

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Vliv geometrie tvářecího nástroje na mechanické vlastnosti
v procesu vícenásobné plastické deformace

Influence of Forming Tool Geometry on the Mechanical
Properties in SPD Process

Student:

Bc. Jiří Švec

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Švec**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: **Vliv geometrie tvářecího nástroje na mechanické vlastnosti v procesu vícenásobné plastické deformace**
Influence of Forming Tool Geometry on the Mechanical Properties in SPD Process

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši nových poznatků o vývoji metod zjemňování zrna v kovových materiálech se zaměřením na zvyšování efektivity procesu vícenásobné plastické deformace.
2. Uveďte nové konstrukční úpravy tvářecích nástrojů i tvářecího zařízení využívající metodu DRECE (pro plech i kulatinu) a jejich vliv na zvyšování mechanických vlastností kovových materiálů po tvářecím procesu.
3. Proveďte experimenty protlačování pásu plechu z oceli Ck55 s různými technologickými parametry (rychlost podávání pásu plechu, velikost přítlaků na předních i zadních válcích, tvářecí úhel v zóně deformace).
4. Proveďte měření a vyhodnocení změny velikosti přítlaků při konstantní podávací rychlosti a při změně podávací rychlosti a konstantních velikostech přítlaků po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením u oceli Ck55.
5. Proveďte vyhodnocení dosažených mechanických vlastností po průchodech tvářecím zařízením vzhledem k mechanickým vlastnostem výchozího stavu.
6. Proveďte celkové vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- HABIBI, A., KETABCHI, M. and ESKANDARZADEH, M.: Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211, iss. 6, pp. 1085 - 1090.
- HASSANI, F. Z., KETABCHI, M. Nano grained AZ31 alloy achieved by equal channel angular rolling process. *Materials Science Engineering: A*, 2011, vol. 528, iss. 21, pp. 6426 - 6431.
- CHENG, Y. Q., CHEN, Z. H. and XIA, W. J. Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature. *Materials Characterization*, 2007, vol. 58, iss. 7, pp. 617- 622.
- KVAČKAJ, T., KOVÁČOVÁ, A., KVAČKAJ, M., KOČIŠKO, R., LITYŇSKA-DOBRZYŇSKA, L., STOYKA, V. and MIHÁLIKOVÁ, M. TEM studies of structure in OFHC copper processed by equal channel angular rolling. *Micron*, 2012, vol. 43, iss. 6, pp. 720 - 724.
- LEE, J. C., SEOK, H. K., HAN, J. H. and CHUNG, J. Y. Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process. *Materials Research Bulletin*, 2001, vol. 36, iss. 5 - 6, pp. 997-1004.

LEE, J. C., SEOK, H. K. and SUH, J. Y. Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, iss. 16, pp. 4005-4019.
SARAY, O., PURCEK, G. and KARAMAN, I. Principles of Equal - channel Angular Sheet Extrusion (ECASE): application to IF-steel sheets. *Advanced Materials Science*, 2010, vol. 25, pp. 42 - 51.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017

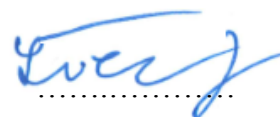

.....
podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15. 5. 2017



Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Švec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Stiborova 606/20, Olomouc

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠVEC, J. *Vliv geometrie tvářecího nástroje na mechanické vlastnosti v procesu vícenásobné plastické deformace: diplomová práce.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 60s. Vedoucí práce: Rusz, S.

Úvodní část diplomové práce je věnována rešerši nových trendů v metodách vícenásobné plastické deformace. Byly uvedeny nové konstrukční úpravy a řešení nástrojů tvářecího zařízení, využívajícího metodu DRECE. Praktická část se zabývá vlivy nastavených parametrů na efektivitu procesu SPD na ocel Ck 55. Byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti v pásu plechu oceli Ck 55 po jednotlivých průchodech a tím prokázána vhodnost dané oceli k zvýšení jakosti metodou DRECE. V poslední části je uvedeno celkové zhodnocení dosažených výsledků.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

ŠVEC, J. *Influence of Forming Tool Geometry on the Mechanical Properties in SPD Process: diploma thesis.* Ostrava: VŠB-Technical University Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 60 p. Thesis supervisor: Rusz, S.

The introductory of theoretical part diploma work deals with the research of new trends in the processes of severe plastic deformation. New construction modifications and tools of forming device were presented. In the practical part of work is provided the analyse nfluence of technological parameters on the efficiency SPD process for Ck 55 steel. The mechanical properties in the Ck 55 steel (strip sheet) were evaluated in individual passes. The suitability this steel to increase the quality by the DRECE method were demonstrated. Conclusion of the achieved results were followed up in the last part of diploma work.

Obsah

	Strana
Seznam použitého značení a symbolů	9
Seznam použitých zkratk	10
Úvod.....	11
1 Nové trendy v metodách vícenásobné plastické deformace.....	12
1.1 ECAR.....	13
1.2 Multi-ECAP-Conform.....	15
1.3 ECAP-Conform.....	16
1.4 Large-Strain Extrusion Machining (LSEM)	17
1.5 Asymmetric rolling	18
1.6 Incremental ECAP (I-ECAP).....	19
1.7 Příklady využití UFG materiálů v praxi.....	20
2 Konstrukční úpravy a řešení nástrojů a tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE	22
3 Vliv změny přítlaků a podávací rychlosti na změnu mechanických vlastností v pásu plechu oceli Ck55	29
3.1 Měření tvrdosti – Rockwell.....	29
3.2 Změna tvrdosti HRB po jednotlivých průchodech zařízením využívajícím metodu DRECE.....	30
3.3 Změna tvrdosti HRB při nižší posuvové rychlosti.....	32
3.4 Změna tvrdosti HRB při rozdílných tlacích	33
4 Vyhodnocení mechanických vlastností po průchodu tvářecím zařízením	35
4.1 Mechanické vlastnosti.....	35
4.2 Hodnocení mechanických vlastností na vzorcích po tepelném zpracování.....	38
4.3 Erichsenova zkouška.....	40
4.4 Tvrdost - Vickers.....	44
4.5 Mikrotvrdost.....	47

4.6	Metalografická analýza	50
5	Celkové vyhodnocení	52
5.1	Mechanické vlastnosti	52
5.2	Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování.....	52
5.3	Erichsenova zkouška	52
5.4	Tvrdomost – Vickers	52
5.5	Mikrotvrdomost.....	53
5.6	Metalografická analýza	53
6	Závěr.....	54
7	Seznam obrázků.....	55
8	Seznam tabulek.....	56
9	Seznam grafů	57
	Poděkování.....	58
	Seznam použitých zdrojů	59

Seznam použitého značení a symbolů

Značka	Název	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A_{80}	Tažnost	[%]
F	Síla	[N]
F_m	Zatížení na mezi pevnosti	[N]
$F_{p0,2}$	Zatížení na mezi kluzu	[N]
HRB	Tvrдость podle Rockwella	[-]
HV	Tvrдость dle Vickerse	[-]
IE	Parametr prohloubení	[mm]
p	Tlak	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
S_0	Počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče	[mm ²]
T	Teplota	[°C]
h	Prohloubení u Erichsenovy zkoušky	[mm]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[1.s-1]
\emptyset	Průměr	[mm]

Seznam použitých zkratk

CONFORM	Continuous Extrusion Forming (Kontinuální vytlačování spojené s pýchováním)
DRECE	Dual Rolls Equal Channel Extrusion (Protlačování plechu přes kanál pomocí válců)
ECAP	Equal Channel Angular Pressing (Protlačování rovnostranným pravouhlym kanálem)
ECAR	Equal Channel Angular Rolling (Rovnostranné pravouhlyé válcování)
HV	Tvrlost dle Vickerse
HRB	Tvrlost dle Rockwella
I-ECAP	Incremental ECAP (přírůstkové protlačování rovnostranným pravouhlym kanálem)
LSEM	Large-Strain Extrusion Machining (Extruzní obrábění při vysokém tlaku)
TZ	Tepelné zpracování
UFG	Ultra Fine Grained Materials (Ultra jemnozrné materiály)
SPD	Severe Plastic Deformation (Vícenásobná plastická deformace)
SEM	Skenovací elektronové mikroskopie

Úvod

Při současných požadavcích průmyslu na namáhané strojní součásti je třeba neustálého výzkumu a vývoje. Jednou z cest, jak dosáhnout vhodných vlastností materiálu, a to především tam, kde je třeba kombinovat malé rozměry součásti s jejich vysokou pevností, je zjemňování zrna.

Výzkum a výroba ultra-jemnozrných (UFG) materiálů se jeví jako způsob, který má z hlediska konstrukce a funkce velký potenciál vyhovět dnešním požadavkům kladeným na strojní součásti. V současné době je již známo, že docílení jemnozrné struktury lze dosáhnout intenzivní plastickou deformací. Více-násobná plastická deformace (SPD) je procesem, který je již několik desetiletí zkoumán za účelem vytvoření jemnozrné struktury v materiálu a zlepšením tak jeho fyzikálních a mechanických vlastností. K dnešnímu dni je ve fázi vývoje již množství metod, které využívají SPD k docílení optimálních vlastností materiálu. Při vývoji těchto metod jsou zkoumány ocelové materiály s různým obsahem uhlíku i neželezné kovy a jejich slitiny.

Pro úspěšné zavedení technologií využívajících SPD k docílení požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností do průmyslové výroby je třeba, aby došlo k jejich optimalizaci a to zejména z hlediska produktivity. Významným pokrokem je zavedení kontinuálních procesů.

Tato práce je zaměřena na vývoj metody DRECE, která je díky konstrukci tvářecího zařízení kontinuálním procesem. Tvářecí zařízení je ve fázi vývoje a probíhají na něm experimenty na ocelích i neželezných kovech a jejich slitinách. V této práci byl zkoumán vliv geometrie nástroje a tvářecích parametrů na efektivnost metody při zvyšování jakosti pásu plechu oceli Ck 55.

1 Nové trendy v metodách vícenásobné plastické deformace

Zájem o nové výrobní technologie UFG materiálů je v čele světového výzkumu a vývoje. Pro dosažení ultra-jemnozrné struktury nebo nanostruktury je využíváno extrémní plastické deformace. U metod založených na principu SPD dochází při tvářecím procesu u výchozího materiálu k podstatnému zjemnění zrna. Velikost zrn po využití SPD procesů dosahuje hodnot 200 – 1000 nm. Při tvářecím procesu dále dochází k nárůstu hustoty dislokací, které jsou příčinou vzniku substrukturních jevů, kterými jsou například subzrna, dislokační sítě apod[1,2].

Dosažení jemnozrné struktury v široké škále materiálů je jednou z cest k dosažení takových vlastností materiálu, které se mohou jevit velmi užitečnými pro konstrukční a funkční aplikace požadované koncovým zákazníkem. V průběhu uplynulých dvou desetiletí výroba ultra-jemnozrných materiálů procesem vícenásobné plastické deformace získala své uplatnění v praxi[3].

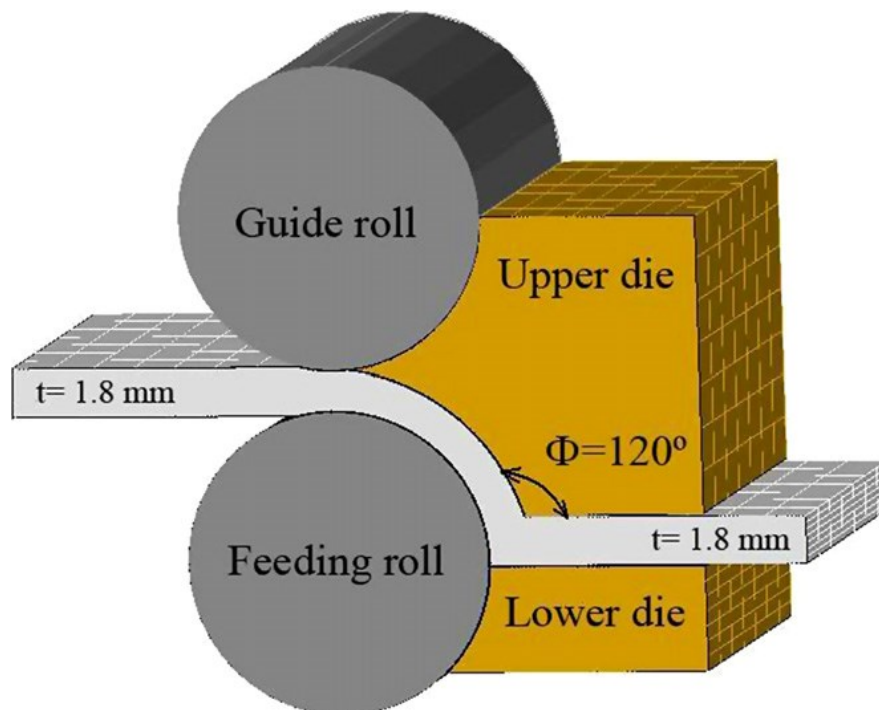
Důležitou vlastností nových metod SPD je jejich kontinuita. Kontinuální proces je jedním ze základních předpokladů v průmyslu a pro vyrábění dlouhých pásů plechu nebo tyčí. Metoda DRECE splňuje tuto podmínku, a proto může být snadno zabudována do výrobní linky, díky čemuž je vhodná pro následné uplatnění v praxi[3].

Vybrané nové technologie SPD:

- ECAR
- Multi-ECAP-Conform
- ECAP-Conform
- LSEM
- Asymmetric rolling
- I-ECAP

1.1 ECAR

Metoda ECAR je založena na válcování rovnostranným pravoúhlým kanálem. Při této metodě je využíváno extrémní plastické deformace ke snížení velikosti zrna u tvorby dlouhých tenkých plechů. Princip metody je znázorněn na obr. 1. Připravený vzorek je přiváděn do nástroje metody ECAR za pomoci dvou válců. Samotný proces SPD je uskutečňován v kanálu o tloušťce 1,8 mm. Nástrojový úhel mezi vstupním a výstupním kanálem je 120° [4].



Obr. 1 Metoda ECAR[4].

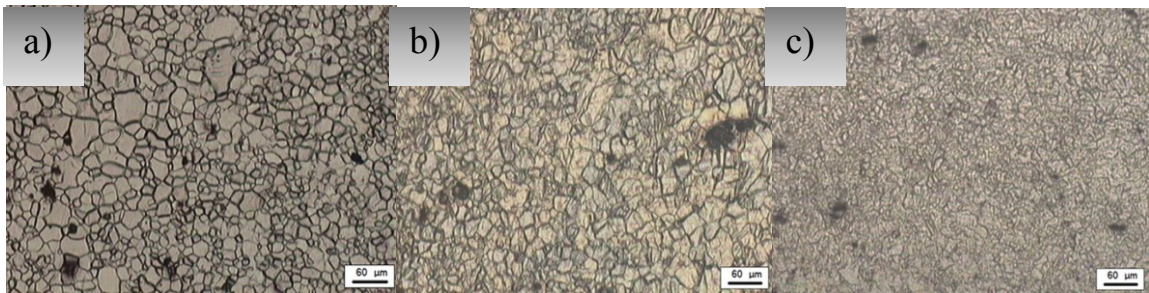
Při vývoji této metody byl zkoumán vliv počtu průchodů nástrojem ECAR na strukturu hořčíkové slitiny AZ31. Pro maximální účinnost zjemnění zrna v materiálu a současně zabránění vzniku trhlin byly vzorky předehřívány. Před každým průchodem byl proveden předehřev na 360°C po dobu 3 minut, přičemž se teplota během procesu snížila na 170°C . Mezi jednotlivými průchody je vzorek otočen o 180° kolem své osy. Po deseti průchodech nástrojem ECAR byla provedena analýza výsledné struktury[4].

Pro zkoušení hořčíkové slitiny AZ31 byly použity vzorky o rozměrech 250 mm x 20 mm x 18, mm (délka x šířka x tloušťka). Chemické složení slitiny je uvedeno v Tab. 1[4].

Tab. 1 Chemické složení AZ31[4].

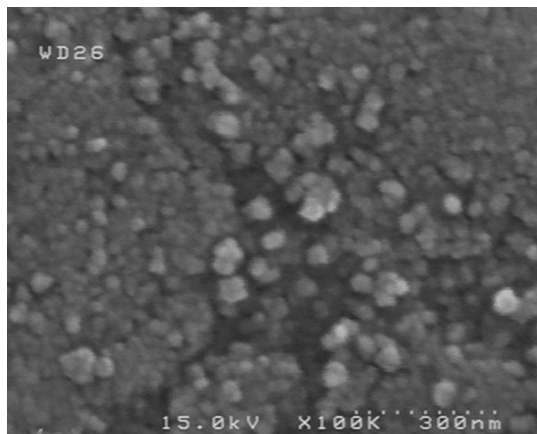
Prvek	Al	Zn	Mn	Mg
hm.podíl [%]	3,2	1,05	0,46	zbytek

Za použití optické mikroskopie, skenovací elektronové mikroskopie (SEM), analytického skenovacího elektronového mikroskopu (FESEM a ASM) byly zkoumány mikrostrukturální změny. Vlivem počtu průchodů se zvyšovalo zjemnění zrna. Snímky pořízené na vzorcích po jednotlivých průchodech za pomoci optické mikroskopie jsou uvedeny na obr .2[4].



Obr. 2 a) výchozí stav b) po 2. průchodu c) po 8. průchodu[4]

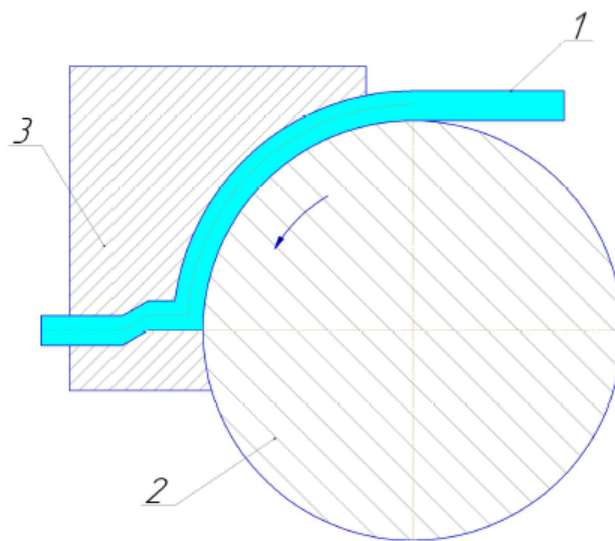
Po 10. průchodu bylo dosaženo snížení střední velikosti zrna na 14-70 nm. Fotodokumentace z metalografické analýzy pomocí metody FESEM je uvedena na obr. 3[4].



Obr. 3 Vzorek po 10. průchodu zařízením ECAR[4].

1.2 Multi-ECAP-Conform

Metoda Multi-ECAP-Conform je založena na kombinaci tří po sobě jdoucích střižných systémů během jednoho průchodu zařízením. Tyč kruhového průřezu je podrobena kontinuálnímu „úhlovému“ tváření. V první fázi je polotovár přiváděn za pomoci válce na vstup pracovního kanálu s drážkou ve tvaru písmene V, který je vytvořen mezi pevnou základnou nástroje a samotným válcem. V druhém kroku je polotovár protlačen pracovním kanálem. Tímto způsobem je u metody Multi-ECAP-Conform dosaženo zjemnění zrna. Princip metody je uveden na obr. 4[5].

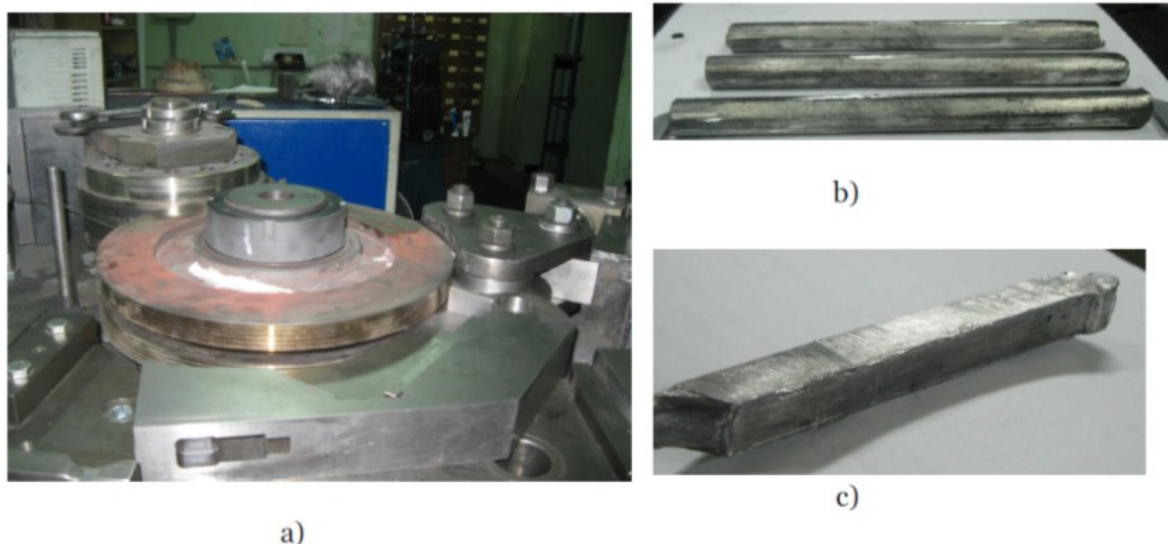


Obr. 4 Metoda Multi-ECAP-Conform: 1 - polotovár, 2- válec, 3 - nástroj[5].

Při experimentech byla využita hliníková slitina AL 6101 v homogenizovaném stavu. Chemické složení slitiny je uvedeno v Tab. 2. Z výchozího ingotu byl pro experiment vyřezán polotovár čtvercového průřezu o délce hrany 12 mm a celkové délce 150 mm. Před samotný proces metody Multi-ECAP-Conform bylo zařazeno tepelné zpracování a to žihání na 540°C po dobu 2 hodin s následným kalením do vody. Zařízení je k dispozici v Ústavu fyziky pokročilých materiálů, Ufa State Aviation Technical University. Pohled na zařízení, polotovár a protlačený vzorek je uveden v obr. 5[5].

Tab. 2 Chemické složení Al 6101[5].

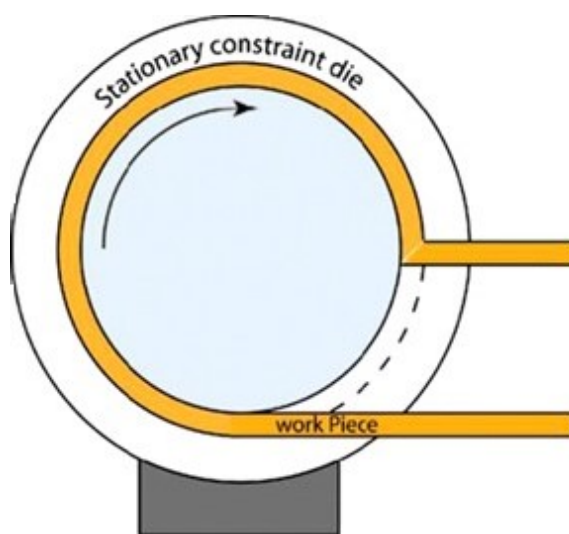
Prvek	Si	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn
hm.podíl [%]	98,15	0,8	0,41	0,01	0,03	0,5	0,1



Obr. 5 Multi-ECAP-Conform: a) tvářecí nástroje, b) polotovary před zpracováním, c) vzorek po protlačení[5].

1.3 ECAP-Conform

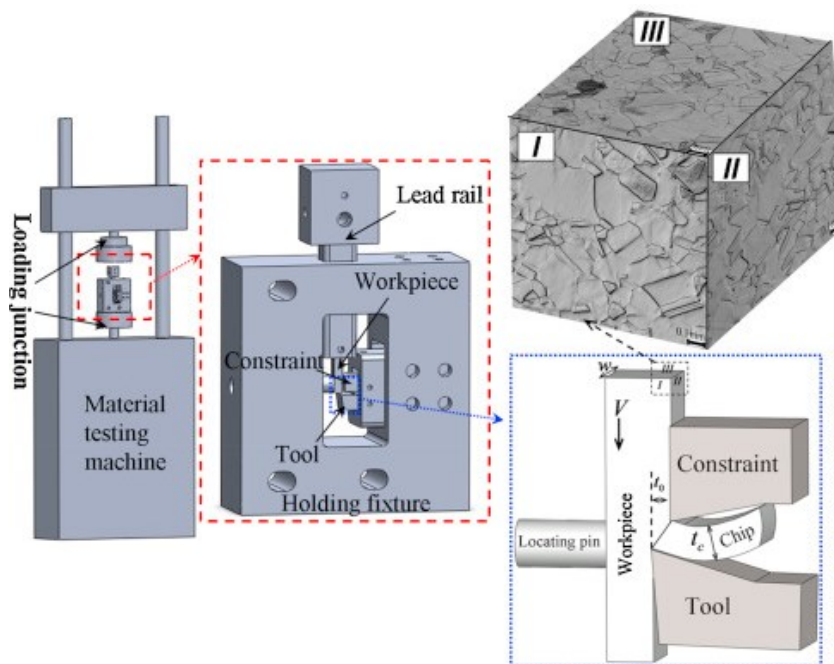
Metoda ECAP-Conform (ECAP-C) vznikla kombinací technologií ECAP a Conform pro výrobu tyčí a drátů. Metoda je založena na použití rotačního hřídele, obsahujícího přesně zhotovenou drážku pro průchod polotovaru. Polotovary jsou přiváděny do matrice a jsou poháněny třecími silami. Myšlenka metody ECAP-C má potenciál při přípravě UFG materiálů pro komerční účely díky tomu, že proces se liší od ECAPu kontinuálně. Na obr. 6 je uvedeno schéma principu metody ECAP-Conform[6].



Obr. 6 Princip metody ECAP-Conform[6].

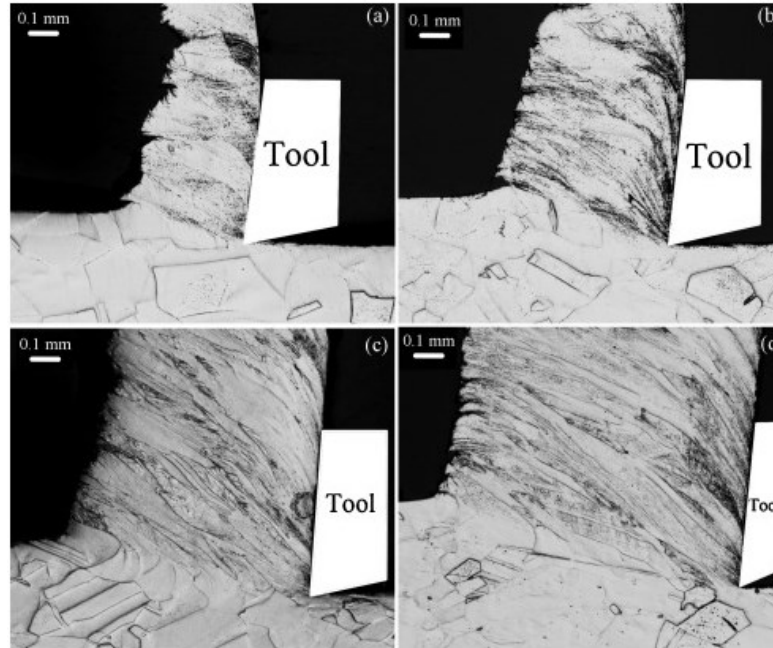
1.4 Large-Strain Extrusion Machining (LSEM)

Obrábění, případně řezání je postup, při kterém je přebytečný materiál z obrobku odstraňován ve formě třísek. Bylo dokázáno, že obrábění je jeden ze způsobů dosažení extrémní plastické deformace a tím i jemnozrné struktury. Schéma procesu využití metody LSEM je zobrazeno na obr. 7[7].



Obr. 7 Metoda LSEM[7].

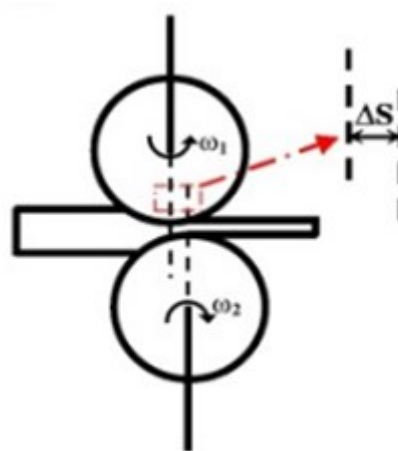
Při procesu metody LSEM je obrobek vtlačován do nástroje se speciálním tvarem, který je pevně a nepohyblivě upevněn v zařízení, dochází k oddělování třísky. Produktem této metody je tenký pás materiálu s jemno-zrnnou strukturou. Bylo zjištěno, že účinnost celého procesu je závislá kromě geometrie nástroje hlavně na velikosti oddělované třísky (omezenou geometrií nástroje a silovými parametry) a posuvové rychlosti. Při velkých posuvových rychlostech a tím i vysokých rychlostech deformace dochází k vysokému ohřevu polotovaru a tím i degradaci vytvořené jemnozrné struktury. Při experimentech bylo zkoušeno oddělování různých tloušťek třísky a tím vytváření polotovarů rozdílných velikostí. Snímek z experimentů je uveden na obr. 8[7].



Obr. 8 Oddělování třísek o různých velikostech metodou LSEM[7].

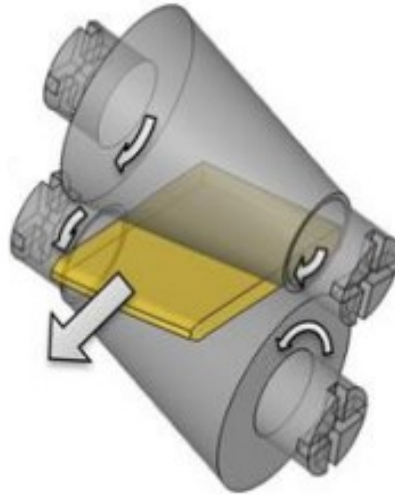
1.5 Asymmetric rolling

Asymetrické válcování je dobře známým procesem tvorby UFG materiálů díky schopnosti vyvolat intenzivní smykové napětí v celé tloušťce zkoušeného vzorku. Asymetrické válcování je proces, při kterém je mezi horní a spodní válec, které mají různé obvodové rychlosti, případně kuželovitý tvar, vložen zkušební vzorek a převálcován. Schéma procesu asymetrického válcování je uvedeno na obr. 9[8].



Obr. 9 Asymetrické válcování[8].

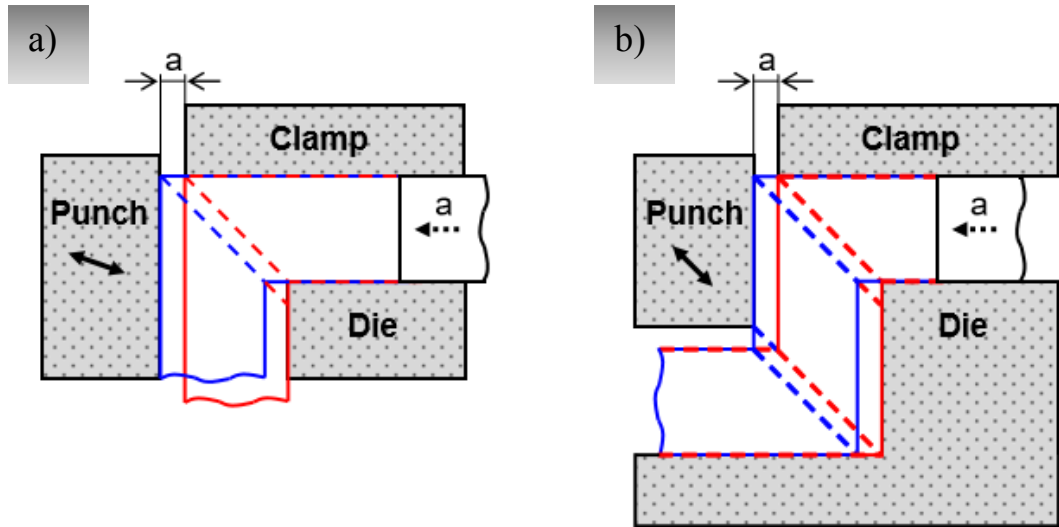
Pro dosažení rovnoměrného zpevnění je vzorek po každém průchodu otočen o 90° . Ve srovnání s běžným „symetrickým“ válcováním dochází při asymetrickém válcování k extrémním plastickým deformacím a ke vzniku odlišných struktur. Asymetrické válcování s kuželovitými válci je zobrazeno na obr. 10[8].



Obr. 10 Asymetrické válcování s kuželovitými válci[8].

1.6 Incremental ECAP (I-ECAP)

Tato metoda byla vyvinuta, jako rozšíření technologie ECAP. Metodu I-ECAP je možno využít při SPD spojitých tyčí, desek a plechů. Zařízení, které využívá tuto metodu, se skládá z vratného razníku, který uskutečňuje samotný proces, upínací desky, která drží polotovary během deformace a podavače, který polotovary přisouvá, když nedochází k deformaci. Celé zařízení je poháněno hydraulickými pohony řízenými PLC. Stroj je schopen deformace polotovarů při pokojové teplotě, i při zvýšených teplotách. Polotovary jsou ohřívány elektricky. Zařízení disponuje integrovaným chladicím a mazacím systémem. Za účelem snížení počtu průchodů, byly zkoumány možnosti použití kanálu s dvojitým zakřivením. Schéma procesu metody I-ECAP je uvedeno na obr. 11[9].

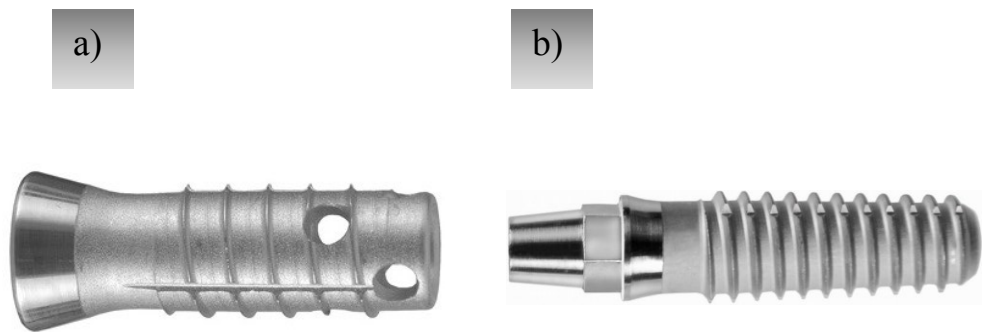


Obr. 11 Metoda I-ECAP: a) pravoúhlý kanál, b) dvakrát zakřivený kanál[9].

1.7 Příklady využití UFG materiálů v praxi

Materiály zhotovené SPD procesem mají velký potenciál využití v praxi. Takto připravené materiály mohou být použity při výrobě například vázací techniky, výrobě zámků, v automobilovém průmyslu, při konstrukci zemědělských strojů, dále při výrobě malých součástí, kde jsou kladeny nároky na pevnost. Možnosti využití ultrajemnozrných materiálů v průmyslové výrobě jsou limitovány odezvami potenciálních průmyslových partnerů[3].

Titanový materiál, který byl nanostrukturován metodou ECAP-C byl využit společností Timplant s.r.o. (Ostrava, Česká republika) k výrobě nové generace zubních implantátů pod značkou Nanoimplant™. Díky vlastnostem UFG materiálu má tento implantát menší rozměry než běžně používaný implantát. Průměr implantátu z UFG materiálu je 2 mm, což je o 1,5 mm méně, než má běžně používaný implantát. Mále rozměry implantátu jsou pro pacienta výhodou z hlediska menšího poškození během chirurgického zákroku a v neposlední řadě mají také lepší biologickou snášenlivost. Rozdíl mezi běžně používanými implantáty a implantáty zhotoveným pomocí SPD procesu je zobrazen na obr. 12[3].



Obr. 12 Součásti zubních implantátů: a) běžně používaný implantát
b) NanoimplantTM[3]

Firma HOBES, spol. s.r.o. využila materiál získaný průchodem tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE pro výrobu tvz. závory. Tato součást byla využita při konstrukci zadlabacího zámku. Výrobek firmy HOBES, spol. s.r.o. je uveden na obr.13[3].



Obr. 13 Zadlabací zámek firmy HOBES, spol. s.r.o[3].

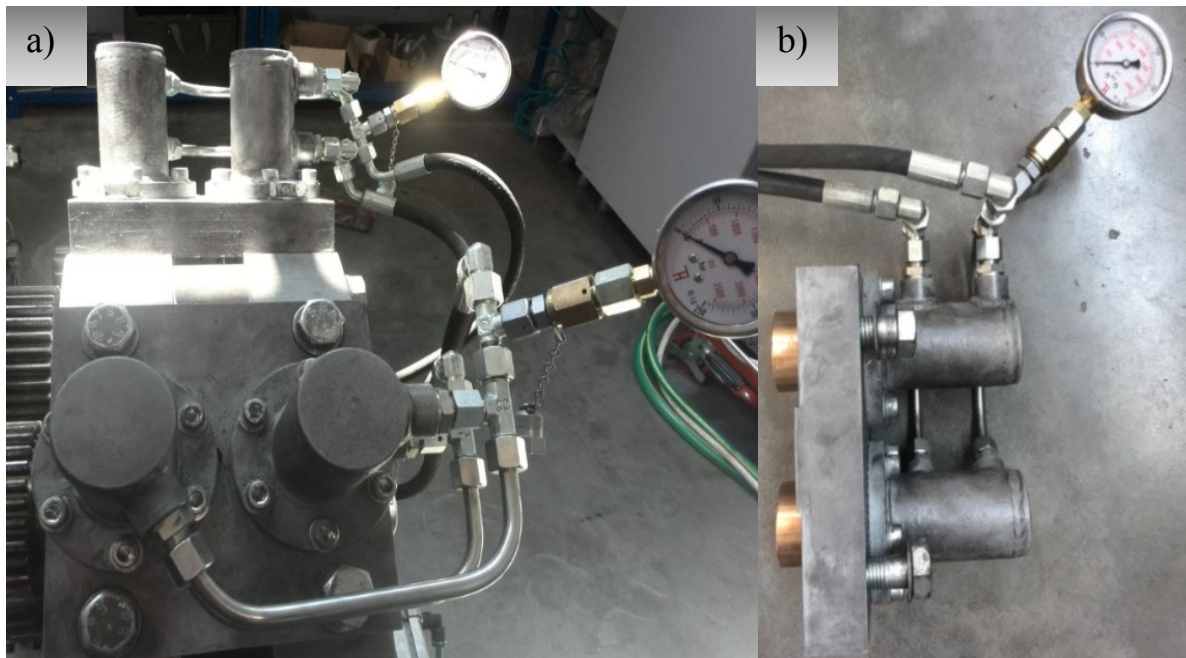
2 Konstrukční úpravy a řešení nástrojů a tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE

Metoda DRECE využívá intenzivní plastickou deformaci materiálu. Tento proces je založen na principu dvou již známých technologií ECAP a CONFORM. Tvářecí zařízení využívající metodu DRECE je prototypem vlastněným Strojní fakultou Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Zařízení disponuje převodovkou NORD a frekvenčním měničem rychlosti, který umožňuje měnit rychlost deformace i během procesu, dovoluje tedy obsluze pružně reagovat na průběh procesu. Dalšími komponenty zařízení jsou talířová spojka, hnací válec, dva přítlačné válce, horní a spodní tvářecí nástroj. Tlak, který působí na přední válec je řízen hydraulikou. Na zadním válci je tlak možno regulovat mechanicky za použití redukčního ventilu. Celkový pohled na zařízení je vyobrazen na obr.14[11].



Obr. 14 Tvářecí zařízení využívající metodu DRECE[11].

V této práci byl zkoumán vliv tlaku přítlačných válců na výsledné mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu. Tlak přítlačných válců je zajišťován hydraulicky. Umístění přítlaků tvářecího zařízení je uvedeno na Obr. 15a). Na Obr. 15b) je uveden hydraulický přítlak. Tlak je regulován podle zkoušeného materiálu. Pro pevnější materiál je volen vyšší tlak. Je snahou nastavovat tlak na co nejnižší hodnotu tak, aby nedocházelo ke zbytečné deformaci plechu, avšak tlak musí být na dostatečné hodnotě, aby došlo k průchodu polotovaru geometrií nástrojů tvářecího zařízení. Tlak na zadním válci je regulován na hodnotu od 150 bar do 250 bar, zatímco tlak na předním válci je nastaven na konstantní hodnotu 50 bar. Ke kontrole nastaveného tlaku slouží připojené manometry.



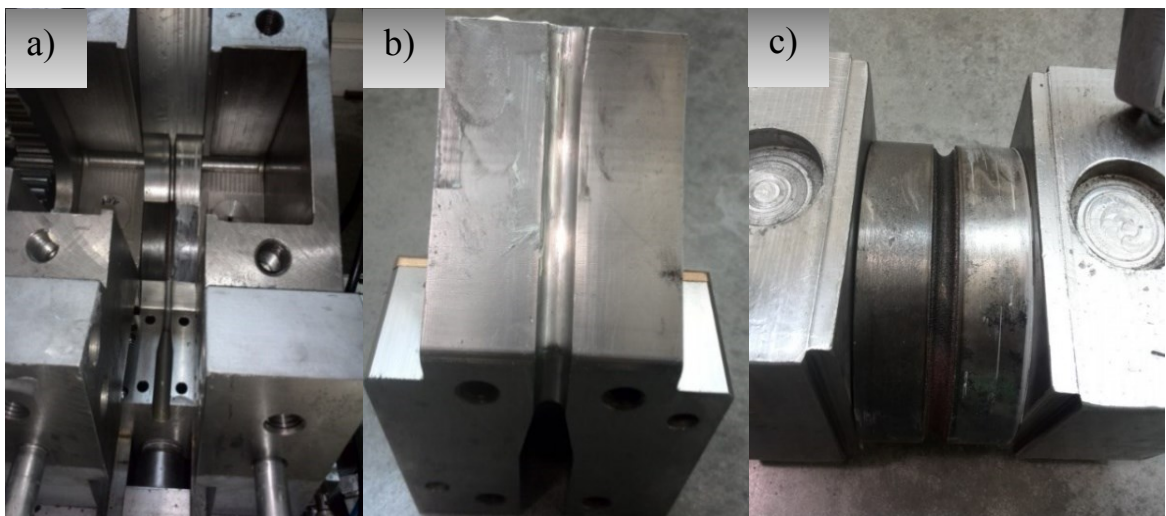
Obr. 15 a) umístění přítlačných válců a manometrů na tvářecím zařízení, b) přítlak.

Tlak na přítlačných válcích je regulován mechanicky a to redukčním ventilem. Ventilem je možno analogově měnit tlak na zadním přítlačném válci na požadovanou hodnotu. Mechanismus určený pro řízení tlaku v hydraulickém obvodu tvářecího zařízení je zobrazen na obr.16.



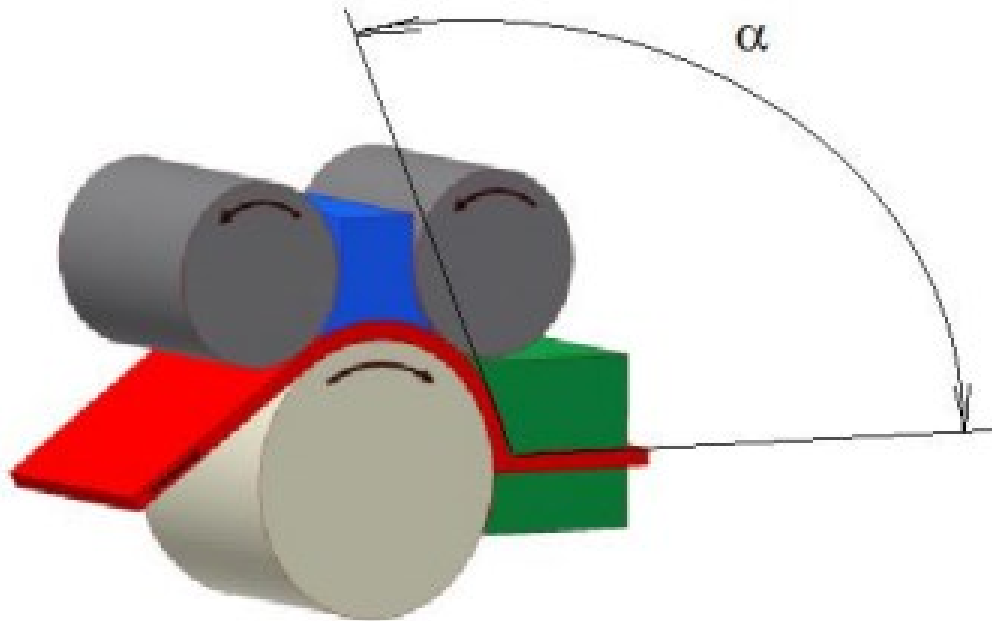
Obr. 16 Regulace tlaku.

V současné době je ve fázi testování i druhé tvářecí zařízení. Zařízení funguje na stejném principu s tím rozdílem, že je schopno místo plechu, protlačovat geometrií nástroje polotovary kruhového průřezu. Zařízení je nastaveno na protlačování kulatiny o průměru 8 mm. Samotný proces plastické deformace probíhá ve dvojici nástrojů – horní a spodní, ve kterých je vytvořen zaoblený kanál. Na obr. 17a) je zobrazen namontovaný spodní nástroj, na obr. 17b) horní nástroj. Přítlačné válce jsou opatřeny drážkou pro zajištění tření mezi válci a polotovarem. Samotná drážka má, na rozdíl od nástrojů, kde je kladen požadavek na co nejnižší drsnost, zdrsňený povrch tak, aby bylo zajištěno tření a tím síla, která vtlačuje polotovary do zóny deformace. Plocha přítlačného válce je uvedena na obr.17c).



Obr. 17 a) spodní nástroj, b) horní nástroj, c) povrch přítlačného válce.

Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje účinnost SPD procesu je geometrie tvářecího nástroje a to zejména úhel, kterým je zakřivena zóna deformace. Při experimentech s úhlem v zóně deformace 108° , 113° a 118° bylo zjištěno, jakým způsobem tento úhel ovlivňuje základní mechanické vlastnosti, jako mez kluzu $R_{p0,2}$, pevnost v tahu R_m a tažnost A_{80mm} . Úhel v zóně deformace je uveden na obr. 18[11].



Obr. 18 Úhel v zóně deformace[11].

Experimenty a jejich vyhodnocení uvedené v této práci byly provedeny na oceli Ck55 (12 060 podle dřívějšího značení). Jedná se o konstrukční nelegovanou ocel, jakostní, vhodnou k zušlechťování. Ocel je běžně používána na namáhané strojní součásti, jako ozubená kola, různé hřídele, šrouby, vřetena, páky, pružiny a jiné namáhané strojní součásti. Dále je využívána na strojní součásti, u kterých je třeba odolávat opotřebení. V Tab. 3 je uvedeno chemické složení zkoušené oceli Ck55. Ocel byla dodána ve formě tabule plechu o tloušťce 2 mm a dále stříhána na pásy o šířce 58 mm. Vzorky byly z tabule odebrány v podélném a příčném směru[11].

Tab. 3 Chemické složení oceli Ck55.

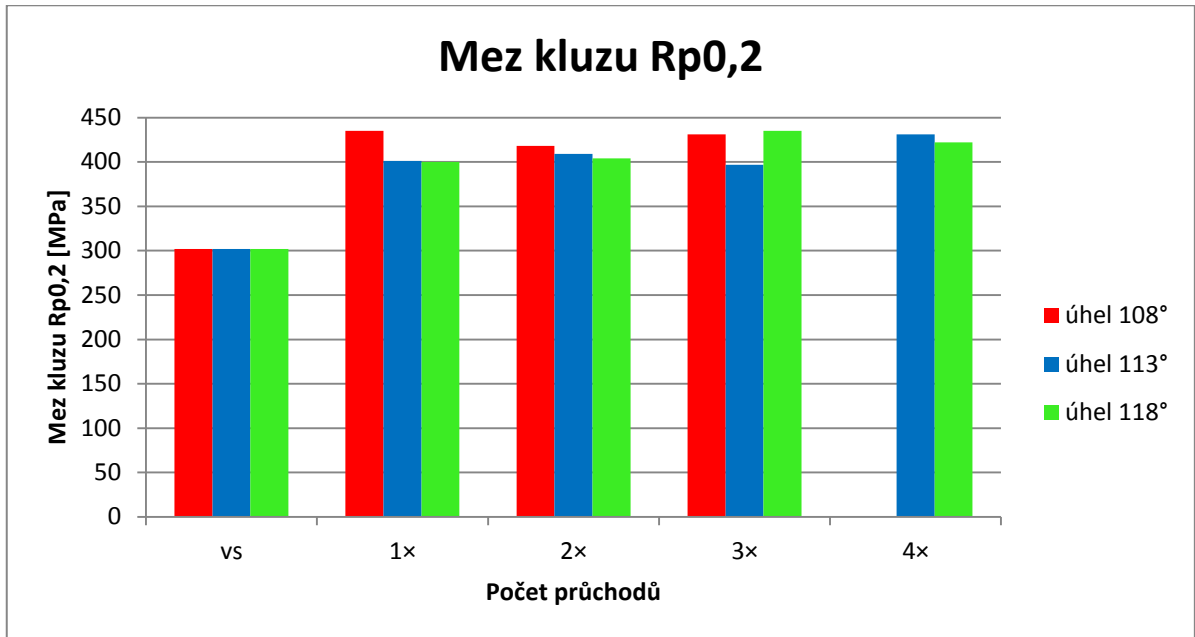
Prvek	C	Mn	Si	Pmax	Smax	Al
hm.podíl[%]	0,53	0,43	0,3	0,03	0,035	0,2

Dosažené výsledky při zkoumání mechanických vlastností pásu plechu po průchodu tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE dokazují významný vliv velikosti úhlu tvářecího nástroje. Při úhlu 108° bylo dosaženo zvýšení meze kluzu o 133 MPa, což představuje nárůst přibližně o 45% oproti výchozímu stavu. Při využití úhlů 113° a 118° bylo po prvním průchodu dosaženo nižšího zpevnění a to o 100 MPa (32% nárůst oproti výchozímu stavu). Naměřené hodnoty meze kluzu jsou uvedeny v Tab. 4[11].

Tab. 4 Hodnoty meze kluzu při použití různých úhlů nástroje[11].

Počet průchodů	Mez kluzu [MPa]		
	úhel 108°	úhel 113°	úhel 118°
vs	302	302	302
1	435	401	400
2	418	409	404
3	431	397	435
4	-	431	422

Při použití nástroje s úhlem 108° bylo dosaženo přibližně stejného zpevnění po prvním průchodu, jako po čtyřech průchodech nástrojem s úhlem 113°. Grafické znázornění vlivu geometrie tvářecího nástroje na efektivnost tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE je uvedeno v Graf 1. Z grafu je patrné, že k nejvyššímu zpevnění dochází po prvním průchodu[11].



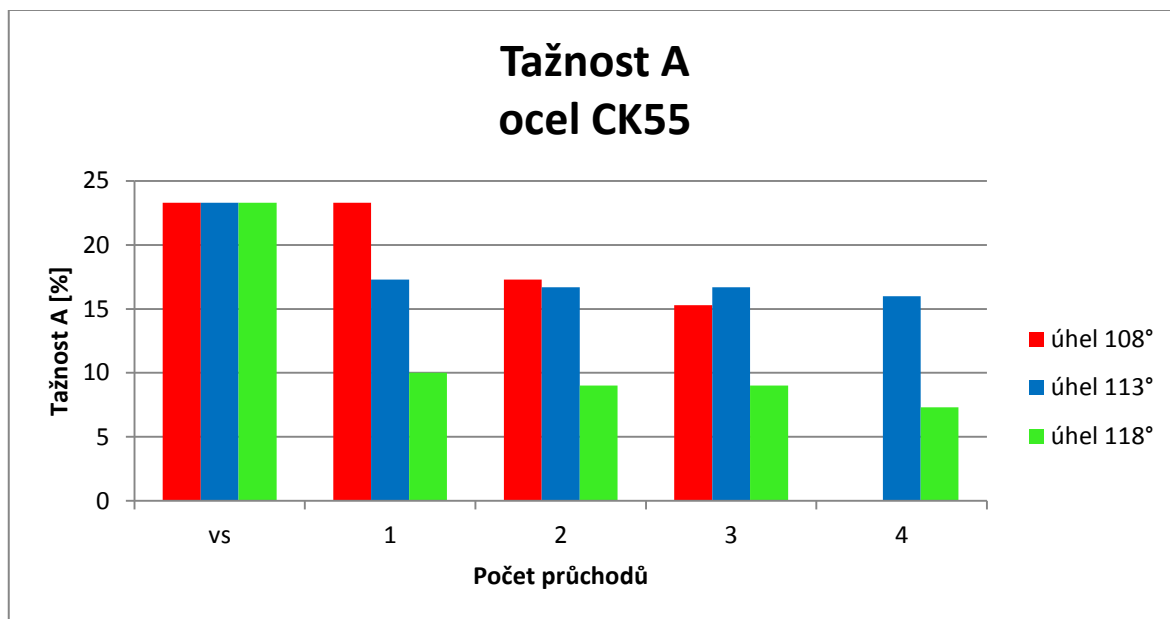
Graf 1 Vliv geometrie tvářecího nástroje na změnu meze kluzu po průchodech tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE[11].

Z Tab. 5 je možno určit, jakým způsobem se měnila tažnost při použití různých geometrií nástroje. Z tabulky je patrné, že při použití úhlu 108° klesala tažnost v závislosti na jednotlivých průchodech nejméně. Naopak nejvíce negativní vliv na hodnoty tažnosti měly průchody při použití úhlu 118°. Dosažené hodnoty tažnosti v závislosti na úhlu tvářecího nástroje a na počtu průchodů jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Hodnoty tažnosti při použití různých geometrií nástroje[11].

Počet průchodů	Tažnost [%]		
	úhel 108°	úhel 113°	úhel 118°
vs	23,3	23,3	23,3
1	23,3	17,3	10
2	17,3	16,7	9
3	15,3	16,7	9
4	-	16	7,3

Důležitým zjištěním je, že bylo dosaženo shodné tažnosti po prvním průchodu tvářecím zařízením s geometrií nástroje 108° , jako na vzorku ve výchozím stavu. Dané zjištění je důležité pro další využití metody DRECE v praxi. Díky tomu, že po prvním průchodu zůstává tažnost zachována, je možno polotovary dál tvářit až do konečného tvaru strojní součásti. Z Graf 2 je patrné, že při použití úhlu 113° a 118° docházelo vlivem počtu průchodů k výraznějšímu poklesu tažnosti, než při použití úlu 108° .



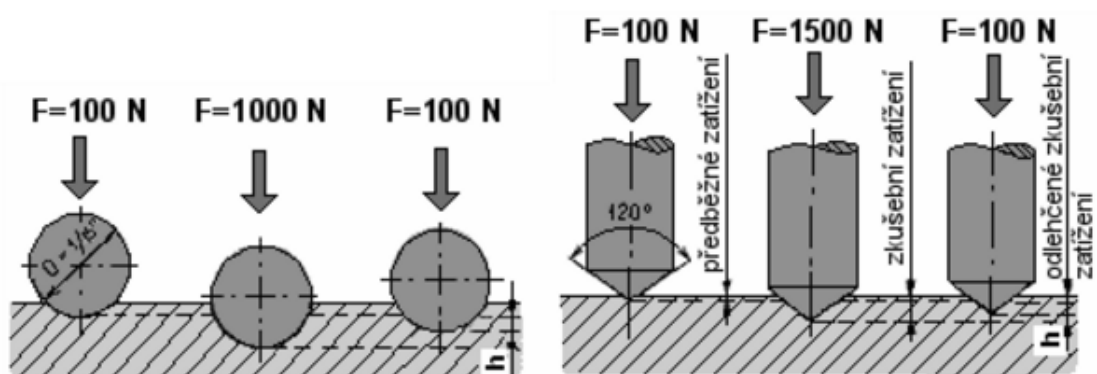
Graf 2 Změna tažnosti v závislosti na počtu průchodů a použité geometrii tvářecího nástroje[11].

3 Vliv změny přítlaků a podávací rychlosti na změnu mechanických vlastností v pásu plechu oceli Ck55

V této práci jsem hodnotil, jaký vliv má nastavení různých technologických parametrů na výsledné mechanické vlastnosti oceli Ck55 při využití metody DRECE. Byl vyhodnocen vliv změny přítlaků a vliv změny podávací rychlosti. Dále byla zkoumána tvrdost materiálu na horní a spodní straně protlačeného plechu. Pro vyhodnocení dosažených výsledků bylo využito měření tvrdosti dle Rockwella. Experimenty byly provedeny při využití nástrojů s úhlem 108° .

3.1 Měření tvrdosti – Rockwell

Při zkoušení vlivu změny tlaků a podávací rychlosti na změnu mechanických vlastností plechu jsem provedl zkoušku tvrdosti dle Rockwella. Tato zkouška patří mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu, je velmi rychlá a snadná, ale vzhledem k nižší přesnosti výsledků je vhodná především pro předběžnou kontrolu výrobků a pro kontrolu velkého množství vzorků. Jakým způsobem se zkouška provádí je předepsáno normou ČSN ISO 6508-1. Při zkoušení je zkušební těleso – indentor – vlivem přesně stanoveného zatížení vtlačeno do zkoumaného materiálu. V první fázi je zkušební těleso zatíženo silou asi 100N, tím je nastavena výchozí poloha k určení velikosti vtisku. Následně se pozvolna zvyšuje zatížení tak, aby bylo během 3 – 6 ti sekund dosaženo zatížení předepsaného normou. V poslední fázi se zatížení opět snižuje na až na 100N. V této chvíli je určen přírůstek hloubky vpichu oproti předchozímu stavu při zatížení 100N. Schéma Měření je uvedeno na obr. 19. Obvykle se jedná o důlky hluboké cca 0,2 mm[12].



Obr. 19 Měření tvrdosti podle Rockwella.[12]

V první řadě, před samotným zkoušením, je třeba určit měřítko zkoušení. Jednotlivá měřítka se liší zatěžovací silou, tvarem a velikostí zkušebního tělesa a v neposlední řadě časem, po který je zkušební těleso zatěžováno. Při zkoumání změny tvrdosti u plechů oceli 12 060 po průchodu tvářecím zařízením DRECE bylo využito měřítko HRB[12].

Často používaná měřítka:

HRA – zkušebním tělesem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°
zatížení 600N
slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy

HRB – ocelová kulička o průměru 1/16''
zatížení 1000N
měkčí kovy

HRC – diamantový kužel
zatížení 1500N
tvrdé kovy, u kterých tvrdost HRB přesahuje hodnotu 100

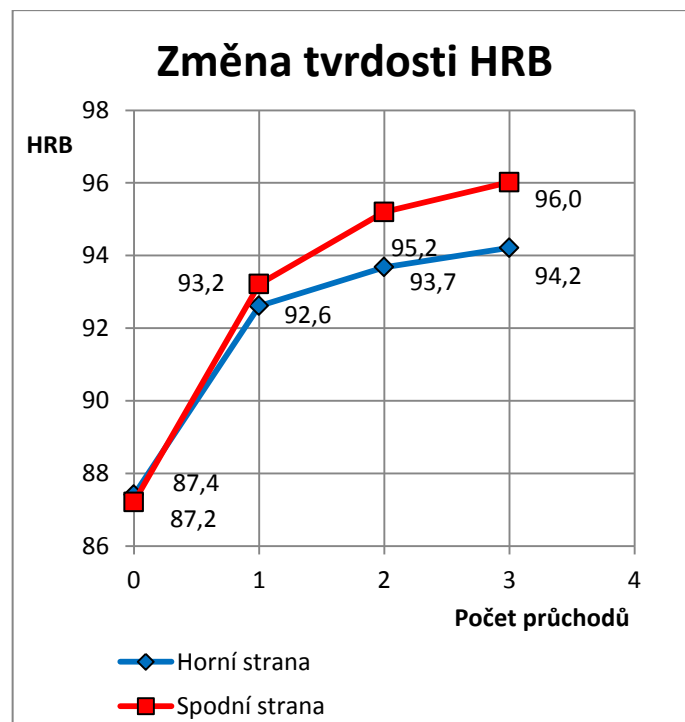
3.2 Změna tvrdosti HRB po jednotlivých průchodech zařízením využívajícím metodu DRECE

Při měření tvrdosti HRB byly vyhodnoceny vzorky ve výchozím stavu, následně vzorky po prvním, druhém a třetím průchodu tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE. Pro porovnání bylo měření provedeno na horní a spodní straně plechu. Z Tab. 6 je vidět, že vlivem průchodů tvářecím zařízením došlo ke zpevnění na spodní i horní straně.

Tab. 6 Měření tvrdosti HRB na horní a spodní straně pásu plechu z oceli Ck55

číslo měření	Výchozí stav		První průchod - 108°		Druhý průchod - 108°		Třetí průchod - 108°	
	Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana
1	87,5	84,8	91,3	91,3	94,2	95,6	95,7	97
2	87,6	87,2	90,6	91,9	93	94,3	94,9	94,8
3	87,7	87,7	93,3	97,6	93,8	95,3	93	94,9
4	87,1	87,4	91,3	92,1	94,1	95,5	93,1	93,8
5	87	88,6	93,7	92,2	93,4	95,4	94,1	97,3
6	88,1	88,3	93,7	95,2	93,8	95,1	95,2	97,6
7	87,5	88,1	93,5	90,4	92,5	95,6	92,4	99,8
8	87,4	88	91,3	94,6	94,1	93,7	95	95
9	87,7	85,5	93,2	95,8	93,8	95,6	93,2	94,5
10	86,5	86,5	94,2	91	94,1	95,7	95,5	95,5
Průměr	87,4	87,2	92,6	93,2	93,7	95,18	94,2	96

Z dosažených výsledků je patrné, jak se změnila tvrdost HRB na horní a spodní straně protlačeného plechu při jednotlivých průchodech. Z grafu č. 3 je zřejmé, že na spodní straně došlo k vyššímu zpevnění. Nejvyšší nárůst tvrdosti byl zaznamenán po prvním průchodu. Hodnota tvrdosti se zvýšila z původní 87,3 HRB na 93 HRB.

**Graf 3** Změna tvrdosti HRB na horní a spodní straně plechu.

3.3 Změna tvrdosti HRB při nižší posuvové rychlosti

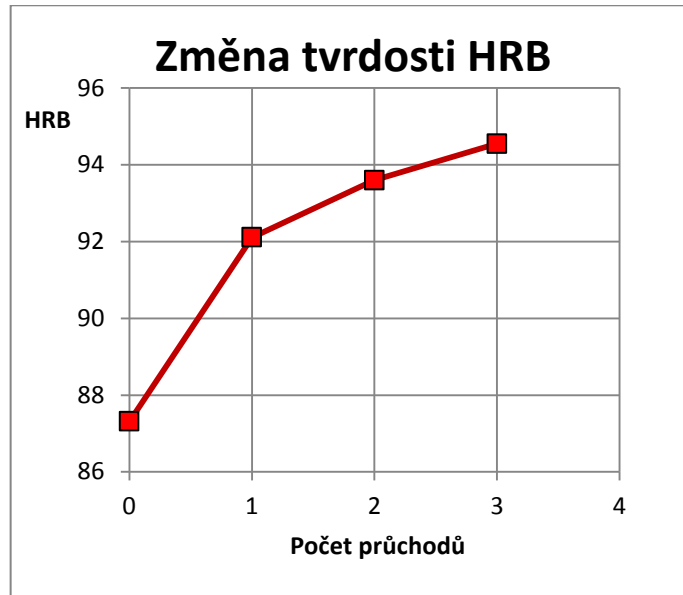
Rychlost válců tvářecího zařízení, využívajícího metodu DRECE, je nastavena převodovkou NORD a otáčkami elektromotoru, který je řízen frekvenčním měničem. Posuvovou rychlost lze díky frekvenčnímu měniči rychlosti měnit během procesu. Experimenty jsou běžně prováděny při maximální posuvové rychlosti, kterou v současné době konstrukce zařízení dovoluje. Bylo zkoumáno, jakým způsobem ovlivňuje posuvová rychlost výsledné mechanické vlastnosti. Při tomto experimentu byla posuvová rychlost nastavena na poloviční hodnotu. Posuvová rychlost byla měněna v rámci možností tvářecího zařízení. Pokud by zařízení bylo upraveno a bylo schopno vyšších rychlostí, výsledky by se pravděpodobně lišily a to například vlivem tření v zóně deformace.

V Tab. 7 jsou zaznamenány hodnoty z měření tvrdosti v pásu plechu protlačeném při poloviční rychlosti. Při porovnání hodnot s výše uvedenou Tab. 6 je zřejmé, že se hodnoty při nastavení nižší posuvové rychlosti příliš nezměnily.

Tab. 7 Hodnoty HRB naměřené na vzorcích protlačených při poloviční posuvové rychlosti.

Číslo měření	Výchozí stav	1x108°	2x108°	3x108°
1	86,2	93,1	94,4	94,6
2	87,4	93	92,5	94,4
3	87,7	92	94,2	95,6
4	87,2	91,8	93,8	93,4
5	87,8	91	94,1	94,6
6	88,2	91,2	94,3	94,2
7	87,8	92,5	93,5	94,4
8	87,7	92	95,5	95,8
9	86,6	91	92,1	94,3
10	86,5	93,5	91,6	94,2
Průměr	87,3	92,1	93,6	94,6

Grafická závislost změny tvrdosti HRB v pásu plechu protlačeném při nižší posuvové rychlosti je znázorněna v Graf 4. Z grafu je zřejmé, že k nejvyššímu nárůstu tvrdosti bylo dosaženo po prvním průchodu. Hodnoty mají podobný průběh, jako hodnoty naměřené při maximální posuvové rychlosti.



Graf 4 Změna tvrdosti HRB při použití nižší posuvové rychlosti.

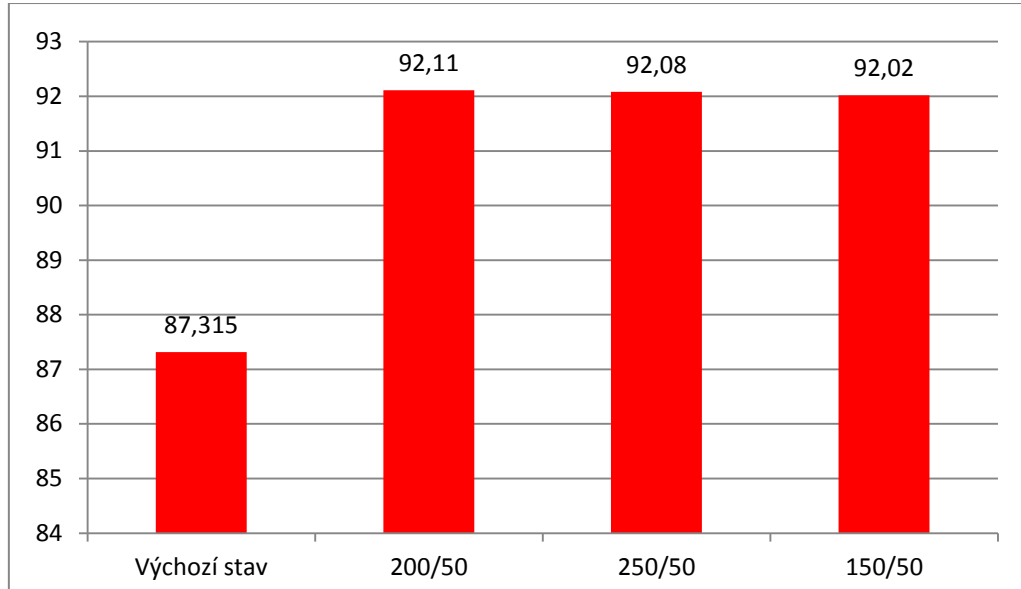
3.4 Změna tvrdosti HRB při rozdílných tlacích

Jak bylo již zmíněno, jedním z parametrů, který lze na tvářecím zařízení regulovat, je tlak na přítlačných válcích. Pro proces je důležité stanovit optimální tlak takovým způsobem, aby vlivem příliš vysokého tlaku nedocházelo k deformacím plechu. Při příliš nízkém tlaku, by nemuselo dojít k průchodu plechu pásmem deformace. Tlak je měněn především na zadním přítlačném válci. Na předním válci je hodnota nastavena na 50 bar. Na zadním válci jsou velikosti tlaků 150, 200 a 250 bar. V Tab. 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tab. 8 Tvrdost HRB na vzorcích při použití rozdílných tlaků na přítlačných válcích.

Číslo měření	Výchozí stav	200/50	250/50	150/50
1	86,2	93,1	92,2	91
2	87,4	93	92,6	91,1
3	87,7	92	91	92,6
4	87,2	91,8	91,1	91,4
5	87,8	91	93	92,1
6	88,2	91,2	91,5	93
7	87,8	92,5	92,6	91,3
8	87,7	92	92,2	92,6
9	86,6	91	92,4	92,5
10	86,5	93,5	92,2	92,6
Průměr	87,3	92,1	92,1	92

Z Graf 5 lze vyčíst vliv změny velikosti přítlaků na tvrdost po průchodu zařízením. Je zřejmé, že změna tlaků na účinnost procesu nemá zásadní vliv.



Graf 5 Tvrdost HRB na vzorcích protlačených při použití rozdílných tlaků na přítlačných válci.

4 Vyhodnocení mechanických vlastností po průchodu tvářecím zařízením

Pro vyhodnocení účinnosti procesu vícenásobné plastické deformace metodou DRECE na ocel Ck 55 bylo využito srovnávání mechanických vlastností vzorků ve výchozím stavu a vzorků po jednotlivých průchodech geometrií tvářecího zařízení. Při všech experimentech bylo provedeno protlačení kanálem tvořeným nástrojem s úhlem 108°. Byla využita maximální posuvová rychlost a tlak na přítlačných válci byl 200 bar na zadním, 50 bar na předním válci. K hodnocení mechanických vlastností byly využity tahové zkoušky, při kterých byla hodnocena především smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) a tažnost (A_{80}). Zajímavé výsledky byly dosaženy v případě tahových zkoušek na vzorcích, u kterých bylo provedeno tepelné zpracování. Dalším hodnotícím kritériem byla tvrdost a mikrotvrdost. K hodnocení tvrdosti a mikrotvrdosti byla využita zkouška dle Vickerse. Byla provedena Erichsenova zkouška, u které byly porovnávány vzorky odebrané ve směru rovnoběžném a kolmém vůči směru válcování polotovaru. Údaje o vlivu průchodu geometrií tvářecího nástroje na výslednou mikrostrukturu byly získány pomocí metalografické analýzy.

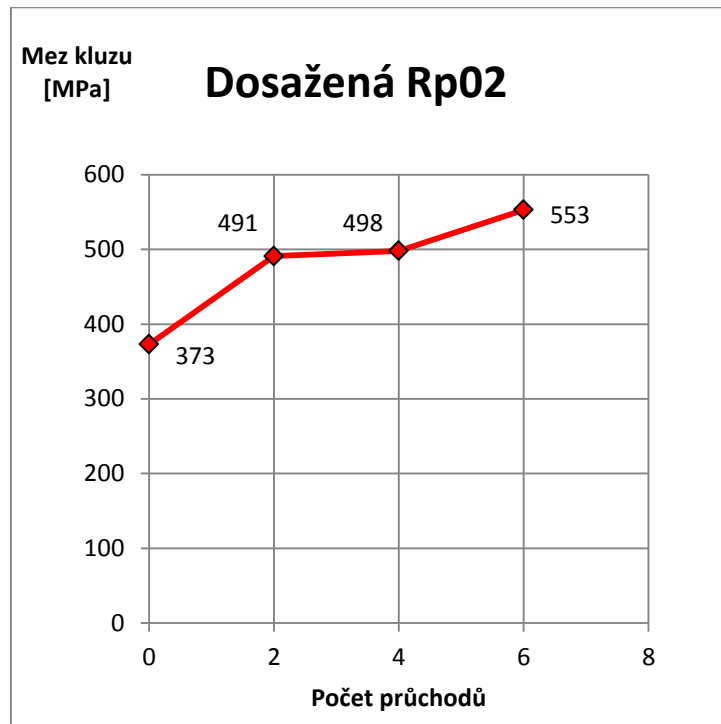
4.1 Mechanické vlastnosti

Za účelem zjištění mechanických vlastností v pásu plechu oceli Ck 55 po průchodu geometrií tvářecího zařízení byly vyhodnoceny vzorky ve výchozím stavu, po druhém, čtvrtém a šestém průchodu. U vzorků ve výchozím stavu, po dvou a po čtyřech průchodech byly provedeny vždy dvě zkoušky. U vzorku pro šestý průchod se zkouška na obou vzorcích nepodařilo vyhodnotit, proto je zaznamenána pouze jedna. Pro vyhodnocení zkoušky byly zhotoveny vzorky z pásu plechu o tloušťce 2 mm. Všechny vzorky měly počáteční délku 80 mm. Měřená délka je zapsána v níže uvedené tabulce. Parametry zkoušky a důležité výstupní hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Vyhodnocení tahových zkoušek.

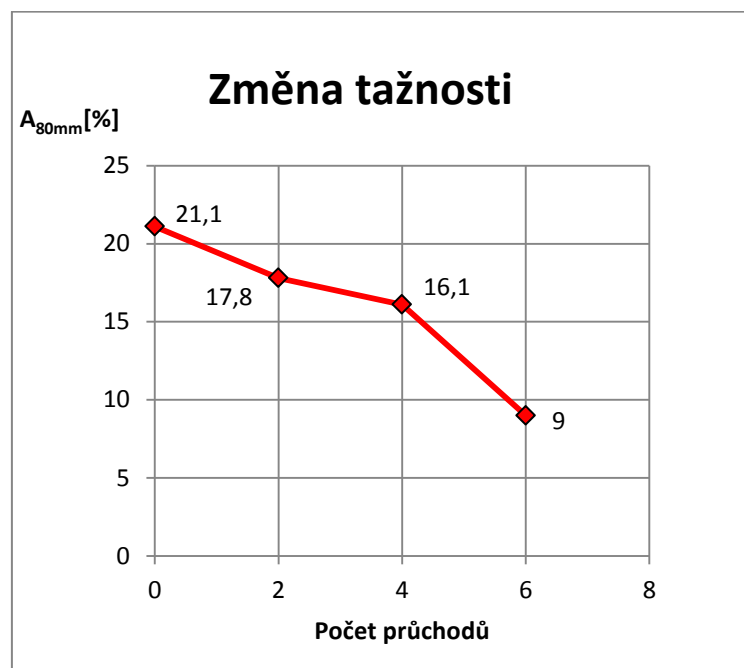
Pořadové číslo;	Označení vzorku								Průměrné hodnoty			
		Měřená délka L_u [mm]	Zatížení na mezi kluzu $F_{p0,2/eH}$ [N]	Zatížení na mezi pevnosti F_m [N]	Mez kluzu $R_{p0,2/eH}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost		$R_{p0,2/eH}/R_m$	Mez kluzu $R_{p0,2/eH}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]
							A	$^{80m}_m$				
							[%]					
1.	výchozí	96,35	36000	53000	373	549	20,4	0,89	373	549	21,1	
2.	výchozí	97,33	36000	53000	373	549	21,7	0,87				
3.	2x	95,88	47000	57500	483	590	19,8	0,85	491	591	17,8	
4.	2x	92,63	48500	57500	498	591	15,8	0,84				
5.	4x	91,77	48500	59500	495	607	14,7	0,78	498	610	16,1	
6.	4x	94,00	49000	60000	500	612	17,5	0,84				
7.	6x	87,20	54500	62000	553	629	9,0	0,79	553	629	9,0	

V Graf 6 je graficky znázorněna změna meze kluzu po průchodech zařízením využívajícím metodu DRECE. Z grafu je vidět, že k nejvyššímu nárůstu došlo po prvních dvou průchodech. Na vzorku po druhém průchodu byla zjištěna mez kluzu 491 MPa, došlo tedy oproti výchozímu stavu (373 MPa) ke zvýšení o 118 MPa, tedy zvýšení o 32% oproti výchozímu stavu. Na vzorku po šesti průchodech byla stanovena mez kluzu 553 MPa. Jedná se o nárůst o 180 MPa, což odpovídá změně o 48% oproti výchozímu stavu.



Graf 6 Změna meze kluzu v závislosti na počtu průchodů.

Změna tažnosti v závislosti na počtu průchodů je uvedena v Graf 7. Z dosažených výsledků je zřejmé, že po prvních dvou průchodech došlo ke snížení tažnosti z 21,1 na 17,8. Podle grafu došlo k nejrazantnějšímu poklesu tažnosti po pátém a šestém průchodu a to z 16,1 na 9.



Graf 7 Změna tažnosti v závislosti na počtu průchodů.

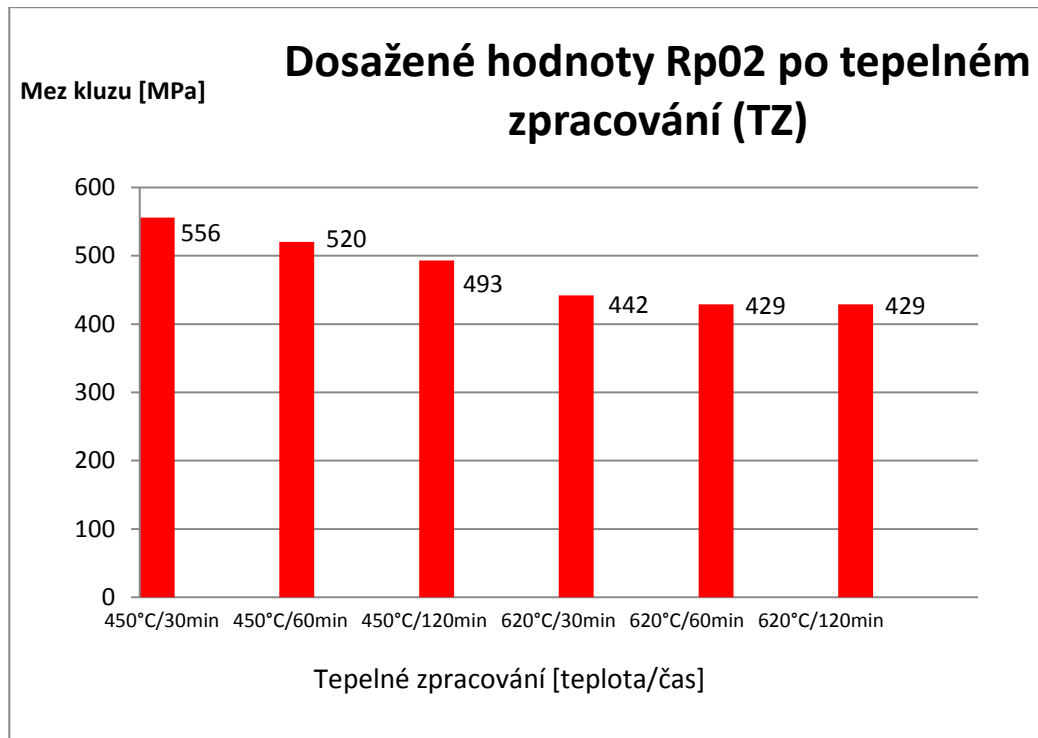
4.2 Hodnocení mechanických vlastností na vzorcích po tepelném zpracování

Při řešení problému klesající tažnosti po průchodech geometrií tvářecího nástroje byla zvážena možnost následného tepelného zpracování. Na protlačených vzorcích bylo provedeno žihání při různých teplotách a časech. Výsledné hodnoty po provedení tahových zkoušek na vzorcích po tepelném zpracování jsou uvedeny v Tab. 10. Z tabulky lze určit, která z variant tepelného zpracování se jeví, jako nejvýhodnější. Jako vhodné se jeví tepelné zpracování při 450°C a to při čase 60 nebo 120 minut., kde bylo zjištěn jen mírný pokles meze kluzu při zachování tažnosti.

Tab. 10 Vyhodnocení tahových zkoušek na vzorcích po tepelném zpracování[3].

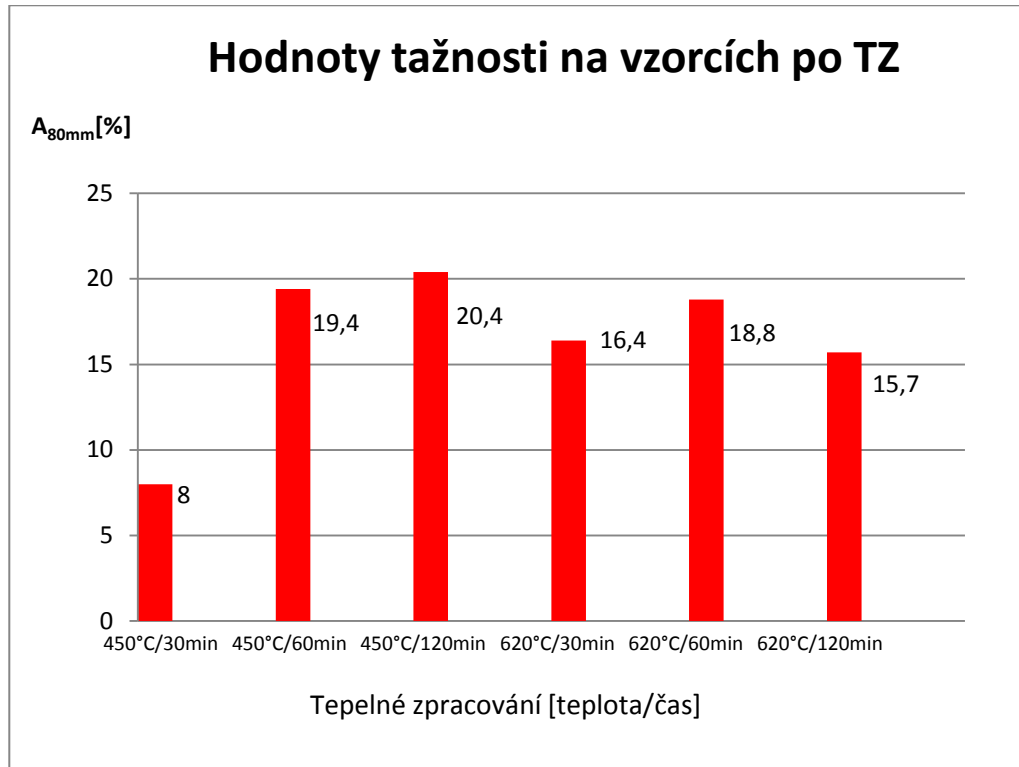
Pořadové číslo;	Označení vzorku								průměr			
		Měřená délka L_u [mm]	Zatížení na mezi kluzu $F_{p0,2/eH}$ [N]	Zatížení na mezi pevnosti F_m [N]	Mez kluzu $R_{p0,2/eH}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost		$R_{p0,2/eH}/R_m$	Mez kluzu $R_{p0,2/eH}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]
							A	A_{80m}				
1.	450 °C 30 min	87,40	55500	62500	561	631	9,3	0,89	556	631	8,0	
2.	450 °C 30 min	85,30	54500	62500	551	631	6,6	0,87				
3.	450 °C 60 min	94,80	51500	60500	520	611	18,5	0,85	520	616	19,4	
4.	450 °C 60 min	96,20	51500	61500	520	621	20,3	0,84				
5.	450 °C 120 min	95,80	46500	59500	470	601	19,7	0,78	493	606	20,4	
6.	450 °C 120 min	96,80	51000	60500	515	611	21,0	0,84				
7.	620 °C 30 min	93,10	44500	56000	449	566	16,4	0,79	442	561	16,4	
8.	620 °C 30 min	93,00	43000	55000	434	556	16,3	0,78				
9.	620 °C 60 min	98,00	42000	56000	424	566	22,5	0,75	429	566	18,8	
10.	620 °C 60 min	92,00	43000	56000	434	566	15,0	0,77				
11.	620 °C 120 min	90,00	43000	55500	434	561	12,5	0,77	429	553	15,7	
12.	620 °C 120 min	95,00	42000	54000	424	545	18,8	0,78				

Z Graf 8 je vidět, jakým způsobem se měnila mez kluzu po tepelném zpracování při rozdílných teplotách a časech tepelného zpracování. Je patrné, že dosažená mez kluzu závisela více na teplotě tepelného zpracování než na čase. Nejvyšší meze kluzu bylo dosaženo při tepelném zpracování 450°C/30 min, tedy při nejnižší teplotě a nejkratším čase. Nejnižší meze kluzu bylo dosaženo při 620°C/120 min.



Graf 8 Mez kluzu na vzorcích po tepelném zpracování.

Závislost tažnosti na tepelném zpracování vzorků po průchodu geometrií tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE je uvedena v Graf 9. Z grafu je vidět, že nejvyšší tažnosti bylo dosaženo při 450°C/120min. Nejnižší tažnosti bylo dosaženo při 450°C/30min.

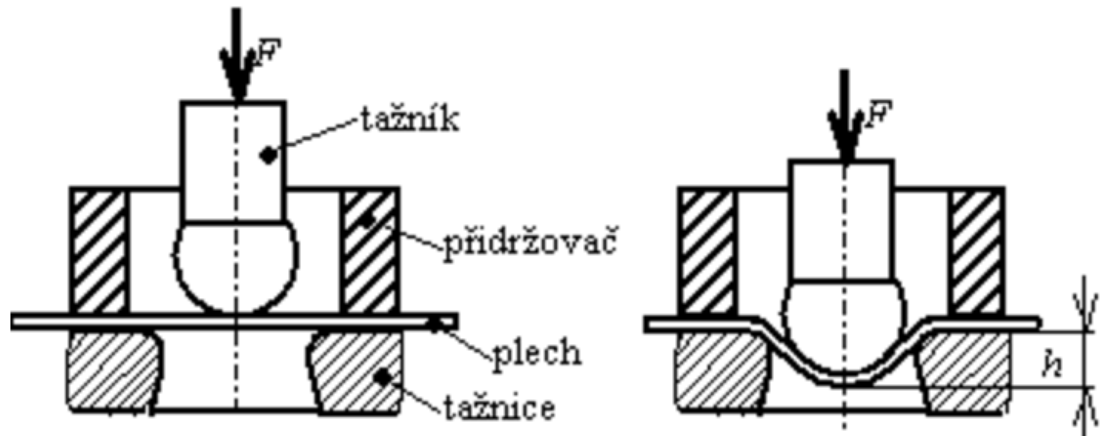


Graf 9 Tažnost vzorků po tepelném zpracování.

4.3 Erichsenova zkouška

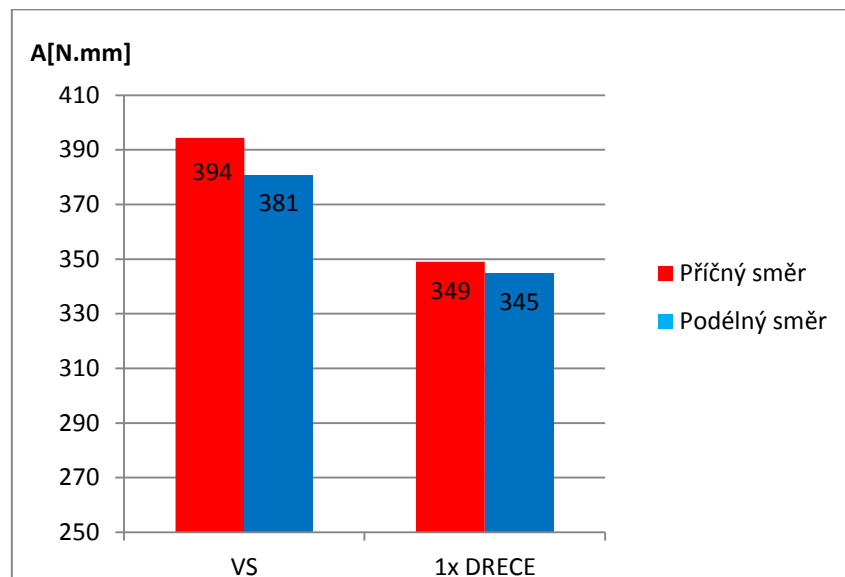
Zkoušením podle Erichsena je sledována vhodnost plechů k tažení. Zkoušený plech je položen na tažnici a přitisknut přidržovačem. Následně je tažníkem, jehož funkční plochou je koule o průměru 20 mm, vlačován do zkoušeného materiálu, dokud nedojde k jeho porušení. Vhodnost k tažení je určována podle hloubky prohloubení (h), dále je sledován vzhled povrchu na vnější straně vlisu protlačeného do plechu a charakter lomových ploch. Schéma Erichsenovy zkoušky je uvedeno na obr. 20[13].

U oceli Ck55 byly zkoumány vzorky odebrané v příčném a podélném směru zkoumaného plechu, tedy vzorky ve směru válcování a ve směru kolmém na směr válcování polotovaru. Zkouška byla provedena na vzorcích ve výchozím stavu a na vzorcích po prvním průchodu tvářecím zařízením DRECE.



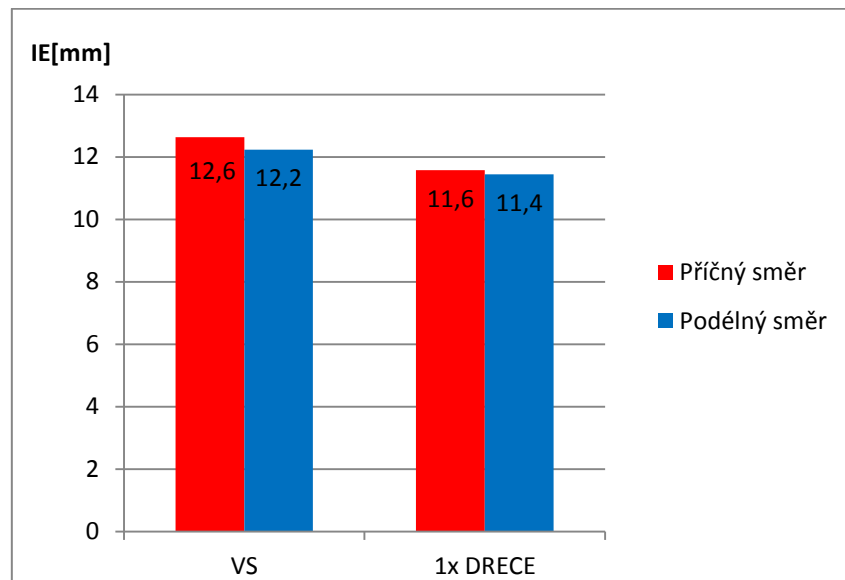
Obr. 20 Erichsenova zkouška[13].

V Graf 10 je graficky znázorněna hodnota práce potřebná k vytvoření trhliny na povrchu zkoumaného vzorku. Z grafu lze vyčíst, že hodnoty práce u výchozího stavu dosahují 394 N.mm, na rozdíl od vzorků po prvním průchodu, kde hodnota dosáhla 349 N.mm. Zkouška tedy potvrzuje, že ve zkoumaném materiálu došlo po průchodu geometrií nástroje ke zpevnění.

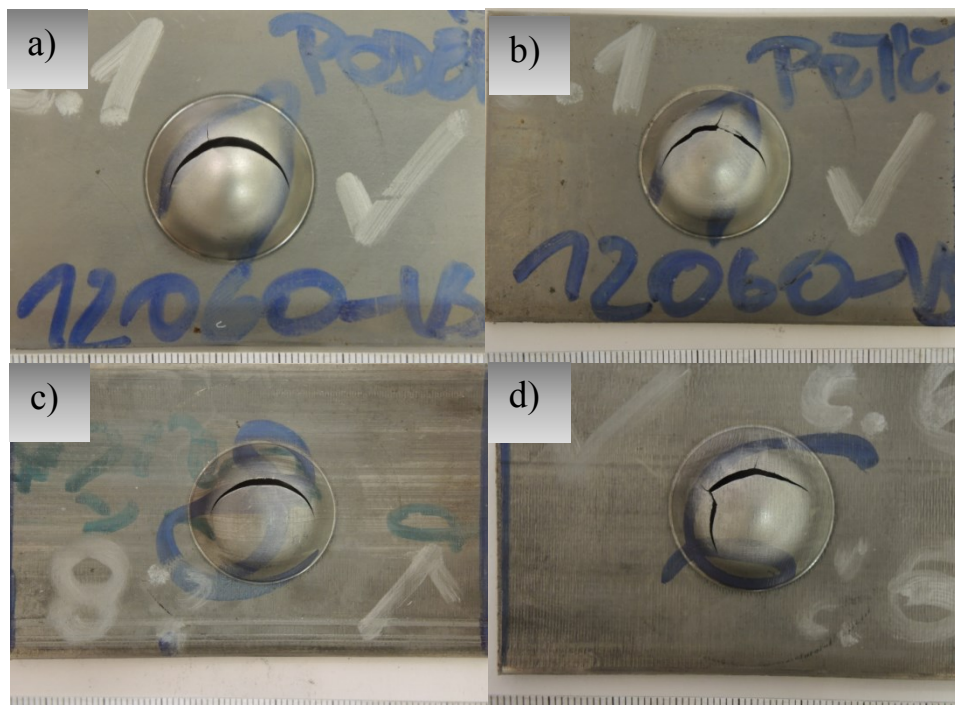


Graf 10 Naměřené hodnoty práce.

V Graf 10 a Graf 11 jsou pozorovány mírně rozdílné hodnoty při porovnání vzorků odebraných ve směru shodném se směrem válcování polotovaru a ve směru na něj kolmém. U vzorků odebraných ve směru shodném s válcováním je pozorována nižší práce nižší prodloužení potřebné k porušení materiálu.



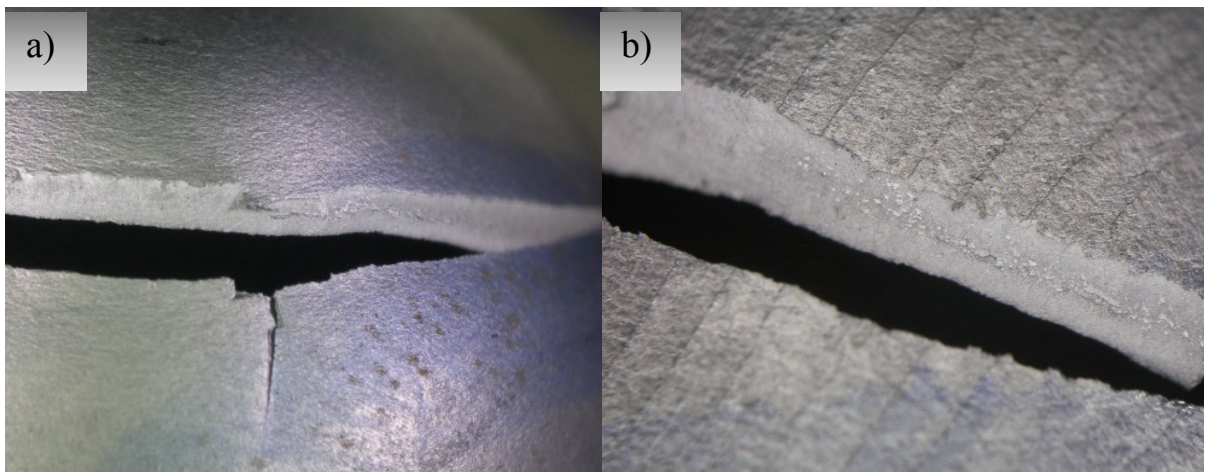
Graf 11 Hloubka prohloubení.



Obr. 21 Erichsenova zkouška Ck 55: a) výchozí stav - podélný směr b) výchozí stav – příčný směr c) první průchod – podélná směr d) první průchod – příčný směr.

Na obr. 21 jsou uvedeny zkušební vzorky po Erichsenově zkoušce. U vzorků výchozího stavu se na povrchu v okolí porušení celistvosti vyskytovalo drobné natrhávání povrchu nepřesahující délky 1 mm. V případě vzorků po prvním průchodu byly na povrchu patrné výrazně rýhy, které v obou případech (příčný a podélný směr) souvisely se samotným mechanismem porušení a chovaly se jako iniciátory porušení (délka samotného prvotního porušení ovlivněné rýhami dosahovala délky 2-4 mm). Rýhy je možno pozorovat na Obr. 22.

Při pohledu na vzorky odebrané v podélném a příčném směru lze pozorovat rozdíly. U podélného odběru tvářeného materiálu je trhlinka rovnoběžná s vnějším okrajem stopy průtlačníku. V případě příčného odběru tvářeného materiálu jsou sledovány transversální trhlinky k majoritní trhlině. Tento jev je typický pro materiály se sníženou schopností absorpce plastické práce. Vzhledem k tomu, že není sledována jasná závislost charakteru průběhu trhliny mezi jednotlivými průchody, lze oprávněně předpokládat, že právě tato snížená schopnost absorpce plastické práce je v přímé souvislosti s orientací odběru materiálu.



Obr. 22 Charakteristika lomových ploch po Erichsenově zkoušce: a) výchozí stav
b) po prvním průchodu

Samotný charakter lomových ploch všech zkoušených vzorků je podobný. V oblastech prvotního (iniciačního) porušení byly lomové plochy matné, houževnatého charakteru s výskytem ojedinělých porušení (zřejmě v důsledku výskytu nekovových vměstků). V oblastech dalšího šíření porušení celistvosti materiálu se přibližně v polovině tloušťky pásové oceli vyskytovalo pásmo, uvnitř kterého se vyskytovaly lesklé drobné

plošky charakteristické pro interkrystalický lom (náznak křehkého porušení). Charakteristika lomových ploch po Erichsenově zkoušce je uvedena na obr 22.

4.4 Tvrdost - Vickers

Zkoušky tvrdosti jsou jedny z nejstarších zkoušek, prováděných na kovových materiálech. Jejich výhodou je jednoduchost a rychlost. „*Tvrdost je obecně definována jako vlastnost, jež se projevuje odporem proti pružné, nebo plastické deformaci tělesa, nebo oddělování části povrchu, nebo jejich kombinaci.*“ Hodnota tvrdosti je posuzována podle velikosti vlisu zkušební tělesa, které je vtlačováno do zkušební vzorku danou silou a za definovaných podmínek[14,15].

Pro zkoumání tvrdosti plechu po procesu vícenásobné plastické deformace metodou DRECE bylo využito zkoušky tvrdosti dle Vickerse. Principem zkoušky je vtlačení zkušební tělesa, které představuje jehlan o čtvercové podstavě s vrcholovým úhlem 136°, do zkoumaného materiálu předem stanoveným zatížením. Hodnotícím kritériem je zde velikost půdorysu vtisku, která je určena velikostí jeho úhlopříček. Konkrétní hodnotu tvrdosti lze určit podle tabulek nebo ze vztahu[15]:

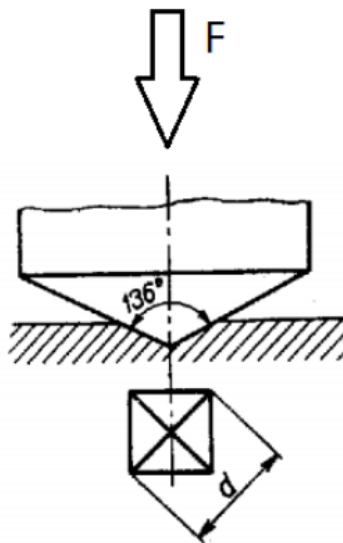
$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} [15]$$

Výhodou této metody je na rozdíl od měření dle Rockwella vysoká přesnost. Použité zatížení je voleno podle předpokládaných vlastností zkoušeného materiálu. Běžně používaná zatížení a označení takto provedené zkoušky je uvedeno v Tab. 11. Pro měření za účelem zjištění tvrdosti v plechu po průchodu geometrií nástroje využívajícího metodu DRECE bylo využito zkoušení tvrdosti dle Vickerse se zatížením 98,07 N, tedy HV 10[15].

Tab. 11 Běžně používaná zatížení a k nim náležící označení[15].

Zkouška tvrdosti dle Vickerse	
Označení	Hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,3
HV 100	980,7

Na obr. 23 je znázorněno schéma měření tvrdosti dle Vickerse. Postup zkoušení je předepsán normou ČSN EN ISO 6507[16].

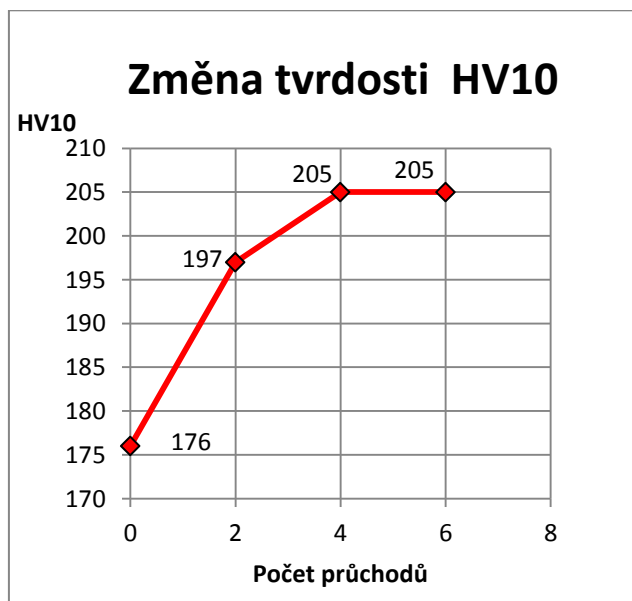
**Obr. 23** Schéma měření tvrdosti dle Vickerse[16].

Měření tvrdosti dle Vickerse u oceli Ck55 bylo vyhodnoceno na vzorcích ve výchozím stavu, po druhém, čtvrtém a šestém průchodu geometrií nástroje tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE. Bylo použito měření v HV 10, při zatížení 98,07 N. Výsledky měření jsou zaznamenány v Tab. 12.

Tab. 12 Výsledky měření tvrdosti HV 10.

Poř. číslo	Označení vzorku	Dél. úhlopříčky		Zatížení F [N]	Průměr d [mm]	Tvrdost HV 10	Průměr
		d_1	d_2				
		[mm]					
1.	Výchozí stav	0,3280	0,3200	98,07	0,3240	177	176
2.	Výchozí stav	0,3250	0,3210	98,07	0,3230	178	
3.	Výchozí stav	0,3270	0,3270	98,07	0,3270	173	
4.	2x	0,3060	0,3070	98,07	0,3065	197	197
5.	2x	0,3090	0,3070	98,07	0,3080	196	
6.	2x	0,3070	0,3070	98,07	0,3070	197	
7.	4x	0,2990	0,2960	98,07	0,2975	210	205
8.	4x	0,3040	0,3040	98,07	0,3040	201	
9.	4x	0,3020	0,3020	98,07	0,3020	203	
10.	6x	0,2990	0,2990	98,07	0,2990	207	205
11.	6x	0,3020	0,3000	98,07	0,3010	205	
12.	6x	0,3020	0,3020	98,07	0,3020	203	

V Graf 12 je graficky znázorněna změna tvrdosti v závislosti na počtu průchodů geometrií tvářecího zařízení. Z grafu lze vyčíst, že nejvyššího nárůstu tvrdosti bylo zaznamenáno po prvních dvou průchodech a to z výchozího stavu – 176 HV 10 o 21 HV 10 na 197 HV 10. Změna tvrdosti po třetím a čtvrtém průchodu byla asi o 8 HV 10.

**Graf 12** Změna tvrdosti HV 10.

4.5 Mikrotvrдость

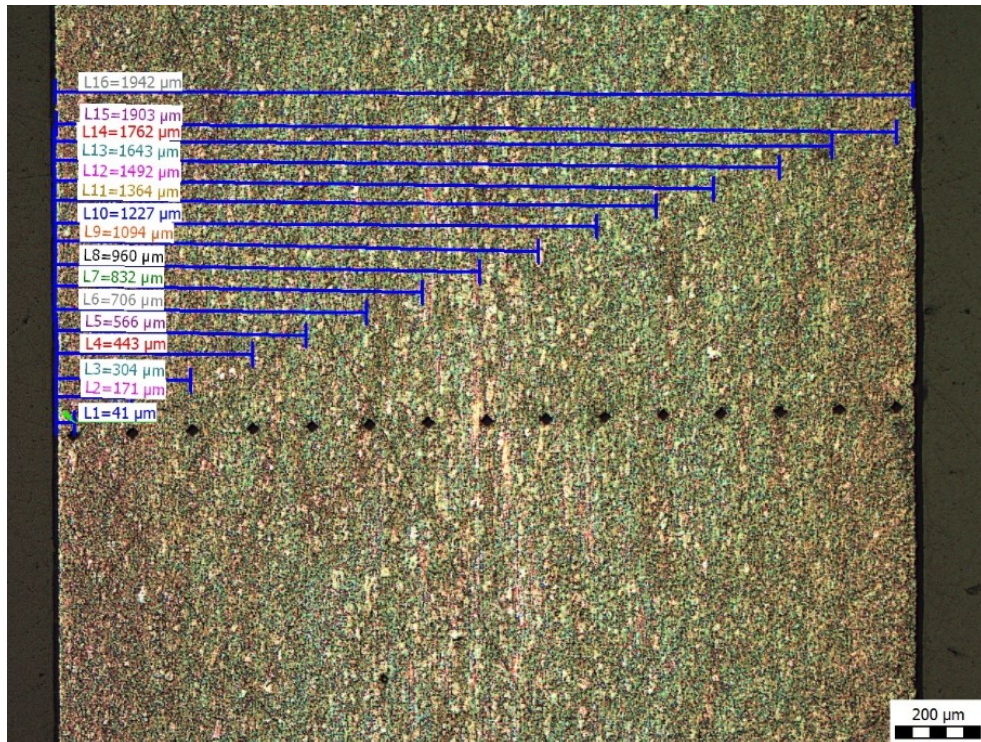
Pro vyhodnocení tvrdosti v řezu pásu plechu oceli Ck55 ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech geometrií tvářecího zařízení využívajícího metodu DRECE bylo využito zkoušky mikrotvrdsti dle Vickerse. Zkouška je principiálně obdobná, jako zkouška makrotvrdsti a liší se v zatížení, které je v případě mikrotvrdsti nízké. Měření mikrotvrdsti lze využít při měření malých nebo tenkých součástí, měření tvrdosti tenkých povlaků, hodnocení svarů, měření křehkých materiálů, zjištění rozdílů tvrdosti mezi hranicemi a vnitřky zrn.

Pro měření mikrotvrdsti musí být povrch, na němž je prováděno měření velmi dobře upraven, například metalografickým výbrusem. Výsledné hodnoty nemůžou být porovnávány s naměřenými hodnotami makrotvrdsti dle Vickerse. Zkouška mikrotvrdsti dle Vickerse je popsána normou ČSN EN ISO 6507-1. Používaná zatížení a k nim příslušná označení pro zkoušení mikrotvrdsti dle Vickerse jsou uvedena v Tab. 13[17].

Tab. 13 Zkušební zatížení a příslušná označení zkoušky mikrotvrdsti[17].

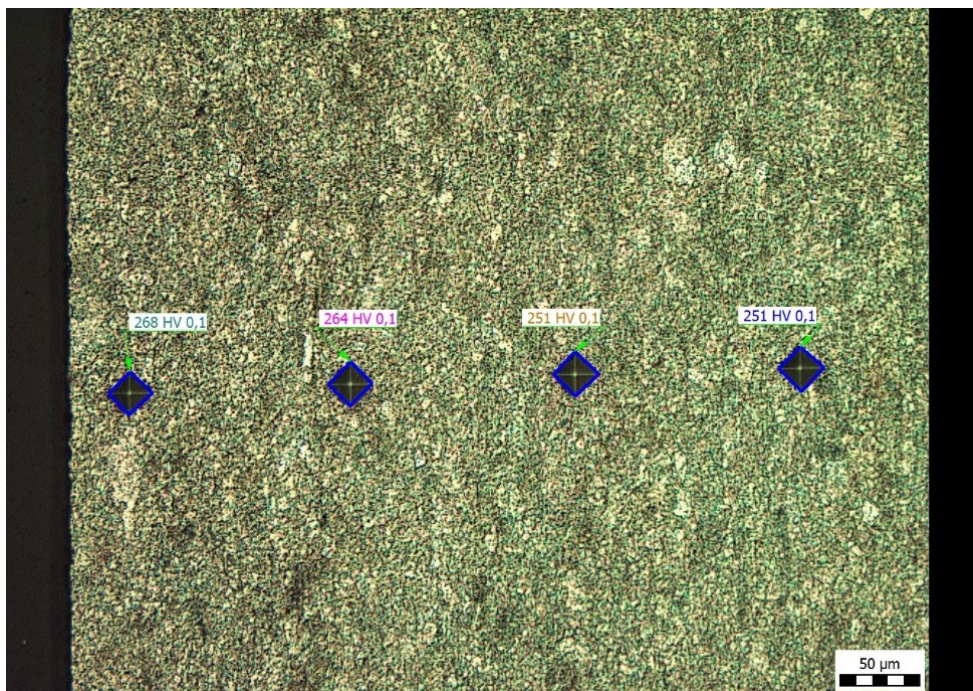
Označení	Zkušební zatížení [N]
HV 0,01	0,098
HV 0,015	0,147
HV 0,02	0,196
HV 0,025	0,294
HV 0,05	0,490
HV 0,1	0,981

Pro vyhodnocení tvrdosti v řezu pásu plechu protlačeného geometrií tvářecího nástroje využívajícího metodu DRECE bylo využito zkoušky mikrotvrdsti HV 0,1 (zatížení 0,981 N). U každého vzorku (výchozí stav, první, druhý a třetí průchod) bylo provedeno celkem 16 vpichů, které byly rovnoměrně rozloženy po celém řezu plechu o tloušťce 2 mm. Rozložení vpichů na zkoušeném vzorku je znázorněno na obr. 24.



Obr. 24 Rozložení vpichů při hodnocení mikrotvrdosti v řezu pásu plechu oceli Ck55.

Na obr. 25 je uveden snímek pořízený při měření mikrotvrdosti. Jedná se o snímek z měření pásu plechu ve výchozím stavu. Ze snímku je vidět, že naměřená tvrdost je nejvyšší v okrajových vrstvách polotovaru.



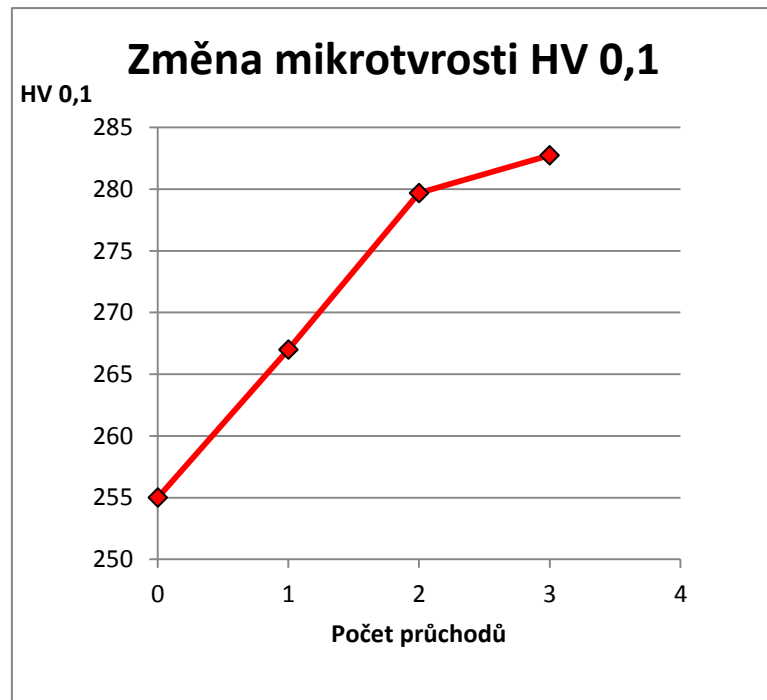
Obr. 25 Snímek z měření mikrotvrdosti.

Údaje z měření mikrotvrdomosti HV 0,1 v řezu pásu plechu oceli Ck55 jsou uvedeny v Tab. 14. Z tabulky lze vyčíst, jaká byla naměřena tvrdost ve vrstvách blíže povrchu zkoušeného plechu a uprostřed materiálu. Hodnoty naměřené při zkoušce mikrotvrdomosti dle Vickerse jsou v tabulce seřazeny tak, že jejich rozmístění v průřezu pásu plechu odpovídá rozvržení, které je uvedeno na obr. 24. Je vidět, že okrajové vrstvy mají vyšší tvrdost již ve výchozím stavu. Po jednotlivých průchodech došlo ke zvýšení hodnot a tedy ke zpevnění materiálu.

Tab. 14 Hodnoty mikrotvrdomosti HV 0,1.

Číslo měření	Výchozí stav	První průchod	Druhý průchod	Třetí průchod
1	268	314	351	326
2	264	282	308	338
3	251	264	292	326
4	251	264	287	264
5	251	255	260	263
6	251	251	273	264
7	251	259	259	260
8	251	243	255	298
9	251	264	282	260
10	255	260	251	264
11	255	263	268	260
12	251	264	260	260
13	251	264	260	264
14	251	263	268	273
15	260	259	287	278
16	268	303	314	326
Průměr	255	267	279,79	282,75

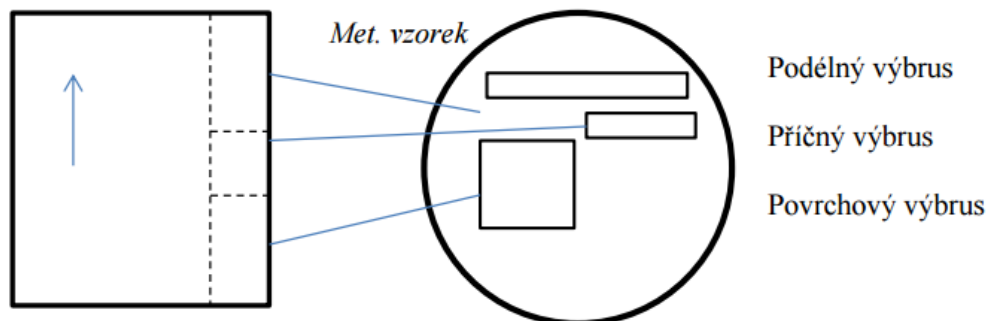
Průměrný nárůst mikrotvrdomosti v průřezu pásu plechu oceli Ck55 je graficky znázorněn v Graf 13. Z grafu je patrné, že podstatného zpevnění došlo po prvních dvou průchodech geometrií tvářecího zařízení. Po dvou průchodech došlo ke zvýšení o 25 HV 0,1. Po třetím průchodu byl nárůst nižší.



Graf 13 Průměrná změna mikrotvrdości.

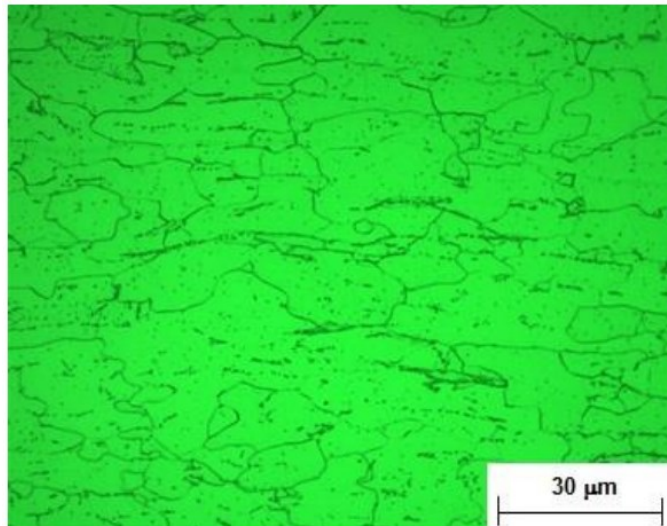
4.6 Metalografická analýza

Kontrola mikrostruktury byla provedena na výbrusech vzorků po naleptání 4% HNO₃ (NITAL). Schéma jejich odběru a orientace vůči směru průtahu, je uvedeno na V případě výbrusu orientovaného rovnoběžně s povrchem plechu došlo k úběru povrchových vrstev vlivem přípravy o 0,1 mm. Na obr. 26 je znázorněna orientace odběru vzorků z pásu plechu. Odebrané vzorky byly zality do matrice, vybroušeny a bylo na nich kromě metalografické analýzy provedeno měření tvrdosti a mikrotvrdości.



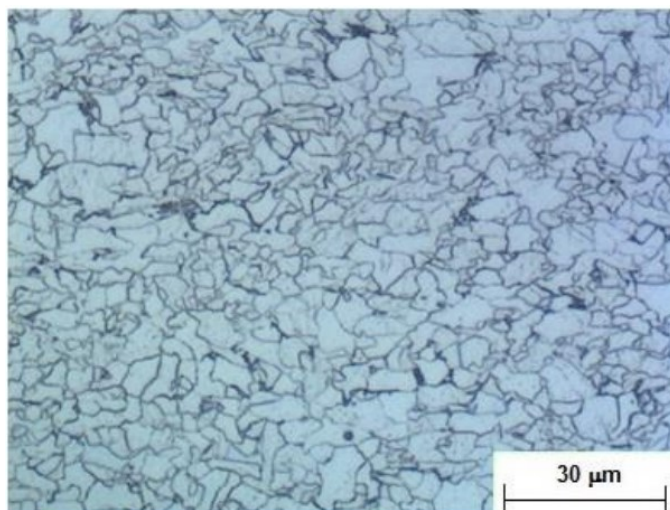
Obr. 26 Orientace odběru vzorků.

Struktura u vzorků oceli Ck55 je tvořena dokonale sferoidizovaným (zrnitým) perlitem vcelku rovnoměrně rozloženém ve feritické matici. Na následujících snímcích bylo použito stejné zvětšení (500x). Snímek vzorku ve výchozím stavu je uveden na obr. 27. Průměrná velikost zrna se pohybuje v rozmezí 30-40 μm [11].



Obr. 27 Metalografický snímek - výchozí stav[11].

Z obr. 28, kde je uveden snímek vzorku po prvním průchodu geometrií tvářecího zařízení, je patrné, že došlo ke snížení velikosti zrn. Velikost zrn po prvním průchodu se pohybovala v rozmezí 5-8 μm [11].



Obr. 28 Metalografický snímek - vzorek po prvním průchodu[11].

5 Celkové vyhodnocení

Po provedení experimentů a po jejich vyhodnocení lze tvrdit, že je metoda DRECE vhodná pro zvýšení jakosti pásu plechu oceli Ck 55.

5.1 Mechanické vlastnosti

Po vyhodnocení tahových zkoušek bylo pozorováno zvýšení smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) a meze pevnosti (R_m). Po dvou průchodech tvářecím, zařízením bylo dosaženo zvýšení meze kluzu o 32%. Tažnost se snížila o podstatnou hodnotu až po pátém a šestém průchodu. Lze tedy tvrdit, že optimální počet průchodů je dva maximálně čtyři.

5.2 Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování

V práci byla vyhodnocena možnost zařazení mezioperačního tepelného zpracování. Byly zkoušeny vzorky po tepelném zpracování při různých teplotách a časech. Z těchto údajů bylo určeno tepelné zpracování při teplotě 450°C po dobu 60 minut, jako nejvhodnější, jelikož bylo pozorováno velmi příznivého poměru meze kluzu a tažnosti.

5.3 Erichsenova zkouška

Erichsenova zkouška v podstatě potvrdila to, že ve tvářeném plechu došlo ke zpevnění. Byl ověřen vliv orientace směru odběru vzorku vzhledem ke směru válcování polotovaru na výsledné vlastnosti polotovaru.

5.4 Tvrdost – Vickers

Pro měření tvrdosti byla využita zkouška tvrdosti dle Vickerse. Bylo provedeno měření na povrchu předem připraveného vzorku. Byl pozorován výrazný nárůst tvrdosti po prvních dvou průchodech geometrií tvářecího zařízení. Nárůst po prvních dvou průchodech byl o 21 HV 10.

5.5 Mikrotvrdost

Pro získání údajů o tvrdosti v řezu pásu plechu oceli Ck 55 ve výchozím stavu a po průchodech geometrií tvářecího nástroje bylo využito měření mikrotvrdomosti dle Vickerse. Jednotlivé vpichy pro vyhodnocení tvrdosti byly rovnoměrně rozloženy po celé tloušťce plechu. Naměřené hodnoty potvrdily předešlé tvrzení, že bylo dosaženo rozdílné tvrdosti na horní a spodní straně protlačeného plechu.

5.6 Metalografická analýza

Údaje o struktuře oceli Ck 55 a vlivu počtu průchodů na velikost zrna poskytla metalografická analýza. Bylo pozorováno výrazné zjemnění zrna po prvním průchodu viz obr. 27, 28. Vzhledem k tomu, že analýza na světelném mikroskopu není dostačující, je vhodné provést analýzu struktury TEM. Tuto analýzu je vhodné provést v dalších výzkumných pracích.

6 Závěr

V úvodní teoretické části byla vypracována rešerše zaměřená na nové trendy v metodách vícenásobné plastické deformace. Popis principu jednotlivých metod je doplněn o obrázky a schémata. Teoretická část je doplněna o příklady využití UFG materiálů v praxi

V diplomové práci jsem ověřoval vliv SPD procesu na změnu mechanických vlastností v pásu oceli Ck 55. Pro uvedení do dané problematiky bylo odborně popsáno konstrukční řešení a možnosti regulování tvářecích parametrů. Byly zkoumány vlivy nastavení tvářecích parametrů na výslednou účinnost celého procesu. Bylo prokázáno, že největší vliv na efektivitu celého procesu má úhel, daný geometrií tvářecího nástroje. Při využití úhlu 108° bylo pozorováno výsledků, které tento úhel označily, jako optimální. Hodnotícím kritériem zde byly především hodnoty meze kluzu a tažnosti. Zásadní vliv velikosti přitlaků a podávací rychlosti nebyl pozorován.

Zkoušky mechanických vlastností potvrdily vhodnost oceli Ck 55 ke zvyšování jakosti použitím SPD procesu. Byla vyhodnocena vhodnost zařazení mezioperačního tepelného zpracování a zvoleny jeho optimální parametry. Dalším ukazatelem zpevnění zkoumaného materiálu bylo měření tvrdosti na povrchu dle Vickerse, které bylo doplněno o měřené tvrdosti v řezu pásu plechu. Měření mikrotvrdosti prokázalo, že došlo ke zpevnění v celém průřezu polotovaru. V průřezu nebyly pozorovány velké změny tvrdosti.

Jelikož provedená metalografická analýza při použití světelného mikroskopu není dostačující, je vhodné provést dalších pracích detailnější rozbor struktury za pomoci například analýzy TEM, která by poskytla další důležité informace.

Ve firmě HOBES s.r.o. Horní Benešov a firmě BRANO a.s. Hradec nad Moravicí byl vstupně prokázán přínos výsledků dosažených metodou DRECE pro průmyslovou praxi v podobě praktických aplikací na strojní součást.

7 Seznam obrázků

Obr. 1 Metoda ECAR.....	13
Obr. 2 a) výchozí stav b) po 2. průchodu c) po 8. průchodu.....	14
Obr. 3 Vzorek po 10. průchodu zařízením ECAR.	14
Obr. 4 Metoda Multi-ECAP-Conform	15
Obr. 5 Multi-ECAP-Conform	16
Obr. 6 Princip metody ECAP-Conform.....	16
Obr. 7 Metoda LSEM.....	17
Obr. 8 Oddělování třísek o různých velikostech metodou LSEM.	18
Obr. 9 Asymetrické válcování.	18
Obr. 10 Asymetrické válcování s kuželovitými válci.	19
Obr. 11 Metoda I-ECAP.	20
Obr. 12 Součásti zubních implantátů:	21
Obr. 13 Zadlabací zámek firmy HOBES, spol. s.r.o:.....	21
Obr. 14 Tvářecí zařízení využívající metodu DRECE.....	22
Obr. 15 a) umístění přítlačných válců a manometrů na tvářecím zařízení, b) přítlak.	23
Obr. 16 Regulace tlaku.....	24
Obr. 17 a) spodní nástroj, b) horní nástroj, c) povrch přítlačného válce.	24
Obr. 18 Úhel v zóně deformace.	25
Obr. 19 Měření tvrdosti podle Rockwella.....	29
Obr. 20 Erichsenova zkouška.....	41
Obr. 21 Erichsenova zkouška Ck 55	42
Obr. 22 Charakteristika lomových ploch po Erichsenově zkoušce	43
Obr. 23 Schéma měření tvrdosti dle Vickerse.	45
Obr. 24 Rozložení vpichů při hodnocení mikrotvrdosti v řezu pásu plechu oceli Ck55.....	48
Obr. 25 Snímek z měření mikrotvrdosti.....	48
Obr. 26 Orientace odběru vzorků.....	50
Obr. 27 Metalografické snímek - výchozí stav.....	51
Obr. 28 Metalografický snímek - vzorek po prvním průchodu.	51

8 Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení AZ31.....	14
Tab. 2 Chemické složení Al 6101.....	15
Tab. 3 Chemické složení oceli Ck55.	26
Tab. 4 Hodnoty meze kluzu při použití různých úhlů nástroje.....	26
Tab. 5 Hodnoty tažnosti při použití různých geometrií nástroje.....	27
Tab. 6 Měření tvrdosti HRB na horní a spodní straně plechu z oceli Ck 55 po metodě DRECE.....	31
Tab. 7 Hodnoty HRB naměřené na vzorcích protlačených při poloviční posuvové rychlosti.	32
Tab. 8 Tvrdost HRB na vzorcích při použití rozdílných tlaků na přítlačných válcích.	33
Tab. 9 Vyhodnocení tahových zkoušek.	36
Tab. 10 Vyhodnocení tahových zkoušek na vzorcích po tepelném zpracování.	38
Tab. 11 Běžně používaná zatížení a k nim náležící označení.	45
Tab. 12 Výsledky měření tvrdosti HV 10.	46
Tab. 13 Zkušební zatížení a příslušná označení zkoušky mikrotvrdosti.....	47
Tab. 14 Hodnoty mikrotvrdosti HV 0,1.....	49

9 Seznam grafů

Graf 1 Vliv geometrie tvářecího nástroje na změnu meze kluzu po průchodech tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE.....	27
Graf 2 Změna tažnosti v závislosti na počtu průchodů a použité geometrii tvářecího nástroje.....	28
Graf 3 Změna tvrdosti HRB na horní a spodní straně plechu.	31
Graf 4 Změna tvrdosti HRB při použití nižší posuvové rychlosti.	33
Graf 5 Tvrdost HRB na vzorcích protlačených při použitírozdílných tlaků na přítlačných válcích.	34
Graf 6 Změna meze kluzu v závislosti na počtu průchodů.	37
Graf 7 Změna tažnosti v závislosti na počtu průchodů.	37
Graf 8 Mez kluzu na vzorcích po tepelném zpracování.....	39
Graf 9 Tažnost vzorků po tepelném zpracování.	40
Graf 10 Naměřené hodnoty práce.	41
Graf 11 Hloubka prohloubení.	42
Graf 12 Změna tvrdosti HV 10.	46
Graf 13 Průměrná změna mikrotvrdosti.....	50

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Stanislavu Ruzovi, CSc. z VŠB-TU Ostrava za pomoc při provádění experimentu a při řešení diplomové práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ZRNÍK, Jozef. *Evropská strategie výrobních procesů*. Ostrava: Repronis, 2007. ISBN 978-80-7329-153-2.
- [2] ZEHETBAUER, M. J., et al. The role of hydrostatic pressure in severe plastic deformation. *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, 2005, 433-446
- [3] KEDROŇ, J., *Vývoj nových nekonvenčních tvářecích technologií: disertační práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 152 s. Školitel: Rusz, S.
- [4] HASSANI, F. Z.; KETABCHI, M. Nano grained AZ31 alloy achieved by equal channel angular rolling process. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528.21: 6426-6431.
- [5] FAKHRETDINOVA, Elvira, et al. Processing ultrafine-grained aluminum alloy using Multi-ECAP-Conform technique. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2014. p. 012037.
- [6] VALIEV, Ruslan Z., et al. Bulk nanostructured metals for innovative applications. *JOM*, 2012, 64.10: 1134-1142.
- [7] S.L. Cai, Y. Chen, G.G. Ye, M.Q. Jiang, H.Y. Wang, L.H. Dai. Characterization of the deformation field in large-strain extrusion machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, 45-58.
- [8] AZBANBAYEV, Eldar, Aristotel ISAGULOV, Nurlybek ZAKARIYA, Nursultan YERMAGANBETOV a Yermaganbetov MARAL. Effect of asymmetric Rolling with frusto-conical tools on microstructure of low-carbon steel. *Nano SPD*. 2014, (UDCUDC621.7.011), 2.

[9]ROSOCHOWSKI, A a OLEJNIK. Incremental ECAP of thick continuous plates – machine and initial trials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014, 63. DOI: 10.1088/1757-899X/63/1/012010. ISSN 1757-8981. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/63/i=1/a=012010?key=crossref.2210d1e9df0324914cee0f99828c28b7>

[10]Timplant ®. *Timplant ® - zubní implantáty* [online]. Ostrava: ToshTak, 2008 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.timplant.cz/cs/>

[11]Development of geometry of forming tools for extrusion of strip sheet by SPD process S Rusz 1 , M Salajka 1 , J Džugan 2 , O Hilšer 1 , J Bořuta 1 , M Pastrňák 1 and J Švec 1

[12]*Měření tvrdosti* [online]. Ostrava: Proinex Instruments, s.r.o, 2005-217 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>

[13]Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. [Http://jhamernik.sweb.cz/](http://jhamernik.sweb.cz/) [online]. Pelhřimov, 2006. [cit. 2017-05-08] Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

[14]PÍŠEK F. *Nauka o materiálu II* (1. svazek). vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660 s. bez ISBN

[15]METROTEST, s.r.o Kladno. [online]. 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z : <http://www.metrotest.cz/pristroje-pro-testovani/tvrdomery/>

[16]SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R. a BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: [s.n.], 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.

[17] *Zkousky_tvrdosti* [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z WWW: . https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf