

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Zvyšování mechanických vlastností u vybraných materiálů procesem SPD
Increasing of Mechanical Properties of Selected Materials by SPD Process

Student:

Pavel Szkandera

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Szkandera**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 23C3R002 Strojírenská technologie

Téma: **Zvyšování mechanických vlastností u vybraných materiálů procesem SPD**
Increasing of Mechanical Properties of Selected Materials by SPD Process

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu metod zjemňování zrna s využitím procesu vícenásobné plastické deformace (SPD)
- 2) Popište metodiku provádění experimentů pro pás plecha, kruhový a hranolovitý polotovár na speciálních tvářecích zařízeních
- 3) Stanovte metodiku vyhodnocování experimentů
- 4) Proveďte měření a vyhodnocení mechanických vlastností v pásu plechu u vybraných materiálů po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením. Výsledky porovnejte s výchozím stavem
- 5) Proveďte celkové vyhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) HIRSH J. *Materials Science Forum*, 2009, p. 604–605, 259–266.
- 2) GARCÍA-INFANTA, J. M., ZHILYAEV, A. P., CEPEDA-JIMÉNEZ, C. M., RUANO, O. A., CARRENO, F. *Scripta Materialia*, 2008, vol. 58, p. 138.
- 3) MAZURINA, I., SVIDKOV, O., KAIBYSHEV, R. and MIURA, H. Effect of deformation temperature on microstructure in 2219 aluminium alloy during ECAP. *Rev. Adv. Materials Science and Forum*, December 2007, vol. 559, p. 554–550.
- 4) MCKENZIE, P. W. J., LAPOVOK, R. ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 2: Mechanical properties and texture. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, p. 3212–3222
- 5) VALIEV, R. Z., LANGDON, T. G. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, p. 881.
- 6) VALIEV, R. Z. The new SPD processing trends to fabricate bulk nanostructured materials. *Rev. Adv. Material Science and Forum*, June 2007, vol. 114, p. 7–18.
- 7) VARYUKHIN, V., SYNKOV, S. and ORLOV, D. Application of twist extrusion. *Rev. Adv. Materials Science and Forum*, January 2006, vol. 504, p. 335–333.
- 8) WEI, L., LIPING, B., GUOYIN, X., WENLI, Z., HONGXIA, W., SHUNQI, W. Transformation matrix analysis of the shear characteristics in multi-pass ECAP processing and predictive design of new ECAP routes. *Materials Science and Engineering*, 2010, A 527, p. 5557–5564.

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

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry




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



Místopřísežné prohlášení studenta

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


V Ostravě 2. 5. 2016


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských 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 bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen vedoucího bakalářské 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 – bakalářskou 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: 2. 5. 2016


podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Szkandera

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Horní Lomná 54,
739 91 Jablunkov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SZKANDERA, P. *Zvyšování mechanických vlastností u vybraných materiálů procesem SPD: bakalářská práce*. Ostrava VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 53 s. Vedoucí práce: Ruzs, S.

Bakalářská práce se zabývá technologiemi intenzivní plastické deformace (SPD). V práci jsou popsány dostupné metody SPD a také experimenty, které byly provedeny. V praktické části práce byly provedeny experimenty na pásech plechů u dvou typů oceli metodou DRECE s cílem dosažení zvýšení mechanických vlastností. Na těchto polotovarech bylo posléze provedeno měření a vyhodnocení tvrdosti, mechanických vlastností a struktury. V závěru bakalářské práce je provedeno shrnutí dosažených výsledků.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SZKANDERA, P. *Increasing of Mechanical Properties of Selected Materials by SPD Process: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical technology, 2009, 53 p. Thesis head: Ruzs, S.

Bachelor thesis is dealing with the technologies severe plastic deformation (SPD). In the thesis are described available methods SPD and also experiments with were performed. In the practical part were done experiments on the metal strips on two types of steel by method DRECE to achieve increase of mechanical properties. On this semi-product was finally done measurement and evaluation of hardness, mechanical properties and structure analyze. In the conclusion of the bachelor thesis is done summarized of achieved results.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 SPD (SEVERE PLASTIC DEFORMATION)	12
1.1 Princip SPD	12
1.2 Proces zjemňování zrn	12
2 HLAVNÍ METODY SPD	13
2.1 ECAP (Equal channel angular pressing)	13
2.1.1 Princip metody	13
2.1.2 Inovace metody ECAP	14
2.2 HPT (High Pressure Torsion)	16
2.2.1 Princip metody	16
2.2.2 Typy metody HPT	17
2.3 CEC (Cyclic Extrusion Compression)	19
2.4 CONFORM (Continuous Extrusion Forming)	20
2.5 ARB (Accumulative-Roll-Bonding)	21
2.6 DCAP (Dissimilar channel angular pressing)	21
2.7 CCDC (Cyclic Equal Channel Die Compression)	22
3 EXPERIMENT NA TVÁŘECÍM ZAŘÍZENÍ (metoda DRECE)	23
3.1 Vlastní experimentální práce	23
3.2 Experimentálně ověřené oceli	28
4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	30
4.1 Kontrola mikrostruktury	30
4.1.1 Kontrola mikrostruktury oceli S235	31
4.1.2 Kontrola mikrostruktury oceli CK55	33
4.2 Tahová zkouška	36
4.2.1 Tahová zkouška oceli S235	36

4.2.2	Tahová zkouška oceli CK55	39
4.3	Zkouška tvrdosti	42
4.3.1	Zkouška tvrdosti oceli S235	42
4.3.2	Zkouška tvrdosti oceli CK55	44
	ZÁVĚR	46
	PODĚKOVÁNÍ	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITRATURY	48
	SEZNAM PŘÍLOH	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Název	Jednotka
A_{150}	tažnost na měřené délce 150 mm	[%]
d_0	vstupní průměr kanálu	[mm]
d_m	zúžený průměr kanálu	[mm]
HV	tvrdost dle Vickerse	[HV]
K	posunutí kanálů	[mm]
N	směr stříhu	[-]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	mez kluzu	[MPa]
T_m	teplota tavení	[°C]
α	úhel nástroje	[°]
$\Delta\varepsilon$	celkové zpevnění materiálu	[°]
Φ	úhel mezi dvěma kanály	[°]
ψ	vnější úhel zakřivení kanálů	[°]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ARB	Accumulative- Roll- Bonding (Vícenásobné dělení a válcování)
CCDC	Cyclic Equal Channel Die Compression (Cyklické pěchování v kanálu)
CEC	Cyclic Extrusion Compression (Cyklické protlačování a pěchování)
CONFORM	Continuous Extrusion Forming (Kontinuální vytlačování spojené s pěchováním)
DCAP	Dissimilar channel angular pressing (Válcování + ECAP)
DRECE	Dual rolls equal channel extrusion
ECAP	Equal channel angular pressing (protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem)
ECAP-C	Equal channel angular pressing- Conform
ECAP- PC	Equal channel angular pressing- parallel channels (protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem s paralelními kanály)
HPT	High Pressure Torsion (krut spojený s vysokým tlakem)
SPD	Severe Plastic Deformation (vícenásobná (intenzivní) plastická deformace)
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
UFG	Ultrafine- grained
VS	Výchozí stav materiálu

ÚVOD

Trendem dnešní strojírenské výroby je snižování celkových nákladů na výrobu při zachování stejné nebo vyšší kvality. Proto probíhá výzkum různých nekonvenčních metod tváření. Nekonenční metody tváření umožňují snížení nákladů díky nahrazení kvalitnějších ocelí s vyšším obsahem uhlíku méně kvalitní ocelí.

Dílčím cílem mé práce je rešerše současného stavu metod tváření SPD (severe plastic deformation). Hlavní výhodou metod SPD je zlepšování mechanických vlastností u méně kvalitních ocelí. Zlepšené mechanické vlastnosti umožňují nahrazování kvalitnějších ocelí, nebo používání stejných ocelí ale s menší tloušťkou stěn.

Hlavním cílem bakalářské práce je provedení experimentu na vybraných materiálech metodou DRECE a následně vyhodnocení získaných mechanických vlastností a metalografické struktury. V této práci je provedeno porovnání mechanických vlastností (mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a tvrdost) materiálů ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech pásů plechů metodou DRECE. V závěru práce je provedeno celkové vyhodnocení dosažených výsledků.

1 SPD (SEVERE PLASTIC DEFORMATION)

1.1 Princip SPD

Metody vícenásobné (intenzivní) plastické deformace (SPD) jsou metody, které vyvíjejí velké napětí ve tvářeném materiálu, čímž dojde k zjemnění zrn materiálu. Tyto metody jsou charakteristické tím, že nedochází ke změně rozměrů materiálu, na který působí velké tvářecí síly. Tváření metodami SPD se provádí za poměrně nízkých teplot, přibližně do $0,4 T_m$. K intenzivní plastické deformaci se používají tvářecí nástroje se speciální geometrií, která zaručuje dosažení požadovaných vlastností materiálů po tváření. [1]

Metody SPD jsou vhodné pro tváření jak železných, tak i neželezných materiálů. Cílem procesů SPD je nahrazení drahých materiálů levnějšími, nebo úspora hmotnosti při zachování stejných mechanických vlastností. Materiály tvářené metodami vícenásobné deformace mají velké uplatnění v široké škále strojírenského průmyslu.

1.2 Proces zjemňování zrn

Pro dosažení UFG struktury procesy vícenásobné plastické deformace existuje několik základních podmínek. [2] První podmínkou je provádění procesů SPD za nízkých teplot, kdy se dosahuje ideální dislokační hustoty. [3, 4] Další podmínkou je dodržení předepsaného úhlu namáhání materiálu během tváření. [3] Dále je potřebné působit na tvářený materiál vysokým tlakem, obvykle vyšším než 1 GPa. Působením vysokého tlaku na materiál je dosahováno požadované výkonnosti metod SPD. Vysoký tlak rovněž zlepšuje deformovatelnost materiálu v průběhu tváření a zvyšuje pevnost materiálu. [5, 6]

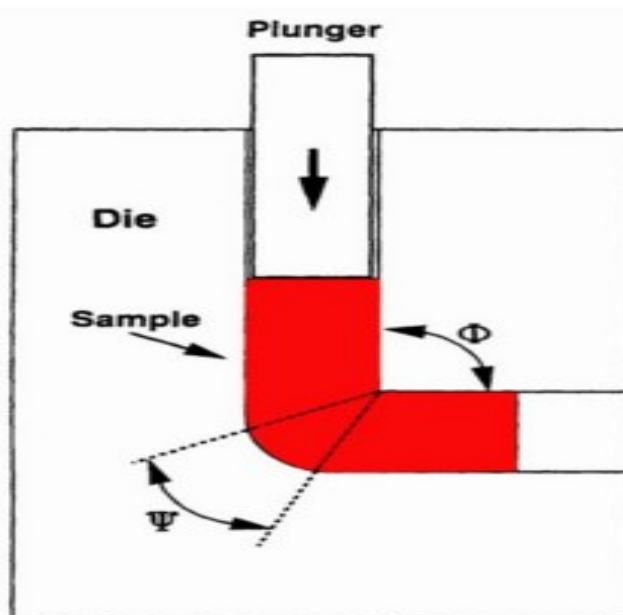
2 HLAVNÍ METODY SPD

2.1 ECAP (Equal channel angular pressing)

2.1.1 Princip metody

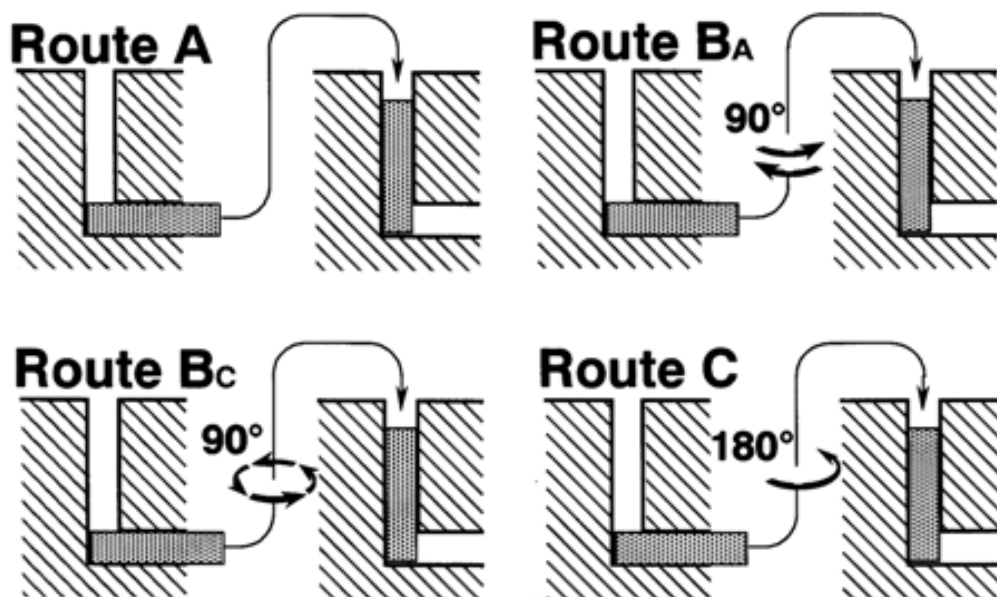
Metoda ECAP je proces tváření materiálu, při kterém dochází k namáhání materiálu stříhem. Stříh, který vzniká působením tlaku pístu na vzorek, vyvolává kluzové systémy v materiálu. [7, 6] Při protlačování působí síla na tvářený materiál v každém místě tvářecí matrice. Vliv síly na tvářený materiál v průběhu protlačování lze analyticky určit. [8] Princip metody ECAP je shodný pro kruhový i pro čtvercový průřez materiálu a je znázorněn na Obr. 1.

