oceli DC01
5. Pro materiál DC01 je součinitel plastické anizotropie u mikrovzorků nižší o 6 % než u vzorků normované velikosti. U materiálu DP1000 je tento rozdíl 12 %.
6. Rozdíly jednotlivých hodnot součinitele plastické anizotropie se pohybují okolo 24 % pro materiál DC01 a okolo 12 % pro materiál DP1000.
7. Použití odlišných vzorků je možné pro vzájemné porovnání chování pevnostních charakteristik sledovaných materiálů. Absolutní hodnoty tažností jsou vyšší pro mikrovzorky přibližně o 25 %, pro oba sledované materiály.
8. Měření tvrdosti je v dobrém souladu s výsledky zkoušky tahem.
9. Byla prokázána vhodnost oceli DC01 pro hluboké tažení.
10. Ocel DC01 vykazuje dle očekávání feritickou strukturu.
11. Struktura DP1000 je výrazně jemnější než struktura DC01, je tvořena feritem a martenzitem.
12. Cíle práce byly splněny.

## 6. Bibliografie

- [1] DVORÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. Vyd. 2. Brno: PC-DIR Real, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1481-2.
- [2] *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie*. Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] ZÍKA, Luboš. *Výroba součástí plošným tvářením* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291323.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
- [4] *Kovové materiály - zkoušení tahem - Část 1: zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [5] *Nedestruktivní hodnocení anizotropie ocelových plechů a pásů magnetoelastickou metodou* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81443/MUC072\\_FS\\_B2341\\_2303R002\\_70\\_2010.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81443/MUC072_FS_B2341_2303R002_70_2010.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Vladislav Ochodek.
- [6] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [7] *Tváření kovů* [online]. [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [9] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Dotisk prvního vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [10] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. 1. vydání. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-718-3054-2.
- [11] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. *Konstruktivní materiály*. 1. vydání. Žilina: Žilinská univerzita, 2000. ISBN 80-7100-608-4.

- [12] *Babca* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [http://babca.cz/content/useruploads/ocelaruv\\_pruvodce\\_2b.pdf](http://babca.cz/content/useruploads/ocelaruv_pruvodce_2b.pdf)
- [13] *SSABlaser* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.ssab.cz/products/brands/ssab-laser/products/ssab-laser-dc03>
- [14] Salzgitter Flachstahl. *Salzgitter Flachstahl* [online]. Salzgitter, 2014 [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/kaltgewalztes\\_feinblech/eng/hc300la.pdf](https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/kaltgewalztes_feinblech/eng/hc300la.pdf)
- [15] HAZ Characterization of Automotive DP Steels by Physical Simulation. *Semanticscholar* [online]. 2019 [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/HAZ-Characterization-of-Automotive-DP-Steels-by-Sumathi-ISODIA/38ccd5be57e20b37662e11d01e7f451b81477a29/figure/1>
- [16] FRODLOVÁ, Barbora, Radek ČADA a Jakub MACHÁLEK. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru dynaform* [online]. In: . Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2012, s. 133 [cit. 2019-12-18]. ISBN 978-80-248-2714-8.
- [17] *Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [18] Docol® 1000DP. *DOCOL* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/docol/products/docol-1000dp>
- [19] Continuous annealing lines. *Andritz* [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.andritz.com/products-en/group/metals/carbon-steel-annealing-coating/continuous-lines>
- [20] *MCAE* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/aramis-professional/>
- [21] *Matematika.cz* [online]. [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://matematika.cz/prumer>
- [22] *Matematika.cz* [online]. [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://matematika.cz/smerodatna-odchylka>
- [23] *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – část 1: Zkušební metoda*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

- [24] *MODIFIKACE CHARPYHO KLADIVA A METODIKA MĚŘENÍ* [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63657/F2-DP-2015-Nikodym-Lukas-Nikodym-Diplomova\\_prace\\_final.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63657/F2-DP-2015-Nikodym-Lukas-Nikodym-Diplomova_prace_final.pdf?sequence=-1).  
Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.

