

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2012

Martin Houček

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Studium kvality střižné plochy v závislosti na typu materiálu

Martin Houček

Bakalářská práce

2012

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Houček**
Osobní číslo: **D08239**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Studium kvality střížné plochy v závislosti na typu materiálu**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Představení procesu stříhání, základních parametrů stříhání.
2. Základní charakteristika testovaných materiálů.
3. Vyhodnocení prezentační sady výstřížků z materiálů rozdílné strukturní báze.
4. Laboratorní vyhodnocení kvality střížné plochy.
5. Souhrnné vyhodnocení vlivu strukturních parametrů testovaných materiálů na kvalitu střížné plochy.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. NOVOTNÝ Josef, LANGER Zdeněk. Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 216 s.
2. FOREJT Milan, PÍŠKA Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80 - 214 - 2374 - 9.
3. PLUHAŘ J., PUŠKÁR A., KOUTSKÝ J. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 420 s. DT 669. 017 (075. 8)
4. PTÁČEK Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2001. 505 s. ISBN 80 - 7204 - 193 - 2.
5. PTÁČEK Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, 1999. 350 s. ISBN 80 - 7204 - 130 - 4.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce:

24. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

31. května 2012

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.

doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. února 2012

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60, odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice ode mne oprávněna požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Martin Houček

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Evě Schmidové, Ph.D., za odborné vedení, ochotu při konzultacích a množství rad poskytnutých během tvorby této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D., za rady a pomoc při práci v laboratořích. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za podporu a trpělivost během celého mého studia.

ANOTACE

Tato práce je věnována technologii stříhání kovových materiálů a studiu kvality jejich střížných ploch. Teoretická část představuje proces stříhání, přičemž je v ní pojednáno o střížné ploše, střížné vůli, střížné síle, střížné práci a stavu napjatosti při stříhání. Praktická část práce se zabývá vyhodnocováním kvality střížných ploch na vzorcích plechu, vyrobených z šesti různých druhů materiálu. Kvalita stříhu je hodnocena v závislosti na výsledcích fraktografických a metalografických analýz, u vybraných vzorků doplněných o měření mikrotvrdosti. Dále je v praktické části navržen parametr, na jehož základě by bylo možné snadno a rychle určit kvalitu střížné plochy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technologie stříhání, střížná plocha, parametr kvality stříhání, zpevnění stříháním

TITLE

The Study of Cut Surface Quality Depending on the Type of Material

ANNOTATION

This work deals with the technology for cutting metal materials and the study of the quality of their cut surfaces. In the theoretical part the cutting process is described and the terms such as a cut surface, cut clearance, cut power, cut work and the distribution of tautness during the cutting process are defined. In the practical part the quality of cut surfaces of sheet iron samples, made of six various kinds of material, is analysed. The cut quality is assessed on the basis of the results of fractographic and metallographic analyses of selected samples. These analyses are complemented by a measurement of microhardness. Furthermore, the parameter which would quickly and easily establish the cut surface quality is designed.

KEY WORDS

Cutting technology, a cut surface, a parameter of cutting quality, reinforcement as the result of the cutting process.

Obsah

Obsah	8
Úvod.....	9
1 PŘEDSTAVENÍ PROCESU STŘÍHÁNÍ	10
1.1 Průběh stříhání.....	10
1.2 Střížná plocha	12
1.2.1 Vzhled střížné plochy.....	12
1.2.2 Kvalita střížné plochy	12
1.2.3 Vliv rychlosti stříhání na kvalitu střížné plochy a zpevnění v okolí stříhu	13
2 Základní parametry stříhání	13
2.1 Střížná vůle	13
2.1.1 Určení střížné vůle	14
2.2 Střížná síla.....	15
2.2.1 Určení střížné síly	16
2.3 Střížná práce.....	18
2.4 Rozbor stavu napjatosti při volném a uzavřeném stříhání	19
2.5 Mechanismy zpevnění vlivem plastické deformace	21
3 Základní charakteristika testovaných materiálů	24
3.1 Antikorozní oceli	24
3.1.1 Ocel 17 240	24
3.1.2 Ocel 17 040	24
3.2 Nelegované feriticko-perlitické oceli.....	26
3.2.1 Ocel 11 321	26
3.2.2 Ocel 11 373	26
3.3 Hliník a slitina hliníku	28
3.3.1 Hliník Al 99,5 E.....	28
3.3.2 Slitina hliníku AlMg3	28
4 Vyhodnocení kvality střížné plochy	29
4.1 Příprava vzorků	29
4.1.1 Stříhání	30
4.1.2 Odběr vzorků	31
4.1.3 Zalisování vzorků	31
4.1.4 Broušení vzorků.....	32

4.1.5	Leštění vzorků	32
4.1.6	Leptání vzorků	32
4.2	Vyhodnocení naměřených parametrů	33
4.3	Měření hloubky zpevnění v okolí střižné plochy	38
4.4	Vyhodnocení kvality střižných ploch pomocí navrženého parametru	41
5	Závěr	43
	Seznam použité literatury	45
	Seznam obrázků, tabulek a grafů	46

Úvod

V současné době, kdy se stále zvyšují nároky na ekonomičnost výroby a úsporu materiálu, má technologie tváření ve strojírenství své nezastupitelné místo. A právě stříhání, jímž se z velké části zabývá tato práce, je jedním z hlavních představitelů skupiny plošného tváření.

Díky vysoké rychlosti výroby a relativně nízkým provozním nákladům se bez tabulových nůžek či jiného střížného nástroje neobejde žádná dílna zabývající se zpracováním plechu nebo jiným podobným zaměřením. Použitím číslicově řízených vystřihovacích lisů lze proces stříhání snadno automatizovat a vyrábět tak ve velmi krátkém časovém úseku velké série i složitých plechových výstřížků o vynikající rozměrové přesnosti.

Vzhledem k tomu, že jedním z nejdůležitějších požadavků kladených na výstřížek je vysoká kvalita jeho střížné plochy, bude předmětem této práce hlubší studium vlivu materiálových parametrů na kvalitu střížné plochy. Hlavním úkolem bude nalezení snadno měřitelného parametru, na základě jehož velikosti bude možné s vyhovující přesností kvalitu střížných ploch určit.

1 PŘEDSTAVENÍ PROCESU STŘÍHÁNÍ

Stříhání jako jedna z nejzákladnějších metod dělení materiálu spadá do skupiny plošného tváření. V průběhu střížného procesu dochází k oddělování částic materiálu smykovým působením dvojice nástrojů (nožů nebo střížníku a střížnice) podél křivky stříhu [2].

Dle tvaru stříhaného objektu rozlišujeme:

- stříhání plošné
- stříhání objemové

V závislosti na tvaru křivky stříhu je stříhání možné rozdělit následovně:

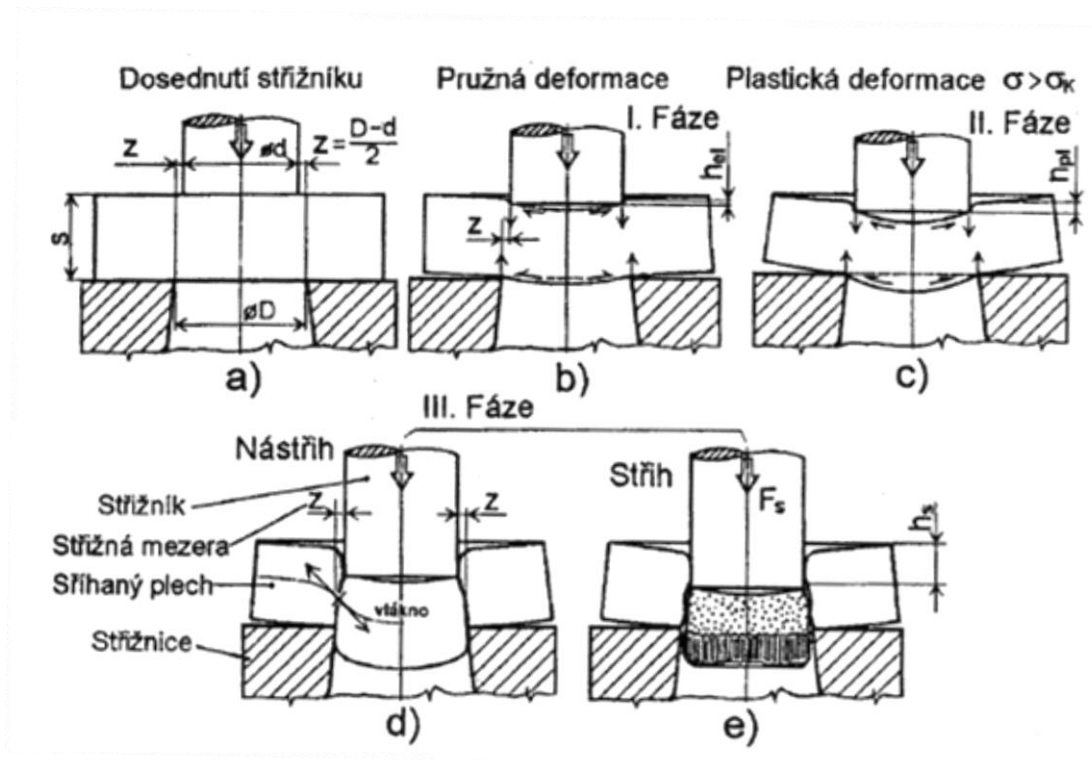
- stříhání podél uzavřené křivky stříhu
- stříhání podél neuzavřené křivky stříhu

Z hlediska konstrukce použitého nástroje se stříhání dělí takto:

- stříhání pomocí rovnoběžných nožů
- stříhání pomocí skloněných nožů
- stříhání pomocí kotoučových nožů

1.1 Průběh stříhání

Proces stříhání probíhá ve třech základních fázích, viz obrázek 1. Na tomto obrázku je proveden rozbor prostříhování ocelového plechu podél uzavřené křivky stříhu, jež je dána obvodem výstřížku, střížníku a střížnice.



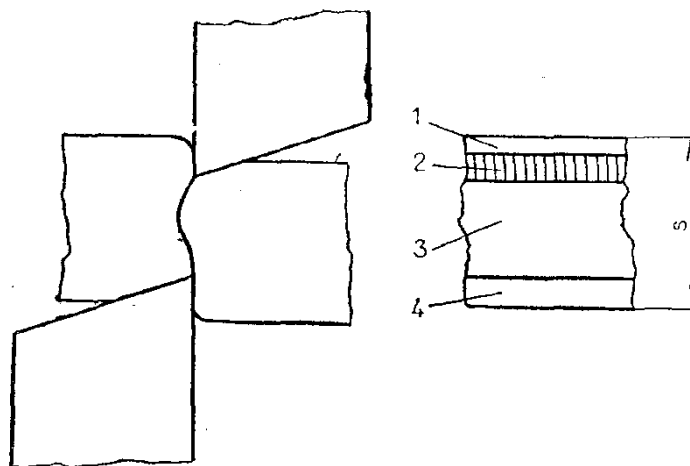
Obrázek 1 – průběh stříhání s optimální střížnou vůlí [4]

1. fáze: Po dosednutí střížníku dochází k jeho pružnému vnikání do povrchu stříhaného materiálu. Hloubka vniku závisí na mechanických vlastnostech materiálu a bývá nejčastěji $h_{el} = (5 \text{ až } 8\%) \underline{s}$.
2. fáze: Napětí ve směru vnikání střížníku dosáhne vyšší hodnoty, než je mez kluzu stříhaného kovu, a dochází k trvalé plastické deformaci. Podle druhu kovu a jeho mechanických vlastností bývá hloubka plastického vniknutí $h_{pl} = (10 \text{ až } 25\%) \underline{s}$.
3. fáze: Střížné napětí dosáhne meze pevnosti ve stříhu τ_s . Nejprve dojde k vytvoření trhlinek (tzv. nástřihu). Trhliny rychle prostupují materiálem, až dojde k oddělení výstřížku. Rychlost vzniku a rozvoje trhlin závisí jak na mechanických vlastnostech stříhaného materiálu, tak i na velikosti střížné vůle. U tvrdých a křehkých materiálů dochází k oddělení již při malém vniknutí střížných hran $h_s = 0,1 \underline{s}$. Naopak u měkkých a houževnatých materiálů bývá hloubka vniknutí střížných hran v okamžiku oddělení až $h_s = 0,6 \underline{s}$ [4].

1.2 Střížná plocha

1.2.1 Vzhled střížné plochy

Stříhaný materiál se neoddělí přímo v rovině kolmé k jeho ose, ale střížná plocha má tvar připomínající písmeno **S**. Toto zakřivení je způsobeno elastickou tvárností materiálu. Střížnou plochu lze rozdělit do čtyř pásem znázorněných na obrázku 2.



Obrázek 2 – vzhled střížné plochy [1]

1 – Pásmo zaoblení, představuje oblast pružné deformace.

2 – Pásmo vlastního stříhu, představuje oblast plastické deformace.

3 – Pásmo utržení je nejširší oblastí na střížné ploše. Šířka pásma se zvětšuje s rostoucí tvrdostí a křehkostí stříhaného materiálu. Dochází zde k oddělení materiálu.

