



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PĚCHOVACÍ ZKOUŠKA A JEJÍ VÝZNAM PRO PRAXI

UPSETTING TEST AND ITS IMPORTANCE FOR PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTINA ZAPLETALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Martina Zapletalová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Pěchovací zkouška a její význam pro praxi**

v anglickém jazyce:

### **Upsetting test and its importance for practice**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pěchovací zkouška je jednou ze základních metod sloužících ke zjišťování mechanických vlastností materiálů. Experiment spočívá především v záznamu a vyhodnocení průběhu tvářecí síly a dráhy. Současným řešením je zastaralá metodika měření, kdy jsou data zaznamenávána na souřadnicovém zapisovači. Cílem práce je použít moderní způsob zpracování přes PC a prostřednictvím software fy.Dewesoft a měřících karet vytvořit ovládací a vyhodnocovací rozhraní a ověřit jeho funkčnost.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na pěchovací zkoušky materiálů. Součástí práce bude i praktické měření na lisu CZR 600 prostřednictvím měřícího modulu fy. Dewetron, které bude srovnáno s klasickým postupem a prokáže správnost vyhodnocení pomocí software.

Seznam odborné literatury:

1. PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.
2. FOREJT, Milan. Teorie tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
3. SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno: VA, 1988. 88 s.
4. MARCINIAK, Zdislaw, J.L. DUNCAN and S.J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.
5. PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvařitelnost kovových materiálů [online]. 3 Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006 , poslední aktualizace 9.1.2007 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TvCELEupr.pdf>>.
6. ELFMARK, Jiří, et al. Tváření kovů. Ing.Pavel Vávra. 1. vyd. Praha: SNTL Praha 1992. 542 s. ISBN 80-03-00651-1.
7. FOREJT, M, A. HUMÁR, M. PÍŠKA a L. JANÍČEK. Experimentální metody [online]. Brno. 2003 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_\\_cviceni\\_\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf)>.
8. MORRIS, Alan S. Measurement and instrumentation principles. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, 475 p. ISBN 0750650818.
9. ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 5.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

ZAPLETALOVÁ Martina: Pěchovací zkouška a její význam pro praxi.

---

Studie byla zaměřena na ověření správnosti vyhodnocení pěchovacích zkoušek. Experimenty probíhaly na válcových vzorcích z oceli 16 231.3 opatřených pevným mazivem Delta 144. Srovnávaly se výstupní hodnoty, které byly zaznamenány klasickým způsobem pomocí liniového zapisovače a zesilovače na lisu CZR 600, s výsledky zpracované měřicím modulem a programem fy.Dewesoft. Pro následné ověření výsledků se pěchovala poslední skupina vzorků v univerzálním stroji ZD 40, který byl napojen na řídicí jednotku a data zpracovával program M-TEST. Z vykreslených pracovních průběhů a křivek přetvárných odporů lze usoudit, že liniový zapisovač a zesilovač se dá efektivně inovovat měřicím modulem a programem.

Klíčová slova: Pěchovací zkoušky, ocel 16 231.3, Delta 144, lis CZR 600, Dewesoft, ZD 40

## **ABSTRACT**

ZAPLETALOVÁ Martina: Upsetting test and its importance for practice.

---

This thesis was aimed at verifying the accuracy of the evaluation of upsetting test. Experiments were carried out on cylindrical samples of steel 16 231.3 with solid lubricant Delta 144. Comparing the output values that were recorded classical way through the liner recorder and amplifier at press CZR 600. The Results have been processed using measuring module and program made by company Dewesoft. Last trio of samples was tested by upsetting test in a universal machine ZD 40, which was connected to the control unit and the data was processed by M-TEST program. From the plotted working curves and curves deformational resistance can be concluded that a liner recorder and amplifier can be effectively innovated by measuring module and by program.

Keywords: Upsetting tests, steel 16 231.3, Delta 144, press CZR 600, Dewesoft, ZD 40

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZAPLETALOVÁ, Martina. *Pěchovací zkouška a její význam pro praxi*. Brno, 2015. 41s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 27. 5. 2015

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za trpělivost, cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a panu Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při vykonání experimentu. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	10
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	11
<b>2 TEORIE PĚCHOVÁNÍ</b> .....	13
<b>2.1 Odpor v tvářecím procesu</b> .....	16
<b>2.2 Teoretická řešení</b> .....	18
2.2.1 Řešení podle Siebla .....	18
2.2.2 Řešení podle Unskova.....	19
<b>2.3 Maziva</b> .....	20
<b>2.4 Druhy zkušebních těles</b> .....	21
<b>2.5 Zaznamenávání hodnot</b> .....	22
2.5.1 Snímání síly.....	22
2.5.2 Snímání dráhy .....	25
2.5.3 Snímání teploty .....	26
<b>3 EXPERIMENT</b> .....	27
<b>3.1 Lis CZR 600 a zapisovač</b> .....	28
<b>3.2 Lis CZR 600 a program</b> .....	32
<b>3.3 Zkušební stroj ZD 40</b> .....	36
<b>3.4 Porovnání výsledků</b> .....	39
<b>ZÁVĚRY</b> .....	41
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratek	
Seznam obrázků a tabulek	

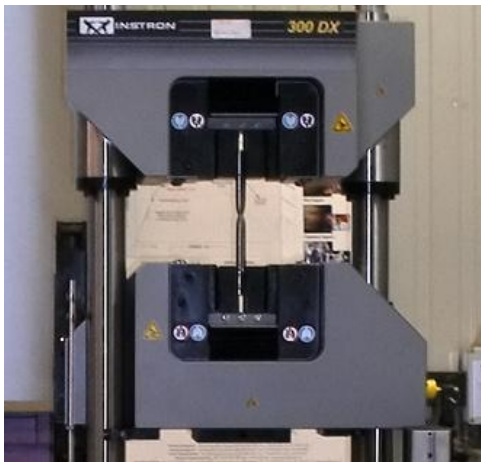


## ÚVOD [1], [5], [9], [18], [32], [33]

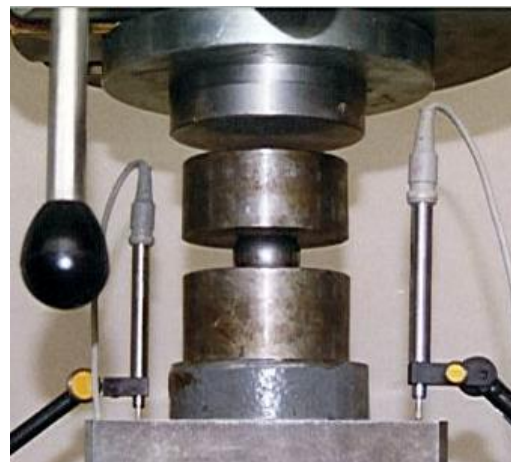
Pro správné a hospodárné využití technických materiálů je zapotřebí znát fyzikální, chemické a pro strojírenství nejdůležitější mechanické vlastnosti. Některé vlastnosti vyjadřují odpor proti deformaci (mez kluzu, mez tečení, tvrdost atd.), jiné vyjadřují deformační schopnost (tažnost, kontrakce atd.). Kromě toho je potřeba znát specifické chování v tvářecím procesu. Zejména se jedná o pružnost, tvárnost, pevnost a houževnatost. Podle potřeby je volen buďto materiál pevný, pro svoji odolnost proti trvalému porušení nebo houževnatý, který je odolný vůči vzniku deformace a porušení.

Ke zjišťování materiálových charakteristik slouží mechanické zkoušky:

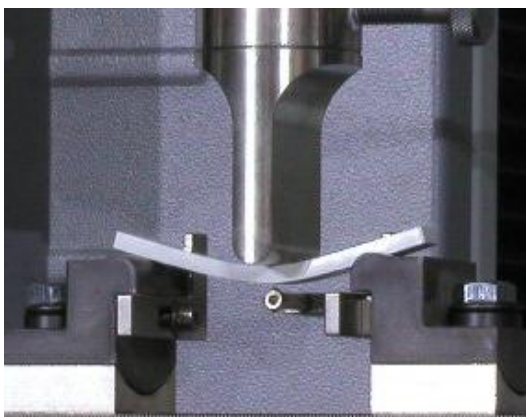
- Statické – jsou uskutečňovány působením klidného rovnoměrného zatížení na zkušební těleso. Základem jsou zkoušky pevnosti, které lze dále dělit podle zatěžující síly na zkoušky v tahu (obr. 1), tlaku – pěchovací zkouška (obr. 2), ohybu (obr. 3), krutu (obr. 4) a stříhu. Provádět je lze na jednoúčelovém nebo univerzálním stroji. Tlaková (pěchovací) zkouška je v současné době jedna z nejrozšířenějších statických zkoušek, provádí se na zkušebních vzorcích za tepla nebo za studena.
- Dynamické – zde síla působí nárazově po zlomek sekundy. Při tzv. únavových zkouškách se cyklicky mění zatížení i mnohokrát za sekundu. Patří sem zkouška rázem v ohybu a zkouška opětovným namáháním (únavová zkouška materiálu).



Obr. 1 Tahová zkouška [5]



Obr. 2 Tlaková zkouška [18]



Obr. 3 Ohybová zkouška [33]

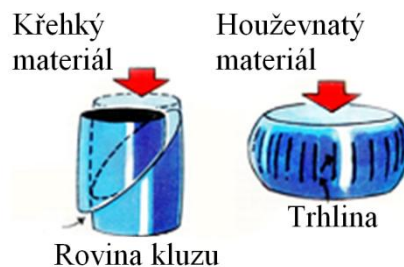


Obr. 4 Zkouška krutem [1]

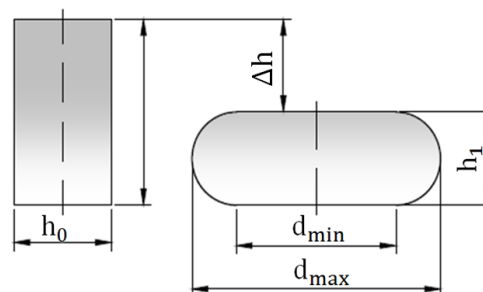
# 1 ROZBOR ZADÁNÍ [6], [12], [13], [14], [15], [22], [37], [38], [40]

Pro zjišťování přetvárného odporu, tvárných a mechanických vlastností v tlaku slouží tlakové zkoušky. Jedná se o běžné zkoušky, kde dochází k nevratné deformaci nebo porušení testovaného materiálu.

Provádí se na zkušebních vzorcích a jsou založeny na principu zmenšování výšky polotovaru a zvětšování příčného průřezu. Při samotném procesu nepůsobí zatížení na boční strany vzorku, což se projevuje jako tvarová změna nazývaná soudečkovitost. Zvětšování šířky se děje díky působení svislé postupně vzrůstající síly, kterou vyvozuje například lis. Proces je ukončen při vzniku prvního povrchového defektu, jako je prasklina (obr. 5). Při této variantě je možné zjistit charakteristiky materiálu, jako je mez pevnosti a přetvoření. Dalším možným ukončením je dosažení požadované hodnoty, buďto stlačením vzorku na danou výšku o  $\Delta h$  (obr. 6) nebo dosažením určité logaritmické deformace. Při této variantě jsou určovány materiálové vlastnosti. Pokud vzorek vydrží dané zatížení, je tvařitelný, pokud ne, není vhodný pro tvářecí procesy.

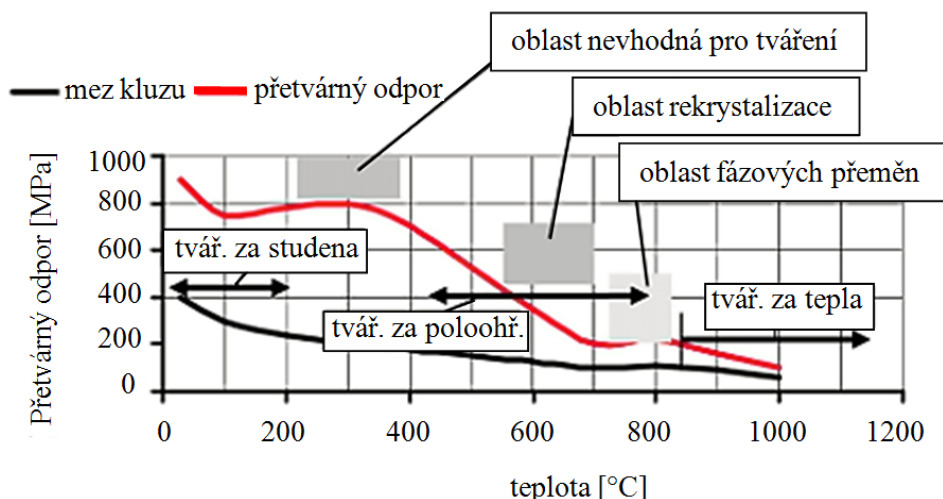


Obr. 5 Vznik praskliny [40]



Obr. 6 Vzorek před a po skončení pēchovací zkoušky [13]

Jelikož průběh zkoušky a chování materiálu ve značné míře ovlivňuje teplota, lze zkoušky provádět za studena, tepla nebo poloohřevu. Při pēchování za studena není překročena teplota rekrystalizace. U pēchování za tepla materiál překročí teplotu rekrystalizace a je ohřát nad teplotu 800 °C a výše. Poslední možností je pēchování za poloohřevu, kde se interval teplot pohybuje v oblasti rekrystalizace (400 – 800 °C). Vhodné tvářecí oblasti pro ocel jsou znázorněny na obrázku 7. Jedná se o obecnou závislost, protože skutečné průběhy meze kluzu a přetvárného odporu jsou ovlivněny druhem oceli.

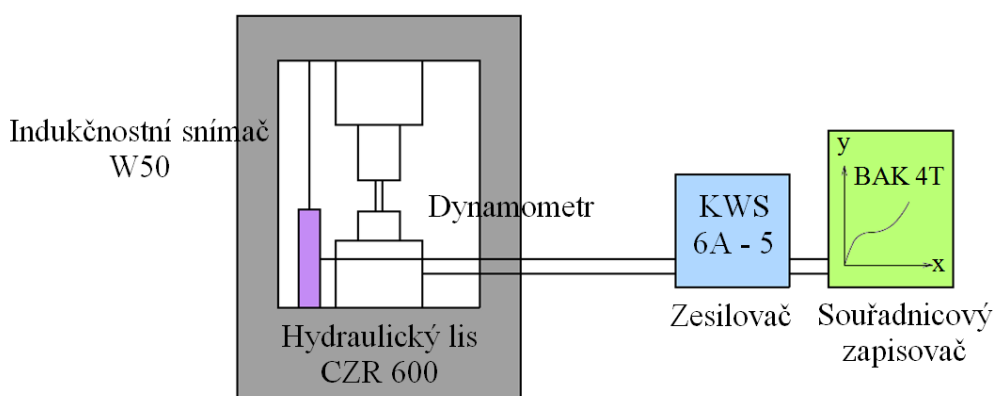


Obr. 7 Zjednodušená závislost mechanických vlastností na teplotě [38]

Z grafu je patrné, že při vyšších teplotách klesá přetvárný odpor, což má za následek vznik oblasti, která je vhodná pro tváření. Tváření za tepla se také vyznačuje nižší mezí kluzu, která způsobuje lepší tvárnost. Při tváření za studena se kovy zpevňují a zlepšují se jejich vlastnosti, jako je pevnost v tahu a tvrdost.

Výsledkem pýchovacích zkoušek je pracovní diagram, vyjadřující závislost síly na dráze. K vyhodnocení a pro tvorbu pracovního diagramu jsou nezbytně nutné měřící zařízení, které musí být připojeny k lisu. Jedná se o snímače tlakové síly, tzv. dynamometry, dále snímače pro měření dráhy a teploty. Podstatné jsou také zapisovače a zesilovače.

Na fakultě strojního inženýrství v Brně se nachází v lisovně lis CZR 600. V současné době zde funguje systém zaznamenávání a vyhodnocování pomocí liniového zapisovače (obr. 8) na milimetrový papír. Tento způsob je již poněkud zastaralý a je zapotřebí ho inovovat. Nevýhody klasického způsobu vyhodnocování pýchovací zkoušky pomocí liniového zapisovače mohou být například: špatný odečet hodnot, nepřesná kalibrace, omezená pracovní plocha a ruční nastavování. Za výhody může být považována například jednodušší manipulace a seřízení.



Obr. 8 Schéma aktuálního zapojení [15]

K obnově byl zakoupen měřící modul (obr. 9) a software. Firmy, které se v současné době zabývají tlakovými zkouškami, vlastní veškerou moderní techniku umožňující jednodušší a praktičtější vyhodnocení dat. Dá se říct, že je tento proces na vysoké automatické úrovni. Vyhodnocení a zaznamenávání probíhá pomocí počítačových karet, elektronických měřících modulů, zesilovače a softwaru, které zpracují naměřená data. Přesto se i u tohoto způsobu vyhodnocování lze setkat s řadou nevýhod, například složitější manipulace a seřízení. Je nutné seznámení se softwarem a správné zapojení měřících modulů a karet.



Obr. 9 Měřící modul [6]

Tato studie se bude zabývat vyhodnocováním pýchovacích zkoušek moderním způsobem. Praktická část má ověřit, že nové zaznamenávání hodnot pomocí zakoupeného softwaru a zesilovače od firmy Dewetron bude stejně spolehlivé, jako ze zapisovače. Budou se porovnávat hodnoty, které byly vyhotoveny osvědčeným způsobem na trhacím hydraulickém zkušebním stroji, dále hodnoty získané klasickým postupem a hodnoty, které byly vyhotoveny pomocí zakoupeného softwaru. Tímto problémem se bude zabývat praktická část a výsledek odpoví na otázku, zda se liniový zapisovač dá efektivně nahradit zakoupeným zařízením.

## 2 TEORIE PĚCHOVÁNÍ [3], [8], [10], [12], [13], [16], [17], [26], [28], [35], [42]

Pěchovací zkouška je běžně používána ke zjišťování plastických vlastností kovů a získání křivek zpevnění. Hlavním důvodem použití jsou vzniklá napětí v pěchovaném tělese, která se shodují s napětím při skutečném technologickém zpracování (kování, lisování a válcování).

Samotné pěchování je rozděleno na tři fáze, které znázorňuje pracovní diagram (obr. 10). První fáze se vyznačuje lineárně narůstající silou, která vzorek viditelně nedeformuje. V této chvíli vznikají tlakové kužely (obr. 11). Do zlomového bodu 'U' se materiál chová pružně, po jeho překročení nastává trvalá deformace a dochází k mírnému poklesu tlakové síly. Při druhé fázi tvar vzorku charakterizuje již zmíněná soudečkovitost. V třetí fázi se tlakové kužely protínají. Na rozdíl od předchozích úseků odpovídá zvětšení tlakové síly relativně malému zmenšení výšky vzorku. To platí pro houževnatý materiál. Křehké materiály jsou zde rozdrceny.

Obecně se plastická deformace tělesa ve směru souřadných os vyjadřuje pomocí normálových nebo také hlavních složek logaritmických deformací. Ze zákona o konstantním objemu vyplývá, že součet deformace ve třech normálových (souřadných) nebo hlavních směrech je rovna nule:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.1)$$

Logaritmická deformace pro pěchovací operace se vypočte z poměru konečné a počáteční výšky vzorku:

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde:  $h_1, h_0$  je konečná a počáteční výška vzorku [mm]

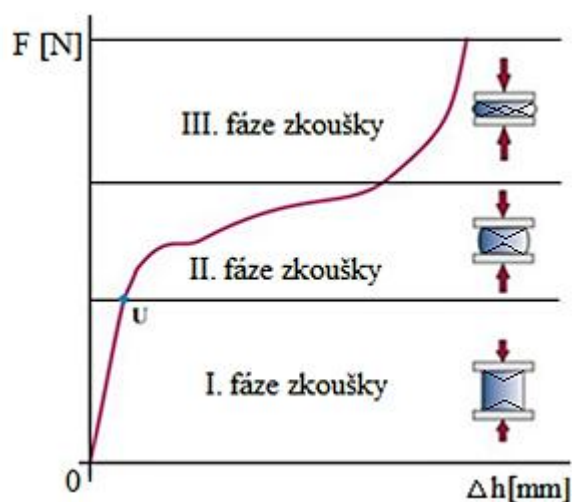
Pokud poměr výšek není jednoznačný, lze vztah odvodit pomocí průřezů. Jedná-li se o válcové těleso, lze vzorec dále upravit na kvadráty počátečního a konečného průměru válečku:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad [-] \quad (2.3)$$

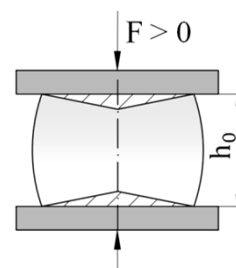
kde:  $S_0, S_1$  je počáteční a konečný průřez vzorku [mm<sup>2</sup>]  
 $d_0, d_1$  je počáteční a konečný průměr vzorku [mm]

Výpočet poměrného přetvoření (deformace) se vyjádří pomocí vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad [-] \quad (2.4)$$

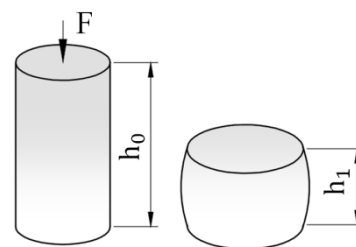


Obr. 10 Pracovní diagram [42]



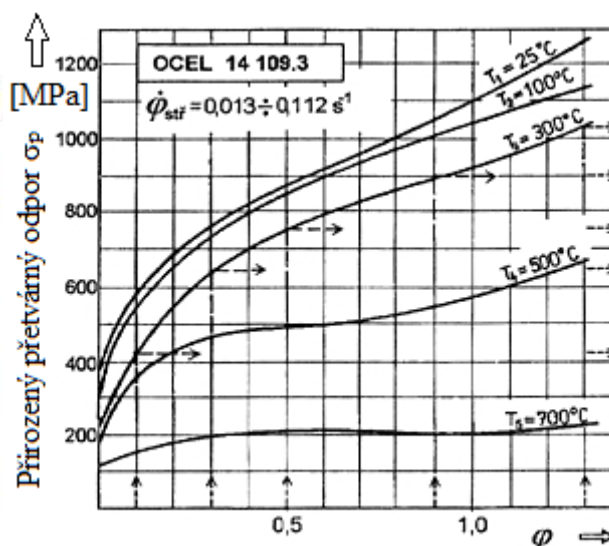
Obr. 11 Tlakové kužely [16]

Při pěchování válcového tělesa se vzorek deformuje podle trojosé napjatosti. Velikost deformace závisí na velikosti působící síly. Aby byla dodržena přesná soudečkovitost, musí se materiál deformovat rovnoměrně. U válcových vzorků se doporučuje dodržovat poměr výšky k průměru v intervalu (1,5 ÷ 2,5), jinak může dojít ke ztrátě vzpěrné stability, což zapříčiní vznik nežádoucích přeložek. Poměr počáteční výšky a zpěchované výšky válečku je součinitel pěchování (obr. 12), což je také ukazatel kovatelnosti.



Obr. 12 Poměr výšek válcového vzorku [26]

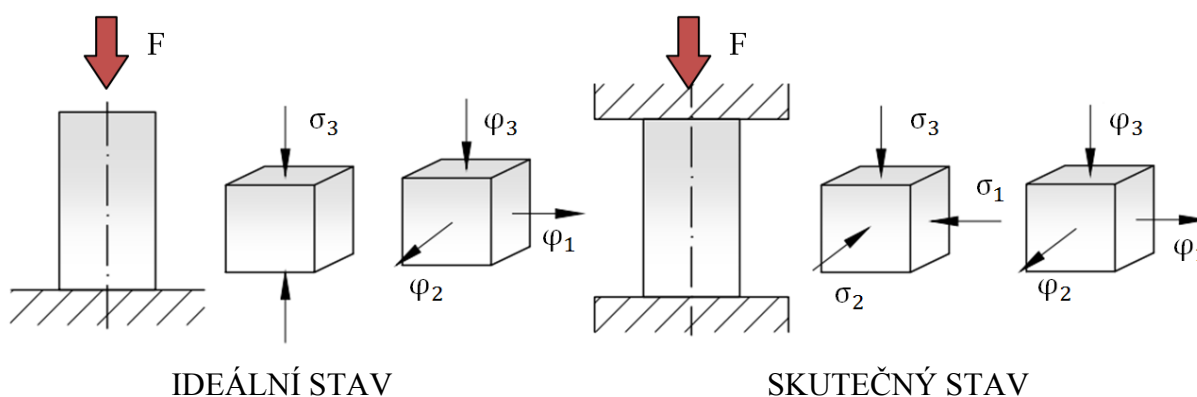
K vypočtené logaritmické deformaci se následně přiřadí odpovídající zpevnění. Křivky přetvárných odporů ocelí případně jiných materiálů, slouží k posouzení mechanických vlastností a tvárnosti. Podle vypočtené logaritmické deformace  $\varphi'$ , lze určit přirozený přetvárný odpor  $\sigma_p$  (obr. 13), což je jedna z požadovaných vlastností.



Obr. 13 Křivky zpevnění pro ocel 14 109.3 [12]

Přetvárné odpory a deformace jsou při tvářecím procesu značně ovlivněny třením. Jedná se o relativní odpor proti pohybu na kontaktní ploše. V soustavě polotovar – nástroj vzniká tření, které ovlivní velikost deformace, napjatosti a také má za následek ztráty výkonu stroje. Při použití správné tvářené součásti, materiálu a dokončovací technologie funkčních ploch nástrojů dojde k úspoře energie.

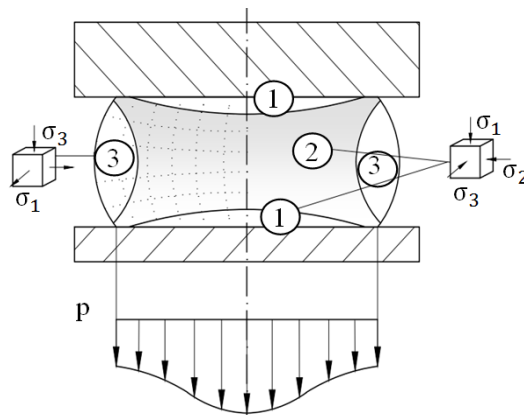
Tlakovou zkoušku lze rozdělit na dva stavy (obr. 14). První stav zanedbává tření, čímž vytváří ideální schéma napětí. Tento stav se využívá pouze jako vzorový, protože v praxi není použitelný. Druhý stav tření uvažuje a tím vzniká trojosá napjatost a prostorový stav deformace.



Obr. 14 Schémata napětí a deformace při pěchovací zkoušce [12]

Při skutečném stavu vnější zatížení vyvolává uvnitř tvářeného objemu prostorový stav napjatosti, který se podél průřezu mění. Díky tomu vzniká složitý mechanismus přetvoření, který je znázorněn na obrázku 15. Změna vnějšího obrysu (soudečkovitost) je způsobena nehomogenní deformací ve vnitřních oblastech. Z obrázku 15 lze rozeznat tři oblasti:

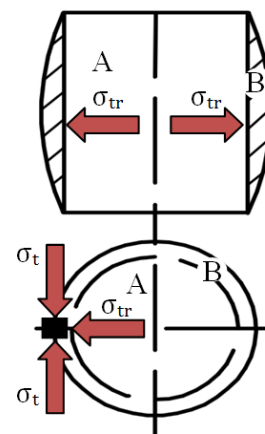
- Oblasti 1 – kov přiléhá k čelům nástroje a prostor lze charakterizovat malou deformací, která je způsobena třecími silami. Třecí síly působí na plochy kovadel a způsobují všestranný tlak. Oblasti jsou také nazývány jako zabrzděná pásma.
- Oblasti 2 – mezi oblastmi 1 vzniká oblast 2. Zde je nejintenzivnější deformace v kolmém a osové směru vzorku. Jedná se o směry nejnepříhodnější pro kluz. Kov na hranici oblasti 2 obtéká krajní oblast 1 ve směru k čelům nástroje. Tento proces vyvolává tahová napětí.
- Oblasti 3 – objem se deformuje s postupujícím rozšiřováním obvodu. Deformace probíhá jako nerovnoměrná, což lze pozorovat i na deformaci mřížky, viz levá polovina obrázku 15 a na rozložení měrného tlaku v dolní části obrázku.



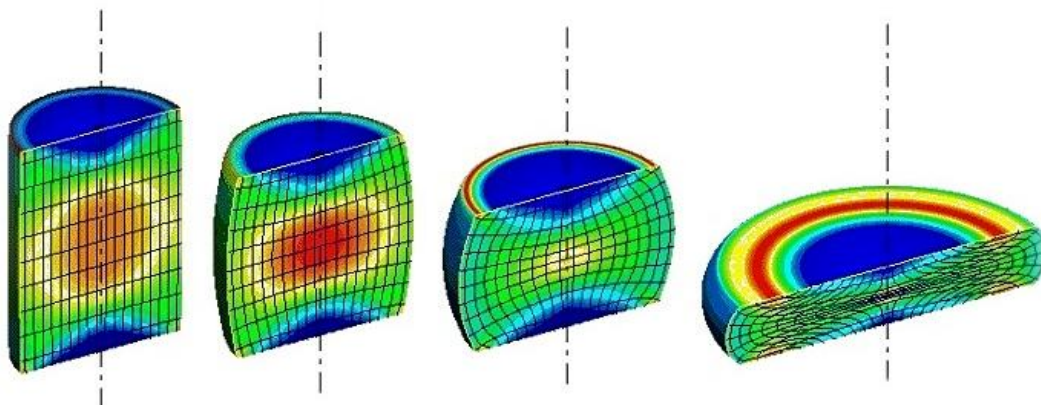
Obr. 15 Pěchování válce – schéma napětí [35]

Nehomogenita deformací vyvolává nahromadění přídavných napětí, která mění základní schéma stavu napjatosti až do takové míry, že v některých oblastech se mohou vyskytovat napětí tahová. Tento jev dále napomáhá rozvoji tzv. soudečkovitosti. V tělese vznikají dvě zóny (obr. 16). Vnitřní zóna 'A' (oblasti 1 a 2), která má tvar válce a vnější 'B' (oblast 3) ve tvaru prstence. Vnitřní válcová zóna se během pěchování snaží změnit do tvaru soudečku, tím působí na vnější tvar a vyvolává v něm tahová napětí  $\sigma_t$ . Vnější trubkovitá zóna je pod účinkem vnitřního tlaku ' $\sigma_{tr}$ '.

Tahové napětí při pěchování může v určitých případech dosáhnout velké hodnoty, a tak vyvolat v povrchu válce trhliny. Na vznik podélných trhlin budou mít vliv zejména mechanické vlastnosti tvářeného kovu a velikost stupně deformace. Na obrázku 17 je znázorněné rozložení napětí a vznik soudečkovitosti postupně pěchovaného vzorku.



Obr. 16 Pěchování válce, vznik oblastí [28]



Obr. 17 Rozložení napětí při pěchování vzorku s rovnými čely [17]

## 2.1 Odpor v tvářecím procesu [3], [12], [28]

Odpor v tváření se skládají ze základních přirozených přetvárných odporů z vývoje plastické deformace v samotných kovech a deformačních přetvárných odporů z pohybu kovu v technologickém procesu. Existují také ideální odpory, kde je snaha nejvíce vyloučit tření a rovnoměrné rozložení deformace. Z mechanických hodnot jsou nejdůležitější počáteční a následující napětí, potřebné na přechod kovu z elastické do plastické oblasti. Z pasivních složek jsou to zejména: kontaktní tření, napjatost, rychlost deformace a rozložení napětí.

Aby se v zatíženém tělese v ideálních podmínkách (bez tření) trvale tvořila plastická deformace, musí být začáteční a následné skutečné napětí v tělese vyvolané vnějším zatížením větší, jako charakteristické napětí kovu (přechod z elastické do plastické oblasti). Pro vznik trvalého pohybu v zatíženém tělese ve skutečných podmínkách (se třením), musí být tlak na těleso vyvolaný vnějším zatížením větší, jako výsledný odpor.

Při pěchování a obecně tváření se nástroj pohybuje určitou rychlostí, která je závislá na druhu použitého stroje (tab. 1). Vliv jednotlivých strojů na rychlost přetvoření je znázorněn na obrázku 18. Rychlost deformace lze definovat jako změnu logaritmické deformace za časovou jednotku nebo první derivaci deformace podle času. Jedná se o rychlost, s jakou se k sobě přibližují dva průřezy kovu vzdáleného o jednotku délky, a vypočte se:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_0}{h} \quad [s^{-1}] \quad (2.5)$$

kde:  $v_0$  je okamžitá rychlost pohybu nástroje [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 $h$  je vztažná výška [mm]

Pokud je rychlost pohybu stroje konstantní, lze ji určit následovně:

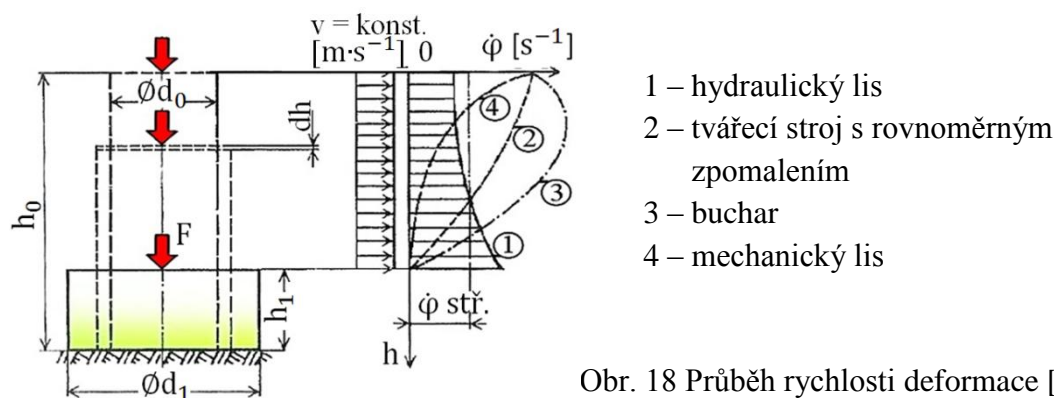
$$v = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} \quad [mm \cdot s^{-1}] \quad (2.6)$$

kde:  $t_1, t_0$  je konečný a počáteční čas [s]

Tab. 1 Rázové rychlosti nástroje u tvářecích strojů [12]

Tvářecí stroj	$v$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$\dot{\varphi}$ [ $s^{-1}$ ]
Hydraulické lisy	0,02 ÷ 0,25	0,01 ÷ 10
Klikové a vřetenové lisy	0,3 ÷ 0,6	4 ÷ 25
Buchary	5 ÷ 8	40 ÷ 160
Vysokorychlostní buchary	20 ÷ 40	200 ÷ 1000

Obecně je rychlost deformace jedna z veličin charakterizující přetvárné odpory, přesněji přirozený přetvárný odpor.



Obr. 18 Průběh rychlosti deformace [12]

Přirozený přetvárný odpor (jinak označován jako základní deformační odpor nebo přetvárná pevnost)  $\sigma_p$  je vnitřní odpor materiálu vůči působení vnějších sil. Vyvolává trvalé změny rozměrů. Je to skutečné napětí, kde podmínkou je jednoosý stav napjatosti, při kterém nastane počátek plastické deformace – přetvoření.

Charakterizuje vlastnosti kovu při daných termomechanických podmínkách:

- chemické složení
- výchozí stav ( $R_e, R_m, \varphi, \varepsilon$ )
- teplota tváření ( $T$ )
- rychlost přetvoření ( $\dot{\varphi}, \dot{\varepsilon}$ )

Zmíněné křivky zpevnění přirozených přetvárných odporů lze získat experimentálně (přechovacími zkouškami) nebo pomocí funkce (matematickou aproximací).

Pro získání okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu je zapotřebí vycházet z objemu vzorku:

$$V = \frac{\pi \cdot d_s^2 \cdot h_i}{4} \quad [\text{mm}^3] \quad (2.7)$$

kde:  $d_s$  je střední průměr vzorku [mm]  
 $h_i$  je okamžitá výška vzorku v místě 'i' [mm]

Ze vzorce (2.7) je vyjádřen střední průměr:

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h_i}} \quad [\text{mm}] \quad (2.8)$$

Ten je následně dosazen do vzorce pro výpočet okamžitého přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_{pi} = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_{si}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (2.9)$$

kde:  $F_i$  je okamžitá síla v místě 'i' [N]  
 $d_{si}$  je okamžitý průměr v místě 'i' [mm]

Deformační přetvárný odpor (jinak označován jako technologický přetvárný odpor nebo přetvárný odpor)  $\sigma_d$  je přirozený přetvárný odpor, zvětšený o vliv technologických pasivních odporů, který při libovolném nehomogenním stavu napjatosti způsobí pohyb kovu (tok). Deformační přetvárný odpor ovlivňuje:

- tření
- změna geometrie – tvaru
- změna teplotních podmínek
- napjatosti a změna nerovnoměrné napjatosti
- lokální změna rychlosti deformace při pohybu kovu

Tyto vlivy lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$\sigma_d = \sigma_p \left( 1 + \frac{\mu_0}{3} \cdot \frac{d}{h} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.10)$$

kde:  $\mu_0$  je materiálová konstanta [-]

Obecně lze tyto vlivy vyjádřit souhrnným součinitelem 'M':

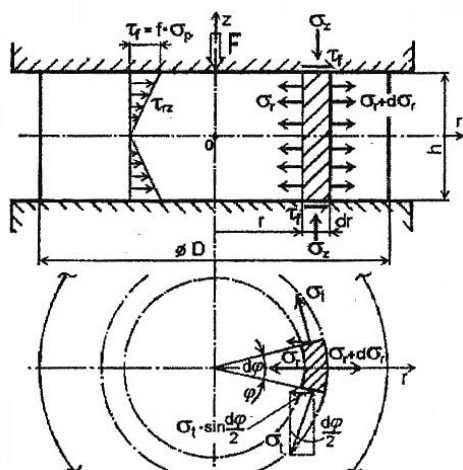
$$\sigma_d = \sigma_d(\sigma_p, M) \quad [\text{MPa}] \quad (2.11)$$

Z deformačního odporu a čelní plochy válcového tělesa lze stanovit tvářecí síla:

$$F_{tvářecí} = \sigma_d \cdot S \quad [\text{N}] \quad (2.12)$$



## 2.2 Teoretická řešení [12], [14]



Problematikou deformačních odporů a průběhů napětí při pýchovacích zkouškách se zabývají přístupy řešení podle Siebla a Unksova. Jedná se o volné pýchování mezi rovnoběžnými rovinami.

Rovinná úloha ve válcových souřadnicích (obr. 19) znázorňuje pýchování válcového tělesa, kdy  $\varnothing d > h$  a je předpokládán rovnoměrný tok materiálu.

Obr. 19 Pýchování válcového vzorku – schéma napětí [12]

Pro pýchování rotačně symetrického vzorku mezi rovnoběžnými rovinami se vychází z rovnice:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.13)$$

kde:  $\sigma_r$  je napětí v radiálním směru [MPa]  
 $r$  je poloměr [mm]  
 $\tau_f$  je třecí smykové napětí [MPa]  
 $h$  je vztažná výška vzorku [mm]

Válcové těleso je plasticky přetvářeno v celém objemu, takže na stykových plochách musí být splněná podmínka plasticity  $\tau_{\max}$ :

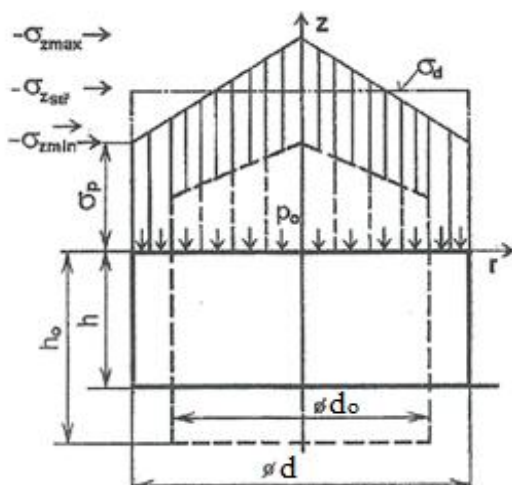
$$\sigma_p = \sigma_z - \sigma_r \quad (2.14)$$

kde:  $\sigma_z$  je napětí ve směru osy 'z' [MPa]

Po derivaci podle souřadnice poloměru lze získat obdobnou rovnici se zaměněnými neznámými:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.15)$$

### 2.2.1 Řešení podle Siebla [12], [14]



Obr. 20 Rozložení osového napětí [12]

Řešení napětí podle Siebla vychází z integrace rovnice (2.13) a za předpokladu, že smykové kontaktní napětí se chová podle Coulombova zákona:

$$\tau_f = f \cdot \sigma_z = -f \cdot \sigma_p \quad [\text{MPa}] \quad (2.16)$$

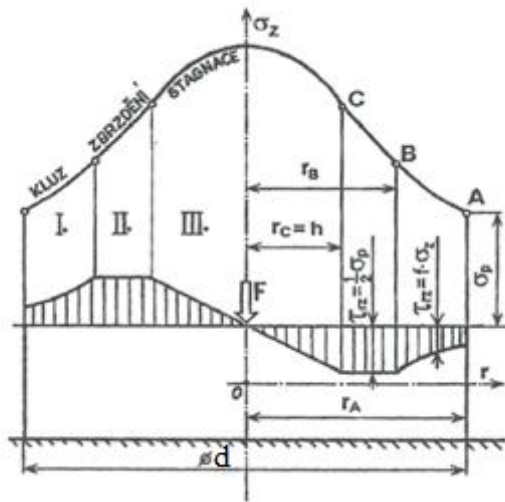
kde:  $f$  součinitel tření [-]

Normálové napětí, v tomto případě ' $\sigma_z$ ', se po celé výšce vzorku nemění – je konstantní. Proměnné jsou zde přetvárné odpory a tvářecí tlak. Na obrázku 20 je znázorněno rozložení napětí podle Siebla. Pomocí podmínky plasticity (2.14) a úprav lze získat finální Sieblův vztah pro výpočet deformačního odporu  $\sigma_d$  při pýchování:

$$\sigma_d = -\sigma_{zs} = \sigma_p \left( 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot d}{h} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (2.17)$$

kde:  $\sigma_{zs}$  je střední osové napětí [MPa]

## 2.2.2 Řešení podle Unskova [12], [14]



Přístup řešení podle Unskova vychází ze smykových kontaktních napětí mezi kovádem a vzorkem, které nejsou konstantní. Pomocí Coulombova vztahu (2.16) a rovnice (2.15) bude diferenciální rovnice podle:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_z}{h} = 0 \quad (2.18)$$

Na obrázku 21 jsou znázorněny průběhy napětí a tři základní pásma. Existence pásem je závislá na okamžitých poměrech délky nebo průměru vzorku a jeho výšky a samozřejmě na vnějším tření. Z obrázku 21 lze tedy rozlišit:

Obr. 21 Rozložení osového napětí [12]

- Pásmo kluzu I – leží v intervalu  $r \in \left\langle r_B; \frac{d}{2} \right\rangle$  a vyznačuje se postupným nárůstem napětí. Po úpravě a integraci rovnice (2.18) vznikne konečné řešení pro pásmo kluzu ve tvaru exponenciální funkce:

$$\sigma_{zI} = -\sigma_p \cdot e^{\frac{2 \cdot f}{h} \cdot \left( \frac{d}{2} - r \right)} \quad (2.19)$$

- Pásmo zbrzdění II – leží v intervalu  $r \in \left\langle r_C; r_B \right\rangle$ , zde smykové napětí dosahuje nejvyšší možné hodnoty. Opětovná úprava rovnice (2.15) a použití Coulombova zákona (2.16) vznikne rovnice:

$$\sigma_{zII} = -\sigma_p \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \left[ 1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot (r_B - r) \right] \quad (2.20)$$

- Pásmo stagnace III – leží v intervalu  $r \in \left\langle 0; r_C \right\rangle$ . Také nazýváno jako pásmo ulpívání nebo přilnutí. Zde materiál přilne na kovádle. V rovině symetrie (nulový bod rozběhu) mění smykové napětí své znaménko. Řešení pro pásmo III vznikne opět pomocí rovnice (2.15) a po dosazení okrajových podmínek lze získat výsledné řešení ve tvaru paraboly:

$$\sigma_{zIII} = \sigma_c - f \cdot \sigma_p \left[ 1 - \left( \frac{r}{h} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

kde:  $\sigma_c$  je hodnota napětí v bodě 'C' [MPa]

## 2.3 Maziva [2], [8], [29], [30], [34]

Jelikož není možné stoprocentně eliminovat tření, které závisí na drsnosti stykových ploch, je snaha ho snížit pomocí maziv s kombinací vhodné dokončovací metody čelních ploch vzorku. Při volbě maziva se musí brát ohled na druh pěchovaného kovu. Mazivo musí dobře přilnout k povrchu a neporušit se při vysokých teplotách. Nesmí reagovat s materiálem ani s nástrojem. Při tvářecím procesu má dva hlavní úkoly, a to snížení třecích ztrát a zabránění svaření za studena mezi nástrojem a polotovarem. Chrání polotovar a nástroj před kovovým stykem, tím zabrání zmíněnému studenému svaru a ochrání jej před opotřebením a otěrem. Pokud jsou snižené třecí ztráty, klesne také velikost přetvárných sil a energií potřebných pro tvářecí proces.

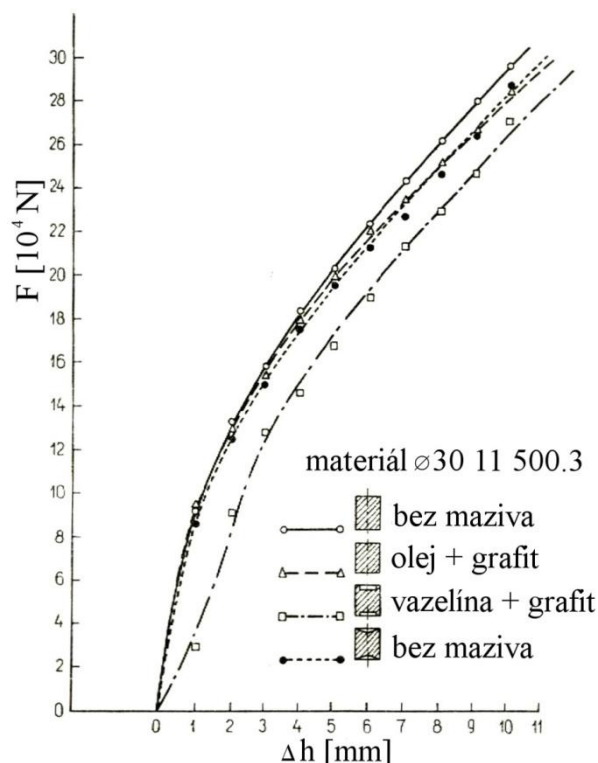
Podle rozhodujících kritérií (například obtížnost tváření, vhodnost maziva v souvislosti s dalším zpracováním polotovaru, ochranný účinek proti korozi nebo hospodárnost) jsou vybírána vhodná maziva, která závisí na druhu tvářecího postupu.

Lze použít:

- Oleje – mohou být syntetické nebo minerální, přednostně se však využívají minerální. Kvůli zlepšení schopnosti lze do nich přidávat různé přísady na bázi fosforu nebo síry.
- Pevná maziva – s vrstvenou mřížkou, mezi ně se například řadí grafit, který se používá ve spojení s vodou nebo olejem. Grafit se používá do teploty, která nepřekročí 800 °C. Při tváření za poloohřevu se využívá sklo ve formě prášku nebo jako natavená vrstva.
- Maziva na bázi mýdel – vznikají reakcí s kovovými oxidy na povrchu kovů a zajistí odolnost proti vysokým tlakům. Příkladem je často používaný stearan sodný (mýdlo).
- Vodní emulze - jsou využívány tehdy, pokud jsou na tvářecí proces požadovány nižší nároky na mazání a větší nároky na chlazení. Do takové kategorie spadají rychlé tvářecí procesy nebo procesy, při kterých vznikají malé deformace.

Obrázek 22 znázorňuje, jaký vliv má mazivo na sílu, která je potřebná ke stlačení různě upravených čelních ploch.

Mezi firmy vyrábějící maziva pro tvářecí procesy patří například: Lubstar, Ellbogen, Lubricant, Fuchs aj. Známejší produkt od firmy Lubricant je Beruforge 170. Jedná se o nanášecí mazivo, které bylo speciálně vyvinuto pro operace objemového tváření ocelových dílů za studena. Mazivo je nanášeno na povrchy otryskaných polotovarů ponořením do lázně. Příkladem produktu od firmy Fuchs, která vyrábí oleje pro tvářecí operace je RENOFORM MBW 2755. Je to vodou mísitelná tvářecí mazací látka s obsahem ropného oleje, která je vhodná pro beztliskové tváření ocelí.



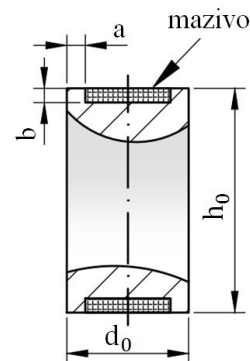
Obr. 22 Vliv mazání a úpravy čelních ploch na tlakovou sílu [8]

## 2.4 Druhy zkušebních těles [8], [11], [13]

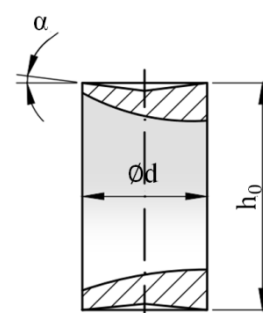
Při pěchování klasického válcového tělesa s hladkými stykovými plochami se vyskytuje problém, protože mazivo má tendenci se vytlačovat. Kromě běžných válcových vzorků s hladkou dosedací plochou, kterými se zabývají Siebl a Unksov existují i jiné. Objevují se i originální zkušební tělesa, která se mohou měnit s testovaným materiálem, ale vyžadují vyšší náklady na provedení zkoušek.

Běžně používána zkušební tělesa:

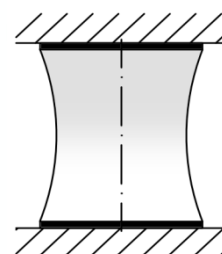
- S upravenou čelní plochou – čelní vybrání (obr. 23) u těles podle Rastěgajeva je vyplněno kyselinou palmitovou, díky které si zkoušené těleso udrží válcový tvar.
- Se zahloubením – tento vzorek byl vytvořen Sieblem a Pompem (obr. 24). V současné době se využívají vzorky s průměrem 20 mm a s výškou  $h_0 = 40$  mm, obsahují kuželové vybrání čelních ploch  $\alpha = 3^\circ$ , které odpovídají součiniteli tření  $f \cong 0,0524$ . Už tyto samotné zkušební tělesa mají velmi nízký součinitel tření, který se ještě dá snížit použitím vhodného maziva. Vzorky se nejprve přepěchují na 45 %  $h_0$ , následně se přesoustruží a znovu pěchují na 50 % až 60 %  $h_0$ .
- Vzorky s podložkou - vzorky válcového tvaru mohou být opatřeny tenkou podložkou, která má menší mez kluzu, než zkoušený materiál. Průběh pěchování oproti klasickým vzorkům je odlišný. Projevují se zde tři oblasti deformací. V první oblasti nastává převážná deformace podložek a tření o materiál způsobuje nerovnoměrné přetvoření. V další fázi vzorek dostává tvar hyperboly (obr. 25) a v jistém rozsahu se zkoušený vzorek i podložky deformují rovnoměrně. V další fázi má vzorek klasický soudečkovitý tvar.
- Plochý pás - jedná se o plochou tyč (obr. 26), na kterou tlačí oproti předchozím variantám úzká kovadla. Poměr délky tyče oproti výšce musí být větší jak šest milimetrů.



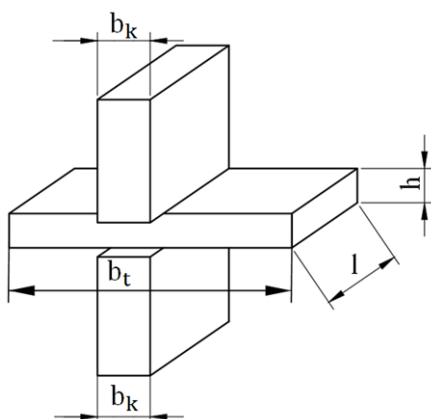
Obr. 23 Vzorek s vybráním [13]



Obr. 24 Kuželové zahloubení [13]



Obr. 25 Vzorek s podložkami [11]



- $b_k$  – šířka kovadla
- $b_t$  – šířka tyče
- $l$  – délka tyče
- $h$  – výška tyče

Obr. 26 Pěchování tyče [8]

## 2.5 Zaznamenávání hodnot [4], [41]

Při zkoušení materiálu je potřeba zaznamenávat hodnoty napětí a dráhy pro pozdější vyhodnocení. Tlakovou sílu, která je při pěchování podstatná pro tvorbu pracovního diagramu, lze snímat pomocí tenzometrů. Dráhu, která je závislá na stlačovací síle, je možné měřit indukčnostími snímači. Teplota, která ovlivňuje tvářecí proces je měřena pomocí termočlánků.

Pro snímání dráhy a napětí se využívají pasivní snímače. Působením neelektrické veličiny se mění některý z jejich parametrů. Pomocí snímače a ostatních prvků je možné vyhodnotit měřenou veličinu. Nejčastěji se v technice využívají snímače s elektrickým výstupem signálu. Jejich využití je nejen pro určení veličin elektrických (napětí, odpor), ale i při měření hodnot neelektrických (síla, moment, dráha, teplota). Zjišťování neelektrických veličin elektrickou cestou sebou nese mnoho výhod i nevýhod:

### Výhody

- větší přesnost
- větší citlivost
- možné dálkové měření
- větší rychlost měření
- speciální výhody, jako je malá hmotnost snímače

### Nevýhody

- větší náklady na měřicí kanál
- větší náklady na údržbu
- vyšší kvalifikace obsluhy

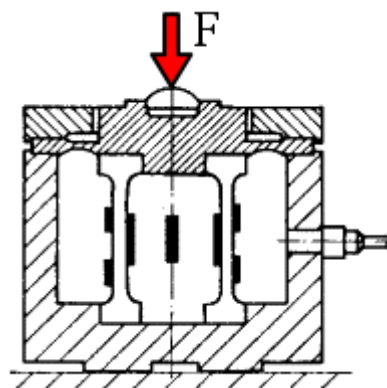
### 2.5.1 Snímání síly [4], [23], [24], [36], [41]

Síla může být měřena indukčnostími, kapacitními nebo odporovými snímači. Běžně se nejvíce využívají tenzometry z důvodu jejich všestranného použití. Lze je aplikovat jak v letectví, stavitelství, tak i v běžných obchodních váhách.

Jedny z moderních zařízení pro měření tlakových sil jsou dynamometry (obr. 27). Tyto snímače se skládají z měrného členu a korekčních prvků. Měrný člen je většinou válcový prstenec, kde na jeho vnější ploše jsou umístěny odporové tenzometry, které jsou zapojeny do celého měřicího mostu. Vše je vhodně zapojeno a vývody jsou umístěny v pouzdře, které je připevněno na kryt dynamometru. Konstrukce snímače je znázorněna na obrázku 28. Citlivost měrného členu se velmi často zvětšuje vyšším počtem tenzometrů v jedné větvi.



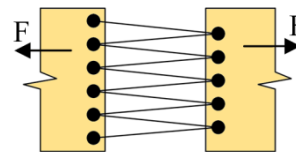
Obr. 27 Prstencový snímač tlakové síly [36]



Obr. 28 Základní konstrukce snímače [23]

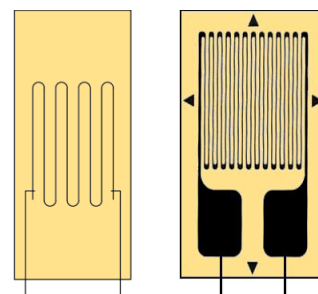
Tenzometrické snímače existují v několika podobách. U klasických kovových tvoří mřížku kov (například konstantan). Podle jejich konstrukce je lze dělit na snímače s volným odporovým článkem (příložné) a lepené.

Příložné tenzometry (obr. 29) mají uchyceny odporové drátky mezi soustavou držáků. Aktivní odporový článek není přilepen a je možností je využívat při vyšších teplotách (až do 310 °C). Výhodou může být nízká hystereze, ale jejich výroba je velmi náročná na mechanické provedení.



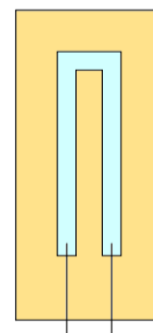
Obr. 29 Příložný tenzometr [41]

Lepené kovové tenzometry mají odporový článek nalepen na podložce, která se potom celá přilepí na měřenou část. Tyto tenzometry jsou v drátkovém nebo fóliovém provedení. Lepené drátkové snímače (obr. 30) mají kruhový průřez a velmi často se používají. Konce aktivního drátku jsou přiletovány na silnější vývody. Snímače je také možno sduřovat a to tehdy, pokud je potřeba měřit poměrné prodloužení ve více směrech. Na jedné podložce je situováno několik vhodně orientovaných vinutí, která jsou umístěna nejen vedle sebe, ale i na sobě. Fóliové tenzometry snášejí větší proudové zatížení než drátkové, protože mnohem lépe odvádí teplo.



Obr. 30 Drátkový (vlevo) a fóliový tenzometr [41], [24]

Pro lepení tenzometru se v současné době používá lepidel, lze je používat jen do teploty 50°C. Pro vyšší teploty jsou zde speciální lepidla na bázi termosetů, které vydrží do teploty až 200 °C. Pro teploty nad 300 °C se používají jiné materiály, a to keramické tmely, které zároveň slouží jako podložka pro odporové vinutí. Z těchto informací lze usoudit, že měření odporovými tenzometry výrazně ovlivňuje teplota. Mění se nejen mechanické, ale i elektrické parametry tenzometru. Vliv teploty lze vyloučit například kompenzací dalším snímačem.

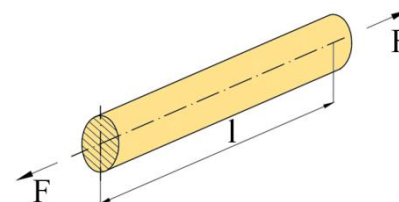


Obr. 31 Polovodičový tenzometr [4]

Jiným typem jsou polovodičové tenzometry (obr. 31). Využívají piezodoporového jevu, kdy při silovém působení na polovodičový přechod PN (vodivost typu P nebo N) se mění proud procházející vodičem. Mění se nejen vodivost přechodu, ale pokud je napětí konstantní, mění se i proud procházející vodičem. Pro tento druh snímačů jsou vhodná tenká vlákna vyrobená z monokrystalu křemíku. Z hlediska použitého materiálu lze tenzometry rozdělit na monokrystalické a polykrystalické.

Obecně jsou tenzometry vhodné jak pro dynamická tak i statická měření. Jejich použití je založeno na faktu, že při jejich deformaci dojde ke změně vodivosti kovů. Z následné změny odporu se dá stanovit požadovaná velikost deformace.

Pro odpor válcového vodiče (obr. 32) o délce 'l' a průřezu 'S' platí vztah:



Obr. 32 Deformace vodiče [41]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (2.22)$$

kde:  $\rho$  je měrný odpor materiálu [ $\Omega$ ]

Jestliže na vodič působí všestranný tlak, vzniknou ve třech hlavních osách mechanické napětí a zároveň i poměrné prodloužení. Změna odporu se vypočítá z diferenciální závislosti, po úpravách lze získat finální tvar pro relativní změnu odporu:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot \left( \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad [\Omega] \quad (2.23)$$

kde:  $\mu$  je Poissonovo číslo materiálu měrného členu

Ve vztahu (2.23) lze závorku nahradit konstantou 'k' (tzv. k-faktor), která charakterizuje deformační citlivost tenzometru. Možné je to pouze tehdy, pokud jsou hodnoty v rozsahu pružné deformace, kde platí Hookeuv zákon. Po úpravě lze vzorec zapsat:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad [\Omega] \quad (2.24)$$

K-faktor pro nejčastěji používaný materiál, kterým je konstantan (slitina mědi a niklu) se pohybuje kolem hodnoty 2. Jelikož poměrná změna odporu při měření pružné deformace odporovými tenzometry je velmi nízká, k zesílení signálu je používáno zapojení do Wheastonova mostu. Základní vztah pro výpočet úloh zapojených do mostu je:

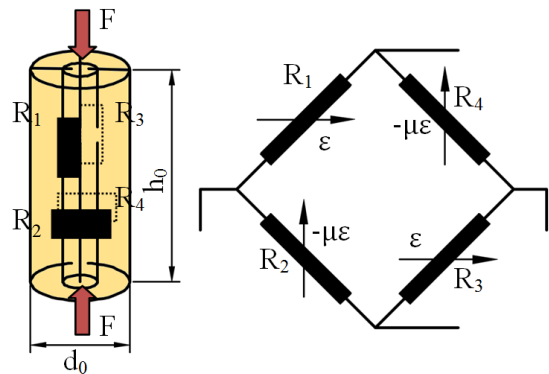
$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad \left[ \frac{mV}{V} \right] \quad (2.25)$$

kde:  $R_1$  až  $R_4$  jsou odpory vyvolané tenzometry  $[\Omega]$

$U_m$  je měřící napětí  $[mV]$

$U_n$  je napájecí napětí  $[V]$

Při přechovacích zkouškách jsou čtyři snímače zapojeny do celého mostu (obr. 33), z toho tenzometry 'R1' a 'R3' jsou ve směru axiálním a 'R2' a 'R4' jsou ve směru radiálním. Prvním krokem je vyjádření hodnot odporů:



Obr. 33 Celý most, úloha tlak [4]

$$R_1 = R + \Delta R_{tl} + \Delta R_t$$

$$R_2 = R - \mu \Delta R_{tl} + \Delta R_t$$

$$R_3 = R_1$$

$$R_4 = R_2$$

kde:  $R$  je jmenovitý odpor tenzometru  $[\Omega]$

$\Delta R_{tl}$  je změna od tlakového zatížení v osovém směru  $[\Omega]$

$-\mu \Delta R_{tl}$  je změna od tlakového zatížení v příčném směru  $[\Omega]$

(2.26)

Změna odporu díky teplotě je srovnatelná se změnou odporu od namáhání, proto je potřeba teplotu kompenzovat. Jestliže jsou snímače nalepené na kovové podložce ze stejného materiálu, jako měřící materiál, musí mít stejnou teplotu a výsledky je třeba zvětšit o ' $\Delta R_t$ '. Dosazením odporů z (2.26) do rovnice (2.25) vznikne po matematických úpravách výsledný vztah:

$$\frac{U_m}{U_n} \cong \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{\Delta R t l}{R} \quad (2.27)$$

Aby byla možnost zahrnout deformační citlivost tenzometru, lze na vztah aplikovat vzorec (2.24), po úpravě vznikne:

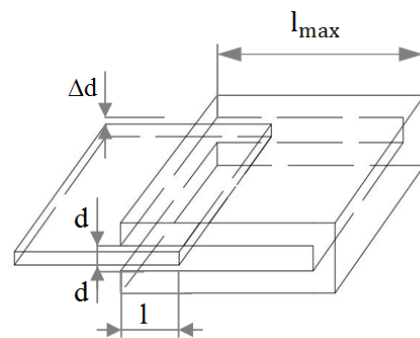
$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{k \cdot (1 + \mu)}{2} \cdot \varepsilon \quad (2.28)$$

Ve výsledném vztahu se teplota nevyskytuje, protože je zcela kompenzována.

### 2.5.2 Snímání dráhy [4], [19], [20], [41]

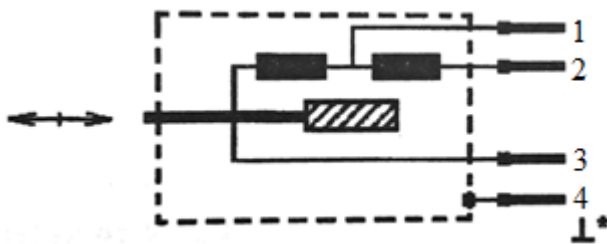
Kromě vyhodnocování přetvárného odporu, práce a dalších parametrů je potřeba znát dráhu, která se zaznamenává se silou současně, popřípadě ve vzájemné závislosti.

Dráhu lze snímat například pomocí kapacitních nebo indukčních snímačů, oba druhy se řadí mezi pasivní. Kapacitní snímače (obr. 34) jsou jedny z nejpoužívanějších. Pracují na principu změn geometrických rozměrů kondenzátoru nebo permitivity mezi elektrodami díky působení měřené veličiny. Kapacita kondenzátoru je závislá na ploše elektrod a na tloušťce dielektrika. Jelikož měření kapacity je obtížné, převádí se veličina na změnu frekvence, což patří mezi velké nevýhody a kromě toho vykazují nežádoucí hysteretzní chování. Výhodou může být velká citlivost při malých vzdálenostech elektrod a odolnost proti poruchám. Oproti indukčním snímačům jsou podstatně jednodušší na výrobu, kde je materiálově dostačující mosaz nebo ocel.



Obr. 34 Kapacitní snímač dráhy [19]

Indukční snímač se skládá ze systému cívek s pohyblivým jádrem a vše je kryté pláštěm. Princip cívky spočívá v indukčnosti, která závisí na počtu závitů, elektrických a magnetických vlastností jádra. Jestliže se pohyblivé jádro posune, změní se magnetická vodivost a tím i indukčnost. Pokud snímač tvoří dvě cívky, změna je v obou cívkách stejná až na znaménko. Na obrázku 35 je znázorněné schéma diferenciálního zapojení. Jádro je spojeno s táhlem a připojeno k měřenému objektu, který se pohybuje. Obrázek 36 znázorňuje běžnou konstrukci snímače dráhy. Tyto snímače jsou velmi přesné, protože nedochází ke zkreslení pohybu setrvačnou hmotou jádra a jsou univerzální, což se o kapacitních říci nedá. Nevýhodou je jejich složitost a cena.



Obr. 35 Schéma indukčního snímače dráhy [4]



Obr. 36 Indukční snímač dráhy [20]



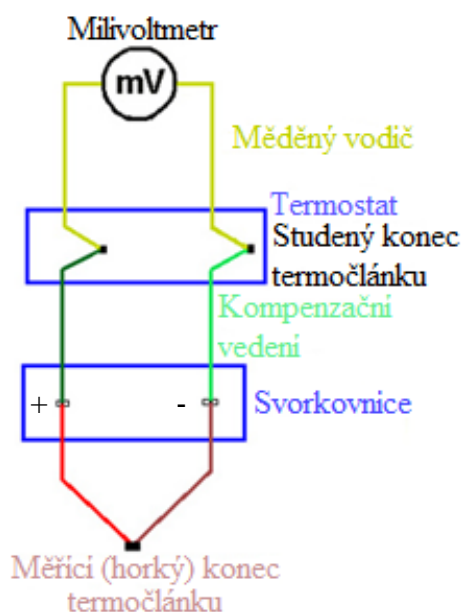
### 2.5.3 Snímání teploty [4], [25], [39], [41]

Při pēchovací zkoušce je potřeba znát teplotu, protože značně ovlivňuje tvārečí proces. Podle styku s měřenou veličinou lze teploměry rozdělit na dotykové (dilatační, elektrické a speciální), bezdotykové (pyrometry, termovize atd.). V tomto případě je nejvhodnější použití termoelektrických snímačů, tzv. termočlánků, protože jsou stabilní, dokážou rychle reagovat na změny měřené teploty, jsou odolné proti teplotním a tlakovým rázům a jednoduše se s nimi manipuluje. Využívají se nejen v oblasti výzkumné, ale i v běžné technické praxi.

Senzory využívají termoelektrického jevu, který objevili vědci Epinus a Seebeck. Skládají se ze dvou drátů různých materiálů spojených na dvou koncích (obr. 37). Jeden konec je horký a slouží k měření, druhý konec je studený a slouží k porovnávání. Mají-li spojené kovy navzájem různou teplotu, vzniká na každém z konců odlišný elektrický potenciál. Při výběru materiálu, ze kterého se kovy budou skládat, je důležitou vlastností čistota, stejnorodost složení a žáruvzdornost. Životnost snímače se dá značně prodloužit umístěním do ochranné trubice. Jednotlivé typy termočlánků mají své označení písmeny i barvami. Přehled nepoužívanějších je v tabulce 2 a na obrázku 38 je znázorněn snímač typu K.

Tab. 2 Druhy termočlánků a rozsah použití [4]

Značení	Druh termočlánku	Rozsah použití v [°C]
T	Cu (+) CuNi (-)	- 200 až 400
J	Fe (+) CuNi (-)	- 200 až 800
E	NiCr (+) CuNi (-)	0 až 1000
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až 1300
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až 1200
C	WRh5 (+) WRh26 (-)	0 až 2320
R	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až 1700
S	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až 1700
B	PtRh30 (+) PtRh6 (-)	0 až 1700



Obr. 37 Schéma zapojení [39]



Obr. 38 Termočlánek typu K [25]

### 3 EXPERIMENT [21], [27]

Experiment je zaměřen na pēchování klasických vālcových vzorků z oceli ČSN 16 231.3. Přesné složení materiálu je znázorněno v tabulce 3. Jedná se o ocel, která je tvárná za tepla a dobře obrobitelná v žíhaném stavu. Vhodná je pro velmi namáhané strojní součásti například: ozubená kola, pastorky, kladky, pístní čepy a jiné.

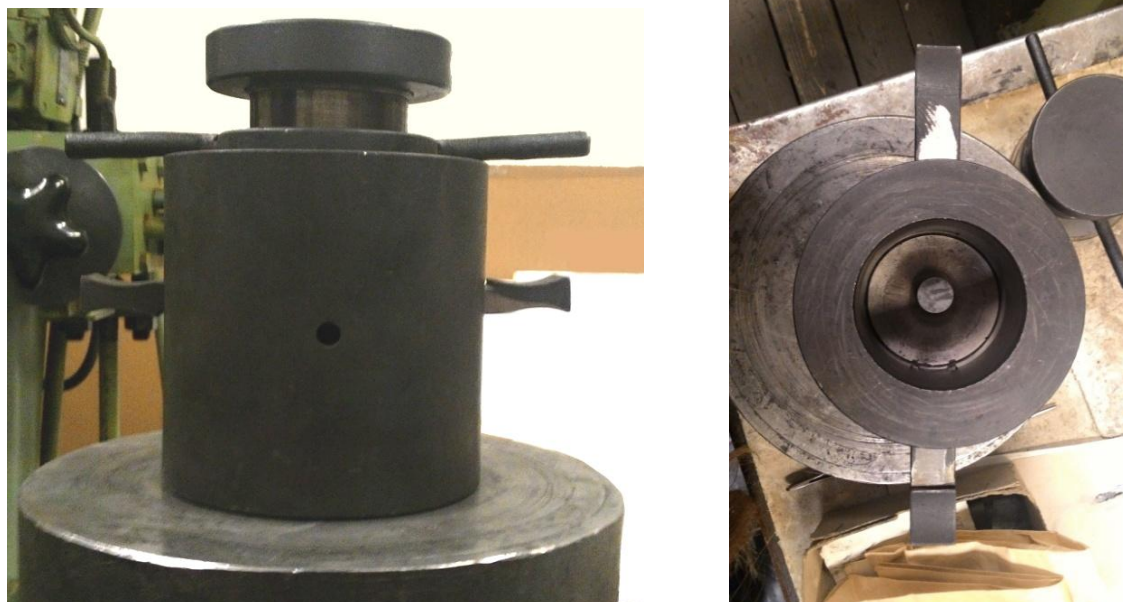
Tab. 3 Vlastnosti oceli [27]

Značení oceli		Střední chemické složení v [%]			
ČSN	EU	C (max)	Mn	Cr	Ni
16 231	19CrNi8	0,24	0,85	0,95	1,45

Vzorky byly opatřeny vrstvou grafitu. Jednalo se o neředěné mazivo Delta 144, s přísadou kysličníku kademnatého, které se používá v teplotním rozmezí od 20 – 600 °C.

Součástí práce bylo měření na lisu CZR 600 pomocí nově zakoupeného měřicího modulu, které bylo porovnáno s běžným postupem vyhodnocení se zapisovačem. Kromě toho se budou hodnoty porovnávat s výsledky, které byly vyhotoveny na certifikovaném univerzálním trhacím stroji s řídicí jednotkou. Při měření se zaznamenávaly nejen hodnoty tlakové síly a dráhy, které jsou nezbytné pro tvorbu pracovního diagramu, ale i teplota. Cílem práce je ověřit funkčnost programu a srovnání dat s klasickým způsobem vyhodnocení.

V každé ze tří částí experimentu se postupně vkládaly do pēchovacího nástroje (obr. 39) tři vzorky a následně celá sestava do lisu a univerzálního trhacího stroje. Pēchovací nástroj se skládá ze dvou částí. Horní část je pohyblivá a uskutečňuje samotné pēchování a boční součásti slouží k vystředění vzorku. Otvor, který je viditelný na levé části obrázku, slouží k měření teploty.



Obr. 39 Pēchovací nástroj

### 3.1 Lis CZR 600 a zapisovač

Experiment byl proveden na třech vzorcích (obr. 40), jejichž rozměry jsou znázorněny v tabulce 4. Počáteční stav znázorňuje rozměry vzorku před zkouškou a konečný stav rozměry po ukončení zkoušky. Pro uskutečnění pýchování byl použit hydraulický lis CZR 600 (obr. 41) o jmenovité síle 6000 kN, který měl na zadní části připevněny měřící prvky (obr. 42).

Tab. 4 Rozměry zkušebních vzorků A

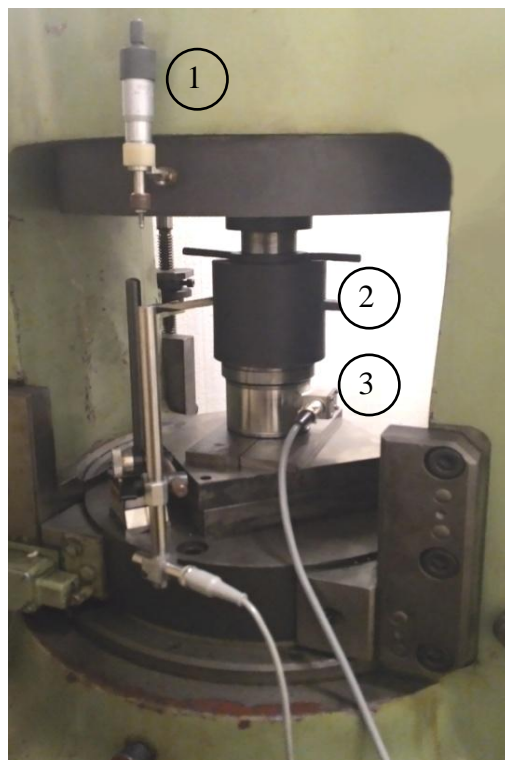
[mm]	počáteční stav		konečný stav	
	$d_0$	$h_0$	$d_1$	$h_1$
vzorek A1	15,10	24,07	20,94	13,46
vzorek A2	15,10	24,12	21,93	12,20
vzorek A3	15,08	24,09	21,94	10,21



Obr. 40 Zkušební vzorky A



Obr. 41 Hydraulický lis CZR 600

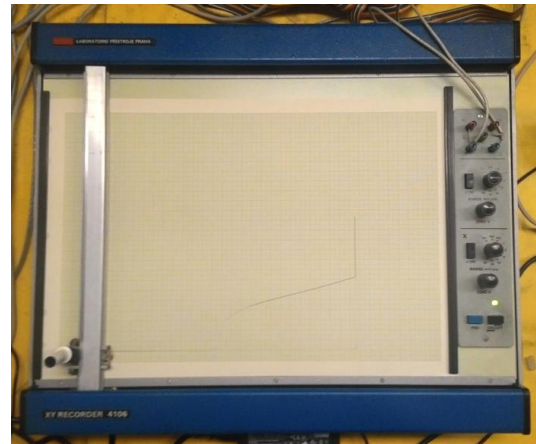


Obr. 42 Měřící zařízení

Pro snímání dráhy posuvu kovadel slouží indukční snímač, který je znázorněn na obrázku 42 a označen pozicí jedna. Jedná se o W50 od firmy HBM s měřícím rozsahem 100 mm. Na pozici dvě je umístěn pýchovací nástroj. Poslední pozice tři označuje tlakový snímač síly, tzv. dynamometr značky C6 R také od firmy HBM. Indukční snímač a dynamometr jsou pomocí kabelů vyvedeny do zesilovače KWS 6A-5 (obr. 43) zakoupeného u firmy HBM a dále do souřadnicového zapisovače typu 4106 (obr. 44). Při provedení pokusu nebyla zapisována okolní teplota, protože liniový zapisovač ji nesnímá.



Obr. 43 Zesilovač typ KWS 6A-5



Obr. 44 XY zapisovač typ 4106

Byly provedeny základní výpočty (vycházelo se z tabulky 4), logaritmická deformace podle vzorce (2.2):

$$\varphi_{A1} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{13,46}{24,07} = -0,581$$

$$\varphi_{A2} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{10,19}{24,12} = -0,681$$

$$\varphi_{A3} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{10,21}{24,09} = -0,858$$

Záporné znaménko u výsledků dokazuje, že se opravdu jedná o tlak. Pro následující zpracování už ale podstatné není a bylo zanedbáno.

Poměrné přetvoření podle vztahu (2.4):

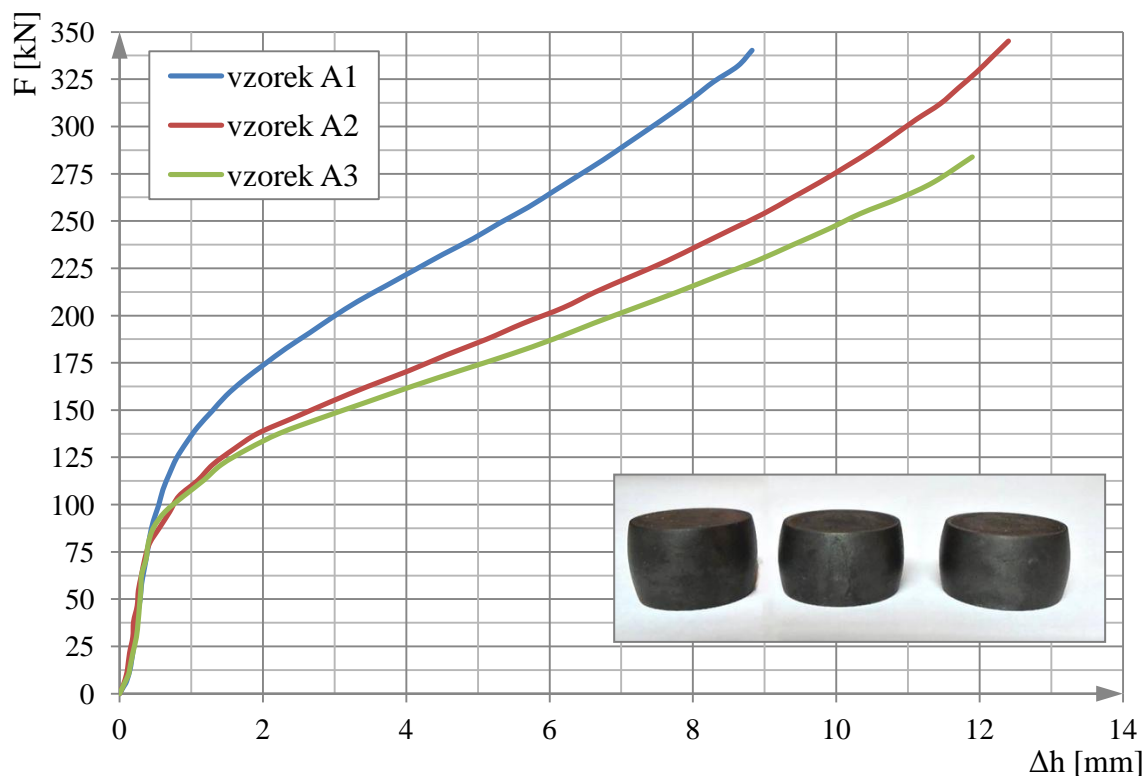
$$\varepsilon_{A1} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,07 - 13,46}{24,07} = 0,441$$

$$\varepsilon_{A2} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,12 - 12,20}{24,12} = 0,494$$

$$\varepsilon_{A3} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,09 - 10,21}{24,09} = 0,576$$

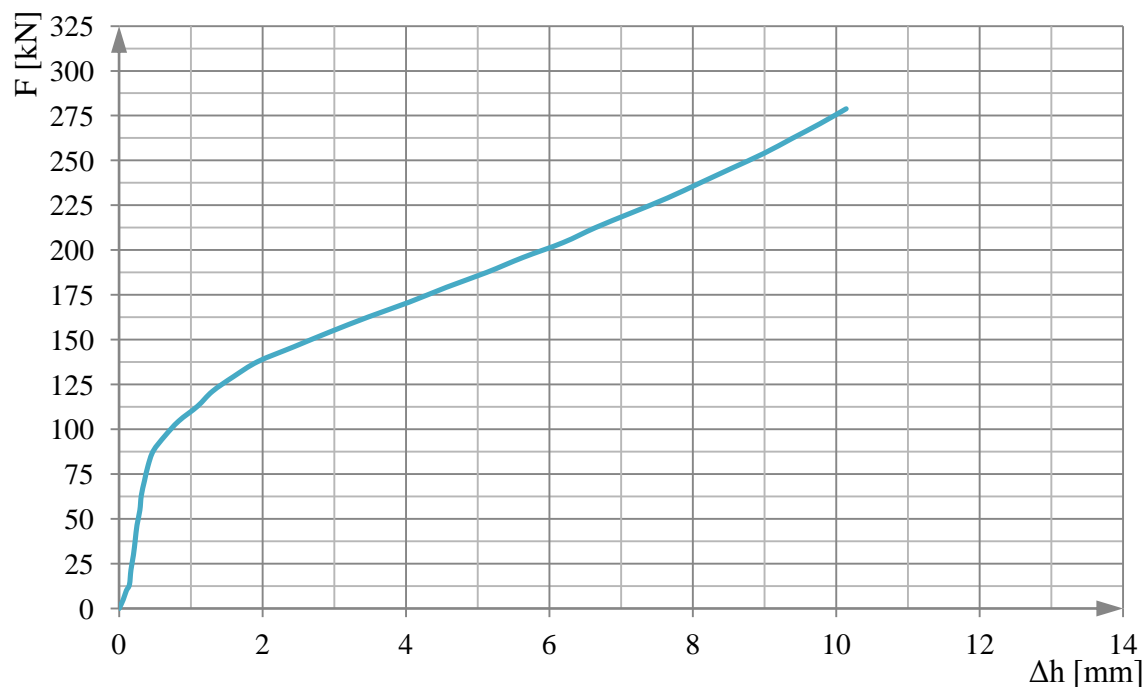
Jelikož během experimentu nebyl snímán čas pěchování, nelze proto určit rychlost posuvu beranu lisu.

Ukončení testu nastává uložením dat a následným vykreslením pracovního diagramu (obr 45). Vzorek A1 byl stlačen silou 400 kN, druhý vzorek A2 silou 350 kN a poslední A3 silou 280 kN. Ani na jednom zkušební tělese se nevytvořila trhлина nebo jiné porušení.



Obr. 45 Pracovní diagram pčhovací zkoušky vyhodnocené pomocí zapisovače

Z grafu je patrné, že křivka charakterizující vzorek A1 je odlišná od zbylých dvou. To může být způsobeno špatnou kalibrací nebo nesprávným nastavením zapisovače. Křivky pro ostatní vzorky už jsou velmi podobné. Pro lepší přehlednost a vyhodnocení byl vytvořen průměr s ohledem na křivku vzorku A1, který je znázorněn na obrázku 46.



Obr. 46 Průměrná hodnota vyhodnocená pomocí zapisovače

V grafu je možné vyzpozorovat, že materiál vykazoval pružné chování skoro až do 80 kN. Poslední fáze, která je charakteristická prudkým nárůstem tlakové síly není z grafu zřejmá, protože vzorky nebyly natolik stlačeny.

Pro tvorbu křivky zpevnění bylo potřeba uskutečnit několik výpočtů. Vycházelo se z průměrných hodnot, které byly použity pro tvorbu pracovního diagramu. Nejprve byl spočítán objem výchozího vzorku, který činí 4257,05 mm<sup>3</sup>. Pomocí rovnice (2.8) byl spočítán střední průměr při výšce h = 20,618:

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h_i}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4257,05}{\pi \cdot 20,618}} = 16,21 \text{ mm}$$

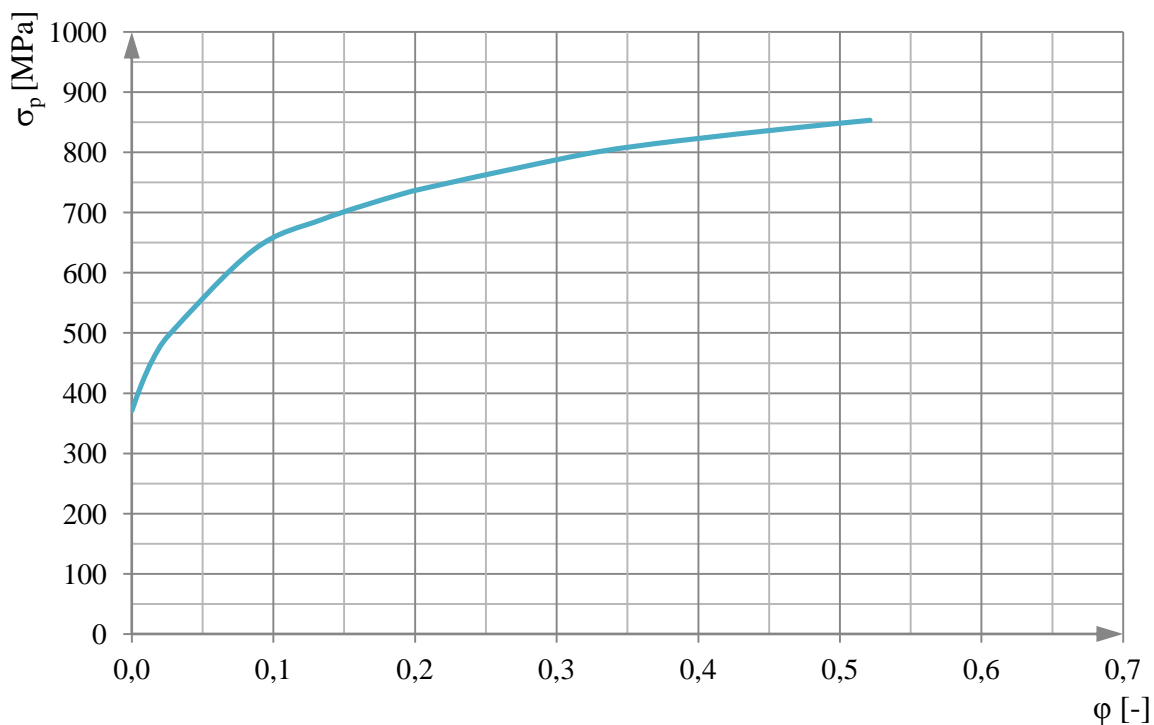
Následně po výpočtu okamžitého středního průměru lze dosadit do rovnice (2. 9), pro zjištění okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu v daném místě stlačení:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_{si}^2} = \frac{4 \cdot 162680}{\pi \cdot 16,21^2} = 787,90 \text{ MPa}$$

Druhá osa vyžaduje okamžitou hodnotu logaritmického přetvoření v dané výšce 'h'. Ta byla vypočtena pomocí vztahu (2. 2):

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{20,16}{24,09} = -0,156$$

Po výpočtu všech okamžitých hodnot deformace i přirozeného přetvárného odporu lze vykreslit křivky zpevnění (obr. 47) pro ocel 16 231.3.



Obr. 47 Křivka zpevnění pro vzorky A

Graf slouží pro určení zpevnění materiálu při dané deformaci. Například při deformaci 0,35 se materiál zpevněl na přibližnou hodnotu 800 MPa.

### 3.2 Lis CZR 600 a program [7]

Experiment byl opět proveden na třech vzorcích (obr. 48), jejichž rozměry jsou znázorněny v tabulce 5. Pro uskutečnění pēchování byl použit stejný hydraulický lis CZR 600 s obdobnými měřicími prvky.

Tab. 5 Rozměry zkušebních vzorků B

[mm]	počáteční stav		konečný stav	
	$d_0$	$h_0$	$d_1$	$h_1$
vzorek B1	15,10	24,06	23,53	10,57
vzorek B2	15,08	24,10	23,98	10,19
vzorek B3	15,10	24,11	23,98	10,21

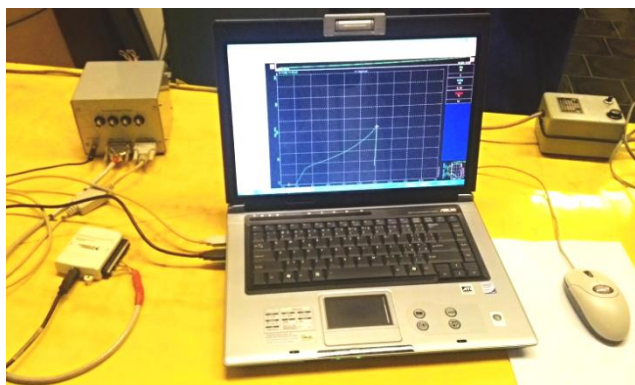


Obr. 48 Zkušební vzorky B

Pro snímání dráhy a síly byly použity stejné snímače, které byly zapojeny a uspořádány opět podle obrázku 42. Indukčnostní snímač a dynamometr jsou pomocí kabelů (obr. 49) vyvedeny do zesilovače DEWE-30-4 od společnosti Dewetron. Tato společnost je na trhu již od roku 1991. Jejich oborem je obchodní a poradenská činnost v oblasti elektrických měření, tvorby programů a jiné. Dále je k modulu připojen termočlánek pro snímání okolní teploty. Modul je následně připojen nejen do počítače, ale i do převaděče analogového signálu na digitální s označením NI USB-6009 od firmy National Instrument a převedený signál putuje opět do počítače. Zapojení přístrojů je znázorněno na obrázku 50.

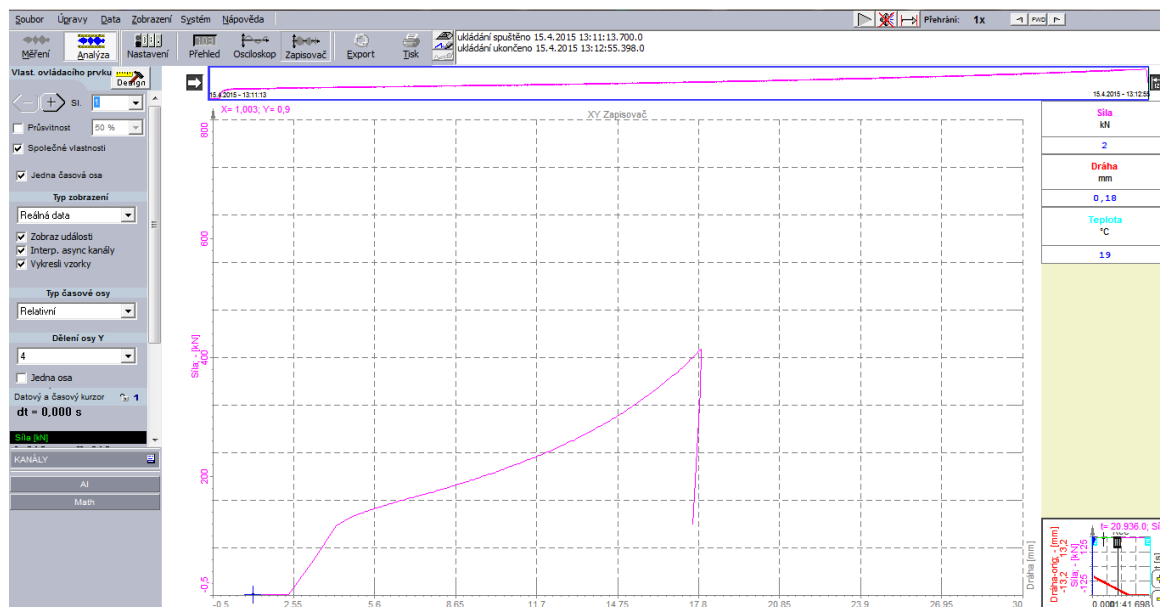


Obr. 49 Zadní strana modulu se zapojenými měřicími prvky



Obr. 50 Zapojení počítače při zaznamenávání hodnot

Data v počítači zpracovával program Dewesoft verze 6.5, který je taktéž od firmy Dewetron. Produkt Dewesoft umožňuje zaznamenání a vyhodnocení jakýchkoliv průběhů fyzikální veličiny. Dokáže sbírat různá data, čímž se stává univerzálním a lze jej použít na jakoukoliv zkoušku. Na začátku testu je potřeba nastavit měřicí kanály pro snímání síly, dráhy a teploty. V nastavení lze upravit vlastnosti snímače, jako zapojení do celého nebo polovičního měřicího mostu, dále rozsah měření, jednotky apod. Následovala úprava zaznamenávacího prostředí (obr. 51). Data na displej lze vykreslovat pomocí analogových a digitálních měřičů, do XY grafů, osciloskopů pro měření vibrací atd. Kromě toho program obsahuje spousty matematických funkcí, včetně statistických výpočtů.



Obr. 51 Prostředí programu a vykreslení hodnot do XY grafu

Zapojení a nastavování měřicích kanálů bylo poněkud komplikované. Okolní teplota se při zkoušce pohybovala kolem 20 °C.

Dále byly provedeny základní výpočty (vycházelo se z tabulky 5), logaritmická deformace podle vzorce (2.2):

$$\varphi_{B1} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{10,57}{24,06} = -0,439$$

$$\varphi_{B2} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{10,19}{24,10} = -0,423$$

$$\varphi_{B3} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{10,21}{24,11} = -0,425$$

poměrné přetvoření podle vztahu (2.4):

$$\varepsilon_{B1} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,06 - 10,57}{24,06} = 0,561$$

$$\varepsilon_{B2} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,10 - 10,19}{24,10} = 0,577$$

$$\varepsilon_{B3} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,11 - 10,21}{24,11} = 0,577$$

a rychlost pohybu beranu stroje dle (2.6):

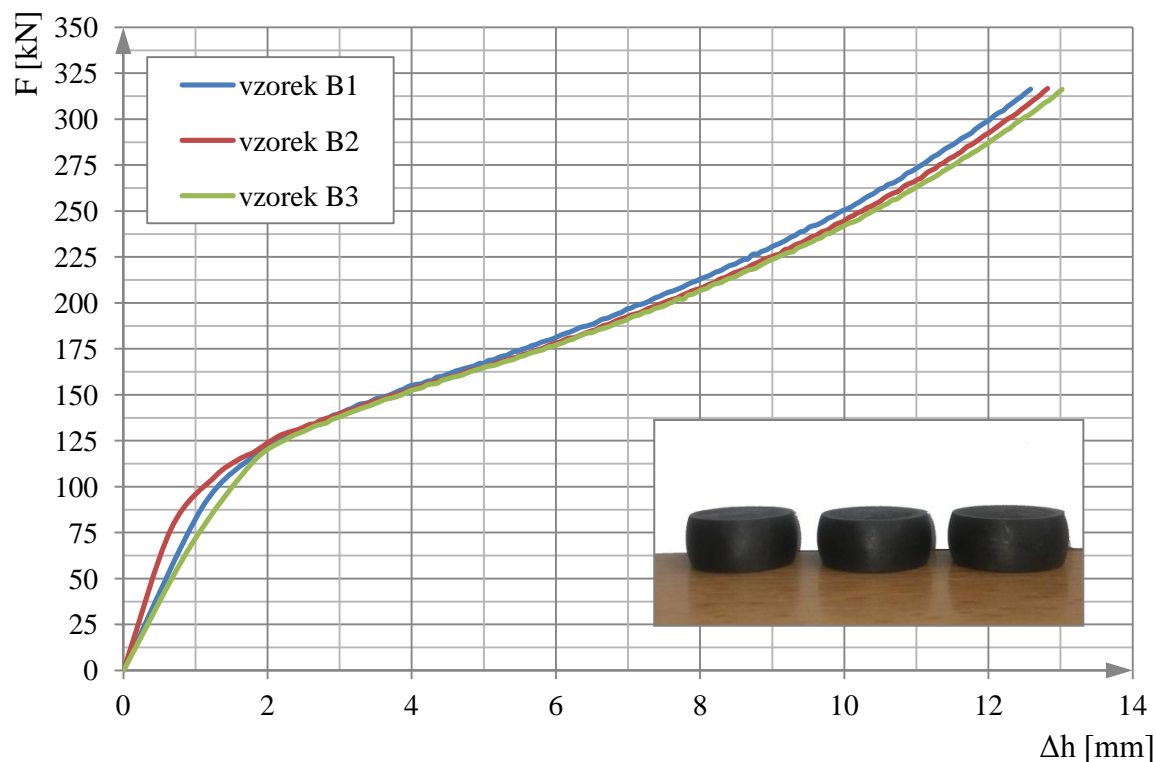
$$v_{B1} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,06 - 10,57}{79 - 0} = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{B2} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,10 - 10,19}{104 - 0} = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{B3} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,11 - 10,21}{100,5 - 0} = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

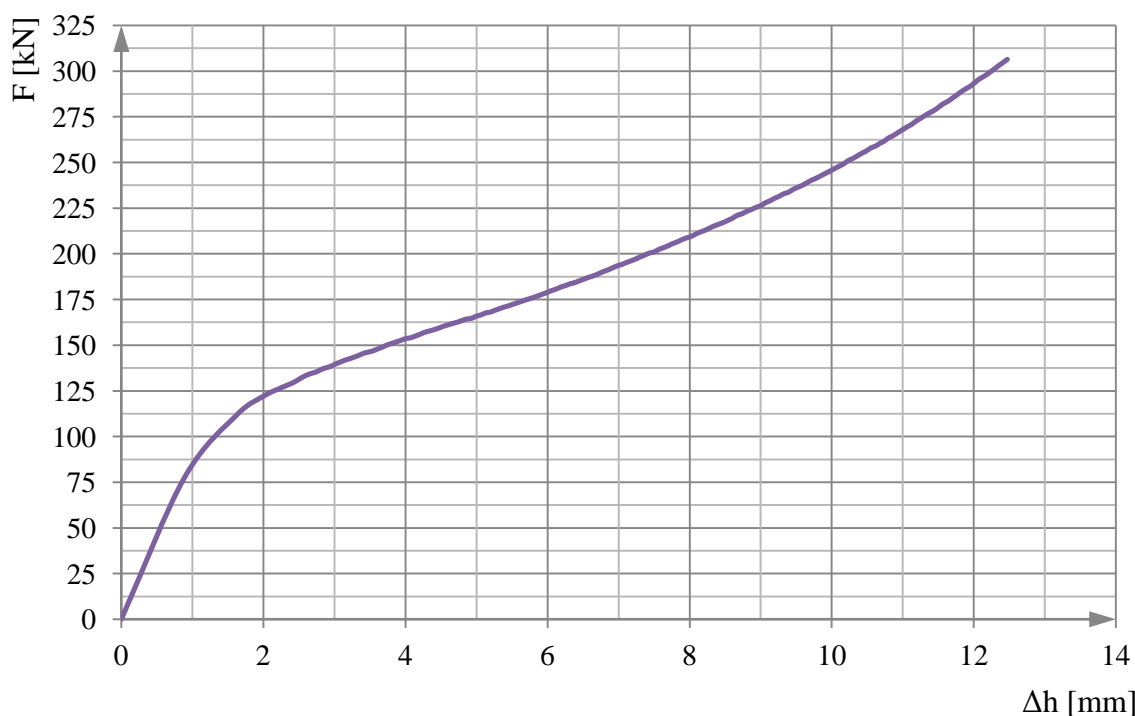


Ukončení testu nastává uložením dat a následným vykreslením pracovních diagramů (obr 52). Na vzorky působila síla o velikosti přibližně 410 kN, ale pro tvorbu jednotných grafů byla koncová data ořezána. Při této části experimentu na vzorcích také nevznikly žádné trhliny.



Obr. 52 Pracovní diagram pýchovací zkoušky vyhodnocené pomocí softwaru

V tomto případě i přes složitost nastavování měřicích kanálů se měření zdařilo a průběhy jsou si velmi podobné, pouze se mírně liší v první fázi. Následně byl vytvořen průměr i z těchto vzorků, který je zobrazen na obrázku 53.



Obr. 53 Průměrné hodnoty vzorků B z pýchovací zkoušky vyhodnocené pomocí softwaru

Z tohoto pracovního diagramu je zřetelně viditelné pružné chování, které trvalo až do 80 kN, což je totožné jak u vyhodnocení pomocí liniového zapisovače. Z grafu je patrný také začátek třetí fáze, protože bylo zaznamenáno podstatně více hodnot.

I zde bylo potřeba uskutečnit několik výpočtů pro tvorbu křivky zpevnění. Objem výchozího vzorku činí 4257,05 mm<sup>3</sup>. Vzorový výpočet byl proveden ve zpěchované výšce  $h = 17,05$ :

Výpočet okamžitého středního průměru podle rovnice (2. 8):

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h_i}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4257,05}{\pi \cdot 17,5}} = 17,83 \text{ mm}$$

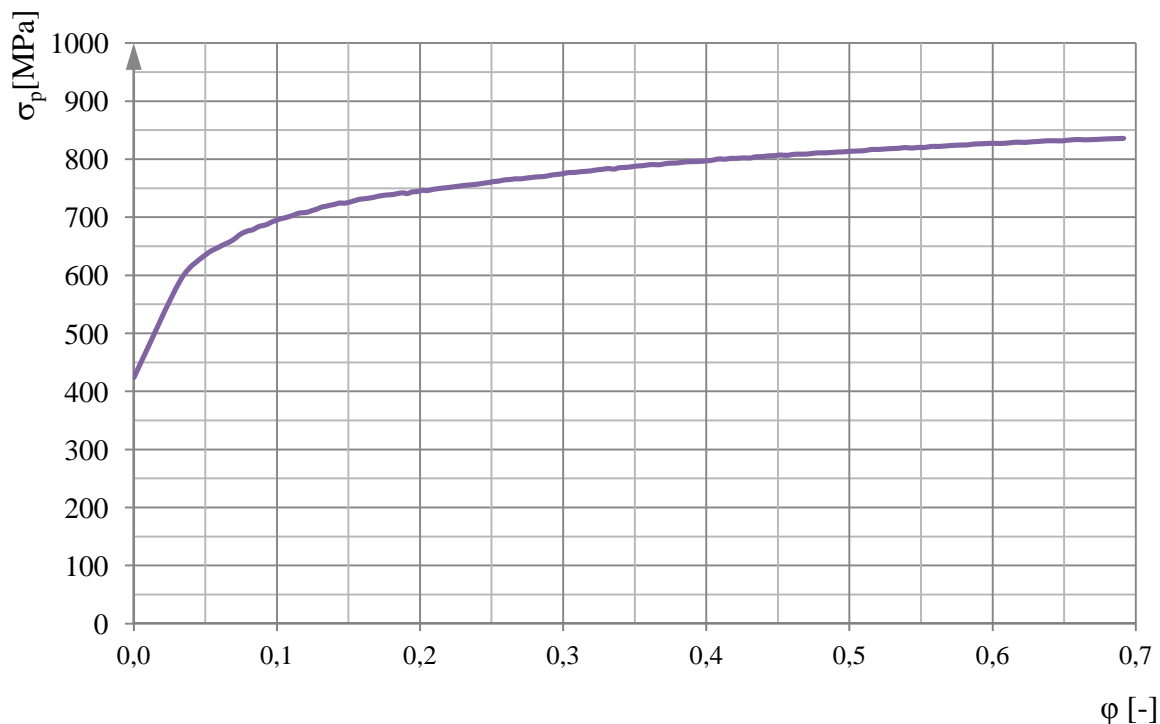
Následně po výpočtu okamžitého středního průměru lze dosadit do (2. 9), pro zjištění okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_{si}^2} = \frac{4 \cdot 194049}{\pi \cdot 17,83^2} = 777,18 \text{ MPa}$$

Okamžitá hodnota logaritmického přetvoření v dané výšce 'h' vypočtena pomocí vztahu (2. 2):

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{17,05}{24,09} = 0,346$$

Po výpočtu potřebných hodnot lze znázornit křivku přirozeného deformačního odporu (obr. 54) pro ocel 16 231.3 při teplotě 20 °C.



Obr. 54 Křivka zpevnění pro vzorky B

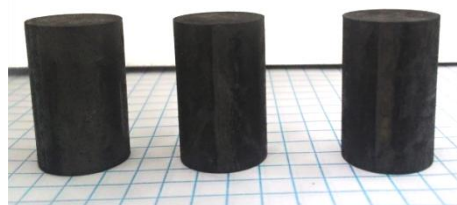
Pro stejnou deformaci (0,35) jako v předešlém případě, se hodnota zpevnění také blíží 800 MPa.

### 3.3 Zkušební stroj ZD 40 [31]

Poslední část experimentu je provedena opět na třech zkušebních vzorcích (obr. 55). Počáteční a konečné rozměry jsou znázorněny v tabulce 5. Zkouška byla realizována na hydraulickém zkušebním stroji ZD 40 (obr. 56), jehož jmenovitá síla je 400 kN. Měření provedená tímto strojem jsou velmi přesná, protože trhačka odpovídá třídě přesnosti 1.

Tab. 6 Počáteční a konečné rozměry vzorků C

[mm]	počáteční stav		konečný stav	
	$d_0$	$h_0$	$d_1$	$h_1$
vzorek C1	15,08	24,03	20,07	14,57
vzorek C2	15,11	24,10	21,23	12,99
vzorek C3	15,09	24,10	20,22	14,34



Obr. 55 Zkušební vzorky 3

Trhací stroj je vhodný pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky kovů i stavebních materiálů. V tomto případě je stroj vybaven vestavěným délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Je to velmi přesné elektronické zařízení, které řídí zatěžování hydraulických zkušebních strojů (obr. 57). Naměřená data jsou zpracována programem M-TEST verze 1.7, který kromě tlakových zkoušek dokáže zpracovat i ostatní mechanické zkoušky s vyhodnocením a následným grafickým zpracováním.

Samotné měření probíhalo bez sebemenších potíží. Vzorky byly stlačeny přibližnou silou 320 kN a ani v tomto případě materiál nebyl porušen. Okolní teplota snímána nebyla. Řídicí jednotka navíc zaznamenávala hodnoty rychlosti přechování, která byla u všech tří vzorků stejná a to:  $v_3 = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 56 Hydraulický trhací stroj ZD 40 [31]



Obr. 57 Řídicí jednotka EDC 60 [31]

Dále byly opět provedeny základní výpočty (vycházelo se z tabulky 6), logaritmická deformace podle vzorce (2.2):

$$\varphi_{C1} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{14,57}{24,03} = -0,606$$

$$\varphi_{C2} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{12,99}{24,10} = -0,539$$

$$\varphi_{C3} = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{14,34}{24,1} = -0,595$$

poměrné přetvoření podle vztahu (2.4):

$$\varepsilon_{C1} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,03 - 14,57}{24,03} = 0,394$$

$$\varepsilon_{C2} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,10 - 12,99}{24,10} = 0,461$$

$$\varepsilon_{C3} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{24,10 - 14,34}{24,10} = 0,405$$

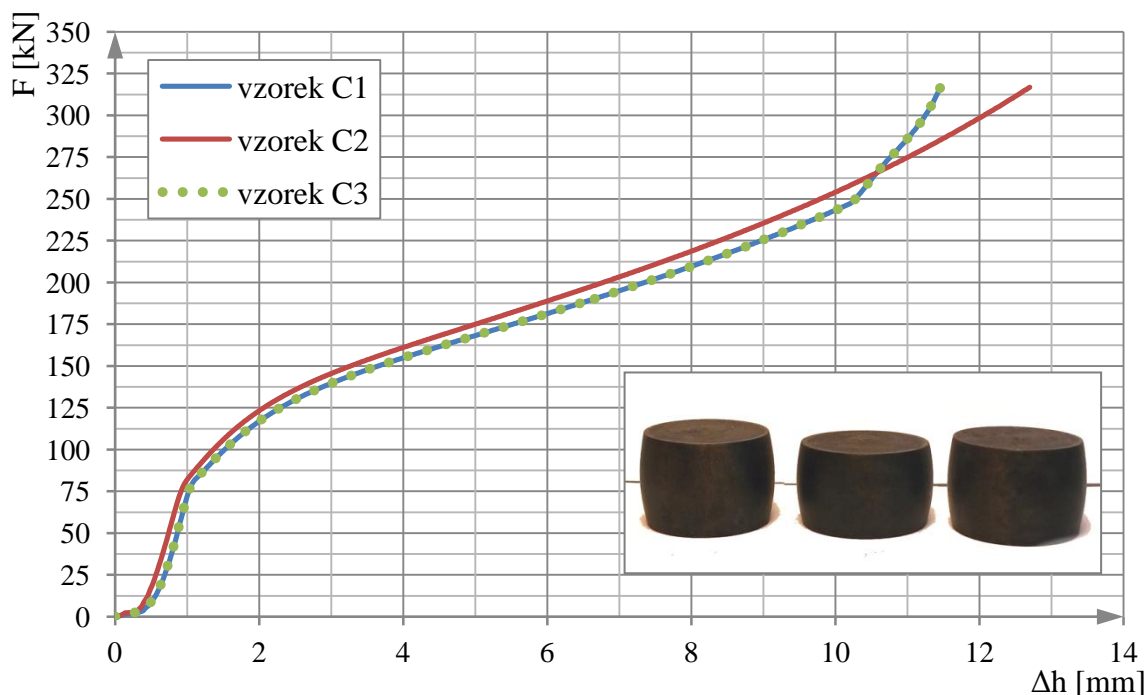
a rychlost pohybu beranu stroje dle (2.6):

$$v_{C1} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,03 - 14,57}{23,64 - 0,74} = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C2} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,10 - 12,99}{25,72 - 0,24} = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

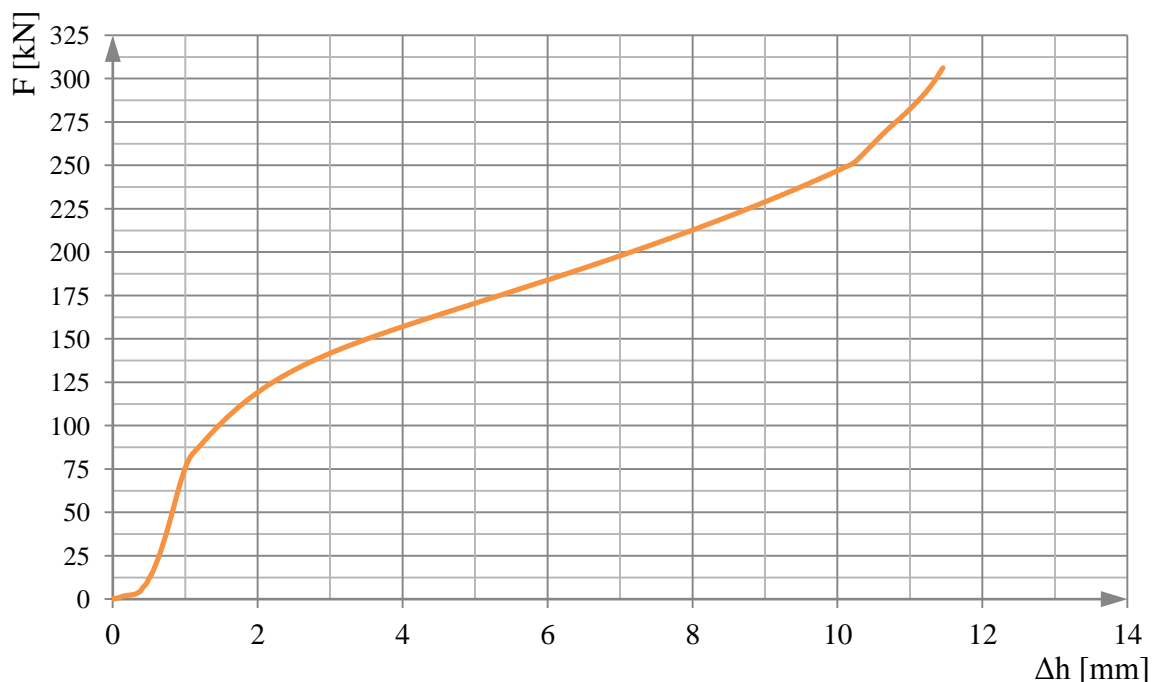
$$v_{C3} = \frac{\Delta h}{t_1 - t_0} = \frac{24,10 - 14,34}{23,64 - 0,74} = 0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Spočítané hodnoty rychlosti se nepatrně liší od hodnot, které zaznamenal samotný stroj, což mohlo být způsobeno chybným změřením vzorků. Ukončení testu nastává opět uložení dat a následným vykreslením pracovních diagramů (obr. 58).



Obr. 58 Pracovní diagram přechovací zkoušky zhotovené na stroji ZD 40

Z grafu je zřejmé, že průběhy vzorků C1 a C3 jsou naprosto totožné, to je způsobené velkou přesností měřícího zařízení. Do přibližné síly 5 kN se síla téměř nemění. Tato prodleva je způsobena hydraulickým chodem, kdy se k sobě plochy kovadel přibližovaly naprázdno. Z obrázku 58 byla vytvořena průměrná křivka, která je znázorněna na obrázku 59.



Obr. 59 Průměrné hodnoty z pýchovací zkoušky vyhodnocené z trhačího stroje

Materiál se choval pružně opět do hodnoty přibližně 80 kN. Charakteristická křivka vykazuje první dvě fáze. Odklon křivky v poslední fázi mohl být způsoben vměstkem nebo jinou nečistotou a to zapříčinilo větší tření.

Vzorový výpočet pro tvorbu křivky zpevnění byl proveden ve zpýchované výšce  $h = 15,00$ , objem zůstává stejný:

Výpočet okamžitého středního průměru podle rovnice (2. 8):

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h_i}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4257,05}{\pi \cdot 15,00}} = 19,01 \text{ mm}$$

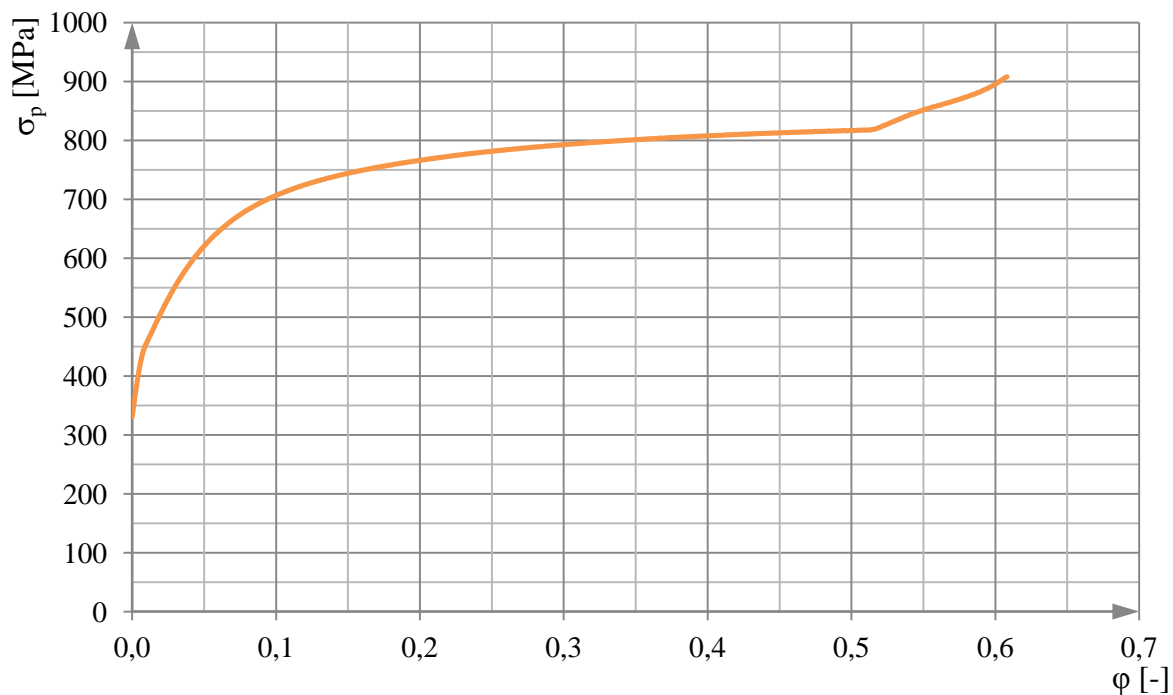
Následně po výpočtu okamžitého středního průměru lze dosadit do rovnice (2. 9), pro zjištění okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_{si}^2} = \frac{4 \cdot 230154}{\pi \cdot 19,01^2} = 811,29 \text{ MPa}$$

Druhá osa vyžaduje okamžitou hodnotu logaritmického přetvoření v dané výšce 'h'. Ta byla vypočtena pomocí vztahu (2. 2):

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{15,00}{24,08} = -0,473$$

Po dosažení všech potřebných hodnot byl vyhotoven graf přirozeného přetvárného odporu pro ocel 16.231.3, který je znázorněn na obrázku 60.

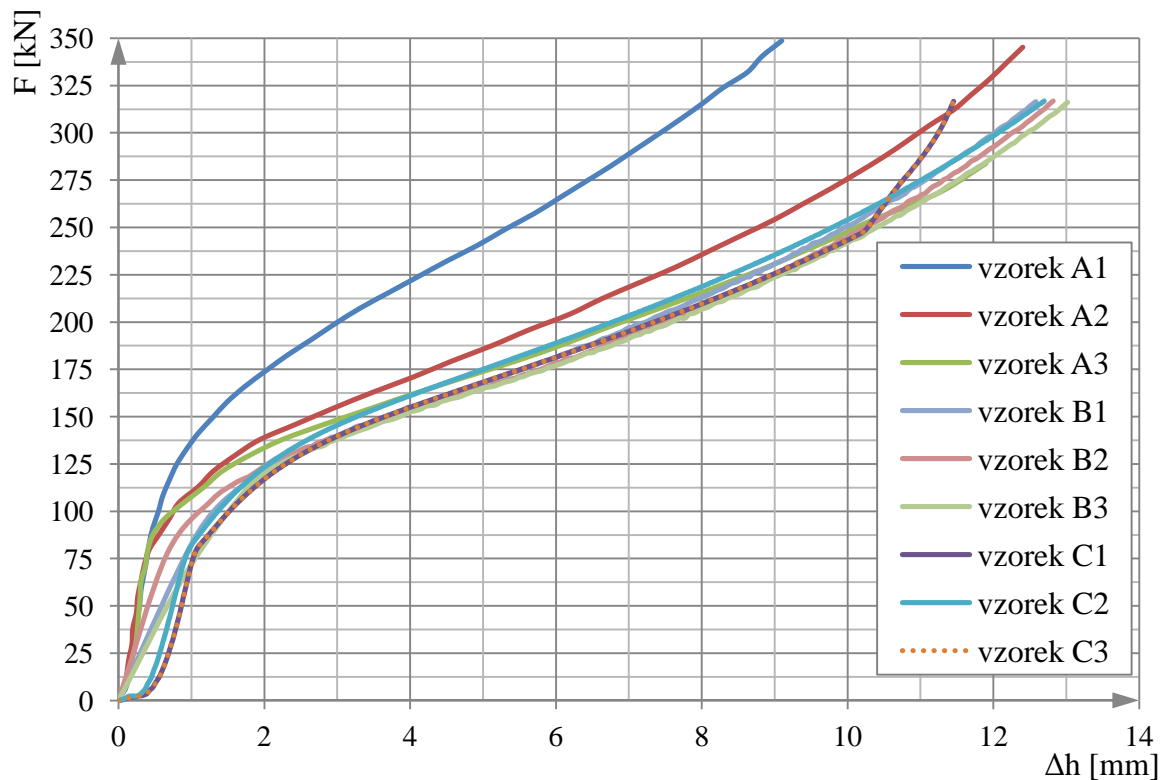


Obr. 60 Křivky zpevnění pro vzorky C

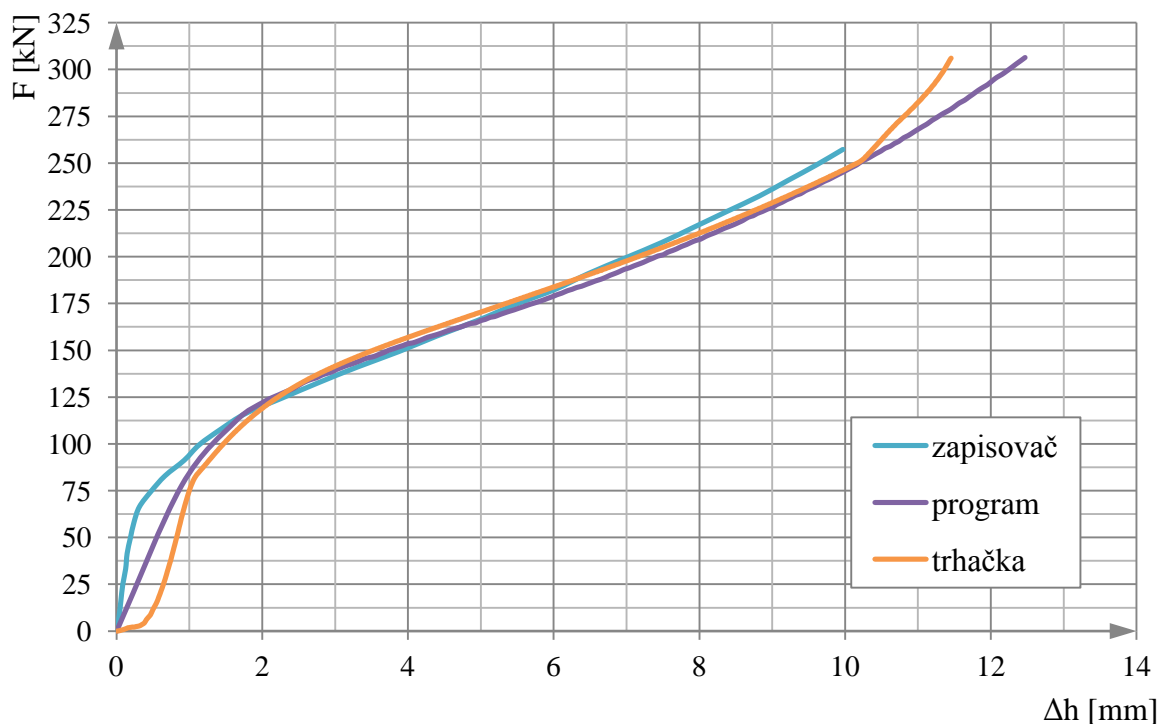
Deformace v místě 0,35 odpovídá zpevnění o hodnotě 800 MPa, což je shodné s předešlými hodnotami.

### 3.4 Porovnání výsledků

Po uskutečnění všech tří experimentů bylo všech devět křivek vykresleno do jednoho grafu (obr. 61). Pro přehlednost a představu byly do jednoho grafu (obr. 62) vykresleny i křivky průměrů jednotlivých metod vyhodnocování.

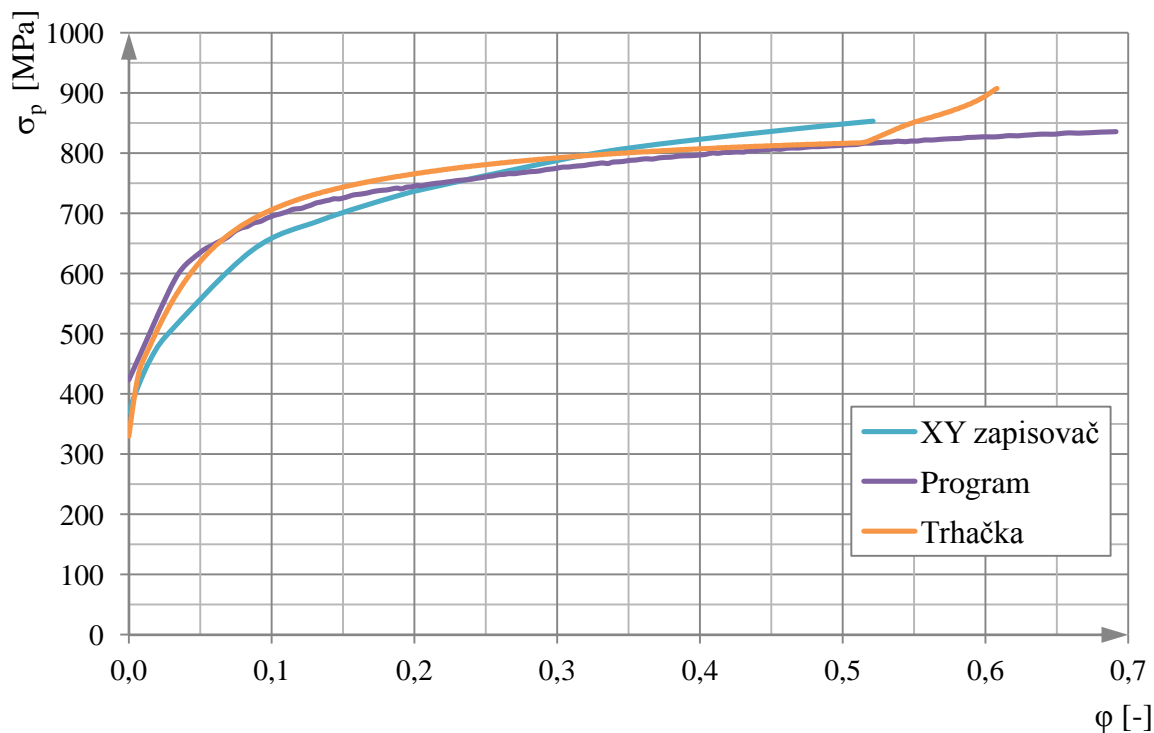


Obr. 61 Hodnoty zpěchovaných vzorků



Obr. 62 Průměrné hodnoty zpěchovaných vzorků vyhodnoceny různým způsobem

Jak je vidět na obrázku 62, průběhy průměrů jsou si velmi podobné až na drobné nepřesnosti. Nejvíce se křivky od sebe liší v první fázi, což je způsobeno rozdílným najetím kovadel k pěchovacímu nástroji. Z obrázku je tedy zřejmé, že se dá zapisovač efektivně nahradit programem. Jako kontrola zde slouží křivka z trhačického stroje. Na obrázku 63 jsou znázorněny křivky zpevnění pro jednotlivé metody vyhodnocení.



Obr. 63 Křivky zpevnění pro ocel 16 232.3 z jednotlivých výstupů

Křivky v tomto obrázku jsou si také téměř podobné, až na mírnou odlišnost liniového zapisovače, což může způsobovat nedostatek odečtených dat z milimetrového papíru.

## ZÁVĚRY

Cílem práce bylo ověření správnosti a funkčnosti počítačového vyhodnocení pýchovacích zkoušek prostřednictvím nově zakoupeného měřicího modulu. Porovnávat se měly hodnoty vyhotovené klasickým způsobem a pomocí softwaru. Kromě toho byla naměřená data srovnána i s hodnotami, které byly naměřeny na hydraulickém zkušebním stroji ZD 40.

V experimentální části se pýchovaly tři válcové vzorky z oceli 16 231.3 třemi způsoby a povrch zkušebních těles byl opatřen mazivem Delta 144 s přísadou kysličníku kademnatého. Pokus probíhal na hydraulickém lisu CZR 600 a naměřená data byla zaznamenána liniovým zapisovačem. Následně byly použity vzorce pro výpočet hodnot důležitých, jak pro tvorbu pracovního diagramu, tak i pro průměrnou křivku zpevnění. Posléze byl proveden stejný pokus, ale vyhodnocení hodnot se uskutečnilo pomocí softwaru Dewesoft od firmy Dewetron. Po úspěšném zapojení, nastavení měřících kanálů a programu, byly hodnoty zaznamenány a uloženy do počítače. Po potřebných výpočtech byly vykresleny grafy, které znázorňovaly průběhy pýchovacího procesu. Navíc byla vykreslena i průměrná křivka zpevnění. Pro ověření byl poslední pokus proveden na hydraulickém univerzálním stroji ZD 40 s měřicí jednotkou a programem M–TEST. Následující postup tvorby grafů byl obdobný jak u předešlých metod vyhodnocení.

Z vykreslených pracovních průběhů a křivek přetvárných odporů lze usoudit, že liniový zapisovač a zesilovač se dá efektivně inovovat měřícím modulem a programem od firmy Dewesoft. Toto tvrzení také potvrzuje výstup z trhacího stroje. I přes nesnadné nastavení je vhodné zapisovač nahradit, protože výhody nového postupu stále převládají. Použitím programu odpadá ruční vyhodnocování, což je časově úspornější a efektivnější.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Axial-Torsion Test. *ADMET: Material Testing System Manufacture* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://admet.com/test-types/axial-torsion-testing/>
2. Bechem - objemové tváření za studena. *LUBRICANT* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.lubricant.cz/46-lubricant-s-r-o/produkty/bechem-plasticka-a-specialni-maziva/bechem-technika-tvareni/bechem-objemove-tvareni-za-studena>
3. BLAŠČÍK, František a Karol POLÁK. *Teória tvárnenia*. Bratislava: Alfa, 1985, 374 s.
4. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.
5. Destruktivní zkoušky. *QP Qualitätsprüfungen GmbH* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.qpgmbh.de/index.php?id=46&L=3>
6. DEWE-30: Modular signal conditioning chassis. *DEWETRON: Test and measurement solution* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.dewetron.com/int/products/signal-conditioning/dewe-30-chassis/>
7. DEWESoft. *DEWETRON: Test and measurement solution* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.dewetron.com/products/software/dewesoftm/>
8. DRASTÍK, František a Jiří ELFMARK. *Plastometry a tvařitelnost kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 386 s.
9. DRMIL, Jaroslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/zkousky\\_mat.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/zkousky_mat.pdf)
10. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992, 524 s. Technický průvodce. ISBN 80-030-0651-1.
11. FARLÍK, Alois a Emanuel ONDRÁČEK. *Teorie dynamického tváření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 314 s.
12. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
13. FOREJT, M., A. HUMÁR, M. PÍŠKA a L. JANÍČEK. Experimentální metody [online]. Brno. 2003 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_\\_cviceni\\_\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf)
14. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
15. FOREJT, Milan. *Teorie tváření: Návodý do cvičení* [online]. Brno, 2004 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/teorie\\_tvareni\\_\\_navody\\_do\\_cviceni\\_\\_forejt.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf)
16. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 9781107004528.

17. HRUBÝ, Jiří. *Strojírenská technologie* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hru45/>
18. Jednoosá pevnost v tlaku. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <https://www.uef-josef.eu/plone/CEG/vyzkum/zkousky/pevnosti-vlastnosti/jednoosa-pevnost-v-tlaku>
19. Kapacitní snímače. *Energetický ústav odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-03.htm>
20. Lineární snímač dráhy Gefran PMI. *Bamas - elektro: Termočlánky - snímače - topné spirály - regulátory* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.bamas-elektro.cz/linearni-snimace-drahy/551-linearni-snimac-drahy-gefran-pme-pmi-pma.html>
21. Materiálové normy. *Ferona: Sortimentní katalog* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)
22. *Mechanické zkoušky* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tlakova\\_zkouska.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tlakova_zkouska.pdf)
23. Měření síly. *Energetický ústav odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-10.htm>
24. Měřicí technika mechanických veličin s kovovými tenzometry. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-mechanickych-velicin-s-kovovymi-tenzometry.html>
25. Měřicí technika: Sondy teplotní - typ K. *Micronix* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/neelektricke-veliciny/teplota-a-vlhkost/sondy-teplotni/typ-k/lutron-tp-01.html>
26. MEYERS, Marc A. a Krishan Kumar CHAWLA. *Mechanical behavior of materials*. 2nd ed. / 5th printing with corrections 2010. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, xxii, 856 s. ISBN 9780521866750.
27. Nelegované konstrukční oceli. *Slidegur* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://slidegur.com/doc/1300119/nelegovan%C3%A9-konstruk%C4%8Dn%C3%AD-oceli>
28. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I. Plošné a objemové tváření*. 2. Brno: VUT, 1992, 171 s. ISBN 8021404043.
29. Oleje a Maziva. *ELBOGEN* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.ellbogen.cz/oleje-a-maziva/>
30. Oleje pro tváření kovů, neobsahující chlór. *Lubstar: The Oil Company* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.lubstar.cz/cs/omv/oleje-pro-tvareni-kovu-neobsahujici-chlor/>
31. PODANÝ, Kamil. *Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/: Parametrické údaje*.

32. Podklady pro výuku - letní semestr: Mechanické vlastnosti a jejich charakteristiky 1. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/02-BUM%20-%20mechanicke%20vlastnosti%201.pdf>
33. Punkt-Biegeversuch an Papierwerkstoffen. *Zwick/Roell* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.zwick.de/de/anwendungen/papier/pruefungen-an-vollpappe-und-ihren-produkten/3-punkt-biegeversuch.html>
34. RENOFORM. *COMBINATA* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.combinata.cz/index.php?route=product/product&product\\_id=3719](http://www.combinata.cz/index.php?route=product/product&product_id=3719)
35. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část II.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. ISBN 9788021444065.
36. Snímače síly Sika. *JPS měření a regulace* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/aktuality/aktuality/seznam\\_aktualit/snimace-sily-sika.html](http://www.jsp.cz/cz/aktuality/aktuality/seznam_aktualit/snimace-sily-sika.html)
37. Technologie objemového tváření - kování. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/03.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm)
38. *Technologie tváření kovů* [online]. BEROUN, Stanislav. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886>
39. *Termická analýza - teorie* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_termicka\\_analyza/teorie.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/teorie.htm)
40. Understanding Compressive Stress in Steel. *Speaking of precision* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://pmpaspeakingofprecision.com/2011/10/18/understanding-compressive-stress-in-steel/>
41. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin.* 2. vyd. Praha: SNTL, 1983, 371 s.
42. Zkouška pevnosti v tlaku. *Slide Player* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1958341/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Název	Jednotka
A	Válcová oblast	[-]
a	Vzdálenost vybrání od kraje vzorku	[-]
B	Prstencová oblast	[-]
C	Uhlík	[-]
Cr	Chrom	[-]
b	Hloubka vybrání	[mm]
$b_k$	Šířka kovádky	[mm]
$b_t$	Šířka tyče	[mm]
$d_{\min}$	Minimální průměr	[mm]
$d_{\max}$	Maximální průměr	[mm]
$d_s$	Střední průměr vzorku	[mm]
$d_{si}$	Okamžitá hodnota středního průměru	[mm]
$d_0$	Počáteční průměr vzorku	[mm]
$d_1$	Konečný průměr vzorku	[mm]
F	Tlaková síla	[N]
$F_i$	Okamžitá síla v místě 'i'	[N]
$F_{\text{tvářecí}}$	Tvářecí síla	[N]
f	součinitel tření	[-]
h	Okamžitá výška	[mm]
$h_i$	Výška vzorku v místě 'i'	[mm]
$h_0$	Počáteční výška vzorku	[mm]
$h_1$	Konečná výška vzorku	[mm]
k	Deformační citlivost tenzometru	[-]
l	Délka	[mm]
M	Souhrnný součinitel	[-]
Mn	Mangan	[-]
Ni	Nikl	[-]
p	Měrný tlak	[MPa]
R	Odpor válcového vodiče	[ $\Omega$ ]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]
$R_1$	Odpor vyvolané tenzometrem 1	[ $\Omega$ ]
$R_2$	Odpor vyvolané tenzometrem 2	[ $\Omega$ ]
$R_3$	Odpor vyvolané tenzometrem 3	[ $\Omega$ ]
$R_4$	Odpor vyvolané tenzometrem 4	[ $\Omega$ ]
$r_B$	Poloměr B	[mm]
$r_C$	Poloměr C	[mm]
S	Čelní plocha	[mm <sup>2</sup> ]
$S_0$	Počáteční průřez vzorku	[mm <sup>2</sup> ]
$S_1$	Konečný průřez vzorku	[mm <sup>2</sup> ]
T	Teplota tváření	[°C]
$t_0$	Konečný čas petchování	[s]
$t_1$	Počáteční čas petchování	[s]
U	Zlomový bod	[-]
$U_m$	měřicí napětí	[mV]
$U_n$	napájecí napětí	[V]
V	Objem vzorku	[mm <sup>3</sup> ]
$v_0$	Okamžitá rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]

$\alpha$	Úhel kuželového zahloubení	[°]
$\Delta h$	Stlačení vzorku	[mm]
$\Delta R$	Relativní změna odporu	[Ω]
$\Delta R_t$	Změna od teploty	[Ω]
$\Delta R_{tl}$	Změna od zatížení v osové směru	[Ω]
$\varepsilon$	Poměrné přetvoření	[-]
$\dot{\varepsilon}$	Rychlost poměrného přetvoření	[s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Poissonovo číslo materiálu měrného členu	[-]
$\mu_0$	Materiálová konstanta	[-]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\rho$	Měrný odpor materiálu	[Ω]
$\sigma_C$	Hodnota napětí v bodě 'C'	[MPa]
$\sigma_d$	Deformační přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_p$	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{pi}$	Okamžitý přirozený přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_r$	Napětí v radiálním směru	[MPa]
$\sigma_t$	Tlakové napětí	[MPa]
$\sigma_{tr}$	Vnitřní tlakové napětí	[MPa]
$\sigma_z$	Napětí ve směru osy 'z'	[MPa]
$\sigma_{zs}$	Střední osové napětí	[MPa]
$\sigma_1$	Napětí v ose x	[MPa]
$\sigma_2$	Napětí v ose y	[MPa]
$\sigma_3$	Napětí v ose z	[MPa]
$\tau_f$	Třecí smykové napětí	[MPa]
$\varphi$	Logaritmická deformace	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost přetvoření	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi_1$	Přetvoření ve směru x	[-]
$\varphi_2$	Přetvoření ve směru y	[-]
$\varphi_3$	Přetvoření ve směru z	[-]
$-\mu\Delta R_{tl}$	Změna zatížení v příčném směru	[Ω]

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

- Obr. 1 Tahová zkouška
- Obr. 2 Tlaková zkouška
- Obr. 3 Ohybová zkouška
- Obr. 4 Zkouška krutem
- Obr. 5 Vznik praskliny
- Obr. 6 Vzorek před a po skončení pēchovací zkoušky
- Obr. 7 Zjednodušená závislost mechanických vlastností na teplotě
- Obr. 8 Schéma aktuálního zapojení
- Obr. 9 Měřicí modul
- Obr. 10 Pracovní diagram
- Obr. 11 Tlakové kužely
- Obr. 12 Poměr výšek válcového vzorku
- Obr. 13 Křivky zpevnění pro ocel 14 109.3
- Obr. 14 Schémata napětí a deformace při pēchovací zkoušce
- Obr. 15 Pēchování válce – schéma napětí
- Obr. 16 Pēchování válce, vznik oblastí
- Obr. 17 Rozložení napětí při pēchování vzorku s rovnými čely
- Obr. 18 Průběh rychlosti deformace
- Obr. 19 Pēchování válcového vzorku – schéma napětí
- Obr. 20 Rozložení osového napětí
- Obr. 21 Rozložení osového napětí
- Obr. 22 Vliv mazání a úpravy čelních ploch na tlakovou sílu
- Obr. 23 Vzorek s vybráním
- Obr. 24 Kuželové zahloubení
- Obr. 25 Vzorek s podložkami
- Obr. 26 Pēchování tyče
- Obr. 27 Prstencový snímač tlakové síly
- Obr. 28 Základní konstrukce snímače
- Obr. 29 Příložný tenzometr
- Obr. 30 Drátkový (vlevo) a fóliový tenzometr
- Obr. 31 Polovodičový tenzometr
- Obr. 32 Deformace vodiče
- Obr. 33 Celý most, úloha tlak
- Obr. 34 Kapacitní snímač dráhy

- Obr. 35 Schéma indukčnostního snímače dráhy
- Obr. 36 Indukčnostní snímač dráhy
- Obr. 37 Schéma zapojení
- Obr. 38 Termočlánek typu K
- Obr. 39 Pěchovací nástroj
- Obr. 40 Zkušební vzorky A
- Obr. 41 Hydraulický lis CZR 600
- Obr. 42 Měřicí zařízení
- Obr. 43 Zesilovač typ KWS 6A-5
- Obr. 44 XY zapisovač typ 4106
- Obr. 45 Pracovní diagram pěchovací zkoušky vyhodnocené pomocí zapisovače
- Obr. 46 Průměrná hodnota vyhodnocená pomocí zapisovače
- Obr. 47 Křivka zpevnění pro vzorky A
- Obr. 48 Zkušební vzorky B
- Obr. 49 Zadní strana modulu se zapojenými měřicími prvky
- Obr. 50 Zapojení počítače při zaznamenávání hodnot
- Obr. 51 Prostředí programu a vykreslení hodnot do XY grafu
- Obr. 52 Pracovní diagram pěchovací zkoušky vyhodnocené pomocí softwaru
- Obr. 53 Průměrné hodnoty vzorku B z pěchovací zkoušky vyhodnocené pomocí softwaru
- Obr. 54 Křivka zpevnění pro vzorky B
- Obr. 55 Zkušební vzorky 3
- Obr. 56 Hydraulický trhací stroj ZD 40
- Obr. 57 Řídící jednotka EDC 60
- Obr. 58 Pracovní diagram pěchovací zkoušky zhotovené na stroji ZD 40
- Obr. 59 Průměrné hodnoty z pěchovací zkoušky vyhodnocené z trhacího stroje
- Obr. 60 Křivky zpevnění pro vzorky C
- Obr. 61 Hodnoty zpěchovaných vzorků
- Obr. 62 Průměrné hodnoty zpěchovaných vzorků vyhodnoceny různým způsobem
- Obr. 63 Křivky zpevnění pro ocel 16 232.3 z jednotlivých výstupů
- Tab. 1 Rázové rychlosti nástroje u tvářecích strojů
- Tab. 2 Druhy termočláneků a rozsah použití
- Tab. 3 Vlastnosti oceli
- Tab. 4 Rozměry zkušebních vzorků A
- Tab. 5 Rozměry zkušebních vzorků B
- Tab. 6 Počáteční a konečné rozměry vzorků C