



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYHODNOCENÍ PĚCHOVACÍ ZKOUŠKY

EVALUATION OF UPSETTING TEST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROMAN VÁVRA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ŘIHÁČEK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Roman Vávra

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:

Vyhodnocení pēchovací zkoušky

v anglickém jazyce:

Evaluation of upsetting test

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pēchovací zkouška je jednou ze základních metod sloužících ke zjišťování mechanických charakteristik materiálů. Záznam průběhu pēchovací zkoušky a její vyhodnocení lze pak provádět různými přístupy s využitím různého technického vybavení měřící laboratoře. Požaduje se proto zpracování literární studie se zaměřením na pēchovací zkoušky. Práce bude též obsahovat vyhodnocení pēchovacích zkoušek provedených na konkrétních vzorcích. Předpokládá se ověření výsledků získaných pomocí měřící stanice Dewetron v součinnosti s PC pomocí srovnávacích měření s výstupem na souřadnicový zapisovač, příp. i jinými přístupy.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce bude vypracování literární rešerše se zaměřením na pēchovací zkoušky. Práce bude rovněž zahrnovat praktická měření a vyhodnocení pēchovacích zkoušek na konkrétních vzorcích, které budou provedena na lisu CZR 600. Dále srovnání vyhodnocení pēchovacích zkoušek pomocí měřící stanice Dewetron s klasickým přístupem, a tedy i zhodnocení výhod či nevýhod použití software pro vyhodnocení pēchovacích zkoušek.

Seznam odborné literatury:

1. DVORÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. MORRIS, Alan S. Measurement and instrumentation principles. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, 475 p. ISBN 0750650818.
4. PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
5. SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno:VA, 1988. 88 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Řiháček

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

V Brně, dne 13.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VÁVRA Roman: Vyhodnocení pēchovací zkoušky

Tato práce se zabývá teoretickým i praktickým zpracováním pēchovacích zkoušek. Je vysvětlen jejich významem ve strojírenství. Zároveň jsou zde popsány různé druhy prováděných zkoušek a způsob jejich vyhodnocování. Dále se práce zabývá provedením experimentu na zadaném materiálu MS 68. Tento materiál byl pēchován za použití dvou zkušebních strojů vybavených měřicím softwarem. Jedním strojem je hydraulický lis CZR 600 se softwarem Dewesoft a druhým je univerzální zkušební stroj ZD 40 používající software M-Test. Na základě získaných dat je v práci provedeno vyhodnocení, jehož výsledkem jsou křivky pētvárných odporů zkoušeného materiálu.

Klíčová slova: Pēchovací zkouška, zkušební těleso, pētvárný odpor, zpevnění

ABSTRACT

VÁVRA Roman: Evaluation of upsetting tests

This work is focused on theoretical and practical processing upsetting test. There is an explanation of their significance in engineering. Also, there are described various kinds of tests and their evaluation. Furthermore, the work deals with the experiment for a specified material MS 68. This material was compacted using two test machines equipped with measuring software. First machine is a hydraulic press CZR 600 with software DEWESoft and the second is a universal testing machine ZD 40 using software M-Test. An evaluation based on the collected data is included in the form of deformation resistance curves of tested material.

Keywords: Upsetting test, the test piece, deformation resistance, hardening

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁVRA, Roman. *Vyhodnocení pěchovací zkoušky*. Brno, 2015. 42 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 28.5.2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, dále pánům Ing. Kamilu Podanému, Ph.D a Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při provedení zadaného experimentu, rovněž bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při mém studiu.

OBSAH

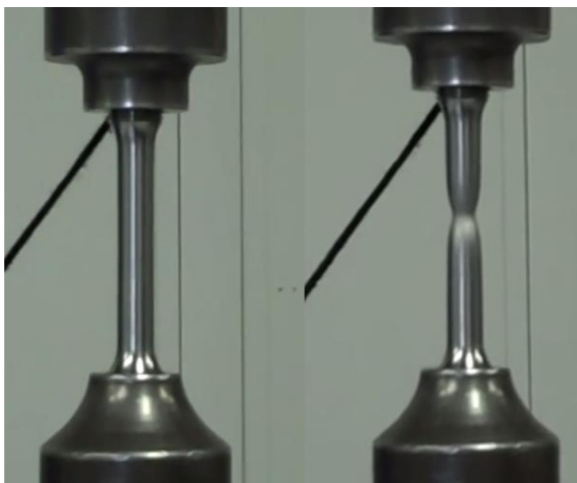
Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD.....	10
1 PĚCHOVACÍ ZKOUŠKA	11
1.1 Přetvárný odpor	12
1.1.1 Vliv tření.....	13
1.1.2 Vliv teploty.....	14
1.1.3 Vliv rychlosti přetvoření.....	18
1.2 Druhy pěchovacích zkoušek.....	19
1.2.1 Přehled základních pěchovacích zkoušek.....	19
1.2.2 Zkušební tělesa a úpravy	21
1.3 Zkušební stroje	26
1.4 Postup vyhodnocení zkoušky	27
2 EXPERIMENT.....	30
2.1 Pěchovaný materiál.....	30
2.2 Pěchovací zkouška na lisu CZR 600	31
2.2.1 Popis měření	32
2.2.2 Vyhodnocení.....	34
2.3 Pěchovací zkouška na ZD40	40
2.3.1 Vyhodnocení.....	40
2.4 Srovnání provedených zkoušek.....	43
3 ZÁVĚRY	44
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	

ÚVOD [14], [29], [19], [11], [7], [22], [31], [10], [1], [16], [4]

Zpracování kovových materiálů tvářením, je jedním z hlavních odvětví strojírenství. Mezi základní operace patří technologie objemového tváření. Objemové tváření je velice důležitou technologickou operací, při které je zpracovávané součásti dán jednak požadovaný tvar, ale zároveň také požadované mechanické vlastnosti. Ty jsou získány díky vláknité struktuře výtvarku, která například při zpracování třískovým obráběním nebude dosažena. Volba technologické operace objemového tváření, je také vhodná pro sériovou výrobu, jelikož se tak ušetří množství potřebného materiálu.

Pro tuto technologii zpracování, je však třeba znát mechanické vlastnosti daného materiálu, k jejich zjišťování se používá různých testů a zkušebních strojů v závislosti na tom, jaké mechanické vlastnosti mají být zjištěny.

Ke zjištění mechanických vlastností materiálu se používá jednoúčelových, nebo univerzálních zkušebních strojů. Materiál bývá testován, zkouškou tahem (obr. 1a), tlakem (obr. 1b), ohybem (obr. 1c), krutem (obr. 1d) nebo smykem. Zkoušky mohou probíhat buď staticky (relativně pomalým zvyšováním působící síly), nebo dynamicky (rázově).



a) Tahová zkouška



b) Tlaková zkouška



c) Zkouška ohybem



d) Zkouška krutem

Obr. 1 Zkoušky mechanických vlastností kovů [16], [4], [1]

1 PĚCHOVACÍ ZKOUŠKA [14], [25], [19], [11], [24], [10], [2], [8]

Pěchování je, jak již bylo řečeno, jednou ze základních operací strojírenské výroby. Používána pro sériovou a hromadnou výrobu. Pomocí něho můžou být získány velmi rychle, s maximálním využitím materiálu přesné výrobky. Spadá do technologie objemového tváření, protože je tvářen celý objem materiálu.

Operace pěchování je využita, mimo jiné, při výrobě průtlačků a výtvarků (obr. 2). Takovými jsou plná tělesa, jako například šrouby s hlavami různých tvarů, šrouby s různě stupňovitým dřikem, nebo kombinace obou. Vyrábí se také dutá tělesa, která mohou být vyrobena s pláštěm stupňovitě vytvořeným, se dnem nebo beze dna. Případně lze vyrobit kombinace plných a dutých těles.



Obr. 2 Ukázka výrobků získaných objemovým tvářením [2]

Změna tvaru polotovaru tvářením je vyvolaná působením vnější síly, která vyvolá v materiálu prostorové napětí takové, aby změna byla trvalá a aby zároveň nedošlo k porušení soudržnosti materiálu. Tváření může probíhat, za studena za poloohřevu a za tepla.

Každé plastické deformaci (trvalé změně tvaru), předchází elastické deformace (dočasná změna tvaru). Pokud na vzorek působí vnější síly, které nepřekročí mez kluzu, vznikají zde pouze elastické deformace. Po odlehčení se vzorek vrací do původního tvaru a ani jeho mechanické vlastnosti nejsou ovlivněny. Při dosažení a překročení meze kluzu nastává plastická deformace a změna tvaru zde bude trvalá i po odlehčení vzorku, rovněž se změní jeho mechanické vlastnosti. Materiál se zpevňuje a jeho zásoba plasticity se zmenšuje.

Pěchování lze využít ke zjišťování materiálových charakteristik, důležitých pro tvářecí operace a to pomocí tzv. pěchovací zkoušky. Při zkoušce se za působení síly vyvozené tvářecím nástrojem zmenšuje výška pěchovaného tělesa a zvětšuje se jeho příčný průřez (obr. 3). Povrch pěchované součásti je tedy deformován plasticky a povrch tvářecího nástroje se deformuje pouze elasticky.

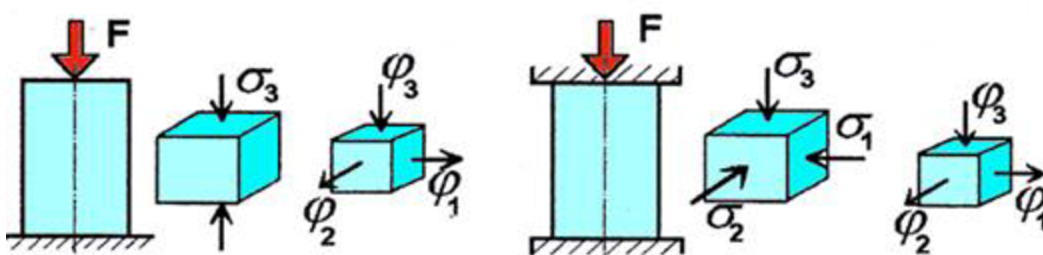


Obr. 3 Pěchování válcovitého tělesa

Pěchovací zkouška je tedy deformační zkouška mechanických vlastností materiálu. Deformace vzorku je vyvolána působením vnějších sil, jak bylo již zmíněno. Úkolem zkoušky je zjistit základní mechanické vlastnosti materiálu, jako jsou křivky přetvárných odporů, neboli křivky zpevnění. Tyto křivky pak ukazují závislost mezi přetvárným odporem a logaritmickým přetvořením. Přetvárný odpor je důležitým základním parametrem materiálu, jde o napětí mezi tvářecím nástrojem a tvářeným materiálem.

Díky znalosti křivek zpevnění lze určit ideální silové poměry pro tváření v závislosti na přetvoření materiálu. Z toho pak lze dále určit stroj potřebné síly, pro výrobu dané součásti a další.

V rozboru napjatosti pěchovací zkoušky, bereme při přetvoření v úvahu dvě základní schémata. Prvním je ideální stav napjatosti, kde při pěchování působí na pěchovanou součást pouze jednoosý tlak (obr. 4a). Zde pak nastává homogenní deformace, kdy jsou všechna napětí tlaková.

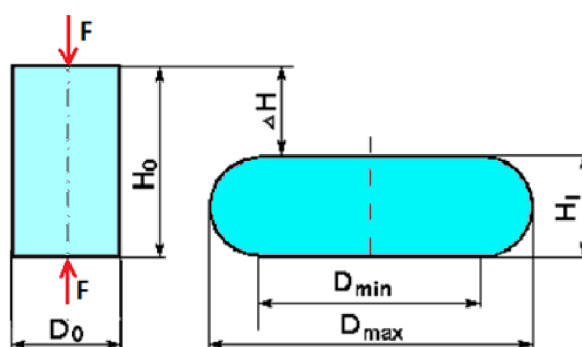


a) Ideální pěchování

b) Pěchování se třením

Obr. 4 Mechanické schéma deformace při pěchování [11]

V reálném případě na součást při tváření, mezi nástrojem a pěchovaným materiálem, působí tření. Materiál je v těsném kontaktu s nástrojem a to způsobuje, že je při procesu tváření je bržděn třením. To má za následek nehomogenní deformaci, jež vyvolává nepříznivá tahová napětí (obr. 4b). Takto vzniklá tahová napětí způsobují, že na pěchovaném vzorku vzniká tzv. soudečkovitost (obr. 5).



Obr. 5 Vznik soudečkovitosti [10]

1.1 Přetvárný odpor [11], [7], [10], [17], [26], [6], [12]

Velmi důležitou vlastností materiálů je, jak již bylo řečeno, jejich přetvárný odpor. Jde o odpor materiálu vůči vzniku plastické deformace a může být rozdělen na přirozený přetvárný odpor a deformační přetvárný odpor. Pro určení přirozeného odporu jsou stanoveny některé neměnné podmínky tváření. Takovými jsou konstantní rychlost, konstantní teplota přetvoření, chemické složení atd. Deformační přetvárný odpor počítá s měnícími se podmínkami při tváření. Těmi jsou změna teploty, přetvárné rychlosti, vliv tření při zkoušce atd.

U tváření za tepla je plastická deformace výrazně ovlivněna termodynamickými podmínkami, v ideálním stavu při této operaci nedochází ke zpevňování materiálu, protože proces zpevňování je provázen procesem dynamického odpevňování.

Odpor kovu proti přetvoření je tedy veličina závisící na chemickém složení, na struktuře materiálu, který tváříme a na termomechanických podmínkách při tváření (těmi jsou mimo jiné tření, rychlost, teplota přetvoření a velikost napjatosti materiálu).

1.1.1 Vliv tření [29], [11], [7], [18], [24], [23]

Tření značně ovlivňuje průběh pýchovací zkoušky, díky němu nelze dosáhnout jednoosého tlaku. Vzhledem k tomu, že deformace a napětí v pýchovaném tělese jsou pak nehomogenní, je hodnocena tzv. průměrná plasticita materiálu. Stupeň přetvoření pro konečný stav ε bývá vyjadřován vztahem (1.1).

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (1.1)$$

kde: h – konečná výška pýchovaného tělesa [mm]

h_0 – počáteční výška pýchovaného tělesa [mm]

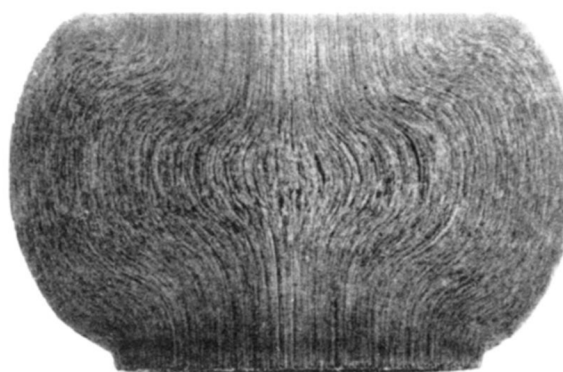
Pro vyjádření stupně deformace v procentech se výsledek vynásobí $\cdot 100$.

Průběh nehomogenní deformace způsobené kontaktním třením, může být pozorován pokud pýchovanou součást rozřízneme podél osy zatížení a provedeme metalografické úpravy pro zviditelnění jejích vláken, viz. obr.6.

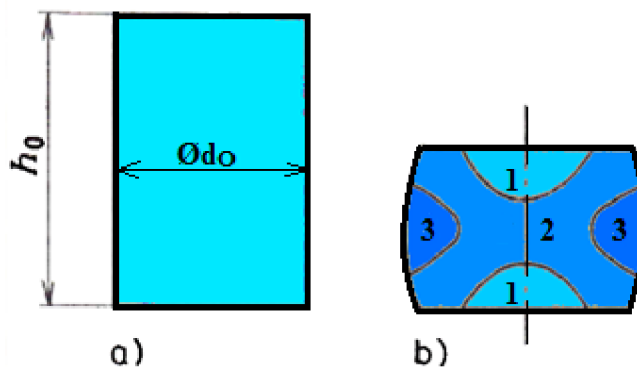
Na pýchovaném vzorku lze rozpoznat celkem 3 pásma deformace způsobená třením, jež schematicky vyobrazuje obr. 7b.

Pásmo 1 je pásmo přilnutí. Díky nejsilnějšímu účinku třecích sil na stykové ploše, je vzniklá deformace v této oblasti téměř zanedbatelná. Velikost třecích sil směrem do nitra vzorku slábne. Oblast 2 tzv. pásmo skluzu, je nejvíce deformovanou oblastí, vznikají zde největší smyková napětí. Ve 3. oblasti probíhá nižší deformace než v oblasti 2, ale vzniká zde tangenciální tahové napětí, jež se směrem k povrchu vzorku zvětšuje a má negativní vliv na mechanické vlastnosti součásti.

V důsledku nesterorodosti přetvoření vznikají v materiálu oblasti s různým stupněm zpevnění s různou velikostí zrn a podobně. Pro překonání kontaktního tření je třeba zvýšit tvářecí síly. Tření má tedy výrazný vliv na požadovanou přetvárnou sílu, na přetvárnou práci a rovněž na opotřebení tvářecího nástroje, s nímž je materiál v kontaktu.



Obr. 6 Vlákniatá struktura výkovku [24]



Obr. 7 Oblasti s různým přetvořením po deformaci [7]

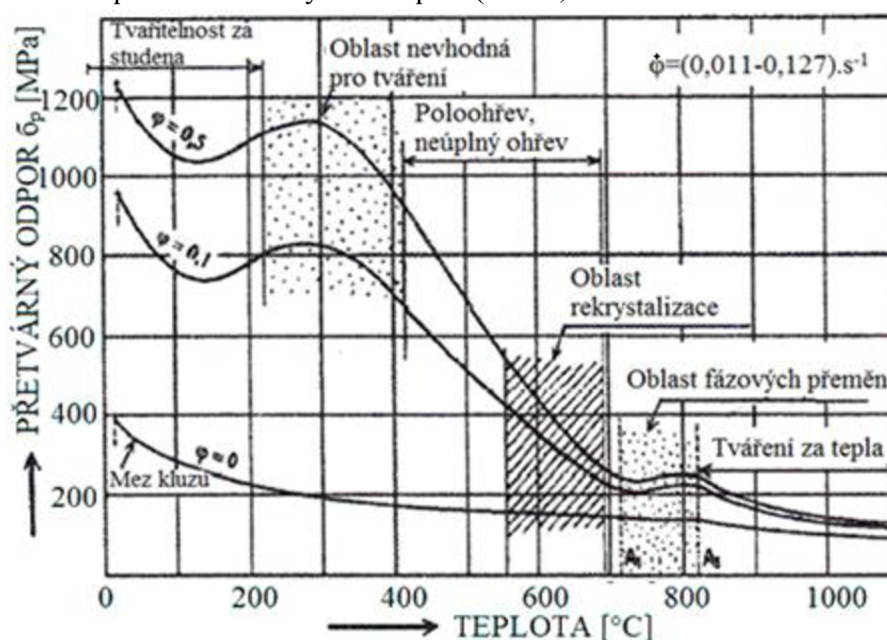
Pro snížení kontaktního tření je v praxi používáno technologických maziv, což vyžaduje úpravu zkoušených vzorků, například vybráním čelní plochy, fosfátováním, povlakováním povrchu plastickými hmotami atd. To zvyšuje časové i finanční náklady na provedení zkoušky. Tření je ovlivněno těmito faktory:

- Výrazný vliv na kontaktní tření, má kvalita opracování kontaktní plochy nástroje. Při použití maziva na broušených čelistech je kontaktní tření ve směru broušení asi o 20% menší než ve směru kolmém na směr broušení. To bylo nazváno jako anizotropie tření. Při práci s hrubě opracovaným nástrojem dosahuje anizotropie tření až 60%, to lze demonstrovat při pěchování válečku, jehož původní styková plocha se změní z kruhové na eliptickou. Mazivo tento nepříznivý vliv snižuje.
- Vliv na plastické tření má také chemický stav povrchu. Při důkladném očištění povrchu vzorku od kysličníků a nečistot bez použití maziva, dojde k výraznému zvětšení třecích sil. Může dojít až k lepení vzorku s nástrojem (zadření).
- Další vliv na součinitel plastického tření má teplota při tváření. Pokud tváříme za studena, bude získán nejmenší součinitel plastického tření, při zvyšování teploty pak roste do určité maximální hranice a při dalším zvyšování teploty znovu klesá, ale je vždy větší než při tváření za studena.
- Vliv rychlosti deformace, se projevuje tak že při zvyšování rychlosti se kontaktní tření snižuje, to způsobuje, že při tváření na lisech je tření o 20 až 25 % větší než při tváření na bucharech.
- Vhodný výběr maziva má na tření největší vliv. Mazivo má za úkol dobře přilnout ke kontaktnímu povrchu a vytvořit zde pevný mastičí film, po kterém tvářený materiál klouže. Po skončení tváření musí jít mazivo lehce odstranit.

Tření je záporný průvodní jev při tváření, a proto je třeba dělat opatření, která ho co nejvíce snižují. Nejpoužívanějšími postupy jsou zvýšení kvality povrchu nástroje, vhodné opracování povrchu vzorku a správná volba technologického maziva.

1.1.2 Vliv teploty [19], [11], [7], [22], [16]

Teplota při tváření má přímý vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Se zvyšující se teplotou klesá mez kluzu a tažnost materiálu vzrůstá. To je z praxe potvrzeno nižší potřebnou silou na přetvoření za vyšších teplot (obr. 8).



Obr. 8 Tvářecí teploty oceli [11]

Diagram na obr. 8 ukazuje, že tváření je podle teploty rozděleno na tváření zastudena (které probíhá pod teplotou rekrytalizace, jak je z grafu patrné), tváření za poloohřevu a za tepla. V závislosti na velikosti přetvoření jsou zde uvedeny tři křivky ukazující vliv teploty na přetvárný odpor materiálu.

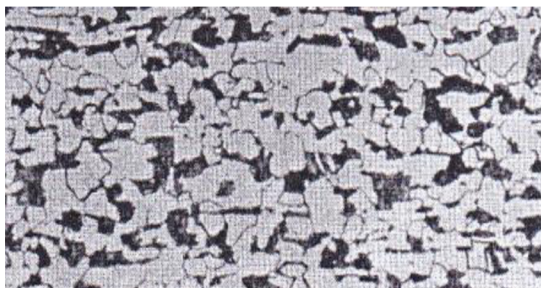
Některé kovy mohou mít za různých teplot různou krystalovou mřížku ($Fe\alpha$ a $Fe\delta$ – mřížka krychlová prostorově středěná, $Fe\gamma$ mřížka krychlová plošně středěná). To lze taktéž pozorovat na obr. 8, kde jsou zvýrazněny oblasti nevhodné pro tváření. Tyto vznikají díky tomu, že takový materiál je za určitých teplot složen z více krystalických mřížek. Změna krystalické mřížky (způsobená vlivem teploty) se nazývá překrytalizace.

Rozhraní mezi tvářením za studena a za tepla závisí na absolutní teplotě rekrytalizace daného materiálu. Ta je určena např. vztahem dle Bočvara (1.2), kde teplota rekrytalizace vychází z absolutní teploty tavení materiálu.

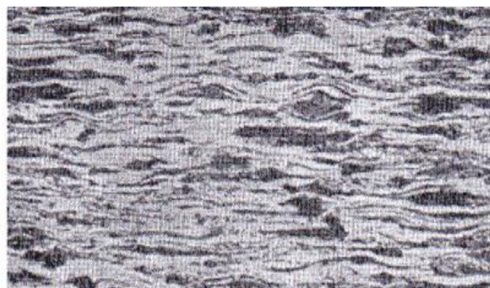
$$T_{REK} = (0,35 \text{ až } 0,4) \cdot T_{TAV} \quad (1.2)$$

kde: T_{REK} – Teplota rekrytalizace [°C]
 T_{TAV} – Teplota tavení [°C]

Pro tváření za studena to je hluboko pod teplotou T_{REK} . Neprobíhají zde výrazné uzdravovací procesy a dojde k protažení zrn ve směru působící síly. První se deformují zrna s vhodně orientovanou mřížkou a při další deformaci dochází ke sjednocování orientace mřížek sousedních zrn, rovněž ve směru působení síly (ve směru tváření), čímž vzniká tzv. deformační textura a materiál je zpevňován. Na obr. 9a lze pozorovat strukturu materiálu po 10% přetvoření, která je k nerozeznání od struktury nedeformované. Jak ukazuje obr. 9b po 30% přetvoření stejného materiálu je zde deformační textura již patrná. Tvářeným materiálem byla feriticko-perlitická ocel u které je struktura materiálu dobře pozorovatelná.



a) Feriticko-perlitická ocel po 10%



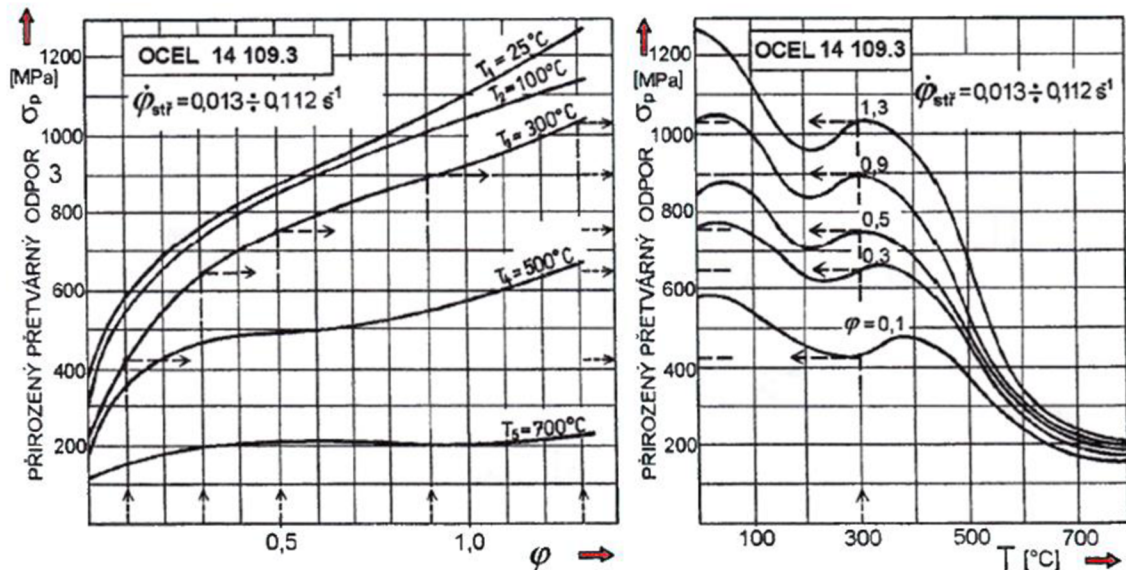
b) Feriticko-perlitická ocel po 30%

Obr. 9 Deformační textura vzniklá tvářením za studena [19]

Tváření za studena může rovněž probíhat za zvýšených teplot, které jsou ovšem nižší než teplota T_{REK} , obvykle v rozmezí $T = (0,25 \text{ až } 0,30) \cdot T_{TAV}$, v materiálu probíhají uzdravovací procesy. Ve tvářeném materiálu je snižováno vnitřní pnutí, způsobené přetvořením, avšak neprobíhá vznik zárodků nových zrn a deformační textura není odstraněna. Pokud je materiál ohřát na teplotu T_{REK} a vyšší, probíhá v materiálu rekrytalizace a deformační textura mizí.

Jak již bylo řečeno, zvýšením teploty tváření se zvyšuje tažnost materiálu A a snižuje se jeho mez kluzu Re . To způsobuje, že se při vzrůstající teplotě snižuje velikost nárůstu přirozeného přetvárného odporu. Toto ukazují následující dva grafy, na obr. 10, které se zabývají vlivem teploty na přirozený přetvárný odpor ložiskové oceli 14 109.3.

Na obrázku 10a je vykresleno několik křivek zpevnění materiálu za různých teplot. Takzvaná křivka zpevnění je znázornění závislosti přirozeného přetvárného odporu materiálu na jeho logaritmickém přetváření. Na obr. 10b jsou vidět křivky ukazující pokles přirozeného přetvárného odporu, vlivem zvyšované teploty a to pro různé velikosti logaritmického přetvoření.



a) křivky zpevnění v závislosti na teplotě b) Vliv tep. na přirozený přetvárný odpor

Obr. 10 Závislost přirozeného přetvárného odporu na teplotě při tváření [11]

Z takového grafu je pak možno určit vhodnou teplotu zpracování s ohledem na požadovanou velikost logaritmického přetvoření daného materiálu.

Při tváření zastudena, to znamená výrazně pod teplotou rekrystalizace, probíhá v materiálu převážně zpevňování. Pro oceli je to obvykle teplota $T \leq 0,3 \cdot T_{TAV}$. Odpor materiálu proti přetvoření se postupně zvyšuje do doby než je vyčerpána zásoby plasticity, pak dojde k porušení soudržnosti materiálu a vznikne lom obr. 11.



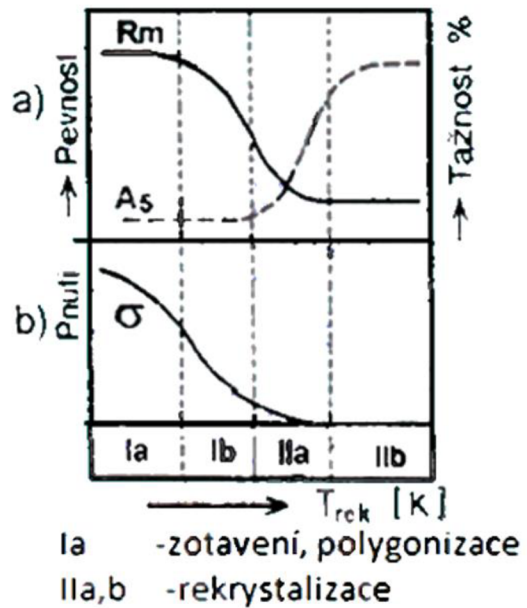
Obr. 11 Lom při pěchování tělesa [15]

Zpevnění je převážně nežádoucí jev, například při víceoperačním tváření je pro obnovení plasticity materiálu třeba mezioperačního tepelného zpracování. Pokud by však byl požadován materiál s vyšší mezí kluzu, může být i přínosem.

Vlivem zvýšené teploty má deformaci zpevněný materiál snahu být odpevňován. Eliminace příčin zpevnění závisí na mimo jiné i na čase.

Pokud probíhá odpevňování současně se zpevňováním, děj je nazýván jako dynamické odpevňování, to je významné u tváření za poloohřevu a tváření za tepla. Obecně u teploty $T \geq 0,7 T_{TAV}$, probíhá odpevňování materiálu tak rychle, že mechanické vlastnosti materiálu nejsou tvářením pozměněny.

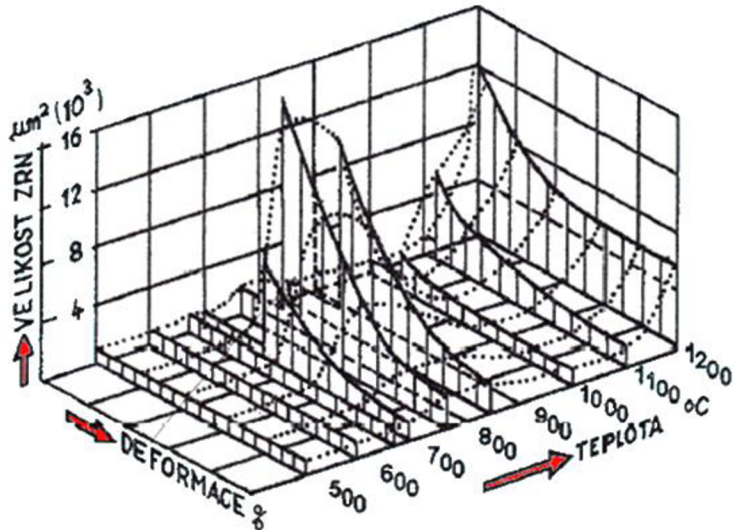
Při Tváření za studena je odpevňování málo výrazné, v praxi pak často musí být obnovena plasticita kovu, k tomu je užíváno mimo jiné mezioperační žihání. Proces odpevňování po tváření za studena je nazýván jako statické odpevňování, to probíhá například polygonizací, či rekrytalizací. Vliv teploty na deformační odpevnění ukazuje obr. 12.



Obr. 12 Vliv teploty na mechanické vlastnosti [11]

Rekrytalizace je obnovení struktury materiálu po plastické deformaci bez přeměny krystalové mřížky (bez překrytalizace). Obnova struktury je způsobena vznikem nových zrn a jejich růstem na úkor zrn plasticky deformovaných. Rekrytalizace je závislá na:

- Velikosti přetvoření materiálu: Čím větší je plastická deformace materiálu, tím je k rekrytalizaci zapotřebí nižší teplota.
- Na teplotě: Se zvyšováním teploty je exponenciálně snižován čas potřebný k rekrytalizaci. Teplota má také významný vliv na velikost zrna. V praxi se teplota rekrytalizace určuje z rekrytalizačních diagramů (obr. 13), ve kterých je zahrnuta velikost zrna a přetvoření.
- Chemické složení materiálu: Nečistoty a vměstky brání v pohybu dislokací, proto čím čistější je kov, tím nižší rekrytalizační teplota je zapotřebí.

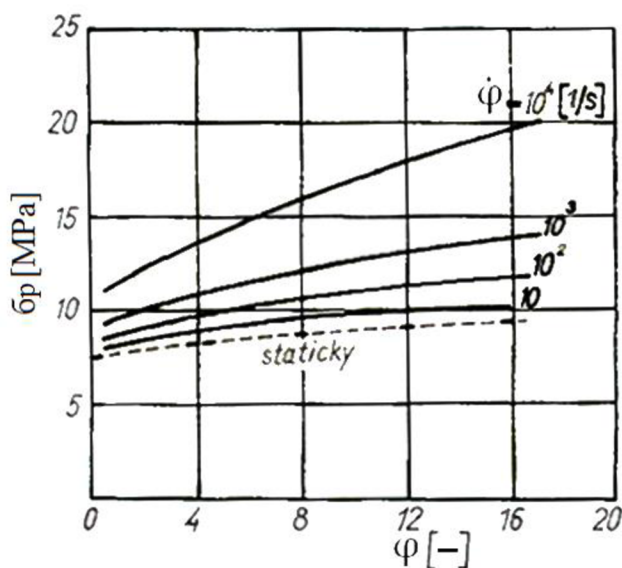


Obr. 13 Rekrytalizační diagram pro nízkouhlíkovou ocel [11]

1.1.3 Vliv rychlosti přetvoření [29], [11], [7], [9], [31]

Zásadní vliv na přetvoření materiálu má také jeho rychlost. Mechanické vlastnosti materiálu se běžně zkoumají experimentálně, na zkušebních strojích, jejichž rychlost bývá asi $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. V praxi při tváření na lisech a kovacíh strojích, se rychlost běžně pohybuje od $0,1$ až $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na bucharech okolo 5 až $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Je důležité vědět, zda můžeme pro pozdější tváření ve výrobě použít hodnoty získané zkouškou v laboratoři. Zvýšení rychlosti má totiž za následek zvýšení meze kluzu a snížení plasticity materiálu.

Rychlost deformace má tedy významný vliv na zpevnění tvářeného kovu, jak je vidět na obr. 14, který vyobrazuje pracovní diagram pro tváření hliníku, za různých rychlostí. Je zde patrný vliv zvýšení rychlosti na nárůst přirozeného přetvárného odporu (křivky zpevnění jsou posouvány k vyšším hodnotám).



Obr. 14 Pracovní diagram přetvoření pro hliník [31]

Při tváření za tepla jsou brány v potaz dva probíhající procesy, jimiž jsou výše zmíněné zpevňování a odpevňování, ale vlivem rychlosti tváření zde vzniká také tepelný efekt (materiál je při relativně velké rychlosti deformace prudce ohřát), je to průvodní jev při plastické deformaci. Vliv tepelného efektu se zmenšuje s růstem teploty tváření, protože s jejím zvýšením je snižována mez kluzu a je zde zapotřebí menší potřebná energie na přetvoření, tím se při operaci uvolní méně tepla. Tepelný efekt je při tváření za tepla menší také proto, že uvolněné teplo je malé vzhledem k teplotě ohřátého vzorku.