Materiál může být protlačován vícenásobně, jelikož se po jednotlivých průchodech zařízením nemění jeho rozměry. Vícenásobné protlačování zvyšuje míru deformace v materiálu a zlepšuje tím jeho výsledné vlastnosti. [9]



Obr. 1 Princip metody ECAP [9]

Na Obr. 2 jsou znázorněny čtyři základní možnosti zpracování materiálu metodou ECAP. Při první možnosti (Route A) není materiál mezi jednotlivými průchody kanálem otáčen. Ve druhém a třetím způsobu provádění (Route B_A a Route B_C) je tvářený materiál po jednotlivých průchodech tvářecím kanálem otáčen o 90°. Rozdíl mezi druhým a třetím způsobem je pouze ve smyslu otáčení tvářeného materiálu, buď je otáčen ve směru hodinových ručiček, nebo proti směru hodinových ručiček. Při čtvrtém způsobu provádění metody ECAP (Route C) je tvářený materiál po každém průchodu otáčen o 180°. Všechny tyto způsoby provádění metody ECAP bývají často vhodně kombinovány tak, aby se maximálně využily jejich výhody při tváření materiálu. [10]



Obr. 2 Provedení ECAP [11]

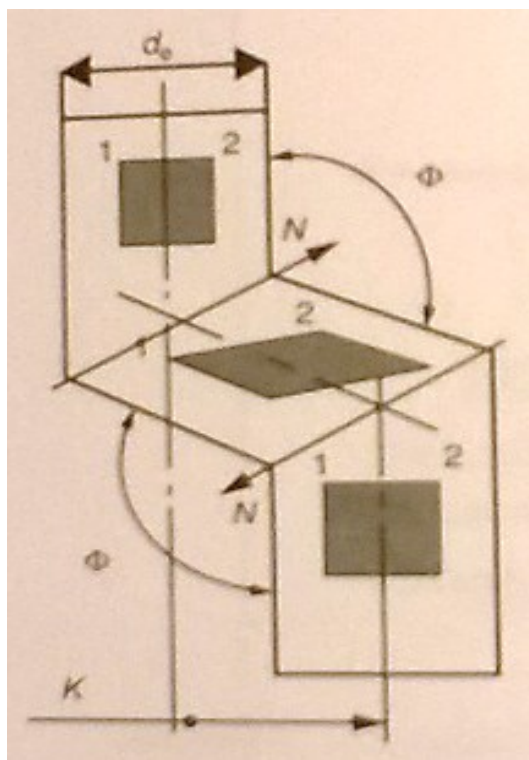
2.1.2 Inovace metody ECAP

V současnosti je vyvíjena řada zlepšení metody ECAP. Mezi nejperspektivnější vylepšení metody ECAP se řadí metoda, která spočívá v používání zařízení, jež obsahuje dva paralelní tvářecí kanály. [12, 13, 14, 15]

Tato inovativní metoda se označuje jako ECAP with parallel channels (ECAP-PC). Metoda je typická tím, že v průběhu procesu protlačování materiálu tvářecí maticí dochází dvakrát k intenzivnímu stříhovému namáhání materiálu. [15, 16] Díky této vlastnosti jsme schopni značně snížit počet průchodu materiálu tvářecím zařízením při

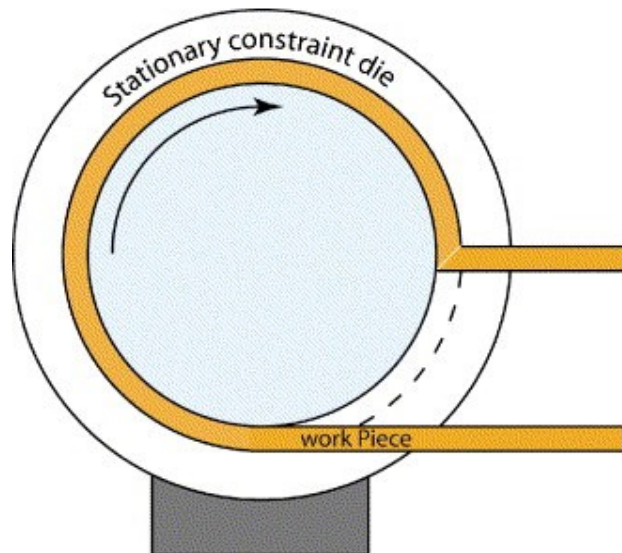
zachování stejných vlastností jako u původní metody ECAP. Touto metodou rovněž můžeme dosáhnout UFG struktury v tvářeném materiálu. [1]

Princip tohoto procesu je znázorněn na Obr. 3. Úhel ϕ je úhel zakřivení kanálů a parametr K charakterizuje posunutí jednotlivých kanálů a N označuje směr stříhu. [16] Při simulování této metody bylo zjištěno, že optimální velikost úhlu ϕ je 100° a parametru K je přibližně roven průměru kanálu. [1]



Obr. 3 Princip ECAP- PC [16]

Druhá velmi významná inovace metody ECAP je označována jako ECAP-Conform (ECAP-C). [17] Tato metoda byla vyvinuta pro tváření hliníkových slitin [18, 19] a titanu [20]. Obr. 4 znázorňuje princip zařízení pro metodu ECAP- C. Materiál vstupuje do zařízení vstupním kanálem, poté je veden vnitřním otvorem v zařízení. Třecí síla mezi rotující hřídelí a tvářeným materiálem zajišťuje jeho pohyb. Na výstupu z tvářecího zařízení přechází vnitřní kanál pod úhlem 90° do výstupního kanálu. [18]

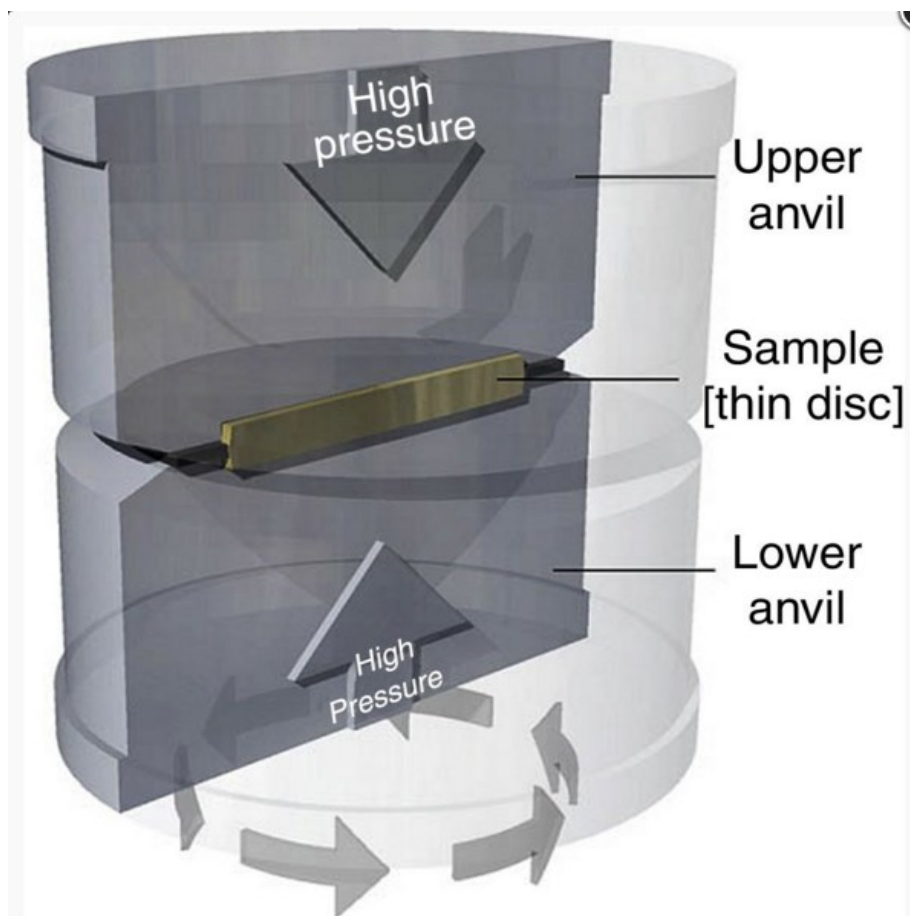


Obr. 4 Princip ECAP- C [21]

2.2 HPT (High Pressure Torsion)

2.2.1 Princip metody

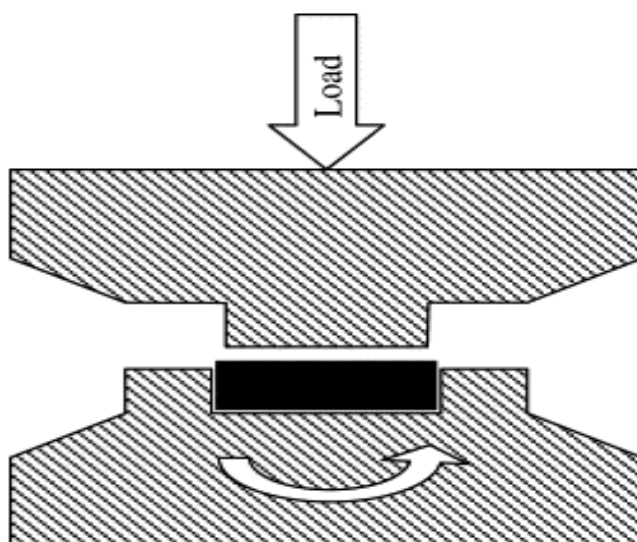
Při tváření metodou HPT je materiál vložen mezi horní a dolní lisovnice. Horní lisovnice vyvíjí vysoký tlak na tvářený materiál a dolní lisovnice působí na materiál krutem. Díky třecím silám mezi lisovnicí a tvářeným materiálem dochází k deformacím vzorku. Metoda HPT se provádí buď za pokojové teploty, nebo se materiál přehřívá. [22] Princip metody HPT je znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5 Princip HPT [23]

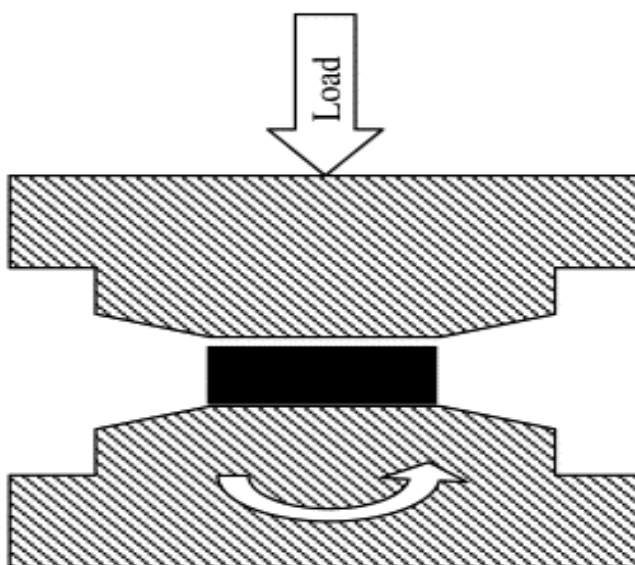
2.2.2 Typy metody HPT

Uzavřený typ HPT, který je zobrazený na Obr. 6, využívá protitlak, který vzniká při působení tlaku lisovníku na materiál v uzavřeném prostoru. Vyrobení ideální horní a dolní tvářecí matrice, jež by zaručovala dokonalé uzavření materiálu, je však velmi obtížné. V praxi téměř vždy dochází k mírnému toku materiálu mezi horním a dolním lisovníkem. [24]