## Seznam obrázků, tabulek a příloh

Obr. 1 Rozmístění vzorků měření anizotropie a rozdíl mezi normálovou anizotropií a součinitelem plastické anizotropie [3] .....	14
Obr. 2 Vztah mezi skutečnou plastickou deformací šířky a délky [2] .....	16
Obr. 3 Pracovní tahový diagram pro měkkou a tvrdou ocel [6],.....	18
Obr. 4 Závislost mechanických vlastností materiálu na velikosti deformace [10].....	20
Obr. 5 Tahový diagram pro: 1 - nelegovanou ocel; 2 - mikrolegovaná svařitelná ocel s vyšší mezí kluzu; 3 – dvoufázová feriticko-martenzitická ocel [11], upraveno pro účely BP .....	21
Obr. 6 Rozměry a geometrie vzorků pro zkoušku tahem; A, Normovaný vzorek ve směru 0°; B, Normovaný vzorek ve směru 45°; C, Normovaný vzorek ve směru 90°; D, Mikrovzorek.....	26
Obr. 7 Univerzální trhací stroj, měřící systémy .....	27
Obr. 8 Elektromechanický stroj pro mikrovzorky, měřící systém .....	27
Obr. 9 Vzorek pro zkoušku tahem. A, strana s patternem; B, strana s vyznačením $L_0$ .....	28
Obr. 10 Příklad metody DIC na mikrovzorku.....	29
Obr. 11 Vybrané vzorky s provedenými zkouškami tvrdosti.....	30
Obr. 12 Plechy pro metalografickou analýzu .....	31
Obr. 13 Připravené vzorky k naleptání.....	32
Obr. 14 Smluvní tahové diagramy pro normované vzorky z materiálu DC01.....	33
Obr. 15 Smluvní tahové diagramy pro normované vzorky z materiálu DP1000.....	33
Obr. 16 Smluvní tahové diagramy mikrovzorků pro materiál DC01 .....	34
Obr. 17 Smluvní tahové diagramy mikrovzorků pro materiál DP1000 .....	34
Obr. 18 Hodnoty součinitele plastické anizotropie pro materiál DC01 .....	38
Obr. 19 Hodnoty součinitele plastické anizotropie pro materiál DP1000 .....	38
Obr. 20 Metalografické výbrusy při 500x zvětšení z materiálu: A, DC01 v podélném směru; B, DC01 v příčném směru; C, DP1000 v podélném směru; D, DP1000 v příčném směru .....	39
Obr. 21 Metalografické výbrusu při zvětšení 1000x z materiálu DP1000 v: A, podélném směru; B, příčném směru .....	40

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti vybraných ocelí pro plechy válcované za studena. ....	22
Tabulka 2 Chemické složení vybraných ocelí pro plechy válcované za studena.....	22
Tabulka 3 značení ocelí pro ploché vzorky k tváření za studena [18] .....	23
Tabulka 4 Plánovaný rozsah tahových zkoušek .....	25
Tabulka 5 Výsledky zkoušek tahem.....	35
Tabulka 6 Hodnoty součinitele plastické anizotropie .....	37
Tabulka 7 Výsledky tahových zkoušek .....	47
Tabulka 8 Hodnoty součinitele plastické anizotropie .....	49
Tabulka 9 Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse.....	48

## Přílohy:

Tabulka 7 Výsledky tahových zkoušek

Směrová orientace	DC01			DP1000			Typ vzorku	
	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]		
0°_1	184,9	294,7	42,2	740,5	994,1	13,0	Normované	
0°_2	187,5	299,6	43,0	747,9	1001,3	13,0		
0°_3	185,3	296,9	40,9	735,7	996,6	13,5		
Průměr	186 ± 1	297 ± 3	42 ± 1	741 ± 6	997 ± 4	13 ± 0		
45°_1	186,5	306,6	39,1	714,6	978,6	12,5		
45°_2	189,2	307,7	41,3	697,3	979,8	13,0		
45°_3	188,4	308,8	40,1	698,9	980,8	13,1		
Průměr	188 ± 1	308 ± 1	40 ± 1	704 ± 10	980 ± 1	13 ± 0		
90°_1	171,0	291,9	45,2	688,5	1002,7	12,4		
90°_2	170,1	291,3	46,0	691,3	1000,5	12,0		
90°_3	181,9	292,3	46,0	689,7	999,7	12,7		
Průměr;r	174 ± 7	292 ± 1	46 ± 1	690 ± 1	1001 ± 2	12 ± 0		
0°_1	182,4	294,8	55,3	745,2	980,5	18,8		Mikro
0°_2	200,0	292,8	55,5	735,5	987,1	19,8		
0°_3	179,2	294,5	54,3	736,1	983,3	19,5		
Průměr	187 ± 11	294 ± 1	55 ± 1	739 ± 6	984 ± 3	19 ± 1		
45°_1	194,9	304,7	51,9	688,4	967,1	20,3		
45°_2	188,6	297,0	51,5	687,6	959,3	20,9		
45°_3	188,8	301,6	51,6	709,9	970,3	21,2		
Průměr	191 ± 4	301 ± 4	52 ± 0	695 ± 13	966 ± 6	21 ± 1		
90°_1	178,4	301,5	55,3	699,5	991,5	16,9		
90°_2	201,0	304,1	54,1	690,8	990,6	17,7		
90°_3	183,3	301,1	54,3	673,7	989,6	17,1		
Průměr	188 ± 12	302 ± 2	55 ± 1	688 ± 13	991 ± 1	17 ± 0		

