



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NÁVRH VÝROBY ČEPU OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM ZA STUDENA

DESIGN OF PIN PRODUCTION BY COLD FORMING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kouřil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.

BRNO 2025

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jakub Kouřil</b>
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	<b>Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2024/25

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 diplomové práce:

## Návrh výroby čepu objemovým tvářením za studena

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o výrobu dílce pomocí technologie objemového tváření za studena. Na tuto oblast bude rovněž vypracována literární rešerše. Dále bude práce obsahovat návrh technologického postupu výroby součásti, technické hodnocení včetně výkresové dokumentace a závěry se zhodnocením navrhované technologie.

### Cíle diplomové práce:

1. Vypracovat literární studii se zaměřením na technologii objemového tváření za studena.
2. Zhodnotit současný stav výroby součásti obdobného tvaru.
3. Navrhnout vlastní technologii výroby včetně posouzení jednotlivých variant.
4. Vypracovat výkresovou dokumentaci nástroje včetně nezbytných výpočtů.
5. Zpracovat technické a ekonomické hodnocení navržené technologie.
6. Závěry a doporučení pro průmyslovou praxi.

### Seznam doporučené literatury:

LANGE, Kurt. Handbook of Metal Forming. New York: McGraw-Hill, 1985. ISBN 0-07-036285-8.

ELFMARK, Jiří a kol. Tváření kovů: Technický průvodce, sv 62. 1.vyd. Praha: SNTL. 1992. 524 s. ISBN 80-03-00651-1.

MIELNIK, Edward M. Metalworking science and engineering. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-041904-3.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: A. n. CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na návrh výroby součásti objemovým tvářením za studena. Předmětem práce je návrh technologie výroby vysokonapěťového pinu o sérii 500 000 ks · rok<sup>-1</sup> pomocí protlačování a pýchování. K výrobě je použita měď Cu-ETP R240. Návrhu výroby předchází konstrukce materiálového modelu prostřednictvím pýchovací zkoušky a Taylorova testu. Následuje volba polotovaru, stanovení geometrie v jednotlivých operacích a nakonec samotné simulace tvářecího procesu. Výrobní postup se skládá ze tří tvářecích operací, kterým předchází tepelné zpracování polotovaru a jeho dělení. Na základě součtu sil v jednotlivých tvářecích operacích, potřebného počtu stanic, výšky dílce v jednotlivých operacích a dalších faktorech, je pro výrobu zvolen tvářecí automat CHUN ZU CBF-204S. Současně je navržen nástroj a v závěru je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, jehož součástí je také výpočet bodu zvratu, kusové ceny při uvažování 8% zisku, která za stanovených podmínek činí 44,51 Kč a dalších ukazatelů.

### Klíčová slova

Objemové tvářením za studena, protlačování, pýchování, pin, konektor

## ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the design of cold-formed bulk components. The subject of the work is the development of a production technology for a high-voltage pin, with an annual production volume of 500,000 pieces, using extrusion and tamping. Copper Cu-ETP R240 is used for the production. The design process is preceded by the creation of a material model through tamping tests and the Taylor test, as well as the controlled selection of the semi-finished product, determination of geometry in individual operations, and finally, the simulation of the forming process itself. The production process consists of three forming operations, preceded by the heat treatment and cutting of the semi-finished product. Based on the sum of the forces in the individual forming operations, the required number of stations, the height of the part in each operation, and other factors, the CHUN ZU CBF-204S forming machine was selected for production. The proposed tool design is also presented. Finally, a technical and economic evaluation is carried out, which includes a break-even point calculation, unit price calculation considering an 8% profit margin, which under the specified conditions amounts to 44.51 CZK, and other relevant indicators.

### Keywords

Volume cold forming, extrusion, tamping, pin, connector

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOUŘIL, Jakub. *Návrh výroby čepu objemovým tvářením za studena*. Online, diplomová práce. Miroslav JOPEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165693>.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Návrh výroby čepu objemovým tvářením za studena vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

Brno, 15. 05. 2025

---

Jakub, Kouřil

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Miroslavu Jopkovi, PhD. za cenné připomínky, doporučení a věnovaný čas, který mi poskytl během vypracování diplomové práce. Díky patří také panu Ing. Janu Řiháčkovi, PhD. za čas, vstřícnost, rady a ochotu při provádění materiálových zkoušek a pomoc při simulacích. Současně bych chtěl vyjádřit vděk společnosti TE Connectivity za možnost vypracování práce se zaměřením na konkrétní aplikaci z praxe. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým, příteli i celé rodině za podporu během studia.

---

**OBSAH**

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	9
1 Rozbor součásti .....	10
1.1 Varianty řešení výroby .....	11
2 Deformační chování materiálu .....	15
2.1 Podstata deformace.....	15
2.2 Objemové tváření za studena .....	19
2.2.1 Pěchování.....	20
2.2.2 Protlačování .....	21
2.3 Pěchovací zkouška .....	24
2.4 Taylorův test.....	28
2.5 Materiálový model .....	33
2.6 Numerické simulace .....	34
3 Návrh výroby.....	36
3.1 Materiálové zkoušky a konstrukce materiálového modelu .....	36
3.2 Návrh polotovaru.....	48
3.2.1 Volba rozměrů .....	48
3.3 Návrh technologického postupu .....	51
3.3.1 Simulace navrženého postupu .....	51
3.3.2 Výpočet přetvoření .....	53
3.4 Výpočet přetvárných rychlostí, odporů, sil, prací a výkonu.....	55
3.5 Volba stroje .....	60
3.6 Návrh nástroje .....	60
4 Technicko-ekonomické zhodnocení .....	62
ZÁVĚR.....	66

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

Seznam výkresů

## ÚVOD

Dnešní moderní doba nám nabízí rozsáhlé možnosti, kterými lze vyrábět nepřeberné množství produktů. Strojírenství není výjimkou a neustávající vývoj nám otevírá nové možnosti i na tomto poli. Růst kvality, inovací a produktivity je na denním pořadu v řadě průmyslových firem a nelze očekávat, že by tomu v brzké době bylo jinak, jelikož konkurence je neúprosná. Mezi základní výrobní technologie pracující také s kovovými materiály, lze zařadit obrábění, tváření, odlévání, svařování, ačkoli celková paleta možností je mnohem širší. Mnoho dílů lze zhotovit za pomoci více výrobních variant. Jedno z nejdůležitějších kritérií je však cena, která se ale u každé z variant může výrazně lišit. I proto je důležité po zvážení stěžejních faktorů vybrat nejvhodnější možnost. Tváření, jakožto jedna z elementárních výrobních metod, patří také mezi ty nejstarší. I dnes je však hojně využíváno. Jedná se o beztržkový způsob manipulace s materiálem, kdy dochází vlivem působení vnějšího zatížení k trvalé změně tvaru původního polotovaru. Podmínkou však je, že nesmí dojít k porušení materiálu. Vlivem dosažené plastické deformace dochází během tvářecího procesu k ovlivnění mechanických vlastností.

V základu lze tváření rozdělit na plošné a objemové. V případě tváření plošného je řeč o přetváření plochých polotovarů, jakými jsou například plech nebo pás. Problematiku lze popsat pomocí 2D. Naopak objemovým tvářením se rozumí trojrozměrná deformace zpracovávaného materiálu. Současně je možné proces realizovat jak za nevýšších (tváření za studena), tak vyšších teplot (tváření za tepla), kdy je materiál tvárnější.

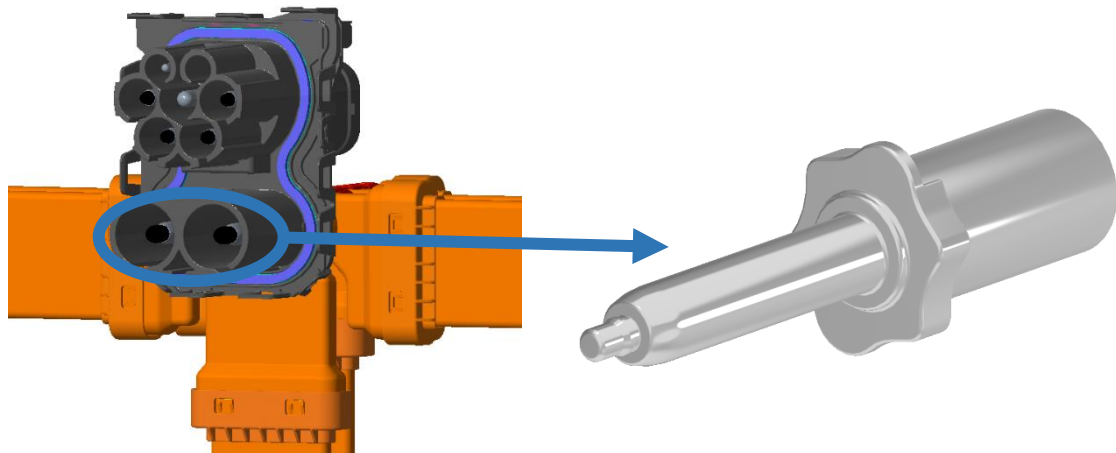
Objemové tváření za studena představuje velice produktivní metodu výroby řady dílů, které jsou součástí našich každodenních životů, jako například šroubů, plechovek, matic, hřídelek atp., viz obr. 1, které vynikají také svými vyššími mechanickými vlastnostmi v porovnání se zhotovením jinými výrobními metodami.



Obr. 1 Díly tvářené za studena [1].

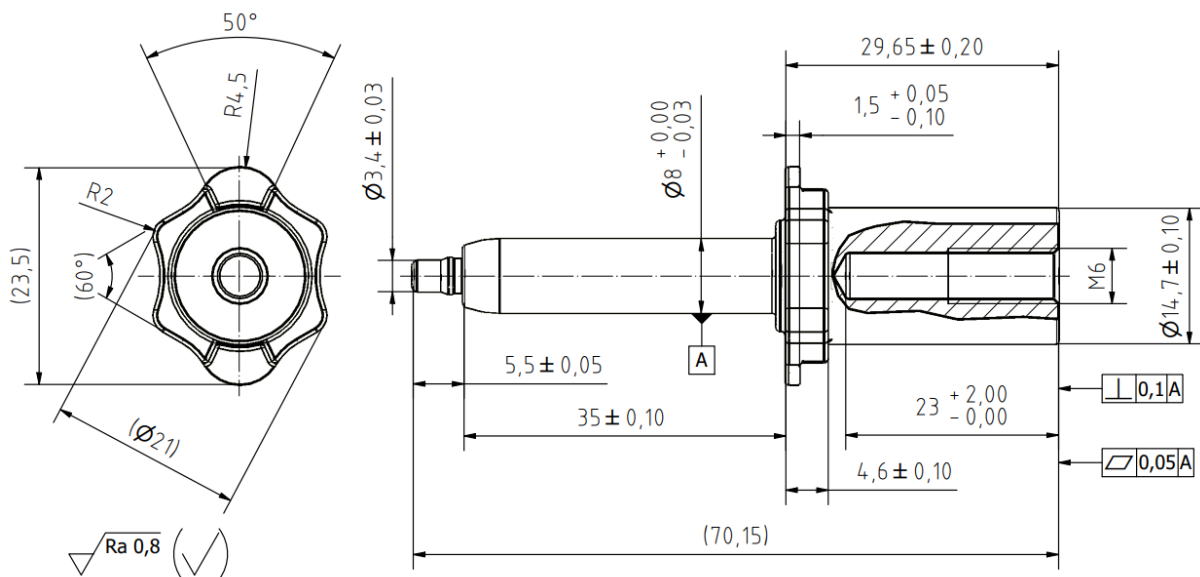
## 1 ROZBOR SOUČÁSTI

Řešenou součástí je vysokonapěťový pin, viz obr. 2. Jak je z obrázku patrné, pin je součástí napájecího socketu, konkrétně stejnosměrného obvodu, navrženého pro napájení elektrických vozidel. Díl jako takový musí plnit hned několik funkcí. Jednak styčná plocha musí splňovat požadavky spojené s přenosem vysokých napětí a proudů, musí být dostatečně otěruvzdorná, současně je na špičce nasazena plastová čepička, jejíž úkolem je zabránit možnosti kontaktu člověka s částí zařízení, které může být pod napětím. Střední část o největším vnějším průměru ve tvaru „kytičky“ slouží k zafixování polohy v plastovém těle konektoru, nemůže tak dojít k posuvu nebo otáčení kolem vlastní osy. Ve spodní části se dále nachází díra se závitem. Jejím prostřednictvím dochází k propojení pinu s vodičem, který elektrický proud distribuuje dále do baterie vozu, aby mohlo dojít k přenosu elektrické energie až do baterie vozidla. Výrobní série činí  $500\,000\text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ .



Obr. 2 Sestava se zadanou součástí.

Z hlediska geometrie se nejedná o jednoduchý díl. Především na střední část a špičku jsou za účelem naplnění spolehlivé funkčnosti kladeny vysoké nároky. Zejména špička kontaktu musí být vyhotovena precizně s přísnými tolerancemi, aby na ni bylo možné nasadit čepičku za stanovených zásuvných sil a bez jejího poškození. Více informací o geometrii je možné vidět na obr. 3, kompletní výkres je možné nalézt v přiložené výkresové dokumentaci.



Obr. 3 Rozměry součásti.

Materiálem pinu je Cu-ETP R240, která je pro danou aplikaci ideální. Je vhodné poznamenat, že během životnosti pinu nebude docházet k jeho mechanickému zatěžování, proto měď svými mechanickými vlastnostmi vyhovuje. Pro spolehlivý přenos elektrického proudu mezi pinem a jeho protikusem je povrch pinu i protikusu pokoven. Finiš tvoří stříbrná vrstva o tloušťce minimálně 8,5  $\mu\text{m}$ . Před stříbrem je však nutné povrch opatřit podkladovou bází, pod stříbrem je tedy nanášena tenká vrstva mědi o tloušťce 0,5  $\mu\text{m}$ , což je dostačující pro následující stříbření. Chemické složení zvoleného materiálu je k nahlédnutí v tab. 1, fyzikální vlastnosti v tab. 2.

Tab. 1 Chemické složení zvoleného materiálu [2].

Cu-ETP R240	Cu	O	Bi	Pb	Další prvky
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	$\geq 99,9000$	$\leq 0,0400$	$\leq 0,0005$	$\leq 0,0050$	$\leq 0,0300$

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti zvoleného materiálu [2].

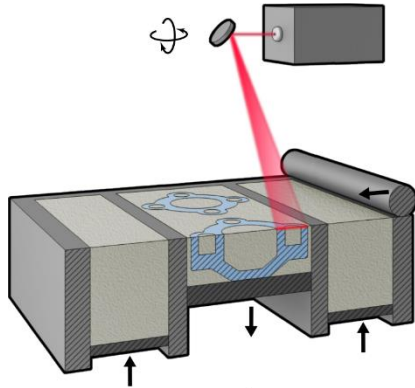
Cu-ETP R240		
Teplota tání	1084	$^{\circ}\text{C}$
Hustota	8,94	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Poissonův poměr	0,34	-
Elektrický odpor	1,72	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
Elektrická vodivost	58	$\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$
	100	% IACS
Měrná tepelná kapacita (při 25 $^{\circ}\text{C}$ )	0,386	$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

## 1.1 Varianty řešení výroby

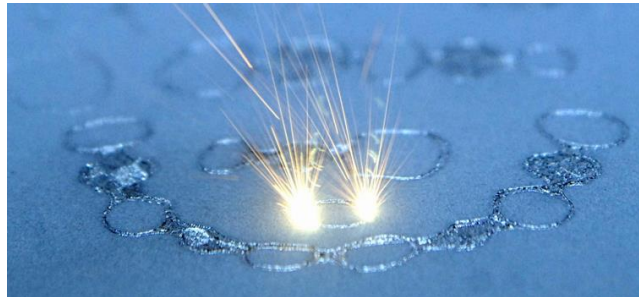
Podobně jako u mnoha jiných dílů i zadaný pin je možné vyrobit za pomoci vícero výrobních technologií. Volba té nejlepší však závisí na mnoha faktorech. Zcela zásadní roli hraje kusová cena. Jelikož má pin komerční uplatnění a firma na něm chce realizovat zisk, je i cena stěžejním faktorem. Ta se odvíjí od ceny materiálu, produktivity výroby, ceny nástroje, výrobní lokaci atp. Právě produktivita může být diametrálně odlišná při porovnání výrobních variant. Kromě finančního hlediska je důležité při volbě výrobní varianty zohlednit také požadavky, které jsou na součást kladeny, jelikož i ty se můžou u různých výrobních technologií zásadně lišit. Například díly tvářené za studena dosahují lepších pevnostních vlastností v porovnání se soustruženou alternativou. Stejně tak mají lepší vlastnosti, než díly vyrobené technologií odlévání. Díly tlakově lité zase trpí na vnitřní pórovitost a současně jako v předchozím příkladě nedosahují pevnostních vlastností, jako za studena tvářené alternativy. Dalším faktorem je dosažitelná přesnost výroby. Zde naopak soustružené nebo obecně díly třískově obráběné mohou vynikat nad díly tvářenými. Všechny výše zmíněné i další faktory je nutné zohlednit a zvolit tu variantu, u níž bude kombinace vlastností nejvíce odpovídat požadovaným charakteristikám.

- 3D tisk – dnešní doba nám nabízí mnoho možností i v oblasti 3D tisku. Tištění kovů se dnes již komerčně uplatňuje, navíc existuje více možností, jak z kovů tisknout. Jednou z možností je tisk z prášku – Direct Laser Metal Sintering (DLMS), respektive postupným tavením tenkých vrstev (0,02 – 0,06 mm) jemného kovového prášku prostřednictvím laserového paprsku. Při vytištění vrstvy dochází k posunutí spečené

části dolů a opětovně zakrytí povrchu vrstvou prášku, která je v následujícím kroku opět připečena k již vytištěné části. Schéma DLMS je znázorněno na obr. 4, praktická ukázka pak na obr. 5. [3, 4, 5]

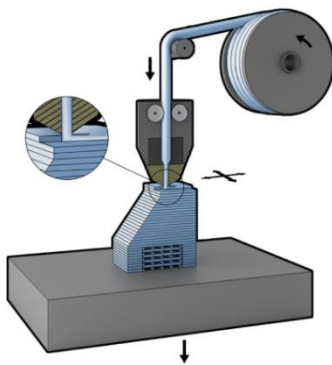


Obr. 4 Schéma DLMS [8].

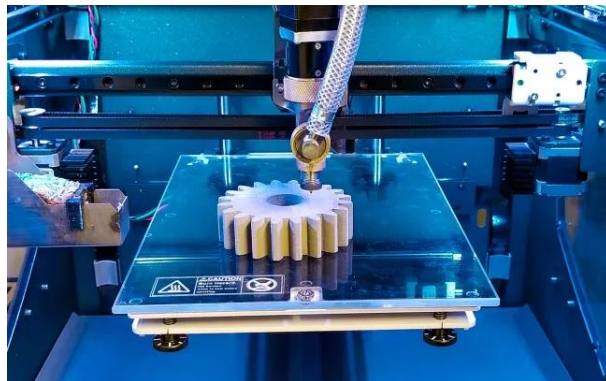


Obr. 5 Ukázka DLMS z praxe [9].

Další variantou může být spékání deponovaného materiálu – Fused deposition modeling (FDM), která spočívá v postupném nanášení nataveného materiálu ve formě filamentu skládajícího se z kovo-polymerového kompozitu, viz obr. 6. Praktická ukázka tiskového zařízení je na obr. 7. V první fázi se vytiskne díl vrstvu po vrstvě, kdy dochází pouze k tavení polymerové složky. Po vytištění je díl očištěn od polymerového pojiva a v peci probíhá spečení kovové složky za teplot vyšších než 1000 °C. [6, 7]



Obr. 6 Schéma FDM [11].

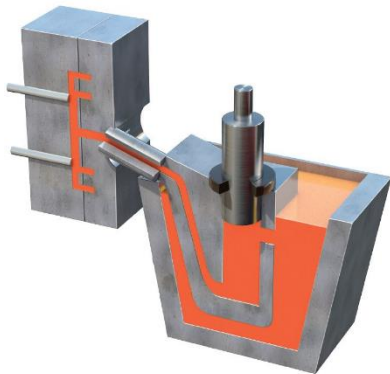


Obr. 7 Ukázka FDM z praxe [12].

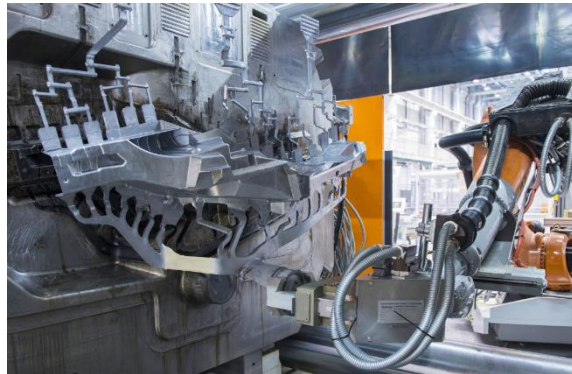
V případě FDM by nebylo možné dosáhnout požadovaných tolerancí. Navíc by bylo nutné tisknout nikoli Cu-ETP, nýbrž měděnou slitinu pro tento účel vyvinutou. Tisk čisté mědi popsányi metodami není možný. Nicméně v případě DLMS by bylo možné použít materiál s požadovanými vodivostními požadavky. Dosažitelná drsnost by také nebyla uspokojivá. Z pohledu mechanických vlastností je vše v pořádku, jelikož se nepředpokládá mechanické namáhání pinu. Nicméně zásadním faktorem je v případě 3D tisku produktivita, která je velmi nízká. Při kvantitě 500 000 ks · rok<sup>-1</sup> nebude výroba profitabilní. [4, 6, 10]

- Odlévání – představuje další výrobní metodu, která funguje na principu roztavení materiálu a následném lití taveniny do formy, jejíž dutina má tvar požadované součásti a v níž dochází k opětovnému tuhnutí taveniny (obr. 8). Stejně jako u 3D tisku i zde máme mnoho výrobních možností, kdy každá z nich je vhodná pro jiný typ výrobku v závislosti na požadavcích. Jednou z nejproduktivnějších metod je technologie tlakového lití – High Pressure Die Casting (DPDC). Průběh výrobního postupu začíná tavením materiálu, který je následně vysokou rychlostí vtlačěn pístem do formy. Při kontaktu s formou začíná kov krystalizovat, přičemž jako poslední tuhne kov nejdále

vzdálen od povrchu formy. Forma samotná je precizně vyhotovena pomocí třískového, elektroerozivního obrábění a případně také následného leštění. Materiál formy je zpravidla ocel, aby vydržela desetitisíce až statisíce cyklů. Po ztuhnutí materiálu dojde k otevření formy, která se skládá ze dvou polovin, jedné pevné a druhé pohyblivé, následného vyjmutí vstříknutého odlitku pomocí vyhazovačů zakomponovaných ve formě a v dnešní době také průmyslového robotu, který odlitky z formy vyjímá. Díl je následně zchlazen v lázni a ohraněn v lisu, což znamená že je odstraněna vtoková soustava a nálitky. Díl pak může postupovat k následnému zpracování jako je omílání, tryskání, či jiné povrchové úpravě. Praktická ukázka je na obr. 9. [13, 14]



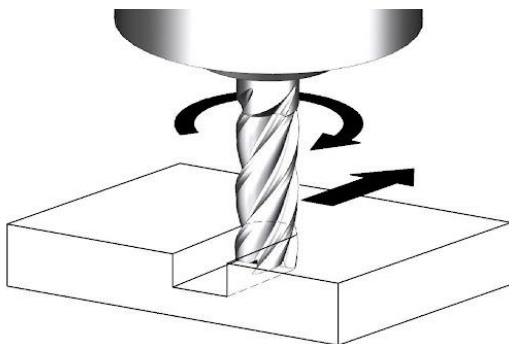
Obr. 8 Schéma DPDC [15].



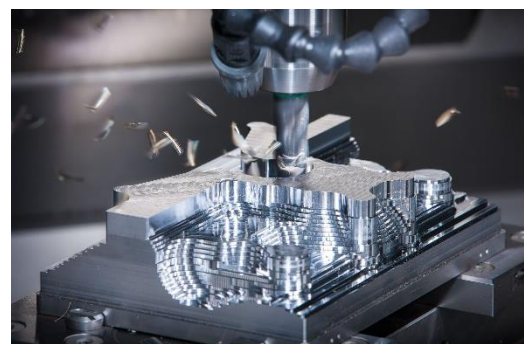
Obr. 9 Ukázka DPDC z praxe [16].

Z hlediska kvantity může být tlakové lití shledáno jako vhodná varianta. Současně lze tlakově lít i měď, takže nejsou limitující materiálové možnosti, jako tomu je u 3D tisku. Nežádoucí je však stopa po dělicí rovině a případně i v toku. Jelikož by dělicí rovina musela být rovnoběžná s osou pinu, byla by stopa i na kontaktní ploše, což je nepřijatelné. Pin by musel být následně ještě broušen nebo soustružen, aby došlo k jejímu odstranění. Vzhledem k charakteru součásti lze také usuzovat, že kvůli závitovým vložkám a dalším pohyblivým částem nutných pro zhotovení střední části pinu s „kytičkou“, by náklady na zhotovení formy mohly být relativně vysoké.

- Obrábění – technologie patří mezi základní a univerzální výrobní postupy současnosti. Základním principem je třískový úběr materiálu z polotovaru pomocí obráběcího nástroje (soustružnický nůž, závitník, fréza, atd.). Dnes jsou již standardem číslicově řízené stroje – Central Numeric Control (CNC), které jsou bez potřeby obsluhy schopné na základě vygenerovaného programu obrobít polotovaz do požadovaného tvaru. Obrábět lze jak kovy, tak plasty, dřevo, kompozity atp. Jak je tedy patrné, škála uplatnění je opravdu široká. Mezi základní obráběcí operace patří frézování, vrtání, soustružení, zapichování atd. Touto technologií lze v praxi zhotovit velmi přesné obrobky rozličných tvarů. Schéma jedné z metod třískového obrábění, konkrétně frézování je znázorněno na obr. 10, praktická ukázka na obr. 11. [17, 18, 19]



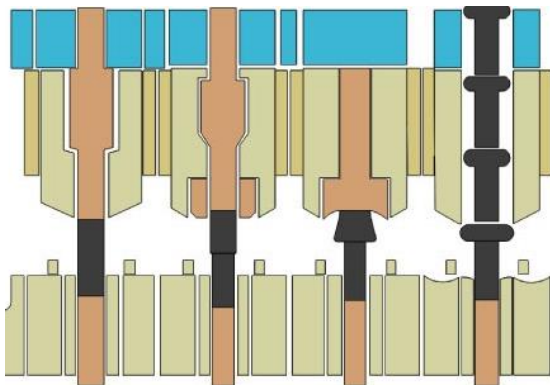
Obr. 10 Schéma frézování [19].



Obr. 11 Ukázka CNC obrábění v praxi [20].

V dnešní době lze touto technologií profitabilně vyrábět i vysoká kvanta jednoho typu dílu. Zpravidla se tak ale děje třeba u součástí, které jsou rotačně symetrické, kdy při dobrém odladění mohou výrobní centra dosahovat velmi vysokého taktu a tím pádem i produktivity. Je důležité brát na zřetel také vznikající odpad ve formě třísky. Ten lze sice opět odprodat, nicméně tím lze vícenásobky na materiál jen z části kompenzovat. S přihlédnutím na charakter zadané součásti lze usuzovat, že by pin nemohl být vyráběn pouze na soustruhu, kvůli již zmíněné „kytičce“, která by musela být frézována. Je tedy zřejmé, že produktivita by nebyla uspokojivá za předpokladu, že by měl být obráběním zhotoven pin celý.

- Objemové tváření za studena – velmi produktivní beztržisková metoda výroby součástí. Při výrobě objemovým tvářením dochází k žádané deformaci polotovaru, kterým bývá drát, tyč, trubka atp., a to buď za studena (menší součásti) nebo po předchozím ohřevu (větší součásti). Aby bylo dosaženo požadovaného tvaru, je polotovar umístěn do nástroje, jehož dutina v dolní úvrati beranu koresponduje s požadovanou geometrií vyráběného dílu. Aby došlo k deformaci materiálu, je stlačován potřebnou silou pomocí pohyblivé části nástroje. Dle složitosti geometrie se volí počet operací. Jednoduché dílce mohou být zhotoveny již během dvou zdvihů. U složitějších dílů s potřebou například děrování, je zdvihů potřeba více. Tvářecí stroje disponují několika tvářecími stanicemi blízko u sebe. Díly jsou mezi jednotlivými stanicemi přepravovány pomocí podavače, který s nimi manipuluje v souladu s taktem stroje, který je velmi svižný. Výsledkem je navíc zlepšení mechanických vlastností, což je u některých aplikací výhodné. Náznorné schéma procesu je na obr. 12, konkrétní praktická ukázka viz obr. 13. [21, 22, 23]



Obr. 12 Schéma objemového tváření [23].



Obr. 13 Objemové tváření v praxi [24].

Z hlediska výrobního množství je objemové tváření ideální výrobní metodou pro výrobu pinu. Také z hlediska materiálu není v případě této varianty problém, jelikož měď je dobře tvárná. Dokonce ani formování střední části pinu není překážkou, jelikož ta půjde prostřednictvím nástroje napěchovat. Problémem ale bude vnitřní závit a také příliš striktní tolerance, kterých není možné tvářením za studena dosáhnout. Špička pinu pro čepičku je tedy touto metodou nevyrobitelná.

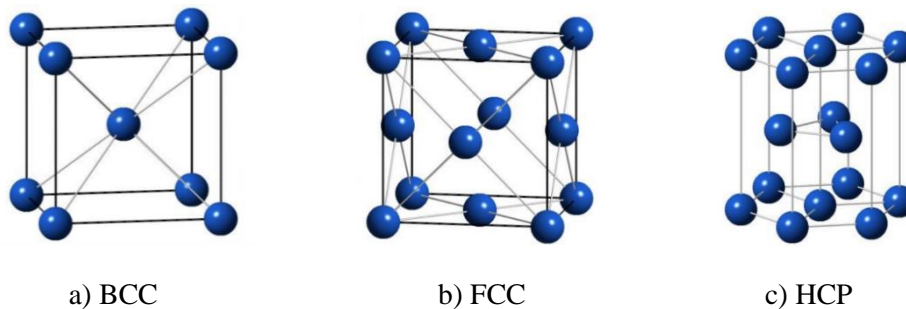
Jak je patrné z dílčích závěrů uvažovaných výrobních technologií, žádná varianta není zcela uspokojivá. Charakter dílce, spolu s požadavky na něj kladenými, neumožňuje uspokojivou výrobou jen jednou technologií. Po celkovém zhodnocení je navržen dvoustupňový proces výroby pinu samotného (bez pokovení). Nejdříve bude zhotoven díl objemovým tvářením za studena, jehož špička a vnitřní závit budou následně soustruženy na CNC automatu. Tímto způsobem bude ušetřeno mnoho odpadního materiálu, který by byl obráběním znehodnocen. Právě návrhu výroby objemovým tvářením za studena bude věnována praktická část diplomové práce.

## 2 DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLU

Pro zhotovení součástí technologií tváření je nutné docílit trvalé změny tvaru zpracovávaného materiálu. Proces, kterým lze takového výsledku docílit, je nazýván deformace. Deformaci je možné rozdělit na pružnou a plastickou. Pružná nebo také elastická deformace předchází plastické, k níž dochází po překročení tzv. meze kluzu, což je materiálová charakteristika. Její podstatou jsou strukturní změny v materiálu, k nimž dochází na základě změn fyzikálních na úrovni krystalové mřížky. Součástí procesu je také ovlivnění mechanických vlastností jako například pevnost, tažnost, houževnatost atp. [25, 26].

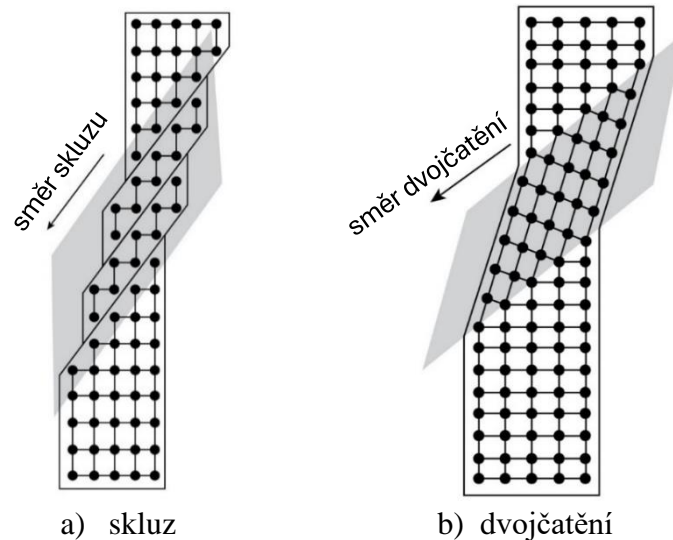
### 2.1 Podstata deformace

K pochopení deformačních jevů je nutné se na materiál podívat podrobněji. Je možné si ho přiblížit a zkoumat jej na makro, mikro i atomární úrovni. Pro porozumění tématu jsou důležité všechny úrovně. Atomární uspořádání kovů lze charakterizovat pomocí krystalové mřížky, která je určena svou geometrií, respektive atomárním uspořádáním, které odpovídá nejnižší energetické úrovni možného uspořádání. Pro kovy je charakteristická kubická a hexagonální těsně uspořádaná (HCP, z anglického hexagonal close packed) mřížka. Kubickou mřížku pak podle vnitřního atomového uspořádání dále dělíme na prostorově středěnou (BCC, body centered cubic) nebo plošně středěnou (FCC, face centered cubic). Všechna uspořádání lze vidět na obr. 14. Na krystalové mřížce závisí mechanické, elektrické, tepelné i magnetické vlastnosti. [25, 26]



Obr. 14 Krystalové mřížky [28].

Elastickou deformaci lze charakterizovat tak, že se těleso po odstranění vnějšího zatížení, respektive silového působení, vrací do původního stavu. Naopak u plastické deformace se po odstranění vnějších sil zpět nevrací, nýbrž zůstává zdeformované trvale. K jejímu vzniku dochází za účasti dvou mechanismů, z nichž první z nich je skluz, ke kterému dochází v rovinách atomy nejhustěji obsazenými a který je dominantně uplatňujícím se při většině tvářecích procesů, vyjma těch vysokorychlostních jako je tváření rázem, kdy hlavní roli hraje naopak dvojčatění a to zejména u kovů s hexagonální mřížkou (jako je hořčík, zinek, titan, kobalt atp.). Oba mechanismy jsou znázorněny na obr. 15. [25, 26, 31]

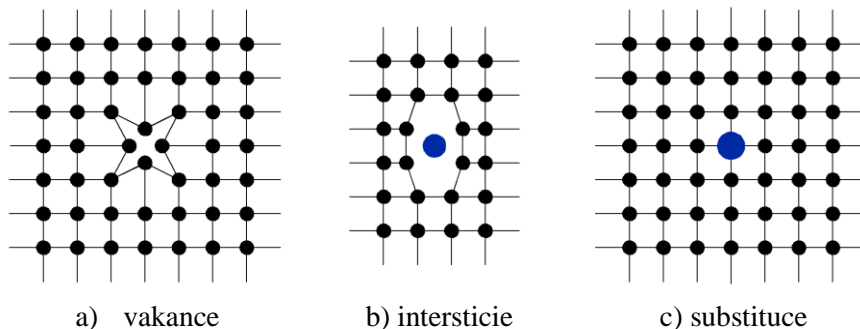


Obr. 15 Mechanismy plastické deformace [29].

K pochopení mechanismu skluzy je nutné si ještě více přiblížit krystalovou mřížku, respektive její reálný charakter, který není ideální, neboť ve skutečnosti obsahuje řadu poruch, které lze rozčlenit do několika skupin podle uspořádání, tvaru nebo třeba rozsahu [25, 26, 27, 31]:

### 1) Bodové poruchy

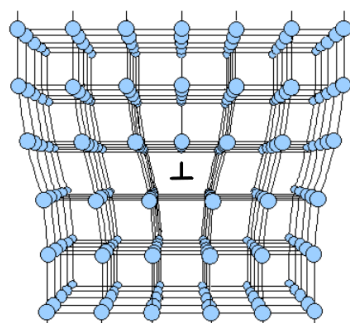
- Vakance – chybějící atom v jinak pravidelné mřížce, viz obr. 16a
- Intersticie – přebývající atom v mřížce, viz obr. 16b
- Substituce – původní atom mřížky nahrazen atomem jiného prvku, viz obr. 16c



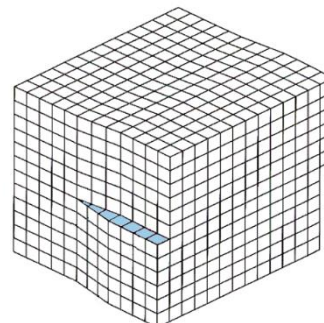
Obr. 16 Bodové poruchy [30].

### 2) Čárové poruchy – dislokace

- Hranová – vzniká posunutím dvou atomárních rovin vůči sobě, viz obr. 17
- Šroubová – „rozříznutý“ krystal je deformován stříhem, viz obr. 18
- Smíšené – kombinace předchozích



Obr. 17 Dislokace čárová [31].



Obr. 18 Dislokace [27].

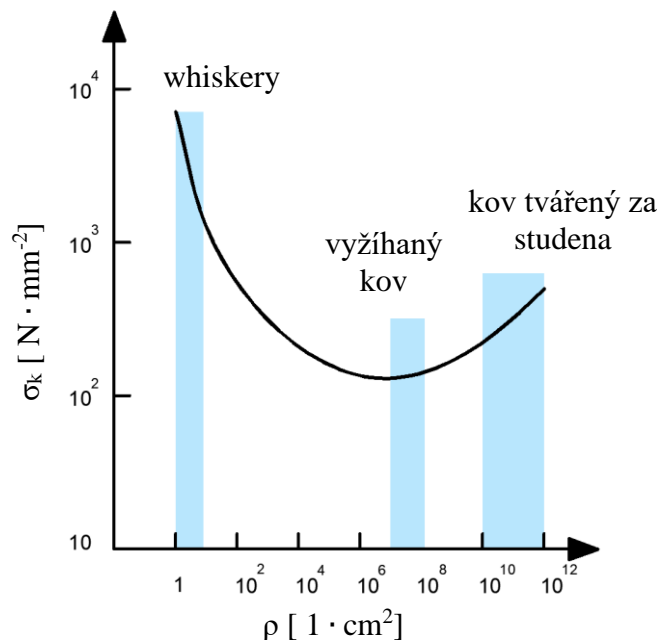
### 3) Plošné poruchy

- Porucha hranice zrn
- Vrstvené chyby
- Plochy dvojčatění

### 4) Prostorové poruchy

- Vměstky
- Široké hranice zrn

Z pohledu teorie plastických deformací jsou stěžejními právě poruchy čárové, tedy dislokace, které významným způsobem ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu. S jejich vyšším počtem se z pravidla zvyšuje deformační odpor, což vede ke zpevnění materiálu. Za účelem popsání tohoto jevu je zavedena veličina  $\rho$ , tedy dislokační hustota. Její hodnotu je možné vypočítat jako celková délka  $L$  dislokačních čar obsažených v daném objemu  $V$ . Závislost výše meze kluzu  $\sigma_k$  na hustotě dislokací je možné vidět na obr. 19. [25, 26, 27]

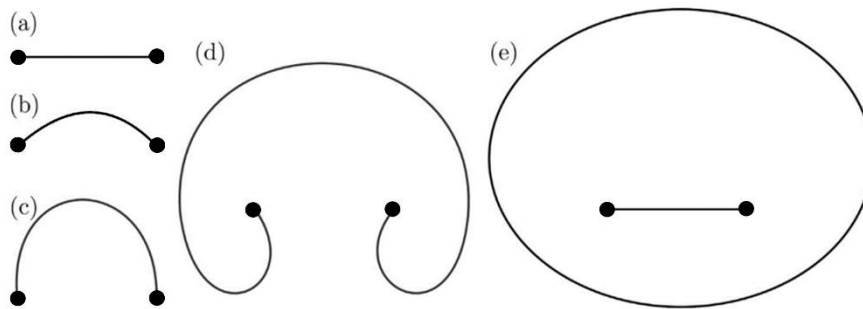


Obr. 19 Vliv hustoty dislokací na mez kluzu [41].

Rozeznáváme několik procesů vzniku dislokací. Prvním z nich je tvorba růstové spirály při krystalizaci. Výsledná dislokace je v takovém případě klasifikována jako šroubová. Druhým jevem je růst zrn do bloků, tak vznikají hranové a šroubové dislokace. Poslední možností je změna shluku vakancí. [25, 26, 27]

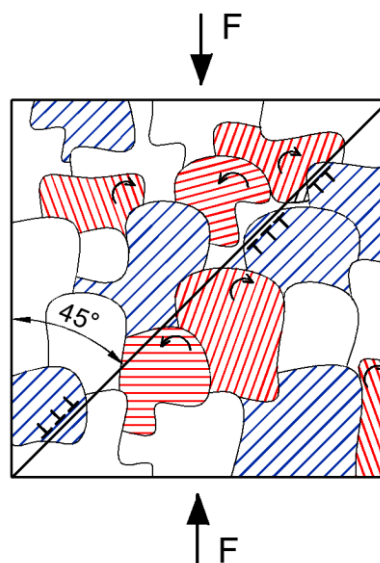
Nakonec je možné si přiblížit elementární průběh dislokačního vzniku, který je reprezentován činností tzv. Frank-Readova zdroje. Při působení smykového napětí se dislokační čára zakotvena mezi dvěma body (obr. 20a) postupně ohýbá (obr. 20a až obr. 20d) až do dosažení napětí, jemuž odpovídá minimální poloměr křivosti. Nadále dochází k jejímu růstu, přičemž v jistém okamžiku dojde ke spojení spirály (obr. 20e). V tu chvíli se z původní dislokace stává dislokace vnější. Mezi stanovenými body vznikne další, vnitřní dislokace, která při dalším působení napětí opět roste a děj se opakuje znovu až do vyčerpání zásoby plasticity. Uvolněná, vnější dislokace se přitom rozšiřuje až k hranici krystalu, který tvoří přirozenou bariéru. Takto probíhá elementární děj plastické deformace odehrávající se v rovině skluzu. Rychlost šíření dislokací závisí na typu mřížky a množství poruch. S jejich rostoucím počtem totiž roste také kritické skluzové napětí, jehož překročení je potřebné k jejich dalšímu šíření. Poruchy mřížky

jsou totiž další formou bariéry, které brání dislokacím v jejich šíření. Podobně působí také protínání dislokací mezi sebou. [25, 26, 27, 32]



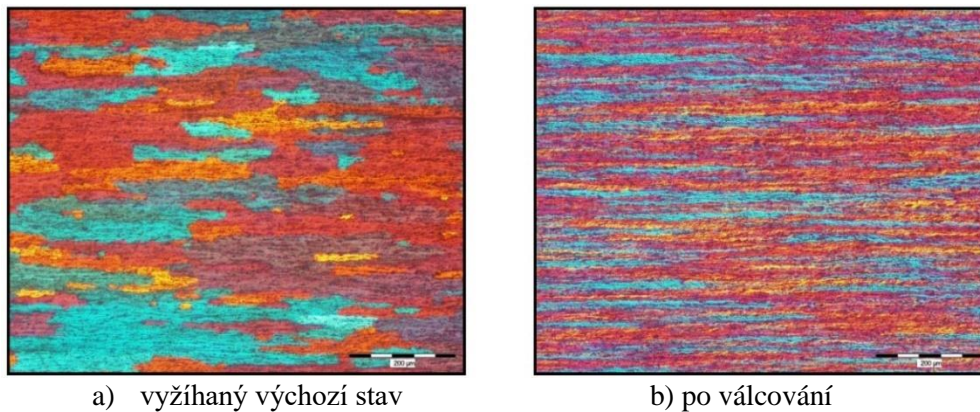
Obr. 20 Činnost Frank-Readova zdroje [32].

Právě skluz dislokací představuje základní mechanismus plastického přetvoření. Z pohledu mikrostruktury je možné říci, že v polykrystalických materiálech právě u zrn správně orientovaných vůči maximálnímu smykovému napětí  $\tau_{\max}$ , dochází k pohybu dislokací nejdříve. Na obr. 21 je mechanismus znázorněn. Skluz dislokací nastane prvně v zrnech označených modře. Následně bude docházet k postupnému natáčení zrn okolních (znázorněno červeně). Se zvyšujícím se napětím vyvolaným vnějším zatížením dochází k šíření skluzu na okolní polykrystalická zrna. Současně je možné, že při specifické orientaci zrn dojde také k dvojčatění. [25, 26, 27]



Obr. 21 Skluz dislokací v polykrystalických materiálech [25].

Akumulací deformačních jevů, tedy skluzu a dvojčatění, která vede k vyšší hustotě poruch v krystalové mřížce, dochází k postupnému deformačnímu zpevnování materiálu, které je doprovázeno rostoucím napětím. Další mechanismy, jak zpevnění docílit, jsou zpevnění legováním (interakce dislokací s atomy příměsí), precipitací (interakce s částicemi vzniklými rozpadem přesyceného tuhého roztoku), nebo zpevnění hranicemi zrn. Důsledkem popsanych procesů je v konečném důsledku zhoršení tváritelnosti materiálu až naprosté vyčerpání zásoby plasticity. Změny mechanických vlastností současně doprovází také změny mikrostrukturní. Při tváření za studena dochází k usměrňování jednotlivých strukturních fází ve shodě se směry hlavních deformací. Výsledkem je typická mikrostruktura materiálu, jejíž příklad je možné vidět na obr. 22. [25, 26, 27]



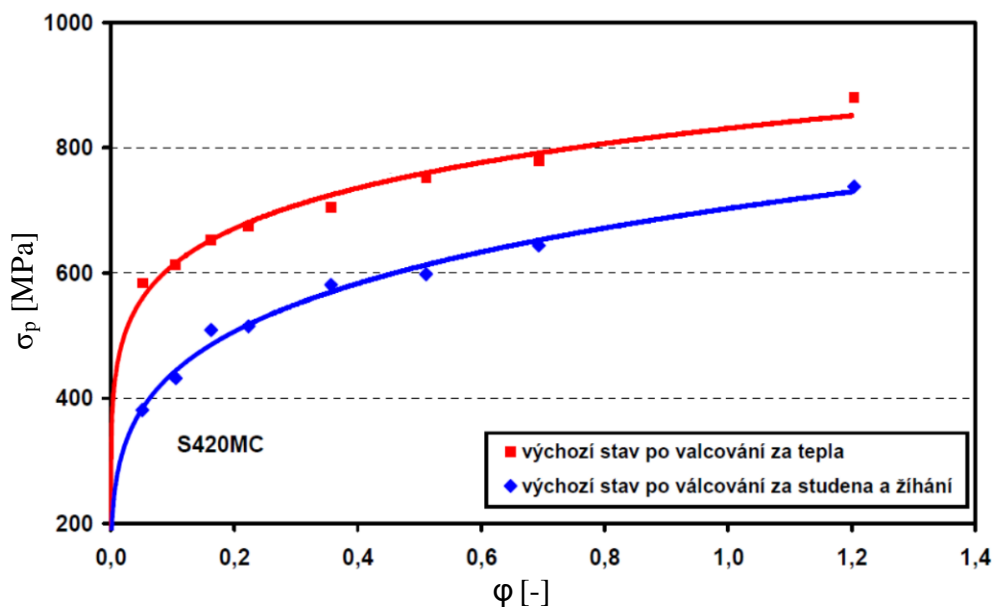
a) vyžíhaný výchozí stav

b) po válcování

Obr. 22 Mikrostruktura leptaných Al vzorků [25].

Anizotropii materiálu lze prezentovat jako rozdílnost vlastností v závislosti na orientaci souřadného systému a lze ji rozdělit na plošnou a normálovou. V případě plošné anizotropie je řeč o nestejnomyšernosti mechanických vlastností v rovině tabule plechu v důsledku metalurgických podmínek jeho výroby. Normálová (plastická) anizotropie udává nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vzhledem k vlastnostem ve směru tloušťky plechu. Vyhodnocení obou vlastností probíhá na základě tahových zkoušek na vzorcích vypreparovaných z plechu pod úhly směrem k válcování  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . [25, 26, 27, 33]

Jak již bylo nastíněno, s narůstající deformací postupně dochází k růstu pevnostních vlastností, jako je mez kluzu  $R_e$  a mez pevnosti  $R_m$ . V kontrastu s pevnostními vlastnostmi však klesají plastické, mezi které patří ku příkladu tažnost  $A$  a kontrakce  $Z$ . Pro lepší představu popsanych závislostí je možné se podívat na obr. 23, který zobrazuje křivky zpevnění pro vybraný materiál zpracovaný jak válcováním za tepla, tak válcováním za studena.



Obr. 23 Křivky zpevnění oceli S420MC [25].

## 2.2 Objemové tváření za studena

Jak napovídá název, tváření za studena probíhá za nezvýšených teplot. V materiálu tedy nedochází k zotavení struktury nebo rekrytalizaci, jelikož teplota  $T \leq 0,3 \cdot T_{TAV}$ . V průběhu tvářecího procesu dochází naopak k hromadnému vzniku a následnému hromadění poruch mřížky. Materiál tedy zpevňuje, díky čemuž se zvyšují jeho mechanické charakteristiky jako mez kluzu a pevnosti. Čím větší je akumulované zpevnění, tím menší je naopak zásoba

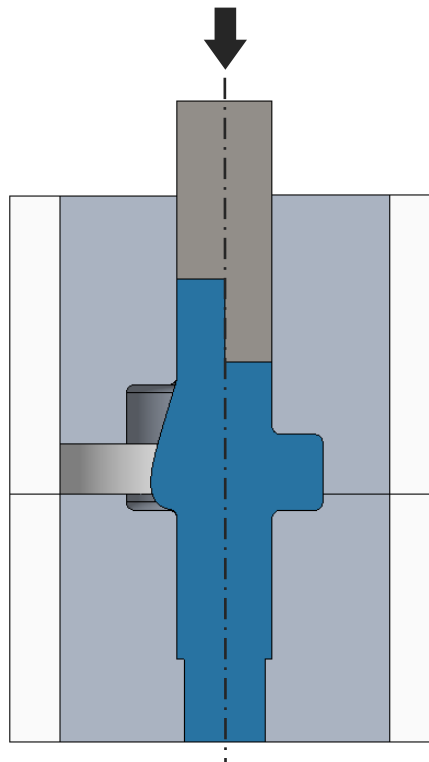
plasticity, tedy schopnost materiálu měnit tvar bez porušení. Plasticitu lze eventuelně zvýšit pomocí mezioperačního rekrystalizačního žíhání, během kterého dochází k růstu zrn nových. Charakteristikou tvářecího procesu je dosažená anizotropie materiálu. Ta je dána deformační strukturou, která je výsledkem toku materiálu způsobeného zatížením nástrojem převyšujícím mez kluzu. Deformační strukturu dosaženou tvářením za studena je možné vidět na obr. 24. Mezi základní tvářecí operace objemového tvářením za studena patří pěchování a protlačování. [25, 65, 66]



Obr. 24 Deformovaná struktura kovu – vlákna [66].

### 2.2.1 Pěchování

Základní tvářecí úlohou je právě pěchování. Charakteristikou této operace je, že během ní dochází ke zvětšování příčného průřezu na úkor výšky pěchovaného tělesa. Pěchování je teorií tvářením charakterizováno obecným napěťovým stavem, který je zapříčiněn třením na styčných plochách dílce a nástroje. To má za následek tvorbu typického soudečkovitého tvaru. Schéma pěchovací operace v uzavřeném nástroji je znázorněno na obr. 25. Horní pohyblivá část nástroje bývá označována jako pěchovník. Spodní nepohyblivá část nástroje je označována jako pěchovnice. [25, 67, 68]



Obr. 25. Schéma pěchování v uzavřeném nástroji [71].

Základní pēchovací úlohou je stlačování polotovaru mezi rovnoběžnými rovinami a je klasifikována jako pēchování v otevřeném nástroji. Výsledný tvar polotovaru v takovém případě není určován pouze nástrojem samotným, jelikož ke kontaktu s nástrojem dochází pouze na horním a spodním čele. Naopak při pēchování v nástroji uzavřeném je výsledný tvar dílce určen geometrií nástroje právě jako v případě obr. 25.

Poměr výšky polotovaru ku jeho průměru musí být menší nebo roven 2,3. Pokud by uvedená podmínka nebyla splněna, mohlo by dojít ke vzpěru polotovaru, tedy k jeho nežádoucímu vybočení. Na obr. 26 jsou příklady dílů zhotovených prostřednictvím pēchovacích operací. [25, 67, 68]



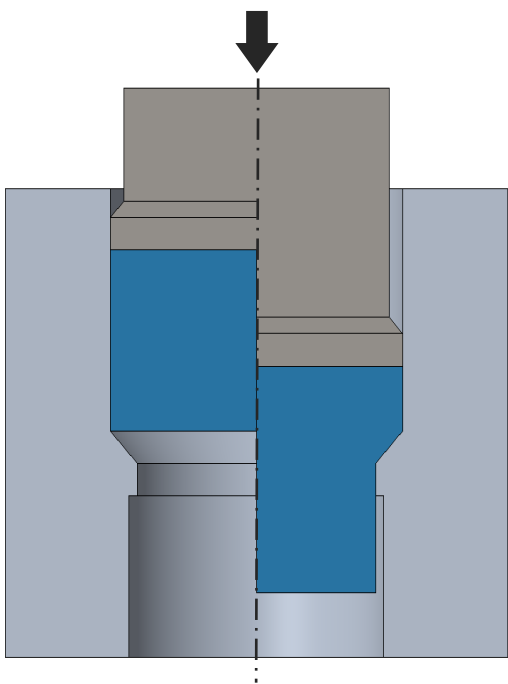
Obr. 26 Díly s pēchovanou hlavou. [72].

### 2.2.2 Protlačování

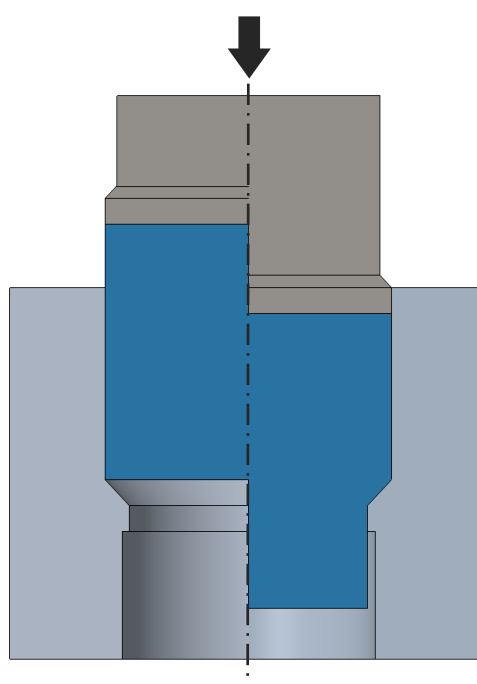
Další základní tvářecí operací je protlačování. Podobně jako v případě pēchování dochází vlivem působení nástroje k výrazným trvalým změnám tvaru tvářeného polotovaru. Nástroj je opět dělený. Na polotovar silově působí pohyblivá část nástroje, průtlačník, který vtlačuje materiál do průtlačnice, kde dochází k jeho deformaci při protlačování zúženou částí nástroje. Na základě geometrie nástroje, polotovaru a výsledného dílce je rozlišováno několik protlačovacích operací. Pokud směr materiálového toku odpovídá směru pohybu průtlačníku, jedná se o protlačování dopředné. To lze dále rozdělit na protlačování v uzavřeném a otevřeném nástroji, dopředné protlačování dutého dílce a hydrostatické protlačování. [25, 65, 67, 68]

Při protlačování dopředném je polotovar tlačěn průtlačníkem do komory, jejíž první válcová část je nazývána zásobník. Následně polotovar prochází zúžujícím se kuzelem, tzv. redukčním okem, na které navazuje oko kalibrační, které se již více nezužuje, ale má za úkol zkalibrovat vnější rozměr tvářeného dílce. Poslední část průtlačnice může být opět rozšířená a protlaček tedy z průtlačnice vypadává spodem nebo může být zhotovena bez rozšíření, kdy ve spodní části zajišťuje vyhození protlačku z komory vyhazovač. Schéma dopředné protlačovací operace v uzavřeném nástroji je na obr. 27, varianta s otevřeným nástrojem na obr. 28 a případ s dutým dílem na obr. 29. Příklady výrobků viz obr. 31. [25, 67, 68]

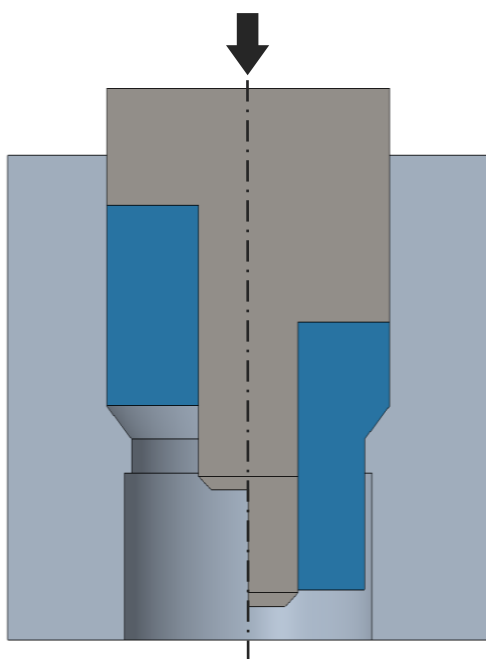
Specifickou variantou dopředného protlačování je protlačování hydrostatické, viz obr 30. To se od předchozích případů liší právě použitím kapaliny, která se nachází mezi nástrojem a samotným polotovarem. Průtlačník je nahrazen pístem, který tlačí na kapalinu a je tak vyvíjen rovnoměrný tlak na celý povrch dílce, který je v kontaktu s kapalinou, která zároveň plní také funkci maziva. Díky vyvolanému všestrannému napětí v materiálu dochází k navýšení jeho tvárnosti. Hydrostatické protlačování tedy umožňuje dosažení vyšších hodnot přetvoření a hodí se pro tváření křehkých kovů. Na druhou stranu tato metoda vyžaduje důkladné zatěsnění a současně nedosahuje produktivity konvenčního řešení. [69, 70]



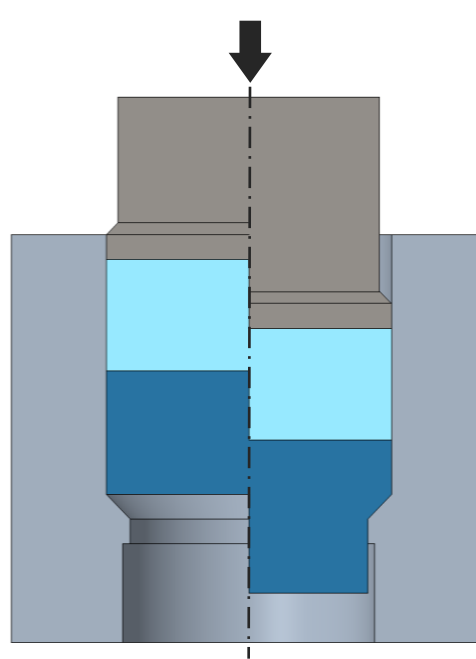
Obr. 27 Protlačování dopředné uzavřené [71].



Obr. 28 Protlačování dopředné otevřené [71].



Obr. 29 Protlačování dopředné duté [71].

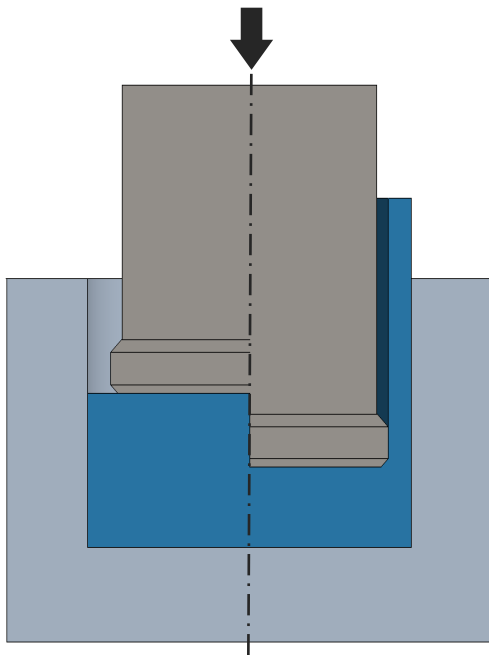


Obr. 30 Protlačování dopředné hydrostatické [71].



Obr. 31 Příklady dopředných protlačků [84].

Dalším typem je protlačování zpětné. Během něho dochází narozdíl od protlačování dopředného, k toku materiálu v opačném smyslu, než ve kterém působí silou průtlačník. Jak je možné vidět na obr. 32, průtlačník tlačí na polotovar označovaný jako kalota, který následně v důsledku vysokého zatížení teče do mezikruží tvořeného čelem průtlačníku a průtlačnicí. Při konfiguraci zpětného protlačování je nutné brát v potaz, že dochází k velkým deformačním odporům, které limitují dosažitelnou výšku protlačku, která by neměla být více než třikrát větší v porovnání s čelem průtlačníku, respektive vnitřním průměrem dna výsledného dílce. Tento typ protlačování se používá zejména na výrobu plechovek, ale i dílců obdobného charakteru, viz obr. 33. [25, 67, 68]

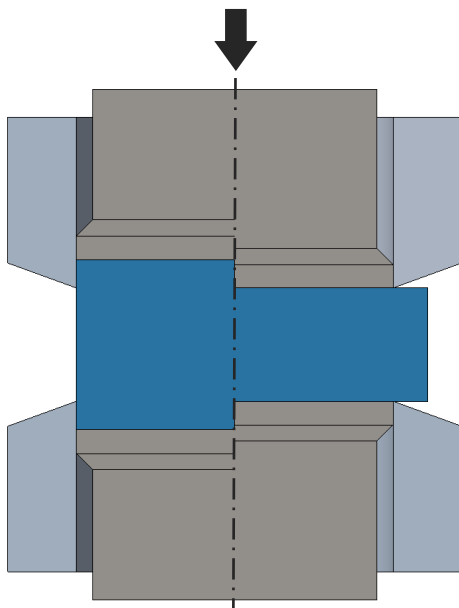


Obr. 32 Protlačování zpětné [71].



Obr. 33 Příklady zpětných protlačků [73].

Často využívané je také protlačování stranové. Jak napovídá název, směr tečení materiálu je v tomto případě radiální vzhledem k ose nástroje, tedy průtlačníku a průtlačnici, které silově působí jak z hora, tak ze spodu, viz obr. 34. Stranové protlačování se uplatňuje zejména při výrobě přírbových součástí. Příklad je zobrazen na obr. 35. [25, 67, 68]

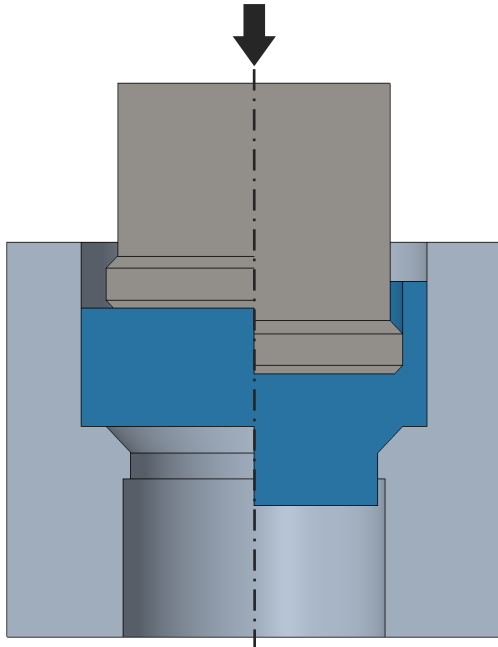


Obr. 34 Protlačování stranové [71].



Obr. 35 Příklady stranových protlačků [74].

Pro výrobu součástí, jejichž charakter odpovídá kombinaci výše zmíněných způsobů se používá typ protlačování, který označujeme jako protlačování sdružené. Je tedy zřejmé, že je pro něj charakteristický tok materiálu do vícero směrů zároveň. Při zatížení dochází k materiálovému toku jak ve smyslu zatěžování, tedy hlouběji do průtláčnice, tak ve smyslu opačném. Sdružené protlačování je tedy kombinací protlačování dopředného a zpětného, viz obr. 36, čemuž odpovídá i tvar protlačených součástí (obr. 37). [25, 67, 68]



Obr. 36 Protlačování sdružené [71].



Obr. 37 Příklady sdružených protlačků [75].

### 2.3 Pěchovací zkouška

Jedná se o kvazistatickou zkoušku probíhající za velmi nízkých rychlostí přetvoření, jelikož je žádoucí se přiblížit právě statickým podmínkám. Pěchovací zkouška bývá prováděna typicky za střední přetvárné rychlosti  $\dot{\varphi} = 10^{-5}$  až  $10^{-1}$ , jejíž přesnou hodnotu lze vypočítat podle vztahu 2.1. Prováděna může být na univerzálních trhacích strojích, které jsou opatřeny přípravky s rovnoběžnými plochami, mezi něž je vzorek umístěn a následně stlačován.

[38, 39, 40]

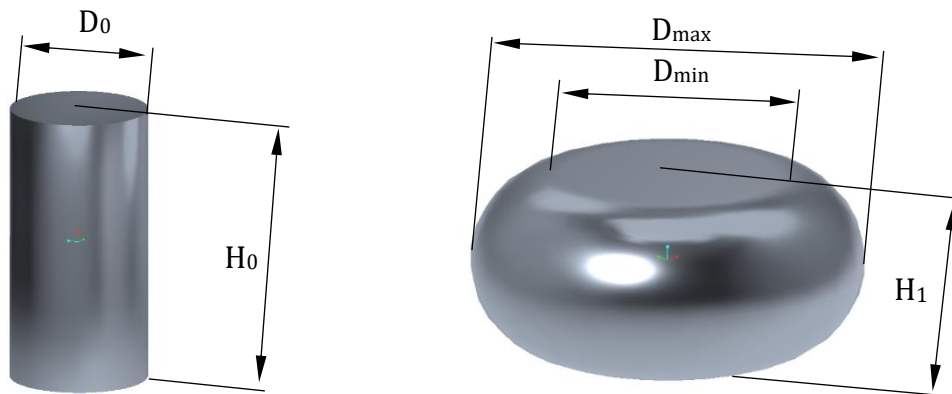
$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \frac{1}{dt} = \frac{v_0}{h} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (2.1)$$

kde:  $v_0$  – okamžitá rychlost pohybu nástroje [ $\text{ms}^{-1}$ ],

$h$  – vztažná výška [m].

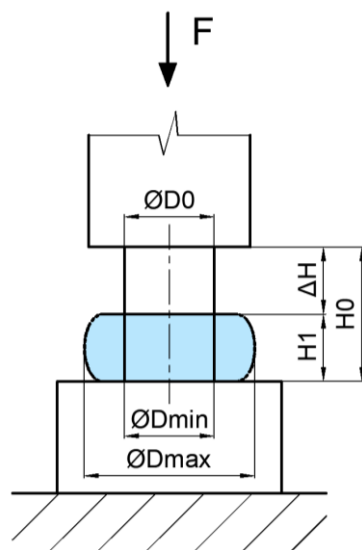
Zkoušku lze provádět se vzorky s pokojovou teplotou i se vzorky ohřátými na kovací teploty s ohledem na reálné podmínky výrobního procesu (tváření za studena X tváření za tepla). Narozdíl od jiných zkoušek, jako je například zkouška tahem, není pěchovací zkouška vázána žádnou normou. I přesto je však nutné dbát jistých zásad. Běžně se za účelem provedení zkoušky používá válcovitý vzorek (možné je testovat i vzorky kvádrovité), viz obr. 38, u něhož by poměr jeho délky ku průměru neměl překročit hodnotu 2,5, jelikož by došlo ke vzpěru a výsledky by nebyly relevantní. Obecně je vhodné se u poměru délky k průměru držet v intervalu 1,5 – 2,0 při jmenovité délce v rozmezí 20 – 30 mm. Pro potřeby zjištění přetvárného odporu, což je vnitřní odpor materiálu působící v opačném smyslu, než zatěžující síly za daných podmínek (chemické složení, výchozí stav zatěžování, teploty a rychlostí deformace), je na čela vzorků nanášeno mazivo, čímž je možné tření mezi styčnými plochami snížit až o přibližně

15 %. Současně musí být povrch vzorků hladký, proto jsou často broušeny nebo dokonce leštěny. [25, 39, 40].

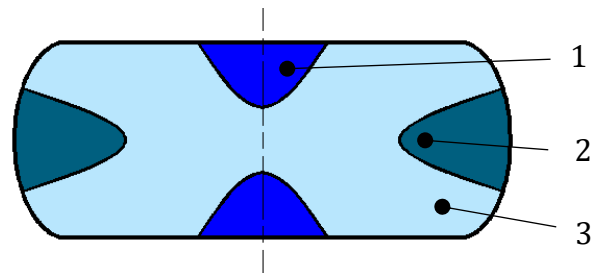


Obr. 38 Vzorek před a po provedení pěchovací zkoušky [39].

Jelikož není možné se tření zcela zbavit, dochází k typickému „soudečkovatění“ zkušebního tělesa. Kdyby však tření přítomno nebylo, byl by napěchovaný vzorek také válcovitý. Výše dosažené deformace není v celém objemu stejná, liší se zejména v oblastech kontaktu s nástrojem (oblast 1, obr. 38), kde je dosažený stupeň deformace nejnižší. Naopak uvnitř (oblast 2, obr. 38) dochází k největší deformaci, jelikož materiál zde není „brzděn“ nástrojem. Specifická je také oblast blízko obvodu (oblast 3, obr. 40), v níž se velikost deformace pohybuje mezi hodnotami odpovídajícím oblastem 1 a 2. Vznik deformace je možný zdůvodnit volným rozšiřováním obvodu. Schéma pěchovací zkoušky je vyobrazeno na obr. 39. [38, 39, 40]



Obr. 39 Pěchovací zkouška [39].



Obr. 40 Deformační zóny pěchovaného válce [39].

K porušení materiálu dochází dvěma typickými způsoby. Pokud je zkoušený materiál tvárného charakteru, dochází k výrazné deformaci ve směru kolmém na smysl zatěžování, zároveň nedochází k porušení soudržnosti, nýbrž jak již bylo nastíněno, válec postupně soudečkovatí, přičemž na povrchu mohou vznikat trhliny. V případě, že je pěchován materiál křehký, dochází k lomu pod úhlem  $45^\circ$ , tedy v rovině maximálních smykových napětí. Zároveň není výrazný úběr původní výšky, jelikož materiál není schopen se plasticky deformovat. [38, 39, 40]

Výstupem zkoušky je především závislost síly na dráze (a čase). Z geometrie vzorku pak lze dopočítat potřebná data, především tedy přetvárný odpor. Nejdříve je však nutné znát objem vzorku, ten lze v případě válce spočítat na základě vztahu 2.2. Současně je nutné znát hodnotu středního ideálního průměru pro každý vyšetřovaný okamžik. Tu lze zjistit ze vztahu 2.3.

Následně je možné přistoupit k výpočtu přirozeného přetvárného odporu, viz vztah 2.4. Paralelně je možné vypočítat také přetvoření dle vztahu 2.5. [38, 39, 40]

$$V = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot H_0, \quad (2.2)$$

kde:  $V$  – objem vzorku [ $\text{mm}^3$ ],  
 $D_0$  – počáteční průměr [ $\text{mm}$ ],  
 $H_0$  – počáteční výška [ $\text{mm}$ ].

$$D_{si} = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi} \cdot \frac{1}{H_i}}, \quad (2.3)$$

kde:  $D_{si}$  – střední průměr v daném [ $\text{mm}$ ],  
 $H_i$  – výška v daném okamžiku [ $\text{mm}$ ].

$$\sigma_{pi} = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot D_{si}^2} \cdot H_0, \quad (2.4)$$

kde:  $\sigma_{pi}$  – přirozený přetvárný odpor v daném čase [ $\text{MPa}$ ],  
 $F_i$  – tvářecí síla v daném čase [ $\text{N}$ ].

$$\varphi_{Hi} = \ln\left(\frac{H_0}{H_i}\right), \quad (2.5)$$

kde:  $\varphi_{Hi}$  – skutečné přetvoření v daném čase [–].

Dále je možné vypočítat hodnotu deformačního odporu. Odpor deformační odpovídá hodnotě odporu přirozeného přetvárného, který je však zvětšen o vliv pasivních účinků, jako je tření, vlivy teplotní, geometrické, napjatostní a změny rychlostí deformace. Výpočet je možný dle rovnice definované Siebelem, viz vztah 2.6, vycházející z integrace diferenciální rovnice definované na základě rovnováhy sil působících na těleso. Úpravou formule 2.7 integrací po čelních plochách, které jsou v kontaktu s nástrojem, lze získat střední osově napětí, respektive požadovaný deformační odpor. [25, 41]

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau}{h_s} = 0, \quad (2.6)$$

kde:  $\sigma_z$  – napětí v ose  $z$  [ $\text{MPa}$ ],  
 $r$  – rozměr objemového elementu v radiálním směru [ $\text{mm}$ ],  
 $\tau$  – Coloumbovo tření [ $\text{MPa}$ ],  
 $h_s$  – výška stlačovaného vzorku [ $\text{mm}$ ].

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \frac{f \cdot D_{\min}}{h_s}\right), \quad (2.7)$$

kde:  $f$  – součinitel tření [–],  
 $D_{\min}$  – průměr na kontaktní ploše [ $\text{mm}$ ].

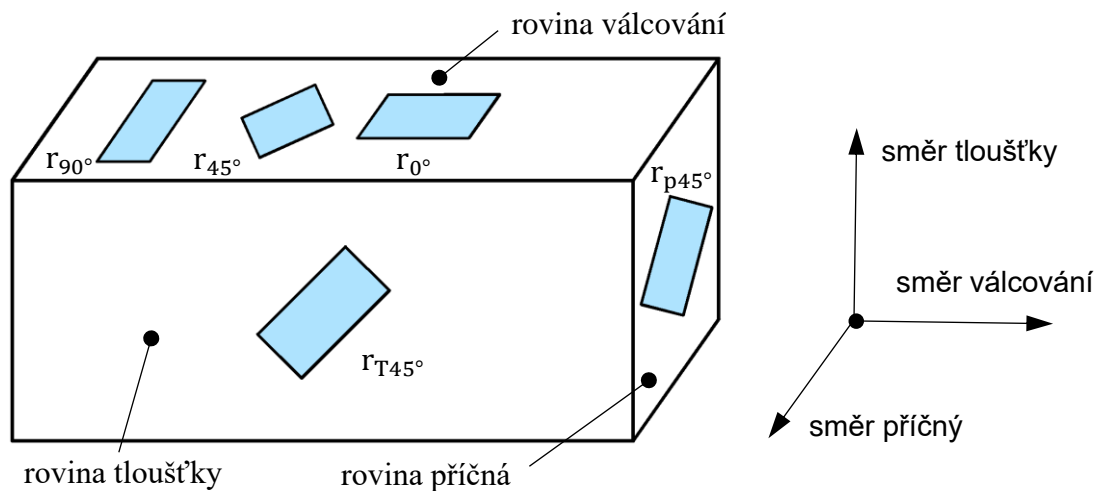
Při tlakové zkoušce je možné vyhodnotit také normálovou anizotropii. K jejímu výpočtu je potřebné vypreparování vzorků s různou orientací vůči rovině válcování plechu, od níž se odvíjí makrostruktura, konkrétně tedy orientace vláken. Vzorky jsou zhotoveny ve tvaru kvádrů pod různými hodnotami úhlu  $\alpha$ , který se směrem válcování svírá úhly  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ , viz obr. 41. Po nastavení zkušebních podmínek, přípravě stroje a vzorků, namazání styčných ploch atp., lze provést tlakovou zkoušku. Z hodnot vypočtených dle vzorců zmíněných výše, lze spočítat součinitel normálové anizotropie dle vzorce 2.8 pro každý vzorek s danou orientací vůči směru válcování. Na základě dílčích výsledků je následně možné zjistit normálovou anizotropii, viz 2.9. [42, 43]

$$r_{\alpha} = \frac{\varphi_{\xi}}{\varphi_{\tau}}, \quad (2.8)$$

kde:  $r_{\alpha}$  – součinitel normálové anizotropie [–],  
 $\varphi_{\xi}$  – skutečné přetvoření ve směru šířky vzorku [–],  
 $\varphi_{\tau}$  – skutečné přetvoření ve směru tloušťky vzorku [–].

$$r_n = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (2.9)$$

kde:  $r_n$  – normálová anizotropie [–],  
 $r_0$  – součinitel anizotropie pro úhel  $0^{\circ}$  [–],  
 $r_{45}$  – součinitel anizotropie pro úhel  $45^{\circ}$  [–],  
 $r_{90}$  – součinitel anizotropie pro úhel  $90^{\circ}$  [–].



Obr. 41 Orientace vzorků vůči směru válcování ve 3D [43].

Při rozšíření úlohy o další osu je možné testu podrobit i další varianty vzorků. Po zjištění jejich součinitele anizotropie lze vypočítat hodnoty anizotropních koeficientů, viz 2.10 až 2.15, které vstupují do Hillovy definice podmínky plasticity 2.16 a které popisují anizotropní charakter materiálu. Schéma znázorňující orientaci vzorků je na obr. 41. Podmínka plasticity Hill 1948 je kvadratickou podmínkou zohledňující anizotropii materiálu, která svým popisem navazuje na podmínku von Misesa. Grafické znázornění podmínek plasticity definovaných různými autory je k nahlédnutí na obr. 42. V případě, kdy se sobě rovnají anizotropní koeficienty  $F'$ ,  $G'$  a  $H'$ , kdy je jejich hodnota rovna  $\frac{1}{2}$  a současně zbytek koeficientů nabývá hodnoty  $\frac{3}{2}$ , pak je podmínka zjednodušena, jelikož materiál není anizotropní. V takovém případě se podmínka vrací do podoby popsané von Misesem, viz vztah 2.17. [42, 43, 44, 45, 46]

$$F' = \frac{r_0}{r_{90} \cdot (1 + r_0)} \quad (2.10)$$

$$G' = \frac{1}{1 + r_0} \quad (2.11)$$

$$H' = \frac{r_0}{1 + r_0} \quad (2.12)$$

$$L' = \frac{1 + 2r_{p45}}{2}, \quad (2.13)$$

kde:  $r_{p45}$  – součinitel příčné anizotropie pro úhel  $45^{\circ}$  [–].

$$M' = \frac{(r_0 + r_0 \cdot r_{90}) \cdot (2r_{T45} + 1)}{2r_{90} \cdot (1 + r_0)}, \quad (2.14)$$

kde:  $r_{T45}$  – součinitel anizotropie v rovině tloušťky plechu pro úhel  $45^\circ$  [–].

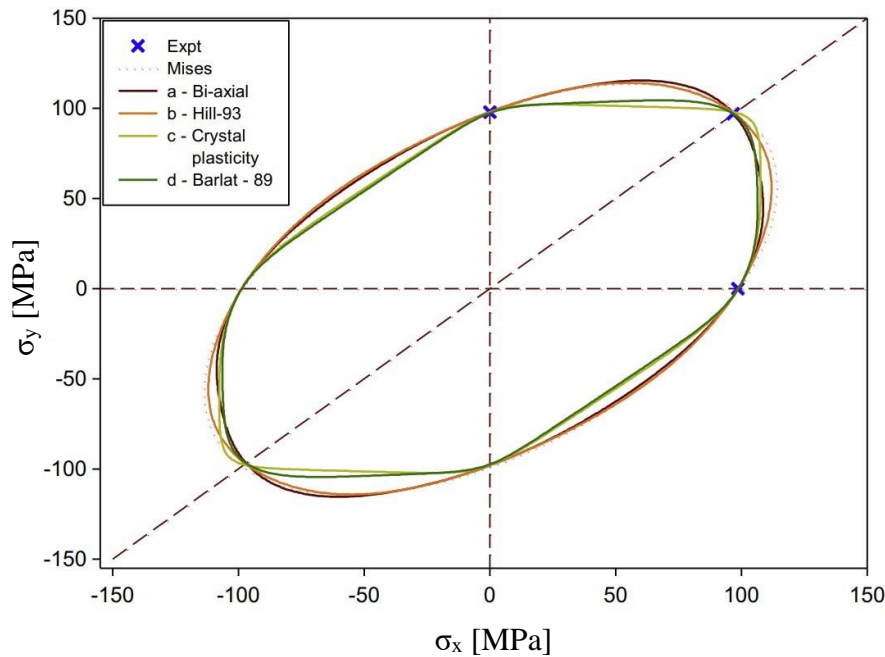
$$N' = \frac{(r_0 + r_{90}) \cdot (r_{45} + 1)}{2r_{90} \cdot (1 + r_0)} \quad (2.15)$$

$$2\sigma_{ef}^2 = F'(\sigma_y - \sigma_x)^2 + G'(\sigma_x - \sigma_z)^2 + H'(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L'\tau_{yz}^2 + 2M'\tau_{zx}^2 + 2N'\tau_{xy}^2 = 1, \quad (2.16)$$

kde:  $\tau_{xy}$  – smykové napětí v rovine xy [MPa],

$\tau_{yz}$  – smykové napětí v rovine yz [MPa],

$\tau_{zx}$  – smykové napětí v rovine zx [MPa].



Obr. 42 Orientace vzorků vůči směru válcování ve 3D [46].

$$\sigma_{ef} = \sigma_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (2.17)$$

Za podmínky  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ,

kde:  $\sigma_{ef}$  – efektivní napětí [MPa],

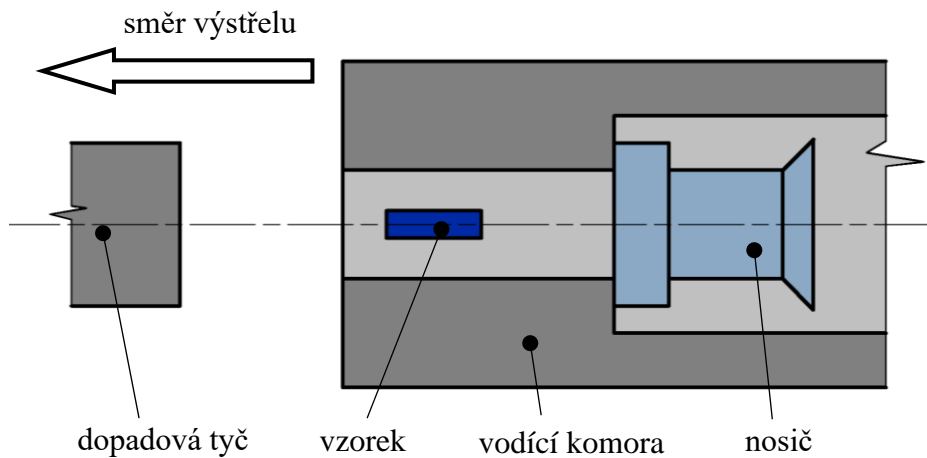
$\sigma_k$  – napětí odpovídající mezi kluzu [Mpa],

$\sigma_{1,2,3}$  – napětí v jednotlivých osách [MPa].

## 2.4 Taylorův test

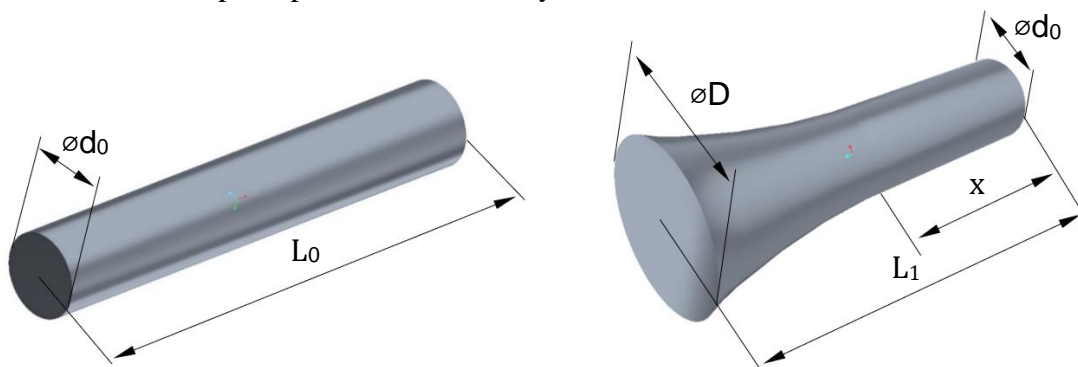
Taylor anvil test (TAT), zjednodušeně Taylorův test, nazvaný po Geoffrey Taylorovi, byl zkonstruován za účelem zjištění chování materiálu v reálných podmínkách průmyslového zpracování. Poprvé byl použit roku 1948 za deformačních rychlostí o velikosti  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . V současnosti se provádí u řady různých materiálů jako kovů, plastů a dřeva. Vzorek nejčastěji ve formě válce o daném průměru a délce, vsazený do nosiče, umístěný ve vodící komoře, je vystřelen směrem k dopadové ploše danou rychlostí o velikosti optimálně  $30 - 240 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Vzorek je uveden do pohybu pomocí stlačeného vzduchu. Během průletu komorou se nosič oddělí od vzorku, díky vnitřním osazením v komoře, o který se nosič zarazí. Vzorek letí dál a nakonec dopadá kolmo na dopadovou plochu. Tu může tvořit tvrzená nebo

vysokopevnostní tyč. Schéma zařízení určeného pro Taylorův test je možné vidět na obr. 43. [47, 48, 49, 50]

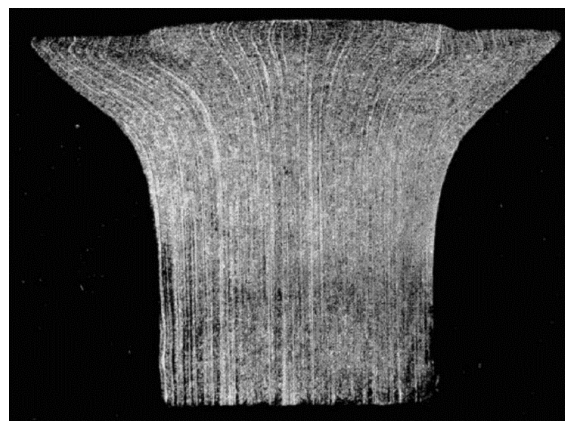


Obr. 43 Schéma Taylorova testu [51].

Při nárazu dochází na čelní dopadové ploše vzorku k tvorbě elastické vlny, která se vzorkem šíří rychlostí zvuku. Následně se šíří k volnému konci, kde se odrazí a šíří se zpět, tentokrát již jako vlna tahová. Pokud dojde k překročení meze kluzu, vzniká také vlna plastická, jejíž rychlost šíření je pomalejší než vlny elastické. Při tomto ději může dojít k několika odrazům elastických vln, přičemž elastické a plastické vlny spolu mohou při srážce interagovat. Výsledkem výstřelu jsou charakteristicky zdeformované vzorky, viz obr. 44. Pozornost je možné věnovat také změnám v mikrostruktuře. Na obr. 45 je vidět zdeformovaná vlákna testovaného vzorku po odpadu směrem od osy válce. [47, 48, 49, 50, 51]



Obr. 44 Vzorek před a po provedení Taylorova testu [51].



Obr. 45 Výbrus testovaného vzorku – deformovaná vlákna [51].

Pokud je testovaný materiál vzorku izotropní a zároveň jsou dodrženy všechny předpoklady (ideální tvar vzorku, kolmost dopadové plochy k rovině čela vzorku, směr pohybu kolmý k dopadové rovině, vyleštěný povrch dopadové plochy pro minimalizaci tření, atp.), pak dochází k symetrické deformaci vzorku. Pokud je zkoušený materiál anizotropní, nebo nejsou dodrženy zmíněné předpoklady, pak dochází k deformaci asymetrické. Jak je tedy patrné, analýza výsledků může doložit rozdílnost vlastností mezi různě zpracovanými vzorky. (tvářenými za tepla nebo za studena). [47, 48, 49, 50]

Jelikož geometrie vzorků není určena normou, není nutné dodržovat specifikované parametry. Optimální geometrie jsou zjišťovány prakticky a to tak, aby bylo snadné následné vyhodnocení. Například vysoký poměr výšky a délky k průměru by mohl vést k asymetrické deformaci nebo vzpěru vzorku. V opačném případě, když by byl poměr příliš malý, by byla potlačena tvorba elastické vlny. Mají-li být výstupy z Taylorovy zkoušky relevantní, je nutné věnovat pozornost předchozímu zpracování vzorků, respektive jejich mikro i makrostruktuře, která by svými vlastnostmi, orientací vůči silovému působení a následné deformaci měla reflektovat praktický případ zpracování polotovaru z daného materiálu. Je tedy nutné brát v úvahu jak samotnou technologii výroby polotovaru, tak tepelné zpracování, nebo jiné teplené ovlivnění, které může mít na mikrostrukturu patrný vliv. Stejně jako u pěstování dochází k vypreparování vzorků z polotovaru. Tím může být například tyčovina nebo plech. Schéma je k nahlédnutí v předchozí podkapitole na obr. 41. Pozornost je vhodné věnovat také povrchu vzorku. Jelikož na příklad soustružení zanechá charakteristickou stopu, nechávají se vzorky následně brousit. [47, 48, 49, 50]

Vyhodnocení testu je založeno především na analýze zdeformovaného vzorku (viz. obr 44), dopadové rychlosti a dopadové síly. Dopadová síla je vypočtena na základě dat naměřených pomocí tenzometrů. Dopadová rychlost může být zjišťována v zásadě dvěma způsoby.

Prvním je odečet na základě přerušení laserových paprsků s určitou vzdáleností průletem projektilu. Druhou možností je výpočet rychlosti z dráhy, kterou vzorek na určitý čas urazí, tedy prostřednictvím optických čidel. V obou případech je výsledek vypočítán pomocí vzorce 2.18. [47, 48, 49, 50]

$$v = \frac{s}{t}, \quad (2.18)$$

kde:  $v$  – rychlost dopadu [ $\text{ms}^{-1}$ ],  
 $s$  – dráha [m],  
 $t$  – doba průletu [s].

První zkoušky zkoumající deformaci materiálu za vysokých přetvárných rychlostí G. I. Taylor představil v letech 1946 a 1948. Zkoušeny byly vzorky tvaru válečku různých materiálů, zvláště pak duralu a vosku. Před samotným testem však Taylor stanovil jisté předpoklady. Prvním byla podmínka uvažující mez kluzu stejnou v celé vzorku, neměnnou během nárazu. Druhou podmínkou bylo, že rychlost elastické vlny šířící se vzorkem je mnohem větší než dopadová rychlost a zároveň rychlost postupu vlny plastické. Tudíž změny řízené elastickou vlnou mohou být v časovém měřítku považovány za nekonečně malé. Na základě zmíněných předpokladů lze materiál považovat za ideálně tuhoplastický. Během nárazu byly pozorovány deformace a také pozice plastické vlny, která se v čase měnila. Taylor během svých výpočtů vycházel z následujících rovnic 2.19 až 2.22: [51, 52]

$$dt_{el} = \frac{2x_{el}}{c_{el}}, \quad (2.19)$$

kde:  $t_{el}$  – rychlost zadní části [ $\text{ms}^{-1}$ ],

$x_{el}$  – délka elastické oblasti [m],  
 $c_{el}$  – rychlost elastické vlny [ $ms^{-1}$ ].

$$dh_{pl} = v_{pl} \frac{2x_{el}}{c_{el}}, \quad (2.20)$$

kde:  $h_{pl}$  – délka plastické oblasti [m],  
 $v_{pl}$  – rychlost plastické oblasti [ $ms^{-1}$ ].

$$dx_{el} = -(u_z + v_{pl}) \frac{2x_{el}}{c_{el}}, \quad (2.21)$$

kde:  $x_{el}$  – délka elastické oblasti [m],  
 $u_z$  – rychlost zadní části [ $ms^{-1}$ ].

$$du = -\frac{2\sigma}{\rho \cdot c_{el}}, \quad (2.22)$$

kde:  $u$  – rychlost zadní části [ $ms^{-1}$ ],  
 $\sigma$  – napětí [MPa],  
 $\rho$  – hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ].

$c_{el}$  lze následně vykrátit z rovnic výše a dostaneme vztahy 2.23 až 2.25: [51]

$$\frac{dh_{pl}}{dt} = v_{pl}, \quad (2.23)$$

$$\frac{dx}{dt} = -(u_z + v_{pl}), \quad (2.24)$$

$$\frac{du_z}{dt} = -\frac{\sigma}{\rho \cdot x_{el}} \quad (2.25)$$

Následně byly stanoveny předpoklady: [51, 52]

- Radiální setrvačnost je zanedbána, problém je jednorozměrný.
- K prodloužení plastické oblasti dochází konstantní rychlostí.
- Deformační zpevnění není uvažováno.
- Přechod mezi plastickou a elastickou oblastí je doprovázen zastavením částice.
- Zpomalení zadní části válce je konstantní. Čas od nárazu po zastavení je tedy dán rovnicemi 2.26 a 2.27 níže: [52]

$$t_{nz} = -\frac{L_1 - x_{el}}{v_{pl}}, \quad (2.26)$$

kde:  $t_{nz}$  – čas od chvíle nárazu po zastavení [s],  
 $L_1$  – deformovaná délka [m].

$$t_{nz} = -\frac{2(L_0 - L_1)}{v_d}, \quad (2.27)$$

kde:  $L_0$  – původní délka [m],  
 $v_d$  – rychlost dopadu [ $ms^{-1}$ ].

Vykrácením  $t$  z předchozích dvou rovnic lze získat: [52]

$$v_{pl} = -\frac{v_d(L_1 - x_{el})}{2(L_0 - x_{el})}$$

Další úpravou a integrací vztahů byl získán vzorec pro výpočet dynamické meze kluzu 2.28: [34, 51, 52]

$$\sigma_f = -\frac{\rho \cdot v_d^2 (L_0 - x_{el})}{2(L_0 - L_1) \ln\left(\frac{L_0}{x_{el}}\right)}, \quad (2.28)$$

kde:  $\sigma_f$  – dynamická mez kluzu [MPa].

Jak je ze vztahu pro výpočet dynamické meze kluzu patrné,  $\sigma_f$  závisí na hustotě materiálu, dopadové rychlosti a také na rozměrech vzorku. Jelikož Taylor ve svém odvození uvažoval pouze jednoosou deformaci, lze považovat prezentované řešení pouze jako aproximaci, která je však nenáročná na samotné provedení testu, jelikož se měří pouze konečné rozměry po nárazu. Současně není potřebné složitějších měřících zařízení a provedení testu je relativně jednoduché. [51,52]

Na práci Taylora postupem času navázali další autoři. Hawkyard, prezentoval vlastní analýzu energetické rovnováhy v plastické vlnoploše. Stěžejní myšlenkou je předpověď konkávní charakteru plasticky deformované oblasti. Výstupem jeho bádání byla následující závislost: [51]

$$\frac{1}{2} \rho \cdot u_z^2 = \sigma_f \left[ \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) - \varepsilon \right], \quad (2.29)$$

kde:  $\varepsilon$  – poměrná deformace [–].

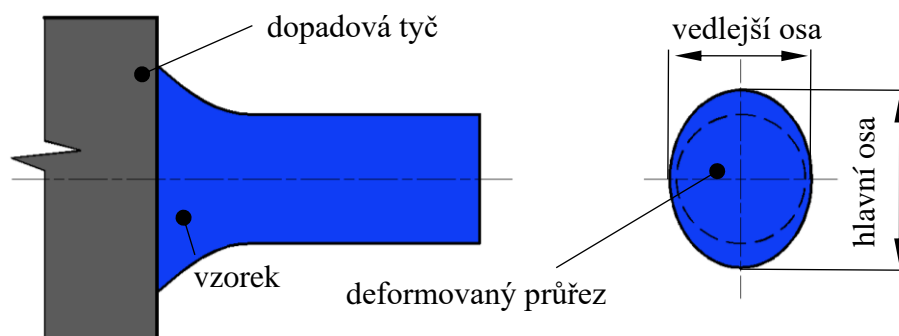
Dalšími mysliteli byli Jones a Gillise, ti vylepšili Taylorovu aproximaci tím, že uvažovali tok materiálu mezi deformovanou a nedeformovanou zónou. Současně vznesli předpoklad, říkající, že při deformaci krátkého vzorku dochází ke konstantnímu podélnému přetvoření. Nakonec představili vlastní vzorec pro výpočet dynamické meze kluzu: [51,52]

$$\sigma_f = (1 - \varepsilon_{L1}) \cdot \left[ \sigma_0 + \frac{(1 - \beta_m)^2}{\varepsilon_{L1}} \cdot \rho \cdot v_d^2 \right], \quad (2.30)$$

kde:  $\varepsilon_{L1}$  – poměrná deformace podél [–],

$\beta_m$  – koeficient závislosti toku materiálu vně a vevnitř plastické oblasti [–].

I v případě Taylorova testu lze vyhodnocovat také anizotropii. Vzorky jsou vyhotoveny z polotovaru pod stejnými hodnotami úhlu  $\alpha$  jako u zkoušky pýchovací, viz obr. 41. Po výstřelu vzorku jsou vyšetřovány jeho rozměry. Typicky je měřena hlavní a vedlejší osa eliptické kontury, respektive čela vzorku po nárazu, viz obr 46. Následně je možné provést výpočty obdobně jako v předchozí kapitole. Opět jsou vypočteny součinitelé anizotropie pro jednotlivé vzorky vyjadřující poměr mezi deformací příčnou a deformací ve směru šířky, viz rovnice 2.10 až 2.15. [43,49,52]



Obr. 46 Deformovaný vzorek po provedení Taylorova testu [49].

## 2.5 Materiálový model

Za účelem zjištění komplexních vlastností materiálů a jejich následného posouzení nejen z hlediska vhodnosti pro tvářecí procesy, je prováděna řada testů a zkoušek. Na základě výstupů lze následně sestavit materiálový model, který je možné použít pro výpočty a simulace, jež jsou nedílnou součástí technologického návrhu výroby. Takový proces sestává z chemických rozborů, metalografických výzkumů, plastometrických experimentů, technologických zkoušek a dalších. S každou procedurou jsou získány detailnější informace o chování materiálu za stanovených podmínek. Za účelem zjištění deformačního chování materiálů podrobujeme materiálové vzorky typickým zkouškám, jako je zkouška tahem, zkouška krutem, zkouška tlakem (pěchovací zkouška), zkouška rázem v ohybu, klínové válcovací zkoušce atd. Výběr nutných zkoušek závisí na vlastnostech, které se projevují u daného tvářecího procesu, pro který je materiál vybírán. Mezi základní však patří pěchovací zkouška a Taylorův test, kterým byly věnovány předchozí kapitoly. Z výstupů pak lze vypracovat materiálový model, který popisuje chování daného materiálu za stanovených podmínek. V současnosti je známa řada konstitutivních vztahů, z nichž materiálový model vychází. Mezi nejznámější konstitutivní vztahy patří: [25, 34, 35, 36]

- Johnson-Cook
- Hense-Spittel
- Zerilli-Armstrong
- Khan-Huang

Konstitutivní vztah dle Johnson-Cooka (J-C) byl původně zkonstruován za účelem popisu vysokorychlostních dynamických jevů. Zohledňuje tedy jak klasické mechanické vlastnosti, tak rychlost deformace, teplotu, či stupeň přetvoření. Používán je pro řadu materiálů a vyniká svou jednoduchostí danou nepříliš vysokou kvantitou materiálových konstant. Výpočet je dán vztahem 2.31. [25, 34, 35, 36]

$$\sigma_p = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot \left(1 - \left[\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right]^m\right), \quad (2.31)$$

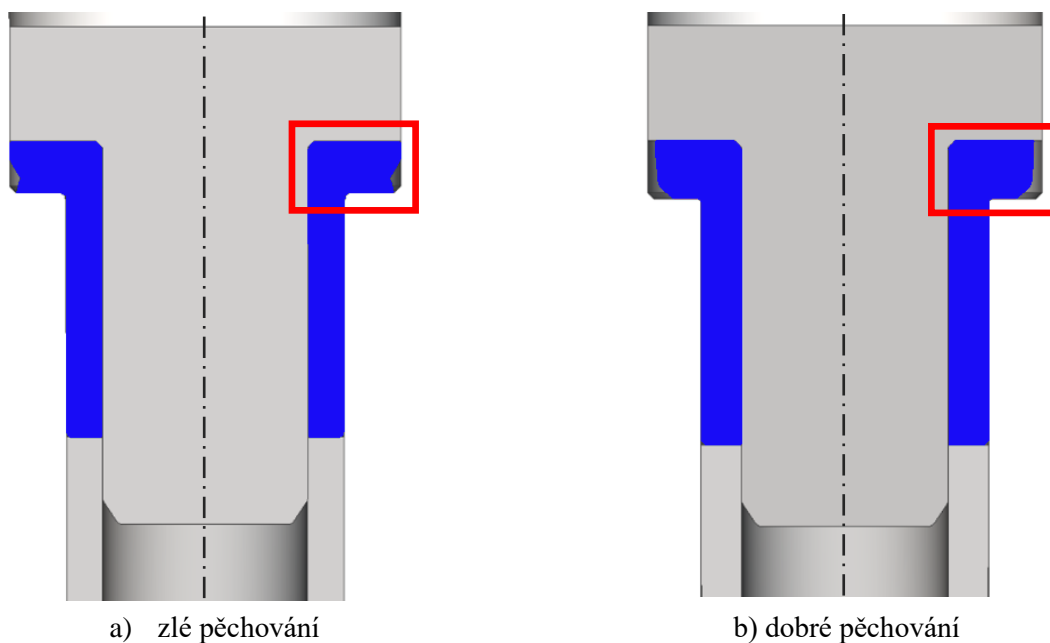
- kde:  $\sigma_p$  – deformační odpor [MPa],  
 $\sigma_0$  – statická mez kluzu [MPa],  
 $B$  – koeficient deformačního zpevnění [–],  
 $\varphi$  – skutečné přetvoření [–],  
 $n$  – exponent zpevnění [–],  
 $C$  – koeficient citlivosti na rychlost deformace [–],  
 $\dot{\varphi}$  – skutečná rychlost deformace [ $s^{-1}$ ],  
 $\dot{\varphi}_0$  – referenční rychlost deformace [ $s^{-1}$ ],  
 $T$  – skutečná teplota materiálu [K],  
 $T_0$  – referenční teplota materiálu [K],  
 $T_m$  – teplota tání materiálu [K],  
 $m$  – exponent změkčení [–].

Některé tvářecí technologie probíhají za podmínek, kdy je možno vztah zjednodušit. Například při tváření za studena nejsou teplotní vlivy na výsledné napětí významné. Zjednodušení je docíleno vynecháním posledního ze tří činitelů (poslední kulaté závorky). Zjednodušení je dáno vztahem 2.32. [37]

$$\sigma_d = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) \quad (2.32)$$

## 2.6 Numerické simulace

V dnešní době jsou již numerické simulace nedílnou součástí návrhu výroby a jeho zhodnocení. S jejich využitím výrobní podniky dosahují vyšší konkurenceschopnosti díky snižování nákladů a navyšování produktivity. V konečném důsledku je tak firma schopna rychleji a levněji vyvinout a následně doručit finální produkt s nižší cenou. Konkrétně se pomocí numerických simulací zkoumají případné defekty reflektující nevhodný návrh, nebo pak dále mohou sloužit i k optimalizaci procesu. Navíc je s jejich pomocí možno zjistit nebo alespoň odhadnout procesní parametry, jako je teplota, tvářecí síla, napětí v dílci, ideální přetvárnou rychlost, zatížení nástrojů, přetvárnou práci, atd. Další výhodou je možnost uchování dat, takže si firma v průběhu času buduje vlastní databázi, se kterou u nových návrhů může pracovat. Příklad optimalizace pěchování dřívku na ukázkovém dílci, viz obr. 47, kdy na obr. 47a dochází v důsledku zlého návrhu geometrie k tvorbě přeložky. Naopak na obr. 47b se již dřívík po geometrické optimalizaci pěchuje rovnoměrně. [53, 54, 55, 56]



Obr. 47 Ukázka pěchování dřívku.

Jelikož většinu úloh nelze řešit analyticky, kvůli jejich komplexnosti nebo je proces výpočtu časově náročný, jsou nejčastěji používány právě metody numerické. Ty fungují na principu diskretizace, tzn. rozdělení řešené úlohy na konečný počet pod úloh. Dochází tedy k řešení po úsecích, kdy výsledkem je po částech spojitá závislost mezi veličinami vstupními a výstupními. V rámci numerických simulací rozlišujeme mnoho metod. Každá z nich má své uplatnění v závislosti na charakter řešeného problému. Mezi nejpoužívanější metody numerických simulací patří: [54, 55, 56]

- Metoda konečných diferencí
- Metoda konečných prvků
- Metoda oddělených prvků
- Metoda SPH
- Metoda konečných objemů

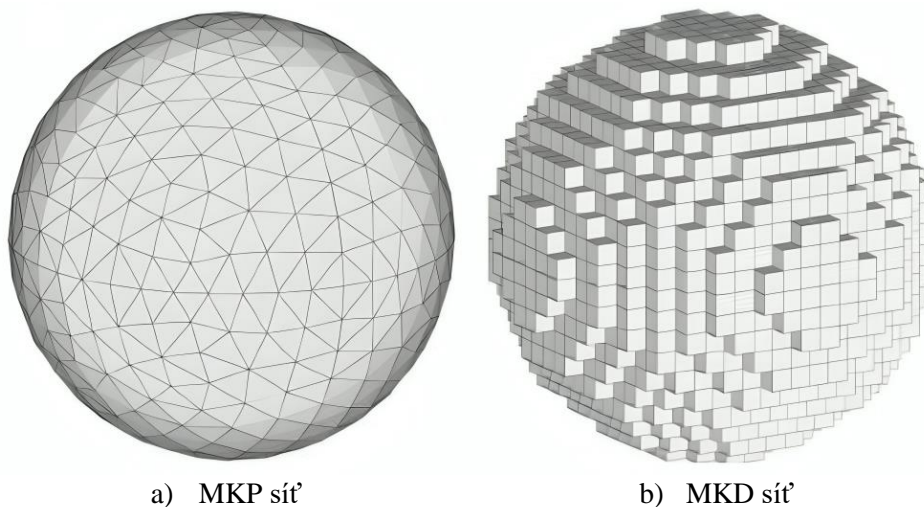
Celý simulační proces lze rozdělit do tří základních bloků, viz obr. 48. Prvním je tvorba numerického modelu, nejčastěji v CAD software, definice materiálového modelu, materiálový model, určení tření, kontaktů, interakcí a dalších vstupních parametrů – preprocessing. Na něj navazuje vlastní výpočet v simulačním programu, tedy processing. Závěrečnou etapou je vlastní vyhodnocení a interpretace výsledků – postprocessing. [55]



Obr. 48 Základní fáze při provádění simulací [55].

Metoda konečných diferencí (MKD) je aproximační metoda řešení parciálních diferenciálních rovnic. Používá se k řešení jednodušších problémů. MKD vytváří pravidelnou síť složenou z konečného počtu uzlů, která se svým charakterem přizpůsobí zadané geometrii. Jelikož je ale síť pravidelná, jen těžko se přizpůsobuje složitějším tvarům, viz obr. 49 b. Výsledky v takovém případě nemusí být dostatečně přesné. Právě body sítě jsou popsány diferenciálními rovnicemi, představující řešení v daném místě. Metodou konečných diferencí je možné řešit lineární i nelineární, časově nezávislé i závislé úlohy. Tuto metodu lze použít pro úlohy s objekty různých tvarů, různými druhy okrajových podmínek a pro mnoho různých materiálů. Aplikace MKD není výpočetně obtížná, protože zahrnuje pouze jednoduché aritmetické operace. [54, 57, 58]

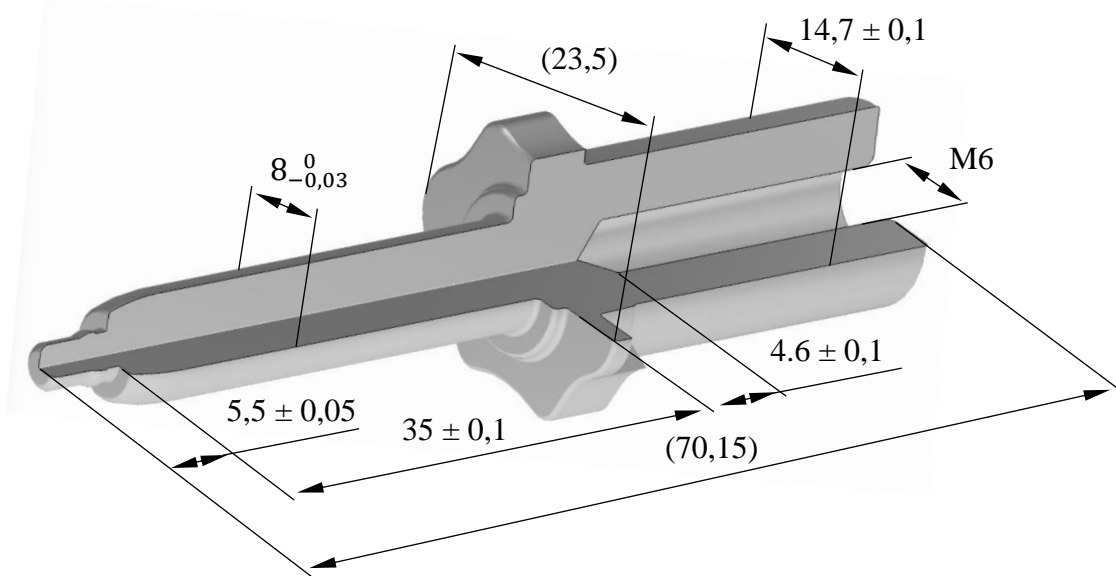
Metoda konečných prvků, zkráceně MKP, vytváří síť propojených elementů o konečném počtu. Prvky se přizpůsobují reálné geometrii dílce, se kterou jsou také pevně svázány. Výpočet probíhá na základě sestavení a řešení soustavy diferenciálních rovnic pro definované elementy. Výsledné řešení má aproximovanou podobu danou variačními principy, tedy konečný výsledek je dán vhodnou kombinací zvolených funkcí a neznámých parametrů. Tato metoda je v praxi dominantní v oblasti inženýrských výpočtů, využívána pro celou řadu úloh, ať už jde o analýzu napjatosti, tepelného toku, deformace, atd. Síť MKP je flexibilní a snadno se přizpůsobí různým geometriím. Výpočet pomocí MKP je však náročnější na vyžadovaný výpočetní výkon v porovnání s MKD. Současně je výpočet citlivý na kvalitu vygenerované sítě. Diskretizace objektu MKP je znázorněna na obr. 49 a. [54, 56, 57]



Obr. 49 Diskretizace pomocí MKD a MKP [59].

### 3 NÁVRH VÝROBY

Předmětem návrhu výroby je vysokonapěťový pin, jehož tvar lze rozdělit na hlavní tři části, z nichž každá má jiný průměr. Největší rozměr střední části pinu činí 23,5 mm, součást je 70,15 mm dlouhá a disponuje také vnitřním závitem. Zmíněné a další základní rozměry jsou znázorněny na obr. 50, výkres je k nahlédnutí v přílohách. Materiál součásti je měď Cu-ETP R240, byť následně pokovená. Povrch je nejdříve poměděn pro lepší přilnavost a následně stříbřen. Výrobní dávka je  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Více podrobností je zmíněno v kapitole 1 Rozbor součásti, výkres součásti je k nahlédnutí v přílohách.



Obr. 50 Geometrie součásti.

Jak bylo nastíněno v kapitole 1.1 Varianty řešení výroby, vyhotovení dílu bude dosaženo pomocí tvářecích operací a následného doobrobení detailu špičky pinu. V následujících podkapitolách je zvolen polotovár, navržen technologický postup, který je ověřen pomocí simulací, vypočteny základní procesní parametry jako je například tvářecí síla, přetvárná práce, přetvárný odpor, deformační odpor, přetvárná práce nebo také potřebný výkon stroje k provedení tvářecích operací. Následně je také zvolen tvářecí automat, na němž bude výroba uskutečněna a na závěr je vypracována výkresová dokumentace.

K matematickým výpočtům, které jsou součástí výroby, je však zapotřebí vstupních parametrů, respektive materiálových charakteristik. Proto jsou v první řadě provedeny a vyhodnoceny materiálové zkoušky. Nejdříve jsou zkoumány parametry odpovídající statickým podmínkám pomocí pěchovací zkoušky a následně je přistoupeno k provedení zkoušky za vysokých rychlostí deformace, Taylorova testu, což koresponduje s reálnými podmínkami v tvářecích automatech. Na základě výstupů je možné dosadit do konstitutivního vztahu J-C a zkonstruovat materiálový model, který je použit v počítačových simulacích.

#### 3.1 Materiálové zkoušky a konstrukce materiálového modelu

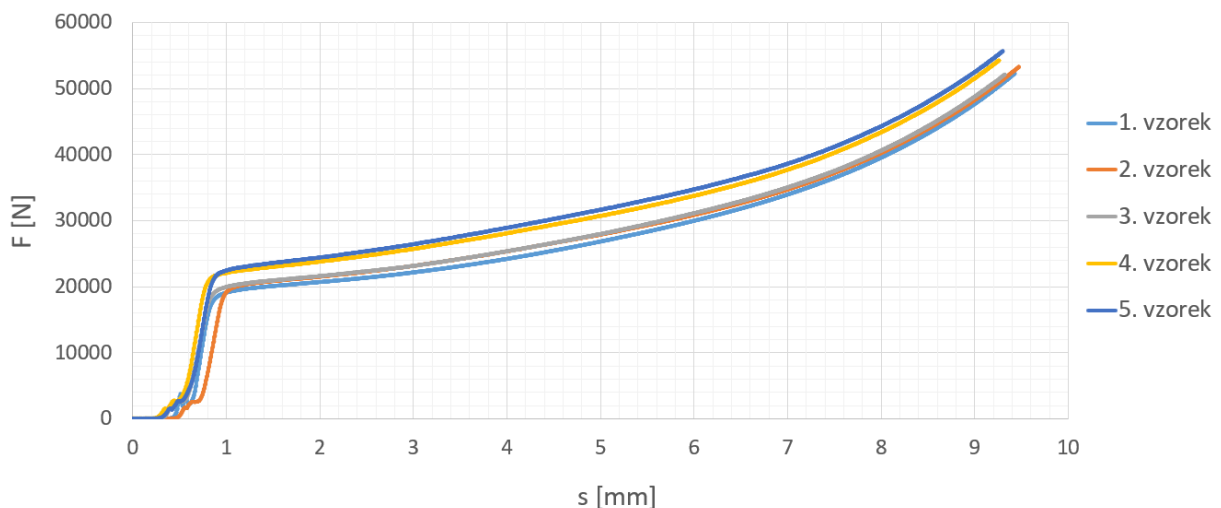
V prvním kroku jsou vyšetřeny vlastnosti materiálu při kvazistatických podmínkách pomocí pěchovací zkoušky. K provedení zkoušky je vyhotoveno pět vzorků o rozměrech  $\varnothing 8 \times 14 \text{ mm}$  pomocí soustružnických operací. Polotovarem je tyč válcovaná za studena,  $\varnothing 10 \text{ mm}$ , normy EN CW004A. Vzorky tedy mají anizotropickou strukturu danou termomechanickými podmínkami zpracování polotovaru válcováním za studena. Rozměry vzorků jsou ověřeny pomocí mikrometru a zaznamenány pro následné výpočty. Zkouška je prováděna na stroji ZD 40, viz příloha č.1, který je součástí vybavení laboratoří na strojní

fakultě Vysokého učení technického v Brně. Stroj ZD 40 je uzpůsoben pro provádění zkoušek pýchovacích, tahových i ohybových. Je schopen vyvinout maximální zatížení o velikosti 400 kN a měřit změnu polohy s přesností  $\pm 1\%$ . Testovací setup je zachycen na obr. 51.



Obr. 51 Pýchování vzorku na zařízení ZD 40.

Pro co možná nejvěrnější přiblížení se statickým podmínkám je stanovena rychlost posuvu na  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vzorky jsou zpýchovávány z původní výšky 14 mm o 9,5 mm. Nejvyšší naměřená síla se pohybuje kolem 56 kN. Z průběhů testů všech vzorků jsou zaznamenány závislosti síly na čase, které jsou k nahlédnutí v příloze č. 2. Shrnutí závislostí je zachyceno na obr. 52. Na grafu je možné si všimnout, že po startu zkoušky je síla nulová až do vzdálenosti cca 0,3 mm, to odpovídá momentu, kdy se nástroj dostane do kontaktu se vzorkem. Následujícího zhruba 0,3 mm je závislost síly na dráze rozkolísaná, jelikož dochází k vymezení vůlí a až od  $s \approx 0,6 \text{ mm}$  dochází ke strmému nárůstu síly.



Obr. 52 Záznam z pýchovací zkoušky.

Předmětem vyhodnocení je stanovení koeficientu zpevnění  $n$ , konstanty zpevnění  $B$ , meze kluzu a meze pevnosti. Nejdříve byly spočteny přetvárné odpory  $\sigma_{pi}$  dle rovnice 2.4, a logaritmické přetvoření  $\varphi_{Hi}$  dle vzorce 2.5. Průběh závislosti přetvárného odporu na logaritmickém přetvoření je zobrazen na obr. 53. Následuje příklad výpočtu přetvárného odporu a logaritmického přetvoření pro první vzorek v posledním měřeném okamžiku, který začíná spočtením plochy průřezu vzorku  $S_0$  a ideálního průřezu pro každou naměřenou hodnotu během průběhu testu  $S_i$ . Z těchto hodnot již lze vypočítat samotný přirozený přetvárný odpor. Logaritmické přetvoření je možné zjistit nezávisle na předchozím výpočtu, a to na základě geometrie vzorku před testem a reálné deformované geometrie během průběhu testu. Z průběhů  $\sigma_{pi}$  spočteného na základě vzorce 2.4 lze také určit mez pevnosti materiálu  $R_m$ , která odpovídá vrcholu, respektive nevyšší naměřené hodnotě  $\sigma_p$ . Na závěr je možné graficky vyjádřit také mez kluzu  $\sigma_0$ , která odpovídá hodnotě průběhu  $\sigma_p$ , kdy během strmého nárůstu hodnot napětí mění charakter křivky z konvexního na konkávní. Hodnotu  $\sigma_0$  je možné zjistit například proložením lineární oblasti přímkou. V místě, kde se přímka začne odchylovat od průběhu  $\sigma_p$  se nachází mez kluzu. Znázornění postupu je k nahlédnutí na obr. 54. Nejprve je oříznuta přibližena oblast lineární závislosti, následně jsou naměřené hodnoty proloženy trendovou linií, to z toho důvodu, že rozlišení naměřených dat není vysoké. V následujícím kroku jsou zvoleny 2 body, jimiž je proložena přímka. Ta se odchyluje od závislosti právě v místě odpovídající napětí cca 275 MPa.

$$S_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 50,27 \text{ mm}^2 \quad (3.1)$$

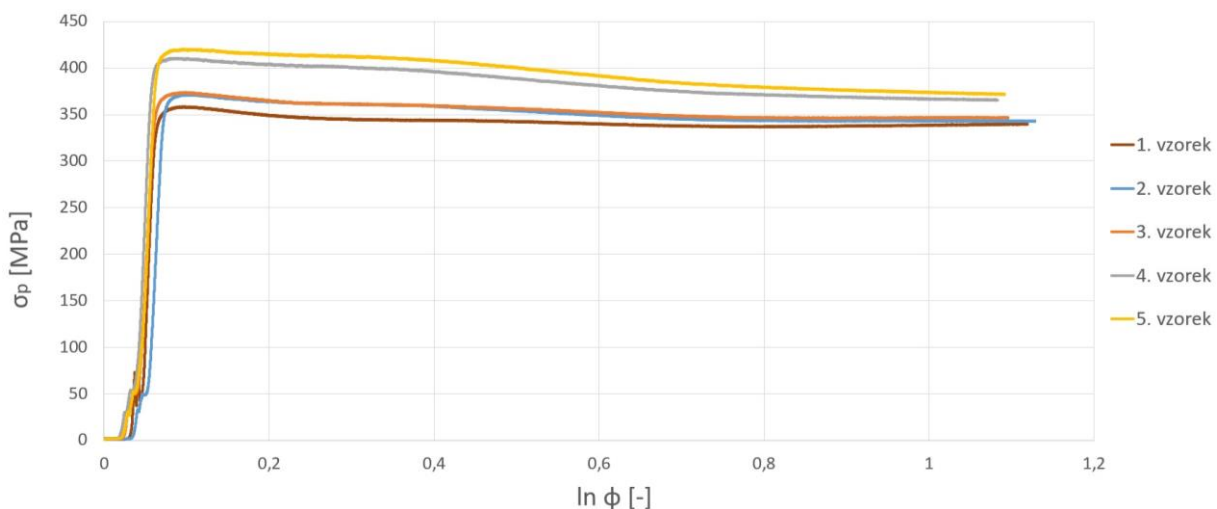
$$S_i = \frac{S_0 \cdot H_0}{H_i} = \frac{50,27 \cdot 14}{4,57} = 154 \text{ mm}^2 \quad (3.2)$$

$$\sigma_{pi} = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot D_{si}^2} \cdot H_0 = \frac{F_i}{S_i} = \frac{52\,299}{153,99} = 339,63 \text{ MPa}$$

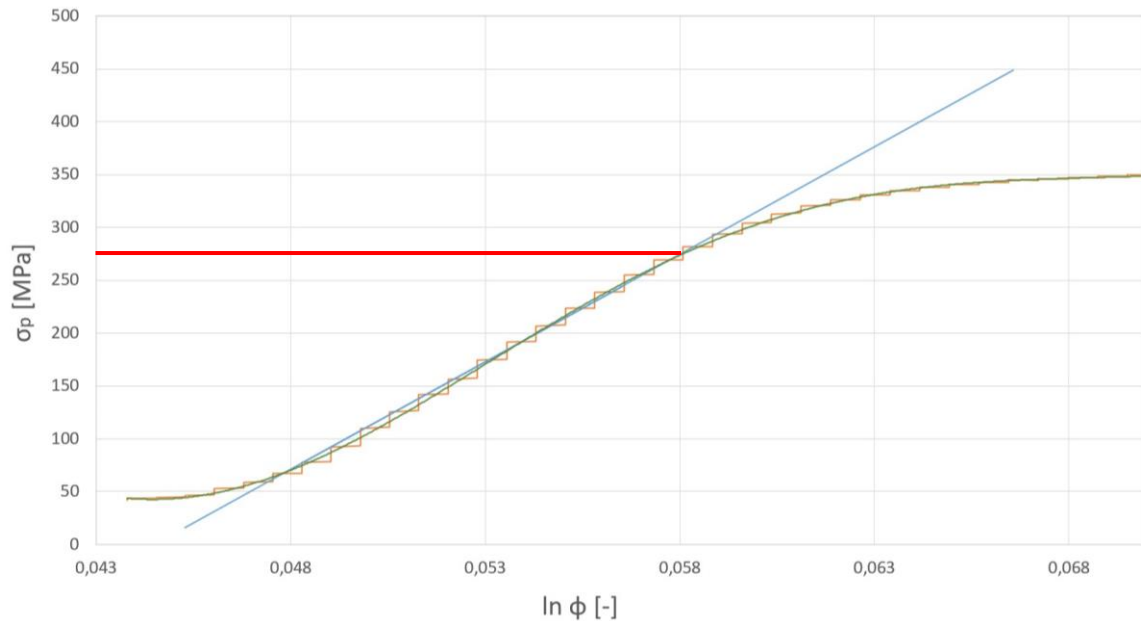
$$\varphi_{Hi} = \ln\left(\frac{H_0}{H_i}\right) = \ln\left(\frac{14}{4,57}\right) = 1,12$$

$$R_m = 356,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_0 \approx 275 \text{ MPa}$$



Obr. 53 Přepočet na průběhy přirozených přetvárných odporů.



Obr. 54 Zjištění meze kluzu u vzorku č. 1.

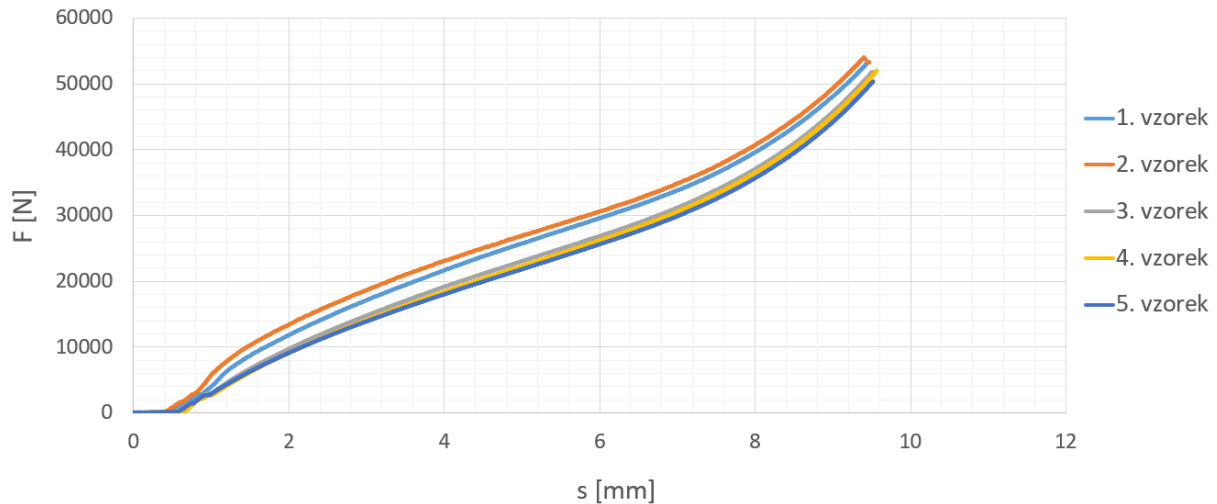
Jak je patrné ze závislostí přetvárných odporů na logaritmickém přetvoření, u všech vzorků dojde k dosažení meze pevnosti již při hodnotách  $\ln \phi \sim 0,1$ . Tato skutečnost značí, že zásoba plasticity vybraného polotovaru je již skoro vyčerpána, což pramení z předchozího zpracování, kterým je válcování za studena. Polotovar v daném stavu není pro výrobu zadané součásti vhodný, jelikož nedisponuje dostatečnou schopností se plasticky tvářet bez porušení.

Pro obnovení plastických vlastností materiálu je zhotovena další sada stejných vzorků, která je podrobena tepelnému zpracování. Vzorky jsou žíhány v keramické peci CBN 100 S od firmy Kittec (obr. 55), jež je rovněž součástí strojového parku fakulty, při teplotě 650 °C po dobu jedné hodiny.

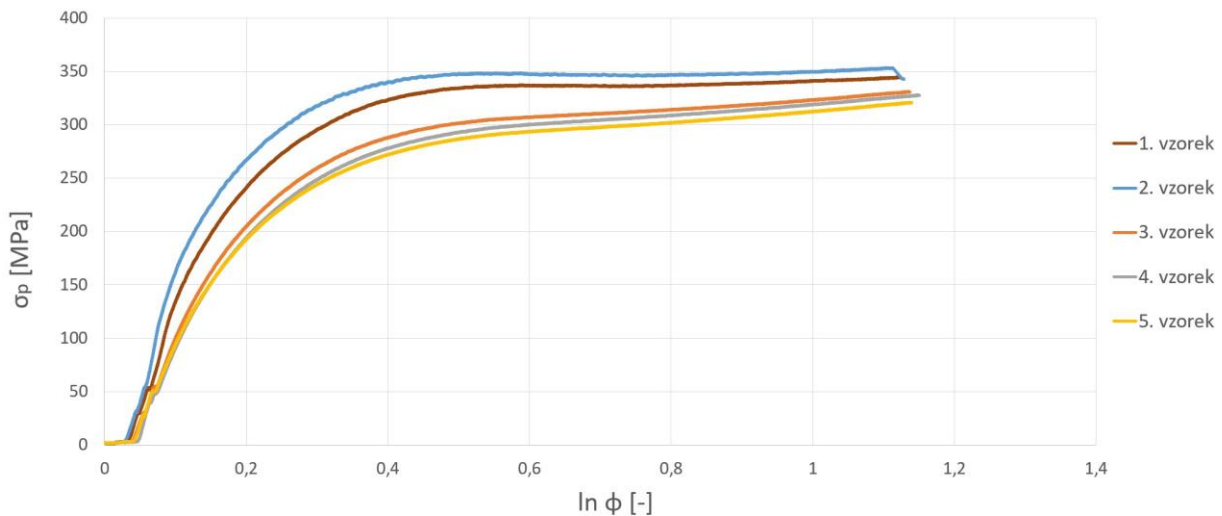


Obr. 55 Keramická pec komorová CBN 100 S.

Následně po zchlazení je opět provedena pēchovací zkouška na strojním zařizení ZD 40 při stejné konfiguraci jako v přechozím kroku. Závislost síly na dráze je k nahlédnutí na obr. 56, jednotlivě pak v příloze č. 3. Jak je patrné, chování materiálu se značně liší od vzorku nežíhaných. Přepočtená data závislosti přirozeného pētvárného na logaritmickém pētvorení, dle postupu popsaneého výše, viz obr. 57. Na grafu je možné vidět, že pomocí pēdřazeného tepelného zpracování je dosaženo kýženeého výsledku. V rozsahu dosaženeé hodnoty logaritmického pētvorení nedochází k dosažení meze pevnosti. Plasticita je tedy obnovena a materiál je možné tvářet minimálně do hodnoty  $\phi = 1,1$  bez porušení.



Obr. 56 Záznam z pēchovací zkoušky žíhaných vzorků.



Obr. 57 Přepočet na průběhy přirozených pētvárných odporů žíhaných vzorků.

Ze zprůměrovaných přepočetů je opět stanovena mez kluzu  $\sigma_0 \approx 125$  MPa. Je ale nutné zohlednit, že přirozený pētvárný odpor odpovídá napětí, které je ve vzorcích až při plastické deformaci. Jelikož k plastické deformaci dochází až po dosažení meze kluzu, je průběh síly na obr. 57 upraven. Na obr. 58 je možné vidět závislost odpovídající zprůměrování hodnot pro vzorky 1 až 5 z obr. 57. Současně závislost začíná napětím na mezi kluzu, ve kterém je také nulová hodnota logaritmického pētvorení. Takto upravená závislost odpovídá teoretickým základům.

Součástí grafu jsou také vybrané body, které budou použity pro výpočet hodnoty exponentu zpevnění a také konstanty zpevnění. Pro zjištění těchto požadovaných výstupů je ještě nutné zlogaritmovat průběh  $\sigma_p$  a vynést jeho závislost na  $\ln \phi$ . Z této závislosti, viz obr. 59, je možné zjistit exponent zpevnění  $n$  i konstantu zpevnění  $B$ . K určení obou hodnot je zapotřebí proložit

funkci přímkou. Předpis této přímky odpovídá rovnici 3.6, což je zlogaritmovaná podoba Hollomonem definovaného vztahu 3.5. Exponent  $n$  je možné odečíst přímo, zatímco koeficient  $B$  je odhalen odlogaritmováním druhého sčítance. [60, 61]

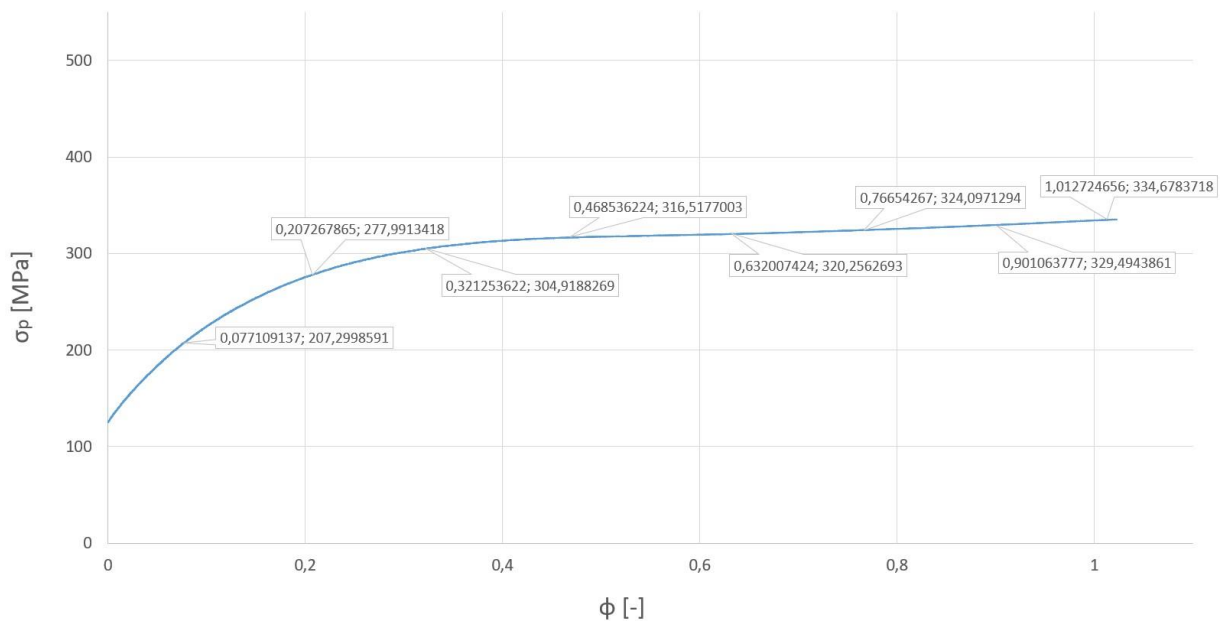
$$\sigma = B \cdot \varphi^n \quad (3.5)$$

$$\ln \sigma_p = B + n \cdot \ln \varphi = 5,4234 + 0,3323 n \quad (3.6)$$

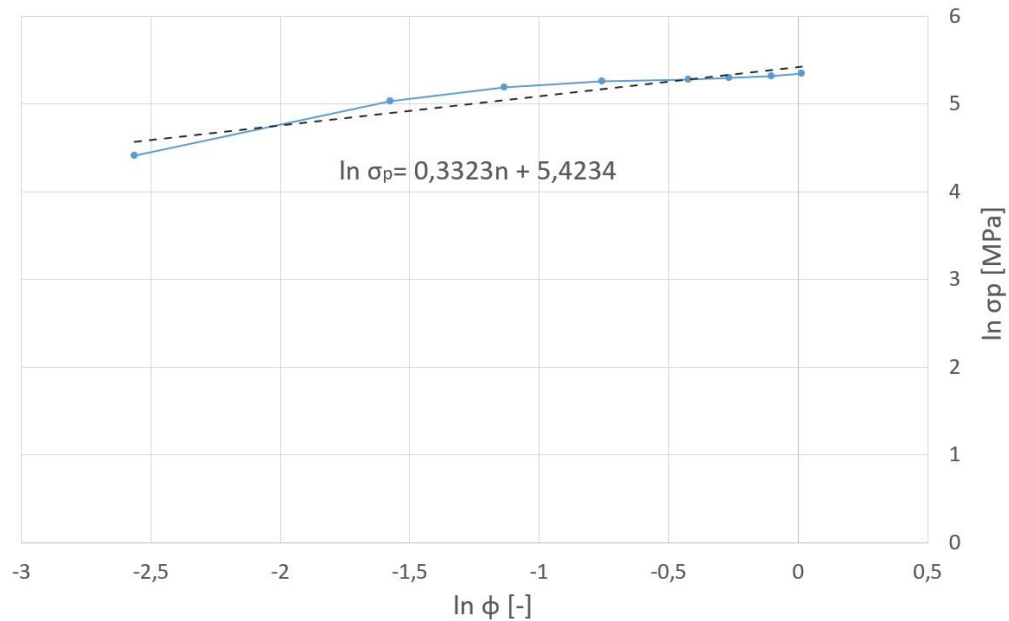
$$n = 0,332$$

$$B = \exp(5,4234) = 226,64 \text{ MPa}$$

$$\sigma_0 \approx 125 \text{ MPa}$$

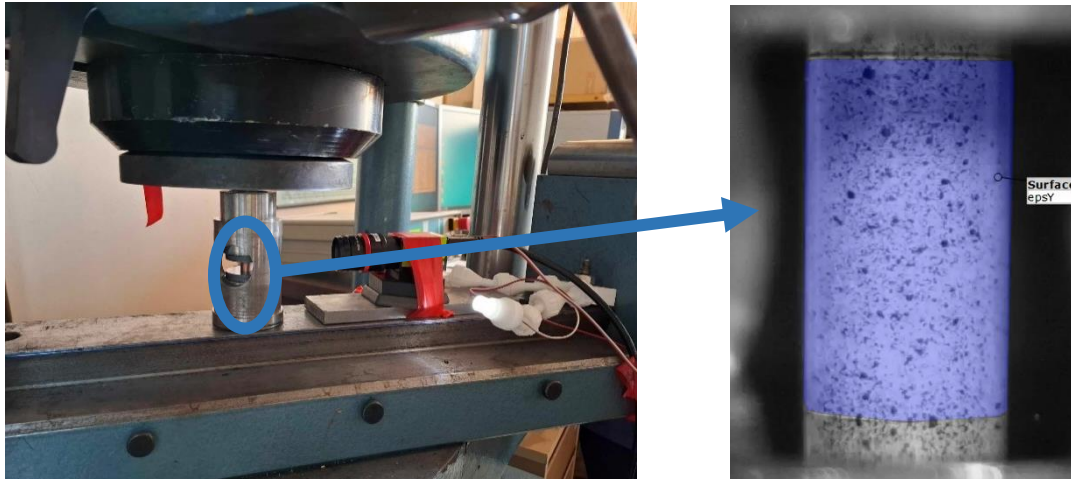


Obr. 58 Zprůměrovaný přirozený přetvárný odpor.



Obr. 59 Závislost zlogaritmovaného  $\sigma_p$  na  $\ln \varphi$ .

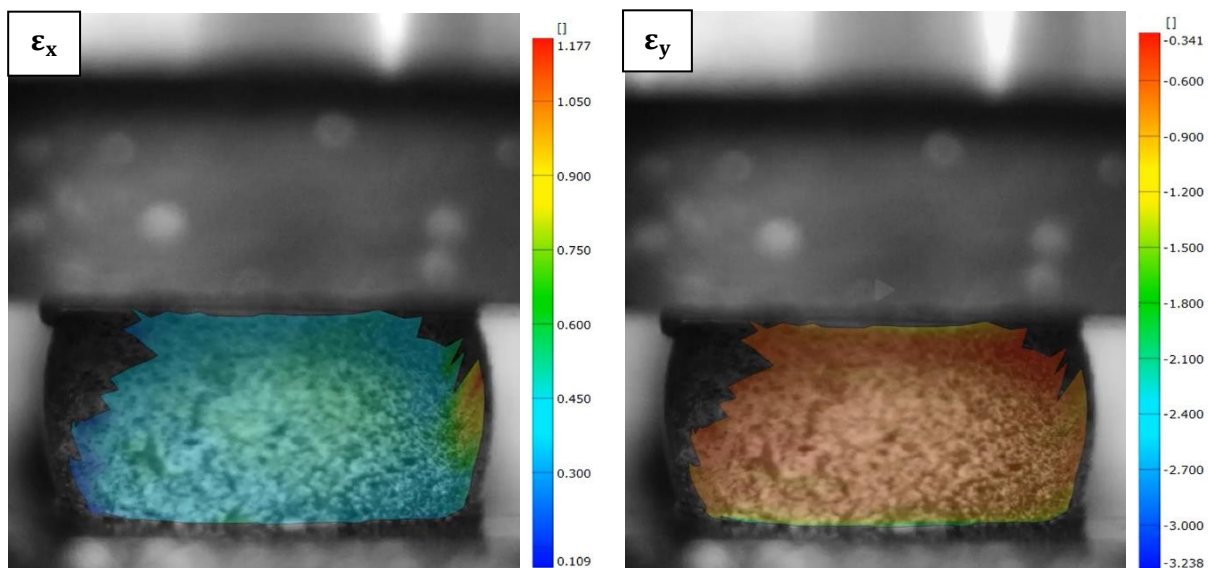
V rámci pēchovací zkoušky je provedena také DIC (digital image correlation) analýza. Vzorky jsou odmaštěny a opatřeny bílým podkladovým nástřikem, na který je nastříkána jemná černá struktura tvořící mapu, pomocí které software dokáže průběh zkoušky správně zaznamenat a následně analyzovat. Zkouška je provedena před zaschnutím nástřiku. To z toho důvodu, aby nástřik rychle nepopraskal, což by znemožnilo analýzu. Použito je stejné zatěžující zařízení ZD 40. Navíc je použita kamera s osvětlením pro pořízení obrazového záznamu, který je následně zpracován v software ARAMIS. Konfigurace testovacího zařízení je na obr. 60.



Obr. 60 Testovací setup při DIC analýze.

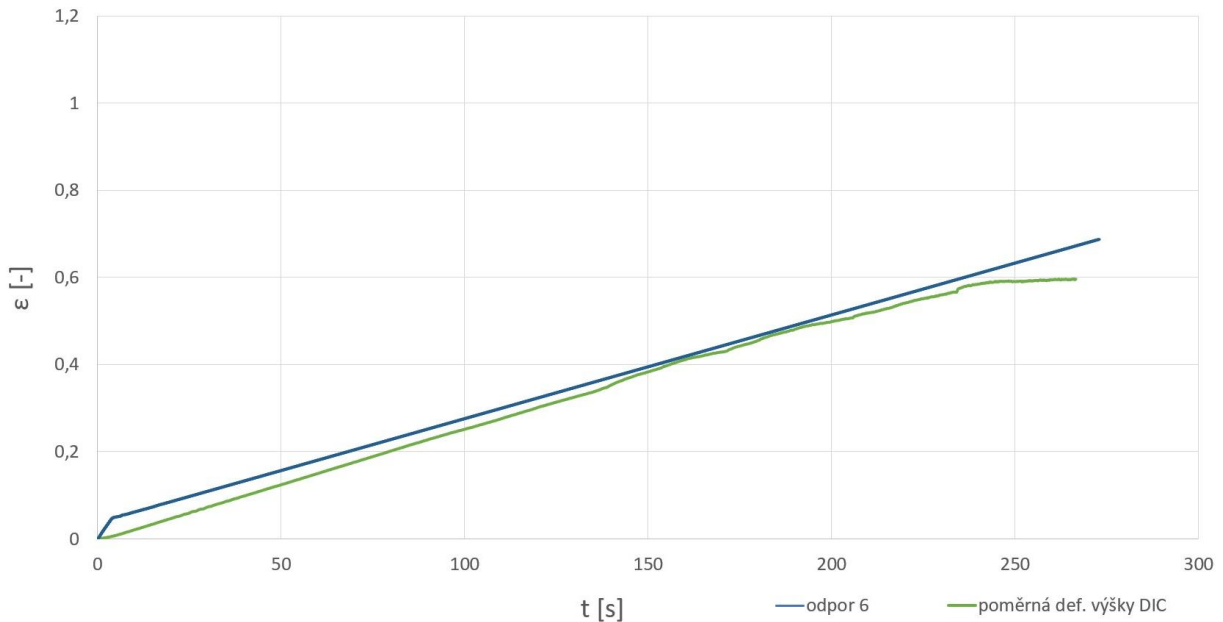
Jak je možné vidět na obrázku, v software je vymezena relevantní oblast (fialová), tedy ta opatřena texturou. ARAMIS si v dané oblasti vytvoří svou síť tzv. fazetek, které jsou navázány na dané body textury v celém průběhu deformační zkoušky. Analýza přetvoření funguje na principu sledování posuvů těchto fazetek, které jsou následně přepočteny na požadovanou veličinu. Data jsou následně dostupná ve formě grafů nebo excelových dat.

Zvolená geometrická konfigurace vzorku není pro potřeby DIC ideální. Jak je možné vidět na obr. 61, v druhé polovině průběhu testu již je deformace příliš velká a současně praská nanesený nástřik, což vede ke ztrátě možnosti analyzovat určité oblasti vzorku. Současně v konečné fázi pēchování dochází k zákrytu horního čela válcového vzorku pēchovníkem, proto není vyšetřována celá výška válce, nýbrž jen cca 9,12 mm z celé výšky. V této oblasti totiž nedochází v průběhu zkoušky ke ztrátě mapy.



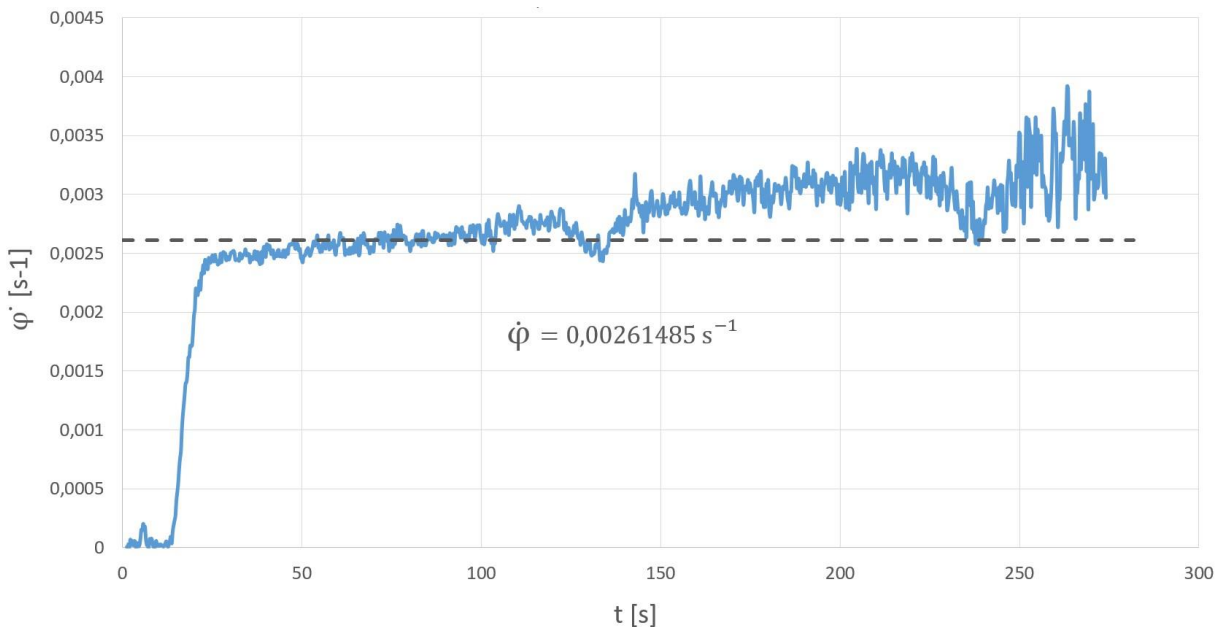
Obr. 61 Mapa přetvoření  $\epsilon_x$  a  $\epsilon_y$  zpēchovaného vzorku.

V rámci postprocessingu je vyšetřen průběh poměrné deformace ve vertikálním směru, který je vyneseno do grafu spolu s vypočtenými závislostmi, které jsou získány na základě záznamu dat ze samotného pýchovacího zařízení, nikoli pomocí kamery. Výsledek je k nahlédnutí níže na obr. 62. Jak je patrné, výsledky se mírně liší, zejména na konci a také na začátku, kdy dochází k vymezení vůlí, je rozdíl největší. Vypočtená data vychází z dráhy čela nástroje, kdežto DIC pracuje s reálnou geometrií vzorku, je tedy logické, že se výsledky budou mírně lišit.



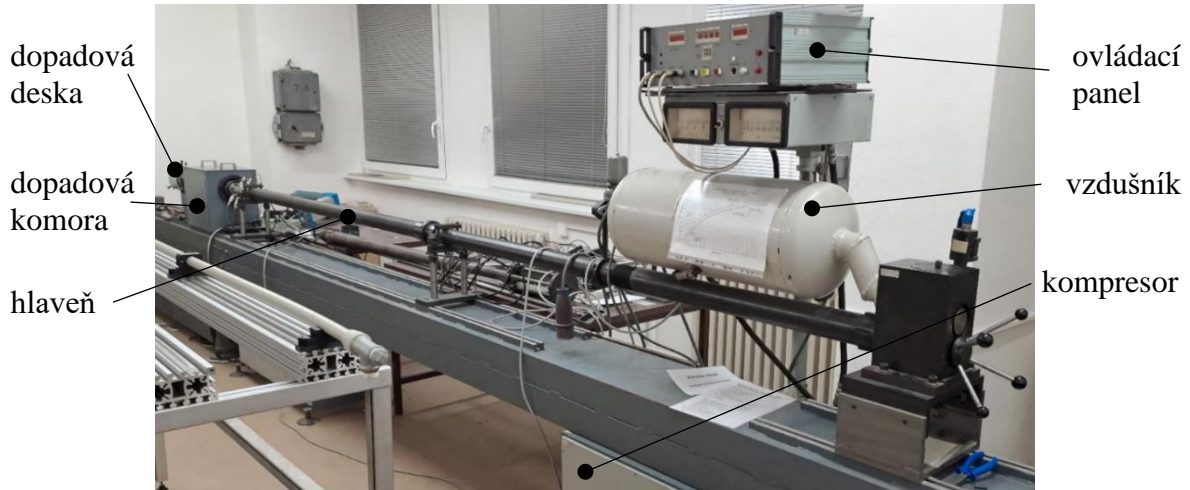
Obr. 62 Průběh poměrné deformace DIC vs výpočet.

Na závěr je také vytvořen průběh závislosti skutečné rychlosti přetvoření na čase. Jak je patrné z obr. 63, průměrná hodnota  $\dot{\phi} = 0,00261485 \text{ s}^{-1}$ . Průběh pýchování v rámci DIC analýzy je podrobněji zachycen k nahlédnutí v příloze č. 4



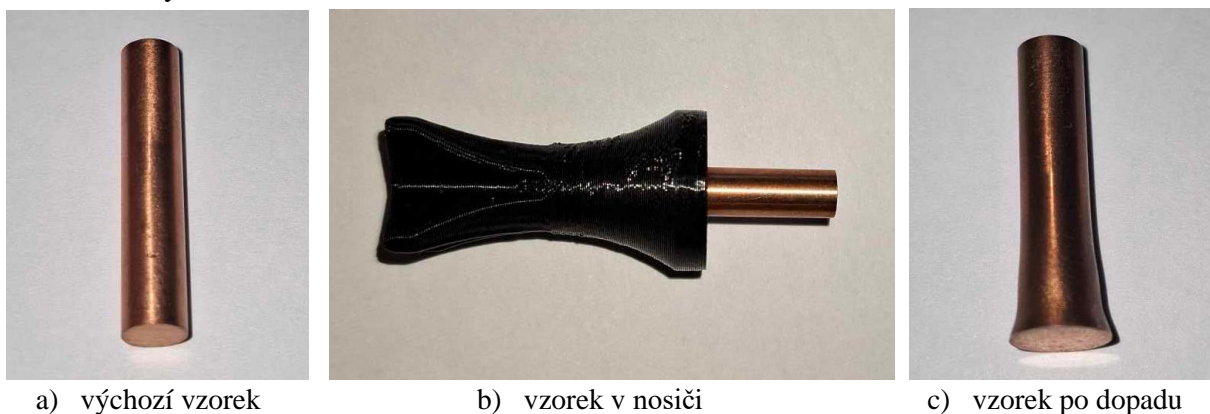
Obr. 63 Průběh skutečné rychlosti přetvoření  $\dot{\phi}$  v čase.

V druhém kroku je přistoupeno k zjištění vlastností odpovídajících tváření za vysoké rychlosti deformace pomocí Taylorova testu. Poslední chybějící konstantou je konkrétně koeficient citlivosti na rychlost deformace  $C$ . Podobně jako u pěchovací zkoušky jsou zhotoveny válcové vzorky pomocí soustružnických operací z tyče válcované za studena  $\varnothing 10$  mm, normy EN CW004A, při celkovém počtu 5 kusů. K testování chování materiálu za vysokých rychlostí deformace je však vyžadována jiná geometrie vzorků, pro účel TAT jsou zhotoveny vzorky  $\varnothing 5 \times 25$  mm. Zkouška je opět prováděna na půdě laboratoří strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně za pomoci přístroje, zkonstruovaného na fakultě samotné, viz obr. 64.



Obr. 64 Zkušební zařízení pro TAT [62].

Nejdříve je vzorek umístěn do nosiče, viz obr. 65. Následně je vložen do komory stroje. Na zařízení je zvolen tlak, který odpovídá konkrétní dopadové rychlosti. Následně se spustí kompresor, který na stanovenou hodnotu vzdušník natlakuje. Po natlakování je vzorek vystřelen spolu s nosičem, přičemž nosič může být v průběhu letu od vzorku oddělen, tudíž vzorek dopadá samostatně. To však není případ použitého zařízení, takže nosič dopadá spolu se vzorkem. Před dopadem je však ještě měřena rychlost pomocí přerušení optických paprsků a doby průletu mezi nimi. Současně je dopad vzorku od doby opuštění hlavně zaznamenáván vysokorychlostní kamerou. Rychlost je tedy možné zjistit i z videozáznamu, který má vysoký počet snímků za sekundu. Dopadová plocha je tvořena pevnou tyčí opatřenou tenzometry, jejichž pomocí je měřeno napětí. Z něho je počítána dopadová síla. Každý z pěti vzorků je vystřelen jinou rychlostí. Pro zjištění koeficientu  $C$  je ze všech výsledků nejdůležitější velikost dopadové rychlosti a také rozměry, respektive geometrie vzorku po dopadu, ty jsou zaznamenány v tab. 3.

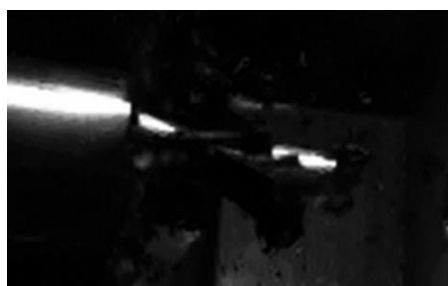


Obr. 65 Testovaný vzorek.

Tab. 3. Výstupy z Taylorova testu.

Vzorek číslo	Dopadová rychlost [m · s <sup>-1</sup> ]	Konečná délka [mm]	Konečný průměr [mm]	Dopadová síla [kN]
1	135,5	18,42	7,0	12,0
2	150,8	17,90	7,2	13,1
3	163,4	17,14	7,6	14,6
4	179,5	16,65	8,2	16,0
5	187,0	15,91	8,4	16,8

Po zjištění dopadové rychlosti a rozměrů je přistoupeno k parametrické simulaci Taylorova testu. V tomto kroku je nakonfigurována simulace v programu Ansys, která věrně kopíruje právě Taylorův test. Pro každý vzorek, který je podroben Taylorovu testu při jiné rychlosti, je provedena analogická simulace. Úlohu je možné zjednodušit do 2D. Současně, jelikož je úloha axisymetrická, je možné úlohu dále zjednodušit. Simulován je ve 2D dopad pouze poloviny vzorku. Porovnání je možné vidět na obr. 66, kdy na 66a je vidět záznam z kamery, na kterém je vzorek milisekundy po dopadu obklopený roztráštěným nosičem a na 66b je výstřižek ze simulací.



a) záznam z kamery



b) simulace v ANSYS, LS DYNA

Obr. 66 Náráz TAT vzorku.

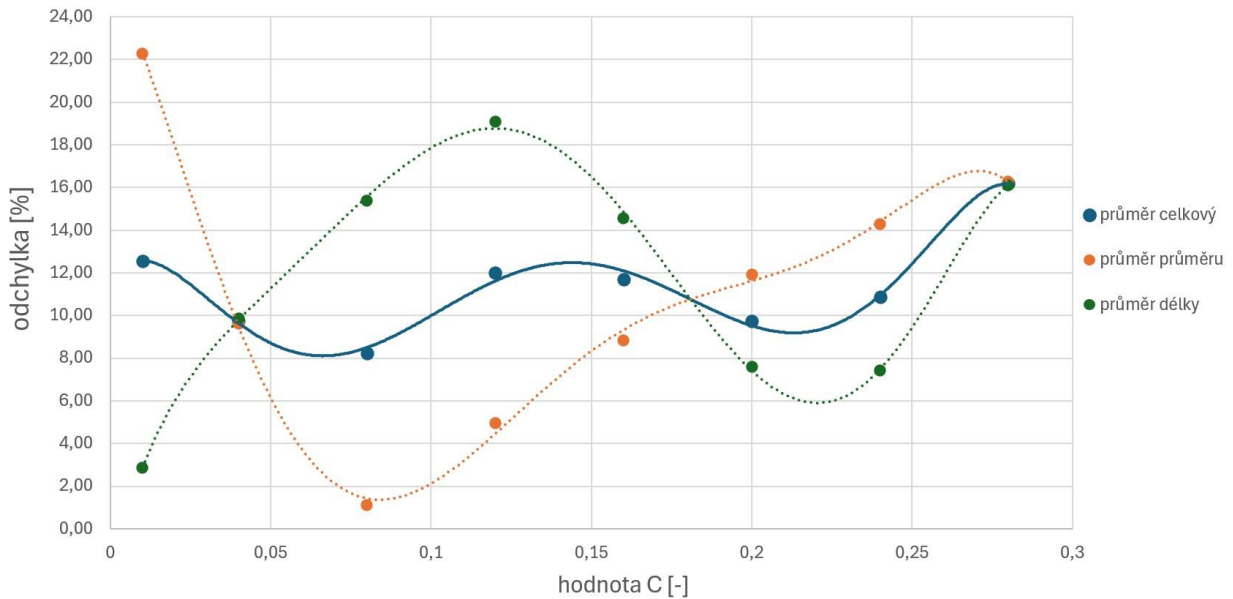
K dosažení relevantních výsledků je mimo jiné nutné zadat správné materiálové parametry. Část z nich je převzata z datasheetu. Mechanické vlastnosti jako mez kluzu, exponent zpevnění, koeficient deformačního zpevnění však pocházejí z výsledků pěchovací zkoušky.

Aby bylo možné simulaci považovat za parametrickou, je nutné vybrat proměnnou, která bude parametrizována. Tou byla volena právě konstanta **C**. Výpočet simulace probíhá pro každý vzorek osmkrát, přičemž osm je právě počet variant proměnné **C**. Výstupem jsou výsledky zdeformované geometrie pro každou tuto zadanou variantu. Cílem je najít výsledek, respektive takovou geometrickou konfiguraci vzorku po dopadu, který by se co nejvíce blížila realitě.

V tab. 4 jsou k nahlédnutí simulované výsledky geometrie pro každou kombinaci dopadových podmínek a konstanty **C**. Tyto výsledky jsou porovnány se skutečnými hodnotami fyzických vzorků. Z vypočtených procentuálních odchylek rozměrů pro každou dopadovou rychlost a konstantu zpevnění jsou spočítány průměrné hodnoty odchylek pro celý **C** sloupec. Z těchto hodnot jsou vykresleny grafy udávající závislost hodnoty konstanty zpevnění na odchylce od reálného maximálního průměru a odchylce od reálné maximální délky. Jak je patrné na obr. 67, tyto závislosti jdou proti sobě. V grafu je možné nalézt dvě lokální minima jejich aritmetického průměru. První odpovídá hodnotě **C** = 0,07 a odchylce ve výši cca 8 %. Druhá hodnotě **C** = 0,22 a odchylce cca 9 %. Pro tvorbu materiálového modelu je voleno **C** = 0,07, jelikož při této hodnotě je dosaženo menší odchylky mezi reálným a simulovaným stavem.

Tab. 4. Výstupy z ze simulací v ANSYS, LS DYNA.

		Parametrizování konstanty C							
Vzorek číslo		0,01		0,04		0,08		0,12	
		délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]
1		19,37	8,18	20,68	7,25	21,02	7,03	20,62	6,70
2		18,41	8,81	19,42	8,03	20,33	7,42	20,98	7,02
3		17,63	9,38	18,74	8,47	19,74	7,76	20,93	7,23
4		16,60	10,15	17,84	9,07	19,00	8,21	19,81	7,68
5		16,12	10,54	17,42	9,36	18,63	8,44	19,46	7,86
Odchylka 1	[%]	5,14	16,90	12,27	3,63	14,14	0,46	11,93	4,28
Odchylka 2	[%]	2,85	22,06	8,49	11,16	13,57	2,70	17,22	2,73
Odchylka 3	[%]	2,86	23,52	9,33	11,62	15,18	2,17	22,11	4,74
Odchylka 4	[%]	2,08	23,81	9,73	10,58	16,88	0,07	21,82	6,34
Odchylka 5	[%]	1,33	25,06	9,51	11,04	17,11	0,17	22,31	6,72
Průměr průměru	[%]	-	22,27	-	9,61	-	1,12	-	4,96
Průměr délky	[%]	2,85	-	9,87	-	15,37	-	19,08	-
<b>Průměr celkový</b>	[%]	<b>12,56</b>		<b>9,74</b>		<b>8,25</b>		<b>12,02</b>	
		Parametrizování konstanty C							
Vzorek číslo		0,16		0,2		0,24		0,28	
		délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]	délka [mm]	průměr [mm]
1		18,87	6,47	17,15	6,29	15,53	6,15	13,93	6,04
2		19,23	6,75	17,52	6,54	15,80	6,38	14,08	6,24
3		19,45	6,99	17,78	6,76	16,07	6,57	14,34	6,42
4		20,02	7,31	17,98	7,04	16,36	6,83	14,53	6,65
5		20,11	7,47	18,24	7,18	16,36	6,95	14,66	6,77
Odchylka 1	[%]	2,45	7,57	6,92	10,21	15,68	12,09	24,39	13,71
Odchylka 2	[%]	7,41	6,56	2,10	9,42	11,75	11,69	21,34	13,54
Odchylka 3	[%]	13,48	7,92	3,73	11,00	6,22	13,46	16,32	15,47
Odchylka 4	[%]	23,11	10,80	10,59	14,13	0,65	16,75	10,61	18,86
Odchylka 5	[%]	26,38	11,34	14,66	14,80	2,84	17,51	7,85	19,71
Průměr průměru	[%]	-	8,84	-	11,91	-	14,30	-	16,26
Průměr délky	[%]	14,57	-	7,60	-	7,43	-	16,10	-
<b>Průměr celkový</b>	[%]	<b>11,70</b>		<b>9,76</b>		<b>10,86</b>		<b>16,18</b>	



Obr. 67 Závislosti zprůměrovaných geometrických parametrů na hodnotě C.

Nalezením hodnoty konstanty zpevnění je možné uzavřít kapitolu materiálových zkoušek a konstrukce materiálového modelu, ačkoli stále chybí poslední činitel, který popisuje chování materiálu za zvýšených teplot. Ten je však možné opomenout, jelikož zadaná součást bude vyráběna tvářením za studena. Pro konfiguraci materiálového modelu, který bude vstupní informací pro simulace tvářecích operací, budou postačovat následující parametry z konstitutivního vztahu J-C, které byly zjištěny v této kapitole a následně zaokrouhleny:

- statická mez kluzu  $\sigma_0 = 125$  MPa,
- koeficient deformačního zpevnění  $B = 227$  MPa,
- exponent zpevnění  $n = 0,33$ ,
- koeficient citlivosti na rychlost deformace  $C = 0,077$ .

Na samotný závěr je provedena SEM analýza leštěného a leptaného výbrusu obou variant měděných vzorků, tedy žíhaných i nežíhaných, které byly podrobeny pēchovací zkoušce i Taylorovu testu. Jak je možné vidět v tab. 5, zrno nežíhaných vzorků je více deformováno v porovnání se vzorky žíhanými. Žíhané vzorky totiž podstoupily zotavovací procesy. Pořízené snímky potvrzují, že výchozí polotovár má již vyčerpanou značnou část své plasticity. Tepelné zpracování tedy obnovilo krystalovou strukturu materiálu a s ní i jeho plasticitu.

Tab. 5 Snímky krystalové struktury.

	Žíhaný vzorek	Nežíhaný vzorek
Pēchovací zkouška		
Taylorův Test		

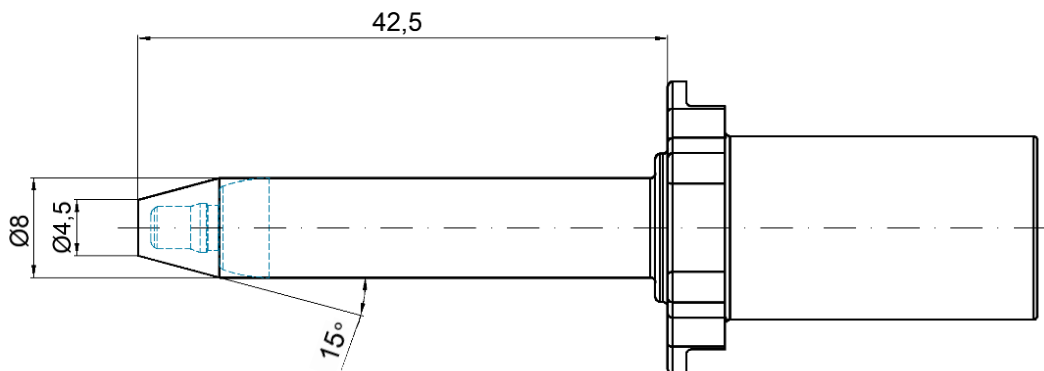
### 3.2 Návrh polotovaru

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, materiálem pro výrobu pinu je zvolena měď Cu-ETP R240. Jelikož bude pin objemově tvářen na postupovém automatu, je potřeba zvolit správný polotovar. Jeho volba je předmětem této kapitoly. Aby mohl být správně zvolen, musí být nejdříve navržen postup tváření v jednotlivých operacích, vypočteno výsledné přetvoření v jednotlivých částech pinu a na základě těchto výsledků bude zvolena nejvhodnější podoba polotovaru. Vychází se z předpokladu, že hodnoty přetvoření v jednotlivých částech dílu by měly být co nejbližší. To z důvodu výše zpevnění materiálu dosažené tvářecím procesem, která by měla být podobná v celém dílci, aby nebyly pevností charakteristiky výrazně odlišné. Současně je přihlíženo na maximální hodnotu přetvoření, která by neměla překrojit mez pevnosti. Jak bylo zmíněno v úvodu, na pin nebudou kladeny zvláštní pevnostní požadavky, nebude totiž silově namáhán. Přesto je vhodné se držet zmíněných zásad, které výrobní proces nemusí zkomplikovat, zajistí však vyšší kvalitu dílce.

#### 3.2.1 Volba rozměrů

Správný rozměr polotovaru je určen také na základě zákona zachování objemu, který patří mezi základní zákony tváření. Jak je tedy zjevné, objem polotovaru je shodný s objemem dílce, který bude zhotoven za pomoci tvářecího procesu. V úvodu je však zmíněno, že pin bude zhotoven za pomoci tváření i obrábění, respektive soustružení, jelikož požadavky na geometrickou přesnost špičky pinu nedovolují pin vyrobit pouze tvářením, které není dostatečně přesné. Současně by zápich na špičce pinu nedovolil vyhazovači pin vytlačit z nástroje.

Aby mohl být tvářený díl obroben, musí být opatřen přídávky na obrábění. Objem pinu jakožto konečného produktu činí  $6838,97 \text{ mm}^3$ . Na obr. 68 níže je možné vidět navrženou úpravu, která již přídávky zahrnuje. Nekótované rozměry budou tvářeny bez přídávků, jelikož přesnost tváření je v jejich případě dostatečná. Přídavek na čele byl volen 2 mm a po obvodu 0,6 mm. Objem pinu opatřeného přídávky je  $7043,55 \text{ mm}^3$ . Obě hodnoty byly zjištěny za pomoci CAD software PTC Creo.



Obr. 68 Tvářený pin s přídávky na obrábění.

Po návrhu podoby protlačku je možné přistoupit k volbě nejvhodnějšího rozměru polotovaru. Pro potřeby tvářecího automatu se nabízí drát, popřípadě tyč. Je však nutné vybrat nejvhodnější průměr. Jak bylo nastíněno výše, volba je postavena na základě vyhodnocení hodnot logaritmického přetvoření  $\phi$  v jednotlivých oblastech pinu lišících se vnějším průměrem. Pro zjednodušení je geometrie zredukována do čistě rotačně symetrické podoby s největším průměrem ve střední části pinu o průměru 21 mm, což představuje jistý střední průměr daného segmentu součásti. Následně jsou zvoleny komerčně dostupné průměry měděných polotovarů a pro každou je spočteno dosažené logaritmické přetvoření. Názorná ukázka pro průměr polotovaru  $\phi 10$  následuje níže na obr. 69, současně je proveden výpočet. Je uvažován pouze výsledný stav bez mezioperací.

Příklad výpočtu pro návrh č. 1 – drátěný polotovár Ø10 mm dle Obr. 69 [64]:

Ačkoli polotovár prochází předchozím hutním zpracováním, je uvažováno  $\varphi_0 = 0$ . Cílem je porovnat hodnoty přetvoření dosažené následujícím zpracováním. Nejsou uvažovány jednotlivé tvářecí operace a je počítáno pouze s výchozím a konečným stavem dle vzorce 2.5, což by odpovídalo situaci, kdy by byl pin zhotoven během jedné operace. Tento orientační výpočet je však pro volbu polotovaru dostačující.

$$\varphi_A = \ln \frac{S_0^2}{S_1^2} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} = \ln \frac{10^2}{8^2} = 0,446,$$

kde:  $S_0$  – počáteční plocha průřez [mm<sup>2</sup>],

$S_1$  – konečný plocha průřez [mm<sup>2</sup>],

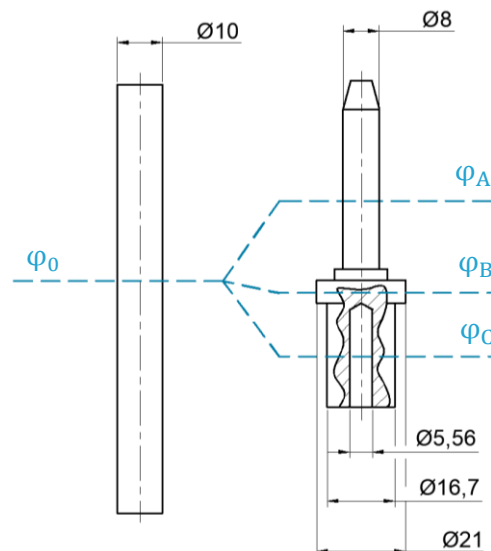
$D_0$  – počáteční průměr [mm],

$D_1$  – konečný průměr [mm].

$$\varphi_B = \ln \frac{S_0^2}{S_2^2} = \ln \frac{D_0^2}{D_2^2} = \ln \frac{10^2}{21^2} = -1,48,$$

$$\varphi_C = \ln \frac{S_0^2}{S_1^2} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2 - d_1^2} = \ln \frac{10^2}{14,7^2 - 5,56^2} = -0,61,$$

kde:  $d_1$  – konečný vnitřní průměr pinu [mm].



Obr. 69 Schéma výpočtu přetvoření pro polotovár Ø10 mm.

Obdobně jako v příkladu č. 1 jsou vypočítány hodnoty přetvoření dalších variant polotovaru. Výpočty jsou provedeny pro katalogové varianty měděných drátů. Celkově je zhodnoceno 7 variant. Žádný z výsledků není ideální, hodnoty přetvoření v sektorech A, B a C se hodně liší ve všech případech. Navíc jsou některé hodnoty příliš vysoké, což značí, že materiál přichází o zásobu plasticity. Výsledky, které jsou považovány za neuspokojivé, jsou označeny „NOK“. Nepříliš vysokých hodnot přetvoření je dosaženo v případě varianty č. 3. Jejich rozdíl je nejmenší v porovnání s ostatními variantami. V případě varianty č. 4 jsou výsledky podobné, ale rozdíl mezi dosaženými hodnotami zpevnění je větší. Obě hodnoty jsou uspokojivé a označené jako „OK“.

Zvolena je varianta č. 3, jelikož rozdíl hodnot je u ní nejmenší a současně není dosaženo příliš vysokých hodnot  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$ . Výsledné hodnoty pro všechny varianty je možné vidět v tab. 6. Zvoleným polotovarem je drát Ø12 mm. Předřazené žíhání zajistí obnovení struktury drátu stejně jako tyče. Drát je volen z toho důvodu, že postupové automaty jsou uzpůsobeny právě pro zpracování drátů.

Tab. 6 Výpočty přetvoření u jednotlivých variant polotovaru.

Návrh číslo	Polotovar	Část	Absolutní logaritmické přetvoření	Výsledek
1	Ø10 mm	A	0,45	NOK
		B	1,48	
		C	0,61	
2	Ø11 mm	A	0,64	NOK
		B	1,29	
		C	0,43	
3	Ø12 mm	A	0,81	OK
		B	1,19	
		C	0,25	
4	Ø14 mm	A	1,12	OK
		B	0,81	
		C	0,06	
5	Ø16 mm	A	1,39	NOK
		B	0,54	
		C	0,32	
6	Ø18 mm	A	1,62	NOK
		B	0,31	
		C	0,56	
7	Ø20 mm	A	1,83	NOK
		B	0,10	
		C	0,77	

Na závěr je možné přistoupit k určení délky. Drát o průměru Ø12 mm je zapotřebí nadělit na přesnou délku. Ke zjištění délky je použit vztah 3.7, který uvažuje, že objem tvářené součásti bude shodný s válečkem, který bude vstupovat do první tvářecí stanice. Z rovnice je následně vyjádřen vztah pro výpočet délky samotné.

$$V_{\text{pin}} = S_{\text{drátu}} \cdot l_{\text{drátu}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{drátu}}^2}{4} \cdot l_{\text{váleček}}, \quad (3.7)$$

$$l_{\text{válečku}} = \frac{4V_{\text{pin}}}{\pi \cdot D_{\text{váleček}}^2} = \frac{4 \cdot 7043,55}{\pi \cdot 12^2} = 62,28 \text{ mm},$$

kde:  $V_{\text{pin}}$  – objem pinu s přídatky [mm<sup>3</sup>],

$S_{\text{drátu}}$  – průřez drátu [mm<sup>2</sup>],

$l_{\text{drátu}}$  – délka drátu [mm],

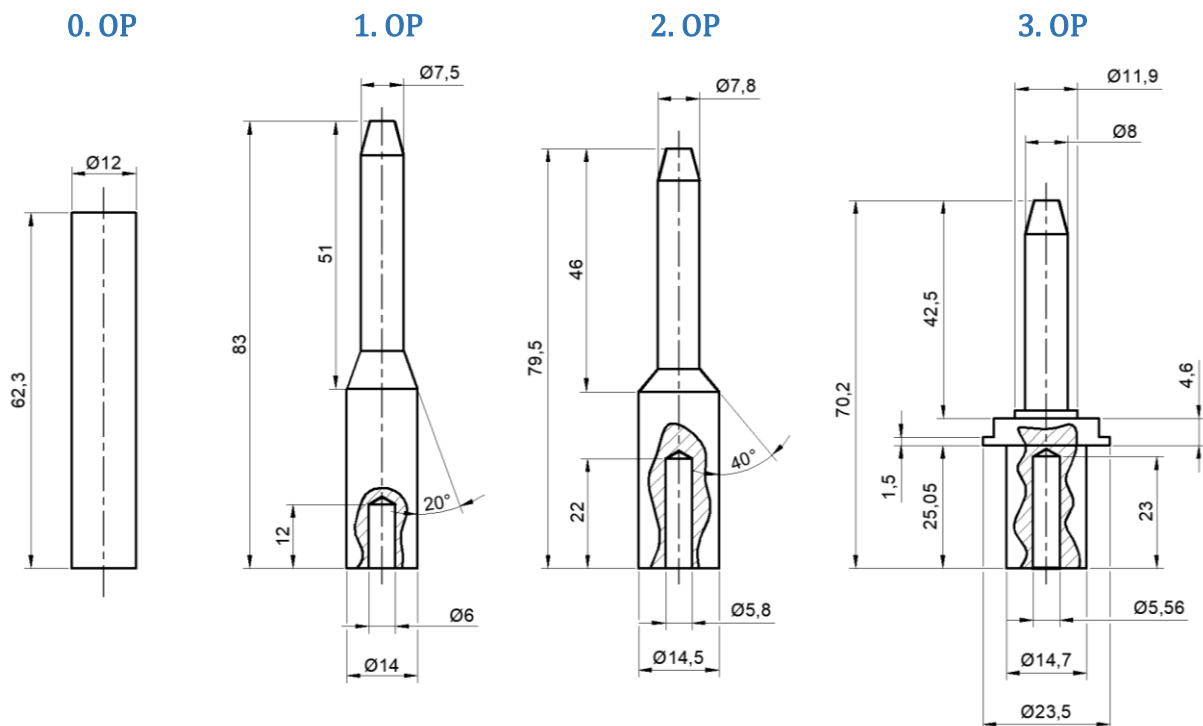
$l_{\text{válečku}}$  – délka válce [mm],

$D_{\text{drátu}}$  – průměr drátu [mm].

Možnosti dělení materiálu pro tuto aplikaci jsou štípání a řezání. Tvářecí automaty disponují zabudovaným systémem s kleštěmi, které přiváděný drát štípou. Současně vzhledem k dosažitelné přesnosti pomocí technologie štípání, která činí ±0,1 mm, je konečná délka válce zaokrouhlena na  $l_{\text{válečku}} = 62,3$  mm. Nařezané válečky budou mít výšku 62,3±0,1 mm.

### 3.3 Návrh technologického postupu

Po stanovení nejvhodnějšího polotovaru je možné přistoupit k samotnému technologickému postupu. V první fázi je navržen sled operací, který povede k vytvarování materiálu do žádané podoby. Jelikož je zapotřebí obyčejný váleček ve formě přířezu po jeho délce různě tvarovat, konkrétně tedy zúžit špici, napěchovat střed a také protlačit díru v zadní části, bude postup sestávat z vícero operací. Prvotní návrh je na obr. 70 níže. Postup se skládá ze čtyř fází. V první, respektive nulté operaci, dojde k uštípnutí polotovaru. V následující, první operaci, přířez podstoupí protlačení špice a napěchování zbylé části, kdy současně bude vytvořen důlek pro následné hlubší děrování. Druhá operace následně prodlouží neprůchozí díru a také trochu napěchuje jak špici, tak zadní část pinu. V poslední operaci dojde k dovršení tvářecího procesu, jelikož bude dopěchována střední část a současně dojde ke kalibraci špice i zadní části.



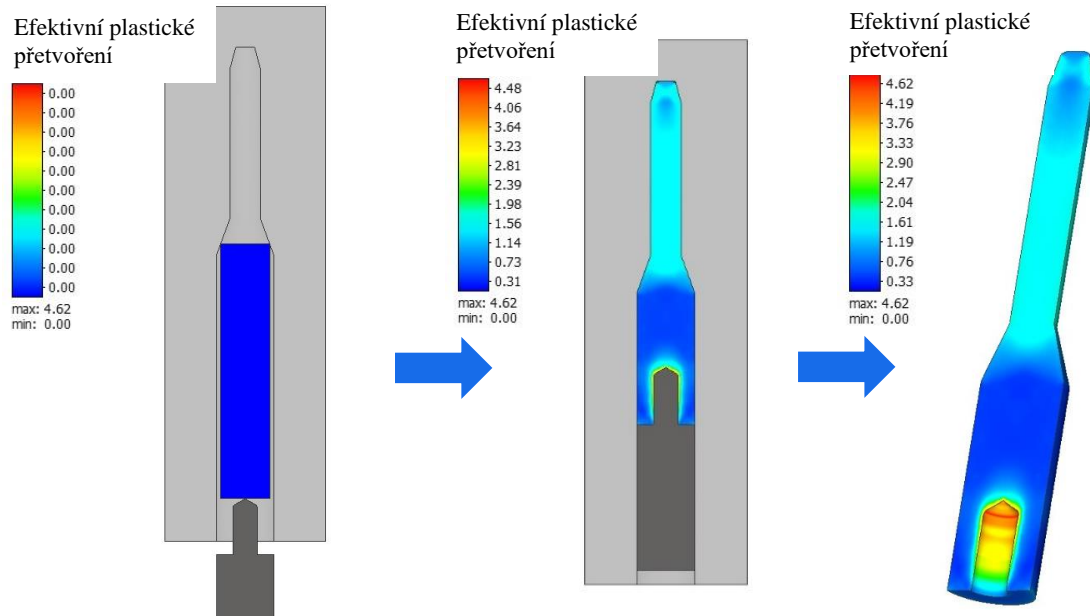
Obr. 70 Návrh technologického postupu.

#### 3.3.1 Simulace navrženého postupu

Navržený postup tvářecího procesu je ověřován v programu Simufact Forming 2021, který je zaměřen na numerické simulování tvářecích operací. Vstupními daty jsou jednak geometrie nástrojů v jednotlivých operacích, materiálové charakteristiky a současně závislosti přetvárných odporů v závislosti na logaritmickém přetvoření pro různé rychlosti přetvoření. Pro účel simulací jsou nástroje zjednodušeny. Průtlačnice i průtlačníky jsou tedy modelovány jako celistvé. Dále nejsou uvažovány vyhazovače. Tato zjednodušení nebudou mít vliv na hodnocené parametry, je tedy možné je bez rizik použít. Křivky přetvárných odporů jsou vygenerovány na základě materiálových parametrů zjištěných v předchozích kapitolách. není tedy použit materiálový model z knihovny programu, nýbrž vlastní. Hlavními výstupy simulací jsou dosažené hodnoty přetvoření, velikost tvářecích sil a v neposlední řadě také tok materiálu v průběhu tváření.

### 1. Operace

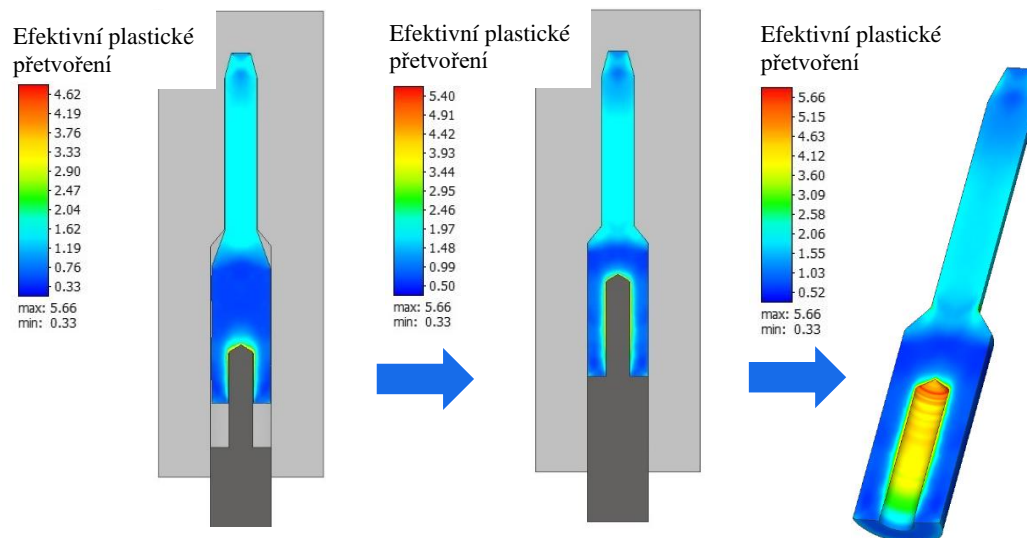
Jak je vidět na obr. 71, pěchovník v první operaci nejdříve trnem předtvaruje díru pro závit M6 a následně protlačí přední část pinu redukčním okem. První operace je tedy kombinovaná a výsledky ukazují, že efektivní napětí dosahuje v užší oblasti hodnot blízkých  $\varphi_{ef} = 1,5$ , zatímco v oblasti širší  $\varphi_{ef} = 0,4$ . V průběhu operace materiál vhodně vyplňuje dutinu zápusky bez nežádoucího porušení. Návrh první operace je tedy hodnocen pozitivně.



Obr. 71 Simulace první tvářecí operace.

### 2. Operace

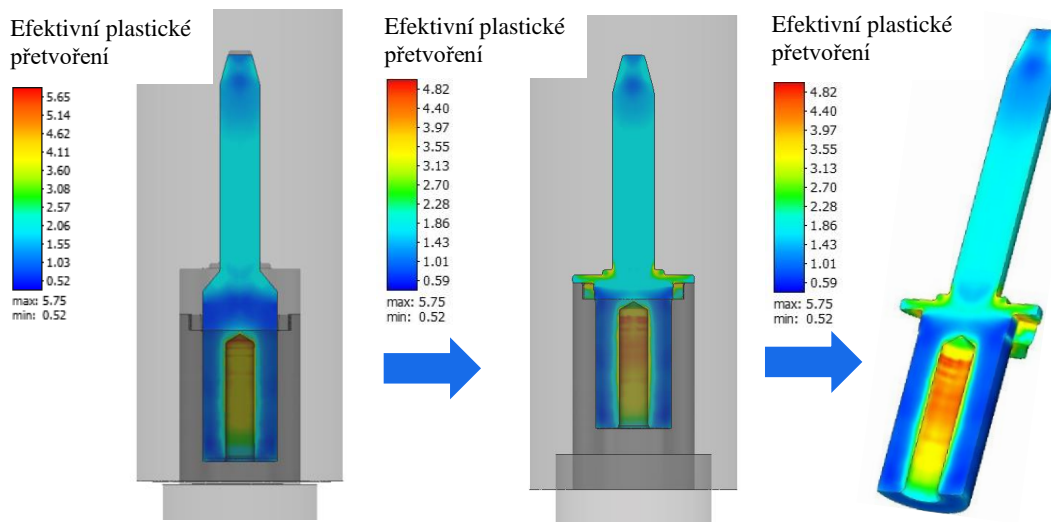
V druhé operaci, viz obr. 72, pěchovník trnem protáhne díru pro závit do téměř plné délky. Následně mírně napěchuje užší i širší část a zvětší úhel mezi nimi, aby se v poslední fázi lépe pěchovala střední část pinu. Druhá operace je tedy také kombinovaná a výsledky ukazují, že efektivní napětí dosahuje v užší oblasti hodnot blízkých  $\varphi_{ef} = 1,8$ , zatímco v oblasti širší  $\varphi_{ef} = 0,8$ . V průběhu druhé operace materiál také vhodně vyplňuje dutinu zápusky. Návrh druhé operace je tedy také hodnocen pozitivně.



Obr. 72 Simulace druhé tvářecí operace.

### 3. Operace

V poslední operaci, která je znázorněna na obr. 73, dochází především k vypěchování střední rotačně asymetrické části. Současně se také dopěchovává jak užší, tak širší část na konečné rozměry. Třetí operace je tedy také kombinovaná a současně nejkomplicovanější právě kvůli střednímu rotačně asymetrickému segmentu. Výsledky ukazují, že efektivní napětí dosahuje v užší oblasti hodnot blízkých  $\varphi_{ef} = 1,9$ , zatímco v oblasti širší  $\varphi_{ef} = 1$ . V průběhu zdvihu materiál opět vhodně zatéká do požadovaných míst. Návrh třetí operace je také hodnocen kladně.



Obr. 73 Simulace třetí tvářecí operace.

### 3.3.2 Výpočet přetvoření

Jelikož je pin zhotoven během tří operací, je nutné se zaměřit na dosažené hodnoty přetvoření v jednotlivých krocích. Rozdíl mezi hodnotami v tab. 6 a níže vypočtenými je dán právě tím, že pro výpočet tabulkových hodnot je problém zjednodušen a reflektuje zhotovení dílce v jednom kroku. Výpočty níže jsou zaokrouhlovány na setiny a zohledňují také dopěchovávání všech třech hlavních částí pinu v každé operaci. Oblast A je v prvním kroku protlačena na  $\varnothing 7,5$  mm, následně pak na  $\varnothing 7,8$  mm a v třetí operaci na finální  $\varnothing 8$  mm. Díky tomu pin mezi jednotlivými operacemi volně zajede do průtláčnice. Oblast B je ve všech operacích postupně pěchována. V oblasti C je nejdříve protlačena díra na  $\varnothing 6$  mm, která je v druhé operaci prodloužena a současně zúžena na  $\varnothing 5,8$  mm. V posledním kroku je prodloužena o zbylý 1 mm na finální hloubku a opět zúžena na  $\varnothing 5,56$  mm, tedy rozměr, do kterého bude dále vysoustružen závit M6. Díky postupnému zužování díry je zajištěno, že trn volně zajede do již předtvarované díry většího průměru v operaci 2 a 3. Současně se v každé operaci pěchuje vnější průměr.

Pro každý sektor pinu a každou tvářecí operaci byla spočtena logaritmická přetvoření dle vzorce 2.5 a nakonec jsou jejich absolutní hodnoty sečteny podle 3.10. Tyto součty reprezentují celkové přetvoření pro danou část pinu. Grafické znázornění přetvoření je možné vidět na obr. 74.

$$\varphi_{A,1op} = \ln \frac{S_{A,1op}^2}{S_{A0}^2} = \ln \frac{D_{A,1op}^2}{D_{A0}^2} = \ln \frac{7,5^2}{12^2} = -0,94$$

$$\varphi_{A,2op} = \ln \frac{S_{A,2op}^2}{S_{A,1op}^2} = \ln \frac{D_{A,2op}^2}{D_{A,1op}^2} = \ln \frac{7,8^2}{7,5^2} = 0,08$$

$$\varphi_{A,3op} = \ln \frac{S_{A,3op}^2}{S_{A,2op}^2} = \ln \frac{D_{A,3op}^2}{D_{A,2op}^2} = \ln \frac{8^2}{7,8^2} = 0,05$$

$$\varphi_{B,1op} = \ln \frac{S_{B,1op}^2}{S_{B0}^2} = \ln \frac{D_{B,1op}^2}{D_{B0}^2} = \ln \frac{14^2}{12^2} = 0,31$$

$$\varphi_{B,2op} = \ln \frac{S_{B,2op}^2}{S_{B,1op}^2} = \ln \frac{D_{B,2op}^2}{D_{B,1op}^2} = \ln \frac{14,5^2}{14^2} = 0,07$$

$$\varphi_{B,3op} = \ln \frac{S_{B,3op}^2}{S_{B,2op}^2} = \ln \frac{D_{B,3op}^2}{D_{B,2op}^2} = \ln \frac{21^2}{14,5^2} = 0,74$$

$$\varphi_{C,1op} = \ln \frac{S_{C,1op}^2}{S_{C0}^2} = \ln \frac{D_{C0}^2}{D_{C,1op}^2 - d_{C,1op}^2} = \ln \frac{12^2}{14^2 - 6^2} = -0,11$$

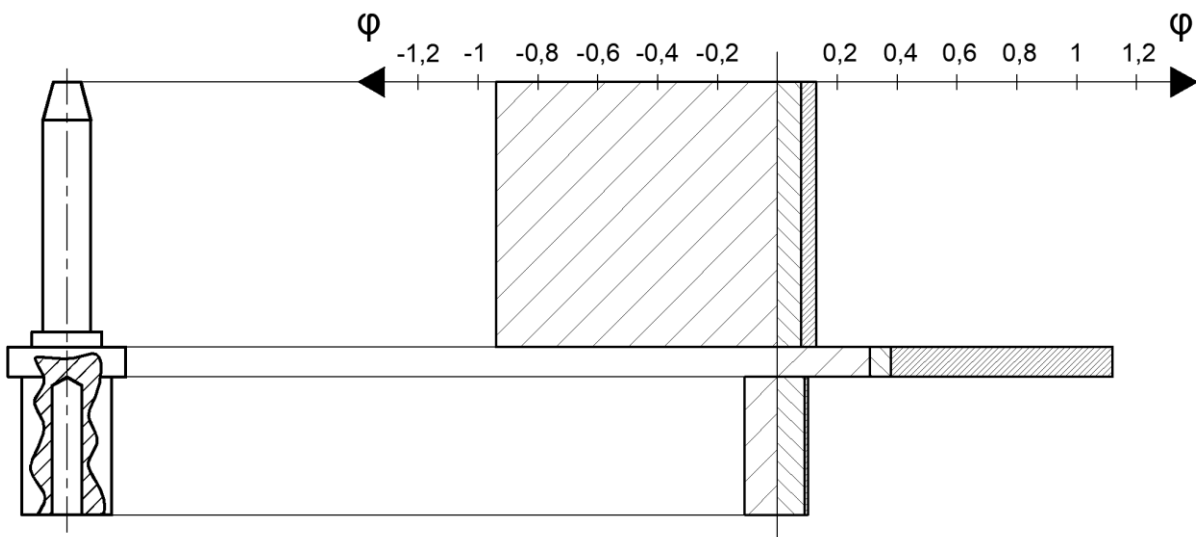
$$\varphi_{C,2op} = \ln \frac{S_{C,2op}^2}{S_{C,1op}^2} = \ln \frac{D_{C,2op0}^2 - d_{C,1op}^2}{D_{C,1op}^2 - d_{C,1op}^2} = \ln \frac{14,5^2 - 6^2}{14^2 - 6^2} = 0,09$$

$$\varphi_{C,3op} = \ln \frac{S_{C,3op}^2}{S_{C,2op}^2} = \ln \frac{D_{C,3op0}^2 - d_{C,1op}^2}{D_{C,2op}^2 - d_{C,2op}^2} = \ln \frac{14,7^2 - 5,8^2}{14,5^2 - 5,8^2} = 0,03$$

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \sum_{i=1}^{\text{počet operací}} |\varphi_{A,iop}| = |\varphi_{A,1op}| + |\varphi_{A,2op}| + |\varphi_{A,3op}| = \\ &= |-0,94| + |0,08| + |0,05| = 1,07 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \varphi_B &= \sum_{i=1}^{\text{počet operací}} |\varphi_{B,iop}| = |\varphi_{B,1op}| + |\varphi_{B,2op}| + |\varphi_{B,3op}| = \\ &= |0,31| + |0,07| + |0,74| = 1,12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_C &= \sum_{i=1}^{\text{počet operací}} |\varphi_{C,iop}| = |\varphi_{C,1op}| + |\varphi_{C,2op}| + |\varphi_{C,3op}| = \\ &= |-0,11| + |0,09| + |0,03| = 0,23 \end{aligned}$$

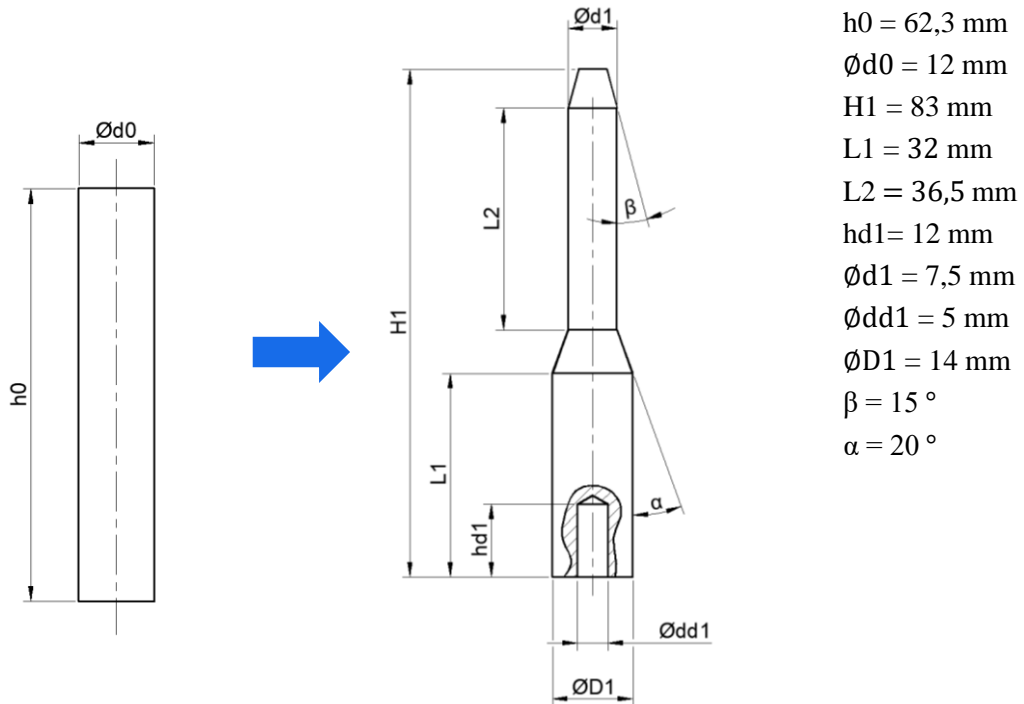


Obr. 74 Grafické znázornění logaritmického přetvoření.

### 3.4 Výpočet přetvárných rychlostí, odporů, sil, prací a výkonu

Pro navržený technologický postup jsou stanoveny technologické parametry. Na základě konzultace s vedoucím práce je věnována pozornost fázi protlačování materiálu redukčním okem v první operaci. Analytické výpočty jsou zpracovány pouze pro první operaci. Zbylé fáze a operace nebudou analyticky počítány, jelikož tvářecí pochody v nich jsou kombinované a tedy komplexnější, což by zvýšilo náročnost výpočtů. Potřebné parametry budou převzaty z výsledků simulací, což je pro volbu vhodného stroje dostačující. Rozměry v první operaci jsou uvedeny na obr. 75.

- 1. Tvářecí operace



Obr. 75 Rozměry v 1. tvářecí operaci.

Do výpočtů níže je třeba dosadit několik parametrů, jako například dráhu nástroje a počet zdvihů za jednotku času, které však přímo závisí na konkrétním strojním zařízení. Proto je nutné předem vytipovat tvářecí automat, který by mohl být pro potřeby výroby pinu vhodný. Předem zvoleným strojem je CHUN ZU CBF-204S, datasheet viz příloha č. 6. Předpokladem je, že automat vykoná 90 zdvihů za minutu, což odpovídá 95 % maximálního vytížení. Průběh rychlosti beranu v závislosti na poloze je díky klikovému mechanismu parabolického charakteru. Pro účel následujících výpočtů je tato skutečnost zjednodušena a je počítáno s konstantní rychlostí beranu.

Střední rychlost přetvoření [77]:

$$\dot{\varphi}_1 = 2 \cdot v_0 \cdot \frac{R_0^2}{R_1^3} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 2 \cdot 0,51 \cdot \frac{0,006^2}{0,0038^3} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 243,6 \text{ s}^{-1}, \quad (3.11)$$

$$\text{kde: } R_0 = \frac{\varnothing d_0}{2} = \frac{0,012}{2} = 0,0060 \text{ m}, \quad (3.12)$$

kde:  $R_0$  – poloměr polotovaru [m].

$$R_1 = \frac{\varnothing d_1}{2} = \frac{0,0075}{2} = 0,0038 \text{ m},$$

kde:  $R_1$  – poloměr přední části pinu [m].

$$v_0 = \frac{s}{t_s} = \frac{n_{\text{zdvih}} \cdot 2 \cdot h_{\text{beranu}}}{t_s} = \frac{90 \cdot 2 \cdot 0,17}{60} = 0,51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (3.13)$$

kde:  $\dot{\varphi}_1$  – střední rychlost deformace [–],  
 $v_0$  – rychlost nástroje [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $s$  – dráha pohybu nástroje [m],  
 $t_s$  – čas pohybu [min],  
 $n_{\text{zdvihu}}$  – počet zdvihů beranu [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $h_{\text{beranu}}$  – zdvih beranu [m].

Následujícím krokem je výpočet přirozeného přetvárného odporu dle Johnson-Cooka. Výpočet neuvažuje teplotního činitele. Teplotní vlivy je možné při tváření za studena zanedbat. Po výpočtu  $\sigma_{p1}$  je spočítán deformační odpor, z něhož je možné vypočítat přetvárnou sílu jako součin přetvárného odporu a průřezu polotovaru. V neposlední řadě je možné dopočítat měrnou přetvárnou práci a přetvárnou práci jako takovou a úplně na závěr také výkon, který je zapotřebí.

Ve výpočtech je uvažována hodnota součinitele tření  $f = 0,05$ . V literatuře, na jejímž základě je tato hodnota použita, autoři uvádí, že hodnota  $f$  se může značně lišit v závislosti na použitém mazivu. Použitý zdroj zkoumá hodnoty tření při procesu tažení měděného drátu za různých podmínek lišících se zejména použitým mazivem. V případě mazání ricinovým olejem se hodnota  $f$  pohybuje v intervalu 0,1 až 0,15. Při použití stearátu sodného však hodnota součinitele tření klesá na 0,02 až 0,03. Obě varianty předpokládají, že je měděný drát nejdřív fosfátován. [81]

Výpočet uvažuje, že měděný drát bude fosfátován a následně opatřen stearátem sodným. Pro potřeby výpočtu je volena hodnota  $f = 0,05$ , jelikož rozmezí součinitele tření 0,02 – 0,03 je nízké s přihlédnutím na údaje uváděné v jiných zdrojích [82]. Volba  $f = 0,05$  je tedy kompromisem mezi údaji ve zdrojích 81 a 82.

Přirozený přetvárný odpor:

$$\begin{aligned} \sigma_{p1} &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{A,10p}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) = \\ &= (125 + 227 \cdot 0,94^{0,33}) \cdot \left(1 + 0,077 \cdot \ln \frac{243,6}{1}\right) = 494,42 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Deformační odpor [78]:

$$\begin{aligned} \sigma_{d1} &= \sigma_{p1} \cdot \left[ \left(1 + \frac{f}{\hat{\alpha}}\right) \cdot \ln \left(\frac{d_0^2}{d_1^2}\right) + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4f \cdot \frac{d_1 \cdot L_2}{d_0^2} \cdot \sigma_{p1} + 4f \cdot \frac{L_1}{d_0} \cdot \sigma_{p1} = \\ &= 494,42 \cdot \left[ \left(1 + \frac{0,05}{0,70}\right) \cdot \ln \left(\frac{12^2}{7,5^2}\right) + \frac{2}{3} \cdot 0,70 \right] + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{7,5 \cdot 36,5}{12^2} \cdot \\ &\cdot 494,42 + 4 \cdot 0,05 \cdot \frac{32,5}{12} \cdot 494,42 = 2251,84 \text{ MPa}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

kde:  $\sigma_{d1}$  – deformační odpor v první operaci [MPa],  
 $f$  – součinitel tření [–],

$$\hat{\alpha} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha}{180} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 20^\circ}{180} = 0,70 \text{ rad}, \quad (3.15)$$

kde:  $\hat{\alpha}$  – úhel kužele v obloukové míře [rad].

Tvářecí síla:

$$F_{1op} = \sigma_{d1} \cdot S_{1p} = 2251,84 \cdot \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 254\,677 \text{ N}, \quad (3.16)$$

kde:  $F_{1op}$  – Tvářecí síla v první operaci [N],  
 $S_{1p}$  – průřez tvářené oblasti v 1. operaci [mm<sup>2</sup>].

Přetvárná práce:

$$A_{j1} = \frac{\sigma_o + \sigma_{p1}}{2} \cdot |\varphi_{A,1op}| \cdot 10^{-3} = \quad (3.17)$$

$$= \frac{125 + 494,42}{2} \cdot |-0,94| \cdot 10^{-3} = 0,291 \text{ J} \cdot \text{mm}^3,$$

kde:  $A_{j1}$  – měrná přetvárná práce [J · mm<sup>3</sup>].

$$A_1 = A_{j1} \cdot V_{1op} = 0,291 \cdot 1928,38 = 561,16 \text{ J}, \quad (3.18)$$

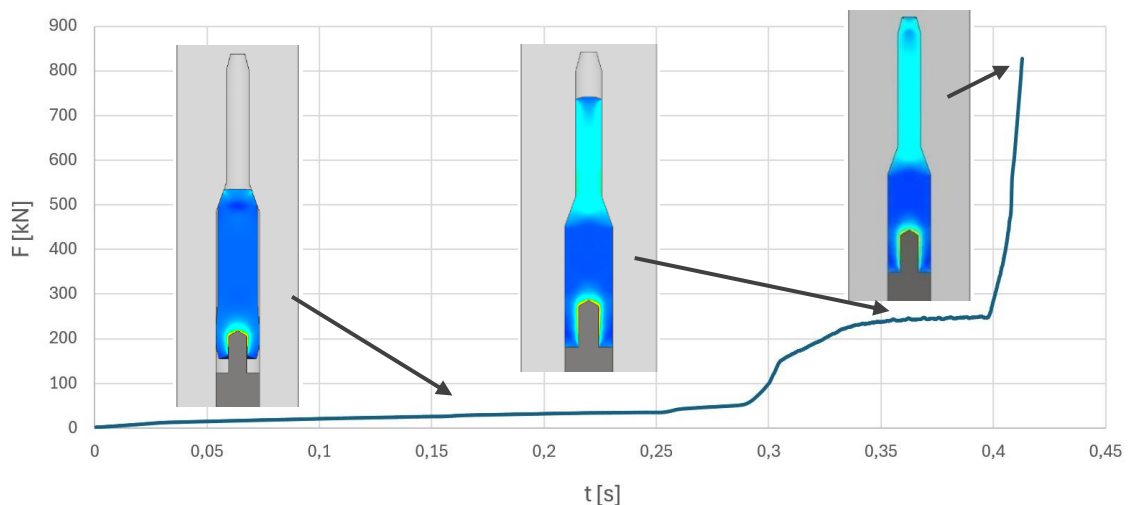
kde:  $A_1$  – přetvárná práce [J],  
 $V_{1op}$  – Objem tvářené části dílu [mm<sup>3</sup>].

Potřebný výkon:

$$P_1 = \frac{A_1 \cdot n_{zdvih}}{t_s} = \frac{561,16 \cdot 90}{60} = 841,74 \text{ W}, \quad (3.19)$$

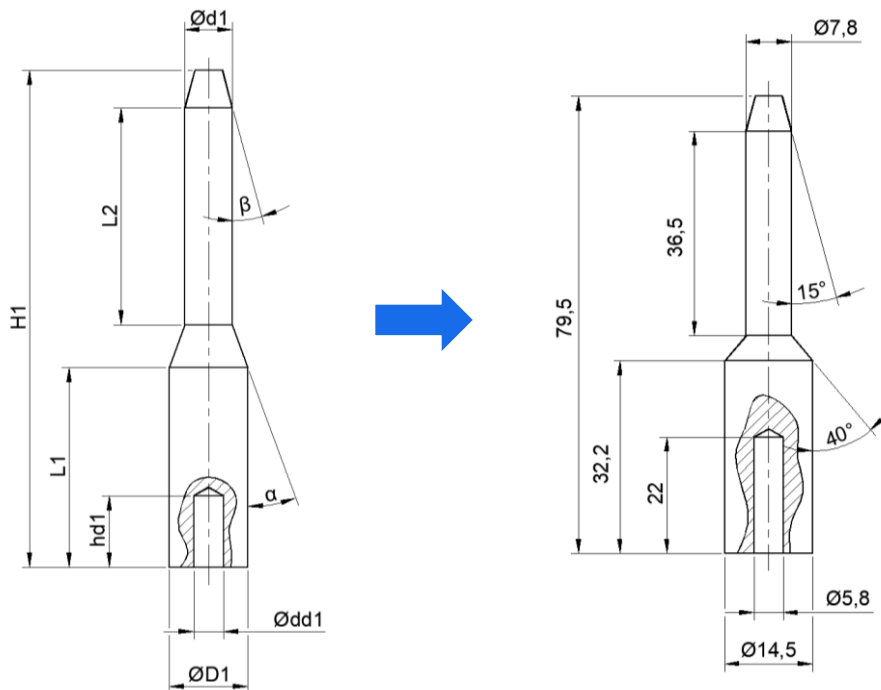
kde:  $P_1$  – výkon potřebný pro část první operace [W].

Výsledky analytických výpočtů je vhodné porovnat s výstupními daty ze simulací. Na obr. 76 je vidět silová závislost na čase získaná ze softwaru Simufact Forming 2021. Vypočtená síla potřebná pro průchod materiálu redukčním okem je  $F_{1op} = 255 \text{ kN}$ . Výstup ze simulací udává hodnoty odpovídající  $F_{1op} = 250 \text{ kN}$ . Rozdíl hodnot tedy odpovídá 2 %, proto je možné při vzájemném srovnání konstatovat, že výsledky navzájem korespondují. Jistá míra odchylky může být dána rozdílným vypočtením modelem obou přístupů. Na grafu je také zaznačena síla působící v momentě vtlačování trnu do polotovaru, která se pohybuje v nižších řádech desítek kilo Newtonů. Dokončení zdvihu vyžaduje sílu o velikosti 830 kN.



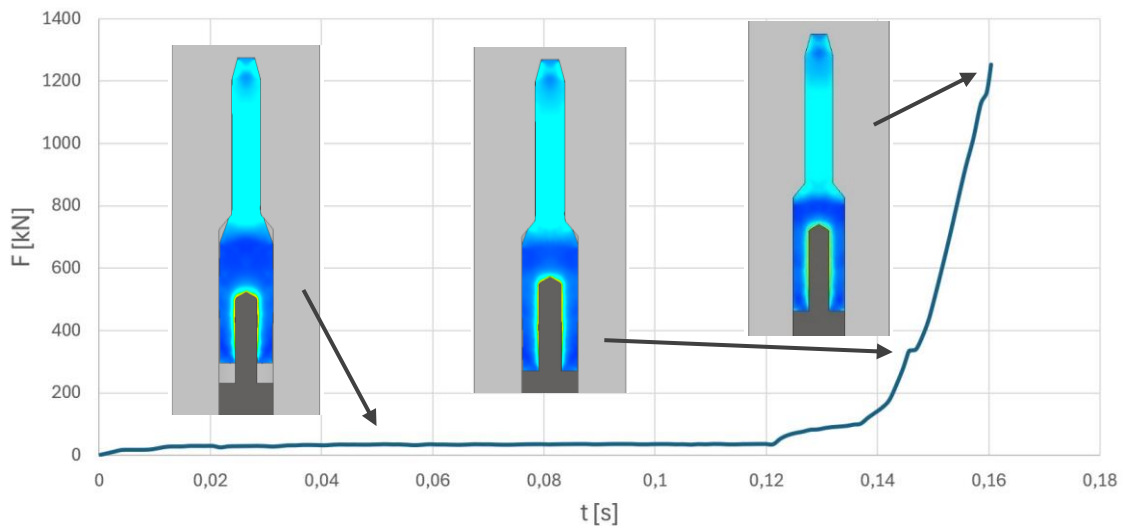
Obr. 76 Průběh první operace.

## ■ 2. Tvářecí operace



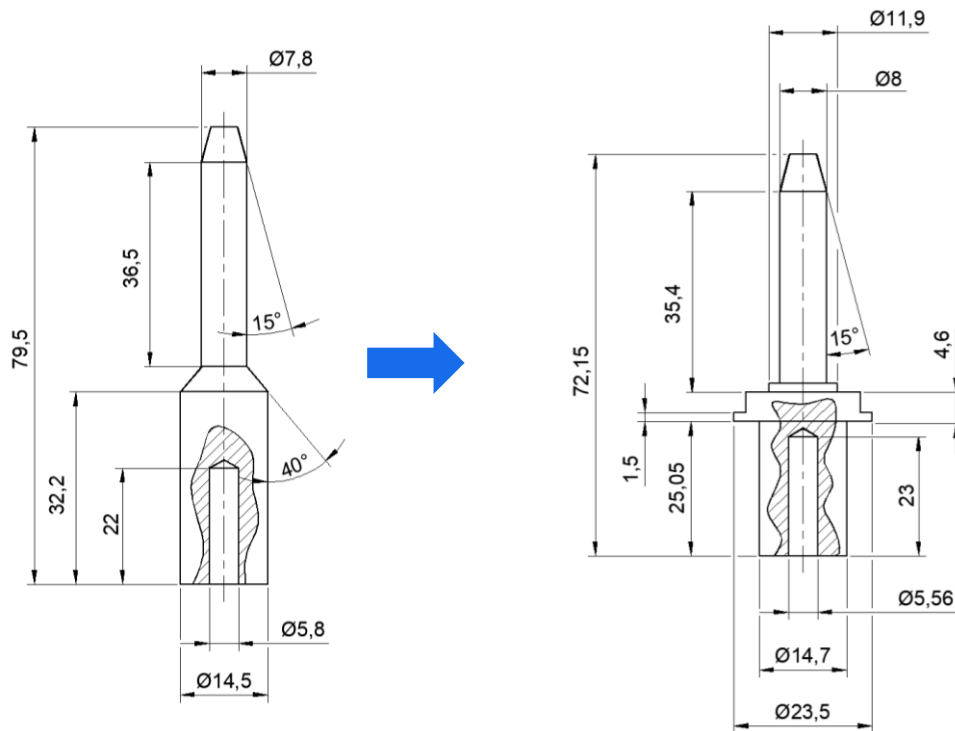
Obr. 77 Rozměry v 2. tvářecí operaci.

Vzhledem k tomu, že charakter druhé operace neodpovídá jednoduchému přechování, dopřednému protlačování, stranovému protlačování ani zpětnému protlačování, tak pro druhou operaci nejsou provedeny analytické výpočty. Je tedy brán zřetel na výstupy simulace, viz obr. 78. V první fázi druhé operace trn více prohlubuje díru určenou pro závit a následně dochází k jemnému dopřechování užšího i širšího průměru spolu s rozšířením redukčního úhlu. Pro dokončení druhé operace je zapotřebí síly o velikosti 1 250 kN. Geometrická konfigurace 2. operace viz obr. 77.



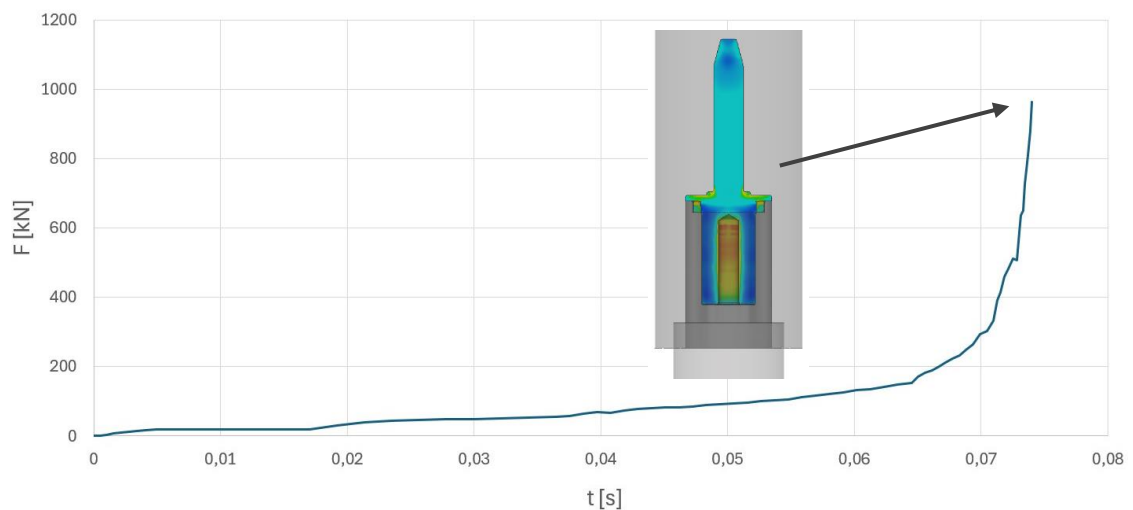
Obr. 78 Průběh druhé operace.

## 3. Tvářecí operace



Obr. 79 Rozměry v 3. tvářecí operaci.

Vzhledem k charakteru třetí operace je obdobně jako v té předchozí vynechán analytický výpočet a v potaz jsou opět brány výsledky simulací. V průběhu celého zdvihu dochází zejména k drobnému dopěchování vrchní i spodní částí pinu, nejvýznamnější je však pěchování střední části, která není rotačně symetrická. K dokončení zdvihu je v poslední operaci zapotřebí síly 965 kN. Průběh síly je znázorněn na obr. 80, geometrie dílu na obr. 79.



Obr. 80 Průběh třetí operace.

Celkovou hodnotu tvářecí síly je možné spočítat jako prostý součet dílčích sil:

$$F_c = F_1 + F_2 + F_3 = 830\,000 + 1\,250\,000 + 965\,000 = 3\,045\,000 \text{ N} \quad (3.20)$$

### 3.5 Volba stroje

Na trhu je mnoho postupových automatů pro tváření za studena lišících se mnoha různými parametry jako výkon, maximální tvářecí síla, výška zdvihu, maximální průměr polotovaru, maximální počet zdvihů nebo například počtem tvářecích stanic. Při volbě je třeba zohlednit výrobní dávku  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ , maximální zatížení, které musí stroj zvládnout, tvářecí sílu, průměr polotovaru, jeho délku, počet operací, který je roven třem atd. Při volbě bylo přihlíženo zejména na průměr polotovaru  $D_0 = 12 \text{ mm}$ , délku uštípnutého válečku  $l_{\text{válečku}} = 62,3 \text{ mm}$ , počet operací  $O = 3$  a také potřebnou tvářecí sílu  $F_c = 3\,045 \text{ kN}$ .

Zvolen byl na základě vyjmenovaných parametrů tvářecí automat SHUN ZU CBF-204S. Stroj disponuje parametry zmíněnými v tab. 7. Kompletní datasheet je k nahlédnutí v příloze č. 6. Toto zařízení splňuje požadavky, které jsou pro výrobu dílce potřebné, nebude tedy během provozu přetěžován. Počet tvářecích stanic stroje je o jednu vyšší, než je dle navrženého technologického postupu nutné, což není špatně. Jedna komora zůstane neobsazena. Zařízení je primárně uzpůsobeno na zpracovávání drátu, který je dělen na jednotlivé válečky, které jsou následně tvářeny. Váleček i díly mezi jednotlivými komorami jsou přemísťovány manipulátorem, který pracuje synchronně s opakovanými zdvihy stroje. Manipulátor je také součástí tvářecího automatu.

Tab.7 Parametry voleného stroje [76].

CHUN ZU CBF-204S	
Počet tvářecích stanic [-]	4
Jmenovitá síla [N]	3 500 000
Maximální průměr k dělení [mm]	23
Maximální délka polotovaru [mm]	195
Maximální počet zdvihů [ $\text{min}^{-1}$ ]	95
Zdvih [mm]	170
Výkon [kW]	56
Rozměry razníku [mm]	$\varnothing 90 \times 215$
Rozměry raznice [mm]	$\varnothing 125 \times 200$
Váha stroje [kg]	62 000

### 3.6 Návrh nástroje

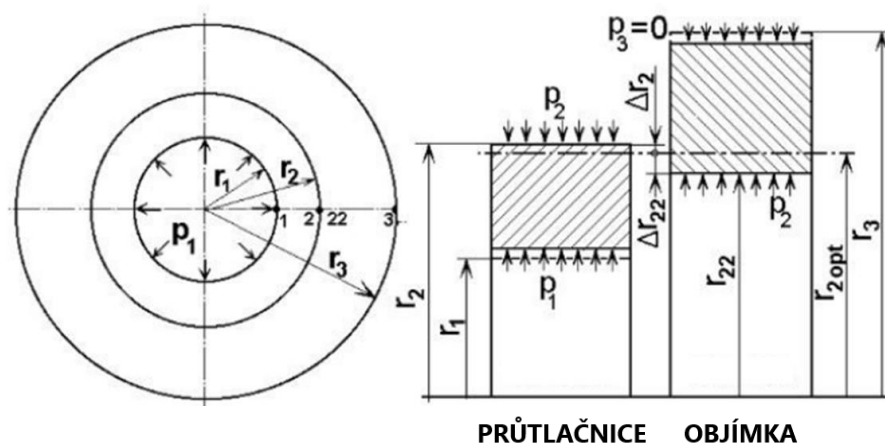
Součástí práce je také návrh tvářecího nástroje. Zpracovaná je výkresová dokumentace sestavy nástroje i jednotlivých dílů pro třetí operaci je součástí příloh. Jednotlivými díly jsou konkrétně průtlačník, trn a obě půlky průtlačnice. Pozornost je v této kapitole věnována kontrole radiálního tlaku na průtlačnici. Na základě jeho hodnoty je volen počet objímek nutných pro zapouzdření průtlačnice. Pro navrženou průtlačnici v první operaci je radiální tlak spočten v programu OPTIM97. Jelikož  $p_1 = 1223,33 \text{ MPa}$ , je průtlačnice v nástroji pouzdřena jen jednou objímkou. Je uvažováno, že pouzdření bude probíhat za studena. Vstupní data použitá pro výpočet v OPTIM97 jsou uvedena v tab. 8, výstupní data v tab. 9. Kromě radiálního tlaku jsou spočteny také hodnoty rozměrů, předpětí, atd. pro uložení průtlačnice do objímky. Schéma uložení průtlačnice v objímce je na obr. 79.

Tab. 8 Vstupní data pro výpočty v OPTIM97.

			Průtláčnice	Objímka
Materiál			19 830	19 733
Modul pružnosti	E	[MPa]	220 000	206 000
Mez pevnosti v tahu	$R_m$	[MPa]	1665	1790
Mez pevnosti v tlaku	$R_d$	[MPa]	0	0
Mez kluzu	$R_{p0,2}$	[MPa]	1480	1670
Poissonovo číslo	$\mu$	[-]	0,33	0,3
Dovolené napětí	$\sigma_d$	[MPa]	1425	1525
Teplota popouštění	$T_{POP}$	[°C]	-	580
Koeficient tepelné roztažnosti	$\alpha_T$	[-]	0,0000124	0,0000136

Tab. 9 Výstupní data výpočtů v OPTIM97.

Poměrný dělicí poměr	$r_1/r_2$	[mm]	1,9561
Radiální tlak	$p_1$	[MPa]	1223,3300
Kontaktní tlak	$p_2$	[MPa]	697,0413
Dělicí poměr	$r_2$	[mm]	13,6927
Vypočítaný přesah	$2\Delta r$	[mm]	0,0905
Kontaktní předpětí	$\bar{p}_2$	[MPa]	436,9246
Stažení vnějšího $\varnothing$ průtláčnice	$2\Delta r_2$	[mm]	0,0375
Roztažení vnitřního $\varnothing$ objímky	$2\Delta r_{22}$	[mm]	0,0530
Zvětšení kontaktního tlaku od $p_1$	$p_2$	[MPa]	260,1167
Kontaktní přesah	$2\Delta r_s$	[mm]	0,0905
Stažení funkčního $\varnothing$ průtláčnice	$2\Delta r_1$	[mm]	-0,0376



Obr. 81 Schéma uložení průtláčnice a objímky [83].

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické kalkulace jsou základním kamenem hodnocení projektu v pilotní fázi. Pokud by výroba a prodej produktu nebyl rentabilní, postrádalo by smysl se návrhem výroby vůbec zabývat. Proto je nutné provést technicko-ekonomické zhodnocení, které investorovi přiblíží ekonomickou stránku projektu.

Následující kalkulace finanční rozvahy pro zadaný díl o výrobní dávce  $500\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$  vycházejí z předpokladu, že výrobce již disponuje potřebným technickým zázemím vyjímaje tvářecího automatu, který bude pořizován nově. Stanovena bude kusová cena zahrnující stanovenou míru ziskovosti. Součástí bude také zhodnocení návratnosti investic. Výpočet zahrnuje postupy, materiály a prostředky nutné pro zhotovení dílce pomocí technologie tváření za studena.

Výpočet začíná stanovením nákladu na materiál. Jelikož není možné dohledat cenu drátěného polotovaru, je ve výpočtu uvažována cena tyče válcované za studena o průměru  $\varnothing 12 \text{ mm}$  z materiálu Cu-ETP R240. Je počítáno s kilovou cenou pro spotřebu odpovídající zadanému výrobnímu kvantu, která je převzata od dodavatele hutního materiálu Feron a.s, čítající  $450,5 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$  [79].

Náklady na materiál:

$$N_{\text{mat}} = s_m \cdot C_m \cdot N = 0,06297 \cdot 450,5 \cdot 500\,000 = 14\,183\,993 \text{ Kč}, \quad (4.1)$$

kde:  $N_{\text{mat}}$  – náklady na materiál [Kč],  
 $C_m$  – cena materiálu [ $\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],  
 $N$  – počet kusů vyráběné součásti [ $\text{ks} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],  
 $s_m = V_{\text{pin}} \cdot \rho = 7043,55 \cdot 10^{-9} \cdot 8940 = 0,06297 \text{ kg} \cdot \text{ks}^{-1}$ , (4.2)

kde:  $s_m$  – spotřeba materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{ks}^{-1}$ ].

Dalším faktorem jsou náklady na mzdy obsluhy. Pro výpočet mezd je nutné uvažovat hodinovou mzdu zaměstnance. Je počítáno s tarifem  $250 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ . K tomu je nutné připočítat odvody ve výši 34 %. Výsledné náklady na pracovníka tedy vychází na  $335 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Dále je uvažováno, že stroj vykoná 90 zdvihů za minutu, což odpovídá 95% vytížení. Zbývajících 5 % představuje přípravný čas.

Náklady na mzdy:

$$N_{\text{mzdy}} = t \cdot M_t \cdot N = 0,00020475 \cdot 335 \cdot 500\,000 = 34\,296 \text{ Kč}, \quad (4.3)$$

kde:  $N_{\text{mzdy}}$  – náklady na mzdy [Kč],  
 $M_t$  – hodinová mzda [ $\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ ],  
 $t = t_{A1} + t_{B1} = 0,000195 + 0,00000975 = 0,00020475 \text{ hod}$ , (4.4)

kde:  $t$  – čas produkce [hod].

$$t_{A1} = \frac{1}{n_{\text{sh}} \cdot 60 \cdot v_s} = \frac{1}{90 \cdot 60 \cdot 0,95} = 0,000195 \text{ hod}, \quad (4.5)$$

kde:  $t_{A1}$  – čas na výrobu jednoho dílu [hod],  
 $n_{\text{sh}}$  – počet vyrobených kusů za hodinu [ks],  
 $v_s$  – vytíženost stroje [-].

$$t_{B1} = t_{A1} \cdot v_p = 0,000195 \cdot 0,05 = 0,00000975 \text{ hod} \quad (4.6)$$

kde:  $t_{B1}$  – čas na přípravu jednoho dílu [hod],  
 $v_p$  – podíl času přípravy [-].

Nemalou část nákladů budou činit výdaje spojené s tepelným zpracováním. Materiál je žhán při teplotě 650 °C po dobu jedné hodiny. Sazba za žhání jednoho kilogramu materiálu je převzata z ceníku společnosti ČZ a.s. a činí 22 Kč · kg<sup>-1</sup>[80].

Náklady na tepelné zpracování:

$$N_{TZ} = s_m \cdot C_{zihani} \cdot N = 0,06297 \cdot 22 \cdot 500\,000 = 692\,670 \text{ Kč}, \quad (4.7)$$

kde:  $N_{TZ}$  – náklady na tepelné zpracování [Kč],  
 $C_{zihani}$  – sazba za žhání [Kč · kg<sup>-1</sup>].

Je nutné vypočítat také náklady na provoz tvářecího automatu. Hlavní složkou jsou zde ceny energií. Výpočet uvažuje spotovou cenu ze dne 26.03.2025, která je 2,3 Kč · kWh<sup>-1</sup>[63]. K ní je připočteno dalších 40 %, což představuje regulovanou složku. Konečný tarif pro výpočet je tedy 3,2 Kč. Je uvažováno, že výkon stroje bude 42 kW, což odpovídá 75% účinnosti a využití maximálního výkonu.

Náklady na energie:

$$N_{energie} = P \cdot \eta \cdot t_{A1} \cdot C_E \cdot N = 56 \cdot 0,75 \cdot 0,000195 \cdot 3,2 \cdot 500\,000 = 13\,104 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

kde:  $N_{energie}$  – Náklady na energie [Kč],  
 $P$  – příkon stroje [kW],  
 $\eta$  – účinnost stroje [-],  
 $C_E$  – cena energie [Kč · kWh<sup>-1</sup>].

Všechny výše vypočtené náklady lze označit jako náklady přímé. Následuje propočet celkových přímých nákladů. Následně je suma vztažena k celkovému počtu kusů, výsledkem je tedy výše celkových přímých nákladů na jeden kus.

Suma přímých nákladů:

$$\begin{aligned} N_{\text{přímé}} &= N_{\text{mat}} + N_{\text{mzdy}} + N_{TZ} + N_{\text{energie}} = \\ &= 14\,183\,993 + 34\,296 + 692\,670 + 13\,104 = 14\,924\,063 \text{ Kč}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

kde:  $N_{\text{přímé}}$  – přímé náklady [Kč].

Přímé náklady přepočtené na jeden kus:

$$N_{\text{přímé 1 ks}} = \frac{N_{\text{přímé}}}{N} = \frac{14\,924\,063}{500\,000} = 29,85 \text{ Kč}, \quad (4.10)$$

kde:  $N_{\text{přímé 1 ks}}$  – přímé náklady na jeden kus [Kč].

Druhým typem nákladů jsou ty, které je třeba vynaložit ještě před samotným začátkem výroby a jsou označovány jako fixní. Patří mezi ně výdaje na stroje, nástroje a také náklady režijní. Níže je uveden výpočet nákladů na konstrukci nástrojů. Ve výpočtu je vycházeno z předpokladu, že doba konstrukce nástroje bude 250 hodin, hodinová mzda konstruktéra je 350 Kč, což s připočtením odvodů ve výši 34 % vychází na 469 Kč. Je také uvažováno, že kilová cena nástroje bude ve výši 1000 Kč · kg<sup>-1</sup> a nástroj samotný bude vážit 40 kg. Uvedené hodnoty představují výchozí předpoklady, nemusí se přesně shodovat s ekonomickou realitou.

Náklady na nástroje:

$$N_{\text{nástroje}} = C_N \cdot H_N + t_K \cdot M_K = 1000 \cdot 40 + 250 \cdot 496 = 164\,000 \text{ Kč}, \quad (4.11)$$

kde:  $N_{\text{nástroje}}$  – náklady na nástroje [Kč],  
 $C_N$  – cena nástroje [Kč · kg<sup>-1</sup>],  
 $H_N$  – hmotnost nástroje [-],  
 $t_K$  – čas konstrukce [hod],  
 $M_K$  – hodinová sazba konstruktéra [Kč · hod<sup>-1</sup>].

Součástí fixních nákladů jsou také náklady režijní. Režie zahrnují ostatní náklady podniku nepřímou související s výrobou daných produktů. Můžou jimi být náklady na skladování, expedici, reklamu, řízení, správu podniku, administrativu a jiné podpůrné složky ve společnosti. Výpočet vychází z předpokladu, že režijní náklady ve společnosti budou 15 %.

Náklady režijní:

$$N_{\text{režijní}} = N_{\text{přímé}} \cdot k_r = 14\,924\,063 \cdot 0,15 = 2\,238\,609 \text{ Kč}, \quad (4.12)$$

kde:  $N_{\text{režijní}}$  – náklady režijní [Kč],  
 $k_r$  – režijní koeficient [-].

Významnou položku tvoří také náklady spjaté se strojními zařízeními. Ekonomická kalkulace vychází z předpokladu, že podnik bude pořizovat tvářecí automat. Dalším předpokladem je, že jeho hodnota je vyčíslena na 30 000 000 Kč. Strojní zařízení bude odepisováno rovnoměrně a to po dobu deseti let. První rok bude odepsáno 5,5 % z jeho hodnoty a v následujících devíti letech se bude odepisovat 10,5 %. Výpočet je založen na odpisu ve výši 10,5 %.

Náklady na odpisy:

$$N_{\text{odpisy}} = N_{\text{stroje}} \cdot k_c = 30\,000\,000 \cdot 0,105 = 3\,150\,000 \text{ Kč}, \quad (4.13)$$

kde:  $N_{\text{odpisy}}$  – náklady na odpisy [Kč],  
 $N_{\text{stroje}}$  – Náklady na stroj [Kč],  
 $k_c$  – odpisový koeficient [-].

Suma fixních nákladů:

$$\begin{aligned} N_{\text{fixní}} &= N_{\text{nástroje}} + N_{\text{režijní}} + N_{\text{odpisy}} = \\ &= 164\,000 + 2\,238\,609 + 3\,150\,000 = 5\,552\,609 \text{ Kč}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

kde:  $N_{\text{fixní}}$  – náklady fixní [Kč].

Po spočítání přímých a fixních nákladů je přistoupeno ke stanovení rentability výroby a kusové ceny při zahrnutí stanovené ziskovosti. Zadaný díl je vyráběn pro automobilový průmysl. Marže v subdodavatelském řetězci v automotive se obecně pohybují v řádech jednotek procent. Výpočet předpokládá marži ve výši 8 %.

Výše zisku za jeden výrobní rok při uvažované marži:

$$\begin{aligned} Z_{8\%} &= (N_{\text{přímé}} + N_{\text{fixní}}) \cdot 0,08 = \\ &= (14\,924\,063 + 5\,552\,609) \cdot 0,08 = 1\,638\,134 \text{ Kč}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

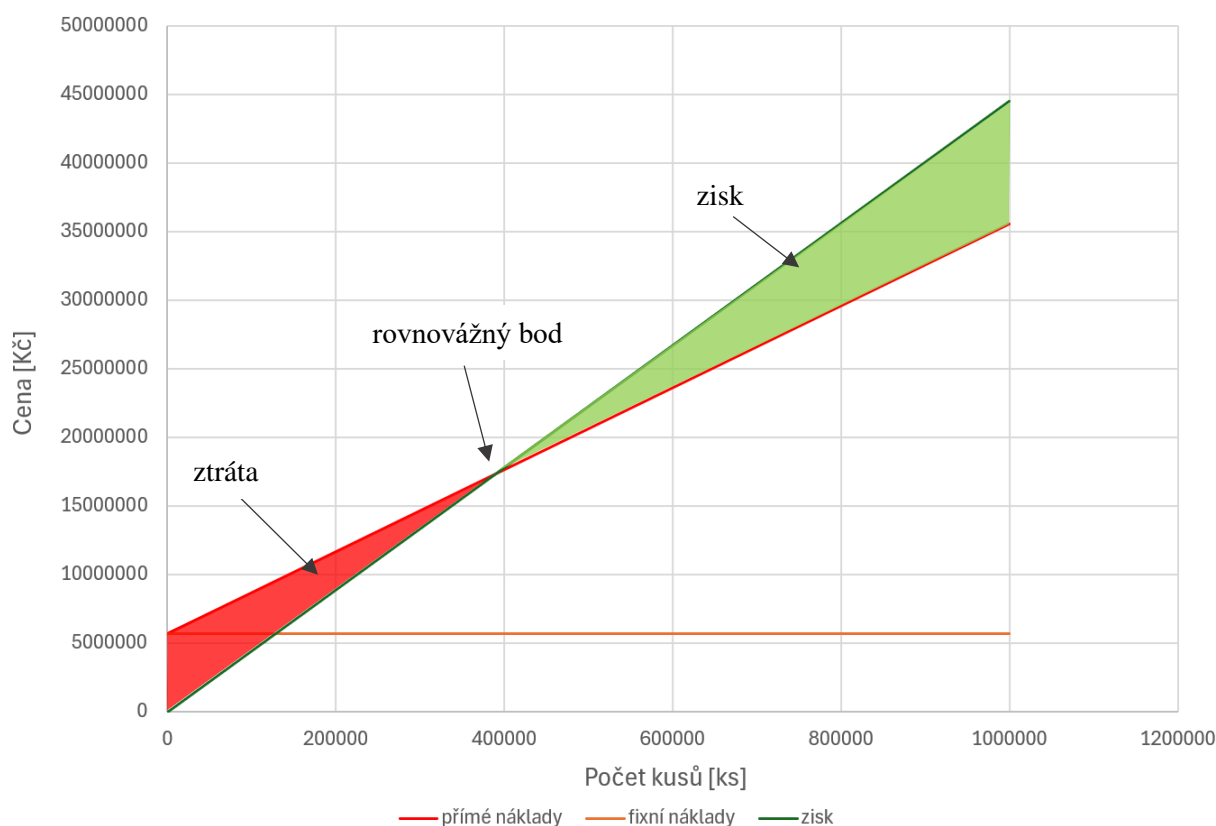
kde:  $Z_{8\%}$  – výše zisku při 8% marži [Kč].

Kusová cena při 8% zisku:

$$C_8 = \frac{N_{\text{přímé}} + N_{\text{fixní}} + Z_{8\%}}{N} = \frac{14\,924\,063 + 5\,692\,609 + 1\,638\,134}{500\,000} = 44,51 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

kde:  $C_8$  – kusová cena při 8% zisku [Kč].

Na závěr je určen rovnovážný bod, tedy počet kusů, které je potřeba vyrobit a prodat, aby zisk z prodeje pokryl náklady na výrobu. Bod se nachází v místě průsečíku přímek v grafu na obr. 82, kde červená křivka reprezentuje přímé náklady, zatímco křivka zelená zase utržený zisk z prodeje. Oranžová přímka znázorňuje hladinu fixních nákladů, které jsou konstantní. V momentě, kdy je vyroben počet kusů odpovídající rovnovážnému bodu se výroba začíná vyplácet. Utržený zisk je v případě použitého výpočetního modelu návratnosti přímo úměrný počtu vyrobených kusů. Červeně vybarvená plocha pod funkcí zisku se rovná celkovým ztrátám a zelená plocha pod funkcí zisku odpovídá celkovému zisku.



Obr. 82 Graf návratnosti.

Jak je možné číst z grafu, výroba se dle výpočtů začne vyplácet až po prodeji cca 390 000 kusů. Je však znovu nutné podotknout, že výpočet je založen na mnoha vstupních datech, která se můžou od podmínek ve skutečném a zaběhlém podniku lišit. Etablovaný podnik může mít například od dodavatelů lepší ceny, což je velmi pravděpodobné, pokud je stálým zákazníkem odbírajícím velké objemy zboží. Právě cena materiálu je ve výpočtu nejvyšším nákladem a má významný vliv na celou rozvahu. Rozvaha nezahrnuje následující výrobní operace, jako soustružení špičky pinu a vnitřního závitu, čistící operace a finální pokovování.

## ZÁVĚR

Zadáním práce bylo vypracování návrhu výroby zadaného dílce spolu s výkresovou dokumentací, potřebných výpočtů a také technicko-ekonomického zhodnocení. V první řadě byl zhodnocen výchozí stav a požadavky na výrobu spolu s výrobními možnostmi. Následovalo vypracování první teoretické části zaměřující se zejména na deformační chování materiálu, možnosti a varianty tváření za studena a materiálové zkoušky. Součástí byla také zmínka o numerických simulacích.

Na základě teoretické části byly pro zvolený hutní polotovar z materiálu Cu-ETP R240 zjištěny hodnoty veličin konstitutivního vztahu J-C po vyhodnocení provedené pýchovací zkoušky a Taylorova testu. Určeny byly hodnoty statické meze kluzu  $\sigma_0 = 125$  MPa, koeficientu deformačního zpevnění  $B = 225$  MPa, exponentu zpevnění  $n = 0,33$  a koeficientu citlivosti na rychlost deformace  $C = 0,077$ . Mez kluzu a koeficient deformačního zpevnění bylo možné určit z pýchovací zkoušky na základě závislosti síly na dráze, která byla přepočtena na závislost přetvárného odporu na logaritmickém přetvoření. Po provedení výstřelů vzorků v rámci Taylorova testu bylo třeba nakonfigurovat simulaci v softwaru Ansys, která odpovídá reálným zkušebními podmínkám a následně parametrizovat koeficient citlivosti na rychlosti deformace. Současně bylo zhodnoceno, že hutní polotovar, a sice tyč válcovaná za studena není pro výrobu součásti vhodná bez předchozího tepleného zpracování, jelikož po hutním zpracování již nedisponuje dostatečnou mírou plasticity, respektive je její zásoba plasticity téměř vyčerpána. Je možné předpokládat, že obdobná situace bude v případě drátěného polotovaru, který je vyráběn tažením za studena a který je pro zpracování na postupovém automatu vhodnější variantou. Proto je nutné podrobit polotovar před dalším zpracováním žíhací proceduře, aby došlo k rekrytalizačním pochodům a obnovení zásoby plasticity.

V další části byl na základě výpočtů přetvoření vybrán nejvhodnější průměr polotovaru. Vybrán byl drát  $\varnothing 12$  mm. Volbě průměru předcházelo stanovení přídavek na obrábění na té části pinu, kterou není možné zhotovit tvářením. Navazoval technologický návrh výroby spolu s jeho ověřením pomocí MKP simulací v softwaru Simufact Forming 2021. Na základě výstupů bylo zhodnoceno, že technologický postup byl navržen vhodně. Následovalo zhodnocení potřebných tvářecích sil. Byl proveden analytický výpočet pro dopředné protlačování v první operaci a jeho výsledek byl porovnán s výstupem ze simulací, přičemž rozdíl obou hodnot byl 2 %, což potvrzuje správnost získaných hodnot. Celková tvářecí síla činí 3 045 kN.

V další kapitole byl zvolen tvářecí stroj CHUN ZU CBF-204S na základě požadavků pro výrobu zadaného dílce a navrženého technologického postupu. Uvažován byl zpracovávaný polotovar, potřebná výška zdvihu, potřebná tvářecí síla, počet tvářecích stanic, počet zdvihů, rozměry tvářecích komor, atp. V neposlední řadě byla také vypracována výkresová dokumentace. V přílohách je k nahlédnutí jak výkres sestavy a kusovník, tak výkresy jednotlivých komponent nástroje pro poslední tvářecí operaci. Návrh zapouzdření průtlačnice byl ověřen v softwaru OPTIM97.

Na závěr bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení práce. Výpočet vycházel z předpokladu, že velikost výrobní dávky činí  $500\,000$  ks  $\cdot$  rok<sup>-1</sup>. Pro uvažovanou ziskovost 8 % bylo spočteno, že kusová cena bude 44,51 Kč. Z toho přímé náklady na 1 ks vyšly 29,85 Kč. Fixní náklady byly vypočteny na 5 692 609 Kč. Rovnovážný bod při stanovených předpokladech vyšel 390 000 ks  $\cdot$  rok<sup>-1</sup>.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Grandeur Fasteners, Inc.* Online. 2017. Dostupné z: <https://www.grandeurfasteners.com/what-is-cold-heading/>. [cit. 2025-03-28].
  2. *Lamineries Matthey.* Online. 2025. Dostupné z: [https://www.matthey.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/fichetechnique/EN/Cu-ETP\\_C.pdf](https://www.matthey.ch/fileadmin/user_upload/downloads/fichetechnique/EN/Cu-ETP_C.pdf). [cit. 2025-03-28].
  3. TANG, Y.; LOH, H.T.; WONG, Y.S.; FUH, J.Y.H; LU, L. et al. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts. Online. *Journal of UMaterials Processing Technology*. 2003, vol. 2003, no. 1, s. 368-372. ISSN 0924-0136. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00766-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00766-0). [cit. 2025-03-28].
  4. VIJAY VENKATESH, K. a VIDYASHREE NANDINI, V. Direct Metal Laser Sintering: A Digitised Metal Casting Technology. Online. *THE JOURNAL OF INDIAN PROSTHODONTIC SOCIETY*. 2013, vol. 2013, no. 1, s. 389–392. ISSN 0972-4052. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13191-013-0256-8>. [cit. 2025-03-28].
  5. ZHU, Cheng; LIU, Tianyu; QIAN, Fang; CHEN, Wen; CHANDRASEKARAN, Swetha et al. 3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage. Online. *Nano Today*. 2017, vol. 2017, no. 1, s. 107-120. ISSN 1748-0132. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2017.06.007>. [cit. 2025-03-28].
  6. MIRELES, Jorge; ESPALIN, David; ROBERSON, David; ZINNIEL, Bob; MEDINA, Francisco et al. Fused Deposition Modeling of Metals. Online. *3rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2012, vol. 2012, no. 1, s. 836-845. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-64-Mireles.pdf>. [cit. 2025-03-28].
  7. LIU, Bin; WANG, Yuxiang; LIN, Ziwei a ZHANG, Tao. Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering. Online. *Materials Letters*. 2019, roč. 2019, č. 1, s. 1-4. ISSN 0167-577X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>. [cit. 2025-03-28].
  8. MANUFACTURING GUIDE SWEDEN AB / QIMTEK AB. *Direct Laser Metal Sintering, DMLS*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/direct-laser-metal-sintering-dmls>. [cit. 2025-03-28].
  9. FICTIV. Advanced Technologies Exploration: Direct Metal Laser Sintering. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.fictiv.com/articles/advanced-technologies-exploration-direct-metal-laser-sintering>. [cit. 2025-03-28].
  10. 3D SYSTEMS. *3D Printers*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers>. [cit. 2025-03-28].
  11. MANUFACTURING GUIDE SWEDEN AB / QIMTEK AB. Fused Deposition Modeling, FDM. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. [cit. 2025-03-28].
  12. THE FABRICATOR. *Metal 3D printer eliminates the debinding step*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/metal-3d-printer-eliminates-the-debinding-step>. [cit. 2025-03-28].
  13. CHICAGO WHITE METAL CASTING, INC. *What is High Pressure Die Casting?* Online. 2022. Dostupné z: <https://cwmdiecast.com/what-we-do/die-casting-process/what-is-high-pressure-die-casting/>. [cit. 2025-03-28].
-

- 
14. YANG, H.M.; GUO, Z. a XIONG, S.M. Microstructure and mechanical properties of high-pressure die cast pure copper. Online. *Journal of Materials Processing Tech.* 20190924-0136, vol. 2019, no. 1, s. 2-9. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116377>. [cit. 2025-03-28].
  15. EMP TECH CO.,LTD. *How to control aluminum alloy die-casting mold temperature*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.empcasting.com/how-to-control-aluminum-alloy-die-casting-mold-temperature.html>. [cit. 2025-03-28].
  16. MECHANICAL-ENGINEERING.COM. *Die Casting – design guide, materials, advantages and disadvantages*. Online. 2018. Dostupné z: <https://mechanical-engineering.com/die-casting/>. [cit. 2025-03-28].
  17. 3ERP. What is CNC Machining: Definition, Process, Purpose & More. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.3erp.com/manufacturing-technology/cnc-machining/>. [cit. 2025-03-28].
  18. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Technologie obrábění*. Online. 2018. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). [cit. 2025-03-28].
  19. TOOL NOTES. *Introduction to Milling Machines*. Online. 2015. Dostupné z: <http://toolnotes.com/home/machining/mills-101/introduction-to-milling-machines/>. [cit. 2025-03-28].
  20. ESSNER MANUFACTURING. *Machining*. Online. 2023. Dostupné z: <http://toolnotes.com/home/machining/mills-101/introduction-to-milling-machines/>. [cit. 2025-03-28].
  21. WILSON-GARNER. *What Is Cold Forming?* Online. 2021. Dostupné z: <https://wilsongarner.com/what-is-cold-forming/>. [cit. 2025-03-28].
  22. NATIONAL MACHINERY. *What is Cold Forming?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.nationalmachinery.com/cold-forming-principals>. [cit. 2025-03-28].
  23. IQSDIRECTORY. *Cold Forging: Types, Uses, Process and Benefits*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/forging/cold-forging.html>. [cit. 2025-03-28].
  24. HATEBUR. *Machines & Accessories*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.hatebur.com/en/>. [cit. 2025-03-28].
  25. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
  26. KOCICH, Radim. *Termomechanické procesy tváření: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3586-0.
  27. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Technologie tváření kovů*. Online. 2016. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm). [cit. 2025-03-28].
  28. ČERNÝ, Miroslav a ŠESTÁK, Petr. *Struktura a vlastnosti moderních materiálů*. Online. 2020. Dostupné z: [https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/1\\_Struktura.pdf](https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/1_Struktura.pdf). [cit. 2025-03-28].
  29. BARTLEBY. *Plastic Deformation of Metal Single Crystals*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.bartleby.com/subject/engineering/mechanical-engineering/concepts/plastic-deformation-of-metal-single>. [cit. 2025-03-28].
  30. ENCYKLOPEDIIE FYZIKY. Bodové poruchy. Online. 2006. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/626-bodove-poruchy>. [cit. 2025-03-28].
-

- 
31. *Allgemeine Materialwissenschaft*. Online. 2016. Dostupné z: <http://web.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/>. [cit. 2025-04-01].
  32. DALIBOR, Vojtěch. *Kovové materiály*. 2006. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006.
  33. DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 4, V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Učební texty vysokých škol. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.
  34. SEN, Subhajt; BANERJEE, Biswanath a SHAW, Amit. Taylor impact test revisited: Determination of plasticity parameters for metals at high strain rate. Online. *International Journal of Solids and Structures*. 2020, vol. 2020, no. 1, s. 357-374. ISSN 0020-7683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.020>. [cit. 2025-04-01].
  35. S SAMANTARAY, Dipti; MANDAL, umantra a BHADURI, A.K. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli–Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr–1Mo steel. Online. *Computational Materials Science*. 2009, vol. 209, no. 1, s. 568-576. ISSN 0927-0256/\$. Dostupné z: <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.09.025>. [cit. 2025-04-01].
  36. LIANG, Riqiang a KHAN, Akhtar S. A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures. Online. *International Journal of Plasticity*. 1999, vol. 1999, no. 15, s. 963-980. ISSN 0749-6419/99/\$. Dostupné z [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(99\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(99)00021-2). [cit. 2025-04-01].
  37. GAO, Song; YU, Xianshun; LI, Qihan; SUN, Yingli; HAO, Zhaopeng et al. Research on dynamic deformation behavior and constitutive relationship of hot forming high strength steel. Online. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, vol. 2023, no. 1, s. 1694-1712. ISSN 2238-7854/©. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.096>. [cit. 2025-04-01].
  38. MEYERS, Marc A. *Dynamic behavior of materials*. New York: Wiley, 1994. ISBN 0-471-58262-X.
  39. DRASTÍK, František a ELFMARK, Jiří. *Plastometry a tvařitelnost kovů: určeno [též] stud. na vys. školách techn. Řada strojírenské literatury*. Praha: SNTL, 1977. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:75d5ee00-536a-11e3-ae59-005056827e52>.
  40. KOVAŘÍK, Rudolf; BENEDIKT, Vladimír a SKÁLOVÁ, Jana. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-623-1.
  41. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
  42. KITAMURA, K. a TERANO, M. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. Online. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014, vol. 2014, no. 1, s. 293-296. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>. [cit. 2025-04-01].
  43. IM, Hojun; BONG, Hyuk Jong; CHENC, Shuh Rong; RODGERS, Theron M.; BATTAILE, Corbett C. et al. Developing anisotropic yield models of polycrystalline tantalum using crystal plasticity finite element simulations. Online. *Materials Science & Engineering A*. 2018, vol. 2018, no. 1, s. 50-56. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.096>. [cit. 2025-04-01].
-

- 
44. ESMAEILPOUR, Rasoul; KIM, Hyunki; PARK, Taejoon; POURBOGHRAT, Farhang a MOHAMMED, Bassam. Comparison of 3D yield functions for finite element simulation of single point incremental forming (SPIF) of aluminum 7075. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017, vol. 2017, no. 1, s. 544-554. ISSN 0020-7403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.09.019>. [cit. 2025-04-01].
  45. MATERIÁLOVÉ MODELÝ V MKP. Online. In: . Brno: Vysoké učení technické v Brně, 24-04-2023, s. 1-45. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/800454/mod\\_resource/content/0/HPT-k-2023-24\\_04%20-%20tisk.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/800454/mod_resource/content/0/HPT-k-2023-24_04%20-%20tisk.pdf). [cit. 2025-04-01].
  46. DASAPPA, Prasad; INAL, Kaan a MISHRA, Raja. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. Online. *International Journal of Solids and Structures*. 2012, vol. 2012, no. 1, s. 3528-3550. ISSN 0020-7683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.04.021>. [cit. 2025-04-01].
  47. KUNČICKÁ, Lenka; JOPEK, Miroslav; KOCICH, Radim a DVOŘÁK, Karel. Determining Johnson-Cook Constitutive Equation for Low-Carbon Steel via Taylor Anvil Test. Online. *Materials*. 2021, vol. 2021, no. 1, s. 1-15. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14174821>. [cit. 2025-04-02].
  48. RODIONOV, Egor S.; LUPANOV, Victor G.; GRACHEVA, Natalya A.; MAYER, Polina N. a MAYER, Alexander E. Taylor Impact Tests with Copper Cylinders: Experiments, Microstructural Analysis and 3D SPH Modeling with Dislocation Plasticity and MD-Informed Artificial Neural Network as Equation of State. Online. *Metals*. 2022, vol. 2022, no. 1, s. 1-29. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met12020264>. [cit. 2025-04-02].
  49. KLEISER, Jeremy; REVIL-BAUDARD, Benoit a PASILIAO, Crystal L. High strain-rate plastic deformation of molybdenum: Experimental investigation, constitutive modeling and validation using impact tests. Online. *International Journal of Impact Engineering*. 2016, vol. 2016, no. 1, s. 1-13. ISSN 0734-743X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.019>. [cit. 2025-04-02].
  50. EAKINS, D. a THADHANI, N.N. ANALYSIS OF DYNAMIC MECHANICAL BEHAVIOR IN REVERSE TAYLOR ANVIL-ON-ROD IMPACT TESTS. Online. *School of Materials Science and Engineering*. 2015, roč. 2015, č. 1, s. 1-34. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/77004614.pdf>. [cit. 2025-04-02].
  51. SEN, Subhajit; BANERJEE, Biswanath a SHAW, Amit. Taylor impact test revisited: Determination of plasticity parameters for metals at high strain rate. Online. *Taylor impact test revisited: Determination of plasticity parameters for metals at high strain rate*. 2020, vol. 2020, no. 1, s. 1-18. ISSN 0020-7683. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.020>. [cit. 2025-04-02].
  52. ZHIYI, Cao. *Investigation of Taylor impact test of isotropic and anisotropic material through geometrical characteristics of specimens*. Diplomová práce. TUSCALOOSA, ALABAMA: The University of Alabama, 2010.
  53. TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. Akademie tváření: Počítačová podpora v technologických procesech. In: MM Průmyslové spektrum. Online. 2011. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademietvareni-pocitacova-podpora-v-technologickyh-procesech.html>.
-

- 
54. MOAVENI, Saeed. *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, c2008. ISBN 978-0-13-189080-0. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0714/2007013446.html>.
  55. ŘIHÁČEK, Jan. Přednáška z předmětu Simulace technologických procesů: *Možnosti numerických modelování*. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24].
  56. ŘIHÁČEK, Jan. Přednáška z předmětu Simulace technologických procesů: *Metoda konečných prvků*. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24].
  57. HUEBNER, Kenneth H.; DEWHIRST, Donald L.; SMITH, Douglas E. a BYROM, Ted G. *The finite element method for engineers*. Fourth Edition. New York: John Wiley, 2001. ISBN 0-471-37078-9.
  58. PEI-BAI, Zhou a LAVERS, J. High frequency losses in multi-turn coils using a boundary element model. Online. *IEEE transactions on magnetics*. 1986, roč. 22, č. 5, s. 1060-1062. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMAG.1986.1064473>. [cit. 2024-08-15].
  59. MOORE ENGINEERING. *Numerical modeling methods in water management*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.mooreengineeringinc.com/lytle-water-solutions/>. [cit. 2025-04-02].
  60. CALLISTER, William D. a RETHWISCH, David G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-40549-8.
  61. HOSFORD, William F. a CADDELL, Robert M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
  62. KONVALINA, Michal. *Optimalizace volby infillu s důrazem na maximální dynamickou odolnost*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2024.
  63. KURZYCZ. *Elektrina - ceny a grafy elektriny, vývoj ceny elektriny 1 kWh - 3 měsíce - měna CZK*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektriny-graf-vyvoje-ceny/1kWh-czk-3-mesice>. [cit. 2025-04-03].
  64. ČADA, Radek. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLEVÁNÍ – V PŘÍKLADECH*. Ostrava: VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ, 2013. ISBN 978-80-248-3016-2.
  65. MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and engineering*. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN isbn0-07-041904-3.
  66. Skriptatvareni. In: *Teorie tváření*. Online. Plzeň: ZÁPADOČSKÁ UNIVERZITA V PLZNI, c1991-2023, 11.01.2012, s. 99 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>.
  67. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Technický průvodce. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 8003006511.
  68. BABOR, Karel; FIALA, Jan a CVILINEK, Augustin. *Objemové tváření ocelí*. Řada strojír. lit. Praha: SNTL, 1967. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:476c4e20-a69e-11e2-b6da-005056827e52>.
  69. ENGINEERING PRODUCT DESIGN. *Metal Extrusion*. Online. 2024. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/metal-extrusion/>. [cit. 2025-04-02].
  70. THUNDERBIRD. *70. Impact extrusion*. Online. 2023. Dostupné z: <https://thunderbird-metals.com/impact-extrusion/when-tochoose.html>. [cit. 2025-04-02].
-

- 
71. BABOR, Karel; FIALA, Jan a CVILINEK, Augustin. *Objemové tváření ocelí*. Řada strojír. lit. Praha: SNTL, 1967.  
Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:476c4e20-a69e-11e2-b6da-005056827e52>.
  72. KO YING. *Cold Formed Parts*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.ko-ying.com.tw/cold-formed-parts.html>. [cit. 2025-04-03].
  73. STALCOP METAL FORGING. *Cold Forming*. Online. 2001. Dostupné z: <https://stalcop.com/processes/primary-processes/cold-forming/>. [cit. 2025-04-03].
  74. THUNDERBIRD METALS. *Benefits of using impact extrusion*. Online. 2024. Dostupné z: <https://thunderbird-metals.com/impact-extrusion/advantages.html>. [cit. 2025-04-03].
  75. GRAMM TEK INC. *Cold Forging*. Online. Dostupné z: [https://www.grammtek.org/productdetail\\_en.php?id=72](https://www.grammtek.org/productdetail_en.php?id=72). [cit. 2025-04-03].
  76. CHYTKA, Eduard. Podklady k tvářecím strojům [elektronická pošta]. Message to: 229942@vutbr.cz. 29.03.2023 [cit. 2023-05-01].
  77. FOREJT, Milan. Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření. In *The 2nd International Conference FORM'95. Volume 1*. Brno: TU Brno, PC-DIR Co.Ltd, 1995. s. 77-82. ISBN: 80-214-0664-X.
  78. HEINZ, Feldmann. *Protlačování ocelí*. Praha: SNTL, 1962. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:0b6de450-bc10-11e8-bbaa-005056827e52>.
  79. FERONA. *Tyč měděná kruhová, EN 13601 // průměr 12*. Online. 2017. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/30714/tyc-medena-kruhova-en-13601-prumer-12>. [cit. 2025-04-03].
  80. ČZ A.S. *CENÍK TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ*. Online. 2023. Dostupné z: [https://www.czas.cz/download/kalirna/kalirna\\_cenik\\_2022\\_12.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.czas.cz/download/kalirna/kalirna_cenik_2022_12.pdf?utm_source=chatgpt.com). [cit. 2025-04-03].
  81. FILHO, Antonio de Pádua Lima; IGOR, Ribeiro; CATANEO, Felipe Biava; CUNHA, Tiago Filipe Soares da a ANDRÉ, Mantovani. Friction and stress evaluation of copper wire drawing under different lubrication conditions. Online. *68º Congresso da ABM*. 2013, roč. 2013, č. 1, s. 3402-3413. ISSN 2594-5327. Dostupné z: <https://doi.org/10.5151/2594-5327-23437>. [cit. 2025-05-12].
  82. KHUDHIR, Waqass S. a ABBOOD, Mohanad Qusay. Analysis of Tool Geometry and Lubrication Conditions Effect on the Forming Load During Wire Drawing Process. Online. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022, roč. 2022, č. 1, s. 279-286. ISSN 2299-8624.  
Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.12913/22998624/152934>. [cit. 2025-05-15].
  83. Řiháček, Jan, odborný asistent [ústní sdělení]. Brno, 12.05.2025.
  84. *COLD FORMED*. Online. VIKING PRODUCTS. 2021.  
Dostupné z: <https://vikingproducts.com/cold-formed/>. [cit. 2025-05-20].
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
$A_1$	přetvárná práce	[J]
$A_{j1}$	měrná přetvárná práce	[J · mm <sup>3</sup> ]
B	koeficient deformačního zpevnění	[-]
C	koeficient citlivosti na rychlost deformace	[-]
$C_8$	kusová cena při 8% zisku	[Kč]
$C_E$	cena energie	[Kč · kWh <sup>-1</sup> ]
$C_N$	cena nástroje	[Kč]
$C_{zihani}$	sazba za žihání	[Kč · kg <sup>-1</sup> ]
$c_{el}$	rychlost elastické vlny	[ms <sup>-1</sup> ]
D	průměr vzorku na dopadové straně po výstřelu	[mm]
D1	průměr širší části pinu po první operaci	[mm]
$D_0$	počáteční průměr	[mm]
$D_1$	konečný průměr	[mm]
$D_{drátu}$	průměr drátu	[mm]
$D_{max}$	průměr vnější maximální	[mm]
$D_{min}$	průměr na kontaktní ploše	[mm]
$D_{si}$	střední průměr	[mm]
d	průměr vzorku před výstřelem	[mm]
d0	průměr polotovaru	[mm]
dd1	průměr díry pro závit po první operaci	[mm]
d1	průměr užší části pinu po první operaci	[mm]
E	modul pružnosti	[MPa]
$H_N$	hmotnost nástroje	[kg]
$h_0$	výška polotovaru	[mm]
$h_{pl}$	délka plastické oblasti	[m]
$F_{1op}$	tvářecí síla v první operaci	[kN]
$F_{2op}$	tvářecí síla v druhé operaci	[kN]
$F_{3op}$	tvářecí síla v třetí operaci	[kN]
$F_c$	tvářecí síla celková	[kN]
$F'$	anizotropní koeficient	[-]
$F_i$	tvářecí síla v daném čase	[N]
f	součinitel tření	[-]
$G'$	anizotropní koeficient	[-]
$H_0$	počáteční výška	[mm]
H1	výška pinu po první operaci	[mm]
$H_1$	zpěchovaná výška	[mm]
$H_i$	výška v daném okamžiku	[mm]
$H'$	anizotropní koeficient	[-]
h	vztažná výška	[m]
hd1	hloubka díry pro závit po první operaci	[mm]
$h_{beranu}$	zdvih beranu	[m]
$h_s$	výška stlačovaného vzorku	[mm]
$k_c$	odpisový koeficient	[-]
$k_r$	režijní koeficient	[-]
L	délka	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
$L_0$	původní délka	[m]
$L_1$	délka širší části pinu po první operaci	[mm]
$L_2$	délka užší části pinu po první operaci	[mm]
$L'$	anizotropní koeficient	[-]
$L_1$	deformovaná délka	[m]
$l_{\text{drátu}}$	délka drátu	[m]
$l_{\text{válečku}}$	délka válečku	[mm]
$M_K$	hodinová sazba konstruktéra	[Kč · hod <sup>-1</sup> ]
$M'$	anizotropní koeficient	[-]
$m$	exponent změkčení	[-]
$N'$	anizotropní koeficient	[-]
$N_{\text{energie}}$	náklady na energii	[Kč]
$N_{\text{fixní}}$	náklady fixní	[Kč]
$N_{\text{nástroje}}$	náklady na nástroje	[Kč]
$N_{\text{mzdy}}$	náklady na mzdy	[Kč]
$N_{\text{odpisy}}$	náklady na odpisy	[Kč]
$N_{\text{přímé}}$	náklady přímé	[Kč]
$N_{\text{přímé 1 ks}}$	přímé náklady na jeden kus	[Kč]
$N_{\text{režijní}}$	náklady režijní	[Kč]
$N_{\text{stroje}}$	náklady na stroj	[Kč]
$N_{\text{TZ}}$	náklady na tepelné zpracování	[Kč]
$n$	exponent zpevnění	[-]
$n_{\text{sh}}$	počet vyrobených kusů za hodinu	[ks]
$n_{\text{zdvihu}}$	počet zdvihů nástroje	[min <sup>-1</sup> ]
$O$	počet operací	[-]
$P$	příkon	[kW]
$P_1$	výkon potřebný pro část první operace	[W]
$p_1$	radiální tlak	[MPa]
$p_2$	kontaktní tlak	[MPa]
$p_2'$	zvětšení kontaktního tlaku od $p_1$	[MPa]
$\bar{p}_2$	kontaktní předpětí	[MPa]
$R_d$	mez pevnosti v tlaku	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	mez kluzu	[MPa]
$R_0$	poloměr polotovaru	[m]
$R_1$	poloměr přední části pinu	[m]
$r$	rozměr objemového elementu v radiálním směru	[mm]
$r_0$	součinitel anizotropie pro úhel 0°	[-]
$r_1/r_2$	poměrný dělicí poměr	[mm]
$r_2$	dělicí poměr	[mm]
$r_{45}$	součinitel anizotropie pro úhel 45°	[-]
$r_{90}$	součinitel anizotropie pro úhel 90°	[-]
$r_n$	normálová anizotropie	[MPa]
$r_{p45^\circ}$	součinitel anizotropie pro úhel 45° v příčné rovině	[-]
$r_{T45^\circ}$	součinitel anizotropie pro úhel 45° v rovině tloušťky	[-]
$r_\alpha$	součinitel anizotropie	[-]
$S_0$	počáteční plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
$S_1$	konečný plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]

Označení	Legenda	Jednotka
$S_{1p}$	průřez tvářené oblasti v 1. operaci	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{drátu}$	průřez drátu	[mm <sup>2</sup> ]
$S_i$	aktuální plocha průřezu vzorku	[mm <sup>2</sup> ]
$s$	dráha	[m]
$S_m$	spotřeba materiálu	[kg · ks <sup>-1</sup> ]
$T$	skutečná teplota	[K]
$T_0$	referenční teplota materiálu	[K]
$T_m$	teplota tání materiálu	[K]
$T_{POP}$	teplota popouštění	[°C]
$T_{TAV}$	teplota tavení	[°C]
$t$	doba průletu	[s]
$t_{A1}$	čas na výrobu jednoho dílu	[hod]
$t_{B1}$	čas na přípravu jednoho dílu	[hod]
$t_{el}$	rychlost zadní části	[ms <sup>-1</sup> ]
$t_K$	čas konstrukce	[hod]
$t_{nz}$	čas od chvíle nárazu po zastavení	[s]
$t_p$	čas produkce	[hod]
$t_s$	čas pohybu nástroje	[min]
$u$	rychlosti zadní části	[ms <sup>-1</sup> ]
$u_z$	rychlost zadní části	[ms <sup>-1</sup> ]
$V$	objem	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{pin}$	objem pinu s přísádky	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{1op}$	objem tvářené části pinu v první operaci	[mm <sup>3</sup> ]
$V_{pin}$	objem pinu s přísádky	[mm <sup>3</sup> ]
$v$	rychlost dopadu	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_d$	rychlost dopadu	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_0$	rychlost pohybu nástroje	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_s$	vytíženost stroje	[-]
$v_p$	podíl času přípravy	[-]
$v_{pl}$	rychlost plastické oblasti	[ms <sup>-1</sup> ]
$Z$	kontrakce	[-]
$\alpha$	úhel na špičce pinu po první operaci	[°]
$\alpha_r$	koeficient tepelné roztažnosti	[-]
$\hat{\alpha}$	úhel kužele v obloukové míře	[rad]
$\beta$	úhel na mezi užší a širší částí pinu po první operaci	[°]
$\beta_m$	koeficient závislosti toku materiálu vně a vevnitř plastické oblasti	[-]
$\varepsilon$	poměrná deformace	[-]
$\varepsilon_y$	poměrné přetvoření v ose y	[-]
$\varepsilon_x$	poměrné přetvoření v ose x	[-]
$\varepsilon_{L1}$	poměrná deformace podél	[-]
$\eta$	účinnost stroje	[-]
$\mu$	poissonův poměr	[-]
$\sigma$	napětí	[MPa]
$\sigma_f$	dynamická mez kluzu	[MPa]
$\sigma_y$	napětí v ose y	[MPa]

Označení	Legenda	Jednotka
$\sigma_z$	napětí v ose x	[MPa]
$\sigma_0$	deformační odpor	[MPa]
$\sigma_{ef}$	efektivní napětí	[MPa]
$\sigma_1$	napětí v ose x	[MPa]
$\sigma_2$	napětí v ose y	[MPa]
$\sigma_3$	napětí v ose z	[MPa]
$\sigma_{dov}$	dovolené napětí	[MPa]
$\sigma_{d1}$	deformační odpor v první operaci	[MPa]
$\sigma_k$	napětí odpovídající mezi kluzu	[Mpa]
$\sigma_p$	deformační odpor	[MPa]
$\sigma_{p1}$	přirozený přetvárný odpor v první operaci	[MPa]
$\sigma_{pi}$	přirozený přetvárný odpor v daném čase	[MPa]
$\tau$	smykové napětí	[MPa]
$\tau_{xy}$	smykové napětí v rovině xy	[MPa]
$\tau_{xz}$	smykové napětí v rovině xz	[MPa]
$\tau_{yz}$	smykové napětí v rovině yz	[MPa]
$\rho$	hustota	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	skutečné přetvoření	[-]
$\varphi_0$	referenční rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi_A$	skutečné přetvoření v sektoru A	[-]
$\varphi_{A,1op}$	skutečné přetvoření v sektoru A v první operaci	[-]
$\varphi_{A,2op}$	skutečné přetvoření v sektoru A v druhé operaci	[-]
$\varphi_{A,3op}$	skutečné přetvoření v sektoru A v třetí operaci	[-]
$\varphi_B$	skutečné přetvoření v sektoru B	[-]
$\varphi_{B,1op}$	skutečné přetvoření v sektoru B v první operaci	[-]
$\varphi_{B,2op}$	skutečné přetvoření v sektoru B v druhé operaci	[-]
$\varphi_{B,3op}$	skutečné přetvoření v sektoru B v třetí operaci	[-]
$\varphi_C$	skutečné přetvoření v sektoru C	[-]
$\varphi_{C,1op}$	skutečné přetvoření v sektoru C v první operaci	[-]
$\varphi_{C,2op}$	skutečné přetvoření v sektoru C v druhé operaci	[-]
$\varphi_{C,3op}$	skutečné přetvoření v sektoru C v třetí operaci	[-]
$\varphi_{ef}$	efektivní přetvoření	[-]
$\varphi_{Hi}$	skutečné přetvoření v daném čase	[-]
$\varphi_s$	skutečné přetvoření ve směru šířky vzorku	[-]
$\varphi_t$	skutečné přetvoření ve směru tloušťky vzorku	[-]
$\dot{\varphi}$	skutečná rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_0$	referenční rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varphi}_1$	střední rychlost přetvoření v první operaci	[s <sup>-1</sup> ]
$2\Delta r$	vypočítaný přesah	[mm]
$2\Delta r_s$	kontaktní přesah	[mm]
$2\Delta r_1$	stažení vnějšího průměru průtlačnice	[mm]
$2\Delta r_2$	stažení vnějšího $\emptyset$ průtlačnice	[mm]
$2\Delta r_{22}$	roztažení vnějšího $\emptyset$ objímky	[mm]

**Zkratky**

Označení	Legenda
BCC	Body Centered Cubic
CNC	Central Numeric Control
DLMS	Direct Laser Metal Sintering
FCC	Face Centered Cubic
HCP	Hexagonal Close Packed
HPDC	High Pressure Die Casting
FDM	Fused Deposition Modeling

---

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Hydraulický zkušební stroj ZD40 400kN
Příloha 2	Záznam pēchovací zkoušky (síla-dráha) nežíhaných vzorků
Příloha 3	Záznam pēchovací zkoušky (síla-dráha) žíhaných vzorků
Příloha 4	Záznam pēchovací zkoušky, poměrná deformace v ose X (DIC)
Příloha 5	Cu-ETP datasheet
Příloha 6	Technické parametry tvářecího automatu CHUN ZU CBF-204S
Příloha 7	Výsledky simulací ze Simufact Forming 2021

**SEZNAM VÝKRESŮ**

Pin	2025-DP-229942-1
Trn - 3OP	2025-DP-229942-2
Pēchovník 3OP	2025-DP-229942-3
Průtlačnice 3OP - 1	2025-DP-229942-4
Průtlačnice 3OP - 2	2025-DP-229942-5
Sestava nástroje	2025-DP-229942-6
Kusovník	2025-DP-229942-7

---

## Hydraulický zkušební stroj ZD40 400kN

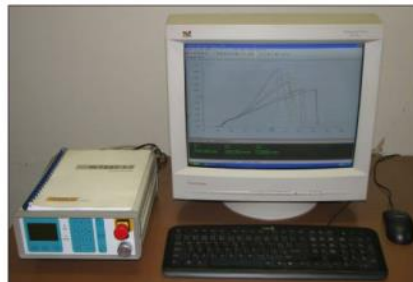
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

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 univerzálních 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

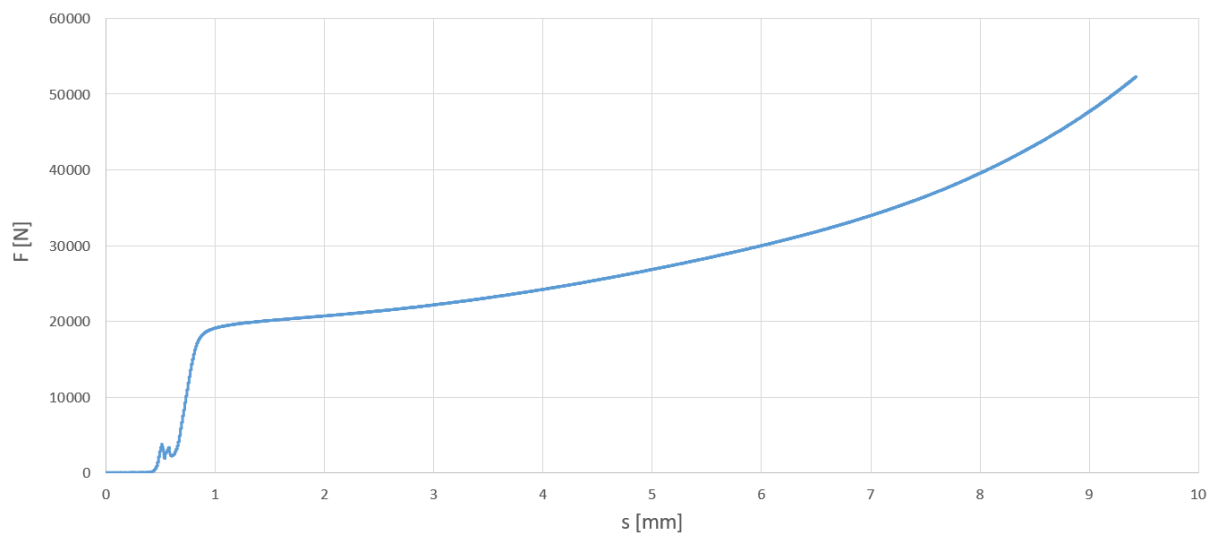
Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



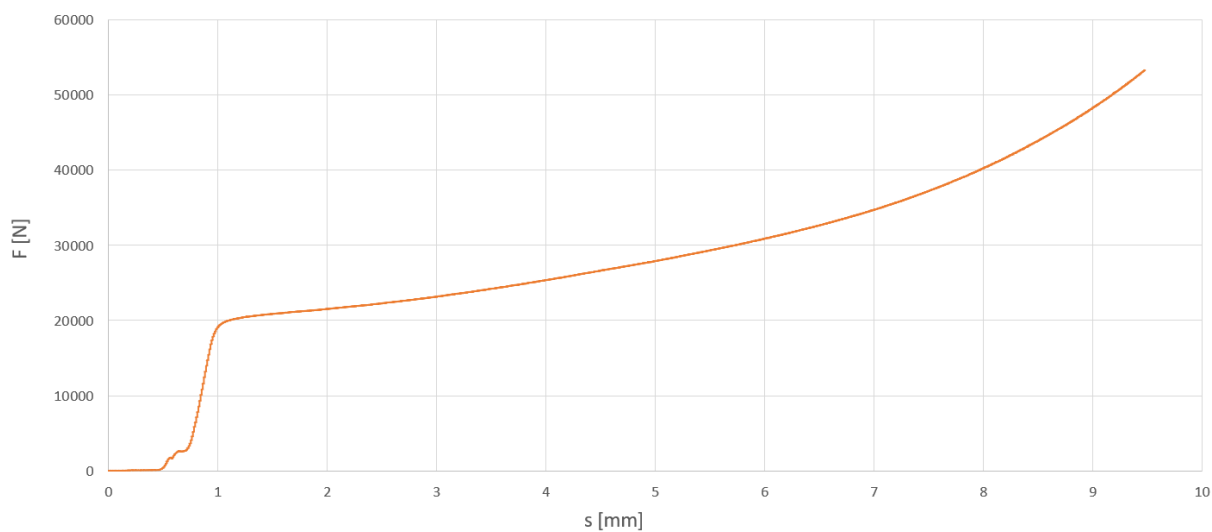
Řídicí jednotka EDC 60

Záznam pěchovací zkoušky (síla-dráha) nežíhaných vzorků

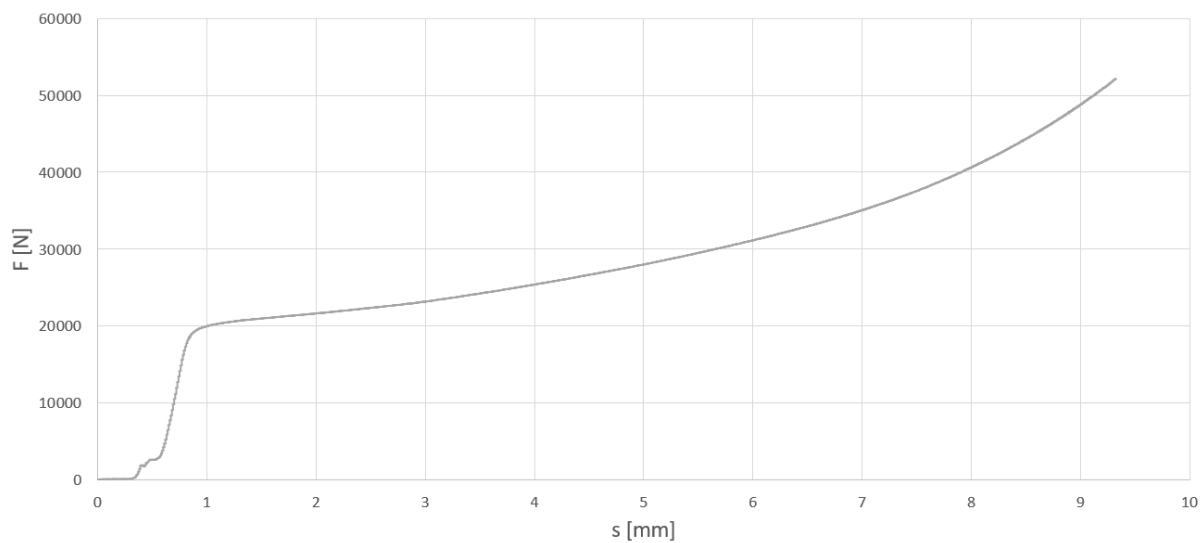
Pěchování vzorku č. 1

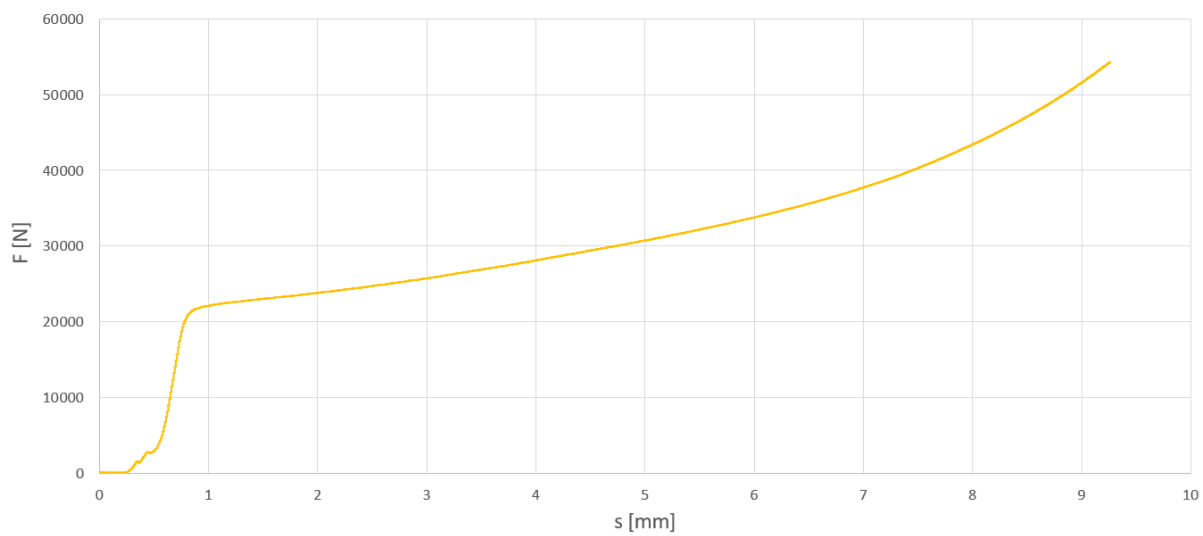


Pěchování vzorku č. 2

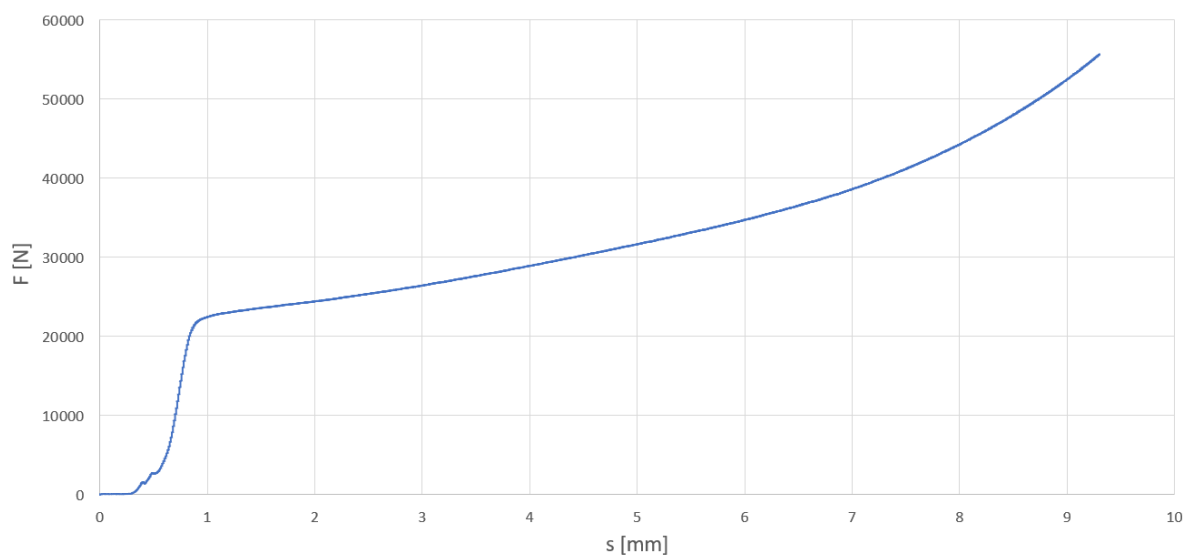


Pěchování vzorku č. 3



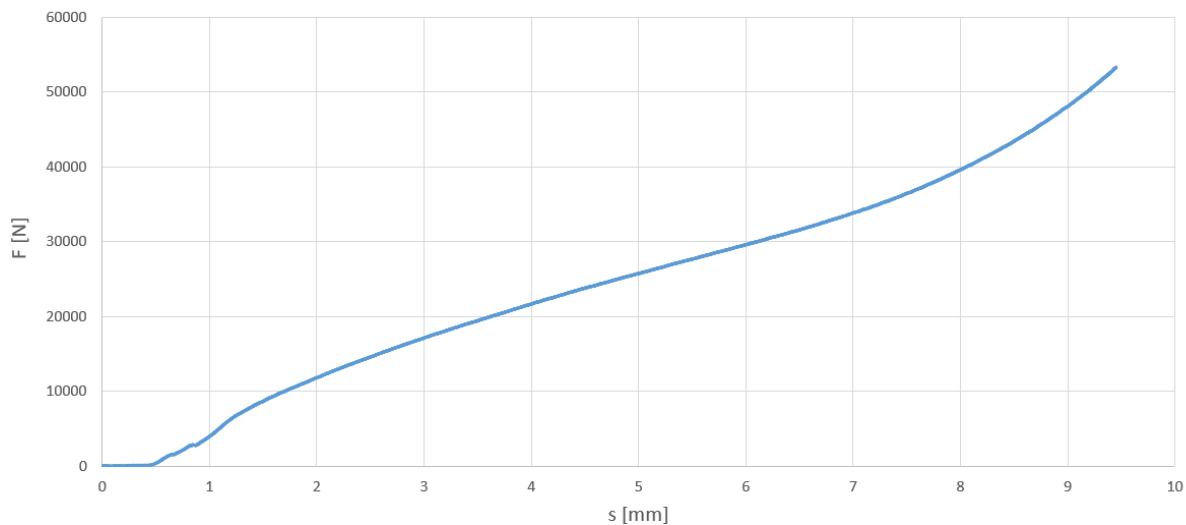
Záznam pěchovací zkoušky (síla-dráha) nežíhaných vzorků  
Pěchování vzorku č. 4

## Pěchování vzorku č. 5

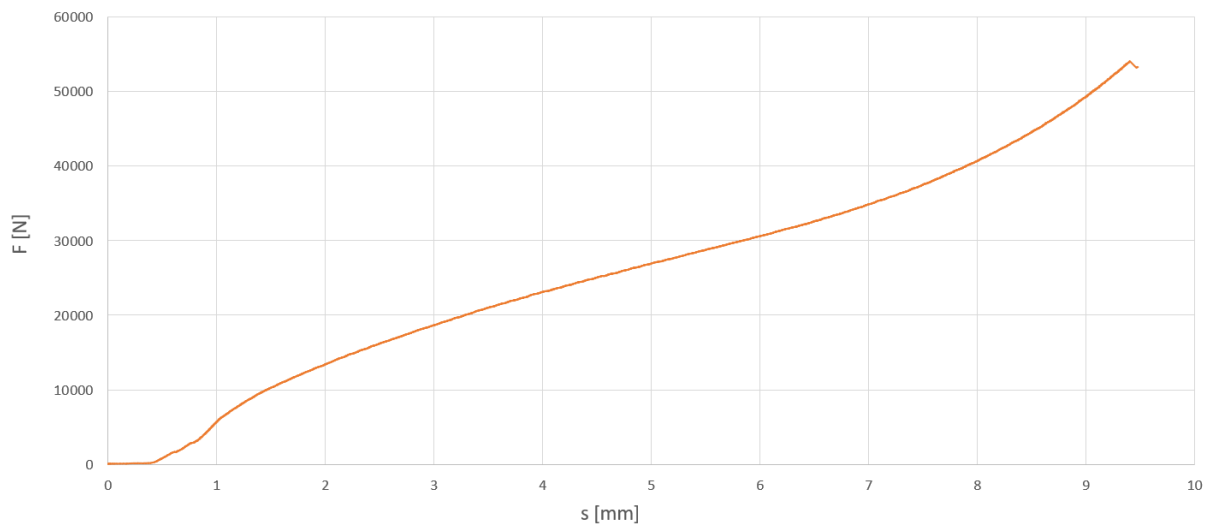


Záznam pěchovací zkoušky (síla-dráha) žíhaných vzorků

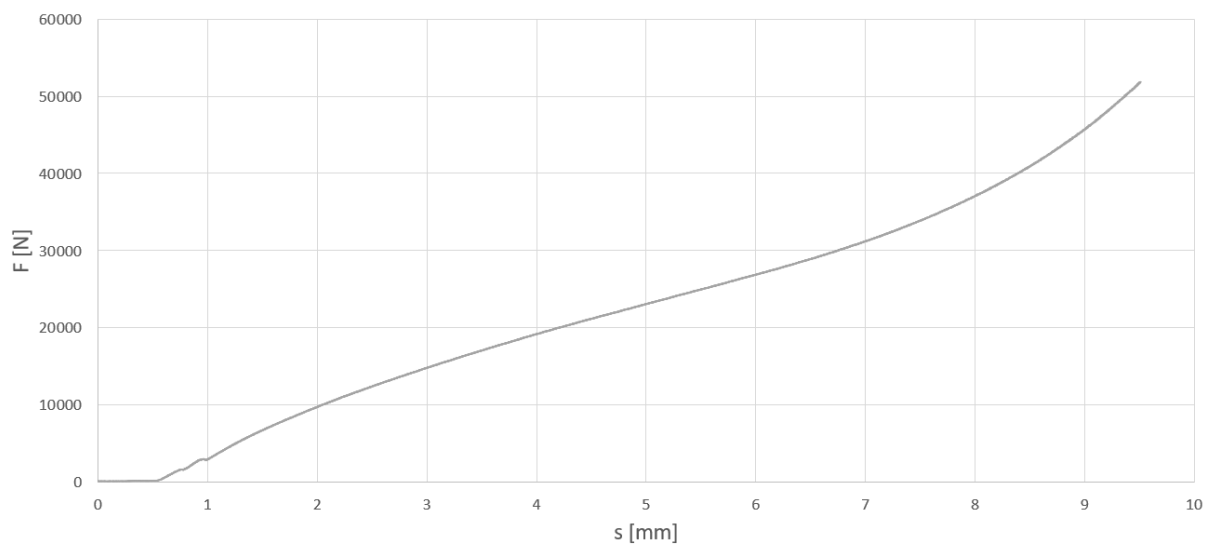
Pěchování vzorku č. 1

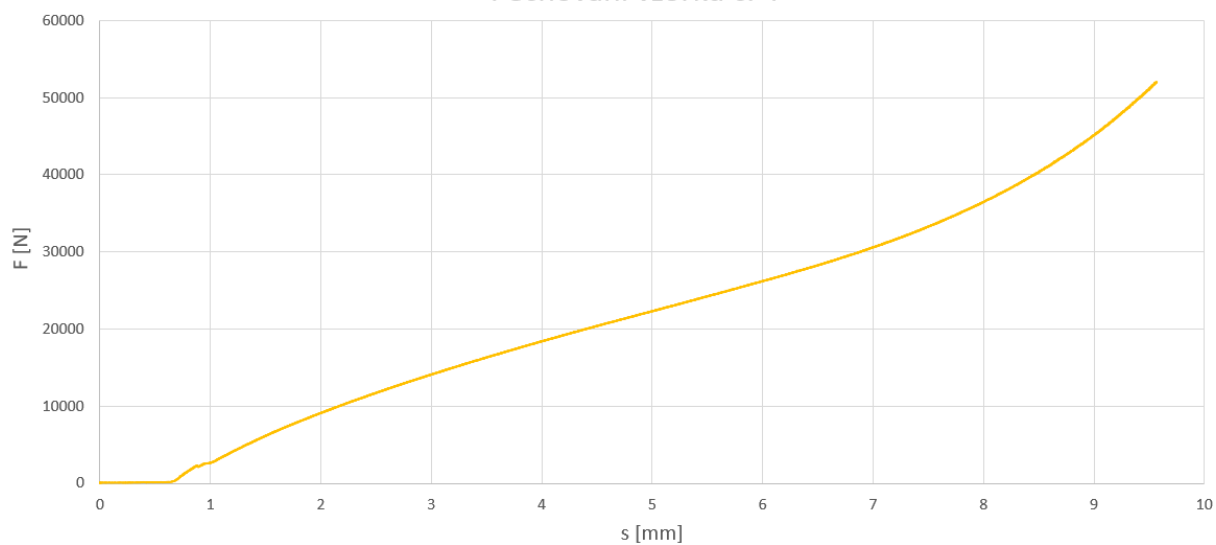


Pěchování vzorku č. 2

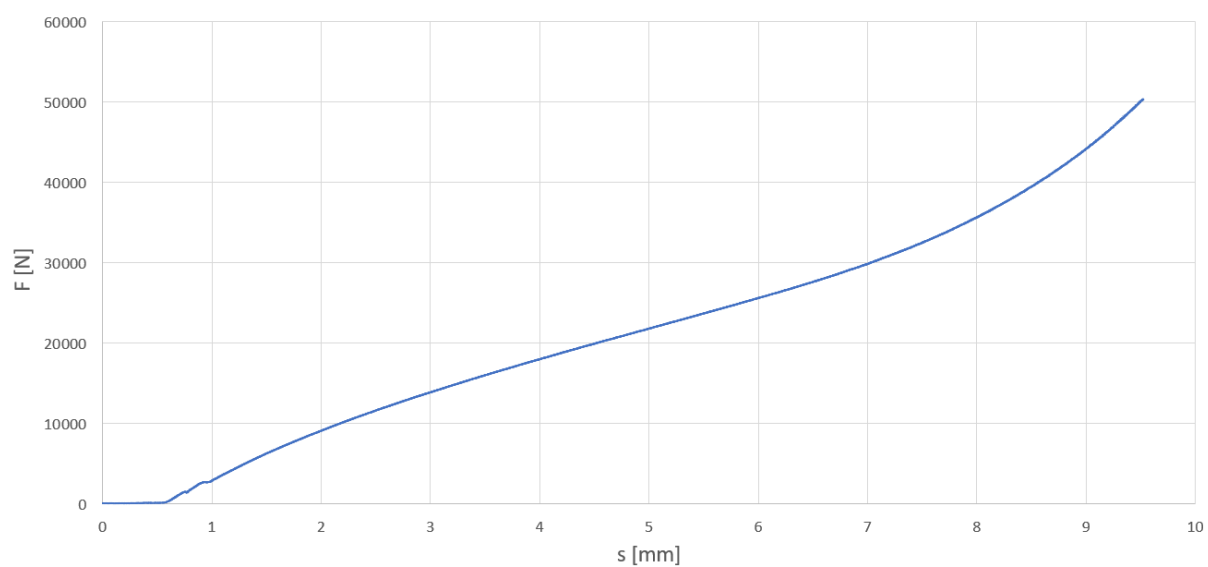


Pěchování vzorku č. 3



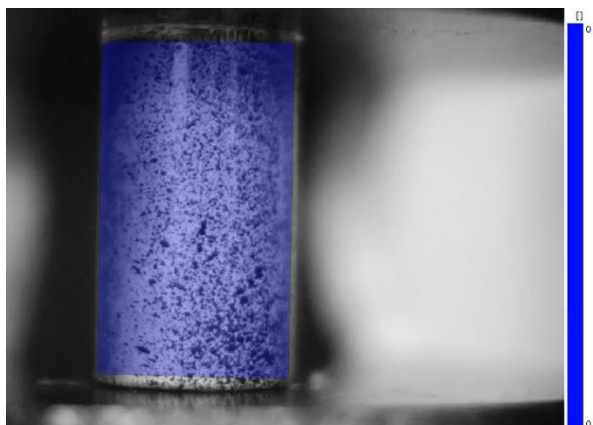
Záznam pėchovací zkoušky (síla-dráha) žíhaných vzorků  
Pėchování vzorku č. 4

## Pėchování vzorku č. 5

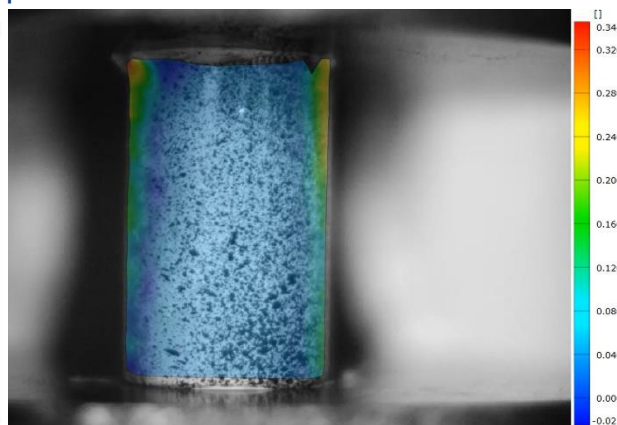


Záznam pěstovací zkoušky, poměrná deformace v ose X (DIC)

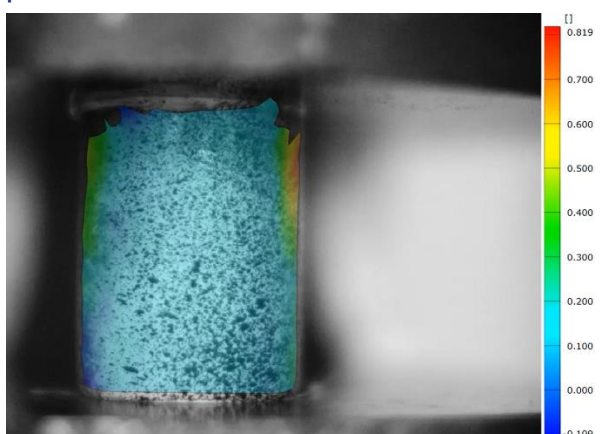
start



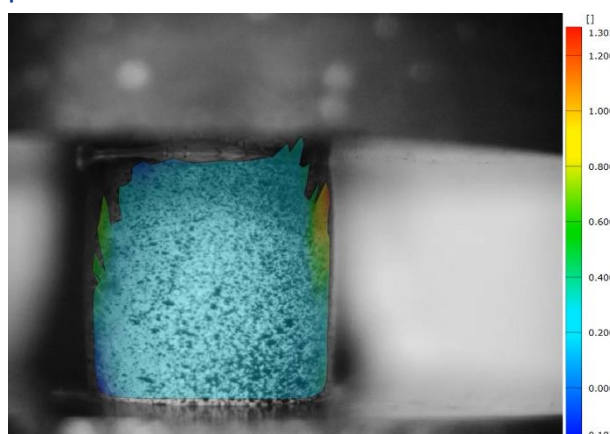
pokračování 1



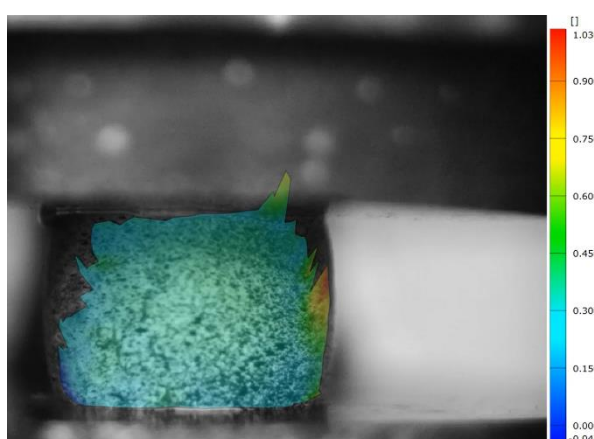
pokračování 2



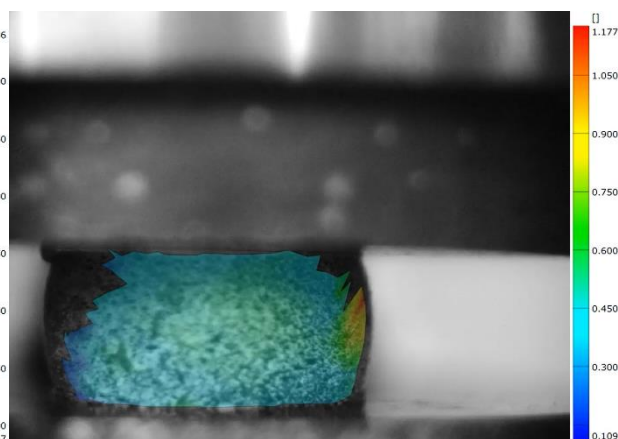
pokračování 3



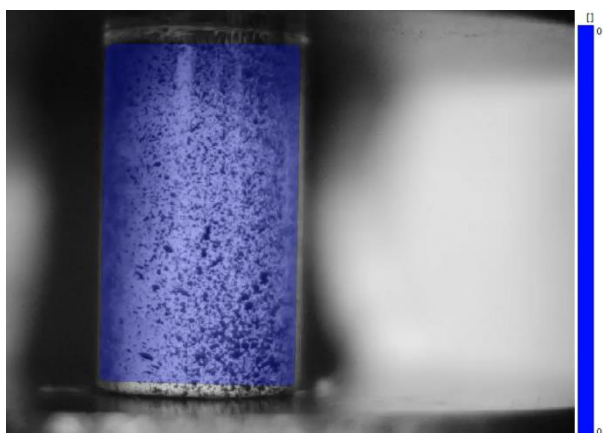
pokračování 4



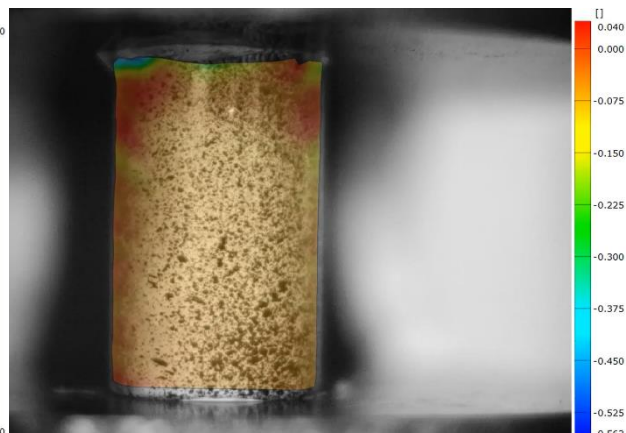
konec



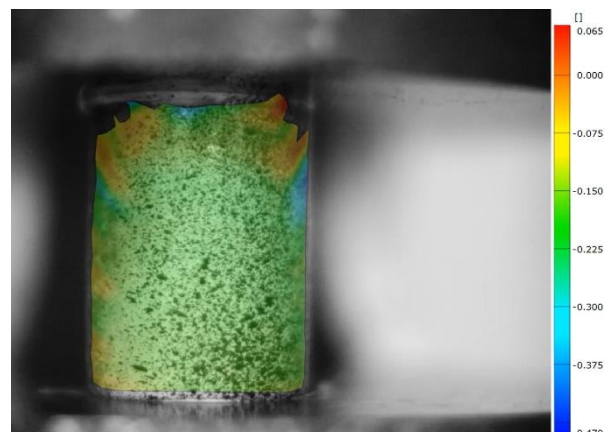
start



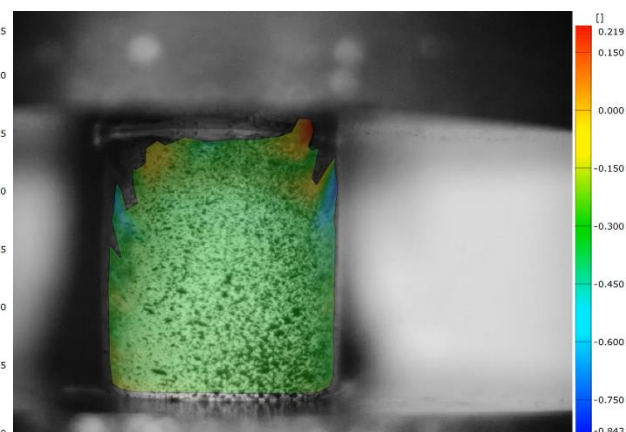
pokračování 1



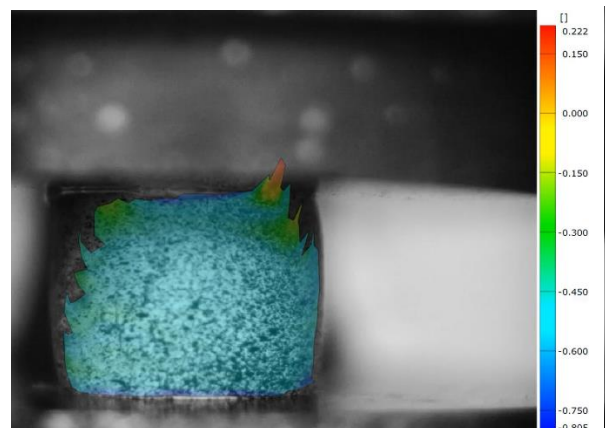
pokračování 2



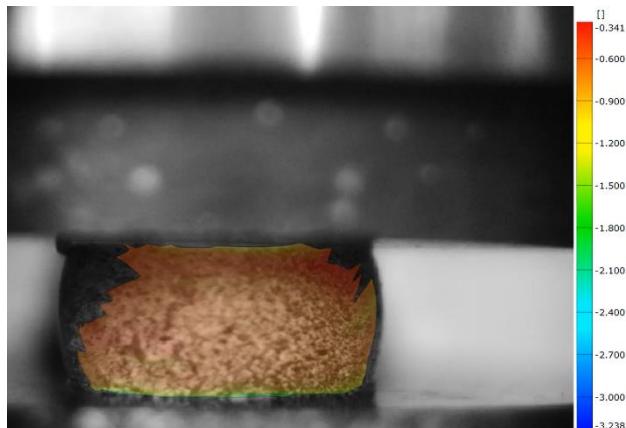
pokračování 3




pokračování 4



konec



		Edition 2014/02		<b>Cu-ETP</b>		
		Page 1/3				
<b>Designation</b>	<b>Cu-ETP</b>	DIN	EN Nr.	UNS (ASTM)	AISI	LMSA
		-	-	C11000	-	B100

### Chemical composition (Weight %)

Cu	Bi	O	Pb	Others
> 99.90	≤ 0.0005	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.03

In order to achieve maximum homogeneity and consistent quality, the actual tolerances on both alloy components and impurities, are significantly tighter and more precisely defined than the standard analysis indicated.

### Main Technological Properties

Cu-ETP (Electrolytic Tough-Pitch) is a pure copper. This copper is characterised by a minimal amount of 99.90% copper and a minimal electrical conductivity of 100% IACS (International Annealed Copper Standard). During the course of fusion and melting, a few hundred ppm of oxygen are introduced, which give the copper particular properties. The presence of copper oxide Cu<sub>2</sub>O, combined with other impurities, reduces the negative effect on the thermal and electric conductivity. This grade of copper is most frequently used in the electro-technical applications. The presence of oxygen renders the Cu-ETP inappropriate for operations requiring heating temperatures which exceed 300°C in a reducing atmosphere containing hydrogen. In fact hydrogen, which diffuses quickly at high temperature will reduce the Cu<sub>2</sub>O oxides by producing totally insoluble H<sub>2</sub>O in the copper. If such a thermal treatment is necessary, the use of copper grades without oxygen, such as a Cu-OF or Cu-OFE, are critical, as they can be thermally treated in a reduced atmosphere. Cu-ETP can easily be brazed; however, welding with inert gas or lasers are difficult. Its galvanizability as well as its tinplating by immersion is excellent and it presents an exceptional ability to cold deformation. Due to its oxide layer having a solid adherence, it also presents a high resistance to oxidation in certain polluted atmospheres, to water, and to water vapor and neutral saline solutions. In contrast, its resistance to corrosion in an oxidizing environment, in the presence of hydrous ammonia or seawater is insufficient.

### Typical manufacturing range

		Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)
<b>Rolled products</b>	Strips in coils <sup>1)</sup>	0.005 - 1.000	1.5 - 210.0	-
	Strips, sheets in <sup>1)</sup>	0.005 - 1.500	10.0 - 210.0	100 - 3000

1) All our production possibilities are not presented here. Other dimensions or other product forms upon request. Certain combinations of thicknesses and widths are not possible.

### Mechanical properties of strips

Temper			R <sub>p0.2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>50mm</sub> (%)	Hv (N/mm <sup>2</sup> )
R200	H45	Annealed	≤ 140	200-260	≥ 33	45-65
R240	H65	1/2 hard	≥ 180	240-300	≥ 8	65-95
R290	H90	hard	≥ 250	290-360	≥ 4	90-110
R360	H110	extra hard	≥ 320	≥ 360	-/-	≥ 110

<b>Designation</b>	<b>Cu-ETP</b>	DIN	EN Nr.	UNS (ASTM)	AISI	LMSA
		-	-	C11000	-	B100

### Physical properties

Modulus of elasticity	kN/mm <sup>2</sup>	127
Poisson ratio		0.34
Density	kg/dm <sup>3</sup>	8.94
Melting temperature	°C	1084
Linear dilatation coefficient	10 <sup>-6</sup> / °C	17.7 (0 to 300°C)
Thermal conductivity at 20°C	W/m °K	394
Electrical resistivity	μΩcm	1.72
Electrical conductivity	MS/m	58
Electrical conductivity	% IACS	100
Specific heat (25°C)	J/(gK)	0.386
Magnetic properties		Non magnetic

### Typical uses

Cu-ETP is primarily used in the electronic industry to produce stamped and folded parts. This alloy is also used in the superconductor industry, as a heat dissipater, as lead frames, in coaxial cables and in underwater fiber optic cables. In vacuum applications, Cu-OF or Cu-OFE are more appropriate as anodes, waveguides, joints, etc.

螺絲成形機規範表 SPECIFICATION OF BOLT FORMER ボルトホーワ仕様書 CBF SERIES 4 Stations																
機軸型番	M/C TYPE	CBF-44S	CBF-64S	CBF-84S	CBF-104S	CBF-104L	CBF-134S	CBF-134L	CBF-134LL	CBF-164S	CBF-164LL	CBF-204S	CBF-204L	CBF-204LL	CBF-254S	CBF-254L
冲程数(段) NO. OF FORGING STATION		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
壓造力 FORGING LOAD	Kg	16,000	40,000	60,000	80,000	80,000	120,000	120,000	120,000	210,000	210,000	350,000	350,000	350,000	430,000	430,000
最大剪断直径 MAX. CUT-OFF DIA.	mm	ø5	ø8	ø10	ø12	ø12	ø12	ø15	ø15	ø15	ø18	ø18	ø23	ø23	ø23	ø26
最大切断長さ MAX. CUT-OFF LENGTH	mm	66	95	100	133	185	140	190	285	195	350	195	240	360	253	320
最高速度 MAX. OUT PUT. (PCS/MIN)	PCS/ MIN.	300	240	200	160	150	150	120	80	110	70	95	80	65	70	62
打機通出衝程 K.O. STROKE K.O. STROKE K.O. STROKE	mm	10	12	19	20	30	26	30	30	30	46	46	46	46	40	46
主馬達 MAIN MOTOR メインモータ	HP	10	20	30	30	40	40	50	50	60	75	75	75	100	125	125
剪機直径 CUT-OFF DIE DIA. クナイル直径	mm	ø42x30L	ø30x45L	ø35x50L	ø45x59L	ø45x59L	ø63x69L	ø63x69L	ø55x70L	ø60x90L	ø64x100L	ø75x120L	ø75x120L	ø75x120L	ø80x130L	ø99x150L
冲具直径 PUNCH DIA. ハンチ直径	mm	ø31x85L	ø40x90L	ø45x115L	ø53x115L	ø53x115L	ø60x130L	ø60x178L	ø60x229L	ø75x185L	ø75x185L	ø90x215L	ø90x215L	ø90x215L	ø120x270L	ø120x270L
打機直径 MAIN DIE DIA. ダイス直径	mm	ø38x85L	ø50x110L	ø60x120L	ø75x135L	ø75x185L	ø86x135L	ø86x190L	ø86x305L	ø100x190L	ø100x345L	ø125x200L	ø125x240L	ø125x345L	ø140x250L	ø148x300L
重量 MACHINE WT. 機械重量	Kg	6,500	10,000	14,500	18,000	21,000	21,000	26,000	38,000	43,000	60,000	62,000	62,000	75,000	105,000	131,000
螺絲最小最大尺寸 NORMAL SIZE OF BOLT. 製造ネジ最小最大	mm	2-4	3-6	5-8	6-10	6-10	8-12.7	8-12.7	8-12.7	10-16	10-16	12-20	12-20	12-20	14-25.4	16-25.4
最短最長 SHANK LENGTH OF BLANK. 製造ネジ最短最長	mm	6-50	10-75	15-77	15-102	20-152	20-100	25-152	75-262	20-152	100-305	25-152	25-200	100-305	35-175 35-165	60-254

附註 1. 本公司保有規格修改之權利。規格修改時不另行通知。2. 生産速度隨產品形狀、材質而有所差異。  
 REMARKS 1. Modification without any notice. 2. Production speed will differ depending upon product's shape and material.  
 備考 1. 当社は機械仕様の変更することがあり、仕様の変更はだちに通知することが出来ない場合がある。2. 生産速度は製品の形状、材質によって変わる場合がある。

2012.2.13



春日機械工業  
CHUN ZU MACHINERY INDUSTRY