Obr. 6 Uzavřený typ HPT [24]

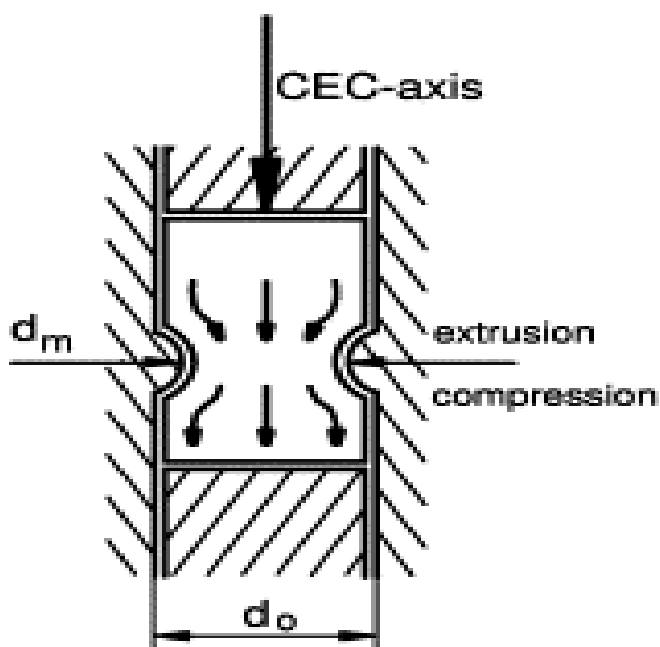
Princip neuzavřeného typu HPT je zobrazen na Obr. 7. Při tváření neuzavřeným typem HPT může materiál při působení tlaku volně téci do stran. Při této metodě se nevyžívá účinek protitlaku na materiál, jelikož téměř nevzniká. [24]



Obr. 7 Neuzavřený typ HPT [24]

2.3 CEC (Cyclic Extrusion Compression)

Metoda CEC se provádí protlačováním vzorku tvářecí matricí, která má kruhový kanál. Kruhový kanál je charakteristický změnou vnitřního průměru. Vzorek nejprve prochází kanálem o stejném průměru jako je průměr vzorku (průměr d_0), poté je kanál zúžen na průměr d_m , a v poslední fázi je kanál opět rozšířen na výchozí průměr d_0 . Při průchodu vzorku kanálem dochází k jeho protlačení a pěchování, čímž dochází k celkovému zpevnění tvářeného materiálu přibližně $\Delta\epsilon=4$. Materiál může procházet kanálem několikrát a každým jednotlivým průchodem dosahujeme zvýšení velikosti zpevnění materiálu. [25] Princip metody je zobrazen Obr. 8.

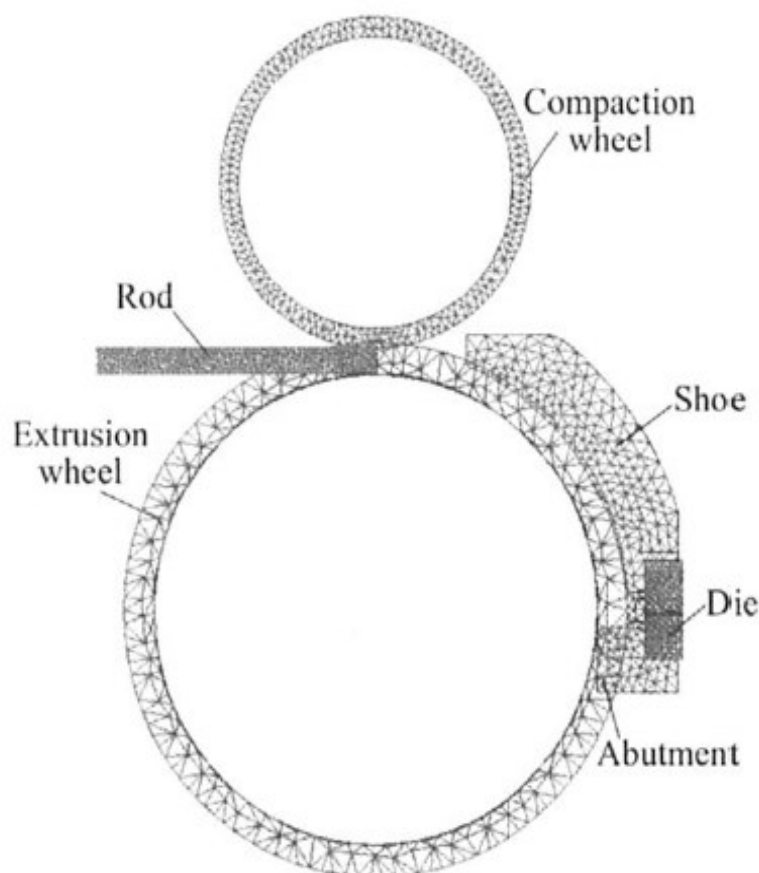


Obr. 8 Princip metody CEC [25]

2.4 CONFORM (Continuous Extrusion Forming)

Metoda CONFORM je metoda, při níž je tvářený materiál nepřetržitě vtahován do dutiny tvářecí matrice, ve které dochází k zpevnění materiálu. Průchod materiál je zajištěn třením mezi materiálem a kanálem v rotujícím protlačovacím kole. Princip metody je zobrazen na Obr. 9. Účinnost této metody je závislá na úhlové rychlosti protlačovacího kola. Při nízké úhlové rychlosti se podstatně snižuje efektivita této metody, při vyšší úhlové rychlosti roste zpevnění materiálu, ale také se zvyšuje teplota. [26]

Metoda CONFORM má své uplatnění zejména při nepřetržitém tváření tyčí, trubek a profilů z hliníkových slitin. Metoda je vhodná rovněž pro tváření pásů a pestrého rozsahu profilů ze slitin mědi. Pro tváření těchto materiálů není zapotřebí zařazovat jejich předehřev, čímž se dosahuje vysoké homogenity tvářeného materiálu, úspora energie a zvyšuje se celková efektivita této metody. [27]



Obr. 9 Princip metody CONFORM [26]

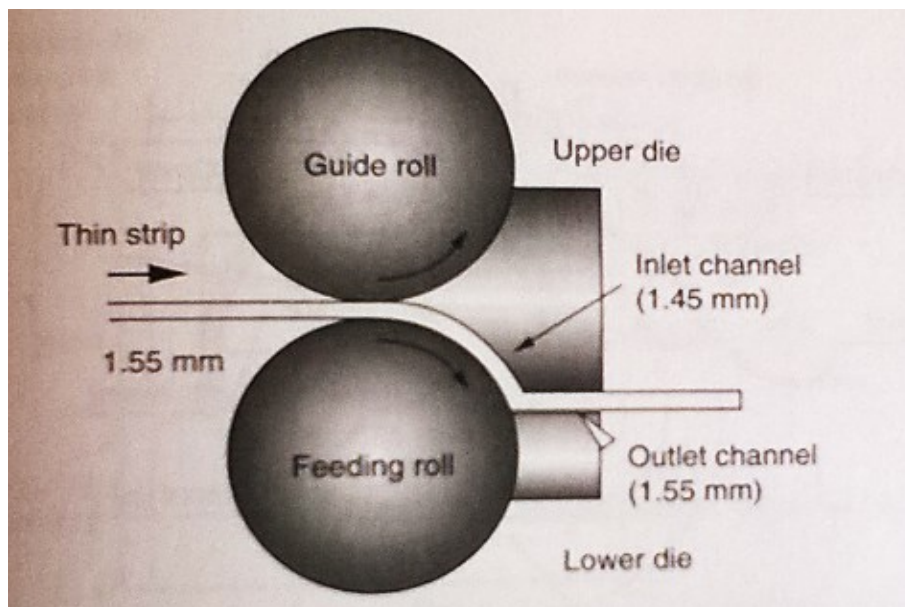
2.5 ARB (Accumulative-Roll-Bonding)

Metoda ARB je charakteristická tím, že se přesně uloží jeden pás plechu na druhý a následně jsou válcováním spojeny. Poté se materiál opět rozdělí na dva stejné kusy, opět se pečlivě položí na sebe a válcování se opakuje. Tento proces se může opakovat libovolně krát, dle požadavku na výsledné vlastnosti materiálu. Tímto procesem je možno dosáhnout velmi vysokého deformačního napětí v materiálu bez změny tvaru materiálu. Při této metodě dochází k úbytku tloušťky materiálu přibližně o 50% po jednotlivých průchodech. [28]

2.6 DCAP (Dissimilar channel angular pressing)

Princip metody je zobrazen na Obr. 10. Metoda DCAP je charakteristická tím, že se v průběhu tváření mění tloušťka materiálu, ale na výstupu z tvářecí matrice má materiál stejnou tloušťku jako na vstupu. Při metodě DCAP je materiál dopravovaný do tvářecí matrice pomocí vstupních válců. Velmi důležité je přesné nastavení mezery mezi válci tak, aby byl zajištěný plynulý přívod materiálu. Válce vhánějí materiál přes vstupní kanál do deformační zóny. V deformační zóně jsou kanály napojené pod úhlem, který je potřebný k dosažení požadovaných výsledných vlastností tvářeného materiálu. V deformační zóně je materiál protlačovaný kanály se zmenšenou mezerou [29] a následně materiál vychází výstupním kanálem, ve kterém je mezera pro průchod materiálu shodná s mezerou na vstupu do tvářecí matrice. [30]

Materiál je při metodě DCAP tvářen zejména smykovou deformací, ale působí na něj i tahové a tlakové deformace. Vliv tahové popřípadě tlakové deformace na výsledné vlastnosti materiálu jsou však zanedbatelné. Velikost smykové deformace, která je vyvíjena při průchodu materiálu deformační zónou, proto ovlivňuje dosažené vlastnosti v tvářeném vzorku. [31]



Obr. 10 Princip metody DCAP [32]

2.7 CCDC (Cyclic Equal Channel Die Compression)

Při metodě CCDC je velmi důležité důkladné mazání tvářeného materiálu. Vzorek je vložen do tvářecí matrice a je ohřát na předepsanou teplotu. Poté je pēchován horním nástrojem do dutiny tvářecí matrice. Po dokončení pēchování je vzorek vytažen z dutiny matrice. V případě, že je vzorek pēchován vícenásobně, musí být po každém pēchování otočen o 90°. Vyším počtem pēchování se dosahuje jemnozrnne, homogenní struktury materiálu. Při tváření metodou CCDC je důležité udržovat vzorek při předepsané teplotě. [33]

3 EXPERIMENT NA TVÁŘECÍM ZAŘÍZENÍ (metoda DRECE)

3.1 Vlastní experimentální práce

Vlastní experiment byl proveden na pásech plechů pomocí metody DRECE. Při této metodě dochází k protlačování pásu plechu na prototypovém zařízení, které je výbavou VŠB- TUO. Metoda DRECE je znázorněna na Obr. 11.



Obr. 11 Metoda DRECE [34]

Protlačování pásu plechu pomocí metody DRECE je možno provádět vícenásobně, aniž by došlo ke změnám rozměrů tvářeného materiálu. V rámci této práce jsou pásy plechů protlačeny jednou, dvakrát a třikrát a posléze jsou provedeny zkoušky mechanických vlastností po jednotlivých průchodech.

Experiment metodou DRECE je proveden na pásech plechu o šířce 59 mm, tloušťce 2 mm a délce 2000 mm. Pás plechu je nutné před samotným protlačováním upravit. Je zapotřebí sestříhnout hrany pásů na pákových nůžkách a posléze takto vytvořené hrany obrousit, aby došlo k odstranění vzniklého otřepu po stříhání. Tato příprava pásu plechu umožňuje jeho plynulý náběh a průchod tvářecí maticí. Úprava

hran plechu je znázorněna na Obr. 12. Dále je nutné odstranit veškeré nečistoty z plechu, včetně stop koroze.