4 – Pásmo otláčení od spodního nože. V závislosti na vlastnostech stříhaného materiálu a střížné vůli může dojít v pásmu otláčení i k výskytu ostřiny v důsledku vytažení materiálu tahovými složkami napětí [3].

1.2.2 Kvalita střížné plochy

Vysoká kvalita střížné plochy je požadována především proto, aby díly získané stříháním bylo možné použít pro následnou montáž bez dalších úprav. Kvalitní střížná plocha je charakterizována: širokým pásmem lomu, kolmostí k rovině stříhaného materiálu, rozměrovou přesností a minimálním zpevněním materiálu v okolí střížné plochy.

Hlavními faktory, jimiž lze kvalitu střížné plochy ovlivnit, jsou:

- kvalita a stav střížného nástroje
- velikost střížné mezery
- vlastnosti stříhaného materiálu
- rychlost stříhání

1.2.3 Vliv rychlosti stříhání na kvalitu střížné plochy a zpevnění v okolí stříhu

Z výsledků zkoušek, které se zabývaly ovlivněním stříhaného materiálu různými střížnými rychlostmi, bylo zjištěno, že při stříhání vyššími střížnými rychlostmi se dosáhlo kvalitnější střížné plochy s menšími ostřinami a také nižší hloubky oblasti zasažené přetvořením a trvalou deformací. Tento trend však platil pouze do doby, než rychlost stříhání přesáhla tzv. kritickou nárazovou rychlost. Kritickou nárazovou rychlostí se nazývá taková rychlost, při níž se mění materiál houževnatý na křehký. Po překročení této rychlosti se oblast zasažená tvářením opět rozšiřovala. Hodnota kritické nárazové rychlosti pro oceli se pohybuje v rozmezí od 50 do 150 ms⁻¹ [1].

2 Základní parametry stříhání

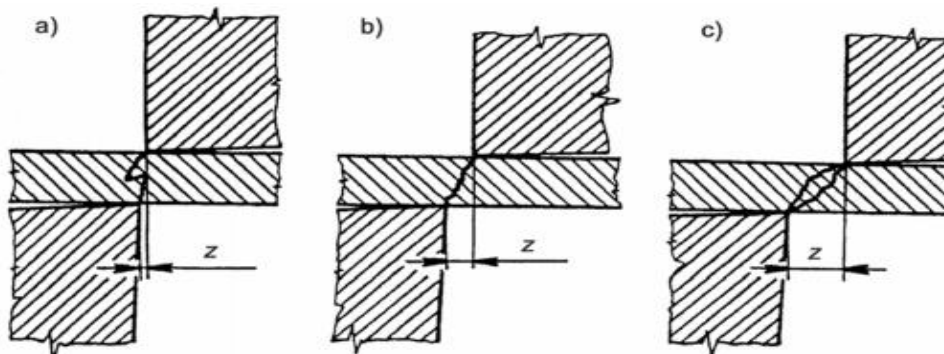
2.1 Střížná vůle

Při stříhání musíme použít střížník o menším rozměru, než je otvor ve střížnici. Následkem toho střížník vniká do střížnice s určitou mezerou na každé straně. Hodnotou rozdílu mezi rozměrem střížnice a střížníku je určena střížná vůle \underline{v} . Jednostranný rozdíl vytváří střížnou mezeru \underline{z} [5]. Střížná mezera by měla být po celé délce křivky stříhu konstantní.

Střížná mezera mezi noži (střížníkem a střížnicí) podstatně ovlivňuje jakost střížné plochy, velikost střížné síly a trvanlivost nástroje. Správně zvolená velikost střížné vůle zaručuje, že trhliny, které při stříhání vznikají, se setkají, čímž se zaručí správné usmýknutí střížné plochy [2]. Nesprávně zvolená střížná vůle může mít za následek nejen nekvalitní střížnou plochu s rozšířeným pásmem otěru, ale i vylomení břitů nožů (střížníku a střížnice) nebo vážné poškození celého stroje.

Na obrázku 3 je naznačen směr trhlin šířících se od horního a spodního nože při:

- a) malé střížné vůli,
- b) optimální střížné vůli,
- c) velké střížné vůli.



Obrázek 3 – šíření trhlin materiálem za různých střížných vůlí [2]

2.1.1 Určení střížné vůle

Pro přímé určení velikosti vůle se přihlíží k tloušťce stříhaného materiálu a k jeho pevnosti ve stříhu [1]. Na základě těchto dvou parametrů se přibližná hodnota střížné vůle vyhledá v tabulce střížných vůlí, například viz tabulka 1. Za optimální je považována taková střížná vůle, při které se dosáhne kvalitní střížné plochy při nejmenší střížné síle [2]. Čím je větší tloušťka a tvrdost stříhaného materiálu, tím větší střížnou vůli je nutno nastavit.

Druh materiálu	Střížná vůle (% s)	
	do 2,5 mm	2,5 až 6 mm
Ocel měkká	5	7 až 8
Ocel středně tvrdá	6	6 až 8
Ocel tvrdá	7 až 9	7 až 10
Hliník	4 až 7	5 až 9
Měď	4 až 7	5 až 7

Tabulka 1 – přehled střížných vůlí základních materiálů [5]

Dále je možné pro výpočet střížné vůle použít vztahů:

- Pro plechy do $s \leq 3$ mm [5]

$$v = 2 \cdot z = 2 \cdot 0,32 \cdot c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_s} \quad (2.1)$$

- Pro plechy $s \geq 3$ mm [5]

$$v = 2 \cdot z = 2 \cdot 0,32 \cdot (1,5 \cdot c \cdot s - 0,15) \cdot \sqrt{\tau_s} \quad (2.2)$$

Kde: v – střížná vůle [mm]

z – střížná mezera [mm]

s – tloušťka plechu [mm]

τ_s – pevnost ve stříhu [MPa]

c – součinitel, jehož velikost se volí v rozmezí $0,005 \div 0,025$.

Nižší hodnoty součinitele c jsou voleny při požadavku na kvalitnější střížnou plochu, naopak při zvolení vyšší hodnoty c dosáhneme minimální střížné síly.

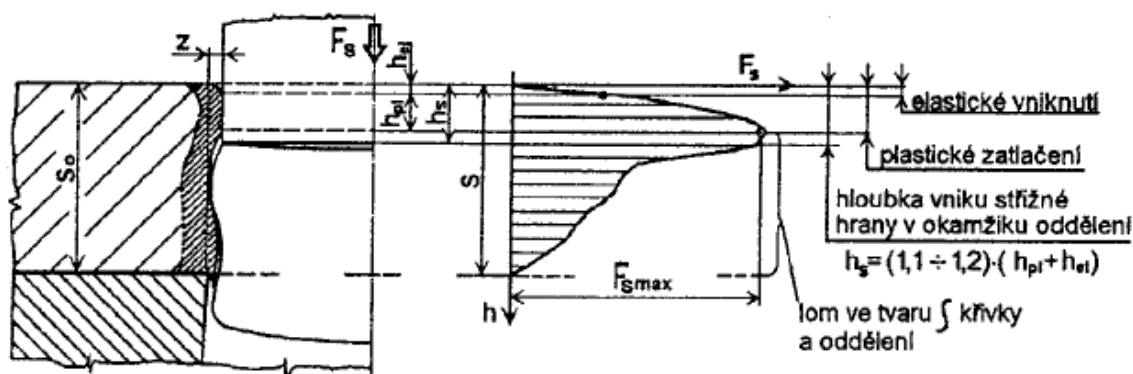
Vzhledem k přesnosti požadovaného rozměru výstřížku je střížná vůle volena na úkor střížníku nebo střížnice. Je-li požadován přesný vnější obvod výstřížku, je nutno dosáhnout střížné vůle zmenšením rozměru střížníku. Při vystřihování přesných otvorů se vytváří střížná vůle zvětšováním rozměru střížnice.

V předchozím textu již byl zmíněn požadavek na dodržení rovnoměrnosti střížné mezery po celé délce křivky stříhu. V případě nesplnění tohoto požadavku se na střížné ploše objevují povrchové vady a ostříny. Tyto závady se také vyskytují při otupených břitech funkčních částí. Otupí-li se břit střížníku, vzniká ostřina na vystřižené součásti. Naopak při otupení ostří střížnice vznikne ostřina kolem vystřiženého otvoru [5].

2.2 Střížná síla

Aby nedošlo k poškození střížného nástroje v důsledku jeho přetížení, je nutné znát velikost a průběh střížné síly. Velikost střížné síly je nejvýznamněji ovlivněna těmito faktory: mechanickými vlastnostmi stříhaného materiálu, velikostí střížné vůle, otupením střížných hran a v neposlední řadě zkosením střížných hran. Vzhledem k tomu, že v průběhu pracovního zdvihu se velikost střížné síly výrazně mění, je ve výpočtech

zapotřebí uvažovat její maximální hodnotu. Obrázek 4 znázorňuje charakteristický průběh střížné síly v závislosti na hloubce vniknutí střížníku do stříhaného materiálu.



Obrázek 4 – průběh střížné síly v závislosti na hloubce vniknutí [4]

Po krátké dráze elastického vniknutí břitu dojde k plastické deformaci. Přestože se střížná plocha zmenšuje, dochází vlivem lokálního zpevnění k plynulému nárůstu střížné síly. Po vzniku prvních trhlinek nastává mírný a plynulý pokles síly až do hloubky vniknutí h_s , kdy dojde k úplnému porušení lomem ve tvaru křivky S a k následnému oddělování výstřížku s výrazným poklesem síly. Lokální snížení výrazného gradientu poklesu střížné síly je způsobeno vzájemným otěrem posouvajících se S ploch. Oblast zpevněná stříhem zasahuje u většiny ocelí přibližně do 20 až 30 % tloušťky plechu [4].

2.2.1 Určení střížné síly

Střížnou sílu lze vypočítat na základě následujícího vztahu:

$$F_s = n \cdot L \cdot (s_0 - h_s) \cdot \tau_s \quad [4] \quad (2.3)$$

F_s – střížná síla [N]

$n = 1,0 \div 1,3$ je zvyšující koeficient zahrnující vliv vnějších podmínek při stříhání, tj. nerovnoměrnost tloušťky plechu, nerovnoměrnost napjatosti a především zhoršení kvality střížných hran.

L – okamžitá délka křivky stříhu [mm]; Pod okamžitou délkou křivky stříhu je myšlena délka nože nacházejícího se v daném okamžiku ve styku se stříhaným materiálem, případně část obvodu střížníku stýkající se s materiálem.

s_0 – počáteční tloušťka stříhaného plechu [mm]

h_s – hloubka vniknutí střižné hrany [mm]

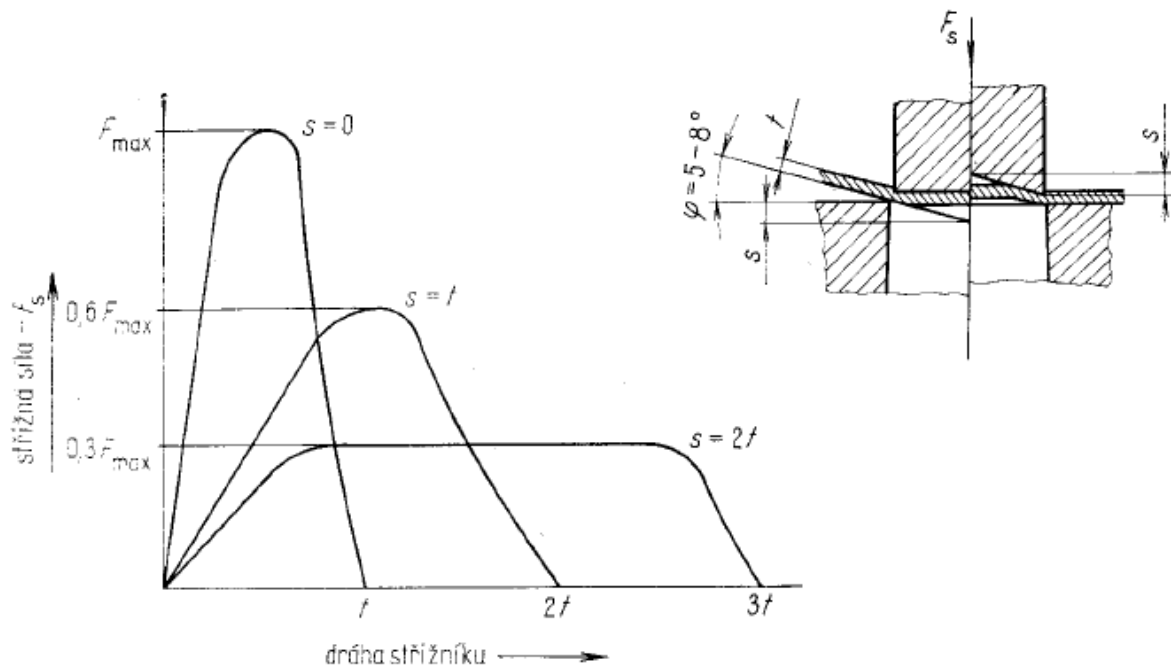
τ_s – pevnost ve stříhu [MPa]

$$\tau_s = \sigma_1 = 0,77 \cdot R_m \quad [4] \quad (2.4)$$

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

σ_1 – tahové hlavní napětí [MPa]

Vedle stavu ostří střižných hran má na velikost střižné síly velmi zásadní vliv také zkosení střižných hran. Díky tomuto zkosení se dosáhne postupného stříhu s menší okamžitou délkou křivky stříhu. To má za následek výrazné snížení střižné síly, jak je znázorněno na obrázku 5.



Obrázek 5 – snížení velikosti střižné síly v závislosti na zkosení střižných hran [5]

F_s – střižná síla, t – tloušťka stříhaného plechu, s – výška zkosení

Zkosení může být vytvořeno na střižné hraně střižníku nebo střižnice. Při děrování má být střižnice rovná a střižník zkosený, čímž se dosáhne nedeformované součásti a ohnutého odpadu [5]. Naopak při vystřihování se zkosenou střižnicí a rovným střižníkem se deformuje pás odpadního plechu a výstřižky zůstávají rovné.

2.3 Střižná práce

Obecně lze říci, že práce potřebná k ustřižení je dána jako integrál plochy pod křivkou znázorňující průběh střižné síly v závislosti na hloubce vniknutí střižníku nebo nože do materiálu, viz obrázek 4. Pro skutečný průběh střižné síly však neexistuje žádné přesné vyjádření matematické funkce. Dostatečně přesné hodnoty potřebné práce je možné získat použitím následujícího vzorce:

$$A = \lambda \cdot F_{s,\max} \cdot s \quad [4] \quad (2.5)$$

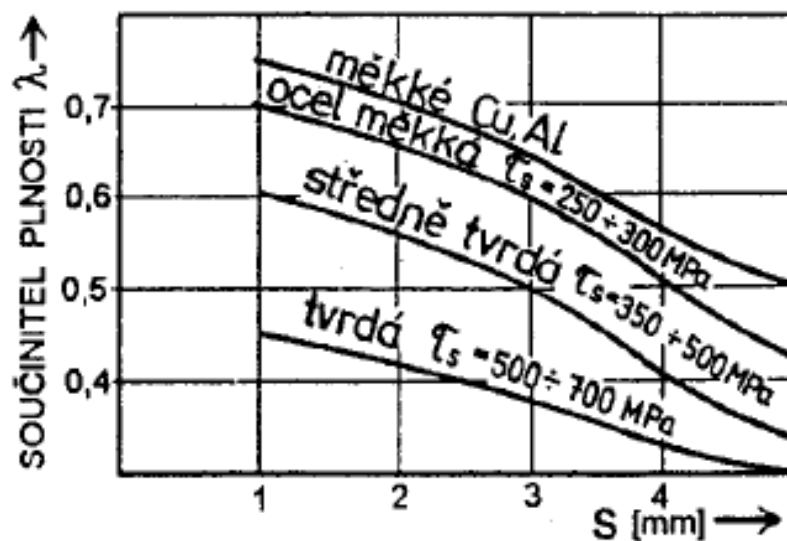
A – střižná práce [J]

λ - součinitel plnosti [-]

$F_{s,\max}$ – maximální hodnota střižné síly [N]

s – tloušťka stříhaného plechu [mm]

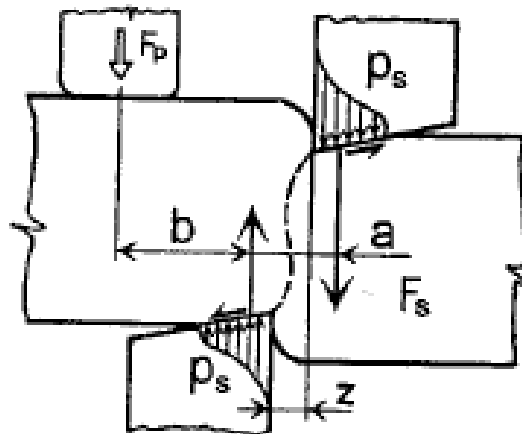
Hodnoty součinitele plnosti λ pro základní druhy materiálu lze určit odečtením z grafu na obrázku 6.



Obrázek 6 – graf ke stanovení součinitele plnosti [4]

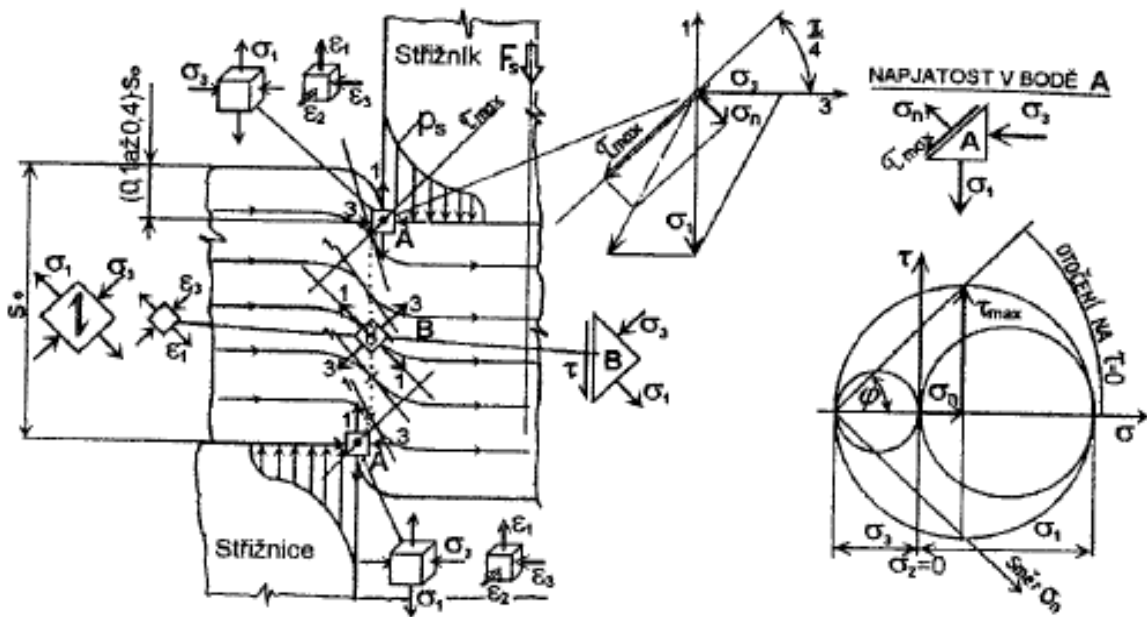
2.4 Rozbor stavu napjatosti při volném a uzavřeném stříhání

Při volném stříhání, jehož schéma je znázorněno na obrázku 7, vytváří střížná mezera z mezi noži spolu s výslednicemi svislých složek střížné síly dvojicí sil působících na rameni a . Aby nedošlo k přetočení a následnému vklínění stříhaného materiálu mezi střížné nože, je nutné použít přidržovač, jenž vyvodí přidržovací sílu F_p na rameni b a tím uvede dvojici střížných sil do momentové rovnováhy.



Obrázek 7 – schéma volného stříhání [4]

V případě uzavřeného vystřihování a děrování (obrys nože vytváří uzavřenou křivku) je ohybový moment navenek vyvážen, ale může způsobit nežádoucí trvalé deformace výstřížků. Střížná síla je oproti volnému stříhání navýšena o vliv tření, které působí mezi pružně svíranými střížnými plochami při protlačování výstřížků. Materiál nacházející se mezi střížnými hranami je jednak natahován a zároveň vytlačován do stran, čímž uvolňuje prostor vnikajícím břitům. Podélné vrstvy, znázorněné vrstevnicemi na obrázku 8, se prodlužují, mění svou křivost a mezi břity se zmenšuje tloušťka plechu [4].



Obrázek 8 – schéma napjatosti a deformace při uzavřeném stříhání [4]

V bodě A těsně u střížné hrany je největší tahové hlavní napětí σ_1 , již dříve definované vztahem (2.4). Praktickými zkouškami bylo zjištěno, že tlakové hlavní napětí σ_3 je přibližně rovno polovině σ_1 . Platí tedy, že $\sigma_3 = -\sigma_1 / 2$ a pro výpočet τ_{\max} lze použít vztah (2.6) [4].

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{3}{2} \sigma_3 \quad [4] \quad (2.6)$$

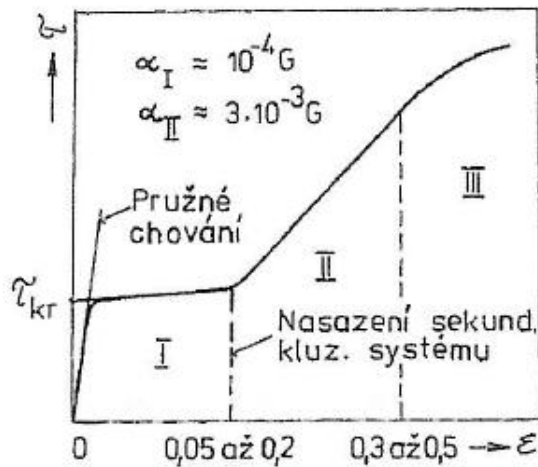
$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad [4] \quad (2.7)$$

Při volném stříhání plechů o větší tloušťce je možno uvažovat přibližně rovinný stav napjatosti, protože $\sigma_2 \approx 0$. Ale protože složka deviátoru napětí $D_{\sigma_2} = \sigma_2 - \sigma_s$ a střední napětí je nenulové, nachází se v bodě A prostorový stav deformace. Z vektorového součtu uvažovaných složek hlavních napětí působících v bodě A na obrázku 8 a z Mohrových kružnic napětí je patrné, že kolmo na rovinu maximálního smykového napětí působí kladná normálová složka σ_n , která se během šíření trhlin po nástřihu podílí na jejich rozevírání. V důsledku změny orientace křivosti vrstevnic stříhaného plechu směrem od střížné hrany do středu dochází k natáčení roviny τ_{\max} , načež střížná plocha vytváří typickou křivku S. Poměr hlavních napětí $\sigma_1 : \sigma_3$ směrem do středu střížné plochy se mění a právě uprostřed v bodě B platí, že $\sigma_1 = |\sigma_3|$ a jsou zde splněny podmínky prostého smyku, kde $\sigma_2 = 0$ [4].

2.5 Mechanismy zpevnění vlivem plastické deformace

Působením dostatečně velkého zatížení mění materiál svůj tvar a rozměry, uskutečňuje se plastická deformace [12]. Tato plastická deformace je realizována pohybem dislokací. Růst odporu kovu proti pohybu dislokací představuje jeho deformační zpevnění. Deformační zpevnění je především důsledkem růstu hustoty dislokací, vzájemné interakce pohybujících se dislokací a dalších střetů dislokací s překážkami [11].

Na obrázku 9 je znázorněna křivka zpevnění monokrystalu kovu s mřížkou K 12.



Obrázek 9 - zpevňovací křivka monokrystalu kovu s mřížkou K 12 [11]

Křivku deformačního zpevnění z obrázku 9 je možné rozdělit do tří oblastí: oblast snadného kluzu (I), oblast lineárního intenzivního zpevňování (II) a oblast parabolického zpevňování.

- (I) – Pro oblast snadného kluzu, která přichází hned po oblasti pružné deformace, je charakteristický malý součinitel zpevnění α . Tento součinitel je dán výrazem (2.8) a jeho hodnota pro tuto oblast je řádově $10^{-4}G$. Ke skluzu zde dochází pouze v jedné soustavě rovnoběžných skluzových rovin, přičemž se dislokace vzájemně neprotínají, ale roste jejich hustota.

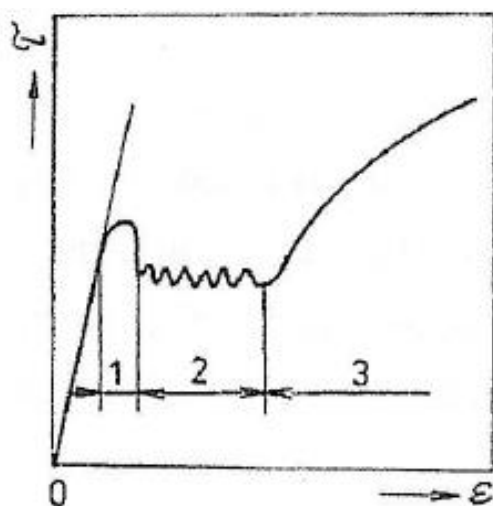
$$\alpha = \frac{d\tau}{d\varepsilon} \quad (2.8)$$

$d\tau$ - diferenciál smykového napětí

$d\varepsilon$ - diferenciál poměrného prodloužení

- (II) – Dosáhne-li napětí kritické hodnoty v některém dalším skluzovém systému, začnou se dislokace protínat a plastická deformace přejde do oblasti lineárního zpevňování. Lamelární skluz se mění v turbulentní, hustota dislokací dále roste a dochází k jejich hromadění na překážkách. Díky těmto všem dějům dochází k nárůstu součinitele zpevnění až na hodnotu blížíci se $3 \cdot 10^{-3} G$.
- (III) – V oblasti parabolického zpevňování dochází k poklesu součinitele α . V tomto stadiu dochází k příčnému skluzu rozštěpených dislokací, který je částečně tepelně aktivován [11].

Na obrázku 10 je znázorněna část zpevňovací křivky monokrystalu s mřížkou K 8 s uplatněním dvojčatění.



Obrázek 10 - část zpevňovací křivky monokrystalu s mřížkou K 8 [11]

Oblasti 1 a 3 znázorňují deformaci skluzem, oblast 2 představuje deformaci dvojčatěním. V případě krystalové mřížky K 8 je od samotného počátku plastické deformace v činnosti více skluzových systémů, oblast snadného skluzu nenastává, kov od počátku intenzivně zpevňuje. V případě, že se u mřížky K 8 kromě skluzu uplatní i dvojčatění, projeví se dvojčatění charakteristickým průběhem, který zachycuje obrázek 10. Napětí, jehož hodnoty dosahují horní polohy „vlnek“, odpovídá kritickému smykovému napětí pohybu parciálních dislokací v rovnoběžných rovinách tvořících mechanické dvojče [11].

Zpevňovací charakteristiky vybraných materiálů jsou uvedeny v tabulce 2.

Materiál	Součinitel zpevnění [MPa]	Exponent zpevnění [1]	Mez kluzu [MPa]
ocel 0,15 C norm. žih.	600	0,25	240
ocel 0,6 C zušlechtěná	1500	0,15	500
aust. ocel Cr18Ni9	1280	0,45	590
měď 99,99	300	0,55	60
hliník 99,9	180	0,20	40

Tabulka 2 - zpevňovací charakteristiky vybraných materiálů [11]

Vzhledem k tomu, že plastická deformace kovových materiálů se uskutečňuje pohybem dislokací, je velikost napětí potřebného k jejímu uskutečnění závislá na typu překážek bránících pohybu dislokací, na množství a rozložení těchto překážek. Za nejučinnější překážky jsou považovány: hranové dislokační smyčky, hranice zrn a subzrn, atomy příměsí, precipitáty a disperzní částice. Na základě vzájemné interakce pohybujících se dislokací s těmito překážkami jsou definovány základní zpevňovací mechanismy kovových materiálů. Jedná se o dislokační zpevnění, zpevnění hranicemi zrn a subzrn, zpevnění legováním a zpevnění cizími částicemi [11].

Na základě studia mechanismu zpevnění hranicemi zrn a subzrn, je možno říci, že čím jemnozrnější strukturu materiál má, tím větší je plocha hranic zrn a tím více je i překážek pohybu dislokací. To je důvod, proč jemnozrný materiál zpevňuje vždy více než materiál hrubozrný.

Výsledné pevnostní vlastnosti materiálu jsou funkcí všech složek zpevnění, avšak jejich superpozice není vždy jednoduchá. Existují rovnice, podle nichž se na základě současných poznatků a zhodnocení příspěvků jednotlivých mechanismů zpevňování nechají pro většinu kovových materiálů hodnoty meze kluzu vypočítat. Jsou však i materiály, např. legované vícesložkové soustavy, pro které je výpočet meze kluzu z elementárních interakcí zatím nemožný. Pro tyto materiály je nezbytné určit experimentálně každou složku zpevnění, a potom použít směšovací pravidlo [12].

3 Základní charakteristika testovaných materiálů

Pro experimentální část práce bylo vybráno šest různých vzorků plechu o tloušťkách 1,5 nebo 2 mm, z nichž každý prezentuje odlišnou skupinu materiálů - antikorozi oceli, nelegované feriticko-perlitické oceli a hliníky, resp. slitiny hliníku. Všechny zkoumané materiály jsou i se svými mechanickými vlastnostmi podrobněji popsány v následujícím textu.

3.1 Antikorozi oceli

3.1.1 Ocel 17 240

Dle EN (1.4301). Jedná se o austenitickou nestabilizovanou korozivzdornou ocel. Ocel je zaručeně svařitelná, nemagnetická a odolná proti mezikystalové korozi u svařených plechů do tloušťky přibližně 6 mm. Tato ocel nachází široké uplatnění při stavbě chemických zařízení, výrobě tlakových nádob, v prostředí oxidační povahy a také v prostředí, kde je koroze zanedbatelná, ale vyžaduje se vysoká čistota produktu (farmaceutický, potravinářský průmysl) [6]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 11.

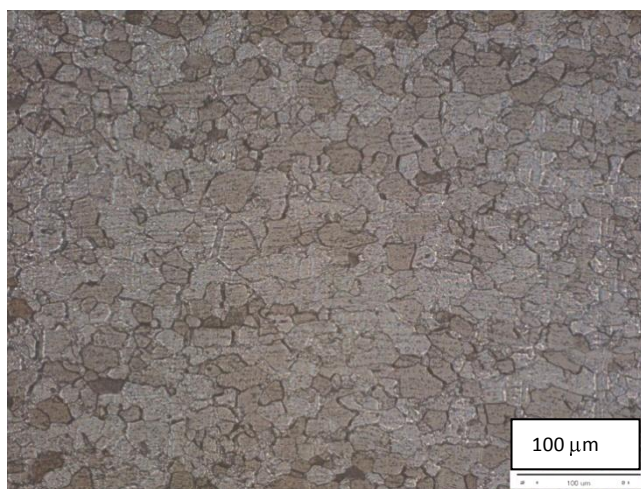


Obrázek 11 – základní struktura austenitické korozivzdorné oceli

3.1.2 Ocel 17 040

Dle EN (1.4016). Ocel patří do skupiny feritických korozivzdorných ocelí, je feromagnetická, svařitelná, dobře tvářitelná za tepla i za studena a dobře obrobitelná. Lze ji použít k výrobě mírně namáhaných zařízení, vystavených působení páry a vody,

dále je vhodná pro výrobu spotřebního zboží, kuchyňských zařízení, pro použití v dopravě a také ve zdravotnictví [7]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 12.



Obrázek 12 – základní struktura feritické korozivzdorné oceli

Z obrázků 11 a 12 je viditelné, že oba dva zkoumané materiály mají polyedrickou strukturu (jsou rekrytalizačně vyžháný), což je velice výhodné pro další hodnocení. Dále je z obou obrázků patrná původní řádkovitost struktury po tváření, zachovaná u rozložení karbidů.

Chemické složení testovaných antikoročních ocelí udává tabulka 3 a mechanické vlastnosti tabulka 4.

Materiál	Chemické složení v %						
	C _{max}	Mn _{max}	Si _{max}	Cr	Ni	P _{max}	S _{max}
17 240	0,07	2,00	1,00	17,0 – 20,0	9,0 – 11,5	0,045	0,030
	C _{max}	Mn _{max}	Si _{max}	Cr	Ni _{max}	Ti _{max}	-
17 040	0,10	0,90	0,70	16,0 – 18,5	0,6	0,80	-

Tabulka 3 – chemické složení použitých antikoročních ocelí v % hmotnosti [8]

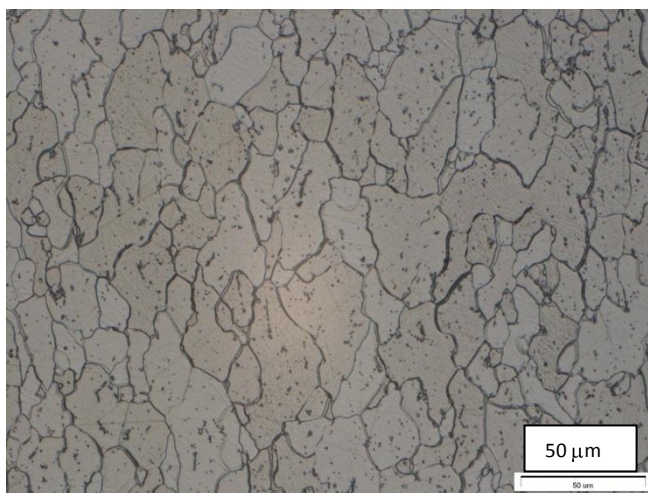
Materiál		17 240	17 040
Nejnižší mez kluzu R _e	[MPa]	190	245
Pevnost v tahu R _m	[MPa]	500 - 700	440 - 590
Nejnižší tažnost A ₅	[%]	37	22

Tabulka 4 – mechanické vlastnosti použitých antikoročních ocelí [6], [7]

3.2 Nelegované feriticko-perlitické oceli

3.2.1 Ocel 11 321

Dle EN (DC 01). Jedná se o nelegovanou feritickou ocel obvyklé jakosti k tažení a tváření za studena. Ocel je vhodná pro střední tažení, lakování, protlačování, pokovování v tavenině a také na smaltování. Pokud se jedná o neuklidněnou ocel, po válcování za studena je náchylná k stárnutí, je proto nutno ji zpracovat v odpovídajícím časovém termínu [9]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 13.

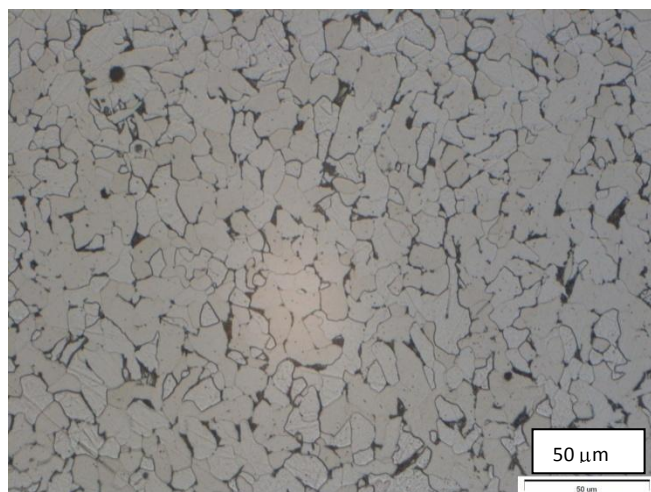


Obrázek 13 – základní struktura nelegované feritické oceli

Na obrázku 13 je viditelná téměř výlučně feritická struktura, ve které jsou obsaženy drobné sekundární částice, tzv. precipitáty (karbidy, nitridy). Velká zrna feritu příznivě ovlivňují tvárnost materiálu, naopak sekundární částice tvárnost zhoršují a zvyšují mez kluzu.

3.2.2 Ocel 11 373

Dle EN (S235JRG1). Jedná se o feriticko-perlitickou nelegovanou ocel obvyklých vlastností. Ocel je vhodná k výrobě svařovaných konstrukcí a méně namáhaných součástí [9]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 14.



Obrázek 14 - základní struktura nelegované feriticko-perlitické oceli

Na obrázku 14 je znatelná feritická struktura kovu s malým podílem perlitu. Perlit by měl být vyloučen rovnoměrně, struktura by neměla obsahovat sekundární částice po hranicích zrn. V případě, že jsou kupř. karbidy vyloučeny po hranicích zrn feritu, zvyšuje se křehkost materiálu.

Chemické složení testovaných nelegovaných feriticko-perlitických ocelí udává tabulka 5 a mechanické vlastnosti tabulka 6.

Materiál	Chemické složení v %			
	11 321	C _{max}	Mn _{max}	P _{max}
	0,10	0,45	0,035	0,035
11 373	C _{max}	-	P _{max}	S _{max}
	0,22	-	0,050	0,050

Tabulka 5 - chemické složení použitých nelegovaných ocelí v % hmotnosti [8]

Materiál		11 321	11 373
Nejnižší mez kluzu R _e	[MPa]	235	235
Pevnost v tahu R _m	[MPa]	280 - 380	360 - 510
Nejnižší tažnost A ₅	[%]	29	17

Tabulka 6 - mechanické vlastnosti použitých nelegovaných ocelí [9]

3.3 Hliník a slitina hliníku

3.3.1 Hliník Al 99,5 E

Dle EN (AW-EA199,5). Jedná se o svařitelný hliník s vysokou odolností proti korozi v městských a průmyslových atmosférách, vodě a vodní páře. Nachází uplatnění především v elektrotechnice. Z tohoto materiálu je vyráběno mnoho druhů vodičů, přičemž každý z nich je vhodný pro konkrétní použití [9]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 15.

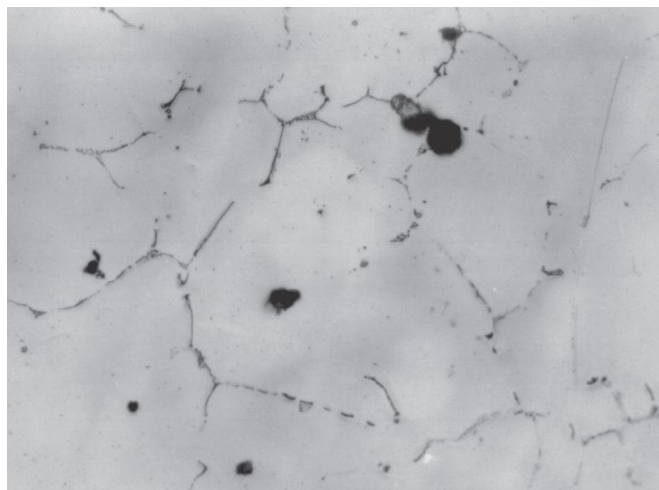


Obrázek 15 – základní struktura litého Al 99,5 E [10] 100x

Leptáním výbrusu tohoto materiálu ve směsi kyselin fosforečné a dusičné se dosáhne zviditelnění heterogenních fází po hranicích zrn, popř. dendritu.

3.3.2 Slitina hliníku AlMg3

Dle EN (AW – AlMg3). Jedná se o svařitelnou slitinu hliníku s velmi dobrou odolností proti korozi, používanou pro všeobecné účely. Tato slitina nachází uplatnění ve výrobě středně namáhaných konstrukcí, které mají odolávat korozi a případně mají být dobře lešitelné (vozidla, námořní plavidla, zařízení v potravinářském a chemickém průmyslu, vnější i vnitřní architektura) [9]. Základní struktura materiálu je vyobrazena na obrázku 16.



Obrázek 16 – základní struktura litého AlMg3 [10] 300x

Chemické složení testovaných hliníkových materiálů udává tabulka 7 a mechanické vlastnosti tabulka 8.

Materiál	Chemické složení v %											
	Al _{min}							Doprovodné prvky _{max}				
Al 99,5 E	99,5							0,5				
AlMg3	Mg	Mn	Si max	Fe max	Ti max	Zn max	Cu max	Cr max	Fe+Si max	ostatní jednotl. max	ostatní celkem max	Al
	2,5- 4,0	0,05- 0,4	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,05	0,6	0,1	1,1	zbytek

Tabulka 7 - chemické složení použitých hliníkových materiálů v % hmotnosti [8]

Materiál	Al 99,5 E	AlMg3
Nejnižší mez kluzu R _e [MPa]	105	185
Nejnižší pevnost v tahu R _m [MPa]	130	270
Nejnižší tažnost A ₅ [%]	3	4

Tabulka 8 - mechanické vlastnosti použitých hliníkových materiálů [9]

4 Vyhodnocení kvality sřížné plochy

4.1 Příprava vzorků

Pro uskutečnění následujících experimentálních prací bylo nutno připravit vzorky jak pro metalografické, tak i pro fraktografické vyhodnocení. Metalografická analýza byla

provedena na světelném metalografickém mikroskopu Neophot 32 a fraktografická analýza byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu TESCAN 5130 SB.

Příprava metalografických vzorků obsahovala:

- nastříhání plechů za definovaných parametrů stříhání
- odběr vzorků potřebných rozměrů
- zalisování vzorků do preparačního materiálu
- broušení vzorků
- leštění vzorků
- leptání vzorků pro zviditelnění struktury

Příprava fraktografických vzorků obsahovala pouze:

- nastříhání plechů za definovaných parametrů stříhání
- odběr vzorků potřebných rozměrů

4.1.1 Stříhání

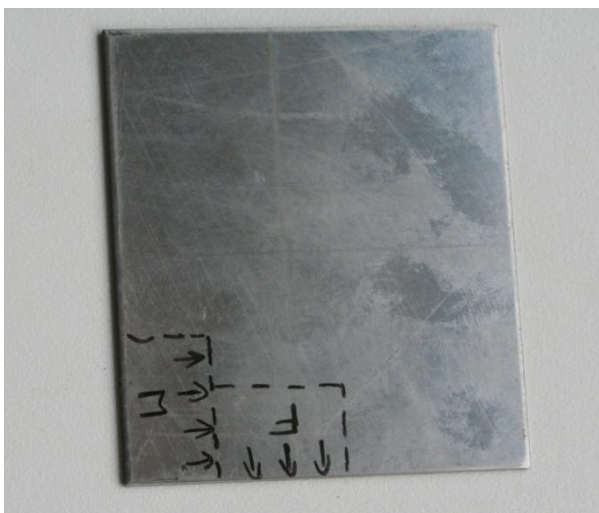
K nastříhání veškerých vzorků plechu, které byly používány v následujících experimentálních pracích, byly použity hydraulické tabulové nůžky s označením M Shear od výrobce Safan. Tyto číslicově řízené nůžky po zadání skupiny materiálů, do níž stříhaný materiál patří, a tloušťky materiálu automaticky nastaví optimální náklon horního nože a velikost střížné mezery. Konkrétní hodnoty střížné mezery a náklonu horního nože pro vyhodnocované materiály jsou uvedeny v tabulce 9.

Materiál (Tloušťka plechu [mm])	Náklon nože [°]	Střížná mezera [mm]
17 240 (1,5)	1,1	0,07
17 040 (1,5)	1,1	0,07
11 321 (1,5)	1,1	0,12
11 373 (2,0)	1,1	0,17
Al 99,5 E (2,0)	1,1	0,08
AlMg3 (2,0)	1,1	0,08

Tabulka 9 – parametry stříhu

4.1.2 Odběr vzorků

Vzorky byly vyhotoveny u všech hodnocených materiálů z obou oddělených částí. Následně byly všechny vzorky odřezány za intenzivního chlazení na kotoučové metalografické pilce od výrobce MTH s označením MIKRON 110. Ukázka odběru vzorků s vyznačením rovin pro metalografické a fraktografické hodnocení je na obrázku 17.



Obrázek 17 – ukázka odběru vzorků

4.1.3 Zalisování vzorků

Z důvodu lepší manipulace s metalografickými vzorky v dalších fázích jejich přípravy a také při samotném vyhodnocování byly vzorky zalisovány za tepla a tlaku do preparačních hmot (bakelitu a dentacrylu). Pro zabezpečení správné polohy (kolmosti vzorků), která je velmi důležitá pro zachování přesnosti měření, byly vzorky ve stabilní poloze zafixovány pomocí opěrných kovových válečků. Zalisování vzorků bylo provedeno na zalisovávacím zařízení metalografických vzorků od výrobce MTH, jenž nese označení STANDARD 30. Ukázka dvou zalisovaných vzorků je na obrázku 18.



Obrázek 18 – vyhotovené preparáty

4.1.4 Broušení vzorků

Hlavním účelem broušení bylo dosažení minimální povrchové nerovnosti připravovaného vzorku, přičemž muselo dojít k odstranění deformované vrstvy vzorku vytvořené jeho odběrem ze zkoumaného materiálu. Broušení vzorků bylo provedeno sadou metalografických brusných papírů o různé zrnitosti za mokra. Vždy při přechodu na jemnější brusný papír byl vzorek očištěn a následně broušen ve směru kolmém k předešlým rýhám, dokud se nedocílilo jejich odstranění. K broušení vzorků byla použita metalografická bruska značky MTH s označením KOMPAKT 1031.

4.1.5 Leštění vzorků

Cílem leštění vzorků bylo získání rovinného povrchu bez přítomnosti rýh vytvořených broušením a u kovů též dosažení zrcadlovitě lesklého povrchu. Připravované vzorky byly leštěny diamantovými lešticími pastami na rotujících kotoučích, přičemž jako chladivo sloužil etylalkohol. Leštění probíhalo ve dvou etapách, a to za použití lešticí pasty různé zrnitosti (min. 0,7 μm). Stejně tak jako k broušení byl i k leštění všech vzorků použit opět přístroj MTH KOMPAKT 1031.

4.1.6 Leptání vzorků

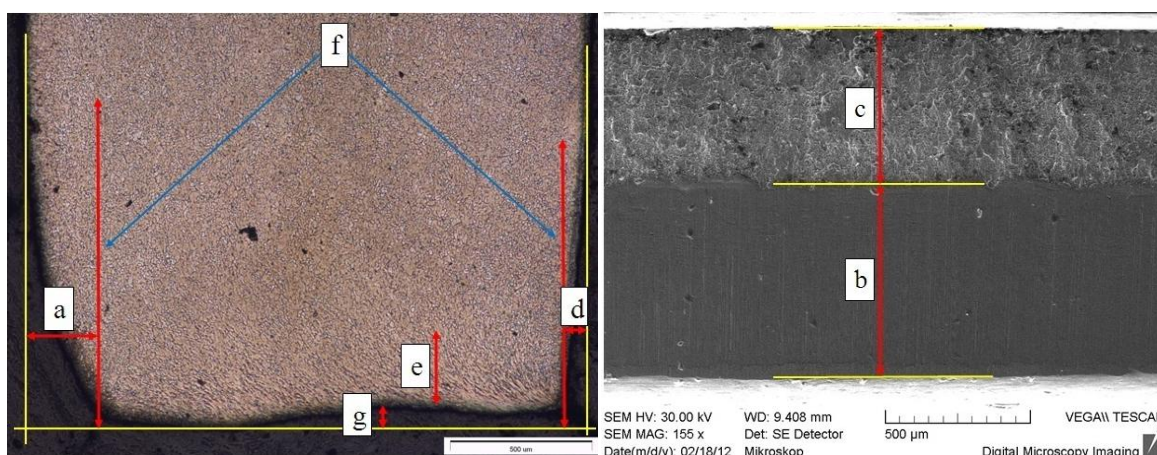
Ke zviditelnění struktury kovu, v daném případě především hranic zrn, bylo použito různých druhů leptadel. Působením leptadla na vyleštěný povrch docházelo k přednostnímu leptání hranic zrn, na vzorku se vytvořil reliéf, díky kterému bylo možné jednotlivá zrna pozorovat. V případě leptání vzorků vyhodnocovaných v této práci bylo použito leptadel uvedených v tabulce 10.

Název leptadla	Složení	Leptaný materiál
Villela-Bain	5 ml kys. chlorovodíkové 1 g kys. pikrové 100 ml etylalkoholu	Korozivzdorné oceli
Nital	3 ml kys. dusičné 97 ml etylalkoholu	Nelegované feriticko-perlitické oceli
Weck's Reagent	100 ml vody 4 g manganistanu draselného 1 g hydroxidu sodného	Hliník, slitina hliníku

Tabulka 10 – použitá leptadla

4.2 Vyhodnocení naměřených parametrů

Při vlastním hodnocení střížných ploch bylo použito sedm parametrů, jimiž byla charakterizována celková kvalita střížné plochy (obr. 19). Číselné hodnoty těchto parametrů byly odměřeny prostřednictvím metalografické a fraktografické analýzy zvlášť pro každý materiál na obou vzájemně oddělených částech (stranách). Všechny hodnocené výstřížky byly rozříděny podle skupiny materiálu - v tabulce 11 jsou korozivzdorné oceli, v tabulce 12 se nachází nelegované feriticko-perlitické oceli a tabulka 13 je určena pro hliník a jeho slitiny.



Obrázek 19 – znázornění měřených parametrů (parametry viz tab. 11, 12 a 13)

Aby bylo možné údaje obsažené v tabulkách vyhodnotit, bylo zapotřebí definovat kvalitní střížnou plochu pomocí měřených parametrů.

Kvalitní střížná plocha má:

- malé pásmo zaoblení
- malé pásmo plastické deformace
- velké pásmo lomu
- malé pásmo otláčení od spodního nože
- malou hloubku vnitřní deformační zóny
- malou hloubku vnější deformační zóny
- malou hloubku maximální nerovnosti

Materiál dle ČSN Tloušťka s [mm]		17 240 (1,5)		17 040 (1,5)	
Zkoumané parametry	označení	část A	část B	část A	část B
Pásmo zaoblení v [μm]	a	98	109	109	82
Pásmo zaoblení v [%] s		6,5	7,3	7,3	5,5
Pásmo plastické deformace v [μm]	b	414	540	679	544
Pásmo plastické deformace v [%] s		27,6	36	45,3	36,3
Pásmo lomu v [μm]	c	825	633	534	670
Pásmo lomu v [%] s		55	42,2	35,6	44,7
Pásmo otláčení od spodního nože v [μm]	d	25	242	není	147
Pásmo otláčení od spodního nože v [%] s		1,7	16,1	není	9,8
Hloubka vnitřní deformační zóny v [μm]	e	39	532	104	406
Hloubka vnitřní deformační zóny v [%] s		2,6	35,5	6,9	27,1
Hloubka vnější deformační zóny v [μm]	f	773	978	615	662
Hloubka vnější deformační zóny v [%] s		51,5	65,2	41	44,1
Hloubka maximální nerovnosti střížné plochy v [μm]	g	71	348	71	237
Hloubka maximální nerovnosti střížné plochy v [%] s		4,7	23,2	4,7	15,8

Tabulka 11 – hodnoty měřených parametrů u korozivzdorných ocelí

Při vzájemném porovnání korozivzdorných ocelí uvedených v tabulce 11 nejsou po zprůměrování hodnot naměřených pro část A a část B ve většině parametrů velké rozdíly. Z tohoto faktu vyplývá, že kvalita střížných ploch obou ocelí je i přes jejich rozdílnou mikrostrukturu téměř srovnatelná. Malé rozdíly v kvalitě střížných ploch jsou způsobeny pravděpodobně tím, že po stránce mechanických vlastností nejsou mezi těmito oceli velké rozdíly.

Materiál dle ČSN Tloušťka s [mm]		11 321 (1,5)		11 373 (2,0)	
Zkoumané parametry	označení	část A	část B	část A	část B
Pásmo zaoblení v [μm]	a	207	220	204	300
Pásmo zaoblení v [%] \underline{s}		13,8	14,7	10,2	15
Pásmo plastické deformace v [μm]	b	777	821	493	605
Pásmo plastické deformace v [%] \underline{s}		51,8	54,7	24,65	30,25
Pásmo lomu v [μm]	c	632	540	1177	1178
Pásmo lomu v [%] \underline{s}		42,1	36	58,9	58,9
Pásmo otláčení od spodního nože v [μm]	d	25	41	69	79
Pásmo otláčení od spodního nože v [%] \underline{s}		1,7	2,7	3,45	3,95
Hloubka vnitřní deformační zóny v [μm]	e	359	383	183	326
Hloubka vnitřní deformační zóny v [%] \underline{s}		23,9	25,5	9,15	16,3
Hloubka vnější deformační zóny v [μm]	f	866	1081	1146	994
Hloubka vnější deformační zóny v [%] \underline{s}		57,7	72	57,3	49,7
Hloubka maximální nerovnosti střižné plochy v [μm]	g	147	91	98	63
Hloubka maximální nerovnosti střižné plochy v [%] \underline{s}		9,8	6,1	4,9	3,2

Tabulka 12 – hodnoty měřených parametrů u nelegovaných feriticko-perlitických ocelí

Aby bylo možné vzájemně porovnávat kvalitu střižných ploch u feriticko-perlitických ocelí uvedených v tabulce 12, bylo nutné hodnoty naměřené v μm převést na hodnoty v [%] \underline{s} . Tento převod byl nutný z toho důvodu, že nastříhané vzorky plechů měly různou tloušťku \underline{s} . Je-li posuzována kvalita střižných ploch těchto ocelí na základě průměru naměřených hodnot, dospěje se k závěru, že ocel 11 373 má kvalitnější střižnou plochu než ocel 11 321. Důvodem kvalitnější střižné plochy u oceli 11 373 je pravděpodobně její větší mez pevnosti.

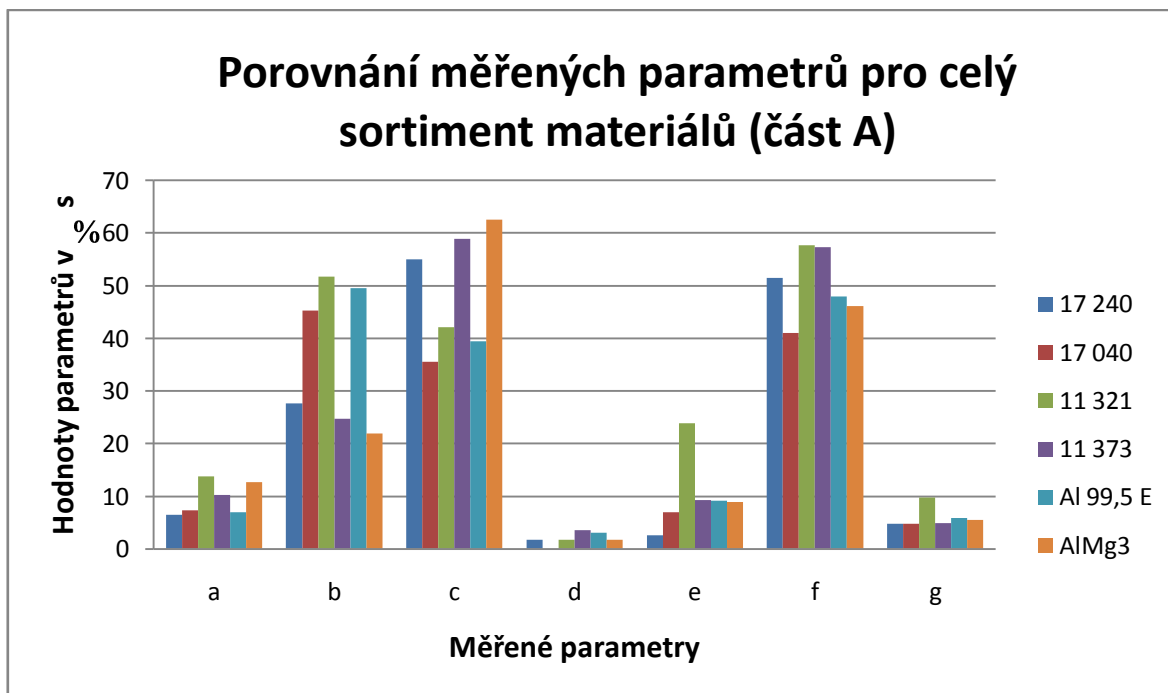
Materiál dle ČSN Tloušťka s [mm]		Al 99,5 E (2,0)		AlMg3 (2,0)	
Zkoumané parametry	označení	část A	část B	část A	část B
Pásmo zaoblení v [μ m]	a	138	153	253	175
Pásmo zaoblení v [%] <u>s</u>		6,9	7,7	12,7	8,8
Pásmo plastické deformace v [μ m]	b	991	873	437	508
Pásmo plastické deformace v [%] <u>s</u>		49,6	43,7	21,9	25,4
Pásmo lomu v [μ m]	c	788	558	1252	1259
Pásmo lomu v [%] <u>s</u>		39,4	27,9	62,6	63
Pásmo otačení od spodního nože v [μ m]	d	59	359	33	36
Pásmo otačení od spodního nože v [%] <u>s</u>		3	18	1,7	1,8
Hloubka vnitřní deformační zóny v [μ m]	e	182	509	177	201
Hloubka vnitřní deformační zóny v [%] <u>s</u>		9,1	25,5	8,9	10,1
Hloubka vnější deformační zóny v [μ m]	f	959	1204	921	888
Hloubka vnější deformační zóny v [%] <u>s</u>		48	60,2	46,1	44,4
Hloubka maximální nerovnosti střížné plochy v [μ m]	g	116	350	109	65
Hloubka maximální nerovnosti střížné plochy v [%] <u>s</u>		5,8	17,5	5,5	3,3

Tabulka 13 – hodnoty měřených parametrů u hliníku

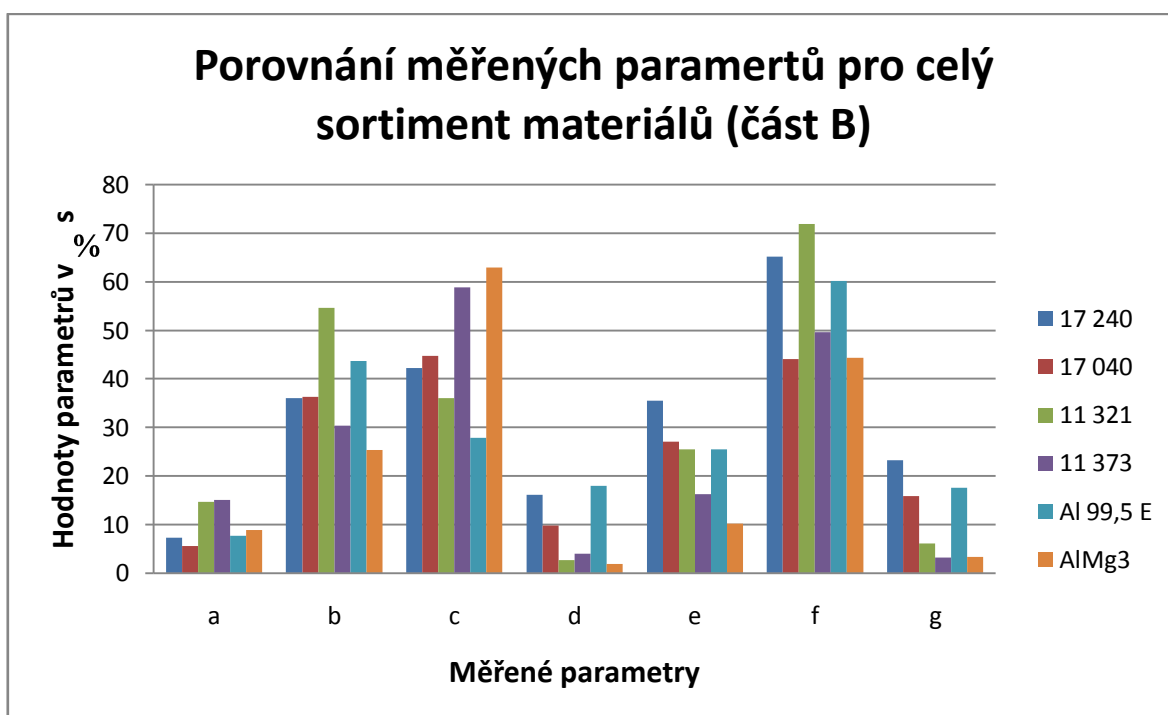
Po porovnání kvality střížných ploch výše uvedených hliníkových materiálů, na základě průměrných hodnot parametrů z tabulky 13, bylo zjištěno, že kvalita střížných ploch těchto dvou materiálů se od sebe odlišuje asi nejvíce z celého spektra vyhodnocovaných materiálů. Důvodem výrazně kvalitnější střížné plochy u materiálu AlMg3 je s největší pravděpodobností opět výrazný rozdíl v mezi pevnosti těchto dvou materiálů.

Z předchozích tabulek je na první pohled zřejmé, že u většiny ze zkoumaných materiálů nejsou střížné plochy na obou odstřížených částech úplně stejně kvalitní. Tento jev je pravděpodobně způsoben tím, že při stříhání vzorků na výše uvedených nůžkách byla vždy jedna z částí přidržována pomocí přidržovače a druhá část nikoliv.

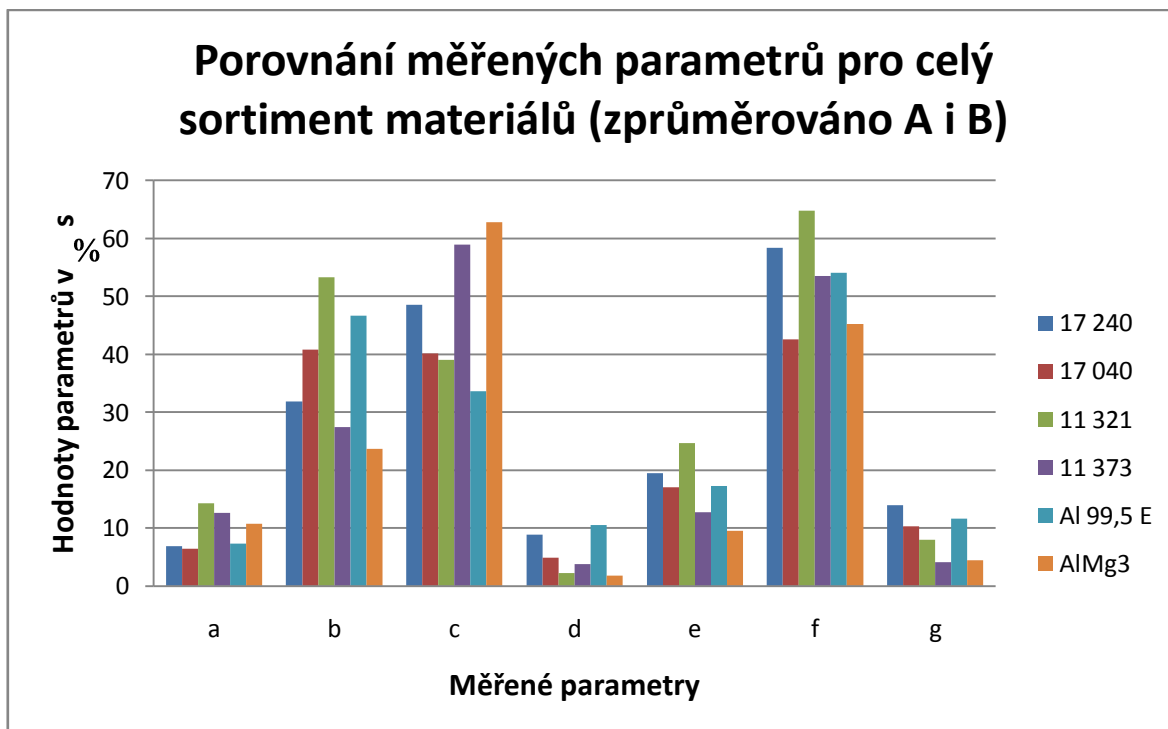
Z důvodu větší přehlednosti byla data zaznamenaná v tabulkách graficky zpracována do následujících grafů. Graf 1 znázorňuje hodnoty naměřených parametrů na částech A pro celý sortiment hodnocených materiálů. Stejně tak i graf 2 znázorňuje hodnoty naměřených parametrů v rozsahu celého sortimentu, ale na částech B. Pro snazší vyhodnocení a zároveň pro větší vypovídací schopnost byly hodnoty parametrů získaných na částech A i B zprůměrovány a z výsledných hodnot byl vytvořen graf 3.



Graf 1 – hodnoty parametrů pro část A (parametry „a“ až „g“ viz obr. 19)



Graf 2 – hodnoty parametrů pro část B (parametry „a“ až „g“ viz obr. 19)

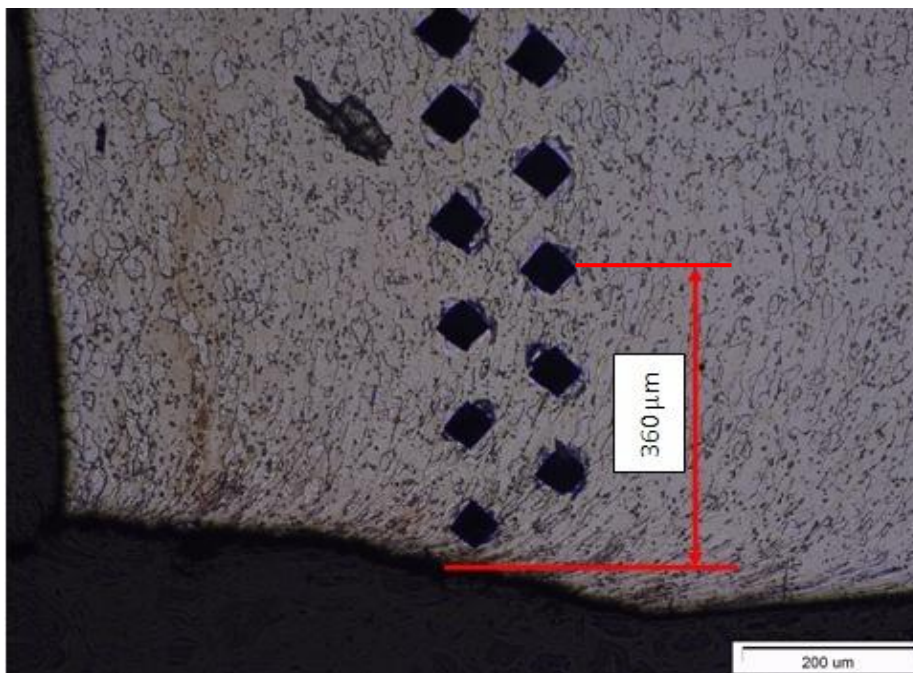


Graf 3 – průměrné hodnoty parametrů (parametry „a“ až „g“ viz obr. 19)

Z grafů 1 a 2 vyplývá, že vyhodnocením měřených parametrů samostatně pro jednotlivé části A a B nelze dosáhnout vypovídajících výsledků, na základě kterých by bylo možné kvalitu střižných ploch určit. Vyhodnocením průměrných hodnot měřených parametrů zaznamenaných v grafu 3 již kvalitu střižných ploch posoudit lze. Toto vyhodnocení lze uskutečnit za uvažování požadavku na co největší hodnotu parametru „c“ a zároveň minimálních hodnot ostatních měřených parametrů. Na základě zde zjištěných výsledků byl zvolen pro finální hodnocení kvality střižných ploch poměr parametrů „c/f“ viz kapitola 4.4.

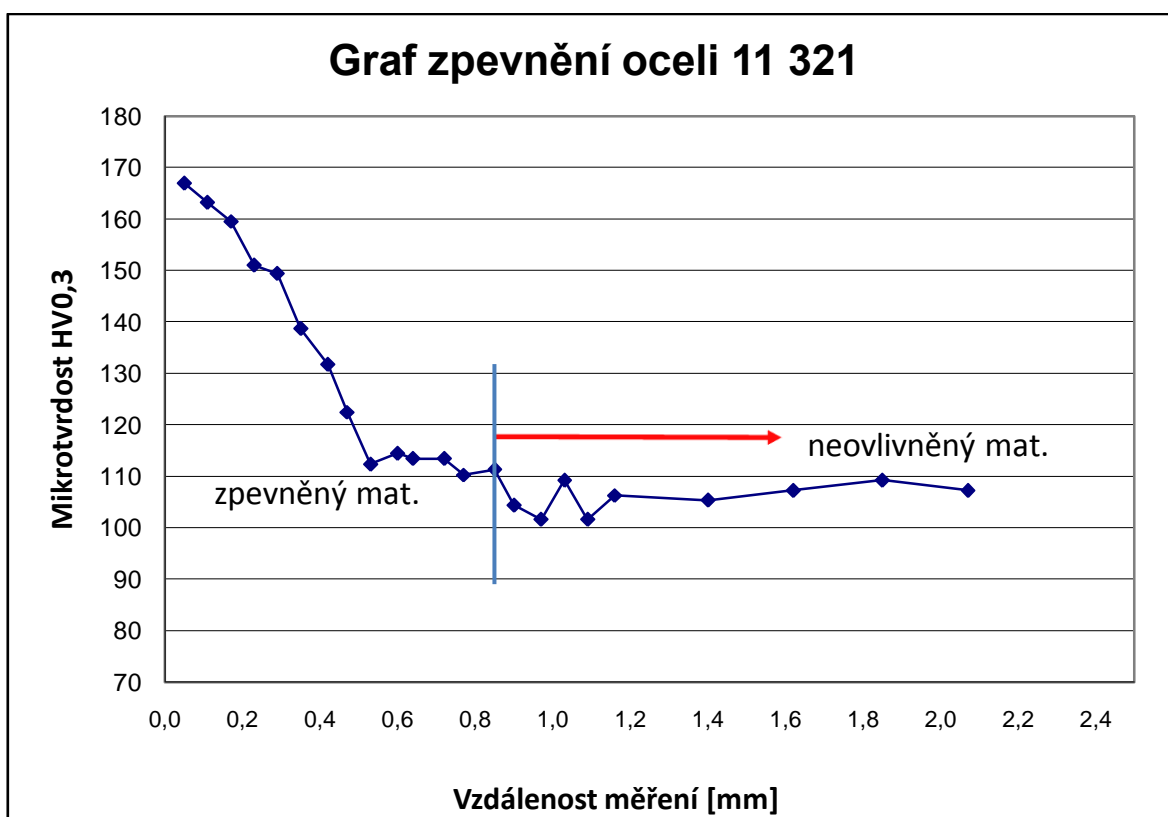
4.3 Měření hloubky zpevnění v okolí střižné plochy

U dvou vybraných materiálů bylo provedeno měření mikrotvrdosti v okolí střižné plochy. Účelem tohoto měření bylo stanovení dosahu zpevnění materiálu a jeho srovnání s dosahem metalograficky evidované deformační zóny. Na obrázku 20 je dokumentován postup měření mikrotvrdosti (ve dvojitě linii pro zjemnění kroku měření) a příslušnou kótou je naznačena maximální hloubka vnitřní deformační zóny (dosah plasticky deformovaných zrn). Pro měření mikrotvrdosti materiálů byl užit mikrotvrdoměr ZWICK / ROELL ZH HV 10.



Obrázek 20 – hloubka dosahu vnitřní deformační zóny

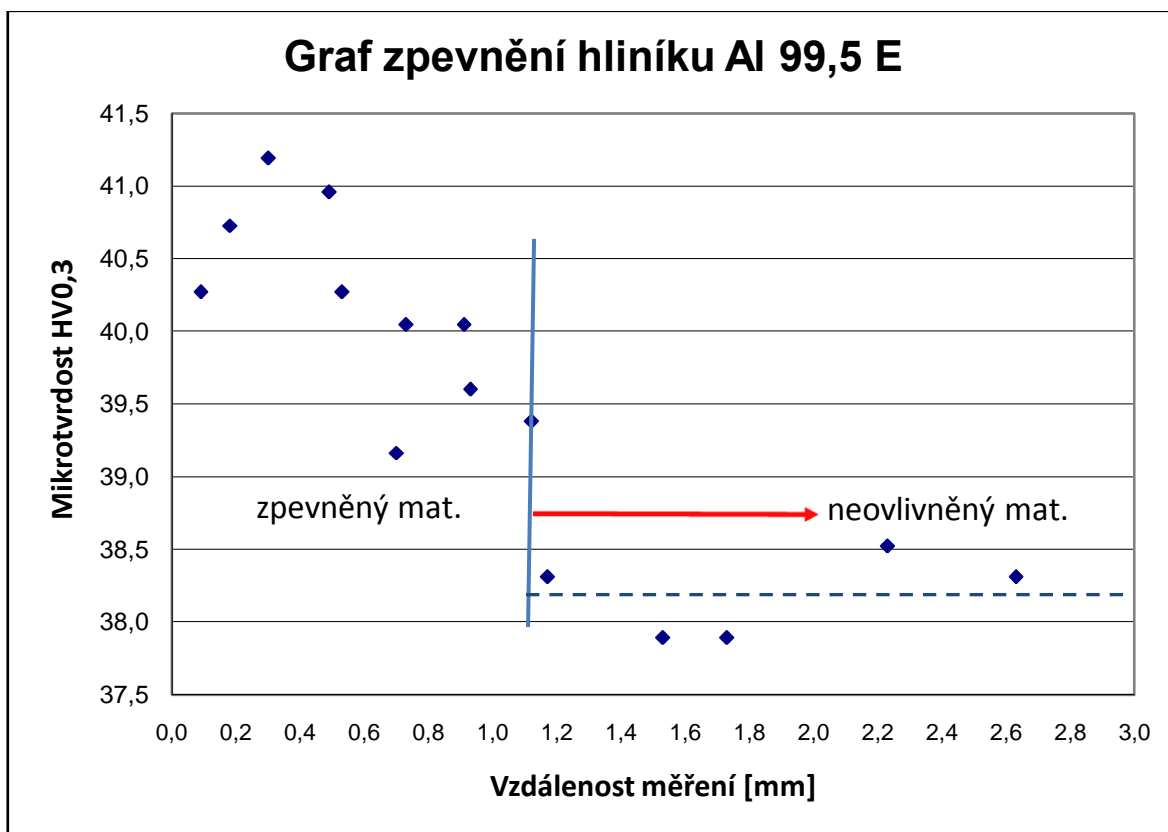
Zjištěné hodnoty mikrotvrdosti vzorku vyrobeného z oceli 11 321 jsou zaznamenány v grafu 4.



Graf 4 – mikrotvrdost oceli 11 321

Z výsledků naměřených hodnot vyplývá, že k největšímu deformačnímu zpevnění dochází v těsné blízkosti střižné plochy, kde u výše uvedeného materiálu došlo k nárůstu mikrotvrlosti téměř o 60 %. Zpevnění způsobené stříhem dosahuje přibližně až do vzdálenosti 0,85 mm od roviny střižné plochy, přičemž hloubka vnitřní deformační zóny v tomto konkrétním místě zasahuje pouze do vzdálenosti 0,36 mm. Rozdíl v naměřených vzdálenostech je zřejmě způsoben dislokačním zpevněním, které zasahuje do podstatně větší vzdálenosti od místa stříhu, než je dosah plasticky deformovaných zrn materiálu.

Hodnoty mikrotvrlosti vzorku vyrobeného z hliníku Al 99,5 E jsou zpracovány v grafu 5.



Graf 5 – mikrotvrdot hliníku Al 99,5 E

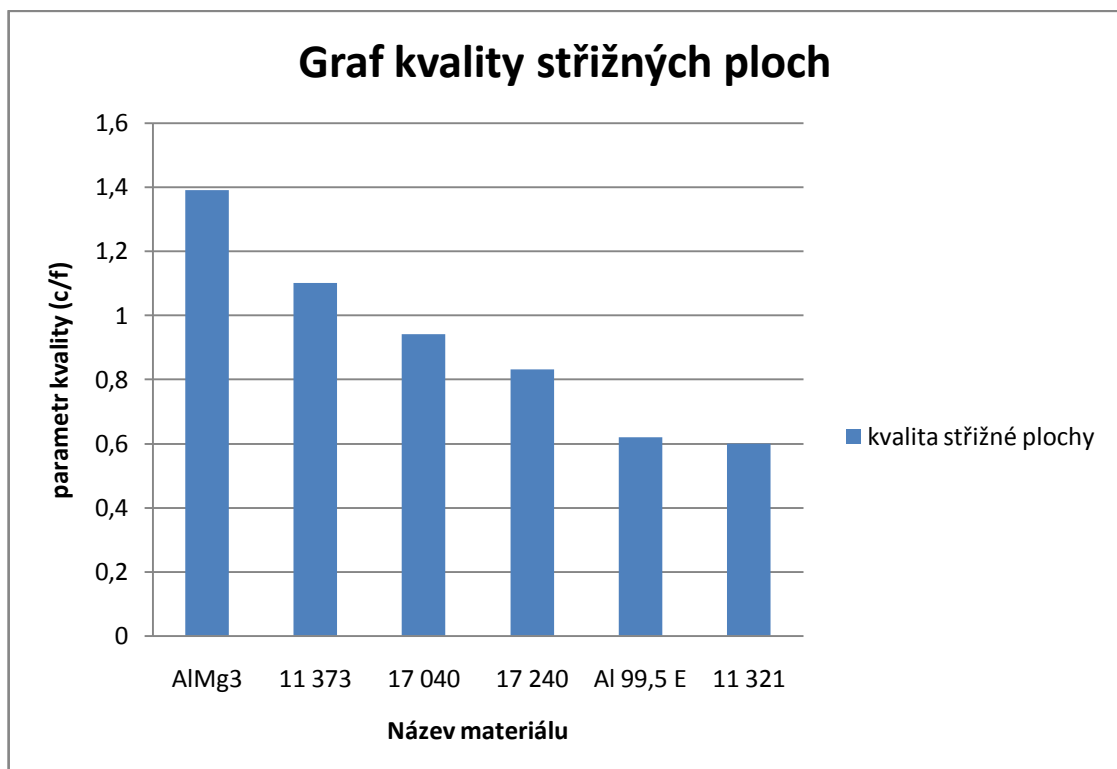
Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že v okolí střižné plochy tohoto materiálu taktéž dochází k nepatrnému zpevnění, ale toto přibližně 8 procentní zpevnění je ve srovnání s předchozím materiálem téměř zanedbatelné. Porovná-li se však dosah střižného zpevnění, které zasahuje až do vzdálenosti přibližně 1,12 mm, a hloubka vnitřní deformační zóny, jež má ve stejném místě dosah pouze 0,51 mm, dojde se ke stejnému zjištění jako v předchozím případě.

Na základě získaných výsledků je možno říci, že dosah zpevnění v okolí střižné plochy nelze srovnávat s parametrem hodnotícím hloubku vnitřní deformační zóny, ale v obou případech se dosah zpevnění velice úzce přibližuje parametru hodnotícímu hloubku vnější deformační zóny.

4.4 Vyhodnocení kvality střižných ploch pomocí navrženého parametru

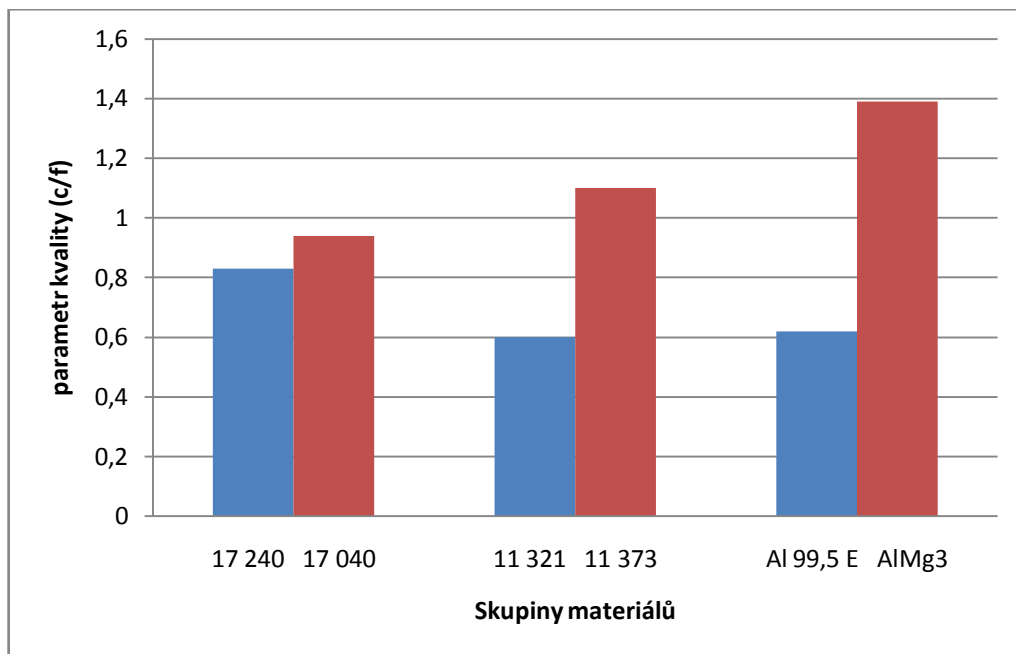
Z výše uvedeného souhrnného vyhodnocení naměřených údajů bylo zjištěno, že největší vypovídací schopnost o celkové kvalitě střižné plochy má podíl velikosti pásma lomu (**c**) a velikosti hloubky vnější deformační zóny (**f**), tj. parametr (**c/f**).

Čím větší je hodnota takto vypočteného výsledného parametru, tím kvalitnější střižnou plochu má vyšetřovaný materiál. Vzájemné porovnání kvality střižných ploch materiálů vyhodnocovaných v této práci je na základě hodnot parametru (**c/f**) znázorněno v grafu 6.



Graf 6 – srovnání kvality střižných ploch

Vliv pevnosti na navržený parametr kvality (c/f) v rámci jedné skupiny materiálů souhrnně dokumentuje graf 7. Jednoznačně se potvrdil pozitivní vliv vyšší pevnosti materiálu na kvalitu střížné plochy.



Graf 7 – porovnání kvality střížné plochy v jednotlivých skupinách materiálů

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo podrobnější studium kvality střížné plochy. V rámci provedených analýz byly na základě laboratorního hodnocení kvality střížné plochy hledány možnosti nalezení metodiky, podle níž by bylo možné i s použitím nejjednodušších měřících přístrojů s co největší přesností určit kvalitu střížné plochy plechových výstřížků. Jako experimentální materiál sloužily nastříhané vzorky plechu dvou rozdílných pevnostních variant hliníku, antikoročních ocelí a nelegovaných ocelí, na základě jejichž střížných ploch byly hledány parametry mající vypovídající schopnost o kvalitě střížné plochy.

Po provedení fraktografické a metalografické analýzy byl nalezen soubor parametrů, podle nichž je možné kvalitu střížné plochy vyhodnotit. Vzhledem k tomu, že vyhodnocovat celý soubor parametrů kvality stříhu by bylo pro běžného uživatele disponujícího pouze jednoduchými měřícími prostředky téměř nereálné a časově velmi náročné, byly z tohoto souboru vybrány pouze dva základní parametry, jimiž lze celý soubor nahradit, aniž by došlo ke zkreslení výsledků. Dále bylo zjištěno, že hodnoty vybraných parametrů, kterými jsou pásmo lomu a hloubka vnější deformační zóny, je možno poměrně přesně určit pomocí běžné lupy s měřítkem již zhruba při dvanáctinásobném zvětšení.

Hodnocení rozsahu zpevnění a hloubky pásma zpevněného materiálu lze na základě provedených analýz doporučit pouze pro některé konkrétní případy použití. Jedná-li se o funkční plochu, u které by zpevnění vyvolané stříháním mohlo způsobit její porušení, je zapotřebí toto zpevnění odstranit buď tepelným zpracováním (vyžiháním), anebo obrobením povrchové vrstvy u střížné plochy. Po provedení měření mikrotvrdoti v okolí střížné plochy bylo zjištěno, že dosah zpevnění u materiálů hodnocených v této bakalářské práci se pohybuje přibližně okolo jednoho milimetru od střížné plochy. Tato hodnota je v obou měřených případech značně větší než dosah vnitřní deformační zóny a v obou případech se velmi těsně přibližuje dosahu vnější deformační zóny.

K tomu, aby se podařilo s jistotou prokázat přímou souvislost mezi dosahem zpevnění a vnější deformační zónou, by muselo být vyrobeno a odměřeno mnohem více vzorků, což ale není možné uskutečnit v rozsahu této bakalářské práce. V případě prokázání souvislosti dosahu zpevnění s parametrem dosahu vnější deformační zóny by

bylo taktéž pro každého uživatele střížného nástroje velice jednoduché zjistit dosah zpevnění i bez mikrotvrdoměru a jiných nákladných zařízení.

Vzhledem k tomu, že u většiny střížných nástrojů pro zpracování plechu jsou nastavovány parametry stříhu pouze v závislosti na zadané tloušťce stříhaného plechu a vybrané skupině materiálů, do níž stříhaný materiál spadá, může dojít k výraznému kontrastu v kvalitě střížných ploch i v rozsahu jedné skupiny, jak je znázorněno v grafu 7. Pro hodnocení kvality střížné plochy každého stříhaného materiálu byl v této práci navržen parametr (c/f), který umožňuje snadno a rychle určit kvalitu střížné plochy.

Zvýšení kvality střížné plochy lze docílit průběžným hodnocením tohoto parametru pro každý stříhaný materiál a jeho evidencí do vhodně připravených tabulek. Se zvyšováním počtu odměřených výstřížků se vytvoří podmínky pro upřesnění závislosti mezi kvalitou střížné plochy a technologickými parametry stříhu pro konkrétní materiály.

Na základě porovnání kvality střížných ploch různých materiálů je možno říci, že pokud je požadována kvalitní střížná plocha, je zapotřebí při nastavování technologických parametrů stříhu (střížná mezera, náklon nože, rychlost stříhu) vycházet z mechanických vlastností konkrétního stříhaného materiálu (R_m , R_e), a nikoliv z údajů o skupině materiálů, do níž je stříhaný materiál zařazen. Tento požadavek vychází ze zjištění, že ve stejné skupině se nachází i materiály s velmi rozdílnými mechanickými vlastnostmi, a tím dochází k velkým rozdílům v kvalitě střížných ploch.

Seznam použité literatury

- [1] NOVOTNÝ, Josef; LANGER, Zdeněk. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 216 s.
- [2] ČADA, Radek. *Technologie I – Objemové a plošné tváření zastudena – (návody do cvičení)*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 2009. 86 s. ISBN 80-248-2126-9
- [3] DVOŘÁK, Milan; kolektiv. *Technologie II*. 3. vyd. Brno: CERM, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7
- [4] FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [5] BOBČÍK, Ladislav. *Střížné nástroje pro malosériovou výrobu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 213 s.
- [6] Technické normy ČSN 41 7240
- [7] Technické normy ČSN 41 7040
- [8] FREMUNT, Přemysl; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Konstrukční oceli*. 1. vyd. Brno: CERM, 1996. 267 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [9] FUERBACHER, Ivan; MACEK, Karel; STEIDL, Josef. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: Kovy, plasty, keramika, kompozity*. 1. vyd. Praha: Dashöfer Verlag, 2002. ISBN 80-86229-02-5.
- [10] MICHNA, Štefan; kolektiv. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s. r. o., 2005. 701 s. ISBN 80-89041-88-4
- [11] JANOVEC, Jiří; MACEK, Karel; ZUNA, Petr. *Fyzikální metalurgie*. Praha: ČVUT, 2004. 238 s. ISBN 80-01-02935-2.
- [12] PLUHAŘ, Jaroslav; PUŠKÁR, Anton; KOUTSKÝ, Jaroslav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 420 s. DT 669.017(075.8)

Seznam obrázků, tabulek a grafů

- Obrázek 11 – průběh stříhání s optimální střížnou vůlí [4]
- Obrázek 12 – vzhled střížné plochy [1]
- Obrázek 13 – šíření trhlin materiálem za různých střížných vůlí [2]
- Obrázek 14 – průběh střížné síly v závislosti na hloubce vniknutí [4]
- Obrázek 15 – snížení velikosti střížné síly v závislosti na zkosení střížných hran [5]
- Obrázek 16 – graf ke stanovení součinitele plnosti [4]
- Obrázek 17 – schéma volného stříhání [4]
- Obrázek 18 – schéma napjatosti a deformace při uzavřeném stříhání [4]
- Obrázek 19 - zpevňovací křivka monokrystalu kovu s mřížkou K 12 [11]
- Obrázek 20 - část zpevňovací křivky monokrystalu s mřížkou K 8 [11]
- Obrázek 11 – základní struktura austenitické korozivzdorné oceli
- Obrázek 12 – základní struktura feritické korozivzdorné oceli
- Obrázek 13 – základní struktura nelegované feritické oceli
- Obrázek 14 - základní struktura nelegované feriticko-perlitické oceli
- Obrázek 15 – základní struktura litého Al 99,5 E [10] 100x
- Obrázek 16 – základní struktura litého AlMg3 [10] 300x
- Obrázek 17 – ukázka odběru vzorků
- Obrázek 18 – vyhotovené preparáty
- Obrázek 19 – znázornění měřených parametrů (parametry viz tab. 11, 12 a 13)
- Obrázek 20 – hloubka dosahu vnitřní deformační zóny
-
- Tabulka 3 – přehled střížných vůlí základních materiálů [5]
- Tabulka 4 - zpevňovací charakteristiky vybraných materiálů [11]
- Tabulka 3 – chemické složení použitých antikoročních ocelí v % hmotnosti [8]
- Tabulka 4 – mechanické vlastnosti použitých antikoročních ocelí [6], [7]
- Tabulka 5 - chemické složení použitých nelegovaných ocelí v % hmotnosti [8]
- Tabulka 6 - mechanické vlastnosti použitých nelegovaných ocelí [9]

Tabulka 7 - chemické složení použitých hliníkových materiálů v % hmotnosti [8]

Tabulka 8 - mechanické vlastnosti použitých hliníkových materiálů [9]

Tabulka 9 – parametry stříhu

Tabulka 10 – použitá leptadla

Tabulka 11 – hodnoty měřených parametrů u korozivzdorných ocelí

Tabulka 12 – hodnoty měřených parametrů u nelegovaných feriticko-perlitických ocelí

Tabulka 13 – hodnoty měřených parametrů u hliníku

Graf 1 – hodnoty parametrů pro část A (parametry „a“ až „g“ viz obr. 17)

Graf 2 – hodnoty parametrů pro část B (parametry „a“ až „g“ viz obr. 17)

Graf 3 – průměrné hodnoty parametrů (parametry „a“ až „g“ viz obr. 17)

Graf 4 – mikrotvrdost oceli 11 321

Graf 5 – mikrotvrdost hliníku Al 99,5 E

Graf 6 – srovnání kvality střížných ploch

Graf 7 – porovnání kvality střížné plochy v jednotlivých skupinách materiálů