Tabulka 8 Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse

Měření	Tvrdost (HV30)	
	DC01	DP1000
1.	94	315
2.	94	310
3.	95	308
4.	96	314
5.	98	317
Aritm. průměr	95	313
Směrodatná odchylka	1,5	3,3



Tabulka 9 Hodnoty součinitele plastické anizotropie

	DC01			DP1000			Typ vzorku	
	Oblast, kde je součinitel plastické anizotropie vyhodnocován			Oblast, kde je součinitel plastické anizotropie vyhodnocován				
	2-5 %	2-3 %	2-A <sub>g</sub> * %	2-5 %	2-3 %	2-A <sub>g</sub> * %		
0°_1	2,123	2,253	1,915	0,914	1,010	0,869	Normované	
0°_2	2,262	2,470	1,976	0,893	0,962	0,855		
0°_3	2,696	3,266	2,169	0,902	0,989	0,847		
Průměr	2,360 ±0,300	2,663 ±0,533	<b>2,075</b> ±0,097	0,903 ±0,011	0,987 ±0,025	<b>0,860</b> ±0,010		
45°_1	1,606	1,748	1,386	1,138	1,212	1,112		
45°_2	1,439	1,541	1,255	1,207	1,362	1,149		
45°_3	1,421	1,523	1,234	1,281	1,429	1,212		
Průměr	1,489 ±0,102	1,604 ±0,125	<b>1,292</b> ±0,083	1,209 ±0,072	1,334 ±0,111	<b>1,158</b> ±0,050		
90°_1	2,054	2,172	1,791	0,998	1,108	0,950		
90°_2	2,824	3,483	2,184	1,119	1,244	1,068		
<del>**90°_3</del>	<del>7,326</del>	<del>-15,820</del>	<del>2,153</del>	<del>0,999</del>	<del>1,074</del>	<del>0,950</del>		
Průměr	2,519 ±0,410	2,868 ±0,660	<b>2,043</b> ±0,218	1,039 ±0,070	1,142 ±0,090	<b>0,989</b> ±0,068		
0°_1	1,923	1,946	1,802	0,799	0,815	0,790		Mikro
0°_2	2,053	2,083	1,803	0,794	0,779	0,764		
0°_3	1,774	1,846	1,671	0,862	0,808	0,765		
Průměr	1,917 ±0,140	1,959 ±0,119	<b>1,759</b> ±0,076	0,818 ±0,038	0,800 ±0,019	<b>0,773</b> ±0,015		
45°_1	1,402	1,355	1,169	1,017	1,014	1,030		
45°_2	1,565	1,563	1,330	1,0150	0,992	1,008		
45°_3	1,5335	1,495	1,363	1,011	1,002	1,005		
Průměr	1,500 ±0,86	1,471 ±0,106	<b>1,287</b> ±0,104	1,014 ±0,003	1,003 ±0,011	<b>1,014</b> ±0,013		
90°_1	1,880	1,876	1,537	0,862	0,889	0,874		
90°_2	1,870	1,824	1,578	0,830	0,869	0,854		
90°_3	1,664	1,720	1,516	0,880	0,857	0,813		
Průměr	1,805 ±0,122	1,807 ±0,080	<b>1,544</b> ±0,032	0,857 ±0,025	0,871 ±0,016	<b>0,847</b> ±0,031		

\*A<sub>g</sub> = plastické prodloužení při největším zatížení

\*\*Hodnoty nebyly započítány do celkových výsledků.