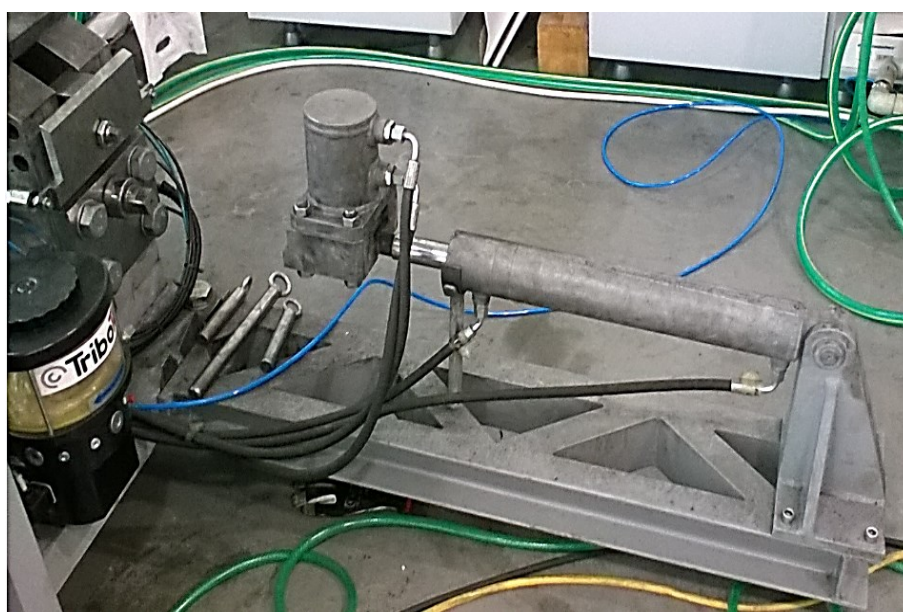
Obr. 12 Úprava hran pásu

Na vstupní část pásu plechu je zapotřebí nanést silikonové mazivo, které snižuje tření při průchodu tvářeného plechu metodou DRECE. Pás plechu je přes podávací přípravek dopraven k podávacímu válci, který podává pás plechu do zóny deformace, kde dochází k protlačování plechu mezi speciálními nástroji. Podávací přípravek metody DRECE je zobrazen na Obr. 13.



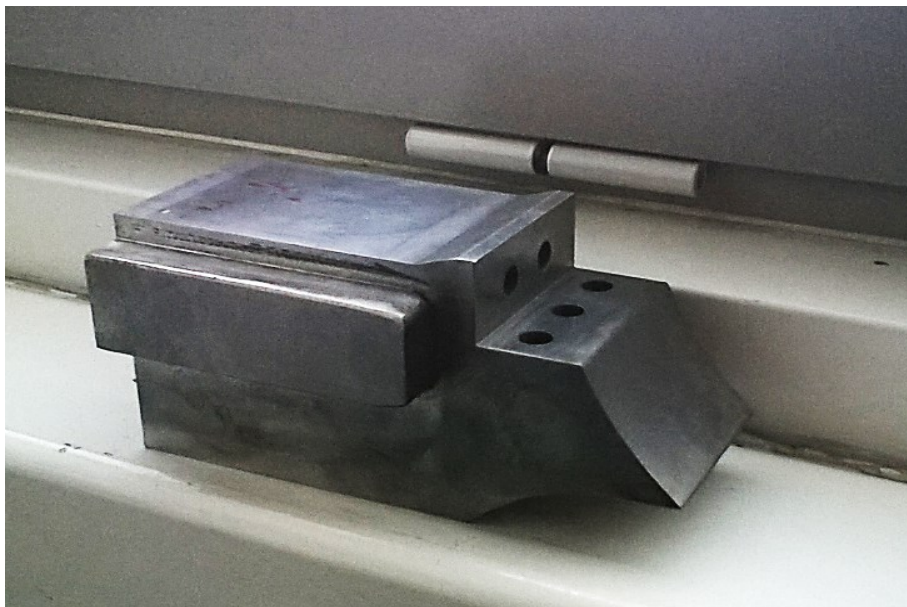
Obr. 13 Podávací přípravek

Po protlačení pásu plechu tvářecí maticí je plech vytažen speciálním hydraulickým vytahovacím zařízením. Vytahovací přípravek sevře pomocí čelistí pás plechu a díky hydraulickému válce dojde k vytažení plechu z tvářecí matrice. Dané zařízení je zobrazeno na Obr. 14.



Obr. 14 Vytahovací přípravek

Experiment na pásu plechu pomocí metody DRECE je možné provádět s různými nástroji, kde je protlačování prováděno pod úhlem α 108°, 113° nebo 118°. Nástroje jsou při protlačování metodou DRECE uchyceny v horním a dolním držáku. Držák horního nástroje je zobrazen na Obr. 15 a držák dolního nástroje je zobrazen na Obr. 16. V této práci jsou provedeny experimenty s nástrojem, který vytváří v zóně deformace úhel α 113°.



Obr. 15 Držák horního nástroje



Obr. 16 Držák dolního nástroje

Při protlačování pásu plechu metodou DRECE je velmi důležité seřízení geometrie tvářecích nástrojů v zóně deformace. Seřizuje se velikost mezery, kterou prochází tvářený pás plechu. Seřízení se provádí pomocí šroubu, který prisouvá horní držák s tvářecím nástrojem k přednímu válci této. Pomocí tohoto šroubu je nutné přesně nastavit požadovanou mezeru v zóně deformace.

V případě, že není správně nastavena mezera v zóně deformace (je příliš natěsno vůči podávacímu válci) dochází při protlačování ke vzniku přeložky na pásu plechu, popřípadě prochází jen velmi obtížně tvářený pás plechu tvářecí maticí. Přeložka je zobrazena na Obr. 17. Pokud je mezera příliš velká, nedochází ke vzniku potřebného tvářecího napětí a plech po protlačení nezíská předpokládané mechanické vlastnosti.



Obr. 17 Přeložka na plechu

3.2 Experimentálně ověřené oceli

Experiment je proveden na pásech plechů z oceli S235 a CK55 (12 060 dle ČSN). Pás plechu je nadělen ve směru válcování (tzn. podélně z tabule plechu) a posléze tvářen metodou DRECE.

V Tab. 1 je zapsané chemické složení experimentálně ověřené oceli S235.

Tab. 1 Chemické složení oceli S235

Chemické složení S235 [%]					
C	Si	Al	S	Cu	Mo
0,170	0,030	0,020	0,035	0,550	0,060
V	Mn	P	N	Cr	Ni
0,008	1,400	0,035	0,012	0,205	0,205

V Tab. 2 jsou zapsány hodnoty mechanických vlastností experimentálně ověřené oceli S235 ve výchozím stavu.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli S235

Mechanické vlastnosti S235		
Mez pevnosti R_m	Mez kluzu $R_{p0,2}$	Tažnost A_{150}
[MPa]	[MPa]	[%]
399,00	254,00	32,05

V Tab. 3 je zapsané chemické složení druhé ověřované oceli CK55 a v Tab. 4 jsou výchozí mechanické vlastnosti této oceli.

Tab. 3 Chemické složení oceli CK55

Chemické složení CK55 [%]					
C	Mn	Si	P	S	Al
0,530	0,430	0,030	0,030	0,035	0,020

Tab. 4 Mechanické vlastnosti oceli CK55

Mechanické vlastnosti CK55		
Mez pevnosti R_m	Mez kluzu $R_{p0,2}$	Tažnost A_{150}
[MPa]	[MPa]	[%]
431,00	302,00	23,30

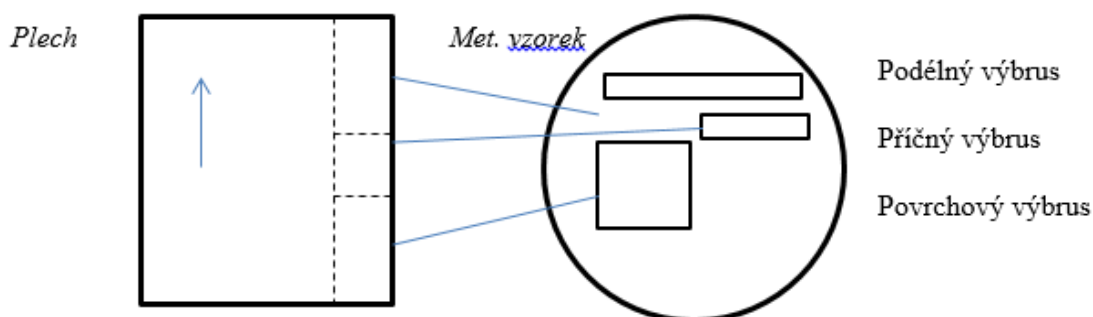
V kapitole 4.2 je provedeno srovnání mechanických vlastností oceli S235 a CK55 ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech tvářecí metodou.

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V rámci této práce je provedena tahová zkouška, zkouška tvrdosti a kontrola mikrostruktury na vzorcích z výchozího stavu oceli S235 a CK55 a dále na protlačených pleších metodou DRECE.

4.1 Kontrola mikrostruktury

Pro potřebu metalografické analýzy byly odebrány vzorky z plechu S235 i CK55. Vzorek je odebrán z plechu ve výchozím stavu, dále z plechu po prvním, druhém a třetím průchodu tvářecí metodou DRECE. V laboratoři byl z těchto plechů odebrán podélný, příčný a povrchový výbrus a posléze byla provedena metalografická analýza. Schéma výbrusů je zobrazeno na Obr. 18.

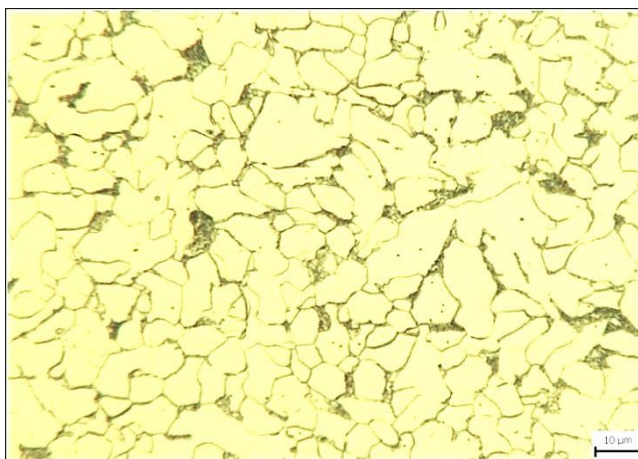


Obr. 18 Schéma výbrusů

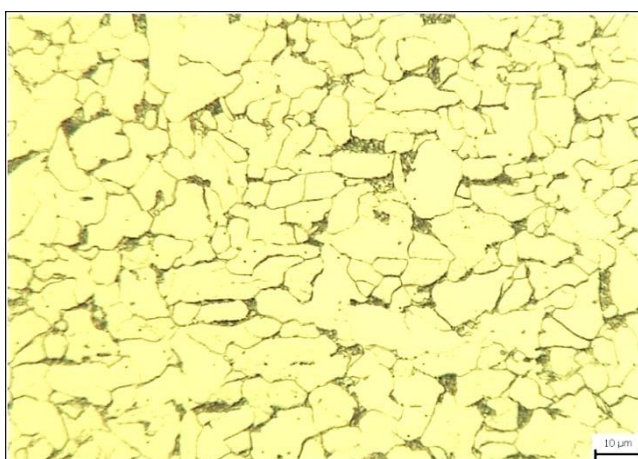
Z důvodu zvýšení přehlednosti této práce jsou v následujících kapitolách zobrazeny pouze snímky z podélných, příčných a povrchových výbrusů ve výchozím stavu a po třetím (posledním) průchodu pásů plechů tvářecí metodou DRECE.

4.1.1 Kontrola mikrostruktury oceli S235

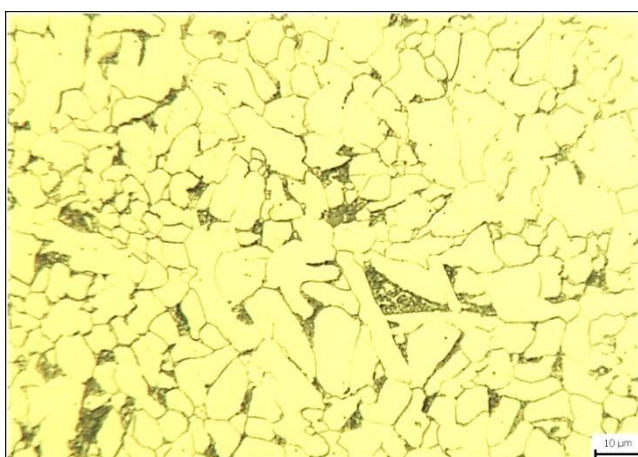
Na Obr. 19 je znázorněna mikrostruktura oceli S235 ve výchozím stavu v podélném výbrusu, na Obr. 20 v příčném výbrusu a na Obr. 21 v povrchovém výbrusu.



Obr. 19 Výchozí stav S235- podélný výbrus

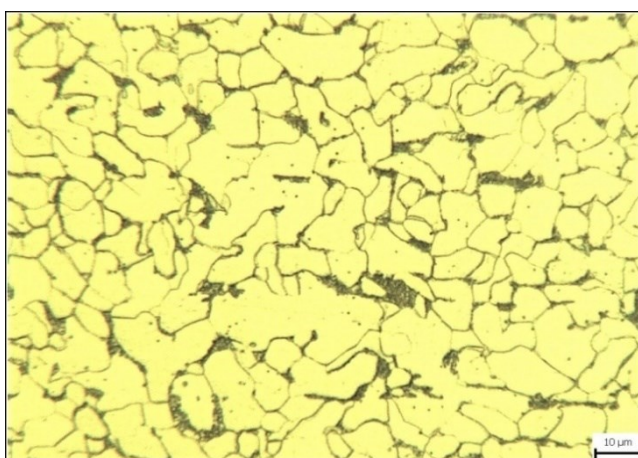


Obr. 20 Výchozí stav S235- příčný výbrus

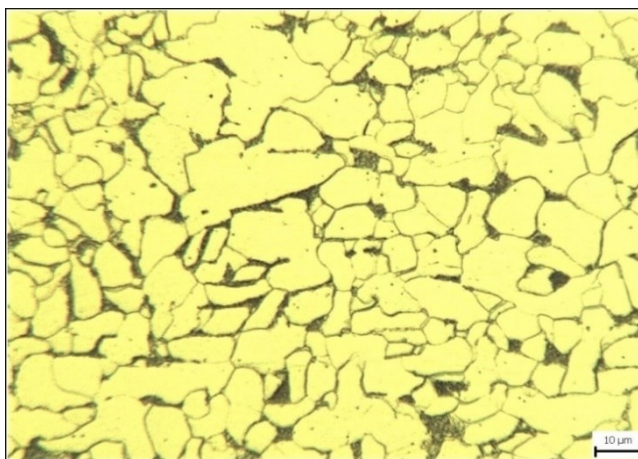


Obr. 21 Výchozí stav S235- povrchový výbrus

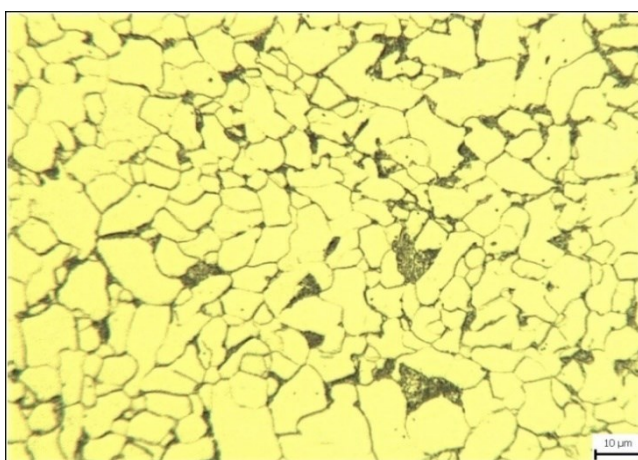
Na Obr. 22 je znázorněna mikrostruktura oceli S235 po třetím (posledním) průchodu tvářecí metodou DRECE v podélném výbrusu, na Obr. 23 v příčném výbrusu a na Obr. 24 v povrchovém výbrusu.



Obr. 22 Třetí průchod S235- podélný výbrus



Obr. 23 Třetí průchod S235- příčný výbrus

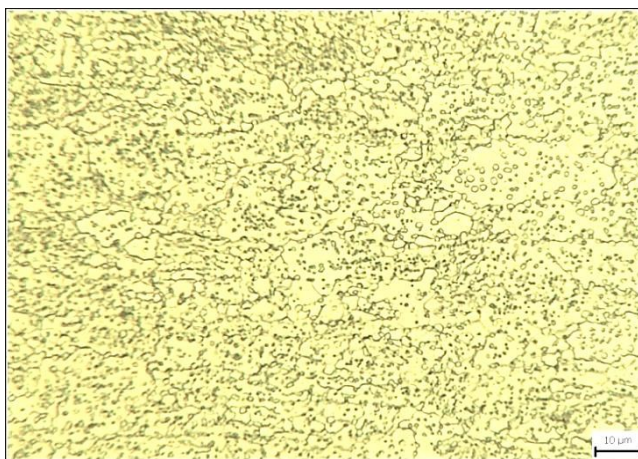


Obr. 24 Třetí průchod S235- povrchový výbrus

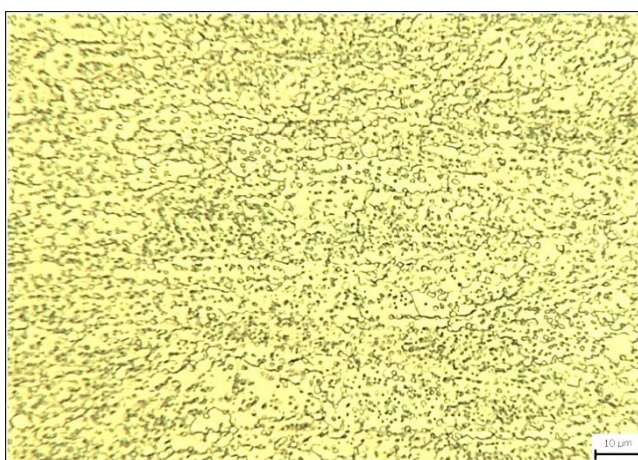
Z těchto snímků je zcela patrné, že průchody oceli S235 tvářecí metodou DRECE neměly zásadní vliv na mikrostrukturu této oceli. Pro důkladnější zkoumání vlivu tvářecí metody DRECE na ocel S235 by bylo vhodné použít TEM.

4.1.2 Kontrola mikrostruktury oceli CK55

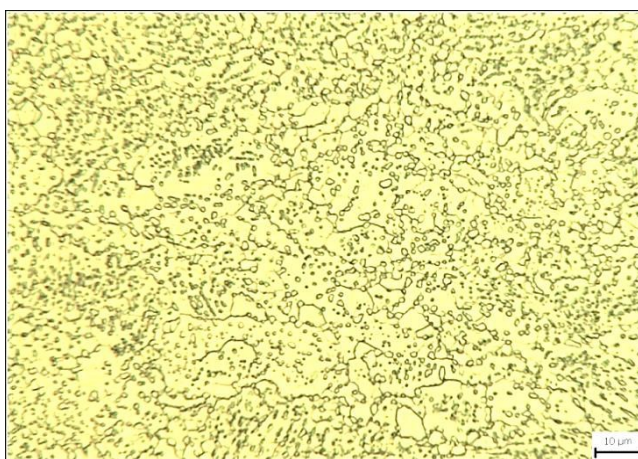
Na Obr. 25 je znázorněna mikrostruktura oceli CK55 ve výchozím stavu v podélném výbrusu, na Obr. 26 v příčném výbrusu a na Obr. 27 v povrchovém výbrusu.



Obr. 25 Výchozí stav CK55- podélný výbrus

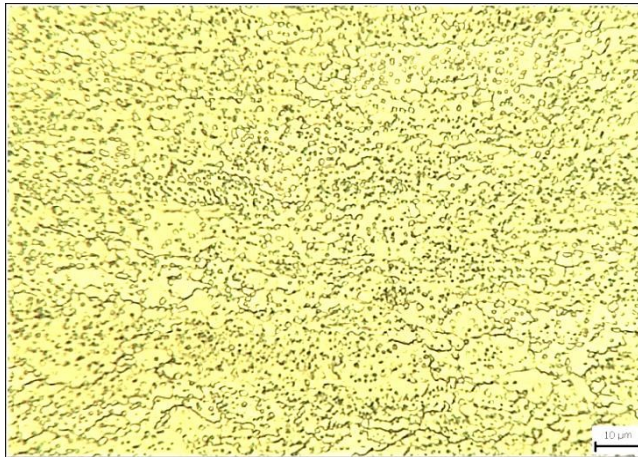


Obr. 26 Výchozí stav CK55- příčný výbrus

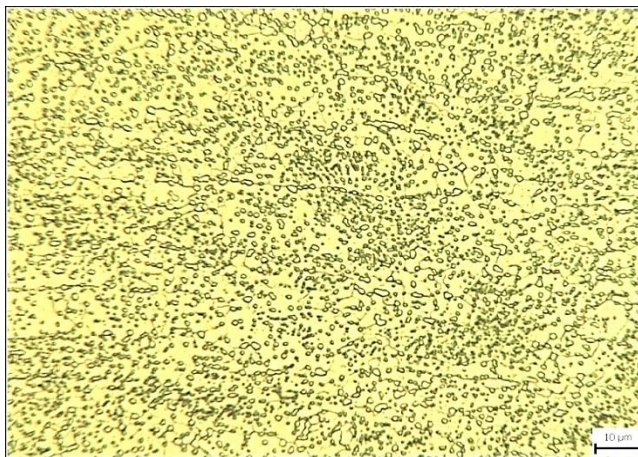


Obr. 27 Výchozí stav CK55- povrchový výbrus

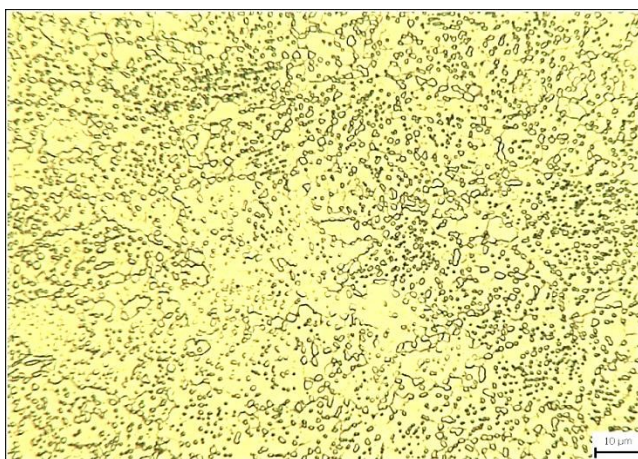
Na Obr. 28 je znázorněna mikrostruktura oceli CK55 po třetím (posledním) průchodu metodou DRECE v podélném výbrusu, na Obr. 29 v příčném výbrusu a na Obr. 30 v povrchovém výbrusu.



Obr. 28 Třetí průchod CK55- podélný výbrus



Obr. 29 Třetí průchod CK55- příčný výbrus



Obr. 30 Třetí průchod CK55- povrchový výbrus

Z Obr. 28 až Obr. 30 je zjevné, že průchody tvářecí metodou DRECE neměly podstatný vliv na mikrostrukturu ani u oceli CK55. Podrobnější analýzu mikrostruktury

by bylo vhodné provést na TEM. Danou analýzou by bylo možné prokázat podíl dislokačně zpevněné struktury vzhledem ke struktuře s rozdrobeným zrnem po 3. průchodu tvářecím zařízením.

4.2 Tahová zkouška

Tvářené plechy z oceli S235 a CK55 byly podrobeny zkouškám mechanických vlastností. Byly provedeny tahové zkoušky na plechu ve výchozím stavu, po prvním a po druhém průchodu za účelem zjištění změny velikosti meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , a tažnosti A_{150} .

Tahové zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892- 1 v Laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ a. s. Dobrá.

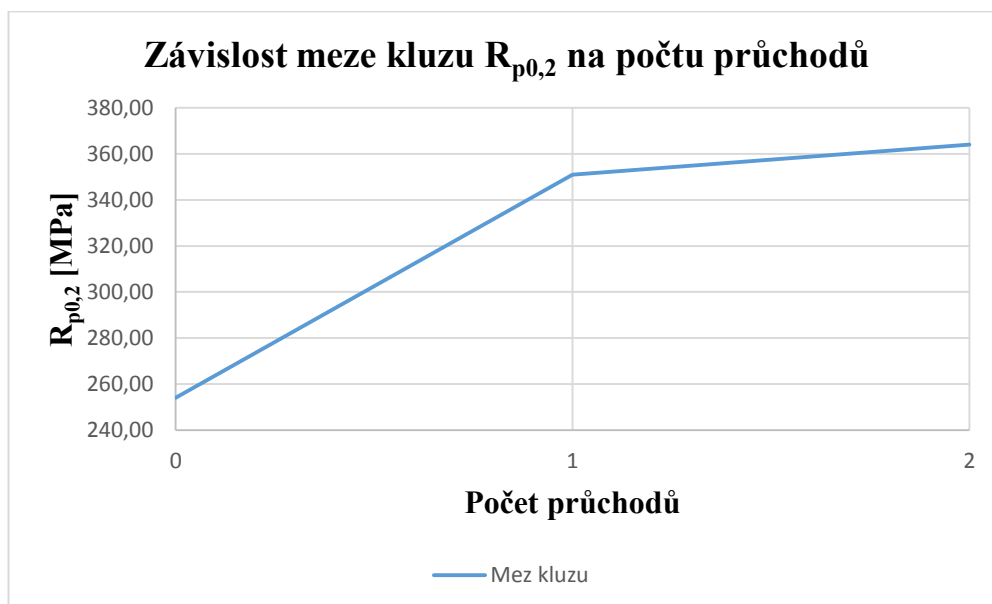
4.2.1 Tahová zkouška oceli S235

Tahová zkouška je provedena na vzorcích z pásu plechu S235 ve výchozím stavu plechu, po 1. průchodu a po 2. průchodu tvářecí metodou DRECE. Měření je provedeno na třech vzorcích odebraných po délce pásu plechu. Záznam ze zkoušky tahem oceli S235 je uveden v příloze A. Z naměřených výsledků byl vyloučen jeden vzorek, jelikož jeho mechanické vlastnosti vykazovaly značný rozdíl ve srovnání se zbylými vzorky. V Tab. 5 jsou zapsány vypočtené střední hodnoty naměřených mechanických vlastností u oceli S235.

Tab. 5 Střední hodnoty mechanických vlastností oceli S235

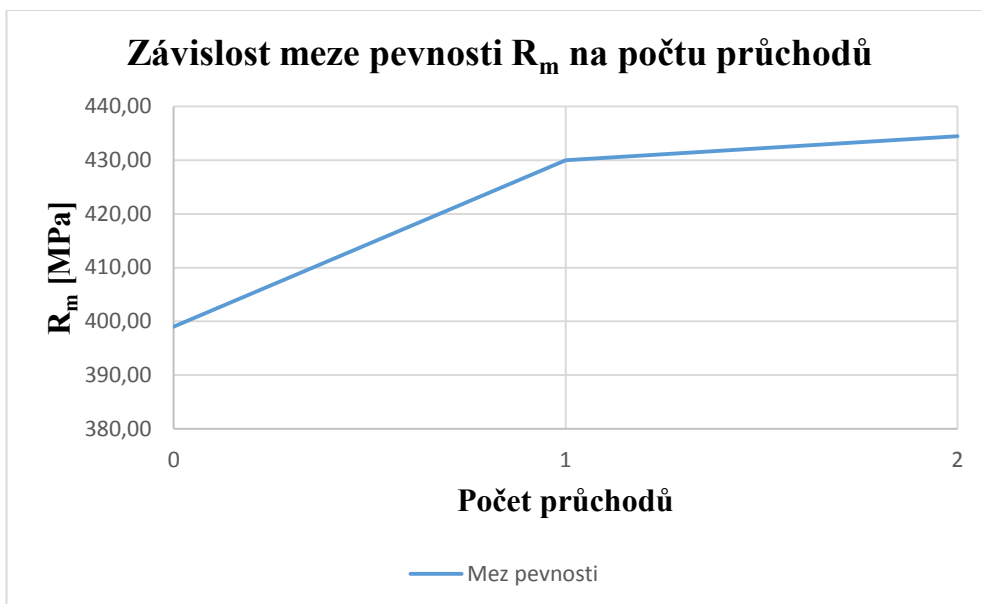
Počet průchodů	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{150} [%]
0 (VS)	254,00	399,00	32,05
1	351,00	430,00	22,65
2	364,00	434,50	20,30

Na základě středních hodnot mechanických vlastností oceli S235 jsou sestaveny grafy 1 až 3. V grafech 1 až 3 je zobrazena závislost změny mechanických vlastností na počtu průchodu oceli S235 tvářecí metodou DRECE.



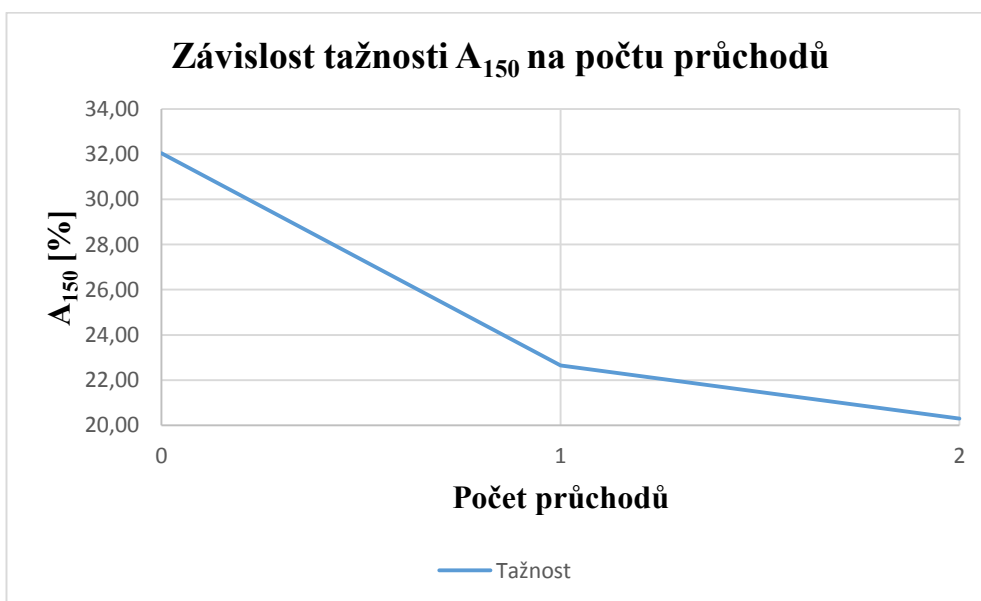
Graf 1 Závislost meze kluzu oceli S235 na počtu průchodů

Z Grafu 1 je patrné, že po každém průchodu pásu plechu tvářecí metodou dochází k nárůstu meze kluzu $R_{p0,2}$. K největšímu nárůstu meze kluzu $R_{p0,2}$ u oceli S235 dochází po prvním průchodu. Nárůst meze kluzu dosahuje po 1. průchodu 38,19 % a po 2. průchodu 43,31% (vše vzhledem k výchozímu stavu).



Graf 2 Závislost meze pevnosti oceli S235 na počtu průchodů

Z Grafu 2 lze vidět, že mez pevnosti R_m oceli S235 roste s každým průchodem plechu metodou DRECE. Nejvyšší nárůst meze pevnosti je dosažen po 1. průchodu 7,77 %, po 2. průchodu 8,90 % (vše vzhledem k výchozímu stavu).



Graf 3 Závislost tažnosti oceli S235 na počtu průchodů

Z grafu 3 je patrné, že tažnost A_{150} oceli S235 se zvyšujícím počtem průchodů klesá. Pokles tažnosti je po 1. průchodu 9,40 % a po 2. průchodu 11,75 % (vše vzhledem k výchozímu stavu). Výsledná velikost tažnosti po 1. i 2. průchodu umožňuje provádění dalších tvářecích operací.

Z grafu 1 a z grafu 2 je zřejmé, že pro získání zvýšených mechanických vlastností zcela postačuje jeden průchod plechu tvářecí metodou. Z grafu 3 jasně vyplývá, že je plech po průchodu tvářecí metodou dále dobře zpracovatelný.

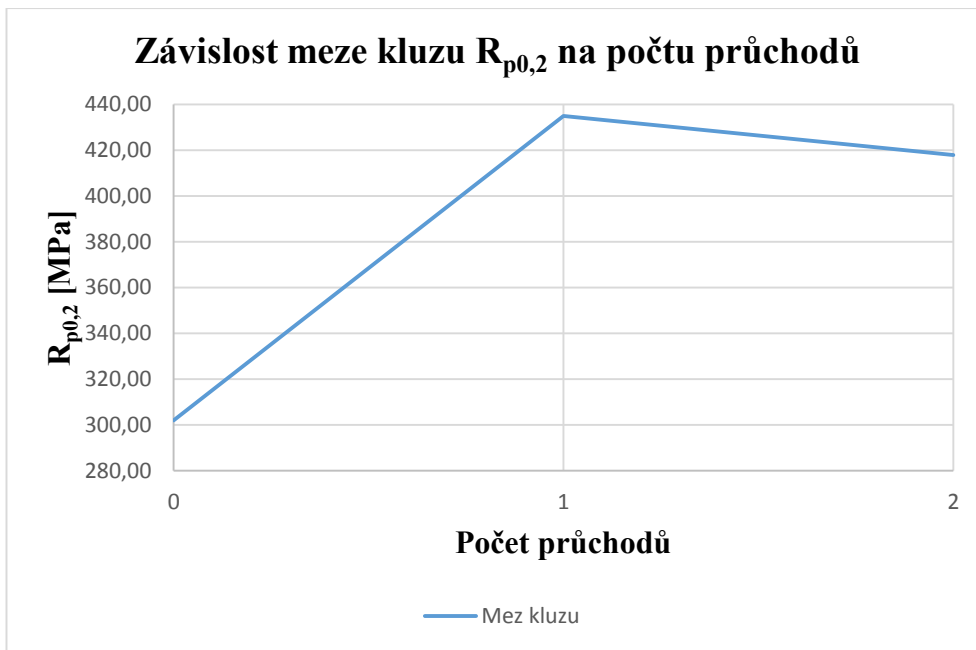
4.2.2 Tahová zkouška oceli CK55

Pro tahovou zkoušku byly odebrány vzorky z pásu plechu CK55. Tahová zkouška je provedena na vzorcích z plechu ve výchozím stavu, po jednom a po dvou průchodech tvářecí metodou DRECE. V Tab. 6 jsou zapsány naměřené mechanické vlastnosti z tahové zkoušky oceli CK55.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli CK55 (12 060 dle ČSN)

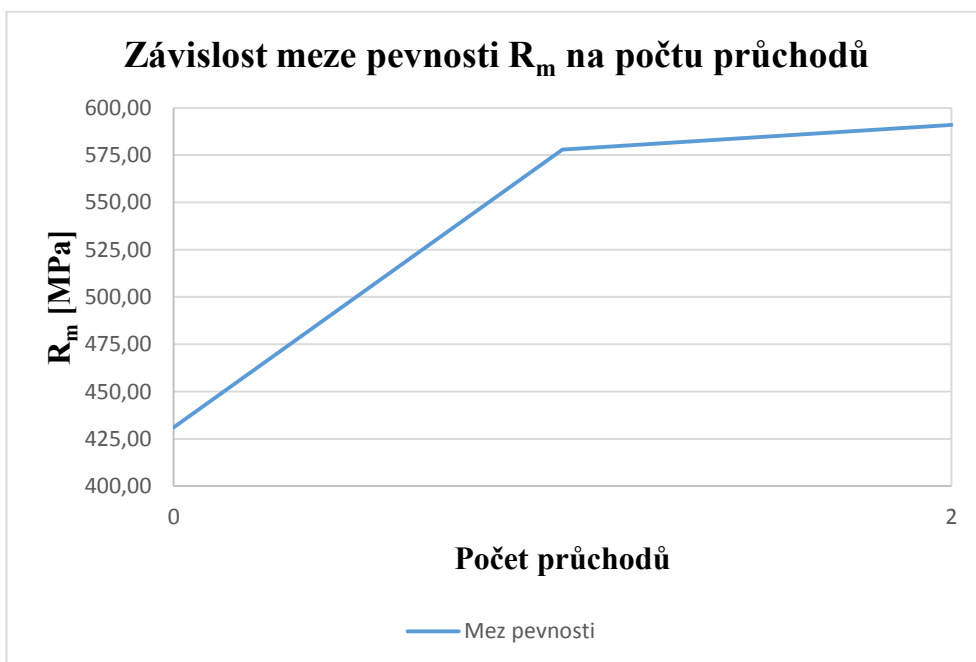
Počet průchodů	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{150} [%]
0 (VS)	302,00	431,00	23,30
1	435,00	578,00	23,30
2	418,00	591,00	17,30

Na základě Tab. 6 jsou sestaveny grafy 4 až 6, které zobrazují závislost mechanických vlastností ($R_{p0,2}$, R_m a A_{150}) oceli CK55 na počtu průchodů plechu tvářecím zařízením.



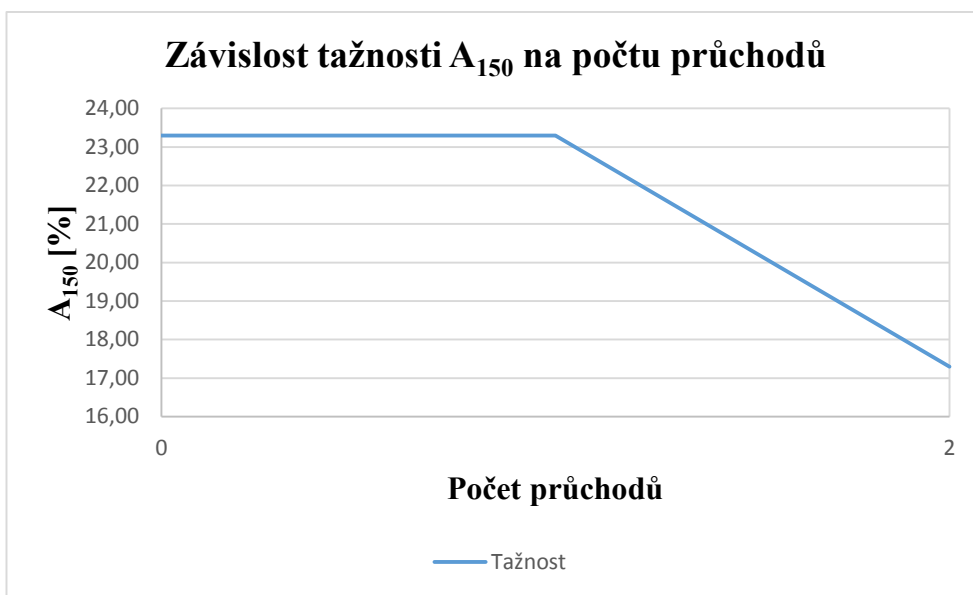
Graf 4 Závislost meze kluzu oceli CK55 na počtu průchodů

Z Grafu 4 je zřejmé, že u oceli CK55 dochází k největšímu nárůstu $R_{p0,2}$ po 1. průchodu, kdy je nárůst ve srovnání s výchozím stavem 44,04 %. Po 2. průchodu je nárůst meze kluzu ve srovnání s výchozím stavem 38,41 %. Z daného výsledku je patrné, že u oceli CK55 došlo po 2. průchodu k mírnému poklesu mez kluzu $R_{p0,2}$ ve srovnání s prvním průchodem. Daný jev je možno interpretovat heterogenitou struktury v měřených vzorcích.



Graf 5 Závislost meze pevnosti oceli CK55 na počtu průchodů

Z Grafu 5 lze vidět, že po prvním průchodu dochází k výraznému nárůstu meze pevnosti R_m . Ve srovnání s výchozím stavem, dochází po 1. průchodu k nárůstu meze pevnosti o 34,11 % a po 2. průchodu o 37,12 %.



Graf 6 Závislost tažnosti oceli CK55 na počtu průchodů

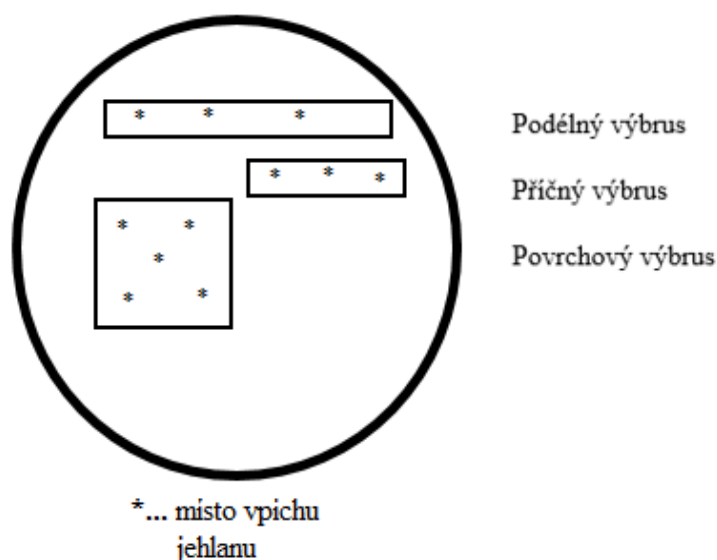
Z grafu 6 lze vidět, že se tažnost A_{150} u oceli CK55 snižuje se zvyšujícím se počtem průchodů. Pokles tažnosti dosahuje po 1. průchodu 0 % a po 2. průchodu 25,75 % (vše vzhledem k výchozímu stavu). Výsledná velikost tažnosti jak po 1. tak i 2. průchodů dává dobré předpoklady pro provedení dalších tvářecích operací.

Z grafu 4 z grafu 5 je zřejmé, že k velmi výraznému nárůstu meze pevnosti R_m a meze kluzu $R_{p0,2}$ došlo po prvním průchodu metodou DRECE. Z grafu 6 vyplývá, že po 1. průchodu sice došlo k značnému poklesu tažnosti, ale výsledná tažnost oceli CK55 umožňuje její následné tváření. Tento poznatek je velmi výhodný pro další možné využití této metody.

4.3 Zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti byly provedeny v laboratoři VŠB- TUO metodou Vickers (HV30). Zkouška tvrdosti je provedena na vzorcích, které byly podrobeny kontrole mikrostruktury. Tvrdost je měřena na vzorcích z plechu S235 a CK55.

Měření tvrdosti probíhalo tak, že je provedeno pět měření v povrchovém výbrusu plechu. Dále jsou provedeny tři měření v příčném výbrusu a tři měření v podélném výbrusu. Schéma měření je zobrazeno na Obr. 31. Měření je provedeno na vzorcích z plechů ve výchozím stavu, po prvním, druhém a třetím průchodu tvářecí metodou DRECE.



Obr. 31 Schéma měření tvrdosti

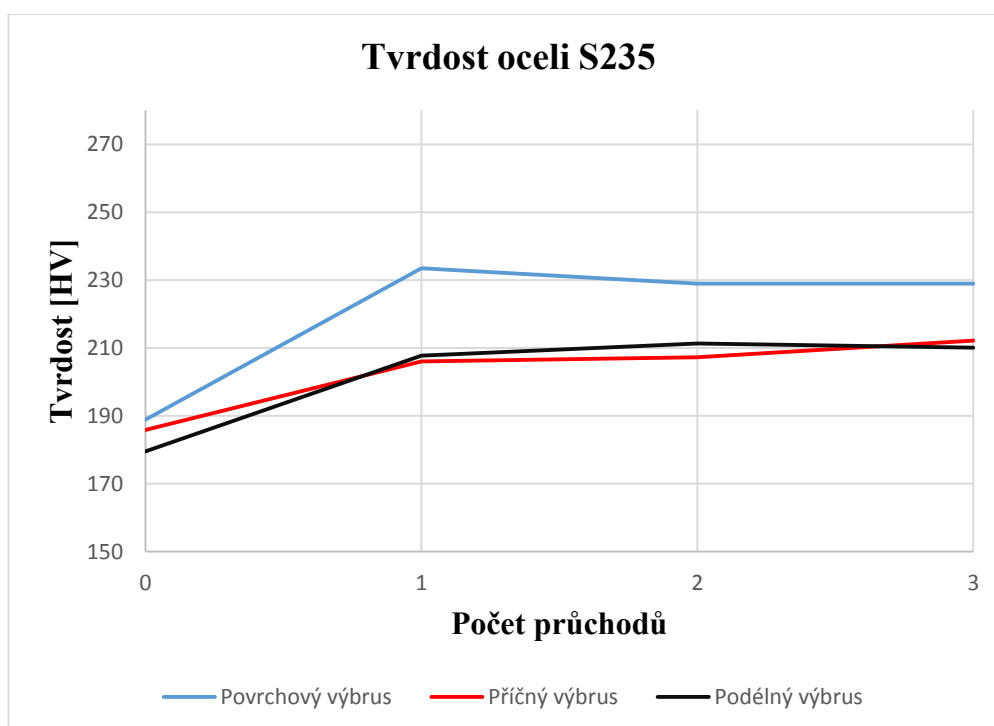
4.3.1 Zkouška tvrdosti oceli S235

Z jednotlivých měření jsou sestaveny průměrné hodnoty naměřené tvrdosti v jednotlivých výbrusech. V Tab. 7 jsou zapsané výsledné hodnoty tvrdostí plechu S235 po jednotlivých průchodech metodou DRECE.

Tab. 7 Tvrđost oceli S235

	VS [HV]	1. průchod [HV]	2. průchod [HV]	3. průchod [HV]
Povrchový výbrus	124,5	170,2	167,9	177,7
Příčný výbrus	115,3	147,2	145,2	153,0
Podélný výbrus	115,7	150,6	145,9	149,0

V Grafu 7 je zakreslena naměřená tvrđost na vzorcích v povrchovém, příčném a podélném výbrusu z plechu oceli S235.



Graf 7 Tvrđost oceli S235

Z Grafu 7 je patrné, že v celém průřezu plechu došlo k nárůstu tvrđosti, přičemž k nejnápadnějšímu nárůstu došlo v povrchové vrstvě plechu. Nárůst tvrđosti v povrchovém výbrusu je po 1. průchodu 36,71 %, po 2. 34,86 % a po 3. průchodu 42,73 %. Nárůst tvrđosti v příčném výbrusu je po 1. průchodu 27,67 %, po 2. průchodu 25,93 % a po 3. průchodu 32,70 %. Nárůst tvrđosti v podélném výbrusu činí po 1. průchodu 30,16 %, po 2. průchodu 26,10 % a po 3. průchodu 28,78 %. Veškeré údaje jsou vztaženy vzhledem k výchozímu stavu materiálu.

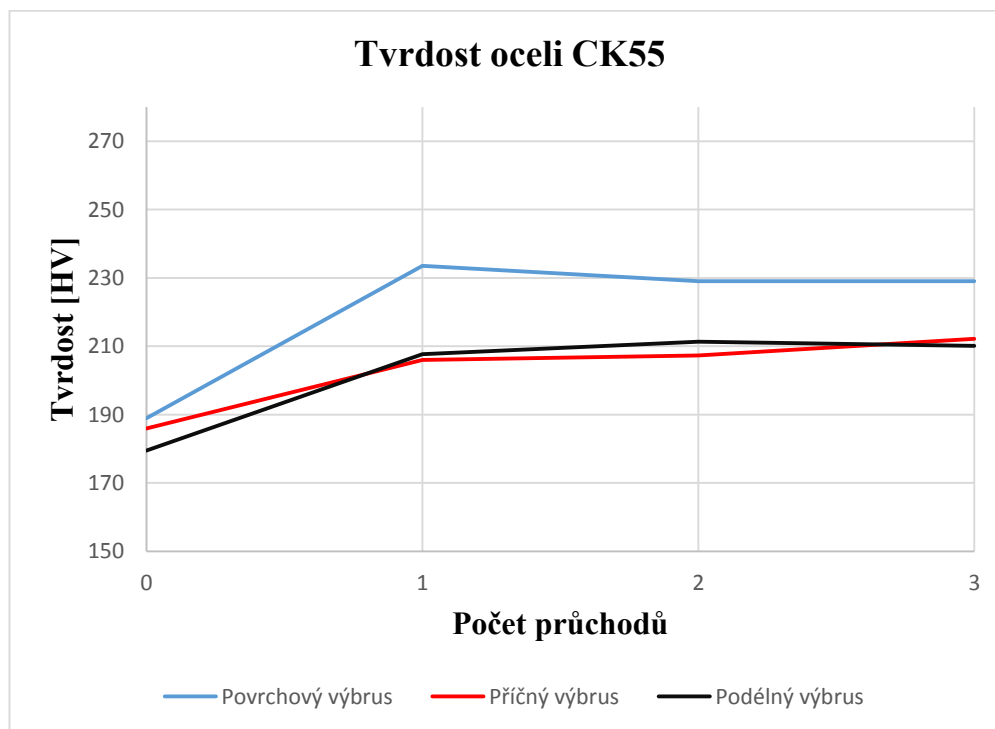
4.3.2 Zkouška tvrdosti oceli CK55

Vzorky z plechu oceli CK55 byly podrobeny zkouškám tvrdosti v povrchové, podélném a příčném výbrusu. Z naměřených hodnot jsou sestaveny průměrné hodnoty tvrdosti, které jsou zapsány v Tab. 8.

