



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝZNAM PĚCHOVACÍ ZKOUŠKY PRO NUMERICKOU SIMULACI TVÁŘECÍCH PROCESŮ

IMPORTANCE OF UPSETTING TEST FOR NUMERICAL SIMULATION OF FORMING PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Tinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Petr Tinka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Význam pēchovací zkoušky pro numerickou simulaci tvářecích procesů

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 měřicí laboratoře. Předpokládá se využití měřicí stanice Dewetron v součinnosti s PC. Získaný materiálový model bude případně ověřen jednoduchou simulací v systému MKP.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování literární rešerše se zaměřením na pēchovací zkoušky,
- praktická měření a vyhodnocení pēchovacích zkoušek na konkrétních vzorcích,
- ověření zjištěného materiálového modelu provedením numerické simulace.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

MORRIS, Alan S. Measurement and instrumentation principles. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, 475 p. ISBN 0750650818.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno:VA, 1988. 88 s.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. 4th ed. United States: Thomson, 2007, xvii, 808 s. : il. (některé barev.) ; 25 cm. ISBN 978-0-534-55298-6.

PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. Výpočetní metody ve tváření. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000, 171 s. ISBN 9778-0-521-51823-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

TINKA Petr: Význam pēchovací zkoušky pro numerickou simulaci tvāřecích procesů

Práce se předně zabývá tvorbou materiálového modelu pro numerickou simulaci s využitím pēchovací zkoušky, a to pro ocel 17 240, na kterou byla nanesena vrstva maziva Delta 144. Ze získaných hodnot síly a dráhy se vytvořil materiálový model, který slouží k charakterizování materiálu pro numerickou simulaci. Simulace probíhala v programu ANSYS Workbench 19.0. Z ní se získá závislost síly na dráze, která slouží k porovnání s pēchovací zkouškou. Ze srovnání vyšlo, že hodnoty příliš neodlišují a je možné tento materiálový model používat pro numerické simulace.

Klíčová slova: pēchovací zkouška, numerická simulace, ocel 17 240, materiálový model

ABSTRACT

TINKA Petr: Importance of upsetting test for numerical simulation of forming processes

The thesis deals primarily with the creation of a material model for numerical simulation using an upsetting test for steel 17 240, a layer of Delta 144 was applied on the steel. From the obtained values of force and path, a material model was created which serves for characterization material for numerical simulation. The simulation was performed in ANSYS Workbench 19.0. From this, force and path are obtained, which is used to compare with the upsetting test. It is clear from the comparison that the values do not differ too much, and it is possible to use this material for numerical simulation.

Keywords: upsetting test, numerical simulation, steel 17 240, material model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TINKA, Petr. *Význam přechovací zkoušky pro numerickou simulaci tvářecích procesů*. Brno, 2018. 40s, 2 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 22.5.2018

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za trpělivost, cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a panu Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc s vykonáním experimentu.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2 TECHNOLOGIE PĚCHOVÁNÍ	11
2.1 Parametry pěchování	11
2.2 Pěchovací zkoušky	12
2.3 Způsoby získávání hodnot	16
2.3.1 Měření pěchovací síly.....	17
2.3.2 Měření dráhy	18
2.3.3 Měření teploty	19
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	20
3.1 Základní typy prvků	20
3.2 Typy řešených úloh	21
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
4.1 Zkušební vzorky	23
4.2 Zkušební zařízení	24
4.3 Kalibrace dynamometru C6R	26
4.4 Pěchovací zkouška	27
4.5 Porovnání křivky zpevnění z tahové zkoušky	30
4.6 Numerická simulace	32
4.7 Dynamometr RA 100	35
5 ZÁVĚRY	40
Seznam použitých zdrojů.....	41
Seznam symbolů a zkratk	43
Seznam obrázků.....	44
Seznam tabulek.....	45
Seznam příloh.....	45

ÚVOD [1], [2], [3]

Mezi mechanické vlastnosti, které jsou důležité pro správný výběr materiálu, patří pružnost, plasticita, pevnost a houževnatost. K určení těchto vlastností se provádějí různé mechanické zkoušky. Mezi základní patří zkouška tahem (obr. 1a), zkouška rázem v ohybu (obr. 1b), zkoušky tvrdosti (obr. 1c), zkouška tlakem (obr. 1d) a další.

Zkouška tlakem (pěchovací zkouška) má velký význam pro hodnocení objemové tvárnosti. Jejím výsledkem je závislost síly na dráze, ze které se přepočtem získá křivka přetvárného odporu, tj. základní charakteristika mechanických vlastností. Hodnotí se jí také pevnost křehkých materiálů (šedá litina, stavební materiály, kompozice a další).

Získané mechanické vlastnosti slouží pro popis modelů v různých numerických simulacích. Jednou z nejužívanějších numerických metod je metoda konečných prvků (MKP). Základem této metody je nahrazení celého objemu tělesa souborem jednoduchých podoblastí (konečných prvků), které tvoří dohromady konečnoprvkovou síť. Zadaná úloha se poté řeší tzv. po částech.



a) tahová zkouška



b) zkouška rázem v ohybu



c) tvrdost podle Vickerse



d) pěchovací zkouška

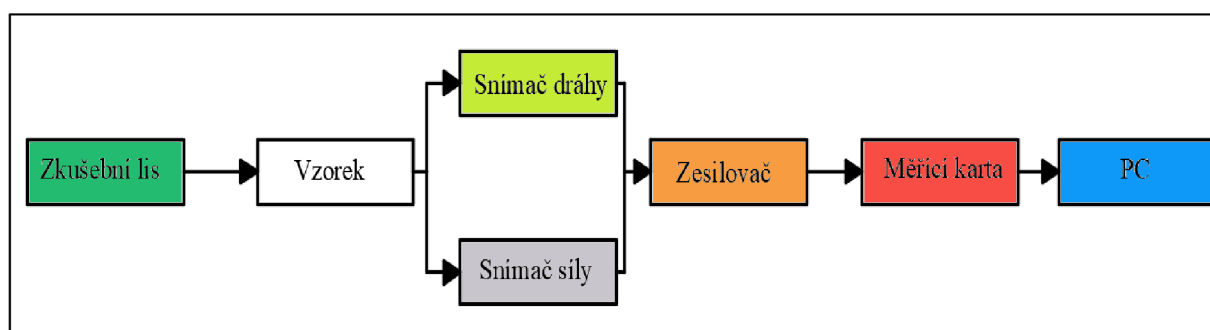
Obr. 1 Stroje pro základní mechanické zkoušky [4], [5], [6]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [8], [9]

Cílem práce je kromě provedení literární rešerše na téma pěchovací zkoušky, také provedení této zkoušky na konkrétních vzorcích a vytvoření numerické simulace. Zjišťování mechanických vlastností při pěchovací zkoušce je, oproti tahové, vhodné pro materiál, jenž bude zatěžován tlakem např. kování, protlačování atd.

Ze zpracovaných dat získanými pěchovací zkouškou, se vytvoří materiálový model, který je potřeba k popsání materiálu pro numerické simulace. Zkoušený materiál bude ocel ČSN 17 240, na který už byla v minulých letech provedena zkouška tahem, a proto se ještě provede srovnání křivek zpevnění získaných při zatěžování tahem a tlakem.

V současné době se na Ústavu strojírenské technologie, odboru tváření kovů a plastů provádí pěchovací zkouška podle obr. 2.



Obr. 2 Diagram měřicí soustavy [8]

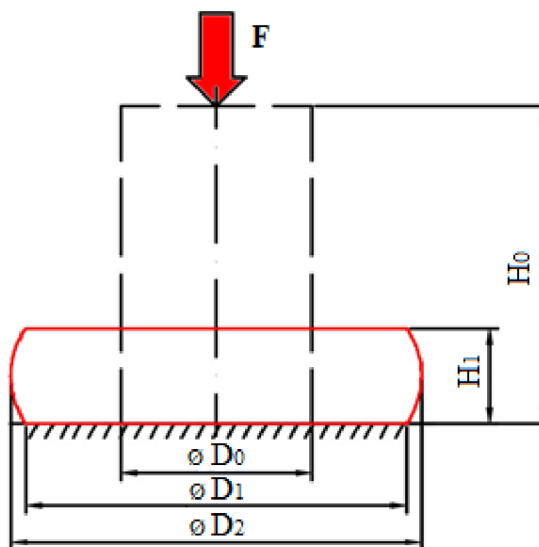
Zkouška probíhá na hydraulické lisu CZR 600. Vzorek je vložen do dutiny lisu mezi dvě rovnoběžné roviny, kterými je stlačován. Pěchovací síla je měřena snímačem síly (dynamometrem) a změna výšky vzorku je zaznamenávána snímačem dráhy. Oba dva signály jsou přes zesilovač a měřicí kartu posílány do počítače, kde je vyhodnocuje program Dewesoft.

Získaný materiálový model ze zkoušky bude ověřován s modelem vytvořeným z numerické simulace. Numerická simulace bude prováděna v programu Ansys Workbench 19.0, což je program řešící různými typy inženýrských analýz jako jsou kinematika, dynamika, prodění kapalin, akustika atd.

2 TECHNOLOGIE PĚCHOVÁNÍ [2], [7]

Pěchování je základní operací objemového tváření za studena, při kterém se zmenšuje výška polotovaru a zvětšuje se jeho příčný průřez (obr. 3), což z pěchování činí silově a energeticky velmi náročnou operaci. Napětí, které je způsobeno pěchovací silou F , působí výlučně na stykových plochách mezi nástroji a tvářeným tělesem. Na boční stěny pěchovaného tělesa většinou žádná vnější napětí nepůsobí.

Technologie má široké spektrum využití. Používá se k prokování ingotů, nebo také v kombinaci s protlačováním při výrobě součástí typu šroub a matice. Bývá to obvykle 1. operace.



Obr. 3 Pěchování válečku [2]

2.1 Parametry pěchování [2], [7], [10]

Nejběžnější polotovar, který se pěchuje je válcové těleso. Platí pravidlo, že poměr výšky ku průměru výchozího polotovaru (štíhlostní poměr λ) by neměl překročit hodnotu 2,3. To zabraňuje nežádoucímu ohybu pěchovaného tělesa a ztrátě stability. V případě, že poměr tuto hodnotu překračuje, je nutné použít víceoperační pěchování. V praxi se většinou pěchuje na dvě operace už při poměru $\lambda = 2$.

$$\frac{H_0}{D_0} \leq 2,3 \dots \text{jednooperační pěchování,} \quad (1.1)$$

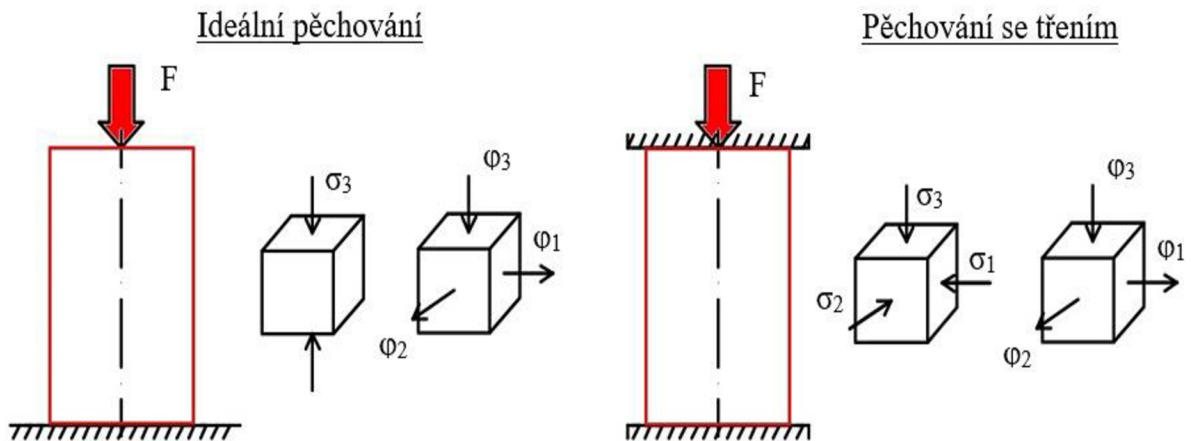
$$2,3 < \frac{H_0}{D_0} < 4,5 \dots \text{dvouoperační pěchování,} \quad (1.2)$$

$$\frac{H_0}{D_0} \geq 4,5 \dots \text{tříoperační pěchování,} \quad (1.3)$$

kde: H_0 ...výška polotovaru před pěchováním [mm],

D_0 ...průměr polotovaru před pěchováním [mm].

V teoretických výpočtech se řeší dvě schémata pěchování, která zobrazuje obr. 4. Jsou to ideální pěchování a pěchování se třením. Ideální pěchování slouží jako modelový případ, u kterého se zanedbává tření. Uvažuje se zde jednoosá napjatost, prostorový průběh deformace, a tak stav tohoto přetvoření má ve všech místech tělesa stejnou hodnotu. U reálného pěchování (se třením) se naopak počítá s víceosou napjatostí. Průběh deformace je, stejně jako u ideálního, prostorový.



Obr. 4 Mechanická schémata deformace při pěchování [2]

Při pěchování je deformace tělesa nerovnoměrná, což má za následek vznik přídavných tahových napětí a nežádoucí tvarovou změnu v podobě soudečkovitosti. Soudečkovitost se mění v závislosti na poměrné změně výšky a štíhlosti výchozího polotovaru. Vyjadřuje se vztahem:

$$c = \frac{D_1}{D_2} [-], \quad (1.4)$$

kde: c ...soudečkovitost [-],

D_1 ...nejmenší průměr napěchovaného polotovaru [mm],

D_2 ...největší průměr napěchovaného polotovaru [mm].

Pro nekruhový průřez zkoušeného vzorku se soudečkovitost vypočte vztahem:

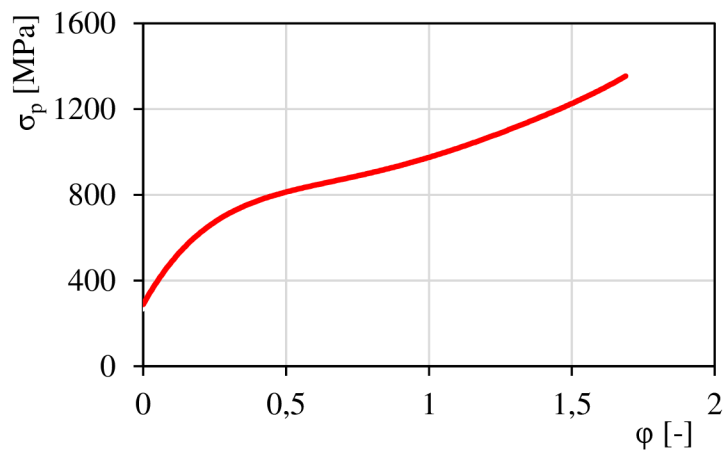
$$c = \frac{V_s}{V_c} [-], \quad (1.5)$$

kde: V_s ...objem soudečku [mm³],

V_c ...celkový objem napěchovaného polotovaru [mm³].

2.2 Pěchovací zkoušky [2], [7], [11], [12], [13], [14], [15], [16]

Cílem pěchovacích zkoušek je zjištění mechanických vlastností materiálů, při tlakovém zatížení. Především jde o získání křivky zpevnění, což je závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci (obr. 5), případně i na deformaci poměrné. Zpevnění se projevuje narůstajícím odporem materiálu proti přetvoření. Přirozený přetvárný odpor je odpor materiálu proti působení vnějších



Obr. 5 Křivka zpevnění [12]

sil za podmínek jednoosého stavu napjatosti, při kterém nastane plastická deformace. Je dán vztahem:

$$\sigma_p = \frac{F}{S} \text{ [MPa]}, \quad (1.6)$$

kde: F ...pěchovací síla [kN],

S ...průřez vzorku v okamžiku zjišťování přetvárného odporu [mm^2].

Průřez vzorku je dán vztahem:

$$S = \frac{S_0 \cdot H_0}{H} = \frac{S_0 \cdot H_0}{H_0 - \Delta H} \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (1.7)$$

kde: S_0 ...průřez vzorku před pěchováním [mm^2],

H_1 ...výška vzorku po pěchování [mm],

H ...výška vzorku v okamžiku zjišťování přetvárného odporu [mm],

ΔH ...změna výšky vzorku [mm].

Logaritmická deformace (skutečné přetvoření) je dána vztahem:

$$\varphi = \int_{H_0}^{H_1} \frac{dH}{H} = \ln \frac{H_1}{H_0} \text{ [-]}. \quad (1.8)$$

Dále se vyhodnocují pevnostní a plastické charakteristiky jako poměrná deformace:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_0 - H_1}{H_1} \text{ [-]}. \quad (1.9)$$

Z pěchovací zkoušky se ještě získává přetvárná práce, která se vypočte podle rovnice:

$$A = \int_0^H \sigma_p \cdot S \cdot dH = \int_0^H \sigma_p \cdot \frac{V}{H} \cdot dH = V \cdot \int_0^\varphi \sigma_p \cdot d\varphi \text{ [J]}, \quad (1.10)$$

kde: V ...Objem zkoušeného vzorku [mm^3].

Tato rovnice se ještě může zjednodušit na:

$$A = \sigma_p \cdot V \cdot \varphi = \sigma_p \cdot S_0 \cdot H_0 \cdot \varphi \text{ [J]}. \quad (1.11)$$

Z přetvárné práce se pak spočítá měrná přetvárná práce, která je vztažená na jednotku objemu a vyjadřuje plochu pod křivkou zpevnění.

$$A_j = \frac{A}{V} = \int_0^\varphi \sigma_p \cdot d\varphi = \text{[J} \cdot \text{cm}^{-3}\text{]}. \quad (1.12)$$

Další veličina, která má velmi významný vliv na velikost přirozeného přetvárného odporu je rychlost přetvoření. Je definována jako rychlost, s kterou se přibližují dva průřezy stlačovaného vzorku (rov. 1.13). S rostoucí rychlostí deformace přirozený přetvárný odpor vzrůstá.

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v}{H} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (1.13)$$

kde: t ...skutečný čas práce [s],

v ...okamžitá rychlost nástroje [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$].

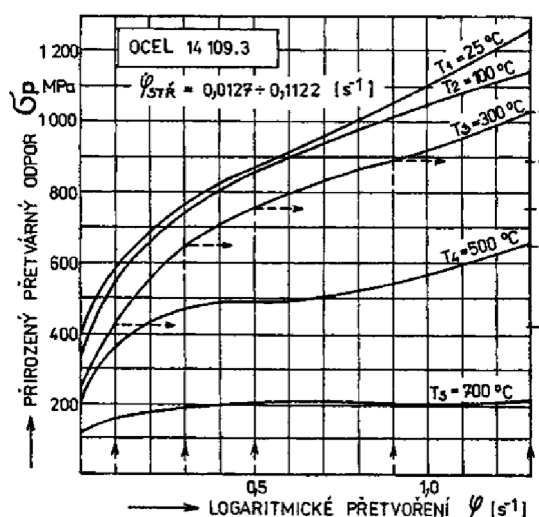
Okamžitá rychlost nástroje se vypočte podle vztahu:

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

Při pēchování je rychlost nástroje závislá na typu použitého stroje. V případě, že se tato rychlost považuje za konstantní, je možné výpočet zjednodušit. Uvažuje se střední rychlost pētvorení:

$$\dot{\varphi}_{\text{stř}} = \frac{v \cdot \ln \frac{H_0}{H}}{H_0 - H} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad (1.15)$$

Zmíněné charakteristiky závisí na chemickém složení, struktuře, velikosti a rychlosti deformace a teplotě tváření. Příklad závislosti přirozeného pētvárného odporu na deformaci a teplotě lze spatřit na obr. 6. Z něj je patrné, že s rostoucí velikostí deformace přirozený pētvárný odpor roste. Se zvyšující se teplotou naopak jeho velikost klesá. Křivky zpevnění se získávají experimentálně, lze je ale řešit i teoreticky, a to výpočtem matematickou aproximací pro dohodnuté převládající podmínky.



Obr. 6 Vliv teploty na přirozený pētvárný odpor [2]

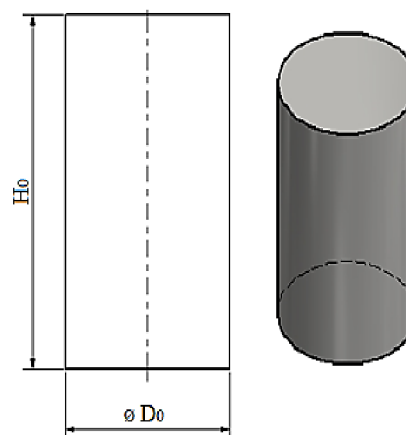
Používá se více druhů pēchovacích zkoušek, které se liší v typu kovadel, tvaru a úpravě zkoušeného materiálu nebo zkoušeným prostředím. Probíhají při určité teplotě a v určitém rychlostním intervalu. Jsou prováděny buď se zanedbáním tření nebo se třením, viz obr. 4. Tření způsobuje nehomogenní deformaci, výrazně ovlivňuje stav napjatosti a deformace a tím i hodnoty tvářitelnosti. Proto je snaha tření co nejvíce eliminovat. Při laboratorním testování se vliv tření podstatně snižuje. To je možné při použití různých maziv (parafin, grafit) nebo že se na pēchovaný materiál přidá destička z kovu (olovo, kadmium apod.). Snižování tření je také možné úpravou čela pēchovaného materiálu, např. úprava čel do kužele, vybráním na čelech apod.

Tyto zkoušky jsou vhodné i k zjišťování přítomnosti podpovrchových vad jako jsou vměstky, bubliny apod. Lze jí ověřovat i vhodnost předvalků (polotovary vzniklé válcováním) pro další zpracování ve ztížených deformačně-napěťových podmínkách.

Mezi základní patří následující typy zkoušek:

- **Pēchovací zkouška se vzorky s rovnými čely**

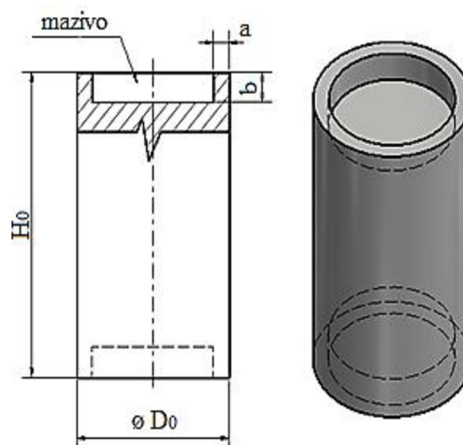
Používají se válcové vzorky (obr. 7), jejichž geometrie je dána průměrem D_0 a výškou H_0 . Z důvodu omezení soudečkovitosti a snížení vlivu tření se používají různá maziva. Vyskytuje se zde ovšem problém, že mazivo může být vytlačováno tvářecím nástrojem. Proto jsou vhodnější vzorky, které mají různá vybrání na čele, nebo i na plášti. Štíhlostní poměr se zde pohybuje v rozmezí od 1,5 do 1,6. Nejčastější rozměry, které se u toho typu vzorku používají, jsou $D_0 = 15 \text{ mm}$ a $H_0 = 25 \text{ mm}$.



Obr. 7 Vzorek s rovnými čely [12]

- **Pěchovací zkouška dle Ratěgajeva**

Zkouší se materiály s čelním vybráním (obr. 8). Toto vybrání je vyplněno kyselinou palmitovou. Zkoušený materiál pak udržuje během zkoušky válcový tvar, protože tlak nástroje se přenáší na mazivo a eliminuje se tím vliv tření. Pěchovací poměr se doporučuje, podobně jako u vzorků s rovnými čely, $\lambda = 1,5$ až $1,6$. Křivka přetvárného odporu dle Rastěgajeva leží asi o 12 % pod křivkou válcových vzorků s rovnými čely.

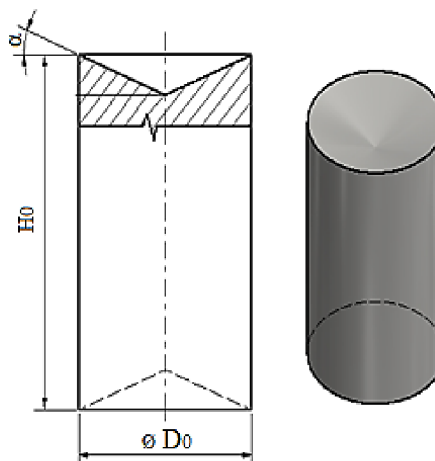


- **Pěchovací zkouška dle Siebela a Pompa**

Zkoušky se provádí na vzorcích, které mají na čele kuželové zahloubení (obr. 9). V současné době se používají vzorky s průměrem $D_0 = 20$ mm a výšce $H_0 = 40$ mm s kuželovým vybráním čelních ploch $\alpha = 3^\circ$. $Tg \alpha$ se pak rovná součiniteli tření μ . Zkoušený materiál je ještě mazán z důvodu snížení vlivu tření.

Obr. 8 Vzorek dle Rastěgajeva [12]

Postup probíhá tak, že vzorky jsou postupně spěchovány nejprve o 45 % výšky vzorku (H_0). Zkoušená tělesa se potom přesoustruží na $\varnothing 14$ mm a výšku 21 mm. Následuje další pěchování, tentokrát na 50 % až 60 % výšky H_0 . V případě velmi tvárných materiálů se pěchuje ještě potřetí. Vzorky se obrobí, postaví na sebe a tvoří tak jeden zkušební vzorek.



Obr. 9 Vzorek dle Siebela a Pompa [12]

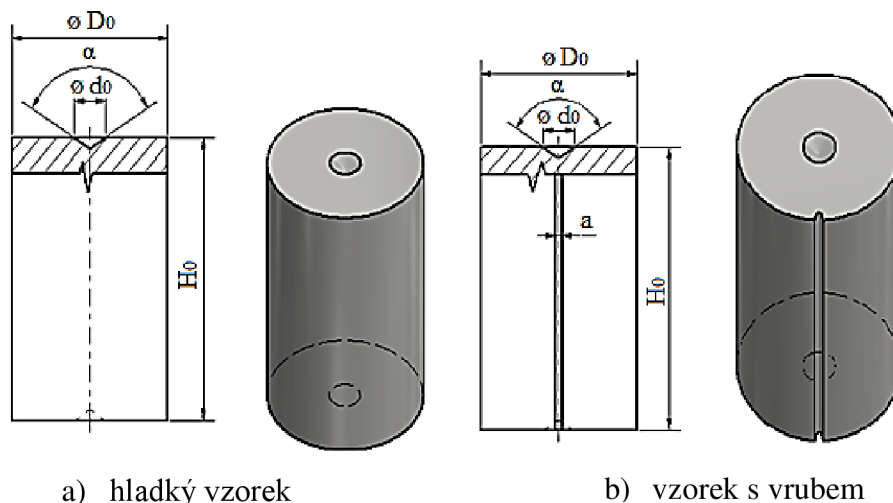
Nástroj se skládá ze dvou kuželových kovadel. Úhel kužele odpovídá úhlu vybrání čelních ploch α .

- **Zkouška pěchovatelnosti dle CIRP-F**

Tuto metodu vypracovala mezinárodní organizace F-Forming. Používají se dva typy válcových vzorků. Jeden je s hladkým, volným povrchem pláště (obr. 10a) a druhý s předepsaným podélným vrubem tvaru „V“ na plášti (obr. 10b). Pěchovací poměr zkoušených materiálů by neměl překročit hodnotu 1,5. V případě nedodržení tohoto poměru hrozí vybočení vzorku.

Provádění zkoušky probíhá v několika fázích. V první fázi se hladký vzorek spěchuje o 50 % jeho výšky (H_0) a vzorek s vrubem o 30 % H_0 . Jestliže zkoušený materiál nepraskne, tak je zřejmé, že je tvárnější za studena. V každém dalším kroku se následně pěchuje o 1,5 % až 2,5 % výšky H_0 . Zkoušení probíhá do té doby, dokud se na některém ze vzorků neobjeví trhliny. Jakmile k tomu dojde, změří se výška, při které se trhliny objevily, tzv. kritická výška vzorku. Z ní se spočítá kritické poměrné přetvoření.

Pěchovací nástroj se skládá ze dvou rovnoběžných kovadel, jejichž čela jsou opatřeny středícími kužely a od nich postupují soustředné drážky. To zaručuje ideální třecí podmínky mezi nástrojem a zkušebním materiálem. Předpokládaná rychlost nástroje je $0,1$ až $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

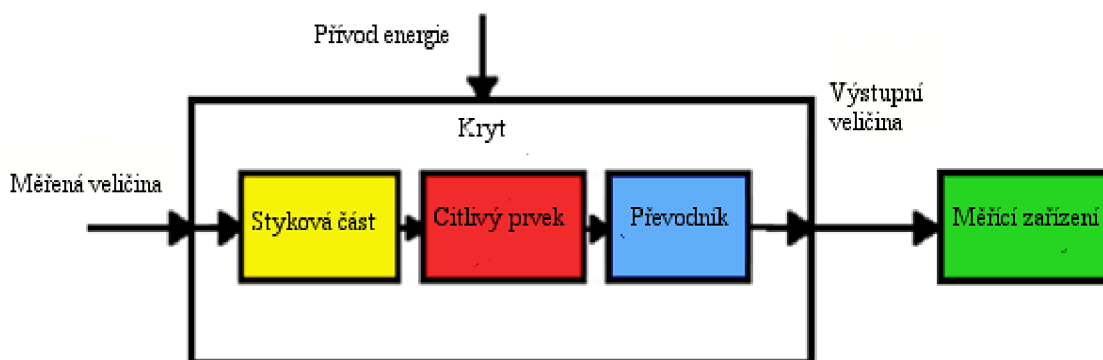


Obr. 10 Vzorky dle CIRP-F [12]

2.3 Způsoby získávání hodnot [17], [18], [19], [20]

U pěchovacích zkoušek se zjišťují velikosti síly, dráhy a popřípadě i teploty. Nejvýhodnější metodou k získávání těchto veličin je pomocí snímačů s elektrickým výstupem signálu. Je to tzv. měření neelektrických veličin elektrickou cestou. Tento způsob měření má, oproti měření neelektrickému, řadu výhod. Je to například větší přesnost a citlivost, větší rychlost měření, možnost záznamu, výstupní signál v číslicové nebo analogové podobě apod. Jsou zde ovšem i nevýhody jako vyšší náklady na měřicí kanál a údržbu. Taky je potřeba kvalifikovaná obsluha.

Měření je prováděno měřicím řetězcem. Ten se skládá z několika členů. Jsou to snímač, blok elektronických obvodů, zařízení pro přenos na dálku a výstupní převodník. Snímač patří mezi základní členy měřicí soustavy. Jejich úkol je převádět vstupní neelektrický signál na signál výstupní elektrický. Tvoří ho styková část, citlivý prvek, převodník a kryt, viz obr. 11. Styková část zabezpečuje přenos měřené veličiny na citlivý prvek (čidlo). Ten mění měřenou veličinu na hodnotu zpracovatelnou převodníkem. Převodník pak transformuje signál citlivého prvku na elektrický signál, který je posílán do měřicího zařízení. Kryt pak tvoří ochranný prvek před vnějšími vlivy jako je vlhkost nebo mechanické namáhání.



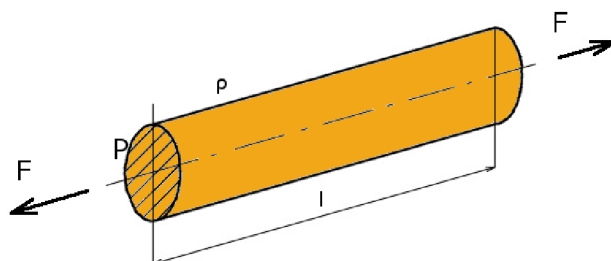
Obr. 11 Schéma univerzálního snímače [20]

Snímače dělíme na:

- Aktivní – chová se jako zdroj elektrické energie, když na něj působí neelektrická veličina. Mohou být:
 - piezoelektrické,
 - indukční,
 - termoelektrické.
- Pasivní – když na něj působí neelektrické veličina, tak mění některý ze svých parametrů. Podle toho, který ze svých parametrů mění, se dělí na:
 - odporové,
 - indukčnostní,
 - kapacitní,
 - ionizační,
 - magnetické.

2.3.1 Měření pětchovací síly [15], [16], [17], [19]

Měří se pomocí dynamometrů neboli snímačů tlakové síly, které se dělí na mechanické nebo elektrické. Mezi elektrické patří odporové snímače, tzv. tenzometry, jež se řadí mezi pasivní snímače a jak je z názvu patrné, fungují na principu změny elektrického odporu. Pro odpor válcového vodiče, který je namáhán silou F (obr. 12), platí vztah:



Obr. 12 Válcový vodič namáhaný tahem [17]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{P} \text{ [}\Omega\text{]}, \quad (1.16)$$

kde: ρ ...měrný odpor [$\Omega \cdot m$],

l ...délka vodiče [m],

P ...průřez vodiče [m^2].

Po dosazení a úpravách se dostane vztah, že poměrná změna odporu se rovná poměrné deformaci, která je ještě vynásobená součinitelem citlivosti k (rov. 1.17). Pro nejčastěji používané tenzometry (slitina mědi a niklu) je $k = 2,05$. Protože je změna odporu při měření deformace velmi malá, používá se zapojení tenzometrů do mostu, které ji zesílí.

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \text{ [-]}, \quad (1.17)$$

kde: $\frac{\Delta R}{R}$...poměrná změna odporu.

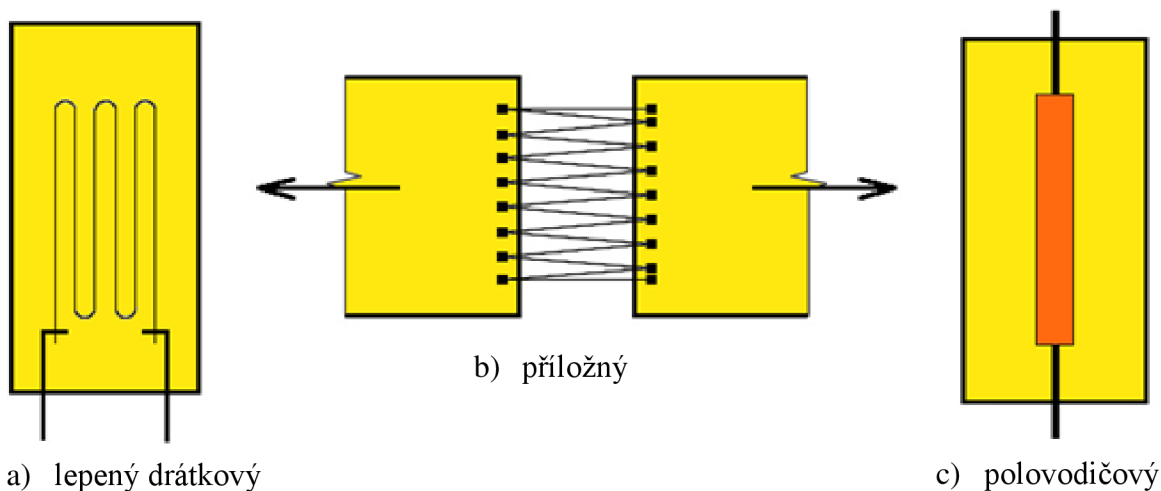
Existuje několik druhů odporových tenzometrů. Dělí se na kovové příložné, kovové lepené a polovodičové. Kovové mohou být drátkové nebo fóliové.

Kovové příložné tenzometry jsou uchyceny soustavou držáků (obr. 13b). Používají se jen zřídka, protože jejich výroba je náročná a jejich cena je tedy vyšší než u tenzometrů lepených.

Kovové lepené tenzometry se hojně používají. Odporový článek bývá nalepen na podložce z papíru, plastu nebo kovu. Používá se jak drátkové, tak fóliové provedení. Příklad lepeného

drátkového tenzometru je na obr. 13a. Fóliové mají lepší pevnostní poměry a mohou být zatíženy větším proudovým zatížením. Jejich výroba je jednoduchá, a tudíž mají i velké využití.

Polovodičové tenzometry se skládají z tenkých vláken z monokrystalu křemíku nebo germania, které jsou umístěny na podložce a lepeny na měřenou součást. Fungují na principu, že síla působí na polovodičový přechod a tím se mění vlastnosti tenzometru. Na obr. 13c je zobrazen jednoduchý polovodičový tenzometr.



Obr. 13 Odporové tenzometry [17]

Příklad dynamometru je zobrazen na obr. 14. Měrný člen je prstencového tvaru a na něj jsou umístěny měřící tenzometry a korekční prvky. Vše je zapojeno a měrný člen je zakryt krytem. Mezi výhody tohoto typu snímače patří, že nemusí být při měření pevně upnut v měřicím řetězci. Jeho nevýhoda je citlivost na rovnoběžnost rovin, mezi kterými je instalován.

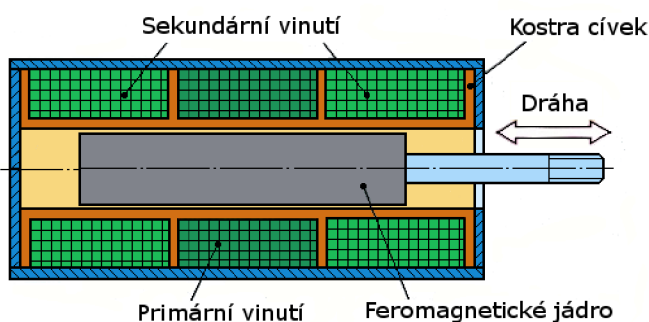


Obr. 14 Snímač tlakových sil [21]

2.3.2 Měření dráhy [15], [17], [18], [20]

K měření dráhy při pýchovacích zkouškách slouží hlavně indukčnostní a kapacitní snímače. Oba dva typy se řadí mezi pasivní snímače. Veličina, která mění svůj parametr, je u indukčnostních indukce. U kapacitních se mění rozměry kondenzátoru nebo změna permitivity (veličiny vyjadřující vztah látky na elektrické pole) mezi elektrodami.

Indukčnostní snímač tvoří jádro, které je omotáno cívkou (obr. 15). Jádro je buď feromagnetické nebo jen elektricky vodivé. Když na něj působí neelektrická veličina, dochází ke vzájemnému posunutí těchto dvou částí, nebo změně jejich elektrických vlastností. Zapojuje se do obvodu s pomocným střídavým napětím. Je také třeba ho propojit s měřicím přístrojem



Obr. 15 Schéma indukčnostního snímače [22]

pomocí vodičů nebo spojovacího vedení, které může negativně ovlivnit přesnost měření. Existuje několik variant těchto snímačů. Ty se liší ve způsobu dosahování indukčnosti. Jsou to snímače:

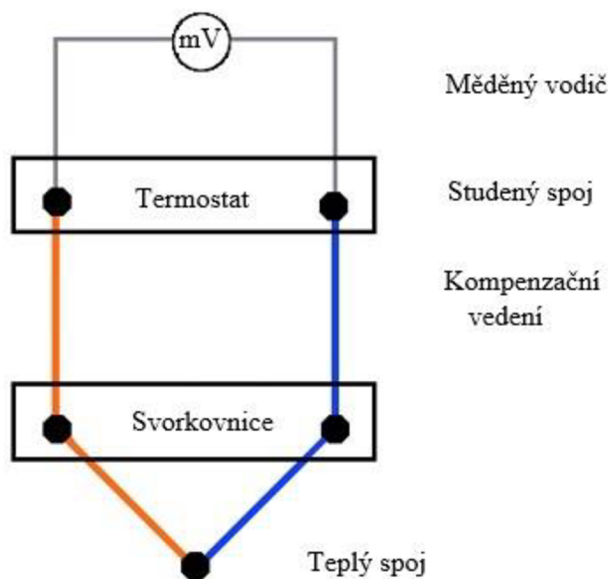
- s malou vzduchovou mezerou,
- s otevřeným magnetickým obvodem,
- na principu změny permeability,
- s potlačeným polem,
- bez feromagnetika,
- s vířivými proudy.

Základem kapacitního snímače je dvou nebo více elektrodový systém s parametry proměnnými působením neelektrické veličiny. Jejím působením se mění buď mezera mezi deskami (ta je nejjednodušší), plocha desek nebo dielektrikum. Velkým nedostatkem tohoto snímače jsou parazitní vlivy kabelu, mezi které patří vlhkost, změna teploty nebo deformace kabelu.

2.3.3 Měření teploty [15], [17], [21]

K měření teploty slouží různé přístroje, které se dají rozdělit na několik druhů podle toho, na kterém fyzikálním principu pracují. Mohou být založené na termoelektrickém efektu, změně odporu nebo citlivosti polovodičového zařízení, teplotní roztažnosti, změně barvy a další. Nejběžnější snímač, který je běžně používán v průmyslu je založen na termoelektrickém jevu (Seebeckově), tzv. termočlánek (obr 16).

Termočlánek se skládá ze dvou rozdílných kovů, které jsou ve formě drátu na konci spojeny dohromady. Jeden konec se nazývá teplý konec termočláneku a slouží k měření. Druhý se nazývá studený konec termočláneku nebo také srovnávací, ten by měl být udržován na konstantní teplotě. Není-li to možné, používá se kompenzační vedení. To chrání přenos termočlánekového napětí ke srovnávacímu místu proti působení okolní teploty. Je-li teplý spoj ohřátý na teplotu vyšší, než je teplota studeného konce, dojde ke vzniku termočlánekového napětí.



Obr. 16 Termočlánek [23]

Termočlánek se vyrábějí v kombinaci různých kovů, jako jsou železo, měď, nikl, mangan, hliník, chrom a další. Jako nekovové materiály se používá uhlík, karbid křemíku a karbid bóru. Každá kombinace má své mezinárodní označení.

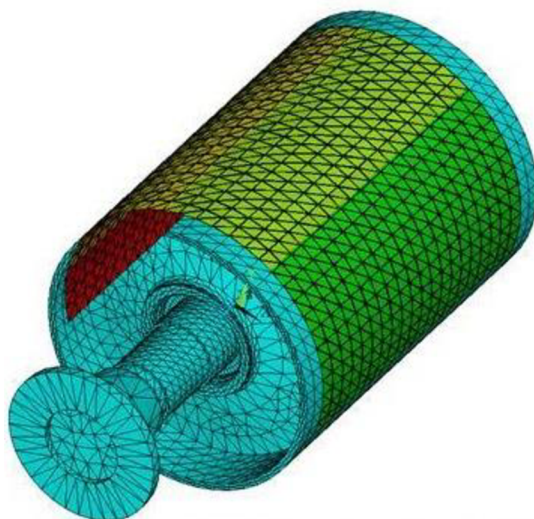
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [3], [24], [25], [26], [27]

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) vznikla v 50. letech minulého století v oblasti vesmírného letectví. Do průmyslové oblasti pronikla až o deset let později. Touto metodou jsou řešeny oblasti mechaniky, proudění kapalin a plynů, termomechaniky, metrologie a mnoho dalších oborů. Aplikace MKP, při tváření kovů, přinesly velké změny při navrhování postupů výroby. Například při kování MKP snadno předpoví změnu tvaru výrobku. Další velkou výhodou je, že k vyřešení problému většinou stačí univerzální počítač.

MKP patří do skupiny metod pro numerické simulace. Do této skupiny patří například ještě tyto metody:

- metoda konečných diferencí (MKD),
- metoda hraničních prvků (MHP),
- metoda konečných objemů (MKO).

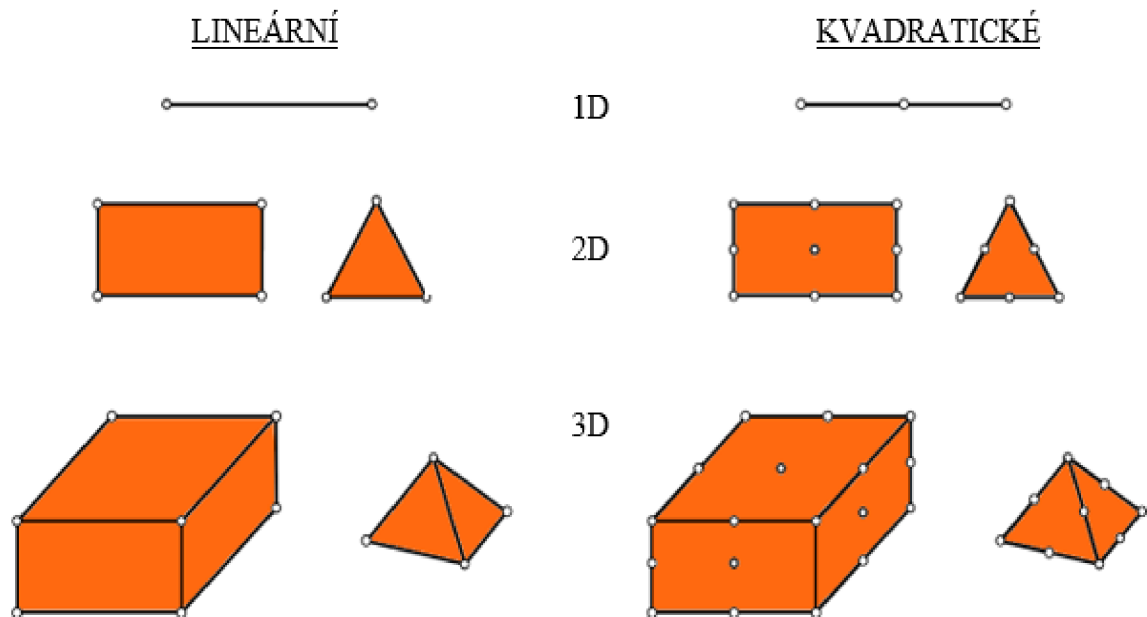
MKP pracuje na principu nahrazení celého objemu tělesa konečným počtem prvků (elementů), proces nazývající se diskretizace. Přilehlé prvky jsou spojeny pomocí uzlů a dohromady pak tvoří konečnoprvkovou síť (obr. 17).



Obr. 17 Příklad diskretizace 3D modelu [27]

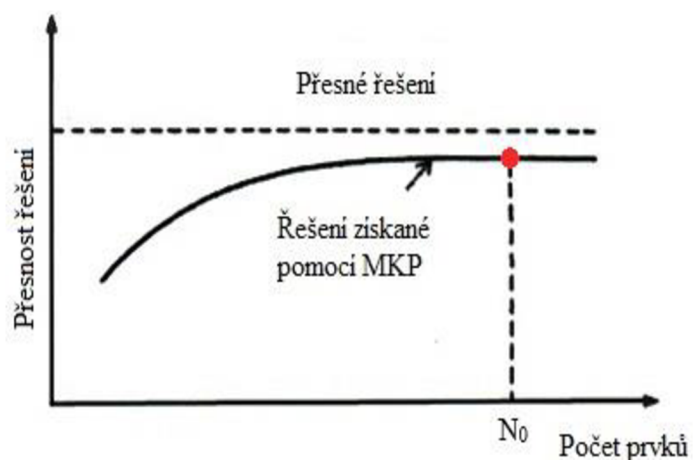
3.1 Základní typy prvků [3], [25], [28]

Existuje několik základních prvků, které se dají dělit podle různých hledisek. Na obr. 18 je zobrazeno jedno z možných rozdělení, kde se prvky dělí na kvadratické a lineární, přičemž mohou být prutové (1D), plošné (2D) nebo objemové (3D). Ideálním tvarem prvku je v rovině čtverec případně rovnostranný trojúhelník, v prostoru krychle. Ne vždy je však možné uvedené tvary dodržet. Jakékoliv přetvoření prvku, však působí nepříznivě na přesnost výpočtu. K obnově deformované sítě během výpočtu se používá metoda tzv. remeshingu.



Obr. 18 Prvky používané v MKP [25]

Tvar a složitost jednotlivých prvků musí být definován tak, aby se celá konečnoprvková síť co nejlépe podobala řešenému modelu. Faktory ovlivňující výběr prvků jsou typ řešeného problému, geometrie, požadovaná přesnost nebo také fyzikální vlivy. Platí pravidlo, že čím menší velikost prvků, tím přesnější řešení. Má to však nevýhodu, a to navýšení výpočtového času. Z toho důvodu se používají elementy různých velikostí. Malé prvky se použijí v nejsledovanější oblasti, což čas výpočtu zkrátí. Podobně platí, že čím více elementů, tím přesnější výsledek. Neplatí to ale vždy. Obr. 19 znázorňuje závislost přesnosti řešení na počet prvků. Z něj lze vidět, že existuje bod N_0 , nad kterým se už přesnost řešení nezvyšuje a zůstává konstantní.



Obr. 19 Vliv zvyšování počtu prvků na přesnost [28]

3.2 Typy řešených úloh [3], [26], [28], [29]

Výběr typu úloh závisí na tom, jaký je cíl modelování. Hlavním stanoviskem je druh fyzikálního problému, který má být pomocí MKP řešen. MKP se zatím nejvíce používá pro numerické řešení úloh mechaniky poddajných těles. Bývá však s úspěchem aplikována i v jiných oblastech jako jsou analýzy vedení tepla, vedení elektrického náboje, řešení elektromagnetického pole, akustiky, difuze a další oblasti.

Z hlediska času se dělí na se úlohy MKP dělí na:

- Stacionární a nestacionární – cílem stacionárních analýz je nalézt takový stav, aby časová změna stavových parametrů byla nulová. Nestacionární analýza mají za úkol získat stavové parametry jako funkce času.
- Statické a dynamické – tyto úlohy řeší případy, kdy jsou nebo nejsou uvažovány setrvačné síly. Ve většině případů platí, že statická analýza je stacionární a dynamická nestacionární. Neplatí to však vždy.

Každá zmíněná úloha se ještě dělí z hlediska linearit rovnic na:

- Lineární – je pro ně typická vysoká míra idealizace a spolehlivost. Mají zaručenou existenci a jednoznačnost modelu.
- Nelineární – jsou závislé na posloupnosti dějů, kterými systém prošel od začátku do konce. Pro správné řešení je třeba znát nejen okrajové podmínky na začátku a na konci, ale i v průběhu děje.

Základ výpočtu je pomocí Lagrangeova variačního principu. Ten je založen na tom, že ze všech definovaných funkcí posuvů, které musí vyhovovat geometrickým okrajovým podmínkám a podmínkám spojitosti tělesa, se uskuteční pouze ty, pro něž dosahuje celková potenciální energie svého minima. Úlohy se poté dělí na:

- **Statické lineární úlohy**

Typickým příkladem těchto úloh jsou napětě-ově-deformační analýzy staticky zatížených těles v oblasti pružné deformace. Základní rovnice pak představuje systém lineárních rovnic, které jsou řešeny v maticovém stavu a dají se zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{F}, \quad (1.18)$$

kde: \mathbf{K} ...globální matice tuhosti,

\mathbf{D} ...globální matice neznámých parametrů (v tomto případě posuvů),

\mathbf{F} ...globální matice zatížení.

- **Statické nelineární úlohy**

Oproti staticky lineárním, řeší staticky zatížené stavy materiálů již v oblasti plastické deformace. Taky hodnotí kvazistatické úlohy, tedy takové, kdy se zatížení s časem nemění. Platí zde nelineární závislost a základní rovnice se mění na tvar:

$$\mathbf{K}(\mathbf{D}) \cdot \mathbf{D} = \mathbf{F}. \quad (1.19)$$

- **Dynamické stacionární úlohy**

Řeší případy, kdy se zanedbává tlumení a lineární systém volně kmitá s neproměnnou amplitudou, frekvencí a fázovým posuvem:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (1.20)$$

kde: \mathbf{M} ...matice hmotnosti,

$\ddot{\mathbf{D}}$...globální matice zrychlení.

- **Dynamické nestacionární úlohy**

U řešené soustavy je nutné zohlednit tlumení, např. při materiálovém nebo konstrukčním tlumení. Řešená rovnice má tvar:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{D}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{F}(t), \quad (1.21)$$

kde: $\dot{\mathbf{D}}$...matice rychlosti.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cíle práce jsou literární rešerše na pēchovací zkoušky a vykonání této zkoušky, z které se získá materiálový model a ten bude ověřován pomocí numerické simulace.

Pēchovací zkouška probíhala na Ústavu strojírenské technologie, odboru technologie tváření kovů a plastů. Bylo zkoušeno deset vzorků. Velikost síly se předně měřila pomocí dynamometru C6R, jehož přesnost měření byla ověřena pomocí univerzálního stroje ZD40, a poté byla snaha o porovnání naměřených hodnot s dynamometrem RA 100. Poté proběhla numerická simulace a následně se porovnály výsledky ze simulace s hodnotami kalibrovaným dynamometrem C6R. Nakonec následovalo porovnání získaných hodnot dvou dynamometrů.

4.1 Zkoušený materiál

Zkoušený materiál je ocel ČSN 17 240 (ČSN EN 1.4301, X5CrNi 18-10). Jedná se o konstrukční, korozivzdornou, austenitickou, legovanou ocel. Používá se na chemická zařízení a také v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Její chemické složení je uvedeno v tabulce 1. Mechanické vlastnosti, které byly zjišťovány při teplotě 20 °C, jsou zobrazeny v tabulce 2.



a) před pēchovánín b) po pēchování

Obr. 20 Zkoušený vzorek

Tab. 1 Chemické složení oceli ČSN 17 240 v hm. % [30]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,019	0,36	1,01	0,034	0,028	18,01	8,01	0,44	0,56

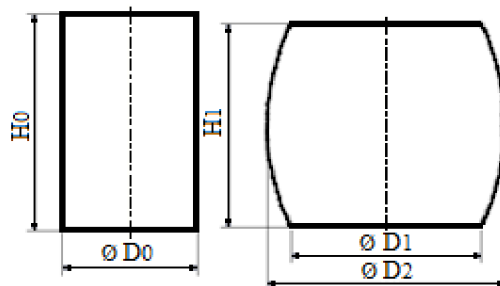
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 240 [30]

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	HBW
min. 190	min. 600	49	74	215

Jednotlivé vlastnosti byly získány z dodacího listu pro zkoušenou ocel. Tento list, ve kterém jsou další mechanické a chemické vlastnosti je uveden v příloze 1. Z důvodu snížení tření pēchovaného vzorku a tím eliminování nehomogenních napětí, byla na zkoušený vzorek nanesena vrstva maziva Delta 144, který byl nařaděný s přísadou kysličníku kademnatého. Mazání bylo provedeno následujícím způsobem:

- 1) vzorek byl zbaven nečistot a odmaštěn,
- 2) ohřál se na teplotu 140 °C a byl ponořen do lázně maziva po dobu, než ustanou reakce,
- 3) oschnutí vzorku,
- 4) ohřátí tělesa po dobu 2 hodiny v peci při teplotě 400 °C.

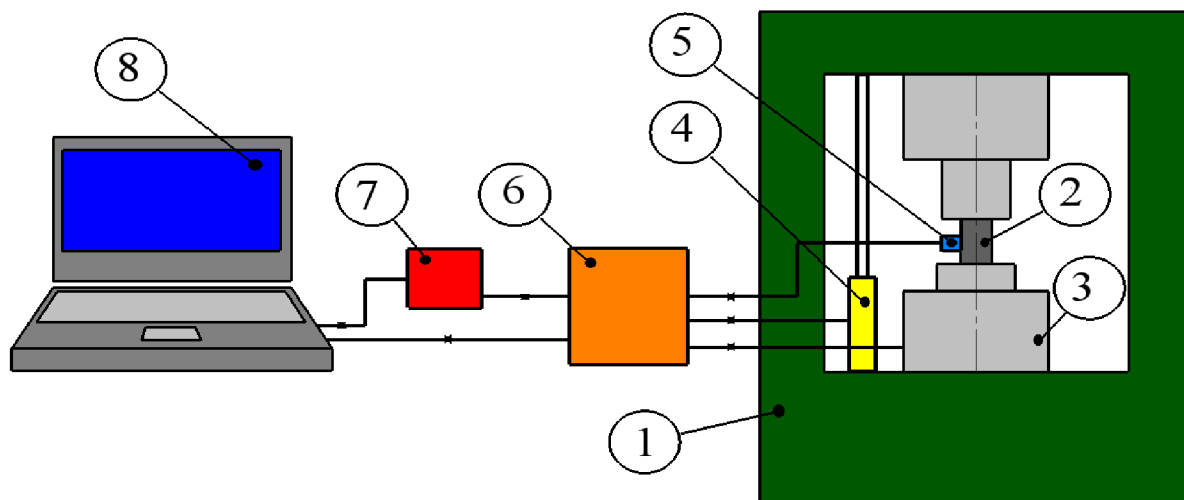
Takto upravený materiál, byl připraven k pēchovací zkoušce a je zobrazen na obr. 20a. Na obr. 20b je zobrazen už spēchovaný vzorek. Na odzkoušeném válečku lze vidět, že soudečkovitost není nijak výrazná, což je zapříčiněno hlavně díky použitému mazivu. Základní značení rozměrů před a po zkoušce jsou na obr. 21.



Obr. 21 Rozměry vzorku

4.2 Zkušební zařízení [8], [31], [32], [33]

Schéma měřicího řetězce je zobrazeno na obr. 22. Hydraulický lis (1) stlačuje vzorek, který je umístěn v pěchovacím přípravku (2). Sílu zaznamenává dynamometr (3), dráhu indukčnostíní snímač (4) a teplotu čidlo (5). Signál z těchto snímačů je převáděn na zesilovač (6), ze kterého signál pokračuje na měřicí kartu (7), kde dojde k převodu analogového signálu na digitální, který je poté pomocí USB rozhraní přenášén do PC (8).



Obr. 22 Schéma měřicího řetězce [8]

Pěchování probíhalo na hydraulickém lisu CZR 600-2 (obr. 23), který má lisovací sílu 6 000 kN a zpětnou sílu 120 kN. Průměry upínacích desek jsou u spodní 345 mm a u horní 350 mm. Jeho další parametry jsou zobrazeny v tab. 3.

Tab. 3 Parametry lisu CZR 600-2 [31]

Parametr	Hodnota	Jednotky
Lisovací síla	6 000	kN
Zpětná síla	120	kN
Zdvih	125	mm
Rozměry	1 600 × 800 × 1 980	mm
Hmotnost	2 400	kg

Pro snímání dráhy byl použit indukčnostíní snímač W50 od firmy HBM (obr. 24c). Pro snímání pěchovací síly sloužil dynamometr C6R (obr. 24b) s rozsahem do 500 kN, který je rovněž od firmy HBM.

Zkoušení probíhalo umístěním vzorku do pěchovací nástroje (obr. 24a), který byl umístěn v dutině lisu. Horní část nástroje je pohyblivá, tlačí na materiál a postupně ho pěchuje. Stlačování probíhalo až do požadované síly, která v tomto případě byla cca 400 kN, aby nedošlo k přetížení použitého dynamometru. Poté následovalo odlehčení a vyjmutí vzorku z pěchovacího nástroje.



Obr. 23 Lis CZR-600



a) pēchovací nástroj



b) snímač síly



c) snímač dráhy

Obr. 24 Zkušební zařízení

Signál, který se získává ze snímačů bývá velmi malý (v řádech milivoltů), a proto se k jeho zesílení používá zesilovač. V tomto případě byl použit zesilovač od firmy Dewetron DEWE-30-4 (obr. 25a). Zesílený signál je ovšem ve formě analogového a je potřeba ho ještě převést na digitální, aby mohl být zpracován v počítači. K tomuto účelu slouží měřicí karta (A/D převodník). Při měření byla použita karta typu NI USB 6009 (obr. 25b), která je schopna pracovat s analogovým i digitálním signálem. Je vybavena vysokorychlostním USB rozhraním, díky kterému je možné propojení s počítačem.



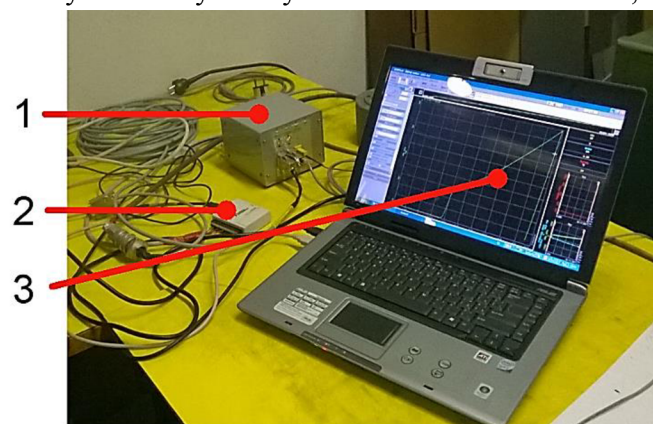
a) zesilovač



b) měřicí karta

Obr. 25 Měřicí zařízení [32], [33]

Samotný měřicí systém zobrazuje na obr. 26. Zesilovač je umístěn na pozici 1, měřicí karta na pozici 2. Převedený signál je v PC (pozice 3) vyhodnocován pomocí programu Dewesoft verze 6.5. V něm je rovnou vykreslován graf závislosti síly na dráze. Tento systém měří pēchovací sílu, dráhu, teplotu a čas pēchování.



Obr. 26 Měřicí systém

4.3 Kalibrace dynamometru C6R

Z důvodu ověření přesnosti měření dynamometru C6R byla provedena přibližná kalibrace, která probíhala na univerzálním zkušebním stroji ZD40 (obr. 27) o jmenovité síle 400 kN, který se řadí mezi velmi přesná zařízení. Je vybaven snímačem síly EDC 60 a síla je zapisována do počítače pomocí programu M-TEST verze 1.7. Technické parametry o zkušebním zařízení jsou v tabulce 4. Další informace a parametry tohoto zařízení jsou uvedeny v příloze 2.

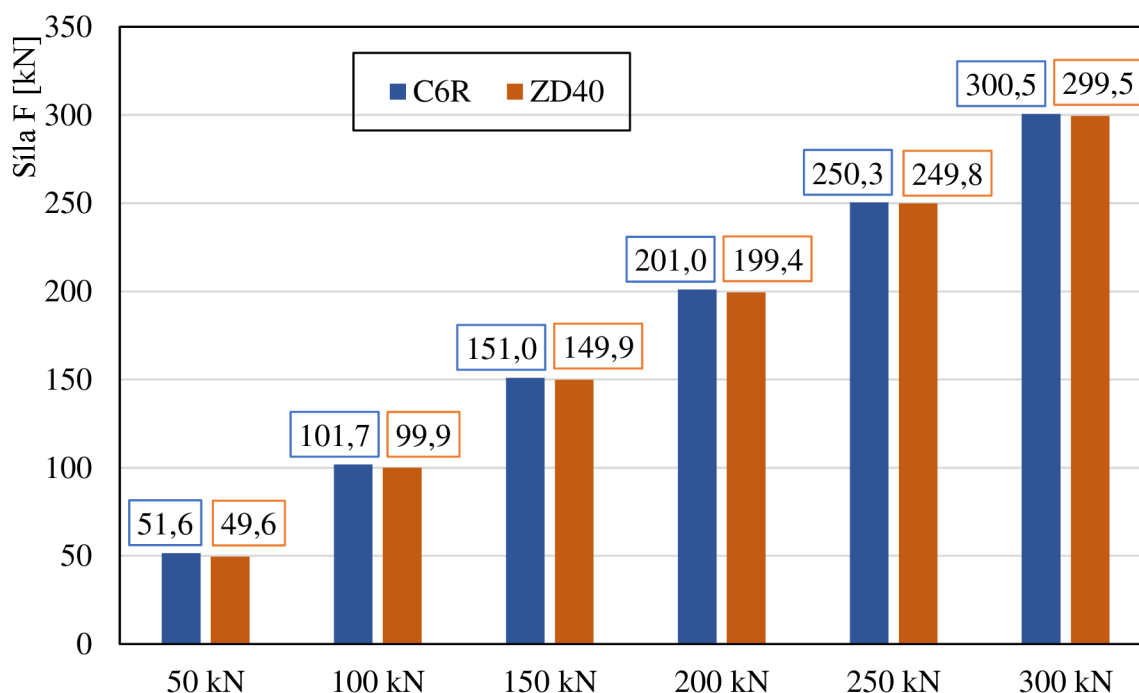
Tab. 4 Parametry zkušebního stroje ZD40

Parametr	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah síly	8–400	kN
Chyba měření síly	1 % jmenovitého rozsahu	%
Měřicí rozsah dráhy	0–280	mm
Chyba měření dráhy	±0,01	mm



Obr. 27 Stroj ZD40

Kalibrace probíhala na základě postupného zatěžování silami 50, 100, 150, 200, 250 a 300 kN. Poté následovalo porovnání hodnot, které je zobrazeno na obr. 28.



Obr. 28 Porovnání hodnot z kalibrace

Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty síly se nijak výrazně neliší. Největší rozdíl hodnot je při zatížení silou 50 kN, a to 2 kN, což není úplně zanedbatelná hodnota, avšak zatěžováno bylo až do síly 300 kN a rozdíl sil hodnotu 2 kN nepřekročil. Z jednotlivých rozdílů zatěžovacích sil byla vypočítána střední hodnota, jejíž velikost je 1,33 kN. Z výše uvedeného lze konstatovat, že dynamometr C6R měří přesně a je tedy správně zkalibrován.

4.4 Pěchovací zkouška [12], [34], [35]

Zkouška byla provedena na pěti vzorcích, které byly změřeny před i po provedení pěchovací zkoušky. Každý rozměr byl měřen třikrát a z těchto hodnot se vypočetl průměr. Měření se provádělo digitálním posuvným měřítkem Mahr GmbH, typ 16EWV s rozsahem 200 mm (obr. 29), jehož parametry jsou zobrazeny v tab.5.



Obr. 29 Posuvné měřítko [34]

Tab. 5 Parametry posuvného měřítka [33]

Parametr	Hodnota	Jednotky
Měřicí rozsah	0–200	mm
Přesnost měření	0,01	mm
Délka čelistí	48	mm

Naměřené hodnoty, ze kterých se vypočítala střední hodnota, jsou zobrazeny v tab. 6, ve které je také zapsán celkový čas procesu pěchování (t). Všechny naměřené rozměry jsou umístěny v příloze 3. Experiment probíhal za konstantní teploty, která byla cca 25 °C. Napěchované vzorky jsou zobrazeny na obr. 30.

Tab. 6 Rozměry zkušebních vzorků

Označení vzorku	D ₀ [mm]	H ₀ [mm]	D ₂ [mm]	D ₁ [mm]	H ₁ [mm]	t [s]
1	15,11	25,05	21,28	19,89	13,67	82,8
2	15,15	25,02	20,87	19,66	14,00	78,9
3	15,15	25,07	20,84	19,62	14,11	77,9
4	15,09	25,07	20,87	19,60	14,05	77,1
5	15,13	25,04	20,90	19,75	13,98	78,0
Průměr	15,13	25,05	20,95	19,71	13,96	78,9



Obr. 30 Napěchované vzorky

Poté se provedli výpočty základních charakteristik. Níže je uveden vzorový výpočet pro vzorek s označením 1. Stejný postup platil i pro ostatní vzorky. Všechny výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 7. Soudečkovitost se spočetla podle vzorce (1.4):

$$c = \frac{D_1}{D_2} = \frac{19,89}{21,28} = 0,935.$$

Logaritmičká deformace podle rovnice (1.8):

$$\varphi = \ln \frac{H_1}{H_0} = \ln \frac{13,67}{25,05} = -0,606.$$

Poměrné přetvoření dle vztahu (1.9):

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_1} = \frac{25,05 - 13,67}{13,67} = 0,833.$$

Dále rychlost stroje podle (1.14)

$$v = \frac{\Delta H}{t} = \frac{25,05 - 13,67}{82,8} = 0,1374 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

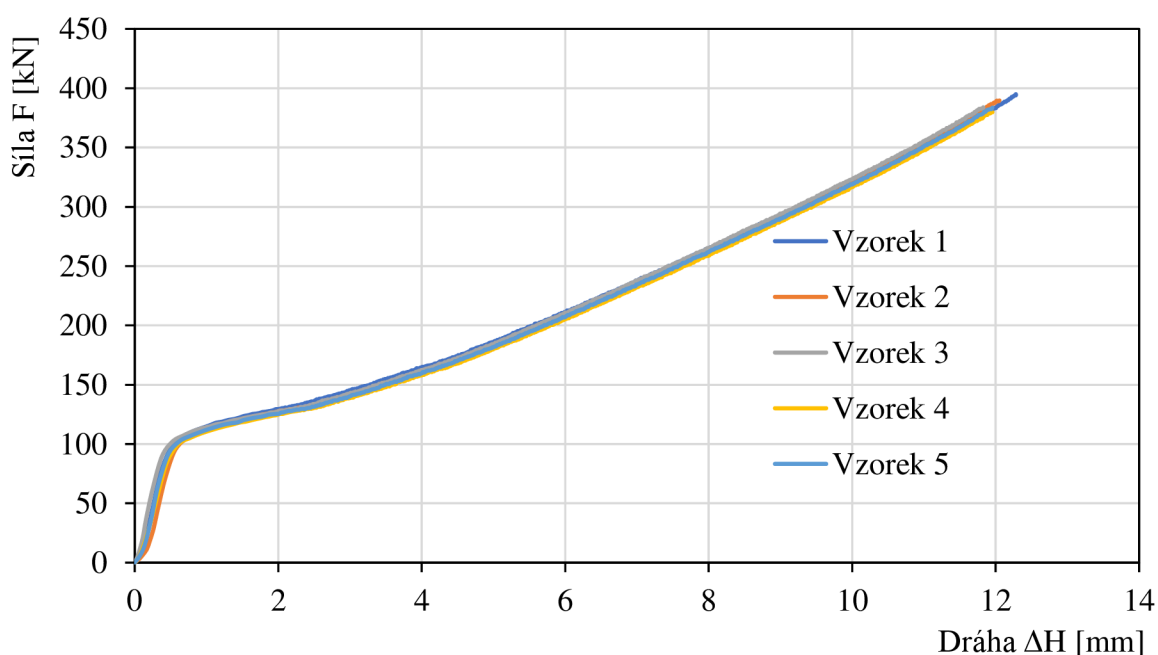
Ještě se vypočetla rychlost přetvoření, u které byl uvažován zjednodušující předpoklad, že rychlost nástroje je konstantní (1.15):

$$\dot{\varphi}_{\text{str}} = \frac{v \cdot \ln \frac{H_0}{H}}{H_0 - H} = \frac{0,1374 \cdot \ln \frac{25,05}{13,67}}{25,05 - 13,67} = 0,00732 \text{ s}^{-1}.$$

Tab. 7 Vypočtené základní charakteristiky

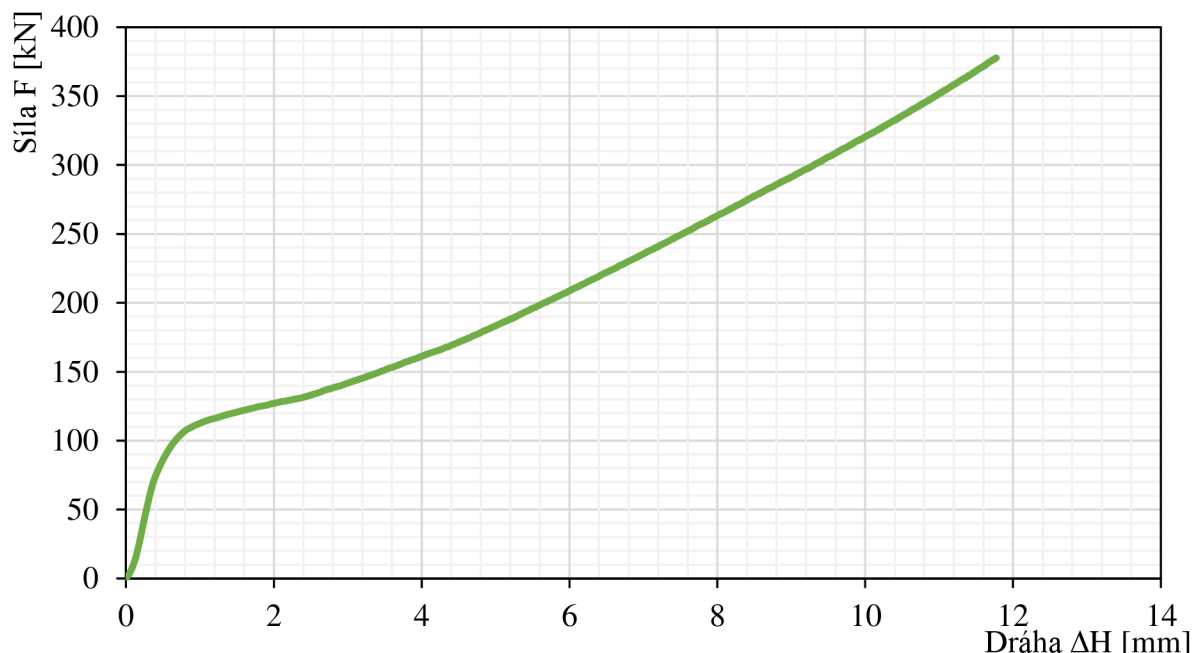
Označení vzorku	c [-]	φ [-]	ε [-]	v [mm·s ⁻¹]	$\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]
1	0,935	-0,606	0,833	0,1374	0,00732
2	0,942	-0,581	0,787	0,1397	0,00736
3	0,941	-0,575	0,777	0,1408	0,00738
4	0,939	-0,579	0,785	0,1430	0,00751
5	0,945	-0,583	0,791	0,1418	0,00747
Průměr	0,940	-0,585	0,795	0,1402	0,00730

Získané hodnoty ze zkoušky, ze kterých se vykreslil pracovní diagram závislosti síly na dráze (obr 31), byly zpracovány v programu Excel.



Obr. 31 Pracovní diagram měření dynamometrem C6R

Z grafu je patrné, že křivky se téměř protínají, a tedy průběhy vzorků jsou velmi podobné. Z těchto pěti křivek byl vytvořen medián (obr. 32), který oproti průměru není ovlivněn extrémními hodnotami, a tudíž je jeho použití výhodnější.



Obr. 32 Medián hodnot vzorků měřených dynamometrem C6R

Z diagramu je patrné, že do síly přibližně 110 kN se materiál chová pružně, kromě počáteční oblasti, ve které je vidět nelineární průběh. Ten je způsoben dosednutím pýchovacího nástroje na vzorek. Od hodnoty 110 kN už nastává plastická deformace.

Pro získání křivky zpevnění bylo potřeba znát hodnotu přirozeného přetvárného odporu a logaritmické deformace. Na výpočet okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu byla použita rovnice (1.6) a (1.7). Z těchto dvou rovnic se po úpravách dosáhlo tvaru:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot (H_0 - \Delta H)}{\pi \cdot D_0^2 \cdot H_0} \text{ [MPa]}. \quad (1.22)$$

Vzorový výpočet byl proveden pro vzorek jedna, v čase pýchování, kdy $\Delta H = 10$ mm a pýchovací síla byla rovna 320 395 N. Potom tedy podle rovnice 1.22:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot (H_0 - \Delta H)}{\pi \cdot D_0^2 \cdot H_0} = \frac{4 \cdot 320395 \cdot (25,05 - 10)}{\pi \cdot 15,11^2 \cdot 25,05} = 1073,5 \text{ MPa}.$$

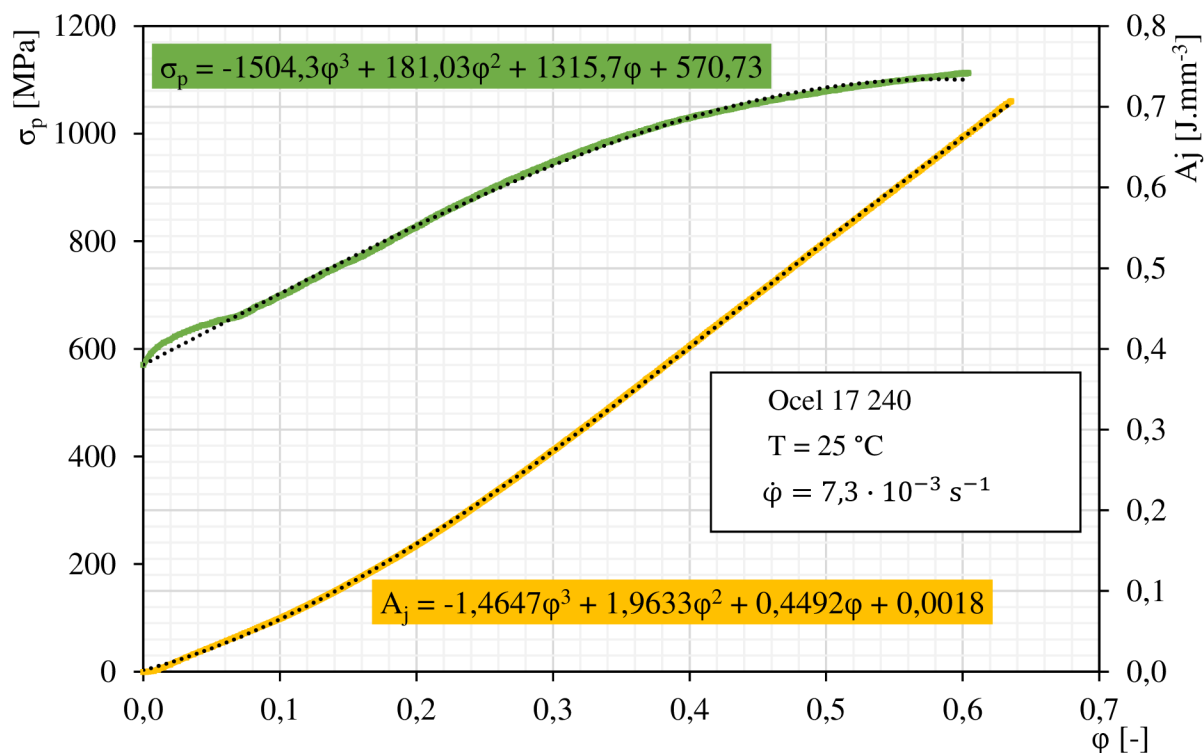
Logaritmická deformace se pak vypočítala podle vztahu (1.8):

$$\varphi = \ln \frac{H_1}{H_0} = \ln \frac{25,05 - 10}{25,05} = -0,509.$$

Další charakteristika, potřebná k vypočítání, byla měrná přetvárná práce. Ta se vypočítala podle rovnice (1.12):

$$A_j = \int_0^\varphi \sigma_p \cdot d\varphi = \sigma_p \cdot \varphi = 1073,5 \cdot 0,509 \cdot 10^{-3} = 0,5464 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}.$$

Po vypočtení všech hodnot, v průběhu celé pēchovací zkoušky, bylo možné vytvořit graf závislosti přirozeného pētvárného odporu na skutečném pētvoření a závislost měrné pētvárné práce také na skutečném pētvoření (obr. 33).

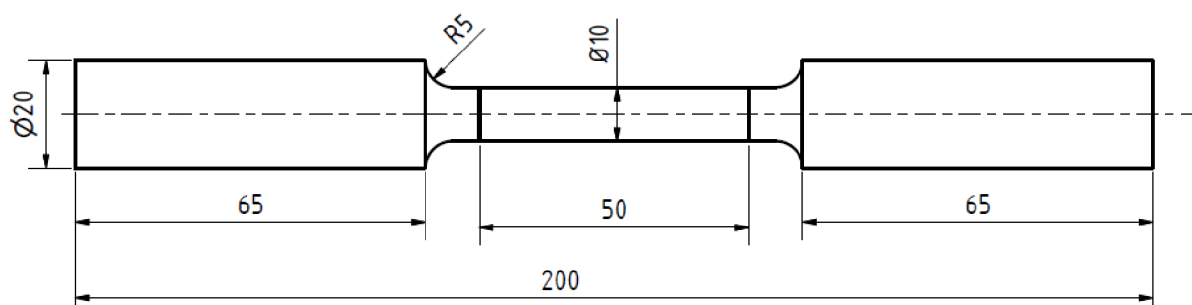


Obr. 33 Diagram křivky zpevnění

Po vykreslení spočítaných hodnot byly tyto závislosti proloženy křivkami třetího polynomu, jejichž rovnice jsou zobrazeny v grafu. Z něj je patrné, že například při deformaci 0,2 se materiál zpevní na hodnotu asi 850 MPa při měrné pētvárné práci 0,16 J·mm⁻³. Křivka zpevnění začíná na hodnotě meze kluzu v tlaku, tedy přibližně 600 MPa.

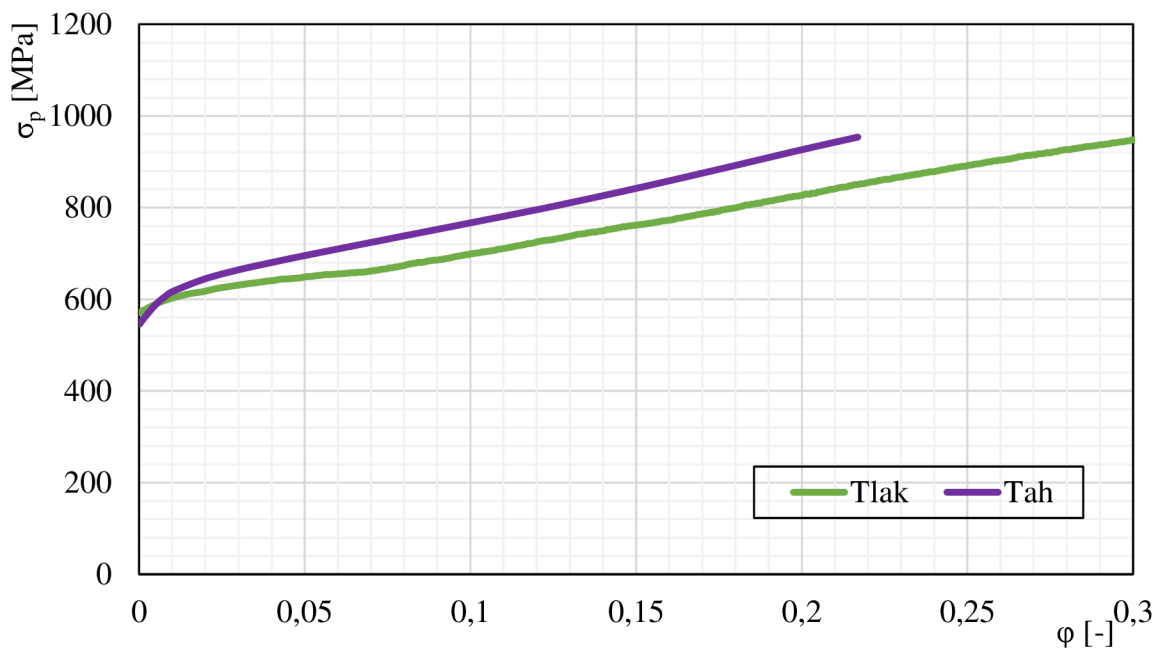
4.5 Porovnání křivky zpevnění z tahové zkoušky [36]

Výsledky pēchovací zkoušky lze dále porovnat s výsledky tahové zkoušky, která byla rovněž zkoumána za pokojové teploty, tj. cca 25 °C. Byl zkoušen vzorek kruhového průřezu o délce 200 mm, velkém průměru 20 mm a malém průměru 10 mm, viz obr. 34. Zkoušený vzorek byl ze stejného materiálu i stejné tavby jako u pēchovací zkoušky, tedy ocel 17 240.



Obr. 34 Geometrie vzorku při zkoušce tahem [36]

Jednotlivé křivky zpevnění jsou zobrazeny na obr. 35. Z grafu je patrné, že hodnota meze kluzu pro tah i tlak je přibližně 600 MPa a tedy křivky zpevnění začínají na stejném místě, avšak už při deformaci 0,01 má materiál vyšší přetvárný odpor při tahovém zatížení a tento odpor se v závislosti na tlakovém zatížení postupně zvyšuje. Další parametr, který by mohl ovlivnit toto srovnání je rychlost deformace. U tahové zkoušky byla střední rychlost přetvoření $\dot{\varphi}_{\text{stř}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$, zatímco u pěchování to bylo $\dot{\varphi}_{\text{stř}} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$. Rozdíl rychlostí tedy byl $3,2 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$, což je minimální hodnota a z toho vyplývá, že rychlost přetvoření na toto srovnání neměla vliv.

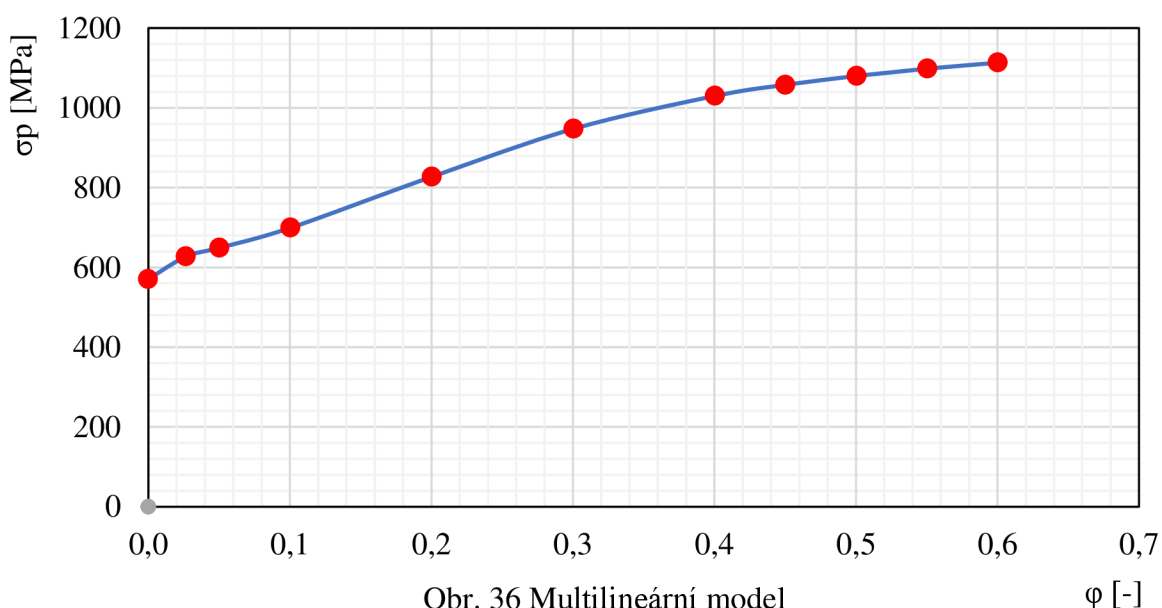


Obr. 35 Srovnání křivek zpevnění z tahové a pěchovací zkoušky

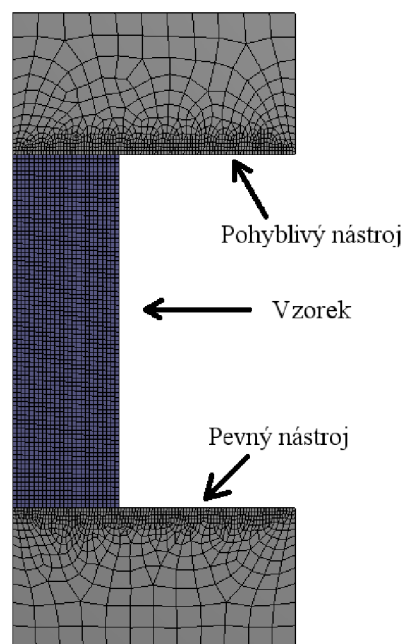
4.6 Numerická simulace [9]

Po stanovení křivek je vhodné ověřit získaný model provedením numerické simulace pěchování, která byla provedena, jak již bylo zmíněno, v softwaru Ansys Workbench 19.0, což je program využívající MKP. Tento program řeší různé typy analýz, jako lineární a nelineární statická analýza, stabilita, šíření trhlin, kinematika a dynamika a mnohé další.

Z hodnot získaných pěchovací zkouškou byl pro numerickou simulaci vytvořen multilineární model (obr. 36), což znamená, že se křivka zpevnění rozdělila na body, které ji charakterizují a který slouží k popsání materiálu.



Pro zjednodušení byla řešená úloha uvažována jako 2D axisymetrická. Nejprve byl vytvořen geometrický model, který je zobrazen na obr. 37 a jehož geometrie vychází z průměrných hodnot skutečného vzorku. Skládá se z pěchovacího nástroje (horního pohyblivého a spodního pevného) a zkoušeného vzorku. Na tento model se nanasla konečnoprvková síť, přičemž nejhustější byla na zkoušeném vzorku a na kontaktních plochách nástroje s materiálem. Vzorek se rozdělil na lineární čtvercové prvky, jejichž velikost byla nadefinována na 2 mm. Čtvercový tvar byl zvolen z důvodu jeho vhodnosti pro daný typ rovinné úlohy. Nastavilo se, že po deformaci prvku, kdy se úhel změní z 90° na 100°, bude z příčiny přesnějšího popisu průběhu pěchování, proveden remeshing (tedy znovu vygenerování konečnoprvkové sítě).

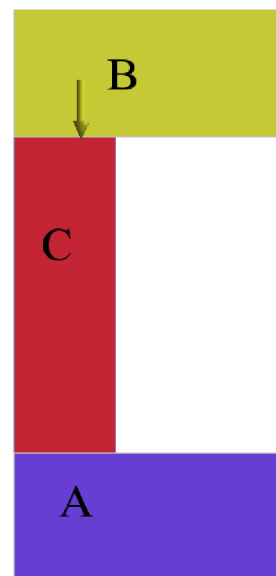


Obr. 37 Geometrický model

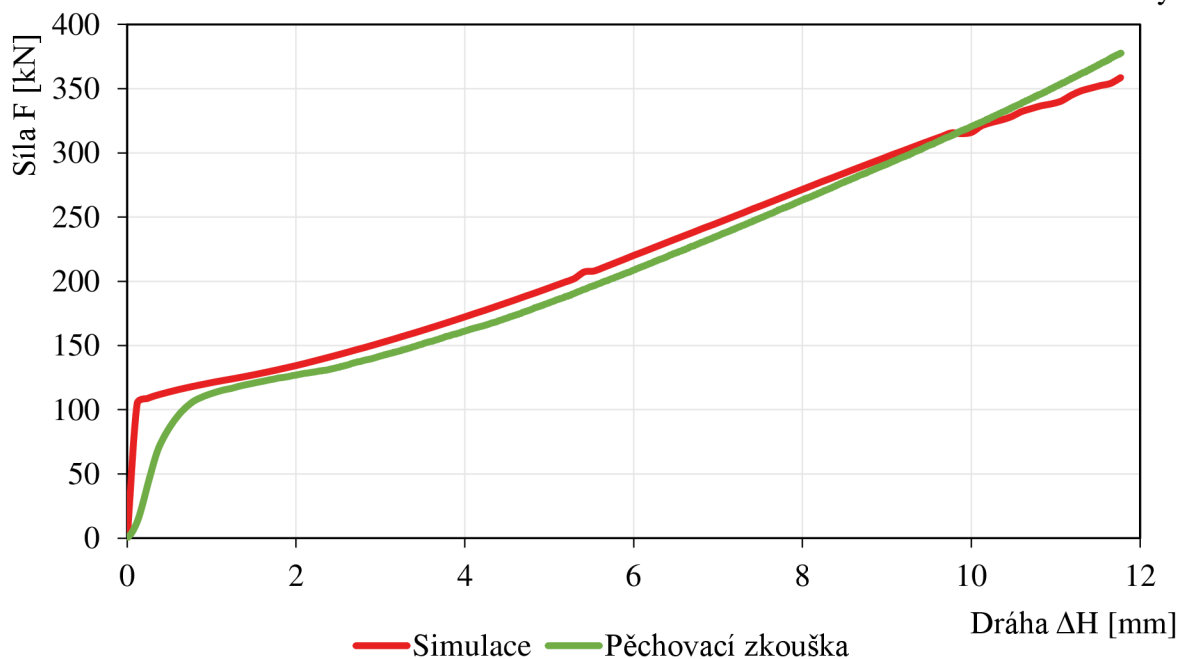
Poté se nadefinoval materiál. Elastická oblast byla popsána na základě modulu pružnosti $E = 2 \cdot 10^5$ MPa a Poissonova čísla $\mu = 0,3$. Plastickou oblast definoval multilineární model, který byl získán z pěchovací zkoušky, viz obr. 40.

Poté bylo třeba nadefinovat vazby (obr. 38). Spodnímu nástroji (pozice A) se přiřadila pevná vazba. Hornímu nástroji (pozice B) byla dána vazba posuvná s vertikálním pohybem, jehož hodnota se nastavila na 11,7 mm. U vzorku (poz. C) se nastavila funkce „Nonlinear adaptive region“, jejíž úkolem je provést již zmíněný remeshing. Ten bude probíhat automaticky, kdy není třeba uživatelského vstupu během řešení. Na kontaktní plochy a vnější povrch vzorku se ještě nadefinoval vliv tření, jehož koeficient (Coulumbův koeficient tření) byl nastaven na hodnotu 0,1.

Poté se už přistoupilo k samotné simulaci. Jedním z jejích výstupních parametrů je závislost síly na dráze (obr. 39), která se porovnávala s hodnotami, jež byly získány z pěchovací zkoušky.



Obr. 38
Nadefinované vazby

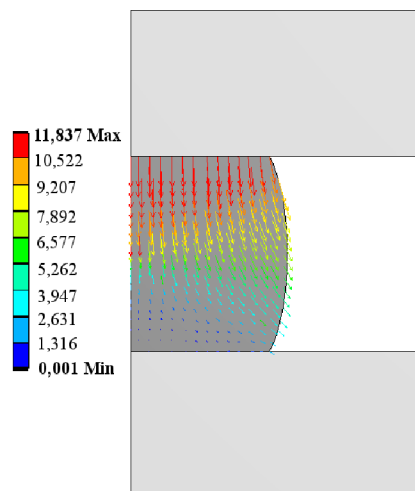


Obr. 39 Porovnání simulace s pěchovací zkouškou

V grafu lze vidět, že k elastickému přetvoření došlo u numerické simulace už při změně dráhy přibližně 0,1 mm, zatímco u experimentu to bylo až kolem 0,4 mm. Je to zřejmě způsobeno tím, že u pěchovací zkoušky chvíli trvalo, než nástroj dosedl na vzorek. Další rozdíl v křivkách je u přechodu z elastické na plastickou oblast, z důvodu zjednodušeného popisu tohoto přechodu u numerické simulace. Mez kluzu v tlaku zde vyšla přibližně stejně, tedy cca 110 kN. V plastické oblasti se už hodnoty podobají, jen na konci zkoušení se zatěžovací síla liší asi o 15 kN, což dělá rozdíl cca 1 %. Zřejmě to může být způsobeno tím, že u simulace je tlak působící na vzorek v celém čase pěchování konstantní, avšak u reálné zkoušky tomu tak není. Další možný důvod rozdílů hodnot by mohlo být, že jsou v plastické oblasti „peaky“, což je způsobeno zrovna probíhajícím remeshingem.

Dalšími výstupy simulace jsou pohyb prvků, elastické, plastické a celkové přetvoření a také napětí podle podmínky HMM.

Na obr. 40 je zobrazen pohyb prvků v materiálu. Z něj lze vidět, že posun prvků byl z počátku kolmý směrem dolů. Se zvyšujícím se odporem materiálu byly tyto prvky postupně vytlačovány směrem ven, a to vedlo ke vzniku soudečkovitého tvaru. Největší množství prvků se přesunulo směrem do středu zkoušeného tělesa.



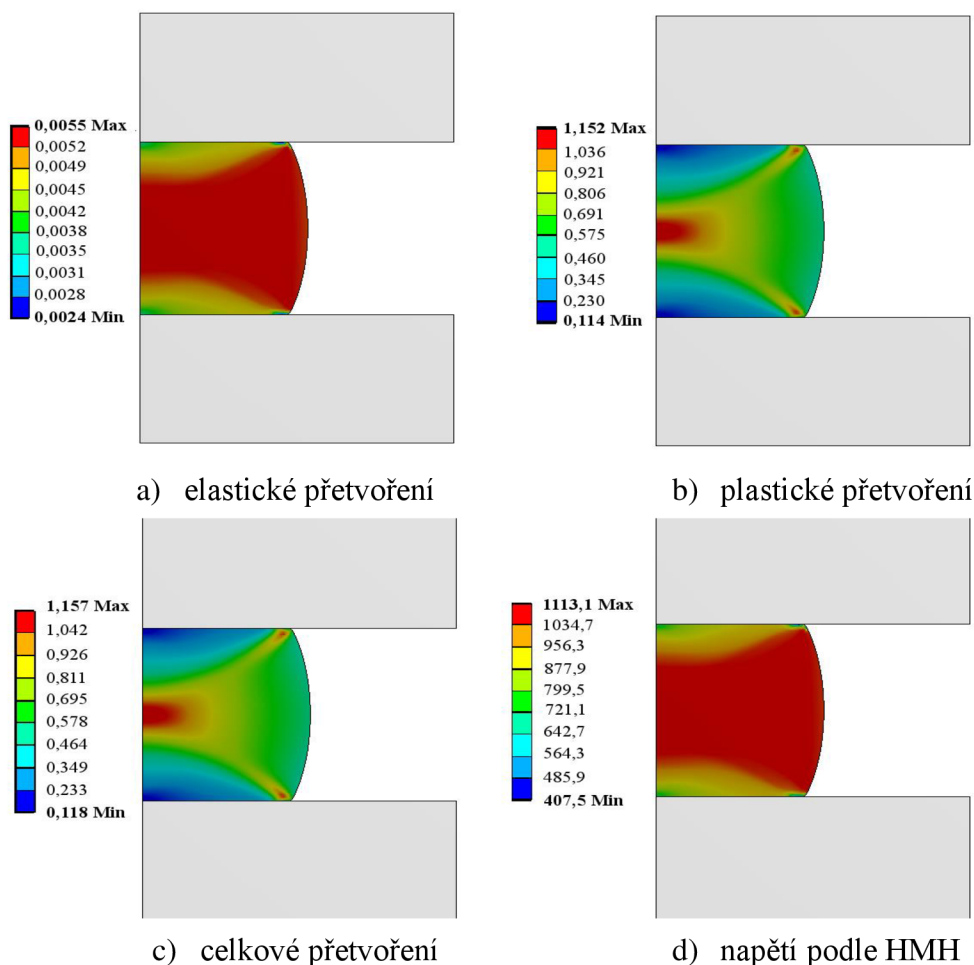
Obr. 40 Pohyb prvků

Elastické přetvoření zobrazuje obr. 41a, kde je vidět, že největší deformace se týkala středu modelu. Nejmenší poté na čele vzorku, přičemž úplně nejmenší deformace byla v rozích.

U plastického přetvoření (obr. 41b) lze spatřit typický kovářský kříž, kdy největší deformace je ve středu tělesa a v jeho rozích. Minimální je na čele.

Na obr. 41c je zobrazeno přetvoření celkové, které se velmi podobá plastické deformaci.

Napětí podle podmínky plasticity HMM (Hencky, Mises, Huber) je na obr 41d. Největší napětí působí ve středu tělesa.

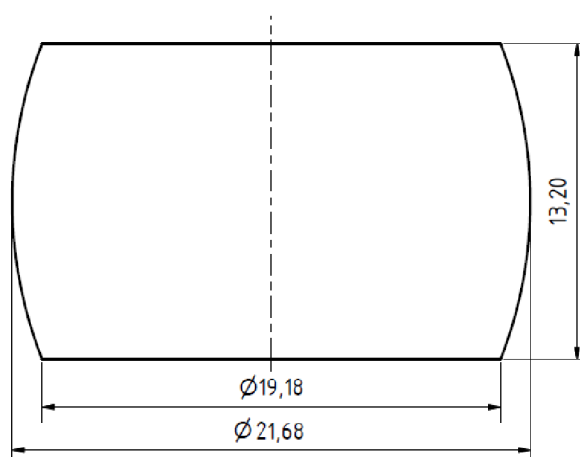


Obr. 41 Výstupy ze simulace

Další parametr vhodný k porovnání s pēchovací zkouškou je soudečkovitost. K tomu bylo třeba znát rozměry napēchovaného vzorku ze simulace, které jsou zobrazeny na obr. 42. Soudečkovitost se poté vypočetla podle vzorce (1.4):

$$c = \frac{D_1}{D_2} = \frac{19,18}{21,68} = 0,885.$$

U pēchovací zkoušky vyšla soudečkovitost 0,940, takže rozdíl od numerické simulace je 0,055, což není příliš velký rozdíl a znamená to, že vliv soudečkovitosti je téměř stejný.



Obr. 42 Rozměry vzorku po simulaci

4.7 Dynamometr RA 100 [10], [34]

Jelikož dynamometr C6R měří jen do síly 500 kN, byla snaha porovnat jeho hodnoty s dynamometrem RA 100, jehož měřicí rozsah je až do 1 000 kN a tudíž je jeho využití větší. Dalších pět vzorků bylo tedy zkoušeno na stejném zařízení, jako v prvním případě, avšak na měření pēchovací síly se použil již zmíněný dynamometr RA 100. Vzorky byly opět změřeny před i po vykonání pēchování. Každý rozměr se rovněž měřil třikrát a z těchto hodnot se vypočítala střední hodnota. Naměřené rozměry jsou v příloze 3 a zprůměrované hodnoty zobrazuje tabulka 8. Experiment probíhal za konstantní teploty, která byla stejná jako v předchozím měření, tedy cca 25 °C. Napēchované vzorky jsou zobrazeny na obr. 43.

Tab. 8 Rozměry zkušebních vzorků

Označení vzorku	D ₀ [mm]	H ₀ [mm]	D ₂ [mm]	D ₁ [mm]	H ₁ [mm]	t [s]
6	15,10	25,12	20,27	19,08	14,79	75,5
7	15,15	25,08	20,37	19,20	14,85	72,5
8	15,09	25,05	20,21	19,12	14,78	72,8
9	15,05	25,02	20,32	19,10	14,77	72,2
10	15,06	24,99	20,25	19,07	14,60	72,8
Průměr	15,09	25,05	20,28	19,11	14,76	73,2



Obr. 43 Druhá sada napēchovaných vzorků

Rovněž se provedli výpočty základních charakteristik. Níže je uveden příklad výpočtu pro vzorek s označením 6. Všechny výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 9. Soudečkovitost se spočetla podle vzorce (1.4):

$$c = \frac{D_1}{D_2} = \frac{19,08}{20,27} = 0,942.$$

Logaritmická deformace podle rovnice (1.8):

$$\varphi = \ln \frac{H_1}{H_0} = \ln \frac{14,79}{25,12} = -0,530.$$

Poměrné přetvoření dle vztahu (1.9):

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_1} = \frac{25,12 - 14,79}{14,79} = 0,698.$$

Dále rychlost stroje podle (1.14)

$$v = \frac{\Delta H}{t} = \frac{25,12 - 14,79}{75,5} = 0,1368 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

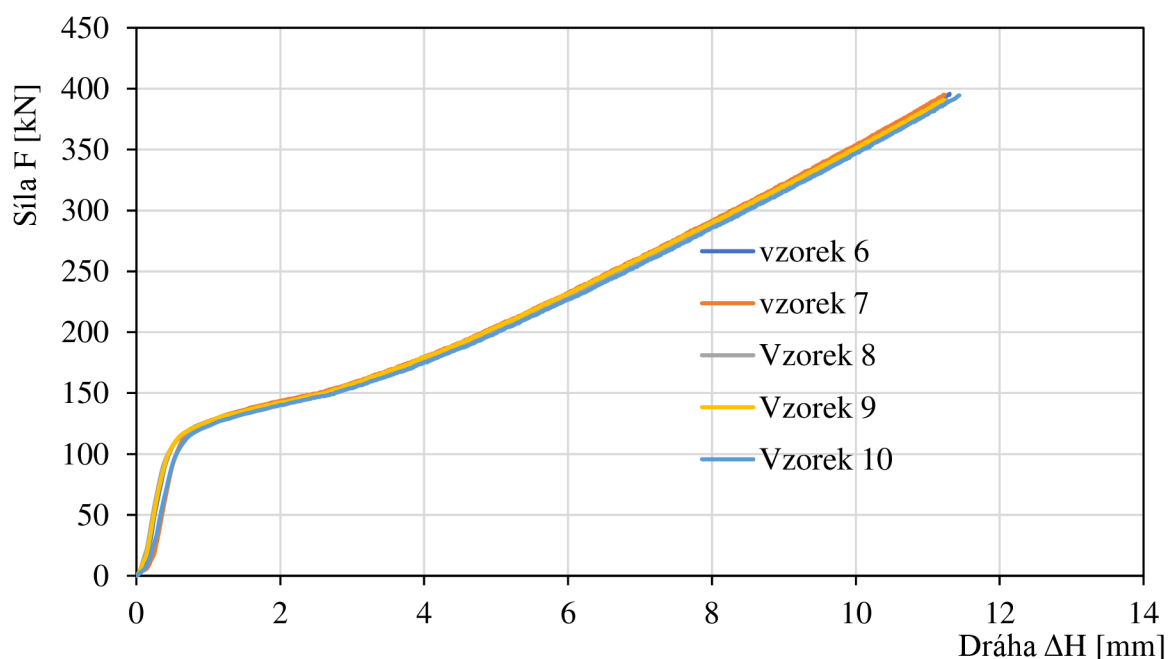
A střední rychlost přetvoření (1.15):

$$\dot{\varphi}_{\text{stř}} = \frac{v \cdot \ln \frac{H_0}{H}}{H_0 - H} = \frac{0,1368 \cdot \ln \frac{25,12}{14,79}}{25,12 - 14,79} = 0,00701 \text{ s}^{-1}.$$

Tab. 9 Vypočtené základní charakteristiky

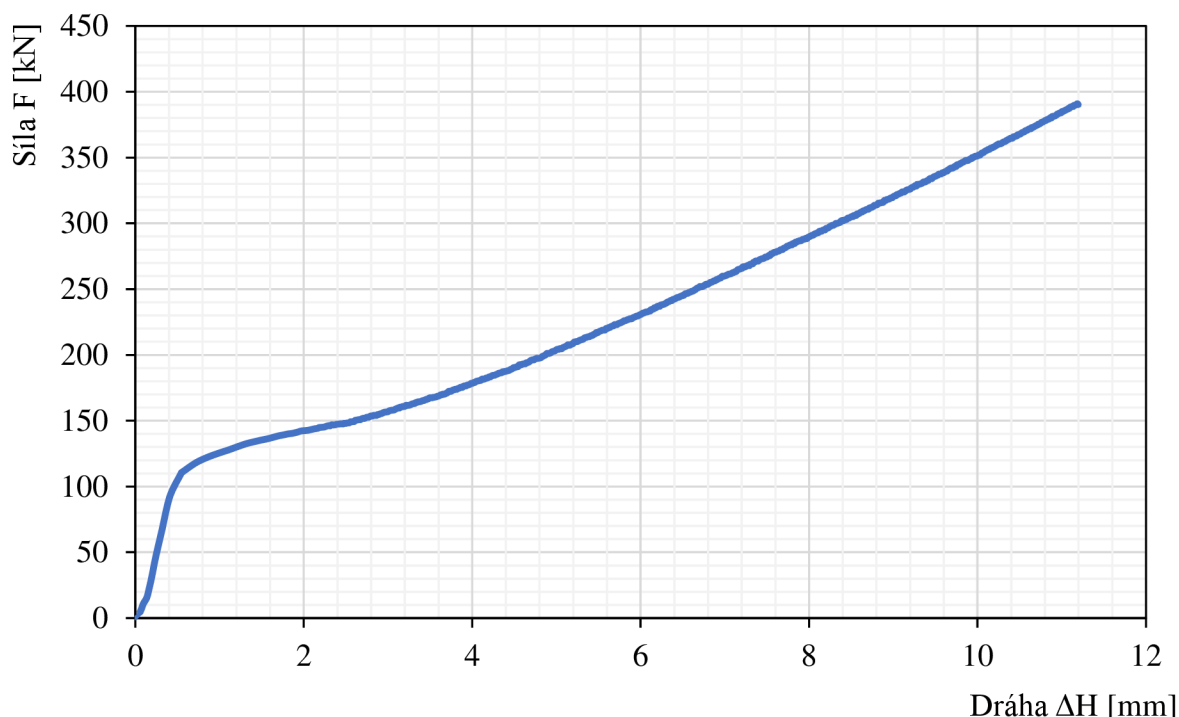
Číslo vzorku	c [-]	φ [-]	ε [-]	v [mm·s ⁻¹]	$\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]
6	0,942	-0,530	0,698	0,1368	0,00701
7	0,942	-0,524	0,689	0,1412	0,00723
8	0,946	-0,527	0,695	0,1410	0,00725
9	0,940	-0,527	0,694	0,1419	0,00730
10	0,942	-0,538	0,712	0,1427	0,00738
Průměr	0,942	-0,529	0,698	0,1407	0,00723

Ze získaných hodnot z experimentu, byl opět vykreslen pracovní diagram závislosti síly na dráze (obr 44).



Obr. 44 Pracovní diagram měřený dynamometrem RA 100

Z grafu je patrné, že křivky se téměř protínají, a tedy průběhy vzorků jsou velmi podobné. Z těchto pěti křivek byl opět vytvořen medián, který je zobrazen na obr. 45.



Obr. 45 Medián hodnot vzorků měřených dynamometrem RA 100

Jak je v diagramu vidět, do síly přibližně 110 kN, se materiál choval pružně. Od této hodnoty už nastává plastická deformace.

Pro výpočet okamžité hodnoty přirozeného přetvárného odporu a logaritmické deformace, a tím získání hodnoty pro křivku zpevnění, se použila rovnice (1.22). Vzorový výpočet byl proveden pro vzorek s označením šest, v čase pěchování, kdy $\Delta H = 10$ mm a pěchovací síla je rovna 351 784 N:

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot (H_0 - \Delta H)}{\pi \cdot D_0^2 \cdot H_0} = \frac{4 \cdot 351784 \cdot (25,12 - 10)}{\pi \cdot 15,1^2 \cdot 25,12} = 1182,4 \text{ MPa.}$$

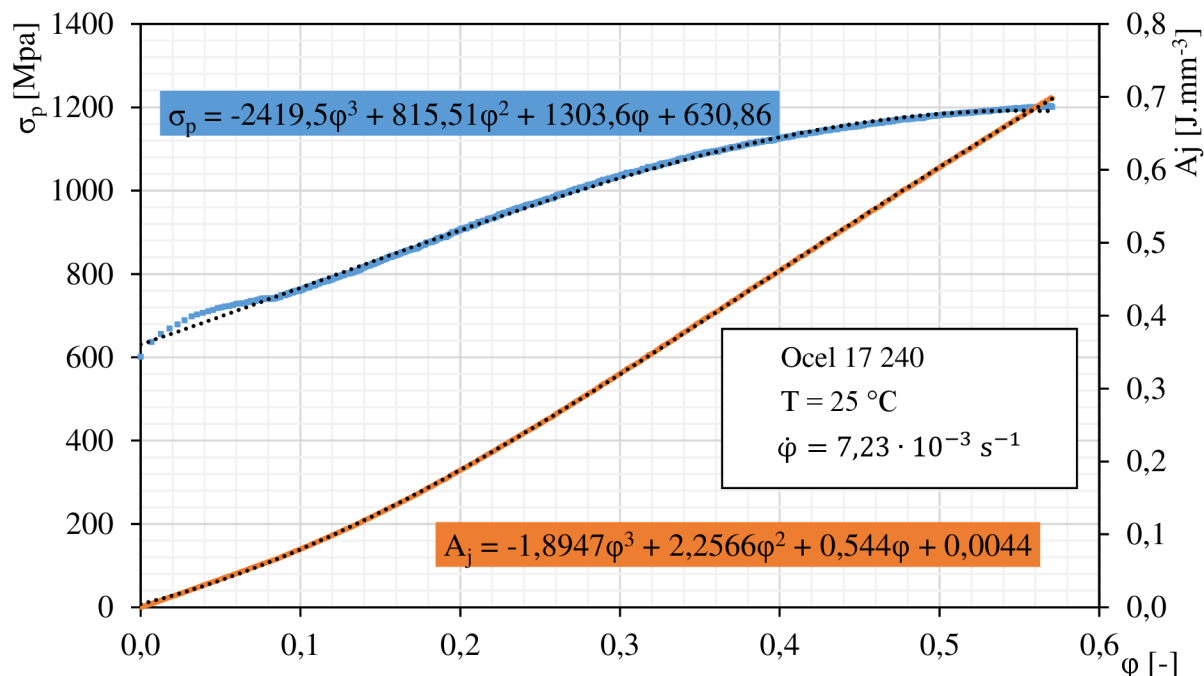
Logaritmická deformace se pak vypočítala podle vztahu (1.8):

$$\varphi = \ln \frac{H_1}{H_0} = \ln \frac{25,12 - 10}{25,12} = -0,508.$$

Další charakteristika, která byla třeba vypočítat, byla měrná přetvárná práce. Ta se vypočítala podle rovnice (1.12):

$$A_j = \int_0^\varphi \sigma_p \cdot d\varphi = \sigma_p \cdot \varphi = 1182,4 \cdot 0,508 \cdot 10^{-3} = 0,6007 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}.$$

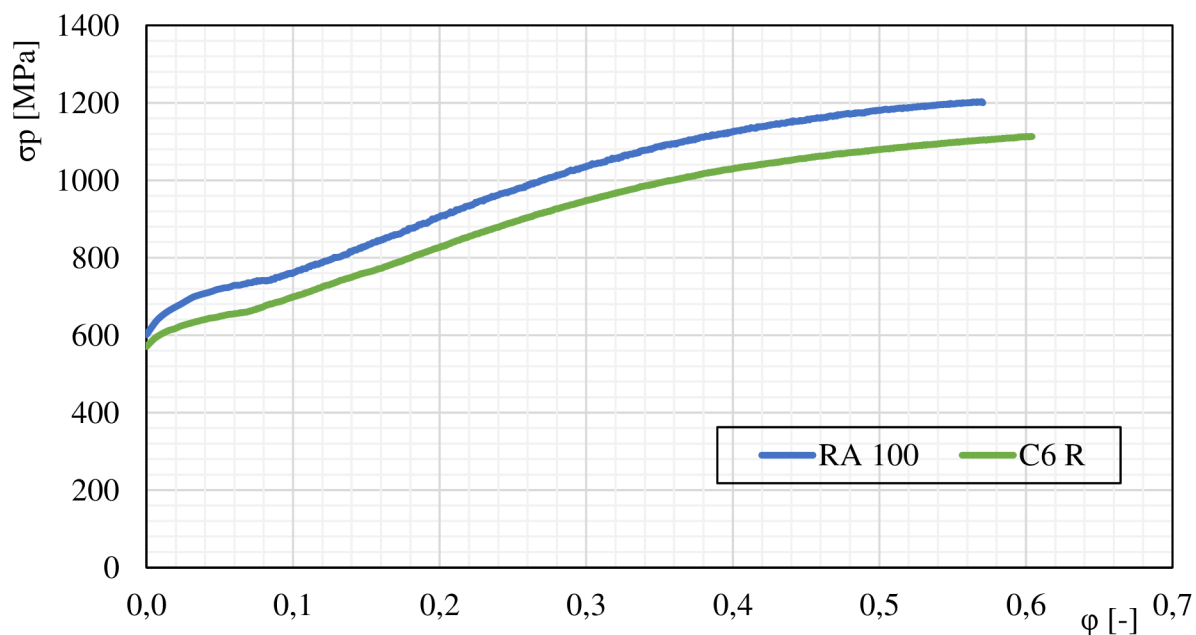
Po vypočtení všech hodnot bylo možné vytvořit graf závislosti přirozeného přetvárného odporu na skutečném přetvoření a závislost měrné přetvárné práce také na skutečném přetvoření (obr. 46).



Obr. 46 Diagram křivky zpevnění

Po vykreslení spočítaných hodnot byly tyto závislosti proloženy křivkami třetího polynomu, jejichž rovnice jsou zobrazeny v grafu. Z něj je patrné, že například při deformaci 0,2 se materiál zpevní na hodnotu asi 900 MPa při měrné přetvárné práci 0,19 J.mm⁻³. Křivka zpevnění začíná na hodnotě meze kluzu v tlaku, tedy asi 630 MPa.

Poté se porovnávaly výsledky naměřené dynamometr C6R s dynamometrem RA 100. Toto srovnání obou dynamometrů je na obr. 47.



Obr. 47 Graf křivek zpevnění obou dynamometrů

Z grafu je patrné, že na začátku plastické deformace (mez kluzu v tlaku) se hodnoty liší přibližně o 30 MPa. Při postupné deformaci zkoušeného materiálu se však tento rozdíl zvětšuje, kdy na konci zatěžování je rozdíl přirozeného přetvárného odporu přibližně 100 MPa, což už dělá téměř 9 %. Jelikož byl dynamometr C6R ověřen pomocí univerzálního lisu ZD40, jsou jeho hodnoty správné. Vyplývá z toho tedy, že kalibrační křivka, podle které jsou vyhodnocovány výsledky měření pomocí dynamometru RA 100 je pro tento způsob měření zavádějící, a tudíž bude potřeba dodatečné kalibrace zmíněného dynamometru.

5 ZÁVĚRY

Hlavním cílem práce bylo zpracování literární rešerše na téma pěchovací zkoušky, vykonání této zkoušky na konkrétních vzorcích a její vyhodnocení pro získání závislosti přirozeného přetvárného odporu na přetvoření. Zmíněnou závislost je možné využít jako materiálový model numerických simulací. V dalším byla proto ověřena jeho správnost provedením ověřovací simulace MKP.

Zkouška probíhala na hydraulické lisu CZR 600-2. Síla byla měřena pomocí dynamometru C6R a dráha snímačem W50. U dynamometru byla provedena přibližná kalibrace pomocí univerzálního zkušebního stroje ZD40 a probíhala na základě postupného zatěžování silami 50, 100, 150, 200, 250 a 300 kN. Z jednotlivých rozdílů sil při zatěžování byla vypočítána střední hodnota, která činí 1,33 kN, tj. 1,3 %. a z toho lze konstatovat, že dynamometr C6R měří přesně.

Pěchovalo se pět vzorků z oceli ČSN 17 240. Před i po ukončení zkoušky se vzorky proměřily posuvným měřidlem a z těchto hodnot se poté vypočetla soudečkovitost, logaritmické a poměrné přetvoření. Naměřené hodnoty síly, času a dráhy byly zaznamenány pomocí programu Dewesoft a zpracovány v softwaru Excel, kde se vytvořil graf závislosti síly na změně dráhy. Přepočtem se také zjistil přirozený přetvárný odpor, logaritmická deformace a měrná přetvárná práce a tím se získaly křivky zpevnění.

V další části se porovnávali výsledky pěchovací zkoušky se zkouškou tahovou. Z tohoto srovnání plyne, že křivka získaná tahovou zkouškou vykazuje větší zpevnění oproti zkoušce tlakové.

Pro ověření získaného materiálového modelu byla zpracována numerická simulace na základě MKP. Ta probíhala v programu Ansys Workbench. Pro její zhotovení bylo potřeba vytvořit z grafu závislosti síly na dráze multilineární model, který popisuje materiál v plastické oblasti. Po uskutečnění simulace byly získány hodnoty síly a dráhy a byly ještě zobrazeny posun prvků, deformace a napětí v tělese. Následně byl vytvořen graf závislosti síly na dráze, který se porovnal s výsledky ze zkoušky. Ze srovnání vyšlo, že hodnoty se příliš neodlišují a je tedy možné tento materiálový model používat pro numerické simulace.

V poslední části proběhla ještě pěchovací zkouška pro dalších pět vzorků ze stejného materiálu, avšak síla byla měřena dynamometrem RA 100. Získané hodnoty se poté porovnávaly s hodnotami získanými pomocí dynamometru C6R. Z tohoto srovnání plyne, že měření dynamometrem RA 100 je nepřesné, a tudíž se jeví jako vhodná další kalibrace zmíněného dynamometru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4193-2.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
3. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: Část tváření*. Brno, 2015. Syllabus. VUT FSI: Ústav strojírenské technologie.
4. Zkušební lisy pro zkoušky tlakem. *Tempos.cz* [online]. TEMPOS, 2017 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje/zkusebni-lisy/zkusebni-lis-pro-zkousky-tlakem>
5. Charpy kladiva. *Igitur.cz* [online]. igitur [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.igitur.cz/razove-zkusebni-stroje/charpy-kladivo-ceast-9050-do-kapacity-50j>
6. Universal Material Tester. *Come-tech.com.tw* [online]. Cometech, 2004 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://www.come-tech.com.tw/en_products.asp
7. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
8. JANEČKA, Dominik. *Systém pro vyhodnocení pěchovací zkoušky* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105479. Bakalářská práce. FSI VUT.
9. ANSYS. *Ansys.com* [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
10. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1992. Technický průvodce. ISBN 80-030-0651-1.
11. MORAVEC, Ján. *Teória tvárnenia kovov*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2015. Vysokoškolské učebnice (Žilinská univerzita). ISBN 978-80-554-1095-1.
12. FOREJT, Milan, Antonín HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody: Syllabus* [online]. VUT FSI Brno: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/he1_experimentalni_metody_cviceni_2017_fo_rejt_piska_humar_janicek.pdf
13. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
14. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
15. ŽÍDEK, Milan. *Metalurgická tvaritelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha: Aleko, 1995. ISBN 80-853-4145-X.
16. ŽÁK, Ladislav. *Zkoušení materiálů a výrobků* (přednáška) Brno:FSI VUT [2017-2-27].
17. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3070-2.
18. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1983.
19. MORRIS, Alan S. *Measurement and instrumentation principles*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 0750650818

20. ŠTĚTINA, Josef, Michal JAROŠ a Pavel RAMÍK. *Virtuální laboratoř – Měření: Měření snímače, metody*. VUT FSI Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2003. Dostupné také z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/>
21. Snímače síly. In: *Hbm.cz* [online]. Praha: HBP měřící technika, 2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/snimace-sily/c2-n-kn/>
22. Snímače polohy. In: *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. Olomouc: Eluc, 2015 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/960>
23. Platinové termočlánky ze SAFINY expandují do hi-tech průmyslu. *Tretiruka.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/platinove-termoclanky-ze-safiny-expanduji-do-hi-tech-prumyslu-/>
24. NIKISHKOV, G.P. *Introduction to the finite element method*. Japan: University of Aizu, 2004.
25. MOOSBRUGGER, Charles et al. *ASM handbook: Fundamentals of Modeling for Metals Processing*. 1. Materials Park, Ohio: ASM International, 2009. ISBN 978-1-61503-001-9.
26. KIM, Nam-Ho. *Introduction to nonlinear finite element analysis*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4419-1745-4.
27. Analýzy metodou konečných prvků. In: *Vypoctykonstrukci.cz* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.vypoctykonstrukci.cz/>
28. FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů*. Ostrava, 2013. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf
29. *Metoda konečných prvků*. FS CVUT: Praha, 2011. Dostupné z: <http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/predmety/mmkp/podklady/mod.pdf>
30. Materiálový list. *České normy* [online]. 2018 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.ceske-normy.cz/>
31. Lis hydraulický vlačovací. In: *Stroje Svoboda* [online]. Blansko, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=DETAIL&katalog=Stroje/Lis&key=&id=13131&ids=13154&o=1>
32. Zesilovač. In: *Directindustry.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/dewetron-gmbh/product-25786-754899.html>
33. Multifunction I/O Device. In: *National instruments* [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.usb-6009.html>
34. Digitaler messschieber. In: *HANN+KOLB* [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.hahn-kolb.de/MAHR-16-EWV-Digitaler-Messschieber-200-mm-mit-Datenausgang-inkl-Zubehoer/31181900.sku/de/DE/EUR/>
35. FOREJT, Milan. *Teorie tváření: Návodý do svičení*. Brno: FSI VUT, 2004. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/hta_teorie_tvareni_navody_do_cviceni_2018a_forejt.pdf
36. HARANT, Martin. *Význam tahové zkoušky pro numerickou simulaci* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149261. Bakalářská práce. FSI VUT.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Přetvárná práce	[J]
A_j	Měrná přetvárná práce	[J·cm ⁻³]
c	Soudečkovitost	[-]
D	Globální matice neznámých parametrů (posuvů)	[-]
D0	Průměr polotovaru před pēchováním	[mm]
D1	Nejmenší průměr napēchovaného polotovaru	[mm]
D2	Největší průměr napēchovaného polotovaru	[mm]
Ď	Matice rychlosti	[-]
Ď	Globální matice zrychlení	[-]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
F	Pēchovací síla	[kN]
F	Globální matice zatížení	[-]
H	Výška vzorku v okamžiku zjišťování přetvárného odporu	[mm]
H ₀	Výška polotovaru před pēchováním	[mm]
H ₁	Výška vzorku po pēchování	[mm]
k	Součinitel citlivosti	[-]
K	Globální matice tuhosti	[-]
l	Délka vodiče	[mm]
M	Matice hmotnosti	[-]
P	Průřez vodiče	[mm ²]
R	Elektrický odpor	[Ω]
S	Průřez vzorku v okamžiku zjišťování přetvárného odporu	[mm ²]
S ₀	Průřez vzorku před pēchováním	[mm ²]
t	skutečný čas práce	[s]
V	Objem zkoušeného vzorku	[mm ³]
v	Rychlost nástroje	[mm·s ⁻¹]
V _C	Celkový objem napēchovaného polotovaru	[mm ³]
V _S	Objem soudečku	[mm ³]
λ	Štíhlostní poměr	[-]
μ	Poissonova konstanta	[-]
σ _p	Přirozený přetvárný odpor	[Mpa]
ΔH	Změna výšky vzorku	[mm]
ΔR/R	Poměrná změna odporu	[-]
ε	Poměrná deformace	[-]
ρ	Měrný odpor	[Ω.m]
φ	Logaritmické deformace	[-]
φ̇	Rychlost deformace	[s ⁻¹]
φ̇ _{stř}	Střední rychlost deformace	[s ⁻¹]

SEZNÁM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stroje pro základní mechanické zkoušky	9
Obr. 2 Diagram měřicí soustavy	10
Obr. 3 Pěchování válečku	11
Obr. 4 Mechanická schémata deformace při pěchování	12
Obr. 5 Křivka zpevnění	12
Obr. 6 Vliv teploty na přirozený přetvárný odpor	14
Obr. 7 Vzorek s rovnými čely	14
Obr. 8 Vzorek dle Rastěgajeva.....	15
Obr. 9 Vzorek dle Siebela a Pompa	15
Obr. 10 Vzorky dle CIRP-F	16
Obr. 11 Schéma univerzálního snímače.....	16
Obr. 12 Válcový vodič namáhaný tahem	17
Obr. 13 Odporové tenzometry.....	18
Obr. 14 Snímač tlakových sil	18
Obr. 15 Schéma indukčnostního snímače	18
Obr. 16 Termočlánek	19
Obr. 17 Příklad diskretizace 3D modelu	20
Obr. 18 Prvky používané v MKP	21
Obr. 19 Vliv zvyšování počtu prvků na přesnost	21
Obr. 20 Zkoušený vzorek	23
Obr. 21 Rozměry vzorku.....	23
Obr. 22 Schéma měřicího řetězce	24
Obr. 23 Lis CZR-600	24
Obr. 24 Zkušební zařízení	25
Obr. 25 Měřicí zařízení	25
Obr. 26 Měřicí systém.....	25
Obr. 27 Stroj ZD40	26
Obr. 28 Porovnání hodnot z kalibrace	26
Obr. 29 Posuvné měřítko	27
Obr. 30 Napěchované vzorky.....	27
Obr. 31 Pracovní diagram měřený dynamometrem C6R.....	28
Obr. 32 Medián hodnot vzorků měřených dynamometrem C6R.....	29
Obr. 33 Diagram křivky zpevnění.....	30
Obr. 34 Geometrie vzorku při zkoušce tahem	30
Obr. 35 Srovnání křivek zpevnění z tahové a pěchovací zkoušky.....	31
Obr. 36 Multilineární model	32
Obr. 37 Geometrický model.....	32
Obr. 38 Nadefinované vazby.....	33
Obr. 39 Porovnání simulace s pěchovací zkouškou.....	33
Obr. 40 Pohyb prvků	34
Obr. 41 Výstupy ze simulace	34
Obr. 42 Rozměry vzorku po simulaci	35
Obr. 43 Druhá sada napěchovaných vzorků	35
Obr. 44 Pracovní diagram měřený dynamometrem RA 100	36

Obr. 45 Medián hodnot vzorků měřených dynamometrem RA 100.....	37
Obr. 46 Diagram křivky zpevnění.....	38
Obr. 47 Graf křivek zpevnění obou dynamometrů	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli ČSN 17 240 v hm. %	23
Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 240	23
Tab. 3 Parametry lisu CZR 600-2 [30]	24
Tab. 4 Parametry zkušebního stroje ZD40.....	26
Tab. 5 Parametry posuvného měřítka [33].....	27
Tab. 6 Rozměry zkušebních vzorků.....	27
Tab. 7 Vypočtené základní charakteristiky	28
Tab. 8 Rozměry zkušebních vzorků.....	35
Tab. 9 Vypočtené základní charakteristiky	36

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Materiálový list oceli 17 240
- Příloha 2 – Hydraulický zkušební stroj ZD40
- Příloha 3 – Naměřené velikosti vzorků

PŘÍLOHA 1

Materiálový list oceli 17 240

1/2

27572P15 - 2 z 2



BEBITZ

Bereich Stabstahl / Bright Bar Division

Flanschenwerk Bebitz GmbH - Lebendorfer Str. 1 - 06420 Bebitz / GERMANY (A01)
Tel. +49 34691 40 0 - Fax +49 3469140 329 - Email: flanges@bebitz.de



Abnahmeprüfzeugnis 3.1 / Inspection certificate 3.1 / Certificat de reception 3.1
nach (A02) / acc. DIN EN 10204 : 2005 Nr. (A03) / No.15-26685 Datum (Z02) / Date 05.11.2015

Zeichen des Herstellers (A04)
Manufacturer's brand



Stempel des Abnehmers (Z03)
Stamp of the testing engineer



Überprüft als Hersteller nach AD-Merkblatt W0 / TRD100. / Approved as manufacturer acc. AD-Merkblatt W0 / TRD100.
Zertifiziert nach DGR 97/23/EG durch TÜV CERT Zertifizierungsst. für Druckgeräte der TÜV NORD GmbH Co KG, Benannte Stelle
Nr. 0045. / Certified acc. to PED 97/23/EC, certifying body for pressure equipment TÜV NORD GmbH Co KG, registration no. 0045.

Besteller
(A06)
Customer

Bestell-Nr. (A07) / Order-No. 2015-OIP-814
Auftrag (A08) / Order 3522090
Lieferschein / Delivery No. 3534842
Position(B07.1) / Item 6

Gewicht Bezeichnung (B01; B09 - B11)
Mass [kg] Product

Schmelze/Prüflos (B07)
Heat no./Test no.

1010 round bar, drawn (chamfered, polished) - 20 mm, inventory length 3000 mm 38133-97505

Material Type 304 / 304L - A/SA-276, A/SA-479

(B02; austenitizing (min. 1040 °C, water)

B05) IK-Test/IC test DIN EN ISO 3651-2 Verf. A/ASTM A262 practice E - NACE MR0175-2011 /
MR0103-2007, crack tested Cl.3 acc. DIN EN 10277 : 2008

Anford. surface condition smooth and clean

(B03) tolerance grade h9 acc. EN 10278 (ISO 286-2)

Require-ments ASTM: A276M-15, A479M-15 / ASME Sec.II Part A 2013 Edition: SA-276, SA-479M / PMI tested

Schmelzenanalyse (C71 - C92) / Ladle analysis Erschmelzung (C70) / Melting proces E+AOD

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Mo	Nb	V	N	Cu	Al	Co
0,019	0,36	1,01	0,034	0,028	18,01	8,01	0,004	0,44	0,012		0,074	0,56		0,150

PREN

20,65 $CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{V + Mo + Cr}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$ PREN = Cr + 3,3 x Mo + 16 x N

Mechanische Prüfungen / Mechanical tests

Probenlage (C02): L / Position of Specimen: L						Kerbschlagbiegeversuch / Impact test DIN EN ISO 148-1 (V-Kerb / V-notch)			Härte (C32) Hardness ISO 6506-1	
Temp (C03) °C	Streckgrenze (C11) / Yield 0,2% MPa (N/mm ²)		Zugfestigkeit (C12) Tensile MPa (N/mm ²)	Dehnung (C13) Elongation %	Einschnürr. Red. of area %	Temp. (C03) °C	Einzelwerte (C42) Single values J	MW (C42) Average J	HBW 2,5/187,5	
20	min	205	515	30,0	40	20				
	max			5d ₀	4d ₀					
20		537	559	673	49,0	61,3	74		183	

Am Material wurden keine Reparaturschweißungen vorgenommen. / No welding repair on the material.
Material ist nicht radioaktiv oder mit Quecksilber kontaminiert. / Material is free from radioactive or mercury contamination.
Sicht- und Maßprüfungen ohne Beanstandungen. (D01) / Visual and dimensional examinations without objections.
Die Anforderungen der Bestellung sind erfüllt. / The product meets the requirements of the order specifications.
Die Angaben in Klammern entsprechen den Vorgaben der DIN EN 10168 / Data in parentheses refer to DIN EN 10168.
APZ ist mit EDV erstellt und ohne Unterschrift gültig. / MTR was electronically generated and is valid without a signature.

R. Sparing,

Abnahmebeauftragter des Herstellers (Z02) / Inspection Representative of the Manufacturer

27572P15 - 1 z 2



BEBITZ

Bereich Stabstahl / Bright Bar Division

 Flanschenwerk Bebitz GmbH - Lebendorfer Str. 1 - 06420 Bebitz / GERMANY (A01)
 Tel. +49 34691 40 0 - Fax +49 3469140 329 - Email: flanges@bebitz.de

Abnahmeprüfzeugnis 3.1 / Inspection certificate 3.1 / Certificat de reception 3.1
nach (A02) / acc. DIN EN 10204 : 2005 Nr. (A03) / No. 15-26684 Datum (Z02) / Date 05.11.2015

 Zeichen des Herstellers (A04)
 Manufacturer's brand

 Stempel des Abnehmers (Z03)
 Stamp of the testing engineer

 Überprüft als Hersteller nach AD-Merkblatt W0 / TRD100. / Approved as manufacturer acc. AD-Merkblatt W0 / TRD100.
 Zertifiziert nach DGR 97/23/EG durch TÜV CERT Zertifizierungsst. für Druckgeräte der TÜV NORD GmbH Co KG, Benannte Stelle
 Nr. 0045. / Certified acc. to PED 97/23/EC, certifying body for pressure equipment TÜV NORD GmbH Co KG, registration no. 0045.

Besteller (A06) Customer	Bestell-Nr. (A07) / Order-No. 2015-OIP-814 Auftrag (A08) / Order 3522090 Lieferschein / Delivery No. 3534842 Position(B07.1) / Item 6
Gewicht Bezeichnung (B01; B09 - B11) Mass [kg] Product	Schmelze/Prüflos (B07) Heat no./Test no.
1010 round bar, drawn (chamfered, polished) - 20 mm, inventory length 3000 mm	38133-97505

Material (B02; B05) 1.4301 (X5CrNi18-10) / 1.4307 (X2CrNi18-9)
 austenitizing (min. 1040 °C, water)
 IC test acc. to DIN EN ISO 3651-2 practice A / ASTM A 262 practice E, crack tested Cl.3 acc. DIN EN 10277 : 2008

Anford. (B03) surface condition smooth and clean
 tolerance grade h9 acc. EN 10278 (ISO 286-2)
Requirements DIN EN 10272 : 2008 / DIN EN 10088-3 : 2014 / AD 2000-Merkbl. W 2 (08.2006), W 10 (01.2004) / PMI tested

Schmelzenanalyse (C71 - C92) / Ladle analysis **Erschmelzung (C70) / Melting proces** E+AOD

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Mo	Nb	V	N	Cu	Al	Co
0,019	0,36	1,01	0,034	0,028	18,01	8,01	0,004	0,44	0,012		0,074	0,56		0,150

PREN $PREN = C + \frac{Mn}{6} + \frac{V + Mo + Cr}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$ $PREN = Cr + 3,3 \times Mo + 16 \times N$
 20,65

Mechanische Prüfungen / Mechanical tests

Probenlage (C02): L / Position of Specimen: L Zugversuch / Tensile Test - ASTM A 370/DIN EN ISO 6892-1							Kerbschlagbiegeversuch / Impact test DIN EN ISO 148-1 (V-Kerb / V-notch)			Härte (C32) Hardness ISO 6506-1
Temp (C03) °C	Streckgrenze (C11) / Yield 0,2% MPa (N/mm ²)	Yield 1,0% MPa (N/mm ²)	Zugfestigkeit (C12) Tensile MPa (N/mm ²)	Dehnung (C13) Elongation %	Einschnürung Red. of area %	Temp. (C03) °C	Einzelwerte (C42) Single values J	MW (C42) Average J	HBW 2,5/187,5	
20	min 190 max	225	600 850	30,0 5d ₀ 4d ₀		20	100	100	215	
20	537	559	673	49,0 61,3	74				183	

Am Material wurden keine Reparaturschweißungen vorgenommen. / No welding repair on the material.
 Material ist nicht radioaktiv oder mit Quecksilber kontaminiert. / Material is free from radioactive or mercury contamination.
 Sicht- und Maßprüfungen ohne Beanstandungen. (D01) / Visual and dimensional examinations without objections.
 Die Anforderungen der Bestellung sind erfüllt. / The product meets the requirements of the order specifications.
 Die Angaben in Klammern entsprechen den Vorgaben der DIN EN 10168 / Data in parentheses refer to DIN EN 10168.
 APZ ist mit EDV erstellt und ohne Unterschrift gültig. / MTR was electronically generated and is valid without a signature.

R. Sparing,

Abnahmebeauftragter des Herstellers (Z02) / Inspection Representative of the Manufacturer

PŘÍLOHA 2

Hydraulický zkušební stroj ZD40

Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 KN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

PŘÍLOHA 3

Naměřené velikosti vzorků

Označení vzorku	D ₀ [mm]	H ₀ [mm]	D ₂ [mm]	D ₁ [mm]	H ₁ [mm]
1	15,11	25,11	20,27	19,08	14,79
	15,09	25,13	20,25	19,10	14,80
	15,09	25,13	20,28	19,07	14,79
2	15,15	25,07	20,39	19,23	14,85
	15,16	25,11	20,38	19,24	14,84
	15,15	25,07	20,34	19,12	14,85
3	15,07	25,05	20,21	19,15	14,78
	15,10	25,04	20,21	19,08	14,78
	15,10	25,05	20,22	19,13	14,78
4	15,05	25,04	20,34	19,13	14,77
	15,05	25,01	20,30	19,06	14,77
	15,06	25,01	20,31	19,10	14,78
5	15,06	24,98	20,24	19,04	14,60
	15,05	24,98	20,26	19,10	14,60
	15,06	25,00	20,25	19,08	14,59
6	15,11	25,04	21,30	19,87	13,66
	15,10	25,05	21,28	19,91	13,67
	15,11	25,05	21,25	19,90	13,67
7	15,15	25,05	20,90	19,64	14,00
	15,14	25,03	20,87	19,69	13,99
	15,16	24,98	20,85	19,66	14,01
8	15,14	25,08	20,88	19,65	14,11
	15,16	25,07	20,84	19,57	14,10
	15,15	25,07	20,80	19,63	14,11
9	15,10	25,07	20,87	19,59	14,05
	15,09	25,08	20,88	19,66	14,05
	15,08	25,07	20,87	19,56	14,05
10	15,14	25,02	20,92	19,80	13,98
	15,13	25,06	20,88	19,70	13,98
	15,13	25,03	20,89	19,76	13,98