Při malé rychlosti deformace se vzniklé teplo rozvede a proces přetvoření bude izotermický, pokud ale bude rychlost přetvoření vysoká, vzniklé teplo se nestačí rozvést a přetvářecí proces nebude izotermický.

Pokud tváříme za studena, neprobíhá odpevňování a zvyšováním deformace v důsledku zpevňování neustále narůstá i mez kluzu, jak již bylo zmíněno. V určitých případech kdy tváříme vysokou rychlostí, může být materiál zahřát na tolik, že proběhne zotavení a mez kluzu se sníží.

Problém může nastat při takzvaném neúplném ohřevu materiálu (obr. 8), kdy jsou v materiálu přítomny 2 různé krystalografické mřížky, což způsobí pokles plasticity a zvýšení meze kluzu. V případě tváření za teplot blízkých oblastem křehkosti, například u technicky čistého železa je to rozmezí 825 až 1100°C , a tváření probíhá za teploty 825°C relativně velkou rychlostí přetvoření, pak se díky tepelnému efektu dostává kov do oblasti křehkosti. To má nežádoucí vliv na tváření, mez kluzu vzrůstá a plasticita kovu se zmenšuje.

Při relativně vysokých rychlostech přetvoření může být běžně předeřhřátý výkovek působením dalšího vzniklého tepla, lokálně přehřát, čímž vznikne zakalená vrstva s martenzitickou strukturou.

Mnohé kovy a slitiny mají kritickou rychlost tváření, při které ztrácí schopnost plasticity a stávají se křehkými.

1.2 Druhy pēchovacích zkoušek [11], [7], [9], [10]

Pro pēchovací zkoušky je používána řada různých postupů, které byly vyvinuty pro získávání co nejpřesnějších výsledků, při zjišťování mechanických vlastností zkoumaných materiálů.

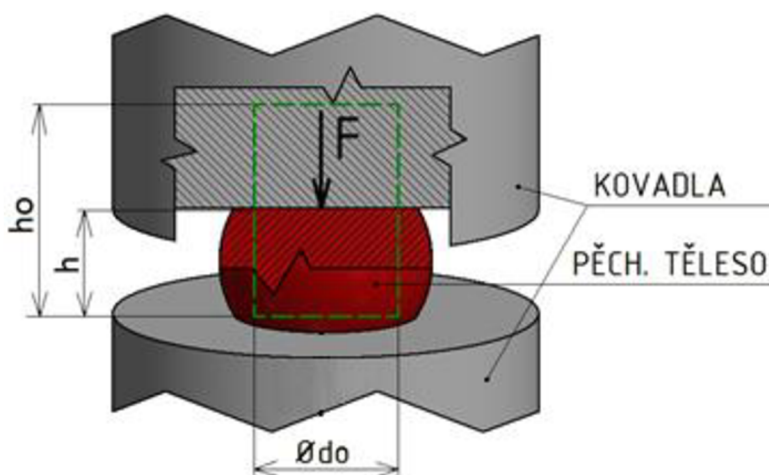
Pro různé druhy pēchovacích zkoušek, se zároveň používá odlišných typů pēchovacích těles. Tělesa pro pēchovací zkoušky lze rozdělit podle jejich geometrie na hranolové, ploché a válcové. Správná volba pēchovaného tělesa může přispět ke zpřesnění výsledků zkoušky.

Vzorky se často dále upravují, protože kvůli vysokým měrným tlakům, běžné mazání nemá dostačující účinnost, na zmírnění kontaktního tření. Úpravy jsou promítnuty jak do geometrie, tak i do jejich povrchových úprav. Zde jsou uvedeny některé postupy pēchování a k nim přiřazená, možná používaná zkušební tělesa.

1.2.1 Přehled základních pēchovacích zkoušek [11], [7], [9], [10], [27]

V praxi je používáno různých pēchovacích postupů, které se mohou lišit jak geometrií kovadel, tak podmínkami při zkoušce, či prostředím ve kterém jsou prováděny. V závislosti na druhu zkoušky, jak už bylo řečeno, může být pēchovací zkouška prováděna za studena, nebo za tepla, za různých rychlostí pēchování, s různými metodami snižování tření a podobně.

- Zkouška rovnými kovadly – Jedná se o velmi jednoduchý druh pēchovací zkoušky (obr. 15) a díky tomu je v praxi hojně používána. Pro tuto zkoušku je vhodné používat válcová hladká tělesa, válcová tělesa s vybráním, nebo tělesa tvaru hranolu a zkouška může probíhat buďto zatepla, nebo za studena. Pēchovací zkouška rovnými kovadly je určena ke zjišťování mechanických vlastností daného materiálu a její vyhodnocení spočívá ve stlačování tělesa na předem stanovenou výšku, nebo do bodu kdy vznikne trhlinka. Ze zkoušky je získán diagram závislosti stlačení na použité pēchovací síle. Z tohoto diagramu jsou pak určovány požadované materiálové charakteristiky.

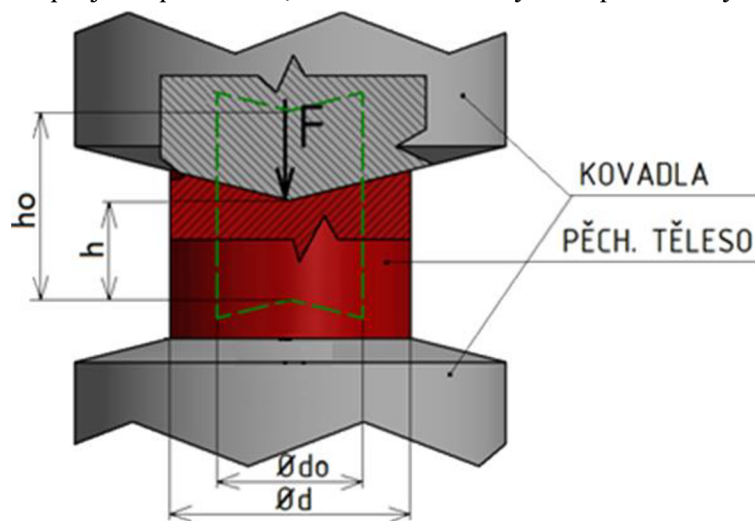


Obr. 15 Zkouška rovnými kovadly

Zkoušku lze provádět například na hydraulických lisech, či na univerzálních pēchovacích strojích.

- Zkouška kuželovými kovádky – Jde o méně rozšířenou pēchovací zkoušku, založenou na stejném principu jako předchozí, která má však vysoké požadavky na přesně vyrobené kuželová kovádla.

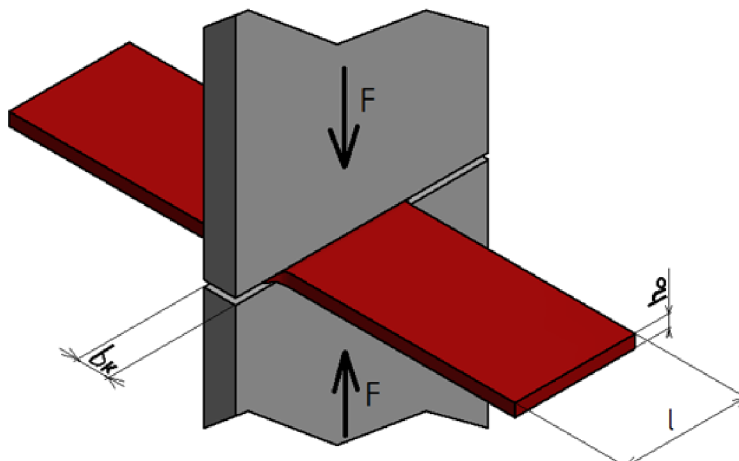
Kovádla pro pēchovací zkoušku musí mít vnější kužel, který odpovídá vnitřnímu kuželu pēchovaného tělesa (obr. 16), upraveného dle Siebela a Pompa, používaného speciálně pro tuto zkoušku. Úhel sklonu stěny vůči základně je u použitého kužele α , jde o takový úhel, aby $\text{tg } \alpha$ bylo rovno součiniteli tření f , to snižuje nehomogenitu deformace a zvyšuje přesnost provedené zkoušky.



Obr. 16 Zkouška kuželovými kovádky

- Zkouška úzkými kovádky – Zkušební vzorek je plochá tyč, jejíž poměr délky vůči výšce, musí být minimálně šestinásobný ($l/h_0 > 6$) a šířka kovadel b_K , má být alespoň 3 mm.

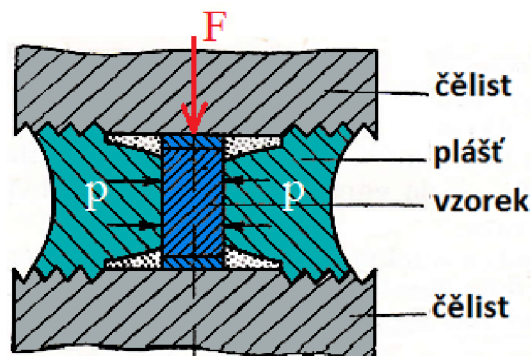
Zkouška probíhá vtlačováním úzkých kovadel (lisovníků), proti sobě, do zkušebního tělesa (obr. 17). Vzniká zde trojosá napjatost a na pēchovaném průřezu vzorku bývá patrné vyboulení. Tuto zkoušku je možno provádět zastudena i za tepla ale vždy by mělo být použito maziv. Touto cestou zjišťovaný přetvárný odpor je větší než přetvárný odpor zjištěný pēchováním válcového tělesa.



Obr. 17 Zkouška úzkými kovádky

- Speciální pēchovací zkoušky – Zkoušky mohou probíhat v prostředí s vysokým tlakem, pak zde působí všestranná prostorová napjatost. Takto snáší vzorek podstatně vyšší plastické deformace a mohou být tvářeny kovy, jež za normálního tlaku tvárné nejsou.

Vysokého tlaku prostředí můžeme dosáhnout například pēchováním v obalu kdy je zkušební vzorek umístěn v plášti z jiného kovu (obr. 18).

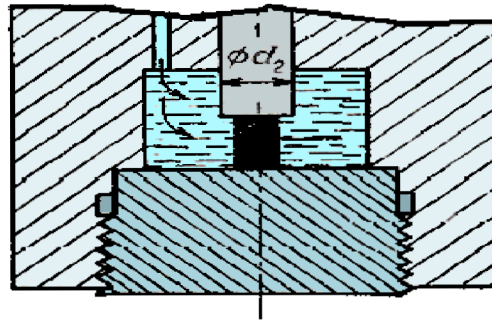


Obr. 18 Pēchování v obalu [7]

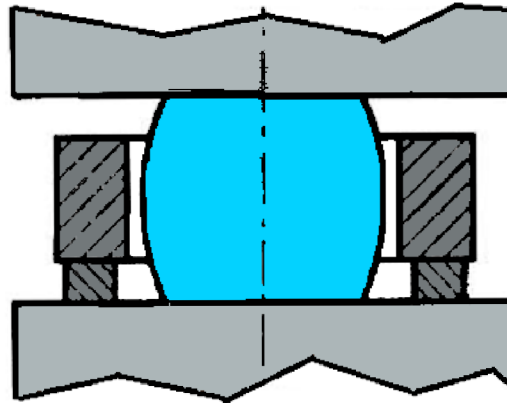
Jakmile je vzorek pēchován, klade jeho obal odpor v radiálním směru, tím se zvyšuje homogenita deformace a stoupá tvāřitelnost.

Podobného efektu dosāhneme pēchováním za hydrostatického tlaku, kdy je těleso obklopeno kapalinou o vysokém tlaku (obr.19), která zde vyvolává rovnoměrnou prostorovou napjatost. Výhody jsou stejné jako u předchozího tvāření v obalu.

Zkouška s omezeným šířením, je rovněž vhodná pro málo tvāřitelné materiály. Provádí se za pomoci objímky, jejíž vnitřní objem odpovídá objemu tělesa, přičemž její výška je shodná s výškou, na kterou pēchujeme (obr. 20). To způsobuje, že při pēchování objímka klade odpor toku materiálu do stran, čímž vzniká všestranná napjatost bránící vzniku další soudečkovitosti, vzniklou deformaci zrovnoměňuje a tím zvětšuje tvāřitelnost materiálu.



Obr. 19 Zk. za hydrostatického tlaku [7]

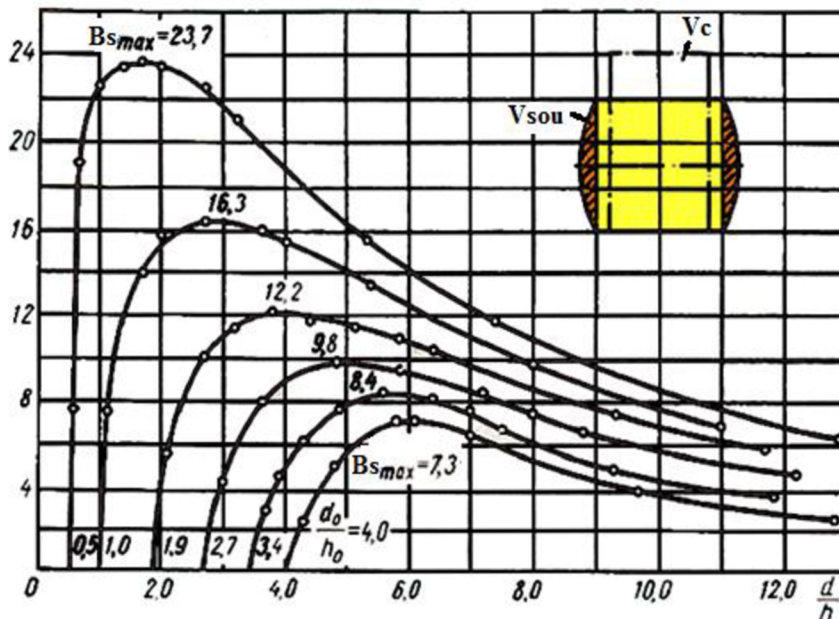


Obr. 20 Zkouška s omezeným šířením [27]

1.2.2 Zkušební tělesa a úpravy [11], [7], [18], [9], [23], [10], [28], [13], [27], [16]

Pēchované zkušební tělesa bývají nejčastěji válcové se stanoveným počátečním průměrem a výškou. Při výpočtech určujících tvāřecí tlaky pro pēchování bývá zanedbána změna tvaru tělesa vlivem nehomogenní deformace, způsobené třením (zanedbání vzniklé soudečkovitosti).

U zkušebních těles bývá určován jejich pēchovací poměr. Tento poměr závislosti výšky a průměru tělesa. Významně ovlivňuje velikost vzniklé soudečkovitosti. Graf na obr. 21 se zabývá vlivem pēchovacího poměru tělesa na vzniklou soudečkovitost. Je zde znázorněno několik křivek udávajících koeficient soudečkovitosti, každá tato křivka je vytvořena pro jiný pēchovací poměr tělesa.



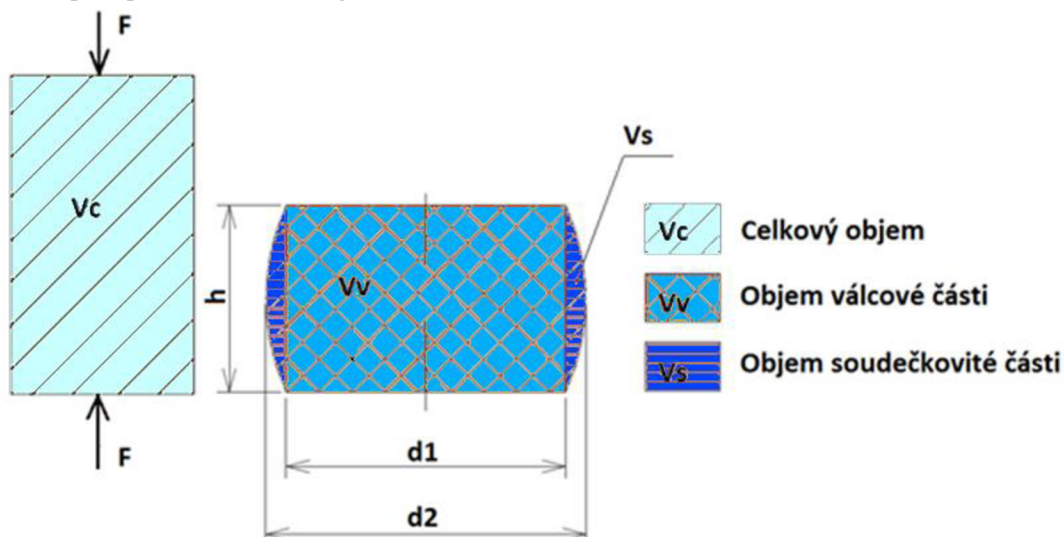
Obr. 21 Závislost soudečkovitosti na pēchovacím poměru [9]

každá tato křivka je vytvořena pro jiný pēchovací poměr tělesa.

Jak je z grafu vidět pro vysoké vzorky s poměrem $d/h=05$ je relativní hodnota vzniklé soudečkovitosti až třikrát větší než pro nízké vzorky s poměrem $d/h=4$.

Pro názornost je u vykreslených křivek (obr. 21) zobrazeno pěchované těleso, jehož objem je rozdělen na dvě části a to na objem celého tělesa a objem soudečkovité části tělesa. Z těchto hodnot je možné vypočítat koeficient soudečkovitosti.

Určovaný koeficient soudečkovitosti B_s , se mění s postupným stlačováním výšky vzorku z h_0 , na h a lze jej vypočítat ze vztahu (1.3). Rozdělení a popis objemů válcové části při spěchování ukazuje obr. 22.



Obr. 22 Rozdělení objemů tělesa pro výpočet koeficientu B_s [16]

$$B_s = \frac{V_s}{V_c} = \frac{V_c - V_v}{V_c} [-] \quad (1.3)$$

kde: V_c – celkový objem tělesa [mm^3]

V_s – objem soudečkovité části tělesa [mm^3]

V_v – objem válcové části tělesa [mm^3]

Výsledný koeficient soudečkovitosti musí vyjít v intervalu 0 až 1, pokud je výsledek větší jak jedna zkouška se stává neplatnou a musí být provedena znovu. Při vynásobení výsledku stem získáme procentuální hodnotu soudečkovitosti. Pokud by při zkoušce nepůsobilo tření objem soudečkovité části vzorku V_s by byl roven nule, stejně jako koeficient soudečkovitosti.

Pro správné vyhodnocení pěchovací zkoušky nesmí být výška tělesa příliš malá, vzhledem k jeho průměru. Naopak pokud by vzorek byl příliš vysoký vzhledem k jeho průměru, nemusel by vyhovovat na vzpěr. K určení předepsaného intervalu, v němž musí ležet rozměry tělesa, slouží pěchovací poměr D_R dle vztahu (1.4).

$$D_R = \frac{h_0}{d_0} \in (1,25 \div 2,5) [-] \quad (1.4)$$

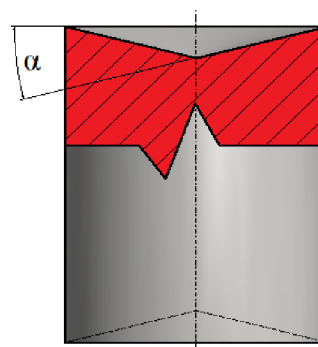
kde: d_0 – počáteční průměr pěchovaného tělesa [mm]

Stanovená výška vzorku může tedy být maximálně dvaapůlnásobkem jeho průměru.

Jak bylo zmíněno, zkušební tělesa se mohou rozdělovat podle jejich geometrie na:

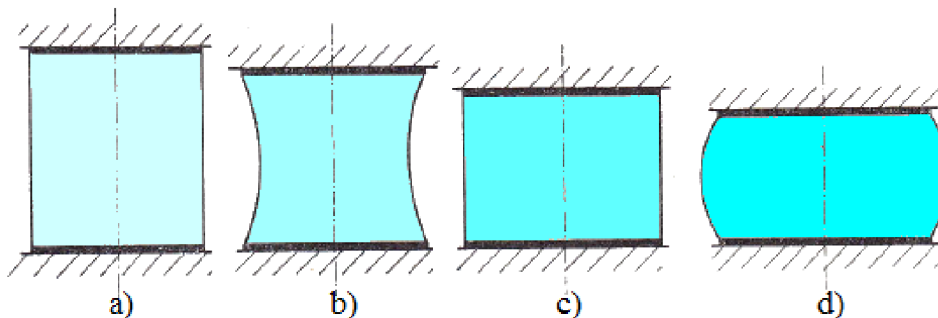
- Tělesa tvaru válce – Kromě nejčastěji používaných již zmiňovaných těles tvaru válce s hladkými čely, se používá i jejich speciálních úprav. V závislosti na požadované přesnosti výsledků, či na druhu mechanických vlastností, které mají být zjištěny. Klasické válcové těleso je vystaveno vysokému kontaktnímu tření na stykových plochách, to mimo jiné zvyšuje potřebnou tvářecí sílu, zapříčiňuje nehomogenní deformaci a vznik soudečkovitosti.

Tato tělesa jsou proto často upravována, například zmiňovaným kuželovým vybráním čel dle Siebela a Pompa (obr. 23), kde $\tan \alpha$ je zde roven součiniteli tření f . Pro takový vzorek je nutno použít kuželových kovadel s kuzelem odpovídajícím vybrání. Tyto vzorky jsou navíc pro další snížení tření mazány.



Obr. 23 Vzorek s kuželovými čely

Použití tenkých podložek dle Šofmana, se provádí na rovných kovadlech. Materiál podložek má menší mez kluzu než materiál zkoušený, v průběhu pěchování se pak projeví 3 oblasti deformace viz. obr. 24.

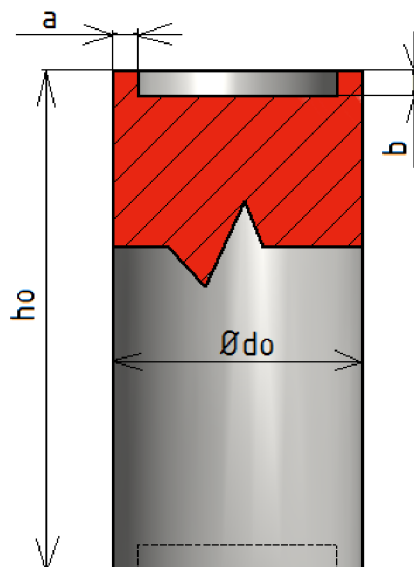


Obr. 24 Fáze deformace při pěchování s plastickými podložkami [9]

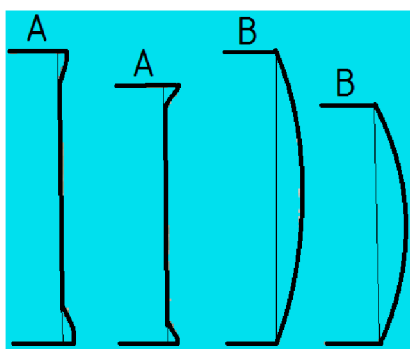
V prvním stádiu se deformuje podložný materiál a vzorek dostává tvar hyperboloidu, jak ukazuje obr. 24b. Při dalším pěchování se podložky i vzorek deformují rovnoměrně a vzorek získává zhruba válcovitý tvar (obr. 24c). V poslední fázi se vzorek začne deformovat více než podložky a vzniká zde soudečkovitost (24. d). Metoda je velmi jednoduchá, ale je vhodné spíše pro určování přetvárného odporu pro malé deformace. Pro přesnější určení v širším rozsahu deformací, se také příliš nehodí. Problematická u této metody je správná volba materiálu a tloušťky užívaných podložek.

Další úpravou je vybráním čelních ploch dle Pavlova a Rastěgajeva (obr. 25), kde jsou válcová vybrání zaplněna vhodným mazivem. To výrazně snižuje vliv tření, tím že mazivo působí jakoviskózní médium pro přenos tlaku na

zkušební vzorek a tlak na stykové ploše rovnoměrně rozprostřen. Vhodným mazivem pro vyplnění je parafin a kyselina palmitová.

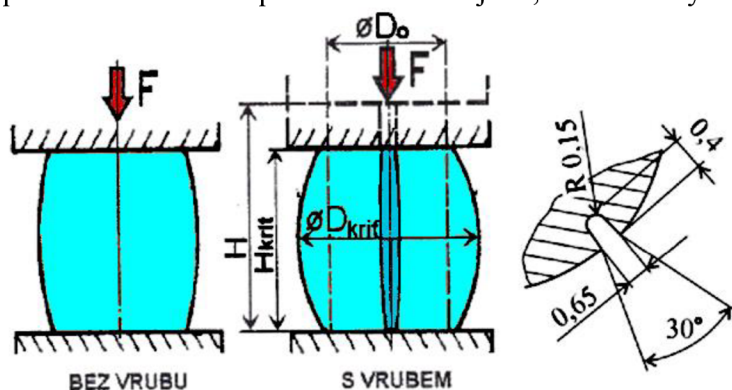


Obr. 25 Vzorek upravený dle Pavlova a Rastěgajeva



Obr. 26 Porovnání upraveného vzorku dle Pavlova a Rastěgajeva se vzorkem neupraveným [9]

nebo do vzniku trhliny. Ovšem u vzorků tvárných materiálů s válcovým průřezem nemusí trhliny vůbec vzniknout. Vznik trhlín je ovlivněn například jakostí povrchu, proto je důležitou pēchovací zkouškou za studena, pēchování tělesa s vrubem. Tvary vrubů se liší podle autora. Často používané tělesa jsou, tělesa se čtyřmi



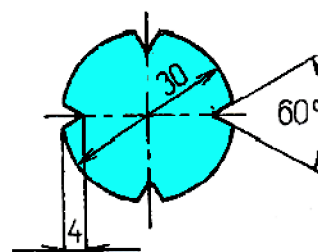
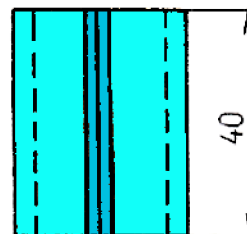
Obr. 28 Zkušební těleso bez vrubu a těleso dle Kuda [11]

Dále mohou být použita speciální pēchovací kovádla s malými středíci dílky, jež mají uprostřed středíci kužel (obr. 29), ty by měli být před každou zkouškou řádně odmaštěny. Na pēchovaném vzorku musí být vytvořen stejný středíci dílek. Použití těchto kovádel snižuje nerovnoměrnost deformace a dělá zkoušku velmi přesnou.

Zkouška probíhá pēchováním vzorku o 30 % výšky, pakliže se neobjeví trhliny lze říci, že materiál je dobře tvárný za studena. Dále se pak pokračuje postupným pēchováním vzorku po krocích o velikosti 1,5 až 2,5 % výšky vzorku a zkouška končí, když se ve v některém z vrubů objeví trhliny.

Takto upravený vzorek, v porovnání s neupraveným, si udrží válcový tvar i při vysokých stupních pētvoření, jen v blízkosti okrajů nastává malé zvětšení průměru, viz. obr. 26. Tímto i vzniklé zpevnění a pētvoření jsou při pēchování, takto upraveného vzorku, rozloženy velice rovnoměrně (to bylo ověřeno metodou sítí). Tato metoda úpravy vzorku je vhodná pro všechny běžně používané materiály.

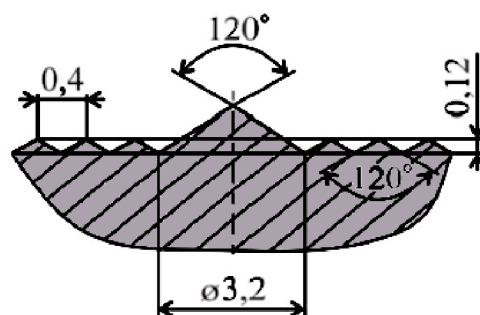
Pēchovací zkouška, jak bylo zmíněno, se obvykle provádí do spēchování vzorku na předem určenou výšku



Obr. 27 Zkušební těleso dle Žídka [7]

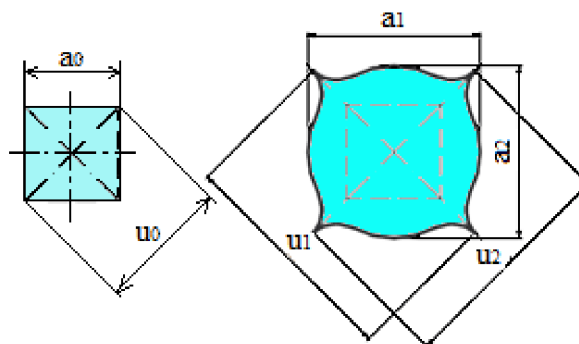
vruby rozmístěnými po svém obvodu, podle Žídka (obr. 27), nebo podle Kuda (obr. 28).

V oblasti vrubů se při pēchování koncentruje napětí a vznikají zde trhliny, jejich četnost a velikost pak podávají poměrně rychlý a přesný obraz o tvárnosti materiálu.



Obr. 29 Průřez speciálně upravenými kovádly [10]

- Tělesa tvaru hranolu – Při pěchování těchto vzorků se vlivem nerovnoměrné deformace, stejně jako u těles válcovitého tvaru, tvoří soudečkovitost. Ve směru pohledu shora, je však vidět zakřivení hran a tvoří se zde ostré rohy (obr. 30).



Obr. 30 Průběh pěchování hranolu [13]

Takových vzorků se používá pro zhodnocení maximální (1.5) a minimální (1.6) poměrné deformace průřezu pěchovaného materiálu.

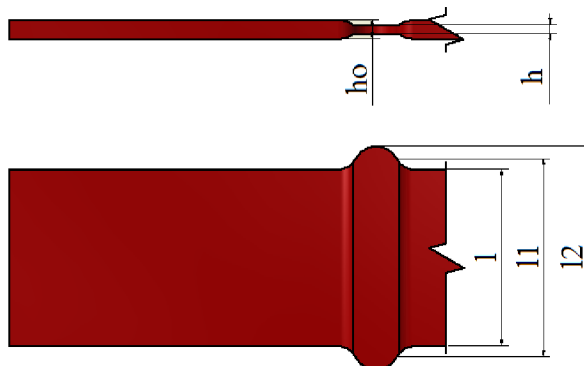
$$\varepsilon_{\min} = \frac{\frac{a_1+a_2}{2}-a_0}{a_0} [-] \quad (1.5)$$

kde: a_0 – délka nepěchované strany [mm]
 a_1, a_2 – délky spěchovaných stran [mm]

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\frac{u_1+u_2}{2}-u_0}{u_0} [-] \quad (1.6)$$

kde: u_0 – délka nespěchované úhlopříčky [mm]
 u_1, u_2 – délky spěchovaných úhlopříček [mm]

- Tělesa tvaru ploché tyče – Jde o třetí z hlavních tvarových skupin těles, která má tvar kvádra (obr. 31) a je charakteristická svým poměrem minimálně šestinásobné délky, ku výšce ($l/h_0 > 6$). Tento tvar vzorku může dosáhnout při tváření, velkých stupňů stlačení i při relativně vysokých poměrných rychlostech pěchování. Podstatou zkoušky je vtlačování úzkých kovadel pěchovaného tělesa. Přetvárná odpor takto pěchované tyče, je větší, než když pěchujeme těleso válcové. Zkouška je vhodná pro provedení zastudena i za tepla.



Obr. 31 Pěchované těleso ploché tyče

Zkušební tělesa mohou být dále upravována například fosfátováním. Fosfátování může být provedeno pro všechny uvedené tvary těles. Jde o velmi rozšířený způsob povrchové úpravy, který probíhá ve fosfátizační lázni za teplot 50 až 60° v časovém rozmezí 5 až 10 minut. Postupu fosfátování musí předcházet předběžné úpravy, jako jsou mechanická úprava povrchu, odmaštění a moření. Proces fosfatizace, se pak skládá z fosfátování materiálu, jeho oplachu a sušení.

Vznikne tenká fosfátovaná vrstva, která je velmi měkká a pórovitá. Její důležitou vlastností je, že na sebe váže organické látky. Touto úpravou povrchu v kombinaci s vhodným mazivem, vznikne mezivrstva snižující tření mezi kovadly a pěchovaným vzorkem, jde o vhodnou úpravu pro tváření za studena.

Vhodným mazivem pro nasycení fosfátované vrstvy je mýdlo. Proces sycení se nazývá mýdlování a provádí se ponořením fosfátovaného předmětu, do roztoku horkého

mýdla. Při tváření takto upraveného vzorku je část mýdla odstraněna a zbytek je změněn na sklovitou vrstvičku, tvořící soudržný film pevně přilnutý ke kovu, který podstatně zmenšuje vliv tření.

1.3 Zkušební stroje [11], [7], [35], [34]

Zkušební stroje pro zkoušení mechanických vlastností, nejčastěji používají elektrický způsob (použití tenzometrů, indukčnostních snímačů a termočlánků), k měření síly, dráhy, rychlosti, teploty a podobně. Hydraulický pohon je mnohdy nahrazován vřetenem, poháněným elektromotorem, což umožňuje nastavení konstantní rychlosti při zkoušce. U moderních hydraulických zkušebních strojů, může být rychlost zkoušky poměrně přesně nastavitelná.

Mnoho zkušebních strojů je konstruováno tak, aby je bylo možné řídit programem, takové programy lze nalézt vypracované, například pro statickou zkoušku tahem, pro série vzorků. Sklíčidlo stroje může být zkonstruováno tak, že samo vkládá vzorky a vyhazuje přetržené, potom se ze zkušebních vzorků statisticky vyhodnotí mez kluzu a mez pevnosti.

U základních strojů bývá připojeno zařízení pro zápis průběhu zkoušky, tím může být například XY souřadnicový zapisovač. Toto zařízení při zkoušce tahem, nebo tlakem, vykresluje křivku závislosti síly na změně délky zkoušeného tělesa. Elektrický signál, jdoucí do zapisovače, pochází z odporového snímače dráhy, připevněném k pohyblivé i nepohyblivé části zkušebního stroje. Než se však elektrický signál dostane k zapisovači, musí projít přes zesilovač (zařízení pro zesílení elektrického signálu). Dalším možným způsobem zápisu průběhu zkoušky, jsou přídavná zařízení komunikující s počítačem, kam jsou nasbíraná data přenášena a programem převáděna na požadované grafy a křivky zobrazující mechanické vlastnosti.

V praxi je zde možno využít široké škály strojů, pro pěchování se používají stroje, které materiál klidně a staticky zatěžují. Lze použít mechanických i hydraulických lisů, pro rychlé zjištění základních mechanických vlastností a toho, zda je materiál tvářitelný použitou technologií. Existují univerzální, či jednoúčelové pěchovací stroje, jež mohou být vybaveny zabudovaným softwarem, pro průběžné vyhodnocování mechanických vlastností, nebo jsou informace ze snímacích čidel převáděny a posílány na vyhodnocení do počítače vybaveného příslušným softwarem. Používají se v laboratořích a lze jimi zjišťovat velmi přesné informace o zkoumaném materiálu. Pořizovací náklady na tyto stroje, jsou však oproti lisům vysoké. Zde jsou uvedeny některé univerzální zkušební stroje firmy Zwick Roell.

Na obr. 32, je vyobrazen zkušební stroj z řady ProLine, vhodný jak pro testování funkčních součástí, tak pro standartní zkoušky materiálů. Stroj využívá intuitivního zkušebního softwaru testXpert II, je velmi jednoduše a rychle ovladatelný. Samotný stroj a veškeré jeho příslušenství včetně softwaru se vyvíjí a vyrábí na jednom místě, v Německu v sídle společnosti Zwick, to zaručuje jeho optimální sladění.



Obr. 32 Zkušební stroj řady ProLine od firmy Zwick Roell [35]

Stroj umožňuje výměnu zkušebních čelistí a tak je vhodný pro zkoušení materiálu na tah, tlak či ohyb. Stroje jsou nabízeny v rozmezí rychlostí 0.0005 až 1500 mm/min a pro zkoušky do síly 100 kN. Stroj se ovládá pomocí běžného počítače, nebo notebooku a není zde třeba přídatných karet.

Zde na obr. 33 jsou ukázky strojů z řady AllroundLine, tyto stroje jsou vhodné pro všechny oblasti testování. Stroje se hodí pro náročné použití, pro kontrolu kvality a jsou vhodné pro výzkumné projekty. Stejně jako u předešlého všechny komponenty a dostupný velký sortiment příslušenství jsou vyráběny na jednom místě, což zaručuje sladěnost celého stroje.

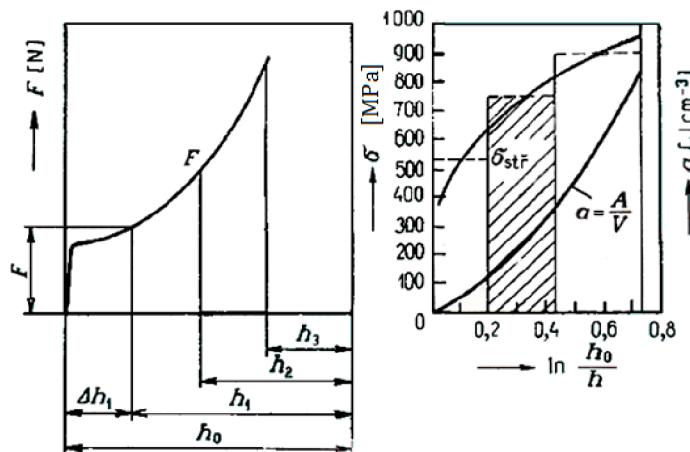


Obr. 33 zkušební stroje řady AllroundLine od firmy Zwick Roell [35]

Tyto stroje mohou nabídnout dva zkušební prostory, to snižuje nutnost výměny zkušebních přípravku, které však lze v případě nutnosti snadno vyměnit. Stroje s větším průřezem komponentů zaručují velkou tuhost a to snižuje nežádoucí vlivy okolí, jež mohou na vzorek působit.

1.4 Postup vyhodnocení zkoušky [11], [7], [10]

Jak již bylo řečeno, hodnoty deformačních odporů lze experimentálně zjistit z tlakových zkoušek, ty se provádí pro daný materiál při daných podmínkách tváření. Při stlačování zkušební vzorku lisem, je získán diagram závislosti použité pěchovací síly na změně délky tělesa (obr. 34a), z toho pak lze přepočtem získat diagram křivky zpevnění materiálu. Křivka zpevnění je vykreslena na obr. 34b, jako závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmickém stupni přetvoření tělesa.



Obr. 34 a) Diagram závislosti pěch. síly na výšce
b) křivka zpevnění a jednotk. přetvárná práce [7]

Při jednoosém stavu napjatosti, lze přirozený přetvárný odpor σ_p určit z podílu působící síly a okamžitého průřezu vzorku, dle vztahu (1.7). Síla a aktuální výška stlačovaného tělesa, jsou pak mechanicky nebo elektronicky měřené a zapisované.

$$\sigma_p = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (1.7)$$

kde: F – síla působící na pěchovaný vzorek [N]
 S – okamžitý průřez zkoušeného vzorku [mm^2]

Výpočet okamžitého průřezu tělesa vyplývá z jeho objemu a aktuální výšky (1.8).

$$S = \frac{V_C}{h} = \frac{V_C}{h_0 - \Delta h} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.8)$$

kde: V_C – objem pěchovaného tělesa [mm^3]
 Δh – rozdíl počáteční a aktuální výšky tělesa [mm]

Poté je třeba vypočítat logaritmické přetvoření tělesa φ , k tomu slouží vztah (1.9).

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h} \text{ [-]} \quad (1.9)$$

Při vykreslování křivky zpevnění je pak hodnota přirozeného přetvárného odporu vynesena na osu y a velikost logaritmického přetvoření na osu x , ty pak vytvoří bod jímž prochází křivka zpevnění materiálu. Z toho plyne nutnost vypočítat obě veličiny při různých velikostech stlačení tělesa, aby bylo možno ze vzniklých bodů vykreslit křivku zpevnění.

Důležitou počítanou veličinou je jednotková přetvárná práce, ta je rovněž zakreslována do diagramu v podobě křivky. Pro její výpočet je třeba znát přetvárnou práci, která je počítaná pro daný stupeň přetvoření (1.10).

$$A = \sigma_{stř} \cdot V_C \cdot \ln \frac{h_0}{h} \text{ [J]} \quad (1.10)$$

kde: $\sigma_{stř}$ – střední přetvárný odpor

Nyní lze počítat přetvárnou jednotkovou práci podle vztahu (1.11). Po rozepsání lze vztah zjednodušit.

$$a = \frac{A}{V_C} = \sigma_{stř} \cdot \ln \frac{h_0}{h} \text{ [J} \cdot \text{cm}^{-3}\text{]} \quad (1.11)$$

Pro vykreslení křivky jednotkové práce, je nutno graficky určit střední přetvárný odpor $\sigma_{stř}$ z každého pěchovaného mezistupně (to znamená např. mezi logaritmickým přetvořením 0,1 a 0,2, poté mezi 0,2 a 0,3, atd.). Tím jsou získány hodnoty, jež po vynásobení s patřičnými logaritmickými přetvořeními udají velikosti jednotkové přetvárné práce v průběhu pěchování. Hodnoty budou vyneseny na osu y a přiřazeny náležitěmu logaritmickému stupni přetvoření. Aproximací vzniklých bodů je vytvořena křivka jednotkové práce.

Přesnější metoda získání $\sigma_{stř}$ lze provést výpočtem z hodnot přirozeného přetvárného odporu σ_p . Vyjádří se jako aritmetický průměr dvou po sobě jdoucích σ_p , viz. vztah (1.12).

$$\sigma_{stř} = \frac{\sigma_{pi-1} + \sigma_{pi}}{2} = \text{[MPa]} \quad (1.12)$$

Ve výsledném grafu křivky přetvárné práce se uvádí střední přetvárná rychlost, ta je vyjádřena ze vztahu (1.13).

$$\dot{\varphi}_{\text{stř}} = \frac{v \cdot \ln \frac{h_0}{h}}{h_0 - h} = [\text{s}^{-1}] \quad (1.13)$$

kde: v – rychlost kovadel [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Pro vyjádření střední přetvárné rychlosti je třeba znát rychlost kovadel (1.14).

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_0 - h}{\Delta t} = [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.14)$$

kde: Δt – čas přechování [s]

Další z věcí, kterou je možno vyhodnotit, je vzniklá soudečkovitost přechovaného tělesa, o které už zde bylo hovořeno. Její vyhodnocení vychází z objemu součásti, který je po přechování rozdělen na objem válcovité části a objem soudečkovité části zkušebního tělesa.

2 EXPERIMENT [7], [34], [5]

Cílem provedeného experimentu bylo zjistit požadované mechanické vlastnosti zadaného materiálu, který byl dodán ve formě připravených zkušebních těles válcového průřezu s rovnými čely. Pro zjišťování těchto vlastností byla provedena pýchovací zkouška na dvou různých strojích. Výsledkem experimentu je tedy i porovnání obou pýchovacích zkoušek.



Obr. 36 ZD 40 [34]

První provedená zkouška, pro získání požadovaných mechanických vlastností, proběhla na zkušebním lisu CZR 600 s hydraulickým pohonem obr. 35. Měření zde probíhá elektricky a



Obr. 35 CZR 600

získané hodnoty jsou průběžně přenášeny a ukládány do počítače, za použití měřicí stanice Dewetron.

Druhá pýchovací zkouška byla uskutečněna na hydraulickém zkušebním stroji ZD40 /400kN/ (obr. 36). Jde o univerzální zkušební stroj, kde je možno provádět zkoušku tlakem, tahem a ohybem. Snímání hodnot v průběhu pýchování je rovněž provedeno elektrickou cestou, zde byl k vyhodnocení zkoušky použit program M-Test.

Výsledky zkoušek z obou zkušebních strojů jsou porovnány a zhodnoceny.

2.1 Pýchovaný materiál [30], [3], [21]

Zkoumaným materiálem, u kterého byly zjišťovány mechanické vlastnosti, je mosaz. Mosaz je slitinou mědi, jejíž hlavní legující prvek je zinek a případně se zde mohou objevovat dalších přísadové prvky. V závislosti na obsahu legur se vyznačuje vlastnostmi, jako jsou dobrá tvářitelnost za studena, svařitelnost a pájitelnost. Obsah zinku bývá asi do 45 %, dalšími legujícími prvky mohou být mimo jiné mangan, hliník, nikl, olovo, křemík.

Často se mosazi značí jako MS + číslo označující procentuální podíl mědi ve slitině. V MS 68 je obsah mědi 68 %. Do mosazi se pro zlepšení mechanických vlastností přidávají i další legující prvky, jak již bylo řečeno. Těmi jsou mimo jiné hliník, nikl, cín. Obsah takových legujících prvků, bývá do 10 %. Po těchto pak bývají mosazi pojmenovány, např. niklová mosaz, jež je používána jako náhrada stříbra. Mosazi jsou označovány i dalšími různými názvy, mosazi s maximálním obsahem zinku 20 %, jsou známé jako tombaky.

Tombaky mají žlutou barvu a jsou vhodné pro výrobu uměleckých předmětů. U mosazí do nichž je přidáno olovo (až 3%), je zlepšena obrobitelnost, takové jsou označovány jako automatové mosazi a jsou vhodné pro výrobu ventilů, šroubů i dalších součástí.

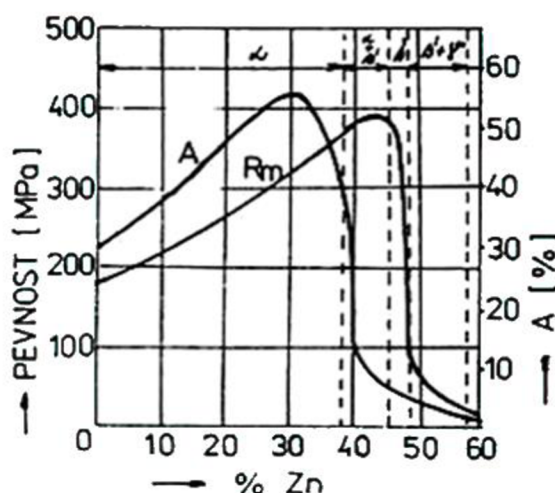
Mosazi, jejichž obsah zinku je zhruba 30 %, se vyznačují nejvyšší tažností, a proto jsou označovány jako hlubokotažné.



Obr. 37 Mosazné nábojnice [3]

Jsou vhodné pro výrobu tyčových profilů, hudebních nástrojů a taky pro výrobu nábojnic vyráběných zpětným protlačováním (obr. 37).

S přibývajícím obsahem zinku ve slitině se zvyšuje pevnost i tažnost materiálu, to však jen do překročení určité hranice, po které nastane prudký pokles obou mechanických vlastností. Jak ukazuje obr. 38, tažnost materiálu vzrůstá zhruba do 32 % a pevnost materiálu roste asi do 46 % obsahu zinku (obr. 9). Proto jsou mosazi s obsahem zinku nad 32%



Obr. 38 Vliv Zn na pevnost a tažnost mosazi [30]

nevhodné k tváření a používají se na odlitky.

2.2 Pěchovací zkouška na lisu CZR 600 [11], [5]

Na tomto stroji byla spēchována tři zkušební tělesa z materiálu MS 68 (obr. 39). Výsledky byly vyhodnoceny pomocí měřicí stanice Dewetron a softwaru Dewesoft. Z každého pěchovaného vzorku byl získán diagram závislosti pěchovací síly na stlačení tělesa. Ty pak byly použity pro sestavení křivek zpevnění a křivek přetvárné práce, pro daný materiál. Kromě tohoto vyhodnocení je zde zhodnocena i vzniklá soudečkovitost.



Obr. 39 Vzorky zpěchované na stroji CZR 600

2.2.1 Popis měření [33], [32], [20]

Při provedení experimentu pēchovací zkoušky bylo nutno mēřit a zapisovat nēkteré neelektrické veličiny a to průběžně s tím, jak bylo zkušební těleso deformováno. Požadované neelektrické veličiny byly mēřeny elektrickou cestou. Mēřenými veličinami, působícími na pēchované těleso, byly pēchovací síla, výška o kterou bylo těleso pēchováno, a teplota tělesa v průběhu zkoušky. Protože použitý stroj CZR 600 nemá ve své konstrukci zahrnuta mēřící zařízení pro zjištění požadovaných veličin, je zde použito přídavných zařízení. Zařízení jsou na stroji připevněna nebo ustavena tak aby bylo možno potřebné veličiny přesně mēřit.

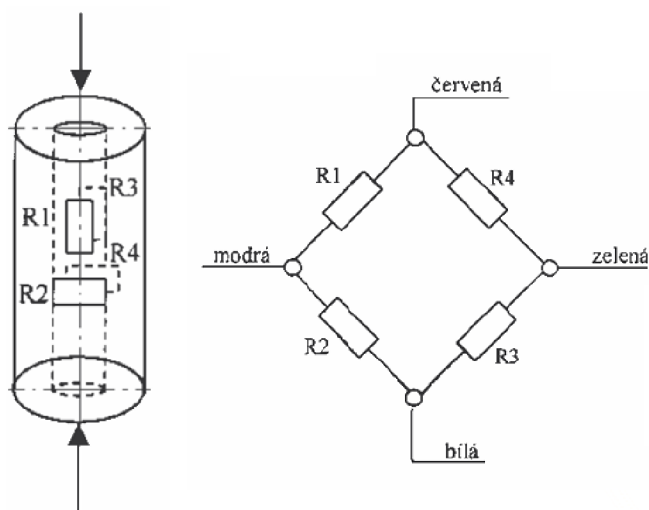
Síla byla snímána v průběhu pēchování za pomoci dynamometru (obr. 40). Použitý dynamometr je zařízení ke snímání staticky působící síly a je proto vybaven odporovými tenzometry. V závislosti na velikosti působící síly vznikají v celém tělese dynamometru pružné deformace a tím jsou deformovány i tenzometry. Vlivem deformace změní tenzometr svůj odpor a tím se mění i napětí. Tento elektrický signál je pak dále zpracováván za účelem získání hodnoty velikosti působící síly.

Používané tenzometry mohou být kovové, nebo polovodičové. Schéma zapojení tenzometrů a jejich upevnění na čidle pro tlakovou zkoušku ukazuje obr. 41. Tenzometry jsou zapojeny do plného mostu. Na mostu jsou znázorněny čtyři vývody popsané barvami. Bílá a červená slouží jako napájení mostu, na modré a zelené je mēřeno napětí. Mēřené napětí je závislé na odporu, ten se mění s deformací tenzometrů.

Pro provedení experimentu je pēchované těleso vloženo do nástroje (obr. 42) a nástroj je umístěn na dynamometru. Obojí je vloženo v lisu CZR 600. Při spuštění stroje pak působí na nástroj síla, těleso v něm je pēchováno a stejná síla působí i na dynamometr. Ten posílá elektrický signál dále ke zpracování a výsledkem je síla mēřená v každém okamžiku pēchování



Obr. 40 Dynamometr k mēření statické



Obr. 41 Schéma zapojení tenzometrů [32]



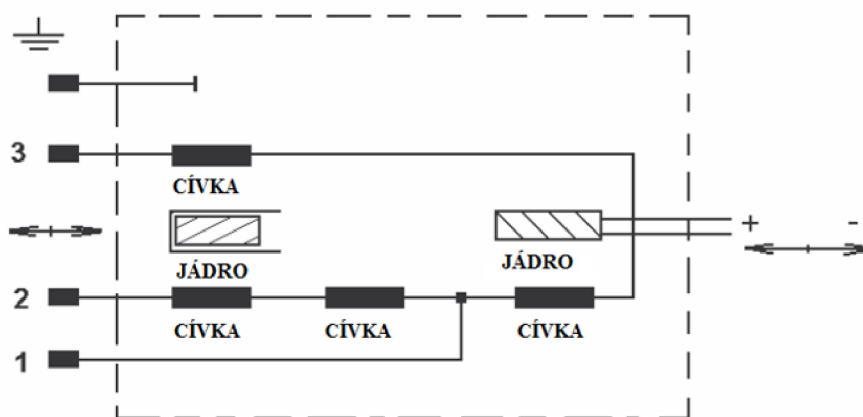
Obr. 42 Nástroj pro pēchování

Pro snímání dráhy, nebo-li pěchované výšky zkoušeného tělesa, byl použit indukčnostní

snímač dráhy.

Tyto snímače jsou v praxi široce využívány, mimo jiné, pro měření polohy a rychlosti.

Výhodou těchto snímačů je že nepodléhají opotřebení a to díky tomu že mohou pracovat bezdotykově.

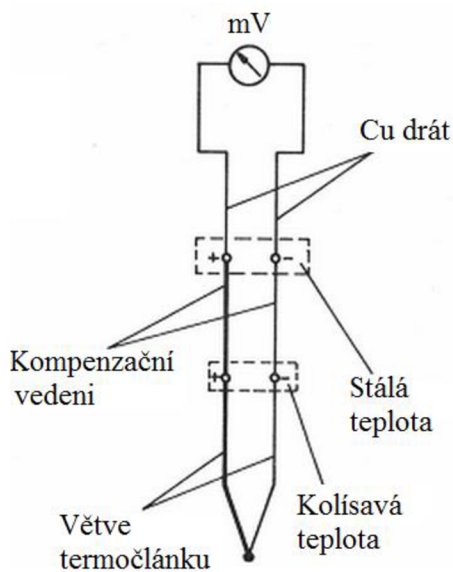


Obr. 43 Indukčnostní snímač [32]

Principem jejich funkce je změna indukčnosti působením vnější síly. Indukčnost může být změněna buďto změnou počtu závitů cívky nebo ustáleným pohybem jádra v cívce. Schéma indukčnostního snímače je vidět na obr. 43. Použitý snímač byl vybaven mikrometrickým šroubem se stupnicí.

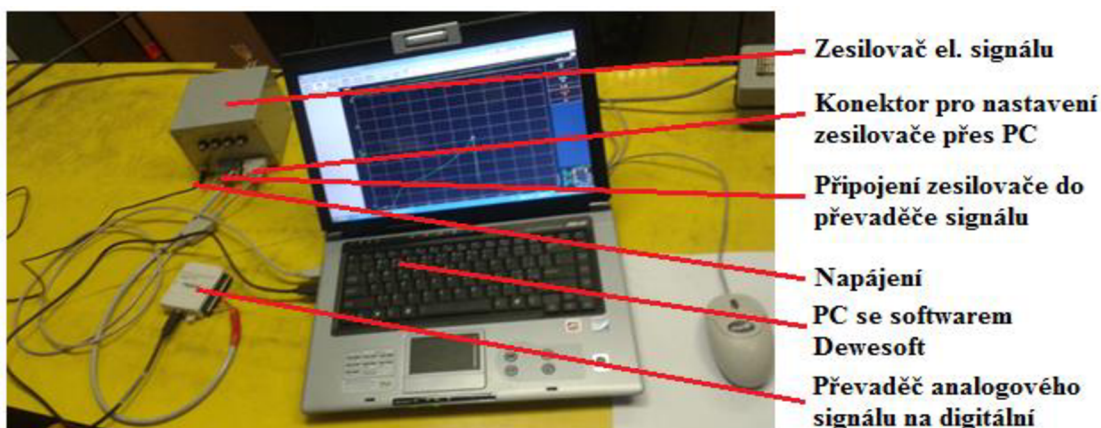
K měření teploty byl použit termočlánek typu K. Termočlánek je zařízení využívající principu termoelektrického jevu. Jde o princip, při kterém je působením tepla na termočlánek vytvářen elektrický proud. Energetická účinnost tohoto zařízení je malá, výborně se ale hodí pro měření teplot.

Existuje více druhů termočláneků, které se používají s ohledem na měřenou teplotu. Každý termočlánek je složen ze dvou různých kovů, to umožňuje vzniknout výše zmíněnému termoelektrickému jevu. Pro náš experiment byl použit termočlánek typu K, jež se skládá z dvojice kovů niklchrom-niklhlíník. Je vhodný pro měření teplot v rozsahu -50 až 1000 °C. Obr. 44 schematicky znázorňuje termočlánek. Dotykem pro měření teploty je spoj obou kovů, tento spoj by tedy měl být při měření v kontaktu s měřeným prostředím. Druhé dva konce jsou přiváděny na zesilovač a měřicí zařízení. V případě provedení experimentu pěchovací zkoušky s ním byla měřena teplota v místnosti.



Obr. 44 Termočlánek [32]

Pro vyhodnocování pëchovací zkoušky na tomto stroji byla pouzita již zmínëná mëřicí stanice Dewetron se softwarem Dewesoft (obr. 45).



Obr. 45 sestava stanice Dewetron

Do zesilovače elektrického signálu ze zadní strany vstupují signály z dynamometru, z indukčnostního snímače a z termočlánu. Zesilovač komunikuje s počítačem pomocí USB vstupu a je touto cestou nastavován pro následné měření.

Všechny signály vstupující do zesilovače jsou zpracovávány souběžně, v průběhu pëchovací zkoušky. Jelikož následné signály vycházející ze zesilovače jsou analogové a software Dewesoft pracuje se signálem digitálním, prochází tyto signály zařízením pro převod analogového signálu na digitální. Takto převedený digitální signál putuje do počítače, kde je zpracován softwarem.

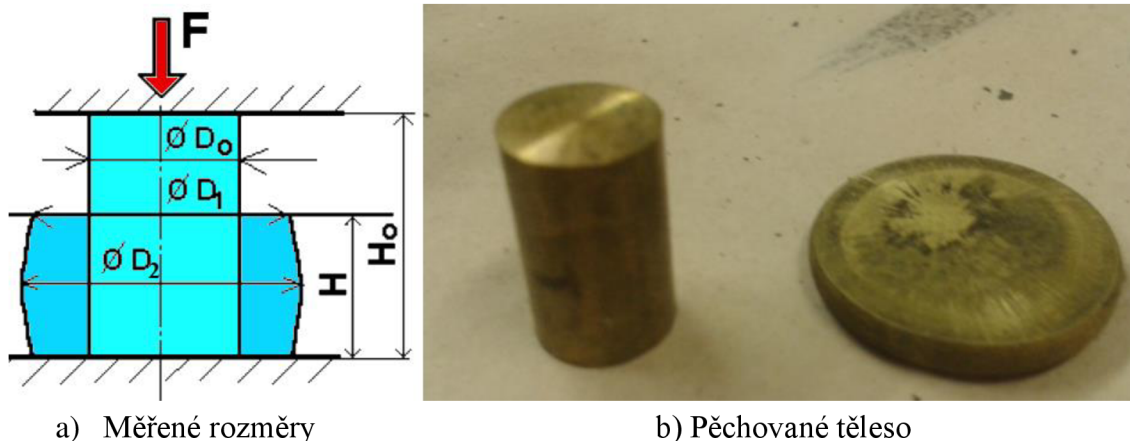
2.2.2 Vyhodnocení [11], [7], [10], [12], [27]

Postupně byly pëchovány tři vzorky. Ty byly před zkouškou změřeny pomocí digitálního posuvného měřidla Mitutoyo CD-15 D (Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Parametry posuvného měřidla

Vlastnosti posuvného měřidla	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření	0 – 150	mm
Rozlišení	0,01	mm

Každá výška i průměr tělesa byly změřeny třikrát a až výsledný aritmetický průměr těchto hodnot byl zapsán do tabulky 2.2. Po proběhlém spëchování byly vzorky opět změřeny (každý rozměr třikrát s následným zprůměrováním). Naměřené hodnoty jsou taktéž zapsány do tabulky 2.2. Měřené rozměry jsou zobrazeny na obr. 46.



Obr. 46 Pëchované těleso s popisem měřených rozměrů [12]

Tabulka 2.2. Rozměry pěchovaných a nepěchovaných vzorků

Číslo vzorku	Nepěchovaná výška h_0 [mm]	Nepěchovaný průměr d_0 [mm]	Pěchovaná výška h [mm]	Průměr pěchované válcové části d_1 [mm]	Průměr pěchované soudečkovité části d_2 [mm]
1	15,02	8,98	2,76	20,47	21,34
2	15,00	9,01	3,28	18,83	19,87
3	15,01	9,01	2,70	20,40	21,14
Průměr	15,01	9,00	2,91	19,9	20,78

V dolní části tabulky jsou zapsány průměrné hodnoty výšek a průměrů tělesa před pěchováním, tyto hodnoty je možno použít pro kontrolu pěchovacího poměru. Jak již bylo řečeno, pěchovací poměr se zabývá předepsanou štíhlostí tělesa (ta je závislá právě na poměru výšky a průměru tělesa). Těleso nesmí být příliš štíhlé, aby odolalo na vzpěr, zároveň malá štíhlost tělesa nezaručuje správné vyhodnocení zkoušky. Vyhodnocovaný pěchovací poměr D_R musí tedy ležet v určitém intervalu, viz. vztah (1.4).

$$D_R = \frac{h_0}{a_0} = (1,25 \div 2,5)[-] = \frac{15,01}{9} = 1,67 \in (1,25 \div 2,5)$$

Z výsledku lze usoudit, že pěchované těleso vyhovuje pěchovacímu poměru a z tohoto pohledu je tedy vhodné pro provedení pěchovací zkoušky.

Z pěchovaných a nepěchovaných rozměrů lze dále určit koeficient soudečkovitosti B_S , dle vztahu (1.3). K jeho určení je třeba znát celkový objem tělesa a objem soudečkovité části tělesa. Objemy lze vypočítat z měřených rozměrů (obr. 46a), které jsou zapsány v tabulce 2.2. Vyhodnocení koeficientu soudečkovitosti je pak provedeno pro každý pěchovaný vzorek. Vypočítané hodnoty jednotlivých koeficientů soudečkovitosti, i objemů potřebných pro jejich výpočet jsou zapsány v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3. Koeficienty soudečkovitosti ze stroje CZR 600

Číslo vzorku	Objem tělesa V_C [mm ³]	Objem válcové části V_v [mm ³]	Objem soudečkovité části V_s [mm ³]	Koeficient soudečkovitosti B_S [-]
1	954,9	908,3	46,6	0,0488
2		847,8	107,1	0,1122
3		882,5	72,4	0,0758
Průměr		9,00	75,4	0,0789

Následuje příklad výpočtu pro 3. řádek tabulky 2.13.

- a) Ve druhém sloupci je počítán objem celého tělesa (1.15). Pro výpočet celkového objemu (1.15), byly použity průměrná výška a průměr tělesa, které jsou vzhledem k malým rozdílům v rozměrech nepěchovaných těles dostačující.

$$V_C = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot h_0 = \frac{\pi \cdot 9^2}{4} \cdot 15,01 = 954,9 \text{ mm}^3 \quad (1.15)$$

- b) Třetí sloupec ukazuje příklad výpočtu objemu válcové části tělesa. Byl počítán pro každé pěchované těleso, podle jeho rozměrů a výsledné objemy byly rozlišeny indexy podle pěchovaného tělesa.

$$V_V = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 20,40^2}{4} \cdot 2,7 = 882,5 \text{ mm}^3 \quad (1.16)$$

- c) Z těchto předešlých objemových výpočtů lze nyní spočítat objem soudečkovitosti pěchovaného tělesa (1.17).

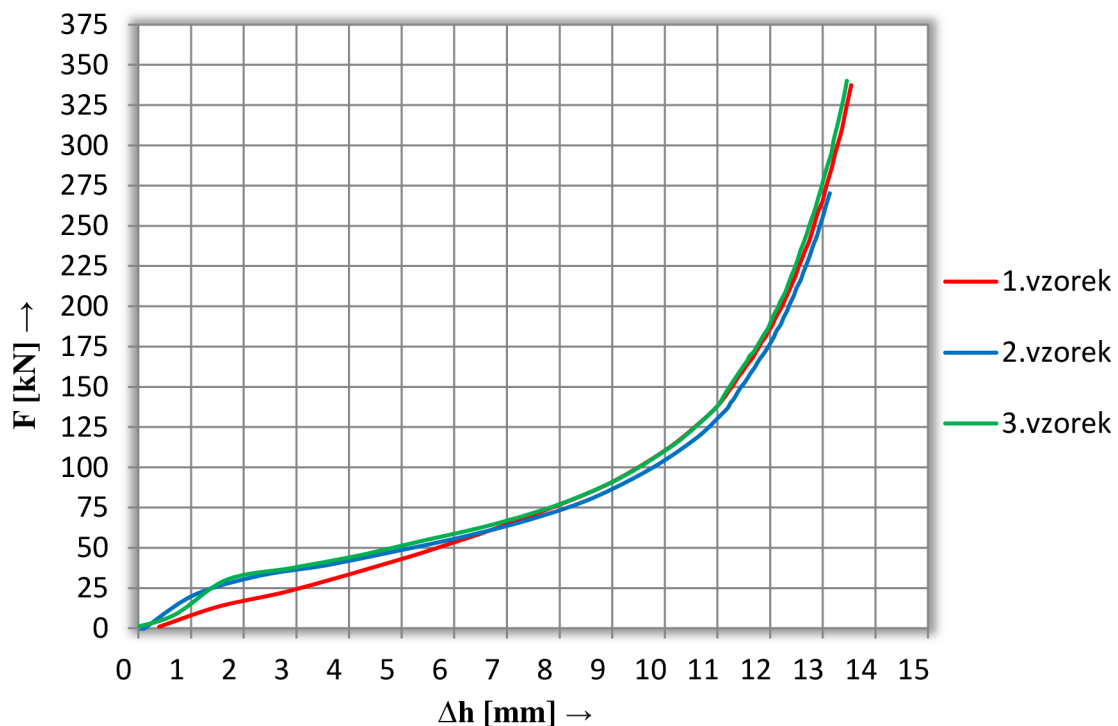
$$V_S = V_C - V_V = 954,9 - 882,5 = 72,4 \text{ mm}^3 \quad (1.17)$$

- d) Výsledný koeficient soudečkovitosti se spočítá dle (1.3)

$$B_S = \frac{V_S}{V_C} = \frac{72,4}{954,9} = 0,0758$$

Výsledný koeficient soudečkovitosti je (vzhledem ke složitosti měření průměru válcové části pěchovaného tělesa d_1) velmi obtížné přesně určit. Hodnoty zde vypočítané je vhodné brát spíše orientačně.

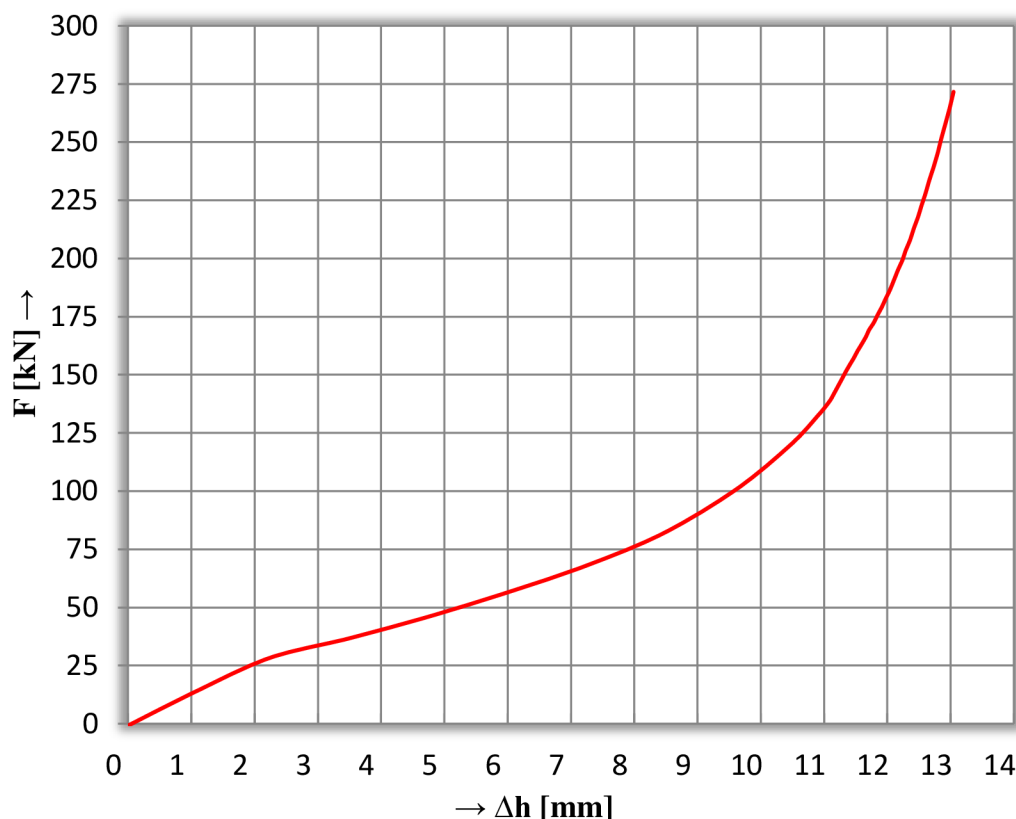
V průběhu pěchovací zkoušky byla z každého pěchovaného vzorku získána jedna z křivek závislosti pěchovací síly na změně výšky tělesa (obr. 47). Zároveň byl vygenerován textový soubor se záznamem popisujícím měřené veličiny v průběhu zkoušky. Zaznamenané veličiny byly, jak již bylo uvedeno, měřeny kontinuálně v půlsekundovém rozmezí. Měřenými veličinami byly čas, působící síla, dráha a teplota. Získané textové soubory byly následně zpracovány v Excelu, za vzniku grafu obsahujícího tři barevně rozlišené křivky.



Obr. 47 Pracovní diagramy získané ze zkoušky na CZR 600

Na vykreslených křivkách jsou vidět jen relativně malé rozdíly, to vypovídá o jednotnosti podmínek při provedené zkoušce. Ovšem začátek pracovního diagramu prvního pěchovaného tělesa vykazuje mírnou odlišnost od ostatních dvou těles. K jeho počáteční deformaci stačila menší přetvárná síla.

Všechny tři získané křivky byly aritmeticky zprůměrovány a ze získaných hodnot vznikla jedna výsledná (obr. 48). Tato křivka je určena jako výchozí pro sestavení grafu křivky zpevnění pro materiál MS 68.



Obr. 48 výsledný pracovní diagram ze zkoušky na CZR 600

Pro vykreslení křivky zpevnění, byly použity hodnoty působící síly v okamžitých výškách pěchovaného tělesa, získané z textových souborů ze zkoušek. Pro názornost jsou zvoleny měřené výšky tělesa, kterými budou h_1 až h_5 . Hodnoty jsou zaneseny do prvního sloupce tabulky 2.4. K nim náleží sloupec čtvrtý, ukazující velikost použité síly při pěchování.

Tabulka 2.4. Základní přetvárné odpory při stlačování

Okamžitá výška h_i [mm]	Log. Přetvoření φ [-]	Plocha styku tělesa a kovadel S [mm ²]	Síla F [N]	Přirozený přetvárný odpor σ_p [N. mm ⁻²]
12,76	0,16144	79,5214969	28 261	378,00764
11,51	0,26524	86,7507239	36 690	442,365796
10,24	0,38175	95,4257963	46 103	494,72307
8,99	0,51219	106,028663	56 582	532,922807
7,76	0,65916	119,282245	67 938	552,419648

Výpočet pro třetí řádek tabulky bude následovný:

a) Logaritické přetvoření φ je počítáno dle vztahu (1.9)

$$\varphi = \ln \frac{h_o}{h} = \ln \frac{15,01}{10,24} = 0,38175$$

- b) Plocha styku tělesa a kovádel, nebo-li okamžitý průřez tělesa S dle vztahu (1.8). Pro jeho výpočet je třeba znát počáteční průřez tělesa S_0 dle (1.18).

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 9^2}{4} = 63,62 \text{ mm}^2$$

Na základě výpočtu počátečního průřezu tělesa a znalosti jeho původní výšky, lze vypočítat průřez tělesa v libovolné výšce

$$S = \frac{S_0 \cdot h_0}{h_i} = \frac{63,62 \cdot 15,01}{10,24} = 95,42 \text{ mm}^2$$

- c) Z takto stanoveného okamžitého průřezu a síly jejíž velikost v daném okamžiku je známá, se určí přirozený přetvárný odpor (1.7)

$$\sigma_p = \frac{F}{S} = \frac{46103}{95,42} = 494,72 \text{ MPa}$$

Poté je v závislosti na logaritmickém přetvoření kreslena křivka zpevnění. Na vodorovné ose je zapsáno logaritmické přetvoření φ a na svislé ose jsou vyneseny, náležící přetvárné odpory materiálu (hodnoty jsou modře zvýrazněny v tabulce 2.4). Vzniklými body je vedena křivka σ_p , která při jednotlivých logaritmických stupních stlačení udává přetvárný odpor materiálu (viz. obr. 49).

Dále je do grafu vkreslena křivka jednotkové práce. Je počítána z přetvárné práce A dle vztahu (1.10) a objemu tělesa V_C (1.15). Výpočet jednotkové práce ukazuje vztah (1.11). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 2.5.

Tabulka 2.5 Základní přetvárné odpory při stlačování

Okamžitá výška h_i [mm]	Log. Přetvoření φ [-]	Přirozený přetvárný odpor σ_p [N·mm ⁻²]	Střední přetvárný odpor $\sigma_{stř}$ [MPa]	Přetvárná jednotková přetvárná práce a [J·cm ⁻³]
12,76	0,16144	378,00764	–	–
11,51	0,26524	442,365796	410,186718	108,7979251
10,24	0,38175	494,72307	468,544433	178,8668373
8,99	0,51219	532,922807	513,8229385	263,1749709
7,76	0,65916	552,419648	542,6712275	357,7071663

Modrou barvou zaznačené hodnoty byly použity pro vykreslení křivky jednotkové práce v obr. 49 (fialová křivka). Třetí řádek tabulky je zde pro názornost vypočten.

- a) Je nutno vypočítat střední přetvárný odpor dle vztahu (1.12)

$$\sigma_{stř} = \frac{\sigma_{p_{i-1}} + \sigma_{p_i}}{2} = \frac{442,36 + 494,72}{2} = 468,54 \text{ MPa}$$

- b) Výpočet přetvárné jednotkové práce vychází z přetvárné práce (1.10) a objemu tělesa.

$$A = \sigma_{stř} \cdot V_C \cdot \ln \frac{h_0}{h} \text{ [J]}$$

Tento vztah je možno dosadit do vztahu pro jednotkovou přetvárnou práci (1.11)

Výpočet je následně zjednodušen. Je vidět že po rozepsání vztahu lze objem tělesa ze vzorce vyloučit.

$$a = \frac{A}{V_c} = \frac{\sigma_{stř} \cdot V_c \cdot \ln \frac{h_0}{h}}{V_c} = \sigma_{stř} \cdot \ln \frac{h_0}{h} = 468,54 \cdot \ln \frac{15,01}{10,24} = 179 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (1.11)$$

Výsledná křivka jednotkové práce (obr. 49), byla vykreslena z takto získaných hodnot. Všechny výpočty byly provedeny pomocí Excelu.

Při vykreslování křivek zpevnění by měla být u grafu zapsána střední přetvárná rychlost, za které zkouška probíhala, ta se vypočítá ze vztahu (1.13). K tomu je třeba znát rychlost kovadel (1.14). Čas pēchování Δt , stejně jako dráhu pēchování Δh , jsou získané ze zkoušky a jsou zapsány ve výstupním textovém souboru. Pro výpočet byla použita průměrná dráha nástroje z tabulky 2.2, čas pēchování $\Delta t = 21\text{s}$. Rychlost kovadel je potom vypočítána jako

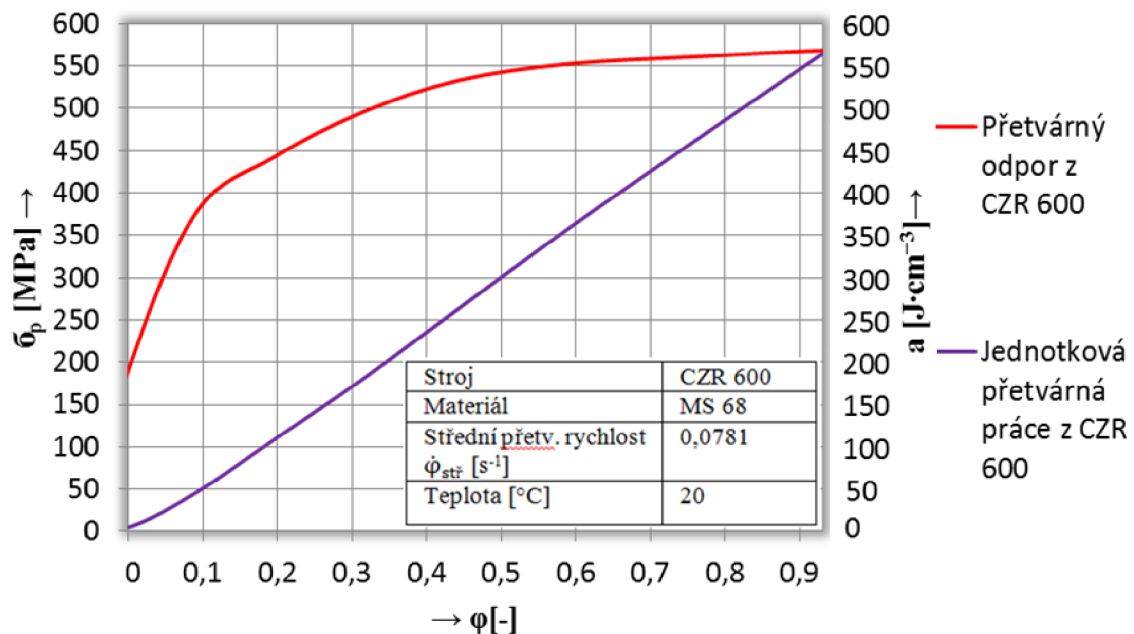
$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_0 - h}{\Delta t} = \frac{15,01 - 2,91}{21} = 0,576 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Střední přetvárná rychlost se pak vypočítá ze vztahu (1.13)

$$\dot{\phi}_{stř} = \frac{v \cdot \ln \frac{h_0}{h}}{h_0 - h} = \frac{0,576 \cdot \ln \frac{15,01}{2,91}}{15,01 - 2,91} = 0,0781 \cdot \text{s}^{-1}$$

V grafu jsou tedy znázorněny dvě barevně rozlišené křivky. Jak ukazuje legenda výše počítaný přetvárný odpor materiálu je zobrazen červenou křivkou. Tato křivka byla vytvořena v programu Excel z textového souboru získaného z pēchovací zkoušky. Tento soubor obsahoval průběžný záznam dat z pēchovací zkoušky.

Do diagramu bývá rovněž zakreslena jednotková práce, která je v legendě znázorněna křivkou fialové barvy. Rovněž byla vytvořena v Excelu ze získaného textového souboru.



Obr. 49 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce ze zkoušky na CZR 600

Jak ukazuje výsledný graf největší dosažený přetvárný odpor materiálu, který lze vyčíst je asi 570 MPa. Graf byl zpracován z údajů naměřených v průběhu zkoušky. Zkouška probíhala při střední přetvárné rychlosti $\dot{\phi}_{stř} 0,0781 \text{ s}^{-1}$ a teplotě 20 °C.

2.3 Pěchovací zkouška na ZD40 [11], [34]

Zkoušení materiálu MS 68 proběhlo podobně jako na předchozím stroji. Byly zde rovněž pěchovány tři zkušební tělesa a snímání hodnot bylo taktéž uskutečněno elektrickou cestou. Snímací zařízení jsou zakomponována uvnitř zkušebního stroje, ale princip jejich funkce je stejný jako u snímačů použitých na CZR 600. Zde byl k vyhodnocení zkoušky použit program M-Test.

2.3.1 Vyhodnocení [11], [7], [10]

Každý rozměr nepěchovaného tělesa byl třikrát změřen a aritmetický průměr těchto hodnot byl zapsán do tabulky 2.6. Po spēchování byla tělesa proměřena stejným způsobem a jejich rozměry byly opět zaznamenány do tabulky. Znázornění měřených rozměrů je na obr. 46a.

Tabulka 2.6. Rozměry pěchovaných a nepěchovaných vzorků

Číslo vzorku	Nepěchovaná výška h_0 [mm]	Nepěchovaný průměr d_0 [mm]	Pěchovaná výška h [mm]	Průměr válcové části d_1 [mm]	Průměr soudečkovité části d_2 [mm]
1	15,01	9,02	3,62	17,81	18,73
2	14,98	9,03	3,67	17,69	18,71
3	15,01	8,98	3,71	17,51	18,67
Průměr	15,00	9,01	3,67	17,76	18,70

Kontrola pěchovacího poměru D_R , vztah (1.11). Je opět počítán z průměrných hodnot výšky a průměru tělesa.

$$D_R = \frac{h_0}{d_0} = (1,25 \div 2,5)[-] = \frac{15,00}{9,01} = 1,66 \in (1,25 \div 2,5)$$

Protože pěchovací poměr tělesa leží v daném intervalu lze říci, že těleso je svými rozměry vhodné pro pěchovací zkoušku.

Jako u předchozí zkoušky na CZR 600 je i zde určen koeficient soudečkovitosti B_S podle vztahu (1.12). Je určován z objemů tělesa, jež byly vypočteny z naměřených rozměrů (tabulka 2.6) a zapsány do tabulky 2.7. V této tabulce je rovněž zapsán výsledný koeficient soudečkovitosti pro každé pěchované těleso.

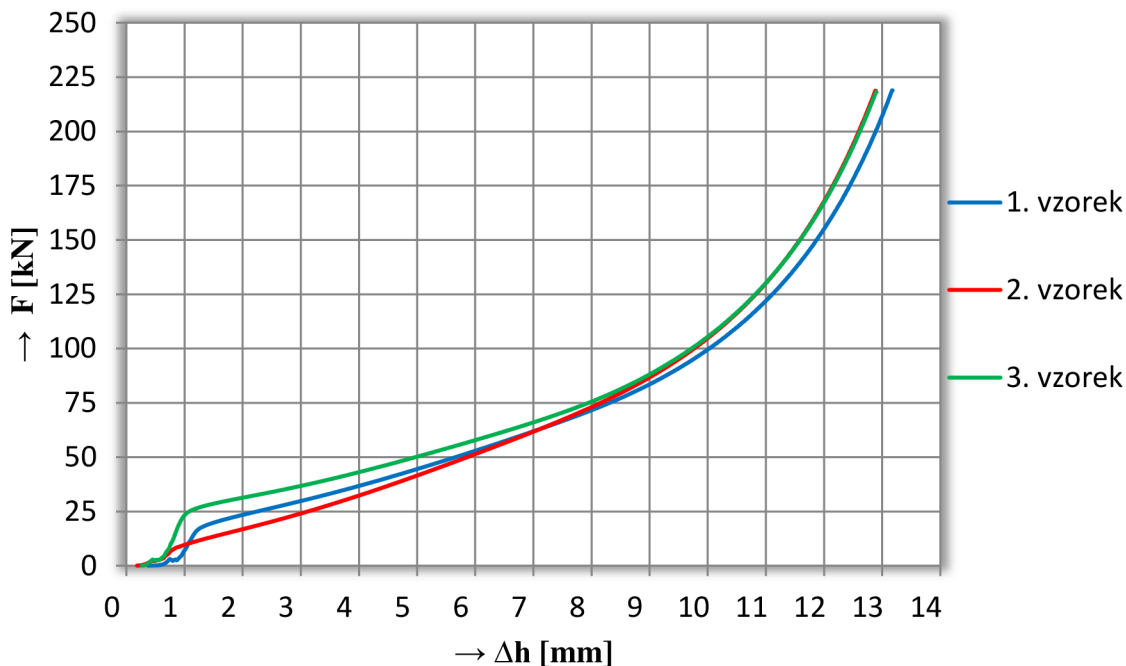
Tabulka 2.7. Koeficienty soudečkovitosti ze stroje ZD 40

Číslo vzorku	Objem tělesa V_C [mm ³]	Objem válcové části V_v [mm ³]	Objem soudečkovité části V_s [mm ³]	Koeficient soudečkovitosti B_S [%]
1	954,9	908,3	46,6	4,88
2		847,8	107,1	11,22
3		882,5	72,4	7,58
Průměr		9,00	75,4	7,89

Celkový objem tělesa byl vypočten z průměrných rozměrů výšky a průměru tělesa. Vzhledem ke značné shodě rozměrů pěchovaných těles je takto vypočítaný objem zcela dostačující. Výsledný koeficient soudečkovitosti je vhodné brát spíše orientačně, stejně jako u předchozího.

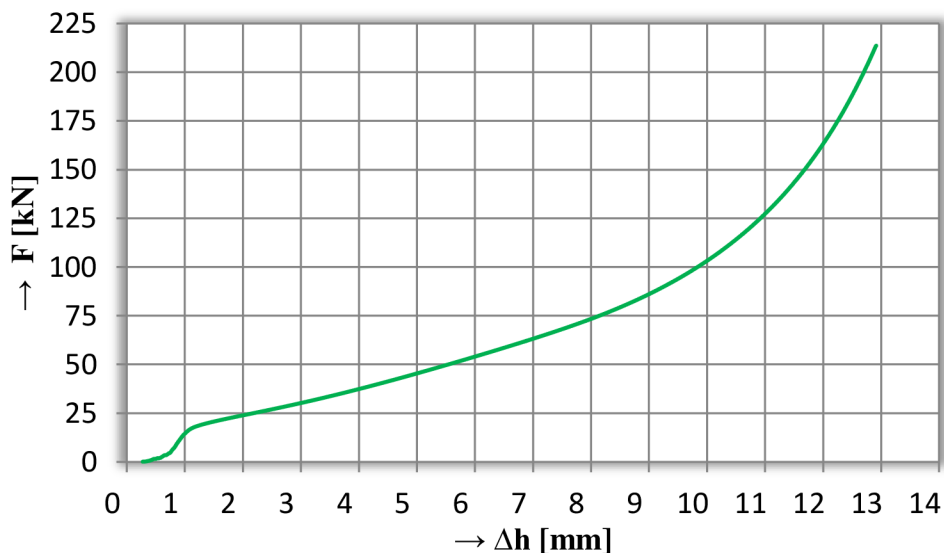
Průběh pětování byl vyhodnocován softwarově zmiňovaným programem M-Test. Výsledkem měření byly stejně jako u softwaru Dewesoft, křivky závislosti pětovací síly na stlačení těles. Pro každé pětované těleso vznikla jedna tato křivka a byl vygenerován textový soubor popisující průběžně měřené veličiny. Za pomoci textových souborů byl v programu Excel vykreslen graf obsahující všechny tři křivky (obr. 50).

Vykreslené křivky vykazují relativně malé rozdíly v jejich průběhu, to značí, že měření všech vzorků probíhalo za podobných podmínek.



Obr. 50 výsledné pracovní diagramy získané ze zkoušky na ZD 40

Hodnoty pro vykreslení pracovních diagramů byly aritmeticky zprůměrovány a vznikla tak jedna výsledná křivka (obr. 51).



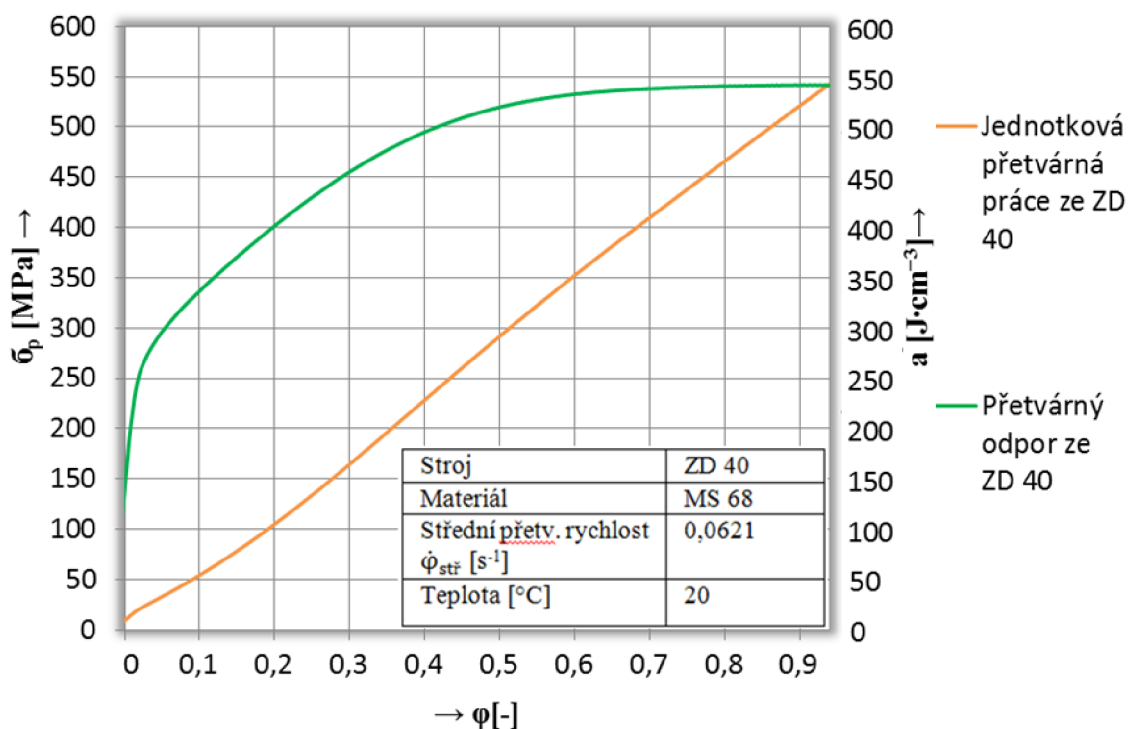
Obr. 51 výsledná křivka získaná ze zkoušky na ZD 40

Výpočet střední přetvárné rychlosti dle vztahu (1.13). U stroje ZD 40 byla pevně nastavena rychlost kovadel na $0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a není ji třeba nadále počítat. Výška tělesa je opět brána jako průměrná hodnota, její velikost je zapsána v tabulce 2.6.

Střední přetvárná rychlost

$$\dot{\phi}_{\text{stř}} = \frac{v \cdot \ln \frac{h_0}{h}}{h_0 - h} = \frac{0,5 \cdot \ln \frac{15}{3,67}}{15 - 3,67} = 0,0621 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výsledná křivka závislosti pěchovací síly na změně výšky tělesa byla použita pro vykreslení křivek zpevnění materiálu obr. 52. Graf byl vytvořen stejným postupem jako graf u zkoušky na CZR 600 a to za pomoci textových souborů a patřičných výpočtů. Grafy i jejich výpočty byly získány z Excelu. Ukázka výpočtů je zobrazena v předchozím měření.

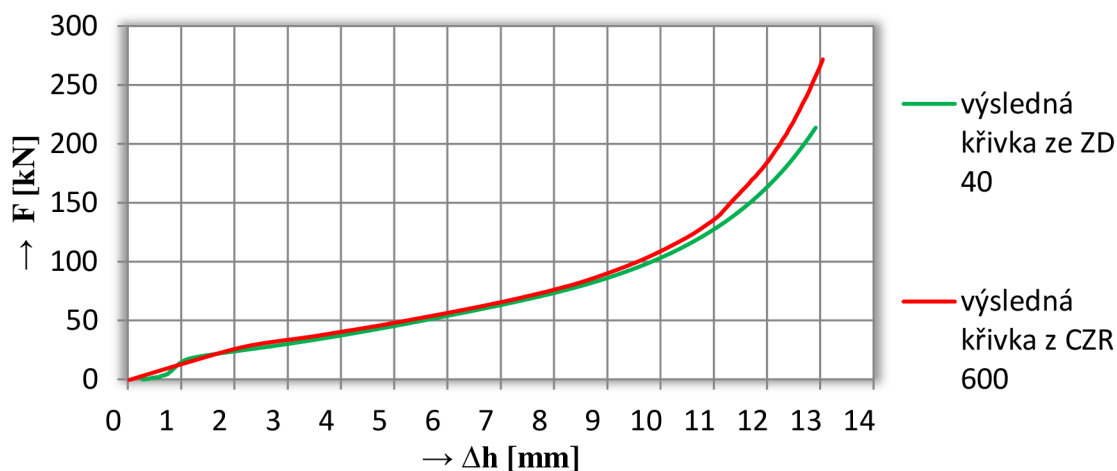


Obr. 52 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce ze zkoušky na ZD 40

Diagram zobrazuje zeleně znázorněnou křivku přetvárného odporu a oranžovou barvou je vyobrazena křivka jednotkové práce. Obě tyto křivky by se měly přibližně shodovat s křivkami získanými ze zkoušky na stroji CZR 600.

2.4 Srovnání provedených zkoušek [11] [7]

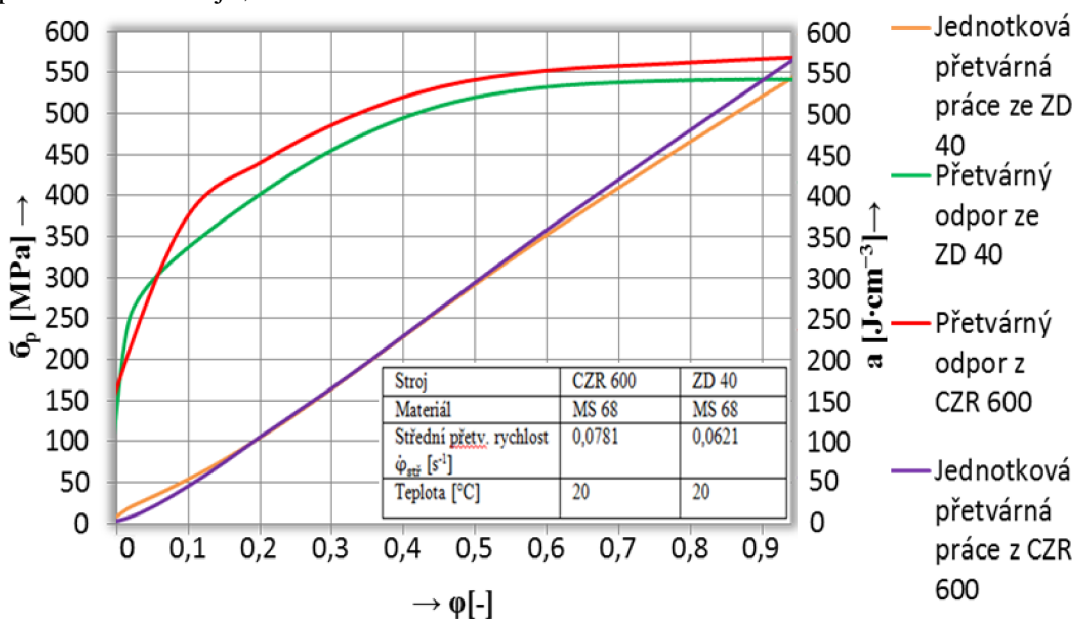
Pro názorné srovnání výsledků pēchovacích zkoušek byl vytvořen graf, obsahující výsledné křivky závislosti pēchovací síly na výšce tělesa, z obou zkušebních strojů (obr 53). Zde lze pozorovat poměrně dobrou shodu obou měření.



Obr. 53 Pracovní diagramy ze ZD 40 a z CZR 600

Naměřené křivky vykazují určité rozdíly v koncové části. Síla potřebná ke spēchování na konečnou výšku je při použití lisu CZR 600 o něco větší, než při použití univerzálního zkušebního stroje ZD 40. Toto mohlo být způsobeno různými pēchovacími nástroji, nebo různou citlivostí použitých snímačů.

Jako další je zde provedeno srovnání vyšších křivek zpevnění a křivek jednotkové práce z obou strojů, viz. obr. 54.



Obr. 54 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce z CZR 600 a ze ZD 40

Jak je na grafu vidět křivky jednotkové práce z obou zkoušek se téměř překrývají. Křivky zpevnění materiálu se mírně liší, ale jejich vykreslení má relativně souběžný průběh. Obojí vypovídá o shodnosti zkoušeného materiálu a o podobných podmínkách při jeho zkoušení. Rozdíl v průběhu křivek může být způsoben již zmíněným rozdílem ve velikosti pētvárných rychlostí, nebo tím že u každého stroje byl použit vlastní pēchovací nástroj. Různé pēchovací nástroje mohly vyvodit různě velkou třecí sílu, která způsobila vzniklou odchylku křivek pētvárného odporu materiálu.

3 ZÁVĚRY

Pěchovací zkoušky jsou používány k vyhodnocování mechanických vlastností materiálu. V této práci byly, mimo jiné, pomocí pěchovací zkoušky zjišťovány křivky přetvárných odporů materiálu. Proběhlo zde teoretické zhodnocení několika druhů používaných pěchovacích zkoušek a je zde rovněž výčet různých druhů pěchovacích těles. Pěchovací tělesa jsou vyrobena ze zkoušeného materiálu. Jsou zde popsána jak bez úprav tak i speciálně upravená, která slouží ke zpřesnění výsledků. Nejčastěji používaná jsou válcová tělesa s rovnými čely, je tomu tak pro jejich snadnou vyrobiteľnost a relativně přesné dosahované výsledky měření.

Byly provedeny dvě pěchovací zkoušky, jedna na hydraulickém lisu CZR 600 a druhá na univerzálním hydraulickém zkušebním stroji ZD 40. Na každém stroji byla pěchována tři zkušební tělesa, pro která byl spočítán pěchovací poměr a pro každé jedno určen koeficient soudečkovitosti. Obě měření byla zpracována softwarem snímajícím průběžné hodnoty při měření. Použitý softwar pro měření na CZR 600 byl program Dewesoft a pro měření na ZD 40 program M-Test. Výsledkem každého měření byla křivka závislosti pěchovací síly na výšce tělesa a textový soubor obsahující průběžně měřené hodnoty každého vzorku.

Za použití těchto textových souborů a výpočtových vztahů byla vykreslena křivka zpevnění materiálu a křivka jednotkové práce pro obě pěchovací zkoušky. Následně byly výsledné křivky obou zkoušek srovnány a byla zde pozorována malá odchylka křivek přetvárného odporu. Ta mohla vzniknout díky tomu, že u každého stroje byl použit jiný pěchovací nástroj. Rozdílné pěchovací nástroje mohly vyvodit různě velkou třecí sílu, která způsobila odchylku obou křivek. Odchylka mohla rovněž vzniknout použitím různých snímačů, které byly různě citlivé.

Jednoznačnou výhodou softwarového řešení pěchovací zkoušky je vzniklý textový soubor se záznamem působících veličin. Takový záznam je lehce reprodukovatelný a může být snadno a rychle použit pro různá vyhodnocení. Při vyhodnocování pěchovací zkoušky například pomocí XY zapisovače, by pro vykreslení křivky zpevnění materiálu a křivky jednotkové přetvárné práce, byly použity totožné výpočtové vztahy. Nevýhodné by zde však bylo, odečítání vstupních hodnot pro výpočet přímo z vykresleného grafu.

Seznam použitých zdrojů

1. ADMET. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://admet.com/products/biaxial-testing-machines/axial-torsion-test-machines/>
2. ARCELORMITTAL TECHNOTRON S.R.O. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.vptechnotron.cz/AMT_images/protlac2.jpg
3. BEAREKA [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.beareka.cz/>
4. BLOCK GMBH. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://block-quality.com/index.php?page_href=Zerstoerende_pruefung/Druckversuch.html
5. DEWETRON [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.dewetron.cz/>
6. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1999, 169 s. : il. ISBN 80-214-1481-2.
7. DRASTÍK, František a Jiří ELFMARK. *Plastometry a tvaritelnost kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 386 s.
8. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992, 524 s.: obr., tabulky grafy; 21 cm. ISBN 80-03-00651-1.
9. FARLÍK, Alois a Emanuel ONDRÁČEK. *Teorie dynamického tváření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 314 s.
10. FOREJT , M, HUMÁR, A, PÍŠKA, M, JANÍČEK, L. *Experimentální metody* [online]. Brno. 2003 [cit. 2015-04-20]. Dostupný z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf
11. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 8021423749.
12. FOREJT , Milan. *Teorie tváření návody do cvičení* [online]. 1 Brno : 2002 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf
13. GAJDOŠ, František. *Technologie výroby I. – tváření* [online]. [2002] [cit. 2009-03-25]. Dostupný z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_vyroby_I__tvareni__gajdos.pdf
14. GAJDOŠ, František. *Teorie tváření*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 141 s. : il.
15. CHLUDIL, Petr. *Pěchovací zkoušky*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.

16. INSTRON. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.instron.com/en-us/testing-solutions/by-test-type/flexure/astm-e290>
17. KIM, Hyunkee, Sang-Mae LEE a Taylan ALTAN. Prediction of hardness distribution in cold backward extruded cups. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 1996, roč. 59, č. 1, s. 113-121 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.1016/0924-0136(96)02292-3.
18. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 216 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-7082-668-1.
19. MICHNA, Štefan a Nataša NÁPRSTKOVÁ. *Tváření*. 1. vyd. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012, 223 s. ISBN 978-80-7414-445-5.
20. MORRIS, Alan S. *Measurement and Instrumentation Principles*. Butterworth Heinemann, 2001. ISBN 0750650818.
21. MULTIMEDIAEXPO [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Mosaz>
22. PEŠINA, Eugen. *Základy užité teorie plasticity*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury ; Slovenské vydavateľ'stvo technickej literatúry, 1966, 184 s. : obr., tabulky, grafy.
23. PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000, [144] s. ISBN 80-7078-635-3.
24. POČTA, Bohumil. *Základy teorie tváření kovů*. Vyd. 1. SNTL - Nakladatelství technické literatury : Slovenské vydavateľ'stvo technickej literatúry, 1966, 510 s. : il.
25. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
26. SAMEK, Radko. *Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti*. 1. vyd. Brno:VA, 1988. 88 s.
27. SEDLÁK, Ondřej. *Pěchovací zkoušky a jejich význam*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
28. SHABAIK, A.H., M. ABDEL-RAHMAN, F.F. ABD ELAZIZ a M.A. CHAABAN. Effect of the pre-gained volume strain ratio on the strain-path configuration of AISI 1045 steel in upsetting. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 1993, roč. 37, č. 1, s. 337-347 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.1016/0924-0136(93)90100-K.
29. SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Vyd. 1. Ostrava: Kovosil, 2011, 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7.

30. SLIDE PLAYER [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3008898/>
31. STOROŽEV, Michail Vasilievič, Jevgenij Alexandrovič POPOV a Karol POLÁK. *Teória tvárnenia kovov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1978, 486 s.
32. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. : il. ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4010-4.
33. ŠIMBERSKÝ, M. *Indukční snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s.
34. TEMPOS [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/>
35. ZWICK ROELL. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/stroje-pro-staticke-zkouseni.html>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol/Zkratka	Název	Jednotka
A	Přetvárná práce	[J]
a	Jednotková přetvárná práce	[J·cm ⁻³]
a ₀	Počáteční šířka vzorku	[mm]
a ₁	Šířka vzorku po spěchování	[mm]
a ₂	Šířka vzorku po spěchování	[mm]
B _S	Koeficient soudečkovitosti	[-]
d ₀	Počáteční průměr pěchovaného tělesa	[mm]
D _R	Pěchovací poměr	[-]
F	Síla působící na pěchovaný vzorek	[N]
h	Aktuální výška pěchovaného tělesa	[mm]
h ₀	Počáteční výška pěchovaného tělesa	[mm]
S	okamžitý průřez zkoušeného vzorku	[mm ²]
S ₀	počáteční průřez tělesa	[mm ²]
T	Teplota	[°C]
T _{REK}	Teplota rekrystalizace	[°C]
T _{TAV}	Teplota tavení	[°C]
u ₀	Počáteční úhlopříčka vzorku	[mm]
u ₁	Úhlopříčka spěchovaného vzorku	[mm]
u ₂	Úhlopříčka spěchovaného vzorku	[mm]
v	rychlost kovadel	[m·s ⁻¹]
V _C	celkový objem tělesa	[mm ³]
V _S	objem soudečkovité části tělesa	[mm ³]
V _V	objem válcové části tělesa	[mm ³]
Δh	rozdíl počáteční a aktuální výšky tělesa	[mm]
Δt	čas pěchování	[s]
ε	Stupeň přetvoření	[-]
ε _{min}	Minimální poměrná deformace průřezu	[-]
ε _{max}	Maximální poměrná deformace průřezu	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
σ _p	Přirození přetvárný odpor	[MPa]
σ _{stř}	Střední přetvárný odpor	[MPa]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
φ̇	střední přetvárná rychlost	[s ⁻¹]

Seznam obrázků

- Obr. 1 Zkoušky mechanických vlastností kovů
- Obr. 2 Ukázka výrobků získaných objemovým tvářením
- Obr. 3 Pěchování válcovitého tělesa
- Obr. 4 Mechanické schéma deformace při pěchování
- Obr. 5 Vznik soudečkovitosti
- Obr. 6 Vlákniatá struktura výkovku
- Obr. 7 Oblasti s různým přetvořením po deformaci
- Obr. 8 Tvářecí teploty oceli
- Obr. 9 Deformační textura vzniklá tvářením za studena
- Obr. 10 Závislost přirozeného přetvárného odporu na teplotě při tváření
- Obr. 11 Lom při pěchování tělesa
- Obr. 12 Vliv teploty na mechanické vlastnosti
- Obr. 13 Rekrytalizační diagram pro nízkouhlíkovou ocel
- Obr. 14 Pracovní diagram přetvoření pro hliník
- Obr. 15 Zkouška rovnými kovadly
- Obr. 16 Zkouška kuželovými kovadly
- Obr. 17 Zkouška úzkými kovadly
- Obr. 18 Pěchování v obalu
- Obr. 19 Zk. za hydrostatického tlaku
- Obr. 20 Zkouška s omezeným šířením
- Obr. 21 Závislost soudečkovitosti na pěchovacím poměru
- Obr. 22 Rozdělení objemů tělesa pro výpočet koeficientu B_S
- Obr. 23 Vzorek s kuželovými čely
- Obr. 24 Fáze deformace při pěchování s plastickými podložkami
- Obr. 25 Vzorek upravený dle Pavlova a Rastěgajeva
- Obr. 26 Porovnání upraveného vzorku dle Pavlova a Rastěgajeva se vzorkem neupraveným
- Obr. 27 Zkušební těleso dle Židka
- Obr. 28 Zkušební těleso bez vrubu a těleso dle Kuda
- Obr. 29 Průřez speciálně upravenými kovadly
- Obr. 30 Průběh pěchování hranolu
- Obr. 31 Pěchované těleso ploché tyče
- Obr. 32 Zkušební stroj řady ProLine od firmy Zwick Roell
- Obr. 33 zkušební stroje řady AllroundLine od firmy Zwick Roell
- Obr. 34 Diagram závislosti pěch. síly na výšce
- Obr. 35 CZR 600
- Obr. 36 ZD 40
- Obr. 37 Mosazné nábojnice
- Obr. 38 Vliv Zn na pevnost a tažnost mosazi
- Obr. 39 Vzorky zpěchované na stroji CZR 600
- Obr. 40 Dynamometr k měření statické
- Obr. 41 Schéma zapojení tenzometrů
- Obr. 42 Nástroj pro pěchování
- Obr. 43 Indukčnostní snímač
- Obr. 44 Termočlánek
- Obr. 45 sestava stanice Dewetron
- Obr. 46 Pěchované těleso s popisem měřených rozměrů
- Obr. 47 Pracovní diagramy získané ze zkoušky na CZR 600
- Obr. 48 výsledný pracovní diagram ze zkoušky na CZR 600

- Obr. 49 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce ze zkoušky na CZR 600
Obr. 50 výsledné pracovní diagramy získané ze zkoušky na ZD 40
Obr. 51 výsledná křivka získaná ze zkoušky na ZD 40
Obr. 52 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce ze zkoušky na ZD 40
Obr. 53 Pracovní diagramy ze ZD 40 a z CZR 600
Obr. 54 Křivky zpevnění a křivky jednotkové práce z CZR 600 a ze ZD 40