Tab. 8 Tvrdost oceli CK55

	VS [HV]	1. průchod [HV]	2. průchod [HV]	3. průchod [HV]
Povrchový výbrus	188,9	233,5	229,0	229,0
Příčný výbrus	185,9	206,0	207,3	212,2
Podélný výbrus	179,5	207,7	211,3	210,1

Na základě Tab. 8 je sestavený graf 8, který zobrazuje průběh tvrdosti plechu z oceli CK55 po jednotlivých průchodech metodou DRECE. Tvrdost je graficky zakreslena ve všech třech výbrusech.



Graf 8 Tvrdost oceli CK55

Z Grafu 8 lze vyčíst, že největší tvrdosti je dosaženo v povrchovém výbrusu tvářeného plechu. V povrchovém výbrusu došlo k nárůstu tvrdosti po 1. průchodu o 23,61 %, po 2. o 21,23 % a po 3. průchodu o 21,23 %. Nárůst tvrdosti v příčném výbrusu je po 1. průchodu 10,81 %, po 2. průchodu 11,51 % a po 3. průchodu 14,15 %. Nárůst tvrdosti v podélném výbrusu je po 1. průchodu 15,71 %, po 2. průchodu 17,72 % a po 3. průchodu 17,05 %. Všechny hodnoty se vztahují k výchozímu stavu oceli CK55.

ZÁVĚR

Na základě dosažených výsledků experimentálních prací byla jednoznačně potvrzena vhodnost použití tvářecího nástroje s úhlem 113° u metody DRECE. Z hlediska mechanických vlastností došlo k výraznému nárůstu meze kluzu a meze pevnosti již po prvním průchodu tvářecím nástrojem u obou ověřovaných ocelí. Obdobně při měření tvrdosti se projevil největší nárůst hodnot po prvním průchodu a to zejména v povrchové vrstvě oceli, jelikož nebyl pás plechu při tváření otáčen. Při tváření metodou DRECE zároveň dochází k poklesu tažnosti, přičemž dosažené hodnoty tažnosti po prvním průchodu umožňují provedení dalších tvářecích operací, např. ohýbání do tvarů různých profilů.

Na základě dosažených výsledků se jeví jako zcela postačující provést protlačování pásů plechů v jednom průchodu v případě zařazení tvářecího zařízení do výrobní linky a tímto snížit celkové výrobní náklady. K velmi výraznému nárůstu mechanických vlastností totiž dochází právě po prvním průchodu tvářecím zařízením

Dosažené experimentální výsledky jsou velmi důležitým podkladem pro průmyslové využití metody DRECE. U menších strojních součástí typu závěsů, táhel, součástí různých typů dveřních zámků (HOBES s.r.o. Horní Benešov) nebo dílů automobilových zámků (BRANO a.s. Hradec nad Moravicí) můžeme nahradit kvalitnější, výše uhlíkové oceli některým typem experimentálně ověřené oceli. Spolupráce s uvedenými firmami je ve stádiu ověřování dalších ocelí, které by nahrazovaly oceli současně používané, případně by došlo k úspoře hmotnosti (tloušťky stěn) u stejných typů ocelí.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc., za vstřícnost a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřejovi Hilšerovi a Bc. Jiřímu Švecovi za pomoc při provádění a vyhodnocení experimentu.

SEZNAM POUŽITÉ LITRATURY

- [1] VALIEV, Ruslan Z, Alexander P ZHILYAEV a Terence G LANGDON. *Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications*. Hoboken, New Jersey: TMS-Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-74261-7.
- [2] Valiev RZ. *Int J Mater Res* 2009;100:757.
- [3] Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. *Prog Mater Sci* 2000;45:103.
- [4] Ungár T, Malong L, Zhu YT, Horita Z, Xu C, Langdon TG. *Mater Sci Eng A* 2007;444:153.
- [5] Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, Langdon TG, Zehetbauer MJ, Zhu YT. *JOM* 2006;58(4):33.
- [6] Valiev RZ, Langdon TG. *Prog Mater Sci* 2006;51:881.
- [7] Segal VM. *Russ Metall* 2004;1:7.
- [8] Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. *Scr Mater* 1996;35:143.
- [9] SKLENICKA, Vaclav, Jiri DVORAK, Milan SVOBODA, Petr KRAL a Marie KVAPILOV. Equal-Channel Angular Pressing and Creep in Ultrafine-Grained Aluminium and Its Alloys. *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications* [online]. InTech, 2012 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.5772/51242. ISBN 978-953-51-0861-0. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/equal-channel-angular-pressing-and-creep-in-ultrafine-grained-aluminium-and-its-alloys>
- [10] Lee S, Langdon TG. *Mater Res Soc Symp Proc* 2000;601:359.

- [11] Nakashima Kiyotaka, Zenji Horita, Minoru Nemoto and Terence G. Langdon (2000), “Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains”, *Materials Science and Engineering A*, Vol.281 (1-2), 82–87.
- [12] Liu ZY, Liang GX, Wang ED, Wang ZR. *Mater Sci Eng* 1998;A242:137.
- [13] Liu ZY, Wang Z. *J Mater Proc Tech* 1999;94:193
- [14] Raab GI, Valiev RZ, Kulyasov Gv, Polozovsky VA. Russian Patent No. 2181314 (2002).
- [15] Raab GI. *Fizika I Tech Vysokikh Davleniy (Phys Eng High Press)* 2004;14(4):83.
- [16] Raab GI. *Mater Sci Eng* 2005;A410- 411:230.
- [17] Segal VM. *J Mater Process Technol* 2010;210:542
- [18] Xu C, Schroeder S, Berbon PB, Langdon TG. *Acta Mater* 2010;58:1379
- [19] Katsas S, Dashwood R, Todd G, Jackson M, Grimes R. *J Mater Sci* 2010;45:4188
- [20] Raab GI, Valiev RZ, Gunderov DV, Lowe TC, Mistra A, Zhu YT. *Mater Sci Forum* 2008;584-586:80
- [21] RAAB, Georgy J., Ruslan Z. VALIEV, Terry C. LOWE, Yuntian T. ZHU a Marie KVAPILOV. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform. *Materials Science and Engineering: A* [online]. InTech, 2004, **382**(1-2), 30-34 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.021. ISBN 978-953-51-0861-0. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509304004022>
- [22] Zhilyaev AP, Nurislamova GV, Kim BK, Baró MD, Szpunar JA, Langdon TG. *Acta Mater* 2003;51:753
- [23] SHARMAN, Katarzyna, Piotr BAZARNIK, Tomasz BRYNK, Asli GUNAY BULUTSUZ, Malgorzata LEWANDOWSKA, Yi HUANG a Terence G. LANGDON.

Enhancement in mechanical properties of a β -titanium alloy by high-pressure torsion. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2015, **4**(1), 79-83 [cit. 2016-03-09]. DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.10.010. ISSN 22387854. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2238785414000994>

[24] ZHILYAEV, A.P., K. OH-ISHI, T.G. LANGDON a T.R. MCNELLEY. Microstructural evolution in commercial purity aluminum during high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, **410-411**, 277-280 [cit. 2016-03-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.044. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509305008397>

[25] RICHERT, M., H.P. STÜWE, M.J. ZEHETBAUER, J. RICHERT, R. PIPPAN, Ch. MOTZ a E. SCHAFLER. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2003, **355**(1-2), 180-185 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00046-7. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509303000467>

[26] WU, Peng-yue, Shui-sheng XIE, Hua-qing LI, Ming YAN, Guo-jie HUANG, Lei CHENG a E. SCHAFLER. Effect of extrusion wheel angular velocity on continuous extrusion forming process of copper concave bus bar. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2007, **17**(2), 280-286 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60085-5. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632607600855>

[27] ETHERINGTON, C., Shui-sheng XIE, Hua-qing LI, Ming YAN, Guo-jie HUANG, Lei CHENG a E. SCHAFLER. Conform—A New Concept for the Continuous Extrusion Forming of Metals. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1974, **96**(3), 893- [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1115/1.3438458. ISSN 00220817. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1443909>

[28] M. G. Nicholas, D. R. Milner
Br. Weld. J., 8 (1961), p. 375

- [29] J.C. Lee, H.K. Seok, J.Y. Suh
Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing
Acta Mater, 50 (2002), pp. 4005–4019
- [30] TAN, Evren, Alp Aykut KIBAR a C. Hakan GÜR. Mechanical and microstructural characterization of 6061 aluminum alloy strips severely deformed by Dissimilar Channel Angular Pressing. *Materials Characterization* [online]. 2011, **62**(4), 391-397 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/j.matchar.2011.01.016. ISSN 10445803. Dostupné z:
- [31] J. H. Han, J.H. Suh, K.K. Jee, J.C. Lee
Evaluation of formability and planar anisotropy based on textures in aluminum alloys processed by a shear deforming process
Mater Sci Eng A, 477 (2008), pp. 107–120
- [32] Lee JC, Suh JY, Ahn JP. *Metall Mater Trans* 2003;34A:625
- [33] METAYER, J., Bing YE, Wei GUO, Qu-dong WANG, Hao ZHOU a F. MOLLET. Microstructure and mechanical properties of Mg–Si alloys processed by cyclic closed-die forging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2014, **24**(1), 66-75 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63029-6. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632614630296>
- [34] RUSZ, Stanislav, Karel MALANÍK, Jan KEDROŇ a Irena SKOTNICOVÁ. NOVÉ POZNATKY Z VÝVOJE A ZKUŠEBNÍHO PROVOZU PROTOTYPOVÉHO ZAŘÍZENÍ DRECE. NANOCON [online]. 2009 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_09/Lists/Papers/019.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Protokol o zkoušce tahem

Příloha A Protokol o zkoušce tahem



ZKOÜŠKA TAHEM

Zkoušeno v souladu s PP 623 - 3, 1
Zkušební těleso plochého průřezu

Laborator mechanických vlastností
VUHZ a.s. se sídlem 739 51 Dobrá 240
vedená u KS v Ostravě, oddíl B, vložka 3030, IČ 27768953

Zadavatel: prof. Ing. Ruzš CSc.
Zakázka č.:
Interní značení:
List č.: 1

Pořadové číslo	Označení vzorku	HODNOTY TAHOVÉ ZKOÜŠKY										Poznámka			
		Rozměry zkušebního tělesa						Zatížení na mezi kluzu $F_{p0,2\%H}$ [N]	Zatížení na mezi pevnosti F_m [N]	Mez kluzu $R_{p0,2\%H}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]		Tahovost A [%]	Kontrakce Z [%]	$R_{p0,2\%H}/R_m$
		Počáteční		Měřená délka L_0 [mm]	Konečné		Měřená délka L_u [mm]								
		Rozměr a_0 [mm]	b_0 [mm]		Průřezová plocha S_0 [mm ²]	Rozměr a_u [mm]									
1.	S235 KEBEK VS	2,00	57,00	114,00				29000	45500	254	399	33,4		0,64	
2.	S235 KEBEK VS	2,00	57,00	114,00				29000	45500	254	399	30,7		0,64	
3.	S235 KEBEK VS	2,00	57,00	114,00				29000	45500	254	399	32,7		0,64	
4.	S235 1x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				38500	48000	338	421	28,0		0,80	
5.	S235 1x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				41500	50000	364	439	17,3		0,83	
6.	S235 1x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				41000	49500	360	434	4,7		0,83	
7.	S235 2x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				41500	50000	364	439	23,3		0,83	
8.	S235 2x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				42500	50000	373	439	6,7		0,85	
9.	S235 2x $\alpha = 113^\circ$	2,00	57,00	114,00				41500	49000	364	430	17,3		0,85	
10.															
11.															
12.															

Zkušební stroj: FPZ 100/1
Teplota zkoušení [°C]: 20
Def. rychlost ISO 6892-1:2009: SMPa/s
Použitá norma: ČSN EN ISO 6892-1

Zkoušku provedl(a): Mrázek
V Dobré dne: 5.4.2016
Podpis: