



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ing. Pavel Stoklásek

**Vliv technologie dělení materiálů
na jejich povrchové vlastnosti**

**Influence of the material cutting technology
on their surface properties**

Disertační práce

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

Konzultanti: Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ing. Aleš Mizera, Ph.D.

Zlín: 2019

Motto:

„Pokud máte odvahu začít, máte odvahu uspět.“

Ralph Smart

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval mým školitelům – doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. a doc. Ing. Miroslavovi Maňasovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a obětavý přístup při řešení této disertační práce.

Rovněž bych rád poděkoval oběma konzultantům – Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D. a Ing. Aleši Mizerovi Ph.D. za užitečné připomínky k řešené problematice.

Rád bych také poděkoval Ing. Martinu Kraváčkovi a Lence Kynčlové ze společnosti Kovárna VIVA, a.s. za pomoc a cenné rady při vyhodnocování vnitřní struktury kovových materiálů.

Upřímné poděkování také patří celé mé rodině za trvalou morální i materiální podporu, kterou mi poskytovala během celého studia.

ABSTRAKT

Dělení materiálů představují technologie, které v poslední době zaznamenaly velký rozmach. Bylo to zejména v důsledku rostoucích nároků na přesnost operací a efektivitu celého procesu dělení. Mechanické způsoby dělení, třískové i beztřískové, jsou známé dlouhou dobu. Tyto způsoby však mají své limity, ve většině případů umožňují jen přímé řezy. Nové technologie, označované jako technologie nekonvenční, zahrnující např. dělení pomocí laseru, plazmy nebo vodního paprsku, umožňují realizovat řezy složitých tvarů, velkou rychlostí a s poměrně vysokou přesností. V mnoha případech, zejména u plošných materiálů menších tloušťek, nevyžadují vytvořené díly žádnou další úpravu dodatečným obráběním. Kromě řezání 2D složitých tvarů, umožňují nové metody i velmi komplikované řezy 3D charakteru. S ohledem na rychlost řezu představují tyto metody významný kvalitativní i kvantitativní pokrok.

K posouzení vhodnosti použití konvenčních metod pro různé aplikace je nutná znalost doprovodných jevů zahrnujících zejména ovlivnění vlastností řezaného materiálu v okolí řezu a jakost řezných ploch. Studium uvedených jevů je jedním ze stěžejních cílů zpracování dizertační práce.

Klíčové slova: nanotvrдость, instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, mechanické vlastnosti, drsnost, řezání laserem, řezání vodním paprskem, řezání plazmou, elektroerozivní drátové řezání

ABSTRACT

Material splitting is a technology that has recently been booming. This was mainly due to the growing demands on the accuracy of operations and the efficiency of the entire division process. Mechanical methods of cutting, both chip and non-chip, are known for a long time. However, these methods have their limits – in most cases they only allow straight cuts. New technologies, referred to as unconventional technologies, including laser, plasma, or water jet cutting, make it possible to realize slices of complex shapes, at high speeds and with relatively high precision. In many cases, especially in the case of thinner materials, the produced parts do not require any further machining. In addition to 2D cutting intricate shapes, new methods allow even very complex 3D character cuts. With regard to cutting speed, these methods represent significant qualitative and quantitative advances.

In order to assess the suitability of using unconventional methods for different applications, it is necessary to know the accompanying phenomena, including in particular the influence of material properties near the cutting line and the quality of the cutting surfaces. The study of these phenomena is one of the main goals of the dissertation work.

Keywords: nanohardness, depth sensing indentation, mechanical properties, roughness, laser cutting, water jet cutting, plasma cutting, electrical discharge machining

OBSAH PRÁCE

SEZNAM ILUSTRACÍ	8
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	13
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
1.1 DĚLENÍ MATERIÁLU	15
1.1.1 Nekonvenční způsoby dělení materiálu.....	15
1.1.1.1 Řezání materiálu laserem	17
1.1.1.2 Řezání materiálu plazmou	19
1.1.1.3 Řezání materiálu vodním paprskem	20
1.1.1.4 Elektroerozivní drátové řezání	23
1.2 TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST	26
1.3 METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI	27
1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	27
1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	28
1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	29
1.4 KONTAKTNÍ MECHANIKA	30
1.4.1 Mechanický kontakt.....	30
1.4.2 Elastický kontakt	31
1.4.3 Elasticko-plastický kontakt.....	36
1.4.4 Plastický kontakt.....	39
1.5 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI	40
1.5.1 Indentory používané při instrumentovaných zkouškách tvrdosti	42
1.5.1.1 Sférický indenter	43
1.5.1.2 Vickersův indenter	45
1.5.1.3 Berkovichův indenter	45
1.5.1.4 Krychlový (cube-corner) indenter	46
1.5.1.5 Knoopův indenter	47
1.5.2 Faktory ovlivňující přesnost měření	48
1.5.2.1 Určení nulové polohy povrchu vzorku	48
1.5.2.2 Geometrie indentoru	49
1.5.2.3 Pile-up a Sink-in efekt	49
1.5.2.4 Drsnost měřeného povrchu	50
1.5.2.5 Vliv nakloněné roviny indentace	51
1.6 MĚŘENÍ DRSNOSTI	52
2 CÍL PRÁCE.....	55
3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	56

3.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	56
3.1.1	Výběr vhodných typů ocelí.....	56
3.1.2	Stanovení geometrie zkušebního tělesa.....	57
3.1.3	Volba metod dělení materiálů.....	58
3.1.4	Výroba zkušebních těles	59
3.1.4.1	Řezání laserem	59
3.1.4.2	Řezání plazmou	59
3.1.4.3	Řezání vodním paprsek s abrazivem	60
3.1.4.4	Elektroerozivní drátové řezání	60
3.1.5	Příprava metalografických vzorků a výbrusů.....	61
3.2	MĚŘENÍ DEFINOVANÝCH VLASTNOSTÍ.....	62
3.2.1	Měření tvrdosti TOO	62
3.2.2	Optická analýza struktury TOO a základního materiálu	66
3.2.3	Měření drsnosti řezných ploch	66
4	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	67
4.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI A PREDIKCE ROZMĚRŮ TOO.....	68
4.1.1	Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)	69
4.1.1.1	Řezání laserem	69
4.1.1.2	Řezání plazmou	70
4.1.1.3	Elektroerozivní drátové řezání	71
4.1.1.4	Řezání vodním paprskem	72
4.1.2	Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)	73
4.1.2.1	Řezání laserem	73
4.1.2.2	Řezání plazmou	74
4.1.2.3	Elektroerozivní drátové řezání	75
4.1.2.4	Řezání vodním paprskem	76
4.1.3	Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)	77
4.1.3.1	Řezání laserem	77
4.1.3.2	Řezání plazmou	78
4.1.3.3	Elektroerozivní drátové řezání	79
4.1.3.4	Řezání vodním paprskem	80
4.2	OPTICKÁ ANALÝZA STRUKTURY TOO A ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU ...	83
4.2.1	Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)	83
4.2.1.1	Určení velikosti TOO při řezání laserem	84
4.2.1.2	Určení velikosti TOO při řezání plazmou	85
4.2.1.3	Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání	86
4.2.2	Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)	87
4.2.2.1	Určení velikosti TOO při řezání laserem	88
4.2.2.2	Určení velikosti TOO při řezání plazmou	89
4.2.2.3	Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání	90
4.2.3	Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)	91
4.2.3.1	Určení velikosti TOO při řezání laserem	92

4.2.3.2	Určení velikosti TOO při řezání plazmou	93
4.2.3.3	Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání	94
4.3	VYHODNOCENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH PLOCH.....	95
4.3.1	Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)	96
4.3.1.1	Řezání laserem	96
4.3.1.2	Řezání plazmou	97
4.3.1.3	Elektroerozivní drátové řezání	98
4.3.1.4	Řezání vodním paprskem	99
4.3.2	Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)	100
4.3.2.1	Řezání laserem	100
4.3.2.2	Řezání plazmou	101
4.3.2.3	Elektroerozivní drátové řezání	102
4.3.2.4	Řezání vodním paprskem	103
4.3.3	Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)	104
4.3.3.1	Řezání laserem	104
4.3.3.2	Řezání plazmou	105
4.3.3.3	Elektroerozivní drátové řezání	106
4.3.3.4	Řezání vodním paprskem	107
5	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	108
6	ZÁVĚR.....	109
	LITERATURA	111
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	116
	CV AUTORA.....	120

SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění</i>	16
<i>Obr. 2 Princip řezání laserem</i>	17
<i>Obr. 3 Princip řezání plazmou.....</i>	19
<i>Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem</i>	21
<i>Obr. 5 Princip elektroerozivního drátového řezání.....</i>	24
<i>Obr. 6 Princip zkoušky podle Brinella.....</i>	27
<i>Obr. 7 Princip zkoušky podle Rockwella</i>	29
<i>Obr. 8 Princip zkoušky podle Vickerse</i>	29
<i>Obr. 9 Zatěžovací křivka při indentaci sférickým indentorem</i>	30
<i>Obr. 10 Charakteristické tvary indentačních křivek různých druhů materiálů.....</i>	31
<i>Obr. 11 Elastický kontakt sférického indentoru s rovinným povrchem</i>	32
<i>Obr. 12 Elastický kontakt kuželového indentoru s rovinným povrchem.....</i>	34
<i>Obr. 13 Elasticko-plastický kontakt sférického indentoru.....</i>	36
<i>Obr. 14 Znárodnění velikosti plastické zóny pod vtiskem při dosažení meze kluzu</i>	37
<i>Obr. 15 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast I elasticko-plastické deformace.....</i>	37
<i>Obr. 16 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast II elasticko-plastické deformace.....</i>	38
<i>Obr. 17 Vizualizace elasticko-plastického kontaktu ve slitině mědi při zátěži ≈ 7500 N.....</i>	38
<i>Obr. 18 Rozložení středního kontaktního tlaku pod sférickým indentorem....</i>	39
<i>Obr. 19 Jedno z prvních zařízení pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti</i>	40
<i>Obr. 20 Indentační křivka pro elasticko-plastické zatěžování a elastické odlehčení.....</i>	41
<i>Obr. 21 Geometrie indentorů se zobrazeným průmětem kontaktní plochy</i>	42
<i>Obr. 22 Závislost zatěžovací síly na průměru vtisku vytvořeného sférickým indentorem v logaritmických souřadnicích</i>	44
<i>Obr. 23 Hrot Berkovichova indentoru</i>	46
<i>Obr. 24 Ukázka vtisku vytvořeného Knoopovým indentorem.....</i>	47
<i>Obr. 25 Ukázka vtisků po indentační zkoušce tvrdosti</i>	48
<i>Obr. 26 Pile-up a sink-in efekt v materiálu při použití Berkovichova indentoru</i>	49
<i>Obr. 27 Vliv drsnosti povrchu na rozložení kontaktního tlaku pod indentorem</i>	50
<i>Obr. 28 Vliv nakloněné indentační roviny na geometrii výsledného vtisku ...</i>	51
<i>Obr. 29 Princip získání profilu pro měření drsnosti</i>	52
<i>Obr. 30 Základní a vyhodnocovací délka drsnosti</i>	53
<i>Obr. 31 Parametry profilu drsnosti povrchu R_p, R_v, R_z a R_a.....</i>	53
<i>Obr. 32 Rozměr zkušební tělesa.....</i>	58

<i>Obr. 33 Schéma vnitřní struktury zkušebního tělesa s TOO a základním materiálem</i>	61
<i>Obr. 34 Nanotvrdoměr TTX-NHT2</i>	62
<i>Obr. 35 Definice minimální vzdálenosti dvou sousedních vtisků</i>	63
<i>Obr. 36 Schéma měření indentační tvrdosti</i>	64
<i>Obr. 37 Konstrukční řešení vyhledávání povrchu vzorku při měření DSI</i>	64
<i>Obr. 38: Znárodnění podbroušené plochy</i>	65
<i>Obr. 39 Ukázka maticového měření a detail indentu</i>	65
<i>Obr. 40 Konfokální mikroskop Keyence Laser Microscope</i>	66
<i>Obr. 41 Vliv tloušťky zkušebního tělesa na vlastnosti TOO – ocel 1.0533</i>	68
<i>Obr. 42 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.0553</i>	69
<i>Obr. 43 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení laserem</i>	69
<i>Obr. 44 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.0553</i>	70
<i>Obr. 45 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení plazmou</i>	70
<i>Obr. 46 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.0553</i>	71
<i>Obr. 47 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po elektroerozivním drátovém řezání</i>	71
<i>Obr. 48 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.0553</i>	72
<i>Obr. 49 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení vodním paprskem</i>	72
<i>Obr. 50 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.7102</i>	73
<i>Obr. 51 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení laserem</i>	73
<i>Obr. 52 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.7102</i>	74
<i>Obr. 53 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení plazmou</i>	74
<i>Obr. 54 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102</i>	75
<i>Obr. 55 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po elektroerozivním drátovém řezání</i>	75
<i>Obr. 56 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.7102</i>	76
<i>Obr. 57 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení vodním paprskem</i>	76
<i>Obr. 58 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.4301</i>	77
<i>Obr. 59 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení laserem</i>	77
<i>Obr. 60 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.4301</i>	78
<i>Obr. 61 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení plazmou</i>	78
<i>Obr. 62 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.4301</i>	79
<i>Obr. 63 Struktura oceli 1.4301 v místě po elektroerozivním drátovém řezání</i>	79
<i>Obr. 64 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.4301</i>	80
<i>Obr. 65 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení vodním paprskem</i>	80
<i>Obr. 66 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.0553</i>	81
<i>Obr. 67 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.7102</i>	82
<i>Obr. 68 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.4301</i>	82

<i>Obr. 69 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.0553</i>	83
<i>Obr. 70 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.0553</i>	84
<i>Obr. 71 Měření rozměrů TOO při řezání plazmou – ocel 1.0553</i>	85
<i>Obr. 72 Měření rozměrů TOO při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.0553</i>	86
<i>Obr. 73 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.7102</i>	87
<i>Obr. 74 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.7102</i>	88
<i>Obr. 75 Měření rozměrů TOO při řezání plazmou – ocel 1.7102</i>	89
<i>Obr. 76 Měření rozměrů TOO při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102</i>	90
<i>Obr. 77 Austenitická struktura základního materiálu 1.4301</i>	91
<i>Obr. 78 Měření velikosti TOO při řezání laserem – ocel 1.4301</i>	92
<i>Obr. 79 Měření velikosti TOO při řezání plazmou – ocel 1.4301</i>	93
<i>Obr. 80 Měření velikosti TOO při elektroer. drátovém řezání – ocel 1.4301</i>	94
<i>Obr. 81 Schéma měření drsnosti na zkušebním tělese</i>	95
<i>Obr. 82 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez laserem</i>	96
<i>Obr. 83 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez laserem</i>	96
<i>Obr. 84 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	97
<i>Obr. 85 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	97
<i>Obr. 86 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	98
<i>Obr. 87 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	98
<i>Obr. 88 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez vodním paprskem</i>	99
<i>Obr. 89 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez vodním paprskem</i>	99
<i>Obr. 90 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez laserem</i>	100
<i>Obr. 91 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez laserem</i>	100
<i>Obr. 92 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	101
<i>Obr. 93 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	101
<i>Obr. 94 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	102
<i>Obr. 95 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	102
<i>Obr. 96 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez vodním paprskem</i>	103
<i>Obr. 97 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez vodním paprskem</i>	103
<i>Obr. 98 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez laserem</i>	104
<i>Obr. 99 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez laserem</i>	104
<i>Obr. 100 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	105

<i>Obr. 101 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez plazmou</i>	105
<i>Obr. 102 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	106
<i>Obr. 103 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání</i>	106
<i>Obr. 104 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez vodním papřskem</i>	107
<i>Obr. 105 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez vodním papřskem</i>	107

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání geometrie indentorů.....	43
Tab. 2 Chemické složení oceli 1.0553	56
Tab. 3 Chemické složení oceli 1.7102	57
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301	57
Tab. 5 Procesní parametry při řezání laserem.....	59
Tab. 6 Procesní parametry při řezání plazmou	60
Tab. 7 Procesní parametry při řezání vodním paprskem s abrazivem.....	60
Tab. 8 Procesní parametry při elektroerozivním drátovém řezání	60
Tab. 9 Rozměry TOO při řezání oceli 1.0553 laserem.....	84
Tab. 10 Rozměry TOO při řezání oceli 1.0553 plazmou.....	85
Tab. 11 Rozměry TOO při dělení oceli 1.0553 elektroerozivním drátovým řezáním.....	86
Tab. 9 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 laserem.....	88
Tab. 10 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 plazmou.....	89
Tab. 11 Rozměry TOO při dělení oceli 1.7102 elektroerozivním drátovým řezáním.....	90
Tab. 12 Rozměry TOO při řezání oceli 1.4301 laserem.....	92
Tab. 13 Rozměry TOO při řezání oceli 1.4301 plazmou.....	93
Tab. 14 Rozměry TOO při dělení oceli 1.4301 elektroerozivním drátovým řezáním.....	94

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

a	zatěžovací stupeň (Brinell)
ADO	Adjust Depth Offset
AWJ	Abrasive Water Jet
C	materiálový a geometrický koeficient indentoru
CNC	Computer Numerical Control (počítačově řízený)
d_1, d_2	průměr vtisku (Brinell) délka uhlopříčky (Vickers)
d_s	střední průměr vtisku (Brinell) střední úhlopříčka (Vickers)
D_{pr}	průměr průmětné kružnice (sférický indentoru)
DSI	Depth Sensing Indentation
E	modul pružnosti
E_{ind}	modul pružnosti indentoru
E_{mat}	modul pružnosti zkušebního tělesa
E_{red}	redukovaný modul pružnosti
F	zátěžná síla indentoru
F0	předběžné zatížení při Rockwellově zkoušce
F1	přídavné zatížení při Rockwellově zkoušce
F_{max}	maximální zatěžovací síly indentoru
h_a	výška od plochy zkušebního tělesa k místu kontaktu
h_e	elastická hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{ep}	přechodová hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{rez}	zbytková hloubka vtisku (elasticko-plastický kontakt)
h_{kont}	výška místa kontaktu
h_{max}	maximální hloubka vtisku
h_p	aktuální hloubka vtisku (výpočet průmětné plochy)
H	číslo tvrdosti
HB	Brinellova tvrdost
HR	Rockwellova tvrdost
HV	Vickersova tvrdost

k	Konstanta úměrnosti
KHN	Knoopovo číslo tvrdosti
ln	vyhodnocovací délka drsnosti
lr	základní délka drsnosti
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
n	Meyerův index
p_{sk}	střední kontaktní tlak
R	relativní poloměr
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_{ind}	poloměr indentoru
R_p	největší výška výstupků profilu drsnosti
R_v	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_z	Největší výška profilu drsnosti
r_{kont}	kontaktní poloměr
R_e	smluvní mez kluzu materiálu
S_{pr}	průměrná plocha vtisku indentoru
S_{skut}	skutečná plocha vtisku indentoru
SW	software
TOO	tepelně ovlivněná oblast
WJM	Water Jet Machining
Z_p	výšky nejvyššího výstupku profilu
Z_v	hloubky nejnižší prohlubně profilu
α	vrcholový polo-úhel kuželového indentoru
ε	poměrné délkové prodloužení
σ	mechanické napětí
μ	Poissonovo číslo
μ_{ind}	Poissonovo číslo indentoru
μ_{mat}	Poissonovo číslo zkušebního tělesa
χ	koefficient zpevnění kovu
θ	vrcholový polo-úhel pyramidálního indentoru

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dělení materiálů představují technologie, které v poslední době zaznamenaly velký rozmach. Bylo to zejména v důsledku rostoucích nároků na přesnost operací a efektivitu celého procesu dělení. Mechanické způsoby dělení, třískové i beztřískové, jsou známé dlouhou dobu. Tyto způsoby však mají své limity, ve většině případů umožňují jen přímé řezy. Nové technologie, označované jako technologie nekonvenční, zahrnující např. dělení pomocí laseru, plazmy nebo vodního paprsku, umožňují realizovat řezy složitých tvarů, velkou rychlostí a s poměrně vysokou přesností. V mnoha případech, zejména u plošných materiálů menších tloušťek, nevyžadují vytvořené díly žádnou další úpravu dodatečným obráběním. Kromě řezání 2D složitých tvarů, umožňují nové metody i velmi komplikované řezy 3D charakteru. S ohledem na rychlost řezu představují tyto metody významný kvalitativní i kvantitativní pokrok.

K posouzení vhodnosti použití konvenčních metod pro různé aplikace je nutná znalost doprovodných jevů zahrnujících zejména ovlivnění vlastností řezaného materiálu v okolí řezu a jakost rezných ploch. Studium uvedených jevů je jedním ze stěžejních cílů dizertační práce.

1.1 Dělení materiálu

Dělení materiálů, zejména plošných útvarů jako plechy či desky, je v průmyslové praxi častým případem zahrnutým již do operací přípravy materiálu. S ohledem na značný rozsah zastoupení těchto operací ve výrobních procesech rostou tlaky na snižování nákladů, zvyšování produktivity při dodržení požadované přesnosti a kvality zhotovovaných polotovarů či přímo hotových výrobků.

Klasické metody dělení, založené na třískových (řezání) či beztřískových (stříhání) metodách jsou velmi dobře známé a popsány. Tyto metody se v průmyslové praxi označují jako konvenční. Aplikovatelnost těchto metod je však omezena pouze na přímé řezy, což v mnoha případech, zejména u tvarově složitých dílů, vylučuje jejich použitelnost. Některé materiály s horší obrobiteľností těmito metodami nelze dělit vůbec. Zmíněné limitující faktory vedly k vývoji nekonvenčních metod obrábění využívaných i v procesu dělení materiálů. [1][2][3]

V této práci budou podrobněji rozebrány pouze nekonvenční metody dělení materiálu. Cíle práce jsou totiž orientovány na zkoumání vlivu těchto metod, především pak metod využívajících tepelných principů.

1.1.1 Nekonvenční způsoby dělení materiálu

Nekonvenční metody dělení materiálu využívají k odstranění materiálu z místa řezu, na rozdíl od konvenčních metod, fyzikálních, chemických nebo mechanických dějů či jejich kombinovaných účinků. Patří sem např. řezání laserem, plazmou nebo vodním paprskem či elektroerozivní drátové řezání.

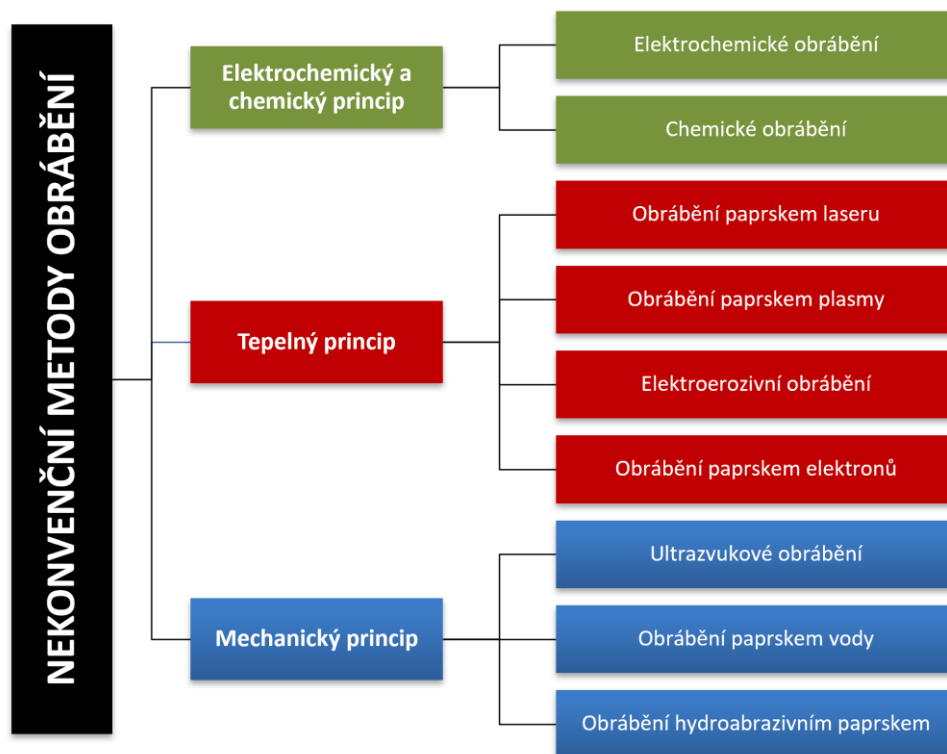
I přes řadu nevýhod je doposud velmi často používáno i dělení materiálu kyslíkem, zejména u plechů a desek větších tloušťek. Ačkoliv má tato metoda na řezaný materiál pravděpodobně největší tepelný účinek ze všech výše uvedených, není řezání kyslíkem řazeno mezi nekonvenční metody dělení materiálu a jeho vliv na místo řezu nebude v práci dále rozebírán. [4][5][5]

Obrovskou výhodou nekonvenčních metod je velká flexibilita a možnost plné automatizace těchto procesů. Užití nekonvenčních technologií umožňuje výrobu tvarově složitých 2D i 3D dílů. Rychlost a výkonnost těchto technologií často nezávisí na mechanických vlastnostech děleného materiálu, lze obrábět materiály s velkou pevností či tvrdostí. Tyto technologie jsou dnes široce využívány v celé řadě aplikací a nacházejí v průmyslové praxi stále větší uplatnění. [1][2]

Z hlediska dělení materiálu mají největší význam metody využívající tepelné a mechanické principy. Výběr technologie dělení kovových materiálů závisí na jejich druhu a použitých procesních podmínkách, které lze optimalizovat buď dle zkušeností obsluhy, nebo pomocí speciálních výpočetních programů, které dokáží velice přesně vyhodnotit vhodnost materiálů pro danou technologii včetně optimálních podmínek řezání. [6][7]

S ohledem na charakter procesu, zejména v případě použití vysoce výkonných tepelných zdrojů (laser, plazma), je nutné zejména kvůli následujícím pracovním operacím zohlednit doprovodné jevy, které mohou ovlivňovat vlastnosti děleného materiálu zejména v okolí místa řezu. [2][7][8]

Rozdělení nekonvenčních metod podle principu je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]

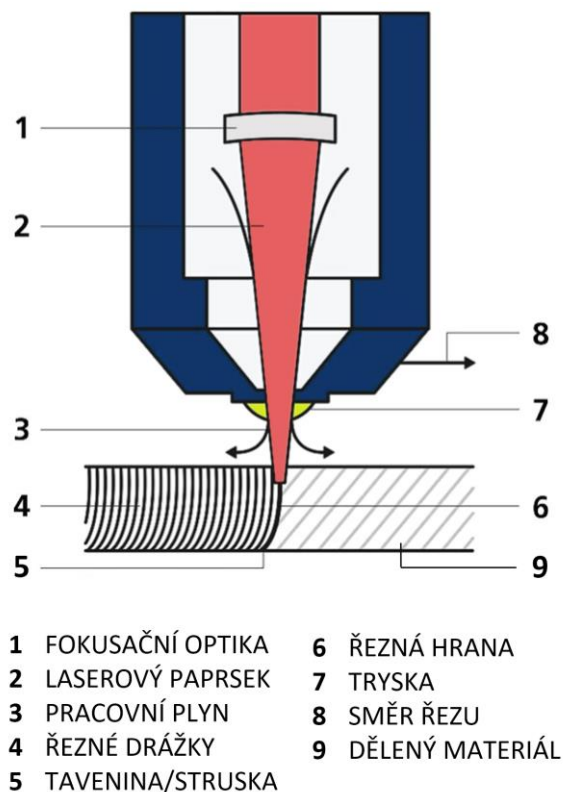
1.1.1.1 Řezání materiálu laserem

Slovo LASER je akronym vycházející z anglického označení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Za laser je obecně pokládán světelný zdroj, který generuje světlo pouze s jednou vlnovou délkou. [2][9][10]

Laser je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie pro excitaci aktivního prostředí. Zdrojem energie je do aktivního prostředí dodávána energie, která energeticky vybudí elektrony aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny. Do vyšších energetických stavů je postupně vybudena většina elektronů aktivního prostředí, čímž dochází k tzv. inverzi populace. Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k emisi množství energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž vyvolají tzv. stimulovanou emisi fotonů. [9][10]

Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například soustavou zrcadel, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu aktivním prostředím. Tím je dále podporována stimulovaná emise a dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný světelný svazek pak opouští rezonátor průchodem skrze výstupní polopropustné zrcadlo. [9][10]

Řezání laserem je termická metoda dělení materiálu, při které laserový paprsek slouží jako dělicí nástroj. Princip této metody je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2 Princip řezání laserem [10]

Princip řezání laserem spočívá v přívodu vysoce koncentrované energie laserového svazku do místa řezu. Světelný svazek opouštějící rezonátor je následně zaostřen soustavou čoček do ohniska, ve kterém je dosahovaná hustota energie více než $10^7 - 10^8 \text{ W.cm}^{-2}$. [9][10]

Přestože bylo první zařízení využívající laser k dělení materiálu zkonstruováno již v první polovině 60. let 20. století, v běžné strojírenské praxi se tato technologie uplatňuje až s masivnějším nástupem CO_2 laserů v 70 a 80. letech. V současnosti je tato technologie hojně využívána pro výrobu širokého spektra produktů především z plechu. Mezi výhody této technologie patří výroba tvarově složitých dílů, vysoká rozměrová přesnost, kusová výroba či velká využitelnost materiálu. [2][8][11][12][13]

Dnešní lasery jsou schopny pracovat s velkou přesností jak při řezání polovodičových čipů s šířkou řezu několik mikrometrů, tak při dělení ocelových plechů o tloušťce až 30 mm. Při řezání laserem není podstatná tvrdost materiálu, ale jeho tepelné a optické vlastnosti. Použitím povlaků lze dosáhnout lepších absorpčních schopností obráběného materiálu. Na absorpční schopnosti materiálu má také vliv kvalita a jakost povrchu. Povrchy s vyšší drsností absorbují energii rychleji než povrchy s nízkou drsností. [7][14][16][17]

Laserové řezání je fyzikálně poměrně komplikovaný proces, jehož složitost stoupá se zvyšující se tloušťkou řezaného materiálu, protože roste nepřesnost řezání, zvětšuje se šířka řezné štěrbiny, velikost tepelně ovlivněné oblasti a rovněž jakost řezné plochy. Pro každý materiál je nutné nastavit optimální řezné parametry. Od určité tloušťky již není možné nastavit vhodnou kombinaci řezných parametrů vedoucí k uspokojivé kvalitě řezu. [18][19][20][21][22]

Řezání laserem je relativně tichá technologie, která neprodukuje téměř žádný odpad. Ze stroje je ovšem nutné zajistit odvod vznikajících kouřových zplodin. Jakmile laserový paprsek dopadne na povrch plechu, ohřeje materiál natolik, že se materiál v místě řezu začne tavit nebo přímo vypařovat. Proces řezání je zahájen, jakmile laserový paprsek propálí celou tloušťku plechu a začne se plynule pohybovat podél obrysů řezané součásti. [22][23][24][25][26]

Při řezném procesu však nestačí materiál laserem pouze roztavit. Roztavený kov totiž drží v řezné spáře kapilární silou a je nutné jej odstranit proudem plynu. Podle použitého plynu se laserové řezání dělí na tavné a oxidační. U nekovových materiálů je využíváno rovněž sublimační řezání, kdy dělený materiál v místě řezu přímo sublimuje. I zde je však nutné použít procesní plyn kvůli vyfouknutí sublimačních produktů a ochraně optiky. Výsledný řez mívá charakteristické vroubkování. [27][28][29][30]

I přesto, že řezání laserem je velmi rychlý proces, může u některých aplikací nastat problém se vznikem tepelně ovlivněné oblasti v důsledku změny mikrostruktury řezaného kovu v okolí místa řezu. Tato oblast zasahuje do malých

hloubek pod řeznou plochou (řádově jednotky desetin mm) a velmi často má vyšší tvrdost než řezaný materiál. Laserové řezání se vyznačuje čistým řezem – nedochází k jeho znečištění vlivem žádných dalších látek, takže vyvolané změny v materiálu jsou čistě strukturní. [31][28][32][33][34]

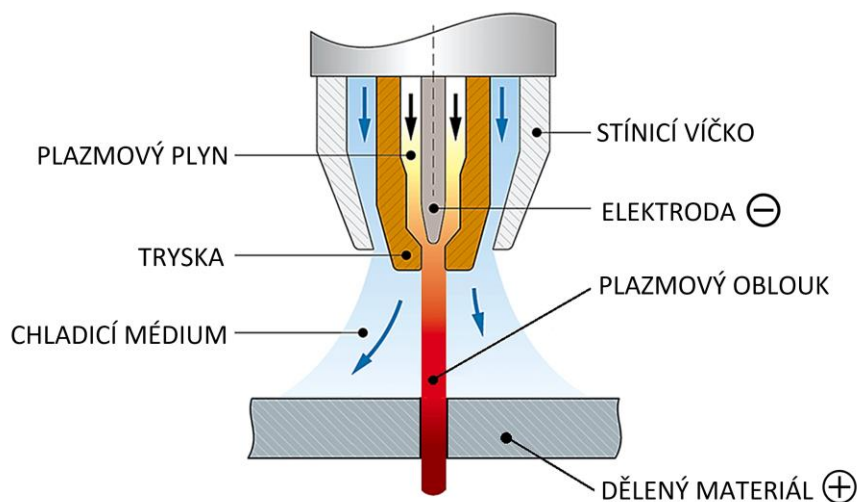
Nejčastější konstrukční provedení strojů pro laserové dělení využívá tzv. létající optiky. Řezaný plech je nehybně ustaven v pracovním prostoru stroje či podpěrách a nad ním se na portálové konstrukci pohybuje řezná hlava. Další konstrukce využívají i jiná konstrukční řešení – např. otočné stoly nebo laserovou hlavu v robotickém rameni pro 3D řezání. [2][14][19]

1.1.1.2 Řezání materiálu plazmou

Fyzikální pojem plazma zavedl v roce 1932 americký fyzik a chemik Irving Langmuir pro speciální stav plynů, který je často označován jako čtvrtý stav hmoty. Obecně lze plazmatického stavu dosáhnout několika způsoby – zvýšením teploty, zvýšením tlaku nebo elektrickým výbojem. V technické praxi je k dosažení plazmatického stavu využíváno elektrických výbojů. [35][36]

Při ionizaci, která je nutná pro vznik plazmy, dochází v plynu k uvolňování valenčních elektronů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a v plazmě vedou elektrický proud. Ionizované jádro atomu má kladný náboj. Navenek je však plazma elektricky neutrální. [35][36]

Princip řezání plazmou je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. Úplné ionizace je dosaženo při teplotě kolem 100 000 K. Při svařování a řezání jsou dosahované teploty podstatně nižší, protože plazma je ionizována jen částečně. Neionizovaná část plynu je chladnější a stabilizuje plazmový parpsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky. [35][36]



Obr. 3 Princip řezání plazmou [35][36]

Princip plazmového řezání je znázorněn na Obr. 3. Vlivem dopadajícího paprsku s vysokou hustotou energie na povrch děleného materiálu dochází k jeho natavení. K vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry je využita dynamika

plazmového paprsku. Ke zvýšení koncentrace energie plazmového oblouku jsou používány chlazené plazmové hořáky, umožňující přívod fokusačního a ochranného (asistenčního) plynu, případně vody. Zvýšení koncentrace energie má za následek výrazné zvýšení výkonu. Asistenční plyn obklopuje plazmový elektrický oblouk, čímž chrání vytvářené řezné hrany před působením okolní atmosféry. [35][36]

Při řezání je výstupní rychlost plazmy 1 500 až 2 300 m.s⁻¹. Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové materiály bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem. Rychlost posuvu při řezání je závislá na výkonu zdroje a tloušťce a fyzikálních vlastnostech děleného materiálu. Maximální tloušťka materiálu, kterou lze plazmou řezat, je 250 mm. Nejčastější využití v průmyslové praxi však nachází plazma při řezání plechů s tloušťkou do 25mm. [35][36]

První myšlenka využití plazmy pro dělení materiálu se objevuje v 50. letech 20. století. Ve svých počátcích byla plazma využívána především pro řezání neželezných kovů a slitinových ocelí. V 60. letech došlo k částečné automatizaci řezání a zjednodušení řezných procesů. Vysoká cena plazmových plynů a výkoných zdrojů však mohla za to, že tato technologie dělení materiálu nebyla až do poloviny 70. let všeobecně využívána. [35][36]

V současné době se plazmové řezání stalo univerzálním způsobem dělení pro širokou škálu kovových i nekovových materiálů. Během posledních dvaceti let především díky vysoké rychlosti řezání, schopnosti řezat neželezné kovy a podstatně menšímu tepelnému ovlivnění v místě řezu dramaticky vzrostlo uplatnění plazmy pro řezání na úkor řezání kyslíkem. [35][36]

1.1.1.3 Řezání materiálu vodním paprskem

Historie využití vodního paprsku sahá do konce druhé poloviny 19. století, kdy v různých částech USA a Kanady naplno propukla tzv. zlatá horečka. Vodní paprsek byl tehdy hojně využíván zlatokopy k odplavování písku a drobného kamení z vytěžené směsi horniny. Tyto systémy by se daly označit jako nízkotlaké. [37]

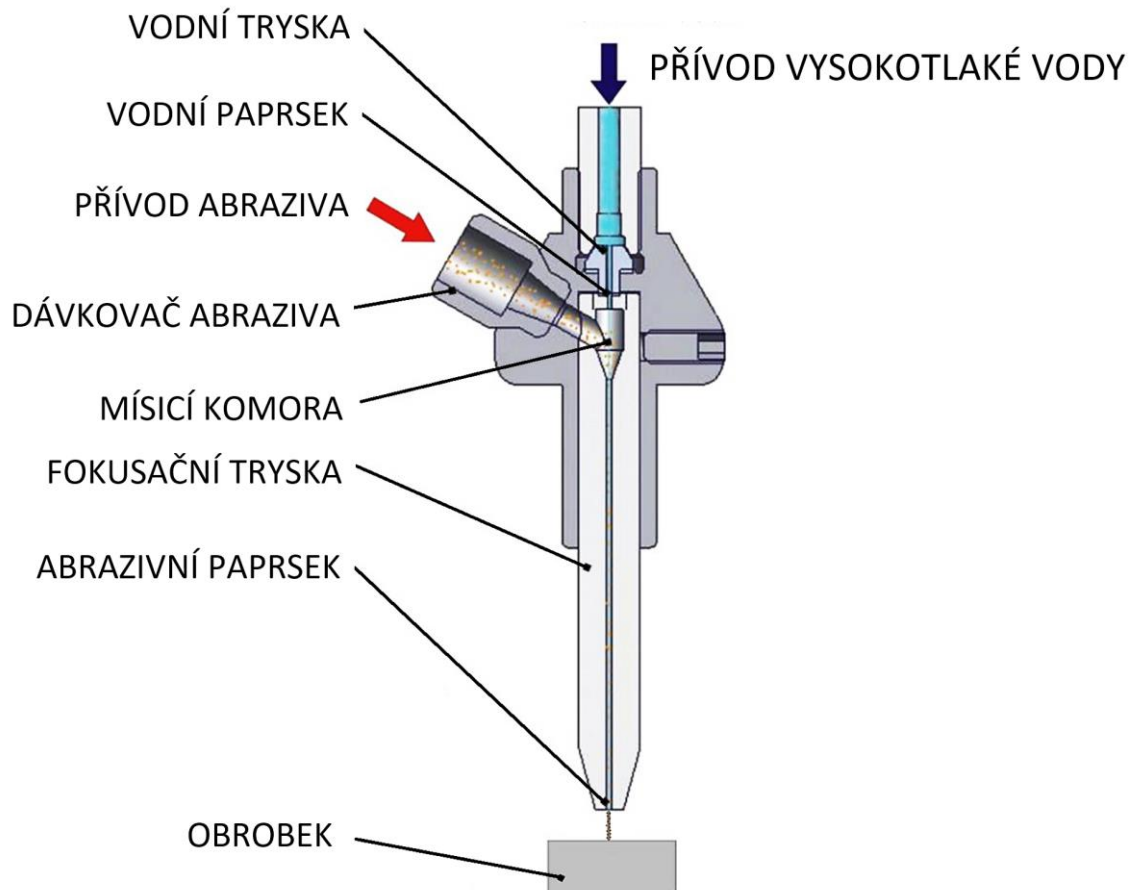
Během dvacátých let 20. století dochází k rozmachu používání vodních trysek k odstranění písku a horniny během různých stavebních činností. Jeden z prvních patentů s využitím vodního paprsku pochází z Ruska a byl uplatňován na vrtání děr v báňském průmyslu. O další rozvoj této metody se zasloužil Petr Tupitsyn, který pracoval v uhelných dolech v Doněcku na Ukrajině. V roce 1936 použil vodní paprsek k řezání děr uhelných slojí. [38][39]

Myšlenka využití vodního paprsku k řezání materiálu se objevuje až o cca 20 let později. V 50. letech 20. století se americký vědec Norman Franz pokusil využít energii vodního paprsku pro řezání dřeva a měkkých materiálu. Velkým problémem počátků této technologie však bylo zajištění konstantního přísunu vody a nízké dosažitelné tlaky. [38][39]

První komerční zařízení využívající technologii vodního paprsku bylo vyvinuto až v roce 1971 společností McCartney Manufacturing Co. a sloužilo k řezání dřevěných desek pro výrobu nábytku. [38][39]

Na konci 70. let 20. století přichází Dr. Mohamed Hasnish s myšlenkou, jak zvýšit řezný účinek vodního paprsku a rozšířit aplikovatelnost této technologie i na materiály s vyšší pevností, tvrdostí i tlouškou – přidání abrazivních částic do proudu vody. Tato myšlenka byla později základem metody označované jako Abrasive Water Jet (AWJ). Technologie řezání čistým vodním paprskem se označuje Water Jet Machining (WJM). Jedno z prvních komerčních zařízení pro oblast automotive bylo na trh uvedeno v roce 1984 a sloužilo k řezání skel. [38][39]

Princip řezání vodním paprskem je znázorněn na Obr. 4. K dělení materiálu je využívána kinetická energie vysokotlakého vodního paprsku vystupujícího z trysky dvoj- až čtyřnásobnou rychlostí, než je rychlost zvuku (600 – 1 200 m/s). V případě, že jsou ve vodním paprsku obsaženy i abrazivní částice, je využívána rovněž kinetická energie těchto částic. [37]



Obr. 4 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem [40]

Při řezání materiálu dochází k vysokorychlostnímu erozivnímu procesu – v místě průniku paprsku do materiálu dochází k obrušování materiálu abrazivními částicemi obsaženými v kapalném médiu. [37]

Řezný proces probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny na materiál prohlubeň, která se mění v otvor. V druhé etapě dochází k prohlubování tohoto otvoru a k vytvoření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na povrch řezaného materiálu dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše. Tím dochází v řezaném materiálu k rázovým vlnám, rychlé destrukci materiálu na hranici zrn a ke vzniku mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří, čímž dochází k odebrání materiálu. Destrukce a odběr materiálu při řezání jsou rovněž způsobovány turbulentním prouděním kapaliny ve spáře a kavitačními bublinami. Pro řezání kovů, keramiky aj. se do paprsku kapaliny přidává abrazivum, což výše popsané účinky vodního paprsku ještě pozitivně ovlivňuje. [1][9][40]

Odběr částic řezaného materiálu se dá považovat za mikro-rozměrový a dochází k němu prakticky za nezvýšené teploty. Šířka řezné spáry je jen o něco málo větší, než je průměr trysky. U obou metod (WJM i AWJ) dochází pouze k minimálnímu ovlivnění struktury v místě řezu a k minimálnímu zvýšení teploty – nedochází tak téměř k žádnému tepelnému ovlivnění materiálu a vzniku vnitřních napětí, jako je tomu např. při řezání plazmou nebo laserem. V místě působení vodního paprsku vzniká množství drobných jisker, v důsledku čehož dochází k nepatrnému odpařování vody. Vlivem přeměny části kinetické energie částic na energii tepelnou zde dochází k lokálnímu zvýšení teploty o cca 20-30 °C. Velikost přeměněné části energie se však dá určit jen velmi obtížně. [37]

Díky skutečnosti, že nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění v místě řezu, je možné řezat i materiály, které jinými metodami dělit nelze. Pro některé materiály však může i toto zvýšení teploty v místě řezu znamenat zhoršení vlastností, což může vést ke znehodnocení celého dílu. [37]

Drsnost řezné plochy se při AWJ většinou pohybuje od 1,6 do 6,3 μm . Kvalita vzniklého řezu je ovlivňována různými faktory, z nichž nejvýraznější vliv mají především vzdálenost trysky od materiálu, tlak a rychlost proudění kapaliny, průměr trysky a rychlost pohybu řezné hlavy. Dalšími významnými parametry ovlivňující kvalitu řezné plochy jsou úhel sklonu paprsku, kuželovitost paprsku a vliv abraziva a jeho dávkování. [9][43]

Abrazivo je popisováno svým chemickým složením a zrnitostí (velikostí a tvarem jednotlivých zrn). Neexistuje jednoznačná závislost kvality řezu na zrnitosti abraziva. Optimální hodnoty dávkování abraziva s ohledem na jeho chemické složení a zrnitost jsou vytvářeny a optimalizovány pomocí experimentů a praktických zkušeností. [42][43]

Mezi velké výhody řezání vodním paprskem patří jeho energetická účinnost v porovnání s dalšími metodami dělení materiálu. Další výhodou je, že při řezání nevzniká žádný poletující prach. Touto metodou lze mimo běžných materiálů dělit i materiály měkké, drobivé, lepivé, křehké. Řezání vodním paprskem je vhodnou metodou i pro dělení kompozitních materiálů. Řezná hrana je velmi kvalitní

a většinou nepotřebuje žádné dodatečné opracování. S výhodou lze AWJ použít i pro řezání povrchově upravovaných dílů, protože nedochází k poškození nanesené vrstvy. Při řezání materiál nepotřebuje pevné upnutí, většinou stačí volné položení či použití dorazů a zatížení v místě, ve kterém nebude prováděn řez.

Mimo vypsané výhody má řezání vodním paprskem i několik limitů a omezení. Protože je hlavním rezným médiem voda, je nutné kovové materiály před i po řezání vhodně ošetřit a v případě řezání nasákavých materiálů počítat s jejich vysoušením. Velkou nevýhodou této technologie je i její hlučnost. Hladina zvuku bývá kolem 80-110 dB. V případě řezání metodou AWJ je nutné právě díky působení abraziva počítat i s omezenou životností trysek. Při řezání navíc dochází k častému prořezání roštů, na kterých leží řezaný materiál. Tyto rošty se musí velmi často měnit za nové. U malých dílů je rovněž nutné počítat s tvorbou tzv. můstků, které zabraňují propadnutí vyřezaného dílce do vodní nádrže. Jednou z nevýhod této technologie je i problematická recyklace abraziva. [44]

1.1.1.4 Elektroerozivní drátové řezání

Historie elektroerozivního drátového řezání sahá do 40. let 20. století, kdy byla tato téměř současně a nezávisle na sobě zdokumentována v tehdejší SSSR a v USA metoda elektroerozivního obrábění. [45]

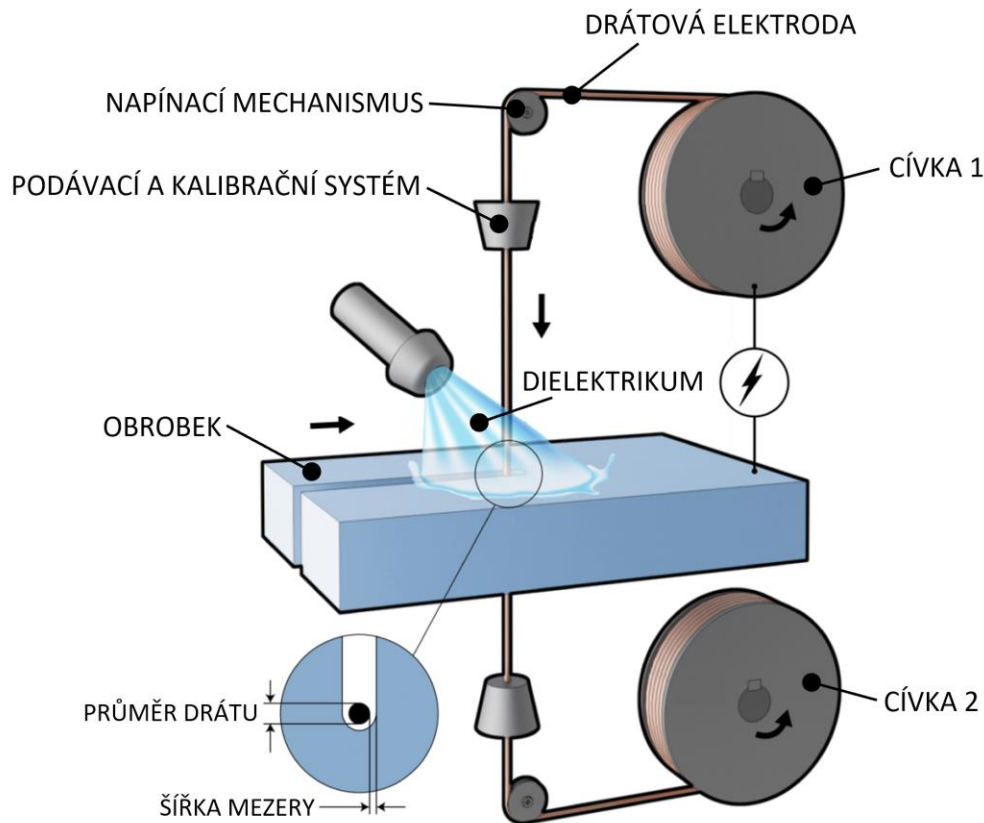
V roce 1943 v SSSR vyvinuli manželé Lazarenkovi řízený obráběcí cyklus s elektrickým obvodem, který udržoval konstantní vzdálenost mezi obrobkem a elektrodou. Jejich prototyp se stal předlohou pro elektroerozivní stroje vyráběných po celém světě. [45]

Vývoj obdobné technologie v USA byl zahájen přibližně ve stejnou dobu, kdy manželé Lazarenkovi začali experimentovat s elektrojiskrovým drátovým řezáním v SSSR. Americká společnost vyrábějící hliníkové ventily a rozvaděče řešila problém s odstraňováním zalomených závitníků a vrtáků při výrobě otvorů. Tým pracovníků vedený elektroinženýrem Victorem Hardingem přišel s nápadem využít elektrickou jiskru k narušení zalomených nástrojů v tělesech rozvaděčů. Vytvořená jiskra odtavila část kovu zalomeného nástroje, který mohl být po malých částech postupně odstraněn. Tato procedura však byla velmi pomalá, což vedlo k vývoji silnějšího jiskřícího procesu. Během něj však docházelo k tvorbě velkého množství roztaveného materiálu, který bylo nutné z obráběné oblasti odstranit. Po nákladných pokusech chlazení této oblasti stlačeným vzduchem se inženýři rozhodli využít k chlazení vodu. [45]

Vznik technologie elektroerozivního drátového řezání se datuje do 60. let 20. století. Impulsem pro vznik elektroerozivního drátořezu byla potřeba zjednodušit a zlevnit výrobu nástrojových elektrod. Elektroda byla časem nahrazena pevným drátem, který se však při řezání ztenčoval a praskal. Toto praskání a kolísání průměru bylo eliminováno kontinuálním posuvem drátu v rezné oblasti obráběného dílu. Postupem času byla technologie řezání zdokonalována. V roce 1967

představil tehdejší SSSR zařízení pro elektroerozivní řezání s dosahovanou přesností až 0,02 mm, které pro pozicování obráběného dílu používalo krokové motory. První drátové řezačky s počítačem řízeným pohybem obrobku se objevily až v 70. letech. S nástupem moderních počítačových systémů začala tato zařízení pro řízení využívat počítačové programy, které značně zefektivnily řízení pracovního procesu. [2][9][45]

Princip elektroerozivního drátového řezání je znázorněn na Obr. 5. Nástrojová elektroda je tvořena tenkým drátem, který je kvůli eliminaci opotřebení převíjen z jedné cívky na druhou. Mezi drátovou elektrodou a obrobkem vzniká vlivem elektroerozivních mechanismů pracovní mezera a řez požadovaného tvaru. Pro docílení přesného řezu a stability řezného procesu je nutné, aby drátová elektroda vstupovala do místa řezu řádně napnutá a vyrovnaná. Před vstupem drátové elektrody do pracovní zóny dochází ke kalibraci v diamantovém průvlaku. [2][9]



Obr. 5 Princip elektroerozivního drátového řezání [40]

Mezi drátovou elektrodou a obrobkem dochází ke vzniku periodicky se opakujících mikro-výbojů. V místě elektrického výboje se materiál na povrchu obrobku prudce ohřívá, taví a částečně odpařuje. Zbylé produkty elektroeroze jsou z mezery mezi nástrojem a obrobkem vyplavovány proudem dielektrické kapaliny. Výboj mezi elektrodami vytváří na povrchu velké množství nepravidelných kráterů, jejichž rozměry jsou závislé na použitém dielektriku, materiálu elektrody a pracovních podmínkách. Vznik těchto kráterů je doprovázen lokálním

natavováním povrchu, vznikem tepelně ovlivněné vrstvy a plastickou deformací kráteru i jeho okolí. [2][9]

Účinkem vysokých teplot (8 000 - 12 000 °C) při elektroerozivním řezání dochází ke vzniku stabilní austenitické vrstvy, která je však téměř okamžitě ochlazována dielektrickou kapalinou a zakalena. Vlivem těchto účinků je na povrchu řezné plochy vytvořena tzv. bílá vrstva o síle 1 - 40 μm. Tato vrstva se vyznačuje martenzitickou strukturou o velké tvrdosti. Síla této vrstvy závisí především na vybíjecí energii impulsů. [46][47][48]

1.2 Tepelně ovlivněná oblast

Většina metod dělení plechů využívající nekonvenční technologie je založena na lokálním tavení materiálu a jeho odvodu z místa řezu. V okolí řezu vzniká v důsledku působení vysokých teplot tzv. tepelně ovlivněná oblast (TOO). TOO bývá popisována jako neroztavená oblast kovu v těsné blízkosti místa řezu, ve které došlo ke změnám materiálových vlastností či vnitřní struktury ve srovnání s tepelně neovlivněným základním materiálem. Vznik TOO je obvykle nežádoucí vedlejší efekt nekonvenčních metod dělení materiálu. Pojem TOO je hojně využíván i v oblasti svařování, kdy definuje oblast v blízkosti svaru s jinými chemickými a mechanickými vlastnostmi, než je materiál svaru a základního materiálu. [2][9][25]

Tepelně ovlivněná oblast se většinou skládá z více pásem. Nejširší pásmo (pásmo s nejvýraznějším projevem tepelného účinku dělení) se nazývá hlavní pásmo tepelně ovlivněné oblasti. Dochází v něm k velmi výrazným rozdílům vlastností v porovnání se základním materiálem (např. zvýšení tvrdosti, snížení chemické či korozní odolnosti nebo zhoršení obrobitelnosti). Za tímto pásmem následuje tzv. přechodové pásmo, ve kterém dochází k postupnému vyrovnání rozdílů mezi vlastnostmi hlavního pásma TOO a vlastnostmi základního materiálu. Velikost pásem TOO se u různých materiálů liší v závislosti na chemickém složení, tloušťce děleného materiálu, intenzitě působení a koncentraci tepelného účinku použitého při procesu dělení. [2][9]

Výrazný vliv na rozměry TOO mají i procesní parametry výrobních zařízení. Metody řezání, které pracují při vysokých teplotách a pomalé rychlosti, vedou k výraznější TOO. Naopak metody, které pracují při vysokých rychlostech vedou ke vzniku menší TOO. [2][9]

TOO může být často rozpoznána řadou barevných pásů viditelných v blízkosti řezů a svarů. Barvy způsobené povrchovou oxidací jsou přibližným ukazatelem teploty, kterou kov při dělení či svařování dosahuje. [49]

1.3 Metody měření tvrdosti [50][51][52][53]

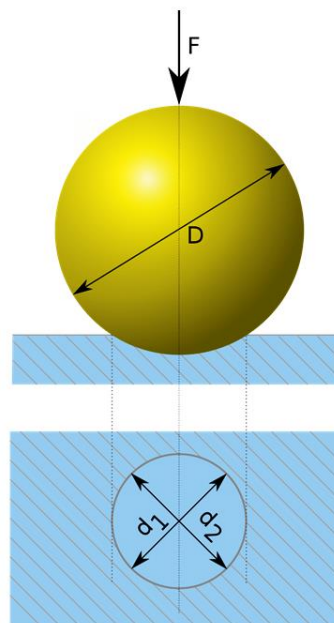
Jednou z nejlépe a nejrychleji měřitelných vlastností materiálů je tvrdost. Tvrdost je definována jako odpor materiálu proti vniknutí jiného tělesa. Výsledky zkoušky tvrdosti často slouží k odhadu dalších mechanických vlastností materiálu. Existují dva způsoby měření tvrdosti – vnikací (indentační) a vrypový. Způsob označovaný jako vnikací pracuje na principu vtlačování vnikacího tělíska, tzv. indentoru, definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu tak, aby došlo k plastické deformaci. Způsob označovaný jako vrypový je založen na myšlence Mohsovy stupnice a dochází při něm k elastické interakci povrchu materiálu a zkušebního tělíska.

Tato část práce se bude zabývat rozbořem indentačních zkoušek tvrdosti.

1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato zkouška tvrdosti byla vynalezena švédským metalurgem Johanem Augustem Brinellem, který ji odborné veřejnosti představil na mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži v roce 1900. Jedná se o zkoušku indentační, která využívá plastické deformace zkoušeného materiálu za působení statické síly. Zkouška se provádí na Brinellově tvrdoměru.

Principem zkoušky je, že se do povrchu zkoušeného materiálu zatlačuje leštěná kalená ocelová kulička nebo kulička z tvrdokovu o průměru D definovanou silou F . Princip Brinellovy zkoušky je znázorněn na Obr. 6.



Obr. 6 Princip zkoušky podle Brinella

Průměr kuličky bývá 1, 2,5, 5 nebo 10 mm. Po odlehčení se změří průměry vtisku d_1 a d_2 vtisku ve dvou na sebe kolmých rovinách a vypočítá se průměr střední d_s .

$$d_s = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

Zkušební zatížení se volí tak, aby platilo:

$$d_s = (0,24 - 0,60) \cdot D \quad (2)$$

Zatěžovací stupeň a se volí podle druhu materiálu, a platí pro něj

$$a = \frac{0,102 \cdot F}{D^2} \quad (3)$$

Pro oceli a litiny platí hodnota zatěžovacího stupně $a = 30$. Doba působení zatížení u ocelí a litin je 10 až 15 s. U měkčích materiálů je doba zatížení delší. Nevýhodou zkoušky je, že vtisk bývá mnohdy nezřetelný a nesouměrný a při nesprávně zvoleném zatížení někdy může dojít k deformaci kuličky.

Hodnota Brinellovy tvrdosti je dána vztahem:

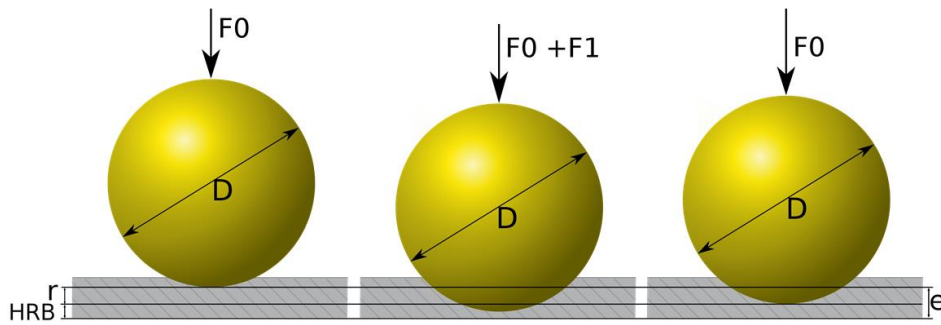
$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{S} \quad (4)$$

kde S je plocha vtisku v mm^2 a F je zkušební zatížení v N.

1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška je založena na historicky starším principu Ludwikovy zkoušky. Jako indenter slouží diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblením špičky 0,2 mm, případně kalená ocelová kulička. Mírou tvrdosti je velikost plastické deformace, která vznikne vtlačení indenteru do zkoušeného materiálu. Zkouška se provádí na Rockwellově tvrdoměru s číselníkovým úchylkoměrem, ze kterého je odečtena hloubka vtisku převedená na tvrdost.

Zkouška se skládá ze 3 kroků a její princip je znázorněn na Obr. 7. Nejprve je indenter zatlačen do zkoušeného materiálu předběžným zatížením F_0 (98,07 N), aby se odstranil vliv povrchových nerovností zkušebního tělesa. V tomto kroku je vynulována stupnice úchylkoměru. V druhém kroku se síla pozvolna zvětšuje o přídavné zatížení F_1 . Celkové zkušební zatížení je $F = F_0 + F_1$. Následně je zátěž snížena na hodnotu předběžného zatížení F_0 a na stupnici úchylkoměru se odečte hloubka vtisku převedená na tvrdost podle Rockwella HR.



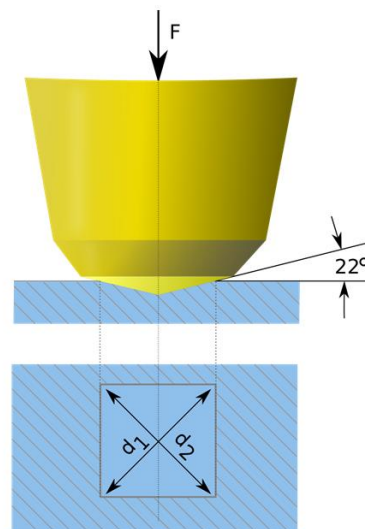
Obr. 7 Princip zkoušky podle Rockwella

Výhodou zkoušky je její velká rychlost a vhodnost pro použití při měření velkých sérií. S výhodou se používá v kalírnách. Její nevýhodou je menší přesnost.

1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Za autory této metody jsou označováni R.L. Smith a G.E. Sandland, kteří metodu vyvinuli v roce 1921. Název metoda získala podle firmy Vickers, ve které byl zkonstruován první tvrdoměr pro tuto metodu. Svým principem je tato zkouška podobná zkoušce Brinellově.

Princip zkoušky je znázorněn na Obr. 8. Do povrchu zkušebního tělesa je silou F zatlačován pravidelný čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Doba působení zatížení je 10 až 15 s. Po odlehčení se změří úhlopříčky vtisku d_1 a d_2 , určí se střední úhlopříčka d_s a vypočte se tvrdost HV.



Obr. 8 Princip zkoušky podle Vickerse

Hodnota Vickersovy tvrdosti je dána vztahem:

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{9,80665 \cdot d_s^2} \cong 0,1891 \cdot \frac{F}{d_s^2} \quad (4)$$

1.4 Kontaktní mechanika

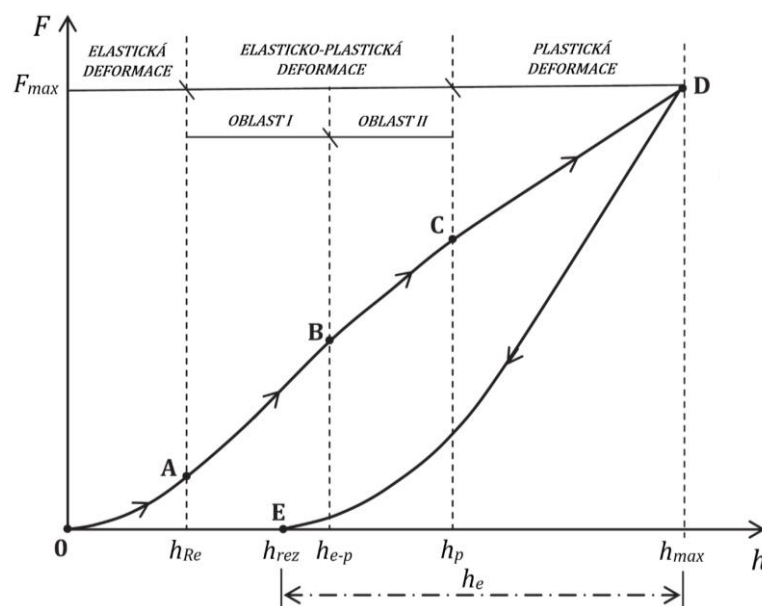
1.4.1 Mechanický kontakt

Pochopení principu a chování kontaktu dvou reálných těles není důležitý prvek jen z hlediska pochopení tvrdosti, ale rovněž pro řešení dalších inženýrských činností v oblasti opotřebení, tření, mazání či kontaktní únavy. Při řešení této problematiky je vždy nutné brát v úvahu mnoho nezanedbatelných faktorů (struktura povrchu, materiálové charakteristiky či geometrie kontaktních těles či přítomnost maziva). [55]

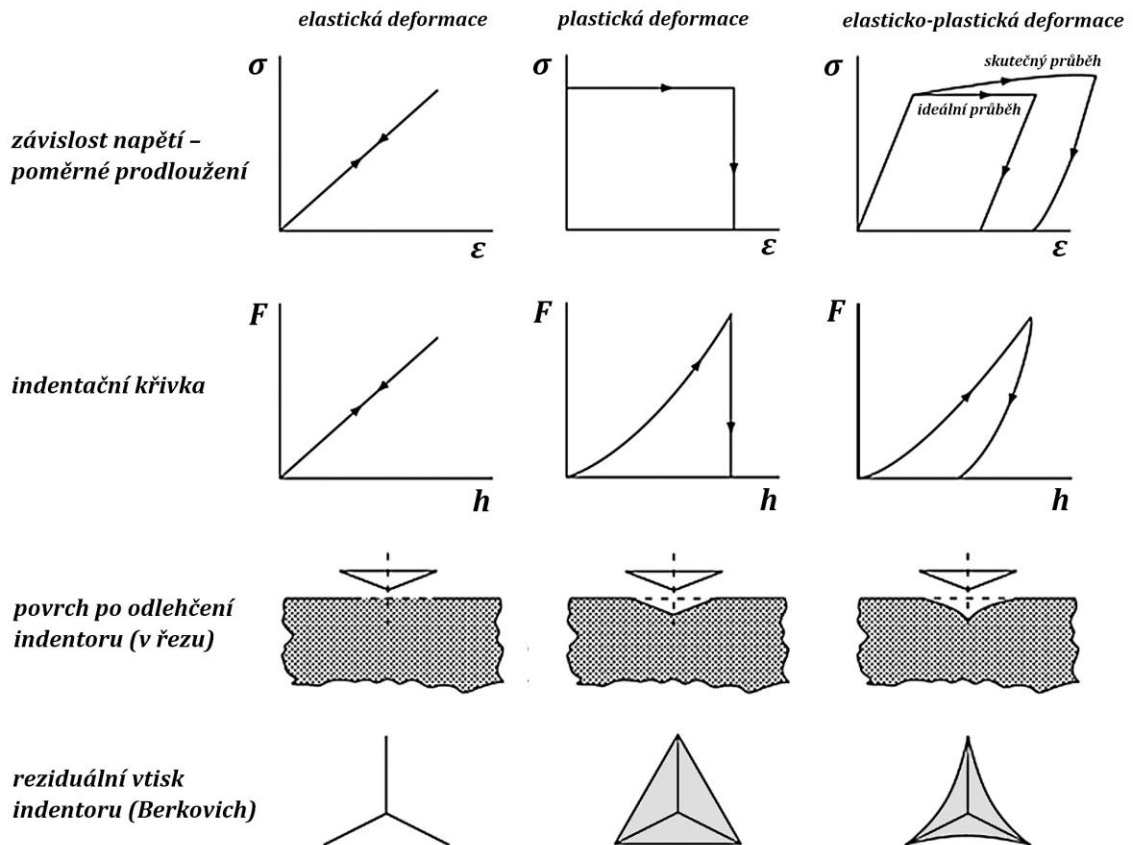
Tato část práce se bude zabývat základními principy suchého elastického a elasticko-plastického kontaktu mezi indentorem a povrchem zkoumaného materiálu a jeho aplikací v nanoindentační zkušce. Níže uvedené vzorce jsou převzaty ze zahraniční literatury a obsahují rozdílné značení veličin, než je v Evropě zvykem. Rovnice i obrázky jsou z důvodu srozumitelnosti přeznačeny dle českých standardů.

Vůbec první matematický popis problematiky kontaktu dvou těles byl publikován v roce 1881 ve studii *On the contact of elastic bodies*, ve které německý fyzik H. R. Hertz popisuje problematiku suchého statického elastického kontaktu dvou nekonformních hladkých těles. [59][60]

Napětí a deformace vznikající v kontaktu dvou těles jsou v oblasti indentačních zkoušek obzvláště důležité. Nejvýstižnější popis kontaktu simulující průběh indentační zkoušky je kontakt koule (sférického indentoru) s rovným povrchem (povrchem vzorku). [61] Reálná zatěžovací křivka při indentaci sférickým indentorem (viz Obr. 9) je rozdělena na tři zóny s různými typy deformace: čistě elastickou, elasticko-plastickou a čistě plastickou. [62] Charakteristické tvary křivek různých materiálu jsou znázorněny na Obr. 10.



Obr. 9 Zatěžovací křivka při indentaci sférickým indentorem [62]



Obr. 10 Charakteristické tvary indentačních křivek různých druhů materiálů [55]

Číslo tvrdosti (někdy taky hodnota tvrdosti) je obecně definováno jako poměr maximální zatěžovací síly indentoru F_{max} a celkové plochy otisku S_{skut} , kterou zanechá indenter ve zkoumaném materiálu:

$$H = \frac{F_{max}}{S_{skut}} \quad (5)$$

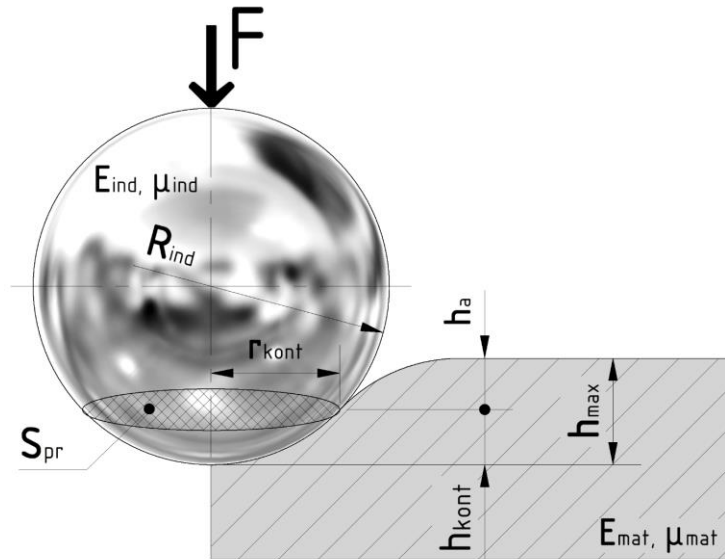
Správná kvantifikace zbytkové kontaktní plochy, případně jejího průmětu, je nezbytný předpoklad pro výpočet tvrdosti materiálu. Matematický popis výpočtu kontaktní plochy lze vysledovat již v Hertzových rovnicích pro popis elastického kontaktu z konce 19. století. [59][60]

1.4.2 Elastický kontakt [55][60][61][63]

Elastická deformace je deformace, kdy po uvolnění zatížení dojde u materiálu k návratu do původního stavu před zatížením. Tento typ deformace se dá popsat rovnicí z Hookova zákona, který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu (pro malá napětí a malé deformace):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

Hertz ve své studii popsal několik typů kontaktů dvou těles. Nejvýstižnější popis kontaktu simulující průběh indentační zkoušky je kontakt koule s rovným povrchem (viz Obr. 11). Ve své práci publikoval závislost mezi zatížením koule (špičky indentoru) F a kontaktního poloměru r_{kont} .



Obr. 11 Elastický kontakt sférického indentoru s rovinným povrchem

Kontaktní poloměr lze vypočítat z rovnice:

$$r_{kont} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{F \cdot R}{E_{red}}} \quad (7)$$

V této rovnici je jako E_{red} označován redukovaný modul pružnosti. Jeho výpočet kombinuje moduly indentoru a zkoumaného materiálu a je definován rovnicí:

$$\frac{1}{E_{red}} = \frac{(1 - \mu_{mat}^2)}{E_{mat}} + \frac{(1 - \mu_{ind}^2)}{E_{ind}} \quad (8)$$

Hodnota Poissonova čísla μ je bezrozměrná a pro většinu materiálů nabývá hodnot z intervalu 0,2 až 0,5 (keramické materiály $\approx 0,2$, kovy $\approx 0,3$, polymery $\approx 0,4$).

Pokud mají indentor i povrch zkoumaného povrchu zakřivení, udává se jejich relativní poloměr R , který je dán rovnicí:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{mat}} + \frac{1}{R_{ind}} \quad (9)$$

Vzorek je v případě indentační zkoušky považován za dokonale rovný. Rovina se dá matematicky popsat jako koule o nekonečném poloměru, tudíž $R_{mat} = 0$.

Deformace je v tomto případě považována pouze za lokální a nezohledňuje tak objemovou deformaci zkoušeného materiálu či napětí související s uchycením vzorku. Hloubku otisku h_{max} na rovném povrchu vyvolanou působením indentoru lze vypočítat z rovnice:

$$h_{max} = \frac{1}{E_{red}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{4 \cdot r_{kont}} \cdot \left(2 - \frac{R_{ind}^2}{r_{kont}^2} \right), \quad R_{ind} \leq r_{kont} \quad (10)$$

Místo kontaktu (teoretická kružnice o poloměru r_{kont} , na které stále ještě dochází ke kontaktu indentoru a zkoumaného materiálu) leží v polovině celkové hloubky vtisku. Vzdálenost od povrchu zkoumaného materiálu k místu kontaktu se dá popsat jako:

$$h_{kont} = h_a = \frac{h_{max}}{2} \quad (11)$$

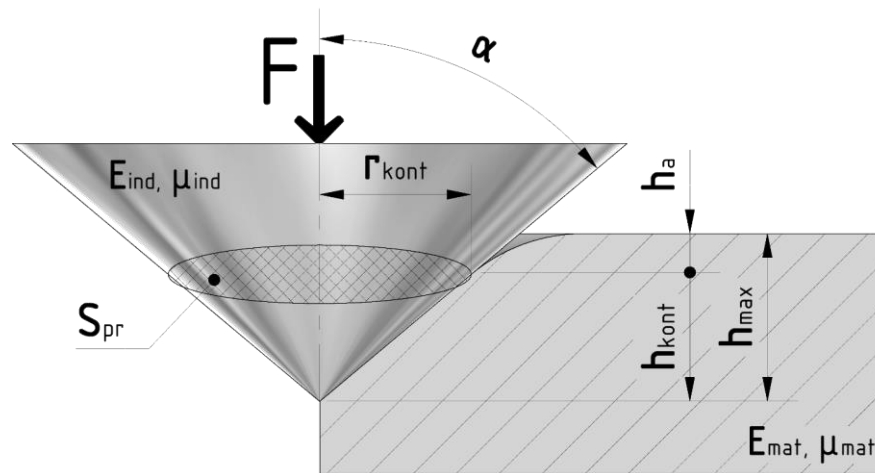
Střední kontaktní tlak p_{sk} je hodnota určený podílem zátěžné síly indentoru a průmětu kontaktní plochy (v případě kruhu jde o obsah kruhu s poloměrem r_{kont}):

$$p_{sk} = \left(\frac{F}{\pi \cdot r_{kont}^2} \right) \quad (12)$$

Dosazením rovnice (3) do této definice dostaneme vztah:

$$p_{sk} = \left(\frac{4 \cdot E_{red}}{3\pi} \right) \cdot \frac{r_{kont}}{R_{ind}} \quad (13)$$

Střední kontaktní tlak p_{sk} bývá označován jako indentační napětí a podíl r_{kont}/R_{ind} jako indentační deformace. Vztah mezi středním kontaktním tlakem p_{sk} a r_{kont}/R_{ind} značí existenci obdobné deformační odezvy jako při konvenční tahové zkoušce – elastická deformace má v obou případech lineární průběh. Vzhledem k lokálnímu charakteru napěťového pole poskytuje indentační deformace důležitou informaci o elasticko-plastickém chování zkoušeného materiálu. Tyto informace však z tahové zkoušky vyčíst nelze.



Obr. 12 Elastický kontakt kuželového indentoru s rovinným povrchem

Pro kuželový indentor (znázorněn na Obr. 12) platí obdobné rovnice jako pro indentor kulový – poloměr kontaktní plochy (kontaktního kruhu) je vztažen k zatížení F rovnicí:

$$F = \frac{\pi \cdot r_{kont}}{2} \cdot E_{red} \cdot r_{kont} \cdot \cot \alpha \quad (14)$$

Hloubka vtisku měřená od povrchu testovaného materiálu je pro tento typ indentoru určena rovnicí:

$$h_{max} = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R_{ind}}{r_{kont}} \right) \cdot r_{kont} \cdot \cot \alpha, \quad R_{ind} \leq r_{kont} \quad (15)$$

α v této rovnici značí vrcholový polo-úhel kuželového hrotu indentoru. Funkce $\cot \alpha$ definuje hloubku vtisku vztaženou k poloměru kontaktní plochy. V případě kuželového indentoru se dá poloměr špičky indentoru považovat za nulový ($R_{ind} = 0$).

Zatížení indentoru F se pomocí úpravy vztahů dá rovněž vyjádřit jako:

$$F = \frac{2 \cdot E_{red} \cdot \tan \alpha}{\pi} \cdot h_{max}^2 \quad (16)$$

h_{max} v této rovnici značí hloubku vtisku od povrchu měřeného materiálu

Indentační metody měření tvrdosti nejčastěji pracují se sférickými či pyramidálními indentory. Pro sférické indentory platí Hertzovy rovnice přímo. U pyramidálních indentorů dochází ke zjednodušení – jsou nahrazovány pomyslnými

kuželovými indentory s takovým vrcholovým úhlem, který poskytuje stejnou projekční plochu S_{kont} při hloubce vtisku h_{kont} jako konkrétní pyramidální indentor.

Nejčastěji používané pyramidální indentory při indentačních zkouškách jsou Vickersův (pravidelný čtyřboký jehlan) a Berkovichův (pravidelný trojboký jehlan).

Pro indentační zkoušku je důležitá znalost kontaktní plochy. Pro sférický indentor platí:

$$r_{kont} = \sqrt{2 \cdot R_{ind} \cdot h_p - h_p^2} \approx \sqrt{2 \cdot R_{ind} \cdot h_p} \quad (17)$$

h_p značí tzv. plastickou hloubku pod kontaktním kruhem k nejnižšímu místu vtisku. Jedná se o základní rovnici, která je použitelná za předpokladu velmi malých deformací ($h_p \ll R_{ind}$). U kuželového indentoru platí pro výpočet kontaktního poloměru rovnice:

$$r_{kont} = h_p \cdot \tan \alpha \quad (18)$$

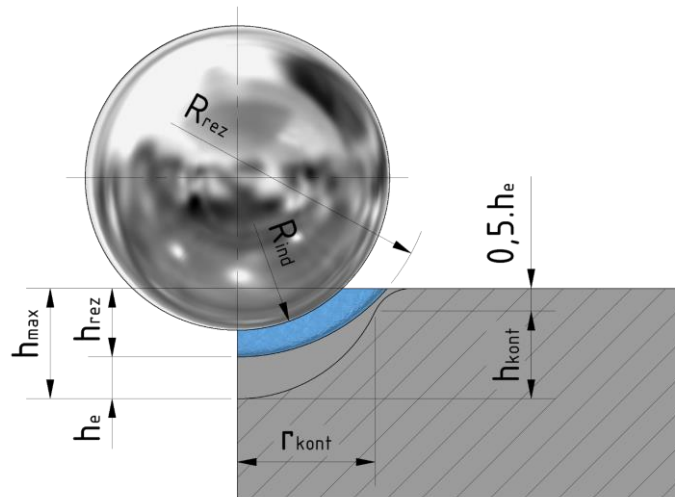
Jak u pyramidálních, tak u kuželových indentorů existuje konstantní závislost rozměrů reziduálního vtisku ve vzorku na zatěžující síle. Na oba typy indentorů tedy lze aplikovat tzv. geometrickou podobnost – indentační deformace r_{kont}/R_{ind} v materiálu je totiž konstantní a nezávisí tedy na síle aplikované na indentor.

U sférického indentoru tato podobnost neplatí. Kontaktní poloměr se totiž při vzrůstajícím zatížení indentoru zvyšuje rychleji než hloubka indentace. Geometrickou podobnost lze ovšem aplikovat i u sférického indentoru, a to za předpokladu, že ve výpočtech bude použito více sférických indentorů o různých poloměrech.

Principy geometrické podobnosti jsou s výhodou využívány právě u měření tvrdosti. Je tedy možné používat např. pyramidální indentor, ačkoliv je jeho kontaktní teorie založena na výpočtech pro indentor kuželový. V těchto případech se ovšem používají různé korekční faktory, které rozdíl v geometrii indentorů zohledňují.

1.4.3 Elasticko-plastický kontakt [55][60][61][63]

V předchozí části bylo popsáno chování materiálu při zatěžování dvou dokonale pružných těles. Při indentačních zkouškách však dochází u velké většiny materiálů ke vzniku obou typů deformací – elastické i plastické, či jejich kombinovanému účinku. Plastická deformace je typ deformace, kdy po uvolnění zatěžující síly nedochází k navrácení materiálu do původního stavu. Při elasticko-plastickém kontaktu (znázorněn na Obr. 13) tak dochází ke tvorbě dvou různých oblastí s rozdílným chováním.



Obr. 13 Elasticko-plastický kontakt sférického indentoru

Hertzova teorie tvrdí, že absolutní hodnota tvrdosti je nejmenší hodnota tlaku působícího na sférický indenter, která vyvolá trvalou deformaci ve středu kontaktní plochy. Experimenty dokazují, že hodnota středního kontaktního tlaku p_{sk} pod hrotem indentoru, která zůstane stejná i při zvětšování zátěžné síly působící na indenter, odpovídá tvrdosti materiálu. Tvrdost tedy lze určit přímo z průmětné kontaktní plochy vtisku S_{pr} .

Indentační zkoušky se běžně používají pro měření tvrdosti materiálu, ale z jejich hodnot se dají vyčíst a predikovat i další mechanické vlastnosti – např. pevnost či lomové vlastnosti materiálu. Některé teorie se snaží najít empirický vztah mezi pevností a tvrdostí materiálu. Schopnost predikce materiálových vlastností pomocí indentační zkoušky byla jedna ze základních teorií Davida Tabora v 50. letech 20. století. Mechanické vlastnosti materiálu bylo v té době možno určovat pouze tahovou zkouškou.

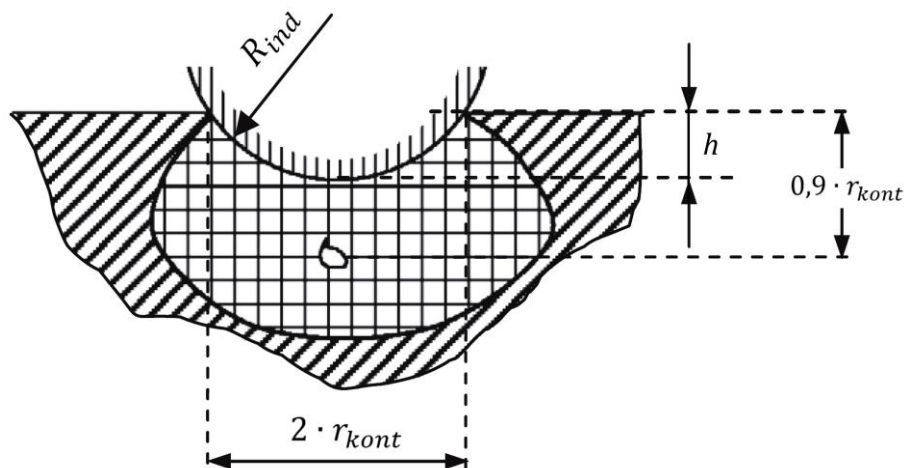
Tvrdost materiálu, obecně označovaná jako H , přímo souvisí se středním kontaktním tlakem p_{sk} . Experimentálně lze dokázat, že střední kontaktní tlak p_{sk} mezi indentorem a zkoumaným materiálem je přímo úměrný napětí na smluvní mezi kluzu tohoto materiálu. Podle Tabora a Johnsona obecně platí rovnice:

$$H \approx C \cdot R_e \quad (19)$$

R_e v této rovnici označuje smluvní mez kluzu materiálu. Koeficient C je závislý na materiálu a geometrii indentoru a u ocelí nabývá hodnot 2,8 – 4,1. U křehkých materiálů (např. sklo) je koeficient $C \approx 1,5$. Tento vztah však platí pouze pro materiály s ideálním průběhem plastické deformace.

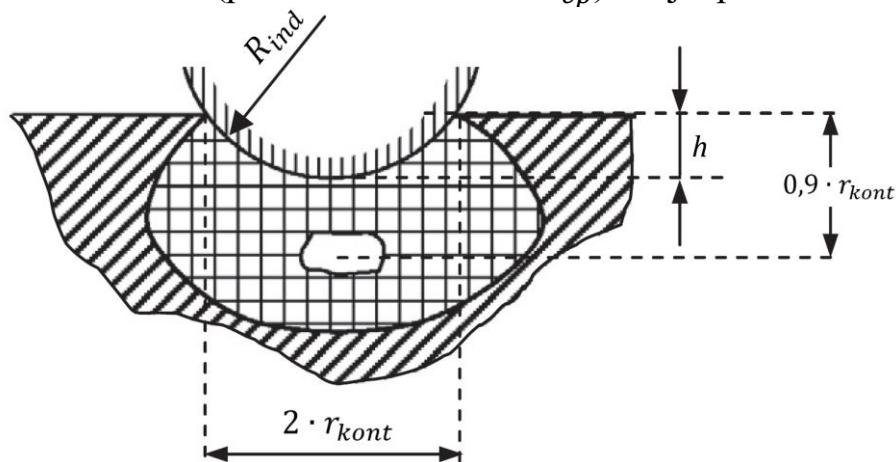
Dle velikosti kontaktního tlaku lze rozdělit indentační chování materiálu na 3 oblasti (Obr. 14-17), které jsou závislé na mezi kluzu materiálu:

- 1) $p_{sk} < 1,1 \cdot R_e$ – materiál má plně elastickou odezvu, po odlehčení indentoru nevzniká v materiálu žádný permanentní otisk. Rovnice předpokládá lineární elasticitu materiálu. Maximální smykového napětí leží v hloubce $\approx 0,9 \cdot r_{kont}$

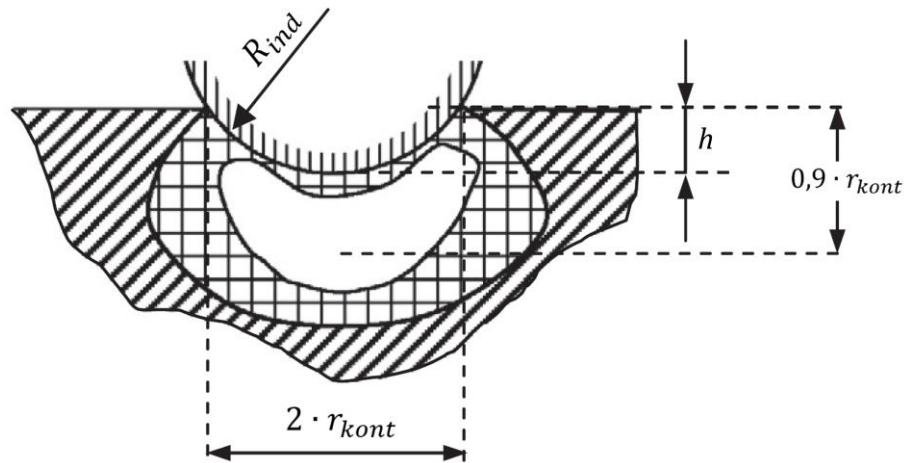


Obr. 14 Velikost plastické zóny pod vtiskem při dosažení meze kluzu

- 2) $1,1 \cdot R_e < p_{sk} < C \cdot R_e$ – materiál má elasticko-plastické chování. Po odlehčení vzniká vlivem plastické deformace pod povrchem permanentní otisk, který je však ovlivňován elastickým chováním okolního materiálu. Tato oblast se dělí na 2 oblasti – oblast při zatížení pod $\approx 1,95 \cdot R_e$ má nelineární průběh, oblast za tímto bodem (přechodová hloubka h_{ep}) má již průběh lineární.

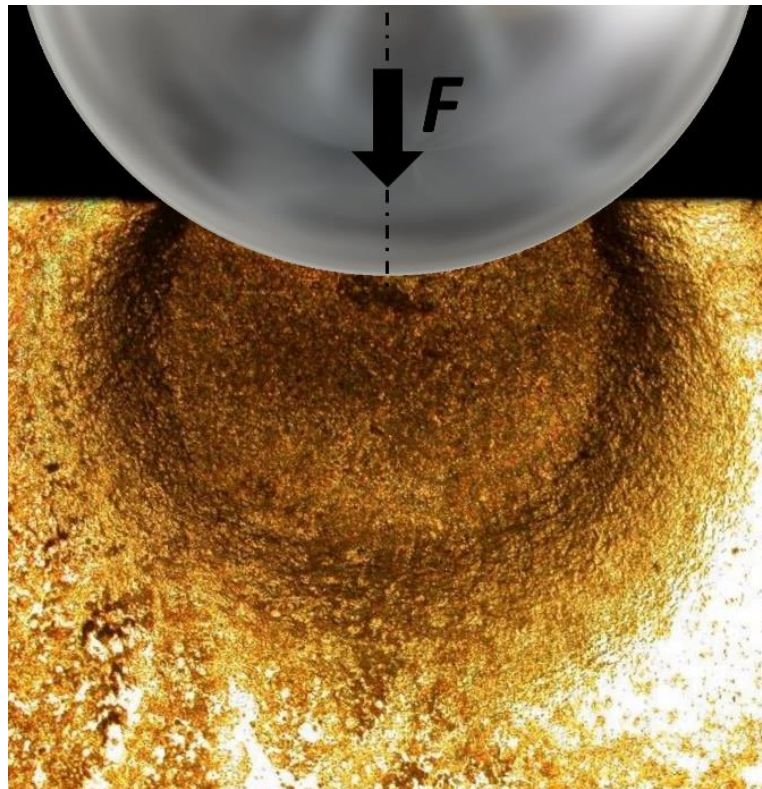


Obr. 15 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast I elasticko-plastické deformace



Obr. 16 Velikost plastické zóny pod vtiskem – oblast II elasticko-plastické deformace

- 3) $p_{sk} = C \cdot R_e$ – oblast vyvolaná plastickou deformací se rozširuje až k povrchu vzorku. Při zvyšujícím se zatížení indentoru se tato oblast dále zvětšuje, přestože střední kontaktní tlak p_{sk} zůstává konstantní. V těchto případech (kdy je střední kontaktní tlak vyšší než mez kluzu materiálu) je již možné z indentační zkoušky přímo určit tvrdost materiálu. [63]



Obr. 17 Vizualizace elasticko-plastického kontaktu ve slitině mědi ($F \approx 7500 \text{ N}$) [64]

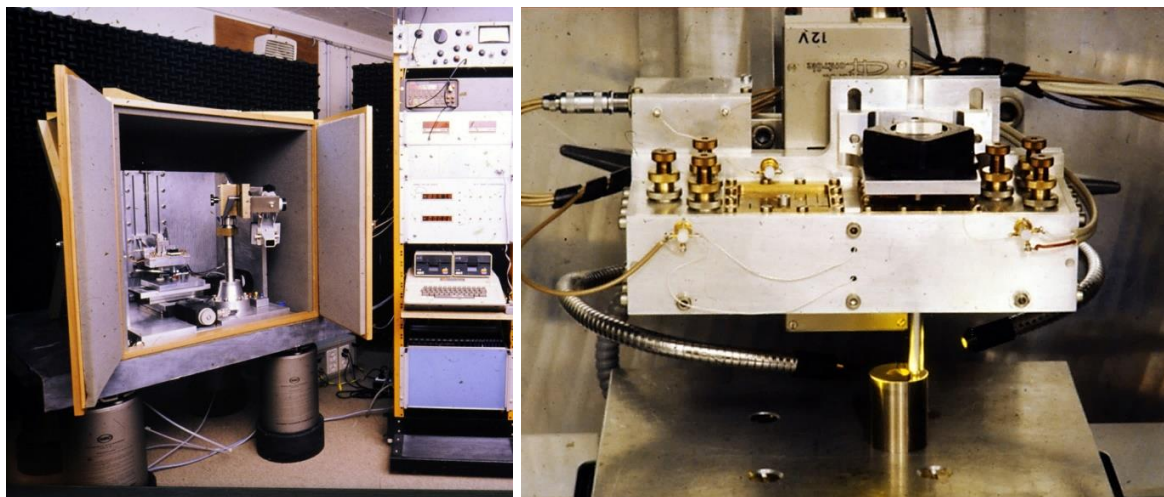
1.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti

Především vývoj, aplikace a požadavky na kontrolu tenkých vrstev a povlaků v posledních třiceti letech donutily vědce a konstruktéry k vytvoření nového typu zkoušky, která by dokázala charakterizovat jejich mechanické vlastnosti. Povlaky a tenké vrstvy jsou popisovány jako vrstvy o tloušťce od několika desítek nanometrů až po několik mikrometrů nanesené na základním materiálu, tzv. substrátu. Tyto vrstvy se oproti substrátu často vyznačují výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi (např. optické vlastnosti, ochranné a krycí vlastnosti či vodivost). [55][56]

Měření tvrdosti tenkých vrstev v té době pomocí konvenčních metod měření tvrdosti nebylo možné především ze dvou důvodů – zkušební zařízení nebyla schopna působit dostatečně malými silami a v případě vyhodnocení běžnými optickými metodami hrozila příliš vysoká nejistota měření velmi malých vtisků. Při použití vyšších zátěžných sil indentoru pak již docházelo k výraznému ovlivnění výsledků substrátem. [55][57]

V 70. letech 20. století začal vývoj nové metody pro zjišťování materiálových charakteristik tenkých vrstev a povlaků. Tato zkouška je později označována jako instrumentovaná indentační zkouška. Předlohou pro vývoj této zkoušky byly konvenční metody měření tvrdosti. Tato zkouška oproti konvenčním metodám měření tvrdosti nevyhodnocuje rozměry kontaktní plochy, ale maximální hloubku vtisku indentoru. V porovnání s konvenčními metodami měření tvrdosti je navíc zaznamenáván celý průběh zatěžování, nikoliv jen jeho maximální hodnota. [57][58]

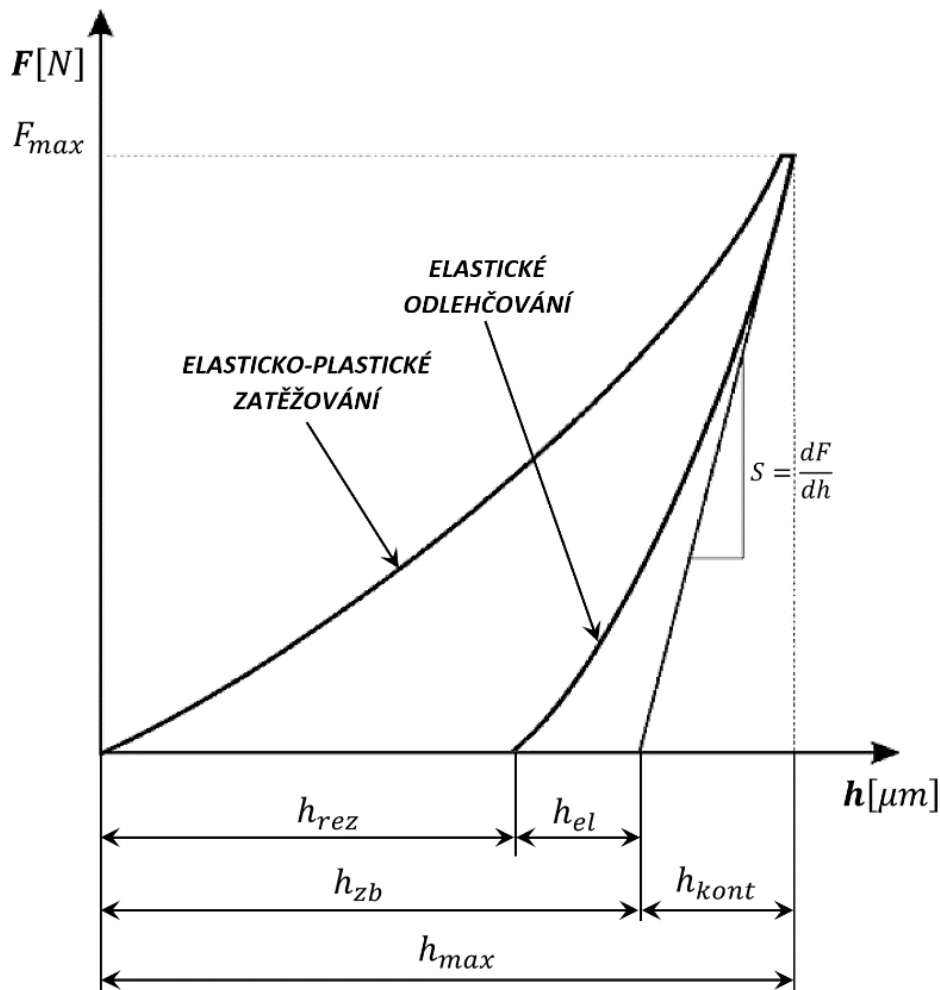
Na Obr. 19 je znázorněno jedno z úplně prvních zařízení pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti, které bylo zkonstruováno v 70. letech 20. století.



Obr. 19 Jedno z prvních zařízení pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti [59]

Průběh indentační zkoušky je znázorněn na Obr. 20 a se skládá z elasticko-plastické zatěžovací a elastické odlehčovací fáze. Síly působící na indentor jsou

řádově jednotky až desítky mN a hloubky vtisku indentoru do zkoumaného materiálu se pohybují v řádu jednotek μm . [57]



Obr. 20 Indentační křivka pro elasticko-plastické zatěžování a elastické odlehčení.

Ideální testovací zařízení pro indentační zkoušku tvrdosti proto musí dokázat přesně aplikovat malou zátěžnou sílu na indenter a musí být odizolováno proti působení vnějších vlivům a vibracím. Tato zařízení rovněž musí umožnit přesnou kontrolu, rozlišení hloubky vpichu a přesné polohování indentoru vůči objektům na povrchu vzorku, nejlépe s rozlišením nanometrů. [59]

Cílem instrumentované indentační zkoušky je získání hodnoty modulu pružnosti a tvrdosti materiálu. Tyto hodnoty jsou získány nepřetržitým snímáním zatížení indentoru a hloubky vtisku ve zkoumaném materiálu. Snímání hloubky vtisku umožňuje nepřímé měření kontaktní plochy při maximálním nastaveném zatížení a z těchto hodnot následně odvodit střední kontaktní tlak. Díky znalosti velikosti kontaktní plochy a působící síly je možné vypočítat tvrdost. Hodnoty modulu pružnosti materiálu a jeho tvrdosti jsou však závislé na správné analýze naměřených dat. Získaná data je nutné analyzovat dle správných postupů a provádět korekce různých systematických chyb popsanych v literatuře. [55][57][59]

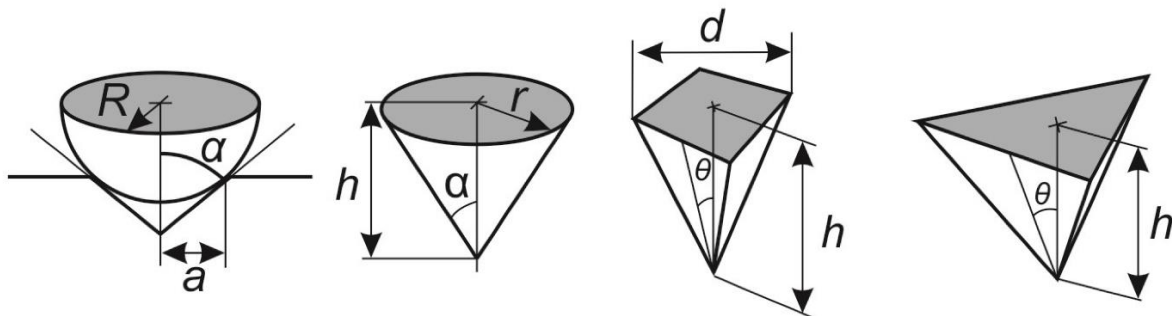
1.5.1 Indentory používané při instrumentovaných zkouškách tvrdosti [55][58][71][72][73]

Hroty indentorů používaných při instrumentovaných zkouškách tvrdosti jsou nejčastěji vyrobeny z diamantu. Přestože jsou velmi tvrdé, jsou rovněž velmi křehké a nesprávnou manipulací může dojít k jejich poškození.

Pro měření tvrdosti za teplot nad 1 000 °C se používají hroty z nitridu křemíku, karbidu křemíku nebo nitrid boru. Pro větší sférické indentory se používá karbid wolframu, jehož vlastnosti se liší především podle obsahu kobaltu. Malé sférické indentory (do průměru 0,5 mm) bývají většinou pouze zaobleným koncem válcového či kuželového indentoru a vyrábějí se ze safiru (oxid hlinitý).

Hodnota modul pružnosti diamantu (v rovnicích označován jako E_{ind}) je ve většině SW vyhodnocující nanoindentační zkoušky nastavena na 1 141 GPa a Poissonovo číslo (v rovnicích označováno jako μ_{mat}) na 0,07.

Z hlediska geometrie lze indentory rozdělit na sférické, válcové, kuželové a pyramidální. Volba vhodné geometrie indentoru pro nanoindentační zkoušku je velmi důležitá. Zatímco „ostré“ indentory (např. Vickersův, Berkovichův či krychlový) jsou vhodné spíše pro zjišťování mechanických vlastností velmi tenkých a tvrdých vrstev, sférické indentory jsou vhodné spíše pro měkčí materiály. Umožňují totiž hladký přechod z elastického na elasticko-plastický kontakt a tím např. zjištění meze kluzu či tuhosti materiálu. Obecně platí, že čím ostřejší je úhel indentoru, tím větší vytváří indentor napětí v materiálu. Zkoušky mikro a nano-tvrdosti jsou obvykle realizovány pomocí pyramidálních indentorů. Různé tvary indentorů jsou znázorněny na Obr. 21









Obr. 21 Geometrie indentorů se zobrazeným průmětem kontaktní plochy [55]

Díky geometrické podobnosti lze kontaktní plochu pyramidálního indentoru přepočítat na kontaktní plochu indentoru kuželového, který je osově symetrický. Plocha průmětu kontaktní plochy se u kuželových indentorů dá vypočítat vztahem:

$$S_{pr} = \pi \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \alpha \quad (19)$$

V Tab. 1 jsou uvedeny výpočty průmětu kontaktní plochy pro další indentory.

Tab. 1 Porovnání geometrie indentorů [55]

Typ indentoru	Průmět kontaktní plochy	Vrcholový polo-úhel	Tvar vtisku
Sférický	$S_{pr} \approx 2 \cdot \pi \cdot R_{ind} \cdot h_p$	–	
Berkovichův	$S_{pr} = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \theta$	65,27°	
Vickersův	$S_{pr} = 4 \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \theta$	68,00°	
Knoopův	$S_{pr} = 2 \cdot h_p^2 \cdot \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2$	$\theta_1 = 86,25^\circ$ $\theta_2 = 65,00^\circ$	
krychlový	$S_{pr} = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \theta$	35,26°	
kuželový	$S_{pr} = \pi \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \alpha$	α	

1.5.1.1 Sfěrický indentor

Na rozdíl od pyramidálních indentorů má sférický indentor výhodu v tom, že u něj nedochází k plastické deformaci v důsledku přítomnosti ostrých hran. Jeho použitím je zajištěn hladký přechod z elastického na elasticko-plastický kontakt. S výhodou se dá použít pro měření měkkých materiálů jako např. guma a plasty. Sfěrické indentory jsou z hlediska výrobních limitů běžně vyráběny jako sféricko-kuželové a poloměr jejich špičky bývá 1-100 μm. Drsnost zkoumaného povrchu má při použití sférických indentorů velký vliv na výsledky nanotvrdostní zkoušky.

Střední kontaktní tlak je u sférického indentoru dán rovnicí:

$$p_{sk} = H = \frac{F}{S_{pr}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D_{pr}^2} \quad (20)$$

D_{pr} je v této rovnici průměr kontaktní plochy při maximálním zatížení. U nanoindentačních zkoušek je obvykle velikost zbytkového vtisku příliš malá na to, aby byla měřitelná běžnými optickými metodami. Místo toho je měřena hloubka vtisku od kontaktní plochy – tzv. plastická hloubka. Plochu kontaktu lze dopočítat díky známé geometrii indentoru. Pro výpočet průmětu kontaktní plochy u sférického indentoru platí rovnice:

$$S_{pr} = \pi \cdot (2 \cdot R_{ind} \cdot h_p - h_p^2) \approx 2 \cdot \pi \cdot R_{ind} \cdot h_p \quad (21)$$

Střední kontaktní tlak určený rovnicí (16) se rovněž označuje jako Meyerova tvrdost H . Navzdory nedostatečnému popisu chování materiálu při zpevňování kovů pracoval Eugen Meyer začátkem 20. století s myšlenou, že proces vtlačování

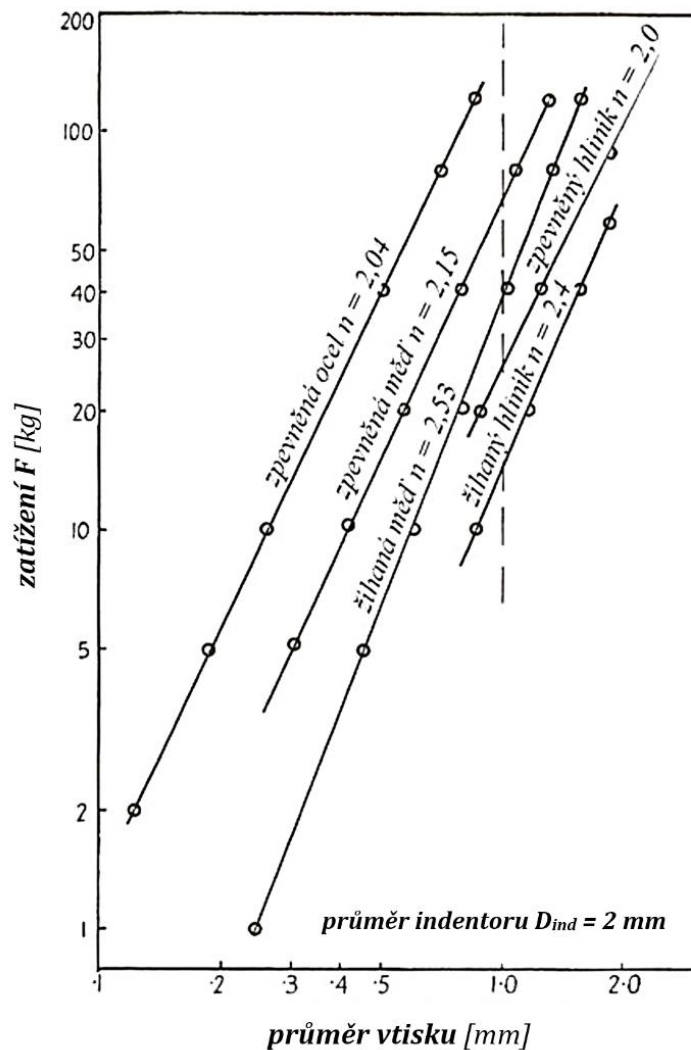
sférického indentoru do povrchu zkoušeného tělesa způsobuje lokální zpevnění materiálu pod jeho povrchem. Svou myšlenku časem sám experimentálně potvrdil (viz Obr. 22) a empirický vztah mezi průměrem vtisku a aplikovaným zatížením byl později nazván Meyerovým zákonem:

$$F = k \cdot d^n, \quad (22)$$

ve kterém značí k konstantu úměrnosti a exponent n tzv. Meyerův index, který je závislý na zpevnění kovu χ a nezávislý na velikosti indentoru. Meyerův index je určen rovnicí:

$$n = \chi + 2 \quad (23)$$

Hodnota n se pohybuje mezi hodnotami 2-2,5. Vyšší hodnoty n odpovídají žilhaným materiálům, nižší hodnoty odpovídají kaleným materiálům.



Obr. 22 Závislost zatěžovací síly na průměru vtisku vytvořeného sférickým indentorem v logaritmických souřadnicích [63]

1.5.1.2 Vickersův indentor

Původní Vickersův indentor byl vytvořen roku 1921 R. L. Smithem and G. E. Sandlandem v britské společnosti Vickers Limited. Jedná se o indentor s geometrií pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým polo-úhlem 68° . Vzhledem k výrobním limitům čtyřstěnu se tento typ indentoru používá především pro zkoušky mikrotvrdomosti. Výrobní nepřesnosti tohoto indentoru by při jeho užití v nanoindentačních zkouškách mohlo způsobovat chyby měření – v místě teoretického ostrého vrcholu pyramidálního indentoru totiž vzniká krátká rovná hrana, která ovlivňuje výsledky.

Průmět kontaktní plochy je u toho indentoru vyjádřen vztahem:

$$S_{pr} = 4 \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 68^\circ = 24,504 \cdot h_p^2 \quad (24)$$

Tradičně je Vickersova tvrdost počítána podle rovnice:

$$HV = \frac{2 \cdot F}{d^2} \sin \frac{136^\circ}{2} = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (25)$$

ve které je d rovno délce úhlopříčky měřené od rohu k rohu vtisku na povrchu vzorku a F síla v kp ($1 \text{ kp} = 9,806 \text{ N}$). Pro výpočet středního kontaktního tlaku vyvolaného Vickersovým indentorem platí:

$$p_{sk} = H = 2 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (26)$$

Pro převod Vickersovy a Meyerovy tvrdosti platí vztah:

$$HV = 94,5 \cdot H, \quad (27)$$

kde je hodnota Meyerovy tvrdosti H vyjádřena v GPa.

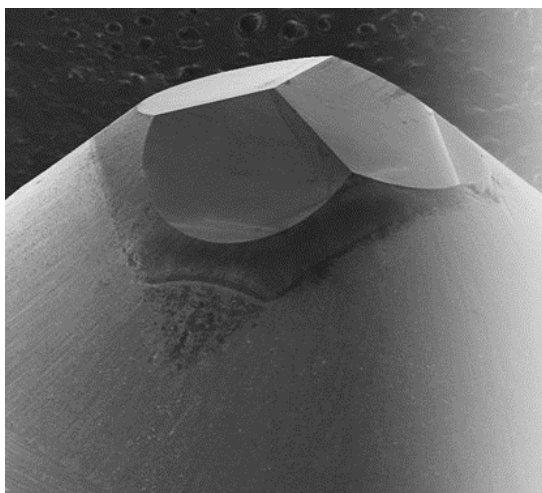
1.5.1.3 Berkovichův indentor

Původní Berkovichův indentor byl vytvořen roku 1950 ruským vědcem E.S. Berkovichem. Jedná se o indentor s geometrií pravidelného trojbokého jehlanu s vrcholovým polo-úhlem $65,0333^\circ$. Hlavním důvodem pro návrh tohoto indentoru byla problematická výroba Vickersova indentoru ve velmi malém měřítku. Díky svému tvaru je tento indentor rovněž méně citlivý na nárazy a neopatrné zacházení než Vickersův indentor. Reálný hrot Berkovichova indentoru je znázorněn na Obr. 23.

Původní Berkovichův indentor byl navržen tak, aby měl stejný poměr průmětu kontaktní plochy k indentační hloubce jako Vickersův indentor. Později byla

vytvořena ještě modifikovaná varianta tohoto indentoru s vrcholovým polo-úhlem $65,27^\circ$. V praxi se používá především tato modifikovaná varianta.

Poloměr zaoblění špičky u nových indentorů bývá 50 až 100 nm. Používáním se může tento poloměr zvětšit až na 200 nm.



Obr. 23 Hrot Berkovichova indentoru

Průmět kontaktní plochy u Berkovichova indentoru je dán vztahem:

$$S_{pr} = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_p^2 \cdot \tan^2 \theta \quad (28)$$

Dosazením hodnoty $\theta = 65,27^\circ$ (pro modifikovaný Berkovichův indenter) do rovnice (24) dostaneme tvar:

$$S_{pr} = 24,494 \cdot h_p^2 \approx 24,5 \cdot h_p^2 \quad (29)$$

Střední kontaktní tlak (Meyerova tvrdost) je následně dán vztahem:

$$p_{sk} = H = \frac{F}{24,5 \cdot h_p^2} \quad (30)$$

1.5.1.4 Krychlový (cube-corner) indenter

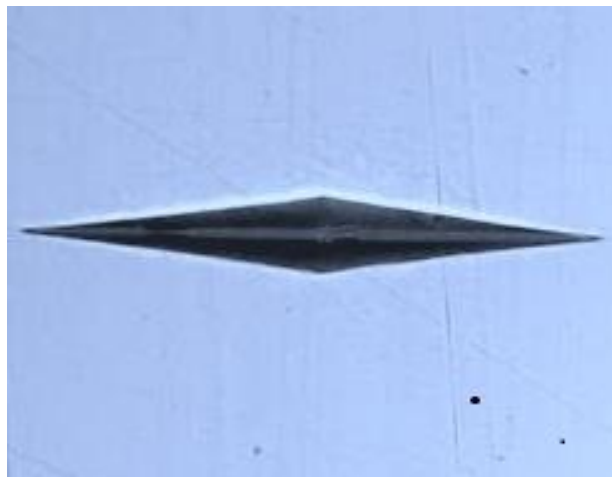
Špička tzv. cube-corner indentoru tvarově odpovídá rohu krychle. Vrcholový polo-úhel tohoto indentoru je $35,26^\circ$. Jedná se o jeden z nejostřejších indentorů. Poloměr zaoblění jeho špičky bývá kolem 30 nm. Používá se především pro zjišťování vlastností velmi tenkých povlaků (do 20 nm). Svou geometrií totiž dokáže i při velmi malém zatížení vytvořit plastickou deformaci. Další možnosti použití tohoto typu indentoru jsou pro měření opotřebení, scratch či pro analýzu lomu chování především kompozitních materiálů.

1.5.1.5 Knoopův indentor

Původní Knoopův indentor byl vytvořen v USA roku 1939 Frederickem Knoopem a jeho kolegy v National Bureau of Standards. Obdobně jako u Vickersova indentoru se jedná se o indentor pyramidálního tvaru s tím rozdílem, že jeho základnou není čtverec, ale protáhlý kosočtverec. Vtisk má tvar kosočtverce s poměrem úhlopříček 1:7,11 a měří se u něho pouze delší rozměr úhlopříčky. Vrcholové polo-úhly tohoto indentoru jsou $86,25^\circ$ a $65,00^\circ$.

Knoopův indentor se používá především pro měření velmi tvrdých materiálů, protože rozměry vtisku (viz Obr. 24) jsou snadněji měřitelné v porovnání s rozměry vtisku vytvořených Vickersovým či sférickým indentorem. Vzhledem ke své geometrii a malé hloubce průniku je používán hlavně pro měření povlaků např. u cementování či nitrídování v oblasti mikrotvrlosti. Tato metoda zdomácněla především v USA.

Při indentaci elastických materiálů je pozorován značný rozdíl u rozměrů krátké úhlopříčky při plném zatížení a úplném odlehčení. Dochází zde k výraznému odpružení materiálu, které je u dlouhé úhlopříčky zanedbatelné.



Obr. 24 Ukázka vtisku vytvořeného Knoopovým indentorem [72]

Knoopovo číslo tvrdosti je vypočteno poměrem zatížení vůči průmětu kontaktní plochy:

$$KHN = \frac{2 \cdot F}{a^2 \cdot \left[\cot \frac{172,5^\circ}{2} \cdot \tan \frac{130^\circ}{2} \right]} \quad (31)$$

Průmět kontaktní plochy je určen rovnicí:

$$S_{kont} = 2 \cdot h_p^2 \cdot \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 \quad (32)$$

1.5.2 Faktory ovlivňující přesnost měření [55][59][70]

Oproti konvenčním způsobům tvrdosti je měření tvrdosti indentační zkouškou založeno na přesném vyhodnocení zatěžující síly a indentační hloubky. Ačkoliv se výrobci zařízení pro měření tvrdosti metodou DSI snaží co nejvíce eliminovat vlivy prostředí a zpřesňovat systém měření, bývají reálná měření často ovlivněna různými faktory, které lze rozdělit do dvou skupin.

První skupinu tvoří *vnější faktory*, které zohledňují vlastností měřicího zařízení a okolní podmínky. Těmito faktory jsou například kolísání teploty, tuhost měřicího zařízení, skutečná geometrie hrotu indentoru, určení výšky povrchu nebo nakloněná rovina indentace.

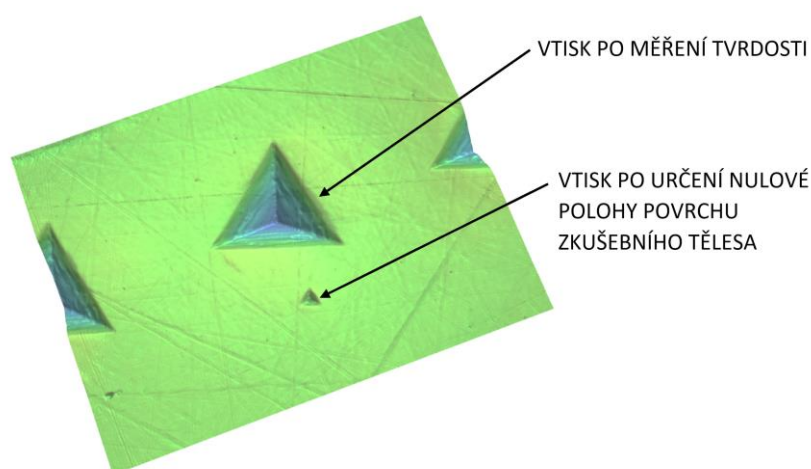
Druhou skupinu tvoří *vnitřní faktory*, do kterých patří vlastnosti zkušebního tělesa a jeho povrchu. Těmito faktory jsou například tvar vtisku (pile-up efekt, sink-in efekt), jakost povrchu měřeného vzorku, vliv velikosti vtisku (ISE), či zbytkové napětí v povrchu vzorku.

Hlavní faktory ovlivňujících měření budou v této kapitole podrobněji popsány.

1.5.2.1 Určení nulové polohy povrchu vzorku

Určení nulové polohy indentoru je jedním z nejdůležitějších parametrů celého měření. Jedná se o teoretický bod na povrchu měřené plochy, ve kterém dochází ke kontaktu indentoru s povrchem zkušebního tělesa.

Ideální případ určení nulové polohy povrchu tělesa před měřením by byl takový kontakt indentoru s povrchem zkušebního tělesa, který by nezpůsobil žádnou trvalou deformaci (vtisk) v jeho povrchu. V praxi se však nulová poloha povrchu vzorku běžně určuje tak, že indentor pronikne do povrchu materiálu při nejmenším možném zatížení, které je měřicí přístroj schopen vyvinout (řádově se jedná o jednotky μN). Minimální hloubka průniku indentoru je pak označena jako výchozí a následující změřená hloubka bude počáteční hloubkou ovlivněna. Měření nulové polohy probíhá v těsné blízkosti místa měření tvrdosti (viz Obr. 25).



Obr. 25 Ukázka vtisků po indentační zkoušce tvrdosti

1.5.2.2 Geometrie indentoru

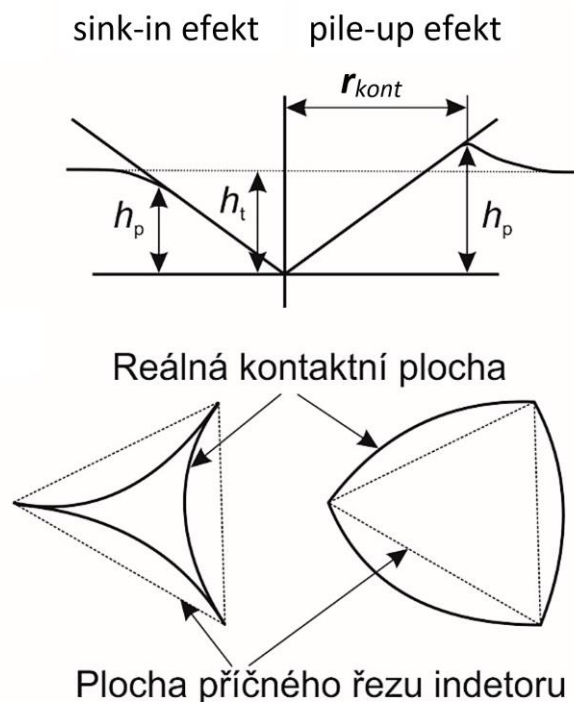
Skutečná geometrie hrotu je jedním z důležitých faktorů ovlivňujících výsledky indentačního měření. Veškeré analýzy a matematické modely indentačního procesu předpokládají ideální tvar hrotu indentoru, který je však v praxi téměř nevyrobitelný. Odchytky od ideálního tvaru indentoru jsou způsobeny technologickými limity výroby (na špičce hrotu nevzniká bod, ale miniaturní kulový vrchlík), opotřebením vlivem velkého počtu měření, v případě diamantových indentorů i anizotropií krystalu a v neposlední řadě i případným narušením povrchu hrotu.

Jedním z parametrů pro určení tvrdosti metodou DSI je projekční plocha určená z maximální indentační hloubky. Jakákoliv odchylka hrotu od ideální geometrie ovlivňuje geometrii vtisku, a tím pádem i průmět vtiskové plochy.

Vliv odchylek geometrie hrotu je pozorován zejména při měření s malými zatěžujícími silami, při kterých je dosahováno velmi malých indentačních hloubek. Při použití vyšších zatěžujících sil již nedochází k výraznějšímu ovlivnění naměřených hodnot.

1.5.2.3 Pile-up a Sink-in efekt

V okolí vtisku mohou vzniknout dva základní typy deformací, které jsou označovány jako pile-up efekt a sink-in efekt. Oba tyto efekty jsou znázorněny na Obr. 26.



Obr. 26 Pile-up a sink-in efekt v materiálu při použití Berkovichova indentoru [55]

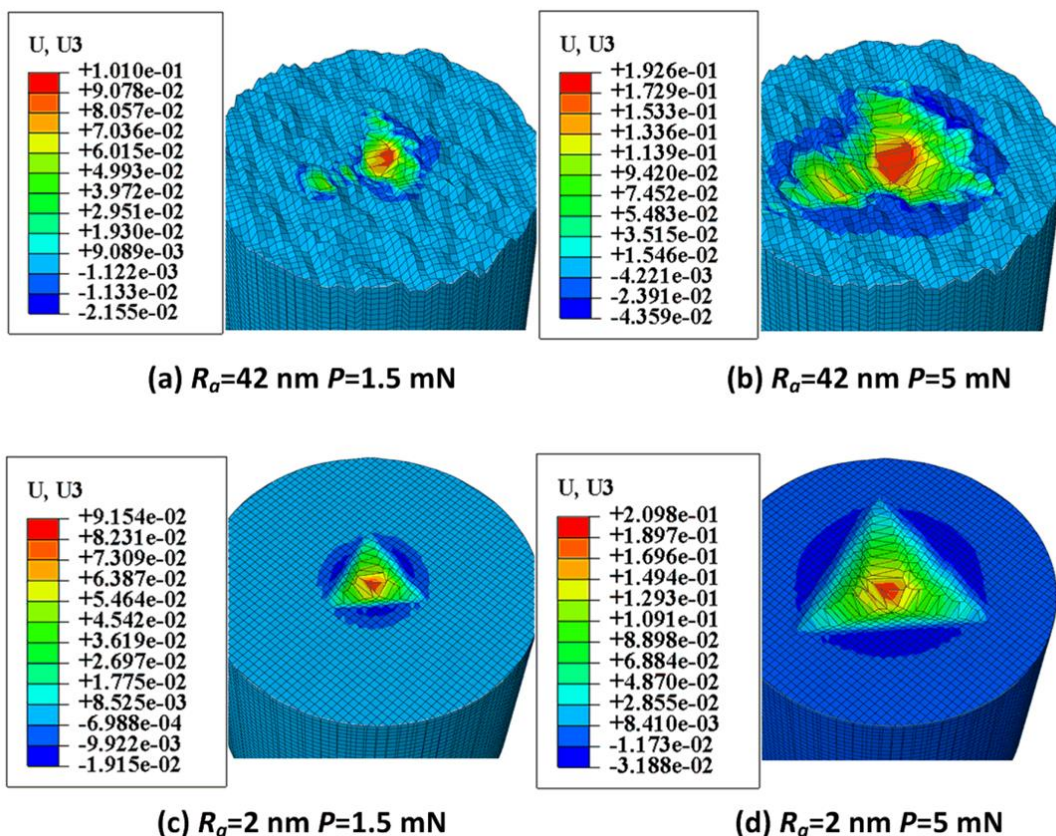
Sink-in efekt vzniká, pokud při indentační zkoušce dochází pouze k elastické deformaci, při které je materiál vtažen do místa vtisku.

U kovových materiálů většinou dochází k opačnému jevu, kdy je materiál vytlačen nad rovinu zkušebního tělesa. Tento efekt se označuje jako pile-up. Oba tyto efekty mají výrazný vliv na správné určení plochy vtisku a jejího kontaktního poloměru. Analýza dat z indentačních zkoušek dle Olivera a Pharra předpokládá čistě elastický kontakt, u něhož dochází pouze k efektu sink-in. Vyskytne-li se při měření tvrdosti materiálu pile-up efekt, může být reálná velikost průmětné plochy negativně ovlivněna. V extrémních případech může pile-up efekt snížit velikost skutečné průmětné plochy až o 60%.

1.5.2.4 Drsnost měřeného povrchu

Při konvenčních zkouškách tvrdosti má drsnost povrchu zkušebního tělesa na výsledky zanedbatelný vliv. Rozměr a hloubka vtisku totiž několikanásobně přesahují velikost povrchových nerovností. V oblasti nanoindentačních zkoušek však má drsnost povrchu důležitý vliv.

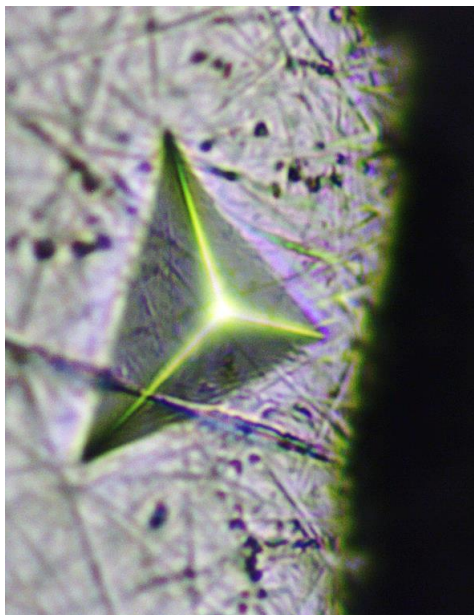
Důsledkem povrchových nerovností dochází k nerovnoměrnému kontaktu mezi indentorem a povrchem zkušebního tělesa. Dochází k nárůstu lokálního napětí pod špičkou indentoru a materiál se deformuje do větších hloubek při relativně nízkém zatížení. Při použití sférických indentorů má jakost povrchu daleko větší vliv na výslednou velikost hodnoty tvrdosti než při použití kuželových indentorů. Matematický výpočet vlivu drsnosti na rozložení kontaktního tlaku je znázorněn na Obr. 27



Obr. 27 Vliv drsnosti povrchu na rozložení kontaktního tlaku pod indentorem [66]

1.5.2.5 Vliv nakloněné roviny indentace

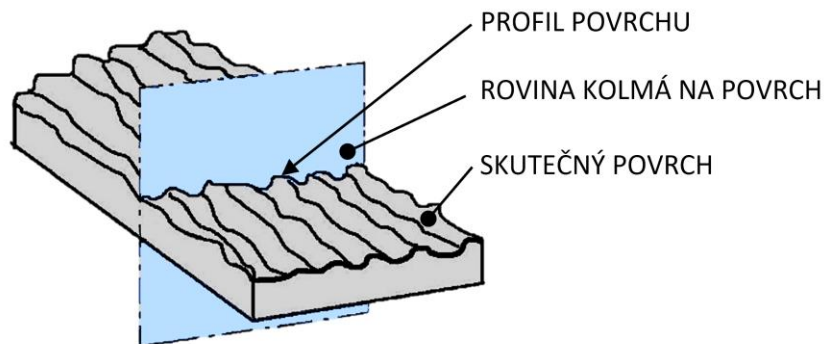
Pokud se tvar skutečné kontaktní roviny liší oproti předpokládané, ideálně rovinné ploše, může docházet k chybám měření. Průnik indentoru do nakloněné roviny může vyvolávat ve zkušebním tělese vznik asymetrických sil a napětí, které nepříznivě ovlivňují naměřené hodnoty. V případě indentace do nakloněné indentační roviny rovněž dochází k deformaci vtisku, která je znázorněná na Obr. 28.



Obr. 28 Vliv nakloněné indentační roviny na geometrii výsledného vtisku

1.6 Měření drsnosti

Drsnost je obecně definována jako soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě. Podle určení a funkčnosti ploch je na povrch výrobku kladen určitý požadavek dodržení drsnosti. Drsnost povrchu je jedním ze sledovaných parametrů pro celkové hodnocení jakosti povrchu, která velmi výrazně ovlivňuje spolehlivost a životnost strojních součástí. Na drsnosti závisí přesnost chodu strojů a mechanismů, odolnost proti opotřebení či únavová pevnost. Z těchto důvodů je nutné drsnost povrchu kontrolovat a optimalizovat pomocí změn procesních parametrů. Po obrábění či řezání vznikají na opracovaném povrchu nerovnosti, které lze velmi obtížně definovat a posoudit. Posuzování těchto nerovností (drsnosti) se řeší redukcí do roviny řezu kolmé na povrchu. Schéma redukce profilu do roviny řezu je znázorněné na Obr. 29. V této rovině je získán profil, který je základním zdrojem informací pro vyhodnocení struktury povrchu.[67][68]



Obr. 29 Princip získání profilu pro měření drsnosti [69]

Nerovnost povrchu je členěna podle velikosti rozteče příslušných nerovností na jednotlivé složky:

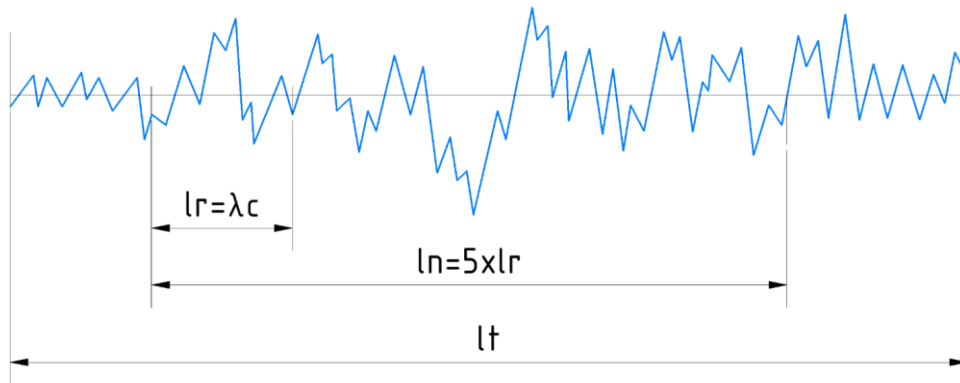
- **drsnost povrchu:** složka s nejmenší roztečí
- **vlnitost povrchu:** složka se „střední“ roztečí nerovností určenou základním profilem.
- **tvar povrchu:** složka s největší roztečí nerovností určenou základním profilem.

K hodnocení struktury povrchu se využívají normalizované parametry určené pro dvourozměrné měření. Dle normy ČSN EN ISO 4287 [69] jsou rozděleny do tří skupin:

- **P – parametr:** parametr, který je vypočítán ze základního profilu
- **W – parametr:** parametr, který je vypočítán z profilu vlnitosti
- **R – parametr:** parametr, který je vypočítán z profilu drsnosti

Základní délka drsnosti l_r – délka ve směru osy x použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti (Obr. 30)

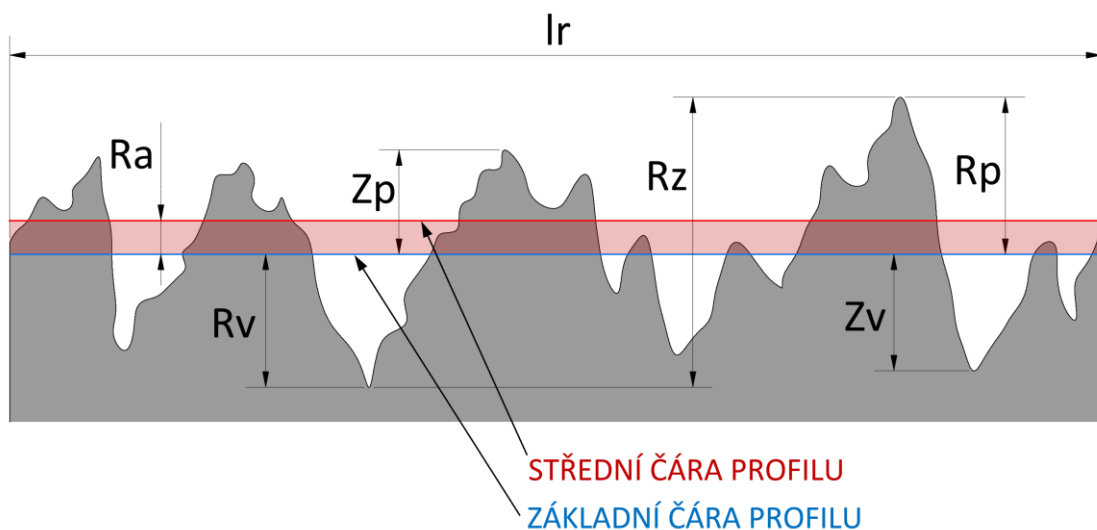
Vyhodnocovací délka l_n – je délka ve směru osy x použitá pro hodnocení posuzovaného profilu (Obr. 30)



Obr. 30 Základní a vyhodnocovací délka drsnosti [69]

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice R – parametru profilu (viz Obr. 31):

- Největší výška výstupků profilu drsnosti **R_p** – je výška nejvyššího výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky.
- Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti **R_v** – je hloubka nejnížší prohlubně profilu Z_v v rozsahu základní délky.
- Největší výška profilu drsnosti **R_z** – je součet výšky nejvyššího výstupku profilu Z_p a hloubky nejnížší prohlubně profilu Z_v v rozsahu základní délky.
- Průměrná aritmetická úchylka profilu **R_a** – udává průměrnou aritmetickou hodnotu výšek profilu drsnosti v rozsahu základní délky l_r .



Obr. 31 Parametry profilu drsnosti povrchu R_p , R_v , R_z a R_a [69]

Geometricky lze parametr R_a vyjádřit jako výšku obdélníku sestrojeného na střední čáře profilu, který má stejnou plochu jako součet ploch všech nerovností profilu od základní čáry. Jde tedy o výškový parametr, který udává střední hodnotu vzdáleností zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. Jedná se o statistickou hodnotu, a proto není pro hodnocení povrchu vždy efektivní. Někdy mohou mít dva povrchy se stejnou hodnotou R_a zcela odlišný tvar profilu, ale také rozdílné chování z hlediska funkčnosti, životnosti nebo tření. Definice parametru R_a totiž při výpočtu nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi - zjištěné odchylky zpracovává v absolutních hodnotách. [67][68]

I přes tato omezení je parametr R_a jedním z nejpoužívanějších pro hodnocení povrchu a kvůli poměrně snadnému a opakovatelnému měření se používá pro předepisování drsnosti povrchu na výkresech. [67][68]

2 CÍL PRÁCE

Cílem dizertační práce je studium vlivu způsobu dělení materiálů na jejich vlastnosti, zejména na změny vlastností v okolí řezu. Pro účely práce byli vybráni zástupci ocelí s odlišnými vlastnostmi, u nichž byl posuzován vliv způsobu dělení (řezání plazmou, laserem, vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním) na míru tepelného ovlivnění místa řezu a drsnost řezné plochy.

Postup při řešení disertační práce:

- **Příprava zkušebních těles**
 - výběr vhodných typů ocelí
 - stanovení geometrie zkušebního tělesa
 - volba metod dělení materiálu
 - výroba zkušebních těles
 - příprava metalografických výbrusů
- **Měření definovaných vlastností**
 - měření tvrdosti metodou DSI
 - metalografická analýza materiálu
 - měření parametrů drsnosti
- **Statistické vyhodnocení naměřených dat**
- **Porovnání naměřených hodnot a určení možných korelací**

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Disertační práce se zabývá měřením mikro-mechanických vlastností a drsnosti materiálů v místě řezů u vzorků vyhotovených různými způsoby dělení – řezáním laserem, plazmou, vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním. Hlavními zkoumanými parametry v této práci jsou tvrdost TOO, velikost TOO a drsnost plochy v místě řezu.

Přípravné práce se zabývaly především výrobou zkušebních těles pomocí vhodných technologií dělení a následnou přípravou metalografických výbrusů.

Ke zjištění mikro-mechanických vlastností TOO a kvantifikaci její velikosti bylo zvoleno měření tvrdosti metodou DSI.

Pro posouzení získaných výsledků byla zvolena optická analýza metalografických výbrusů.

Ke stanovení drsnosti rezných ploch bylo využito bezkontaktní měření pomocí laserového skenovacího mikroskopu.

3.1 Příprava zkušebních těles

3.1.1 Výběr vhodných typů ocelí

Ve spolupráci s dodavateli zkušebních těles bylo na základě analýzy realizovaných zakázek za roky 2017 a 2018 zvoleno několik zástupců průmyslově běžně používaných ocelí různého chemického složení a mechanických vlastností. Polotovarem pro výrobu zkušebních těles byly plechy z vybraných materiálů o tloušťkách 5, 10 a 15 mm.

- **Ocel 1.0553 (dle ČSN 11 523)**

Jedná se o nízko-uhlíkovou, nelegovanou konstrukční jemnozrnnou jakostní ocel vhodnou ke svařování. Je určena pro všeobecné technické použití - na mostní konstrukce, ohýbané profily, svařované konstrukce z dutých profilů či součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Ocel má zaručenou hodnotu nárazové práce při -20°C . Chemické složení této oceli je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2 Chemické složení oceli 1.0553

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	N [max. %]
0,20	1,60	0,55	0,030	0,030	0,012

- **Ocel 1.7102 (dle ČSN 14 260)**

Jedná se o středně-uhlíkovou pružinovou ocel s obtížnou svařitelností. Používá se pro výrobu zvláště namáhaných pružin pro automobily a železniční vozy, rovinných součástí vyžadující odolnost proti opotřebení (obložení aktivních částí stavebních a zemědělských strojů) či dlouhých čepelí jako jsou meče, mačety nebo bojové nože. Ocel se 1.7102 je často dodávána ve vyžíhaném stavu, není rovnaná a může se na ní vyskytovat koroze. Tepelně a mechanicky zpracované plechy mají vysokou pevnost, tvrdost a otěruvzdornost, obrobiteľnosť a tvarovateľnosť je však obtížná. Chemické složení oceli 1.7102 je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Chemické složení oceli 1.7102

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	Cr [max. %]	Ni [max. %]	Cu [max. %]
0,60	0,80	1,60	0,035	0,035	0,70	0,5	0,30

- **1.4301 (dle ČSN 17 420)**

Jedná se o základní korozivzdornou austenitickou ocel běžně obsahující cca 18 % chromu a cca 10 % niklu. Ocel 1.4301 je nemagnetická, má nízkou tepelnou vodivost a vynikající odolnost proti korozi ve vodním prostředí a ovzduší bez koncentrace chloridů, anorganických kyselin a solí. Svařitelnost této oceli je zaručena. Provozní teploty výrobků z této oceli jsou až 350 °C. Ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti i při extrémně nízkých teplotách. Použití nachází v potravinářském, farmaceutickém či kosmetickém průmyslu, hojně se však využívá i v průmyslu stavebním a bytové architektuře. Chemické složení oceli 1.4301 je uvedeno v Tab. 4.

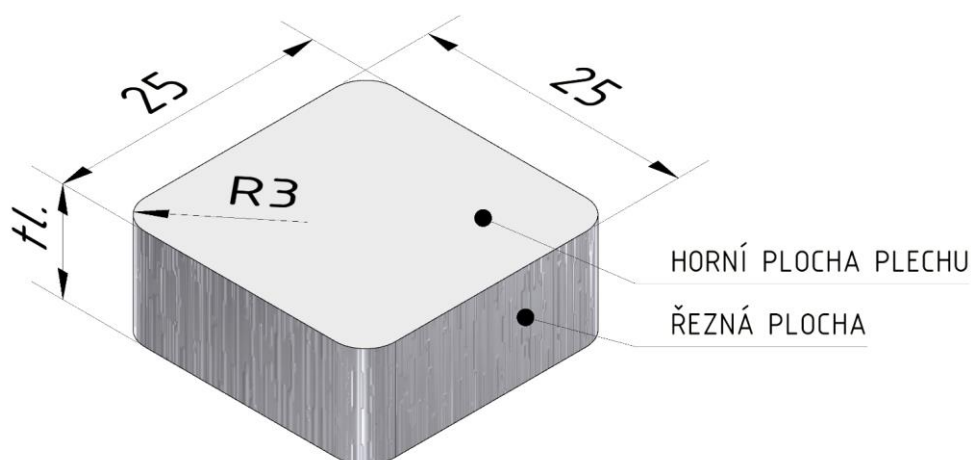
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301

C [max. %]	Mn [max. %]	Si [max. %]	P [max. %]	S [max. %]	Cr [max. %]	Ni [max. %]
0,07	2,00	1,00	0,045	0,030	19,50	10,5

3.1.2 Stanovení geometrie zkušebního tělesa

Rozměr zkušebního tělesa byl zvolen s ohledem na rozměr teplotní komory lisovacího zařízení pro výrobu metalografických vzorků a pracovní prostor nano-tvrdoměru, na kterém bude probíhat měření. Průměr dutiny lisovacího zařízení je 30 mm. Zkušební těleso má čtvercovou základnu o délce hrany 25 mm. Výška zkušebního tělesa odpovídá tloušťce plechu, ze kterého je vyrobeno. V práci byly použity plechy o tloušťce 5, 10 a 15 mm. U některých nekonvenčních technologií je obecným problémem výroba ostrých hran. Z tohoto důvodu bylo zvoleno

zaoblení ostrých rohů čtvercového profilu $R = 3$ mm. Rozměry zkušebního tělesa jsou uvedeny na Obr. 32.



Obr. 32 Rozměr zkušebního tělesa

3.1.3 Volba metod dělení materiálů

Pro výrobu zkušebních těles byli zvoleni čtyři zástupci nejběžnějších nekonvenčních technologií dělení materiálu. Jedná se o řezání laserem, plazmou, vodním paprskem s abrazivem a elektroerozivní drátové řezání.

Při řezání laserem a plazmou je materiál v místě řezu odebírán paprskem koncentrované energie. Plazmový paprsek má na místě výstupu z hubice teplotu přes $20\,000\text{ °C}$. V místě řezu se předpokládá vznik TOO.

Elektroerozivní drátové řezání je technologie, při níž se materiál odebírá drobnými, periodicky se opakujícími elektrickými výboji mezi obrobkem a elektrodou v kapalném dielektriku. Při výbojích dochází lokálně k dosažení teplot až $12\,000\text{ °C}$. Svým principem se elektroerozivní drátové řezání řadí k nekonvenčním technologiím využívající tepelného principu. V místě řezu se tedy předpokládá vznik TOO.

Řezání vodním paprskem s abrazivem využívá pro odběr materiálu kinetickou energii vysokotlakého vodního paprsku vystupujícího z trysky cca trojnásobkem rychlostí zvuku. V místě řezu dochází vlivem přeměny části kinetické energie vody a částic abraziva na energii tepelnou k lokálnímu zvýšení teploty o cca $20\text{--}30\text{ °C}$. Jedná se o tzv. studený řez, při kterém nedochází ke vzniku TOO. Měření tvrdosti provedené na zkušebních tělesech vyrobených touto technologií bude sloužit jako komparační pro určení tvrdosti základního materiálu. Jeho cílem bude rovněž ověření, zda nedochází v blízkosti řezu k mikro-plastické deformaci, která by se projevila zvýšením tvrdosti.

Velikost TOO a kvalita řezné plochy je určena především volbou optimálních procesních parametrů pro konkrétní typ a tloušťku materiálu. Při výrobě zkušebních těles byly u všech technologií dělení voleny běžně komerčně používané

procesní parametry vycházející z tzv. technologických tabulek. Ty jsou vytvářeny empiricky pro konkrétní materiály a tloušťky plechů přímo dodavatelem technologie a bývají často implementovány do programů, které tvoří CNC program řezání. V práci tedy nebude sledován vliv změny procesních parametrů na kvalitu řezu či hloubku TOO, ale vliv běžně používaných parametrů v komerčním provozu.

3.1.4 Výroba zkušebních těles

Polotovary pro výrobu zkušebních těles byly standardně dodávané plechy z materiálů 1.0553 (dle ČSN 11 523), 1.7102 (dle ČSN 14 260) a 1.4301 (dle ČSN 17 420) v tloušťkách 5, 10 a 15 mm. Povrch plechů nebyl nijak speciálně ošetřen a před dělením nebyl čištěn či odmašťován. Výroba zkušebních těles probíhala za běžných průmyslových podmínek.

Z každého polotovaru byla vyrobena tři zkušební tělesa. Jedno těleso bude sloužit pro měření tvrdosti TOO a pro metalografickou analýzu vnitřní struktury, druhé pro vyhodnocení drsnosti řezné hrany a třetí pro komparační měření na jiném tvrdoměru či kontrolní doměření v případě znehodnocení vzorku. Z důvodu minimálního ovlivnění místa řezu sousedním řezem byla při dělení laserem a plasmou předepsána minimální vzdálenost mezi vyráběnými zkušebními tělesy 20 mm.

3.1.4.1 Řezání laserem

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání laserem byla vyrobena pomocí CO₂ laseru na zařízení Trumpf TruLaser 3030. Procesní parametry (viz Tab. 5) vycházely z knihovny stroje. Pro všechny tloušťky a materiály plechů byl nastaven stejný výkon laseru 3200 W, jediným proměnlivým parametrem při řezání byla rychlost posuvu.

Tab. 5 Procesní parametry při řezání laserem

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[m/min]	3,1 / 1,8 / 1,1			3,1 / 1,8 / 1,1			2,1 / 0,4 / 0,1		
výkon laseru	[W]	3200			3200			3200		

3.1.4.2 Řezání plasmou

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání plasmou byla vyrobena na CNC pálicím stroji Kjellberg pomocí plazmového invertoru HiFocus 80i, který je vhodný pro řezání všech elektricky vodivých materiálů v rozsahu tlouštěk 5 – 25 mm. Procesní parametry (viz Tab. 6) vycházely z knihovny stroje.

Tab. 6 Procesní parametry při řezání plazmou

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[m/min]	3,5 / 2,3 / 1,2			3,5 / 2,3 / 1,2			3,5 / 2,3 / 1,2		
elektrický proud	[A]	50 / 80 / 80			50 / 80 / 80			50 / 80 / 80		

3.1.4.3 Řezání vodním paprskem s abrazivem

Zkušební tělesa pro určení vlivu řezání vodním paprskem byla vyrobena na zařízení Flow WaterJet Mach 4020c. Procesní parametry (viz Tab. 7) vycházely z knihovny stroje a byly shodné pro všechny materiály i jejich tloušťky.

Tab. 7 Procesní parametry při řezání vodním paprskem s abrazivem

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
tlak vody	[MPa]	380			380			380		
rychlost posuvu	[mm/min]	320 / 150 / 60			320 / 150 / 60			320 / 150 / 60		
průtok abraziva	[kg/min]	0,45			0,45			0,45		
zrnitost abraziva	[μm]	150-300			150-300			150-300		

3.1.4.4 Elektroerozivní drátové řezání

Zkušební tělesa pro určení vlivu elektroerozivního drátového řezání byla vyrobena na zařízení FANUC ROBOCUT α -CiB. Použitý drát byl z mosazi o průměru 0,25 mm. Jako dielektrická kapalina byla použita deionizovaná destilovaná voda. Procesní parametry (viz Tab. 8) vycházely z knihovny stroje.

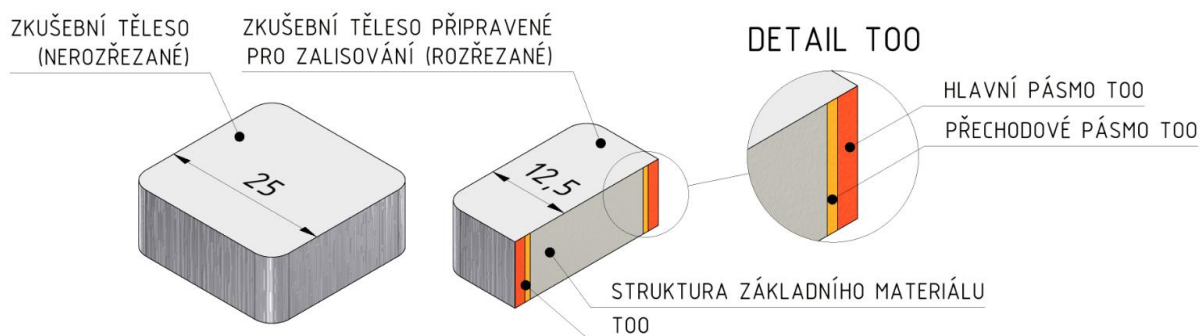
Tab. 8 Procesní parametry při elektroerozivním drátovém řezání

nastavitelný parametr	jednotky	materiál								
		1.0553			1.7102			1.4301		
		5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm	5 mm	10 mm	15 mm
rychlost posuvu	[mm/min]	12 / 9 / 6			12 / 9 / 6			12 / 9 / 6		
průměr drátu	[mm]	0,25			0,25			0,25		
počet řezů	[-]	1			1			1		
volba materiálu	[-]	ocel			ocel			nerez		

3.1.5 Příprava metalografických vzorků a výbrusů

Povrch pro měření tvrdosti metodou DSI musí svou kvalitou odpovídat metalografickému výbrusu. K jeho zhotovení byly využity všechny standardní operace přípravy metalografických vzorků.

Na vyrobených zkušebních tělesech však bylo nejprve nutné vytvořit řez, který by měření mechanických vlastností TOO a následnou optickou analýzu umožnil (viz Obr. 33). Všechna zkušební tělesa byla rozřezána diamantovým řezným kotoučem na metalografické rozbrušovací pile Buehler IsoMet 4000 v cca polovině své délky (12,5 mm od řezné hrany). Otáčky řezného kotouče byly nastaveny na 1800 ot/min a posuv řezného kotouče byl nastaven na 16 mm/min. Místo řezu bylo intenzivně chlazeno vodní sprchou, aby bylo zabráněno jakémukoliv možnému tepelnému ovlivnění způsobenému řezáním. Při řezání zkušebního tělesa nebyl zohledňován směr vláken v materiálu. Byl však dbán důraz na to, aby zápal či místo vniku paprsku do materiálu vždy ležely mimo tuto oblast.



Obr. 33 Schéma vnitřní struktury zkušebního tělesa s TOO a základním materiálem

Po rozřezání byla zkušební tělesa na lisovacím zařízení Buehler SimpliMet 1000 za tepla zalisována do lisovací hmoty PhenoCure. Zkušební těleso bylo do prostoru lisovací komory umístěno tak, aby rozřezaná plocha (plocha, na které bude měřena tvrdost a zkoumána struktura) ležela na jejím dnu. Lisování vzorků bylo provedeno za tlaku 29 MPa a teploty 150 °C. Čas ohřevu lisovací hmoty byl nastaven na 90 s, čas ochlazování na 240 s.

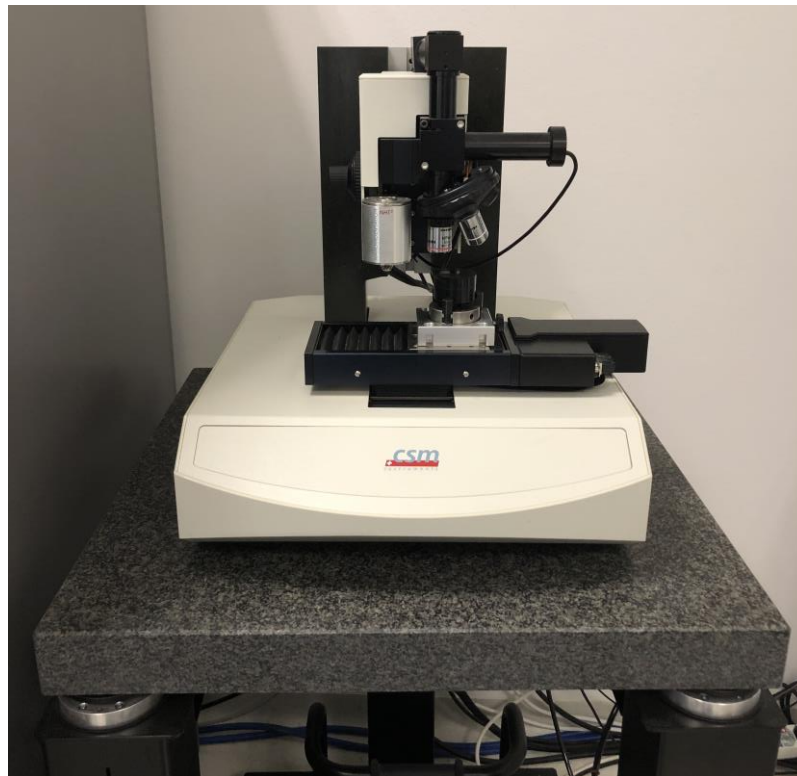
Následné broušení a leštění zalisovaných zkušebních těles probíhalo na leštičce Buehler EcoMet 250. Pro broušení a leštění byla použita různá brusná plátna s postupně zvyšující se zrnitostí (180, 320, 600 a 1200). Přítlačná síla vzorků byla při broušení nastavena na 30 N, otáčky hlavy lešticího přístroje na 40 ot/min a otáčky brusného plátna na 100 ot/min. Z každého zkušebního tělesa bylo broušením odebráno cca 0,5 mm materiálu. Pro finální zaleštění vzorků bylo použito textilní plátno v kombinaci s diamantovou pastou CAMEO s velikostí zrn 9 μm a následně 3 μm .

3.2 Měření definovaných vlastností

3.2.1 Měření tvrdosti TOO

Tvrdot TOO byla měřena metodou DSI dle normy ČSN EN ISO 14577-1 [54] na nanotvrdoměru TTX-NHT2 od společnosti CSM Instruments (Obr. 34).

Jako vnikací těleso byl použit indentor typu Berkovich. Vyhodnocení naměřených údajů bylo provedeno metodou Oliver & Pharr. Hlavními sledovanými výsledky indentační zkoušky byly indentační tvrdost HV_{IT} a maximální indentační hloubka h_{max} .



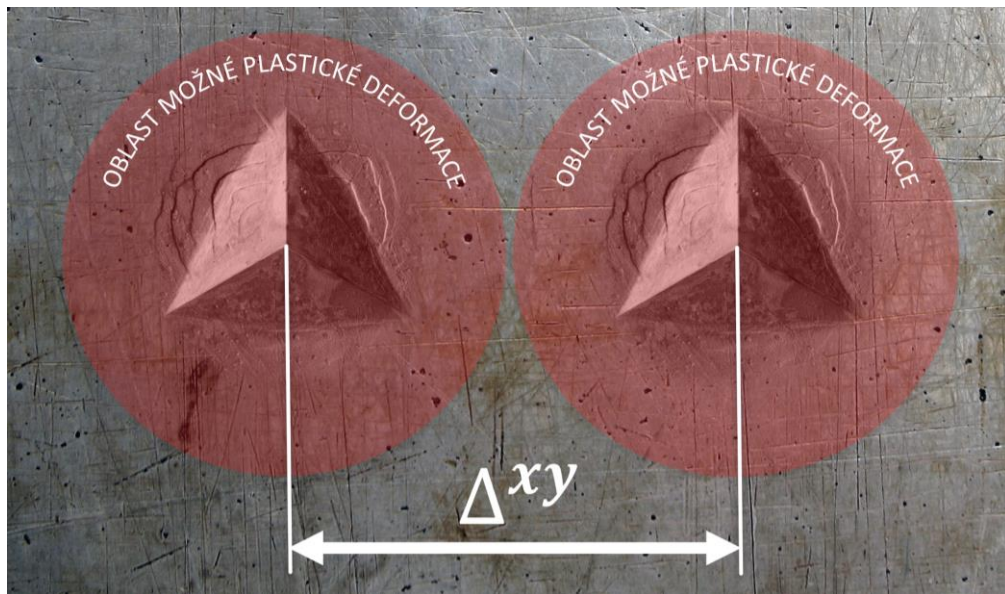
Obr. 34 Nanotvrdoměr TTX-NHT2

Volitelné parametry instrumentované indentační zkoušky byly s ohledem na doporučení uvedená v normě ČSN EN ISO 14577-1 nastaveny následovně:

- maximální aplikované zatížení: 500 mN
- výdrž na maximálním zatížení: 15 s
- zatěžující a odtěžující rychlost: 1 N/min.

Ke zjištění tvrdosti a velikosti TOO bylo použito maticové měření. Pro minimální vzdálenost mezi dvěma vtisky (znázorněno na Obr. 35) platí kvůli ovlivnění plastickou deformací již vytvořeného vtisku obecné doporučení:

$$\Delta^{xy} > 30 \cdot h_{max} \quad (29)$$



Obr. 35 Definice minimální vzdálenosti dvou sousedních vtisků

Před definováním minimální vzdálenosti mezi jednotlivými kroky měřicí matice je tedy nutné vytvořit vtisk stejným zatížením, které bude nastaveno v této matici jako maximální aplikované. Z maximální dosažené hloubky vtisku lze odvodit nejmenší doporučený krok.

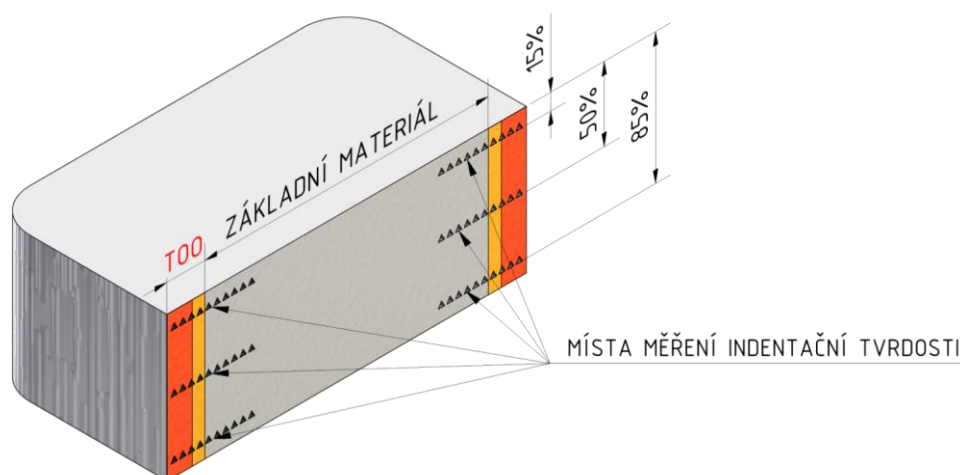
V přípravných pracích před zahájením samotného měření tvrdosti na zkušebních tělesech byl proveden experiment, který měl za úkol určit minimální možnou vzdálenost mezi dvěma vtisky, při které ještě nedochází k ovlivnění místa indentace sousedním vtiskem. Tento experiment prokázal, že ani při použití poloviny doporučené vzdálenosti mezi dvěma sousedními vtisky nedochází k žádným rozdílům v porovnání s hodnotami naměřenými při striktním dodržení celé doporučené vzdálenosti. Experiment byl proveden na stejných materiálech a při stejných podmínkách, jaké byly následně použity při samotném měření tvrdosti na zkušebních tělesech.

Z výše popsaného důvodu byla zvolena minimální vzdálenost mezi dvěma sousedními vtisky dle vzorce:

$$\Delta^{xy} > 15 \cdot h_{max} \quad (30)$$

Matice měření obsahovala celkem 39 pozic v jedné řadě a zasahovala do hloubky 5 mm od řezné hrany. Kvůli předpokládanému výskytu TOO byla vzdálenost mezi dvěma sousedními vtisky nastavena na 50 μm až do hloubky 1,5 mm od řezné hrany. V této vzdálenosti se již předpokládal pouze vliv základního materiálu, proto byl další krok mezi dvěma sousedními vtisky nastaven na 500 μm až do hloubky 5 mm.

Měření tvrdosti TOO u každého zkušebního tělesa bylo provedeno celkem na šesti místech - oboustranně v horních 15 % tloušťky od plochy kolmé na směr vniku paprsku, příp. drátové elektrody, v 50 % tloušťky a 85 % tloušťky (viz Obr. 36). Vícenásobné měření tvrdosti TOO na jednom zkušebním tělese má za cíl redukovat nehomogenitu materiálu ve vnitřní struktuře.



Obr. 36 Schéma měření indentační tvrdosti

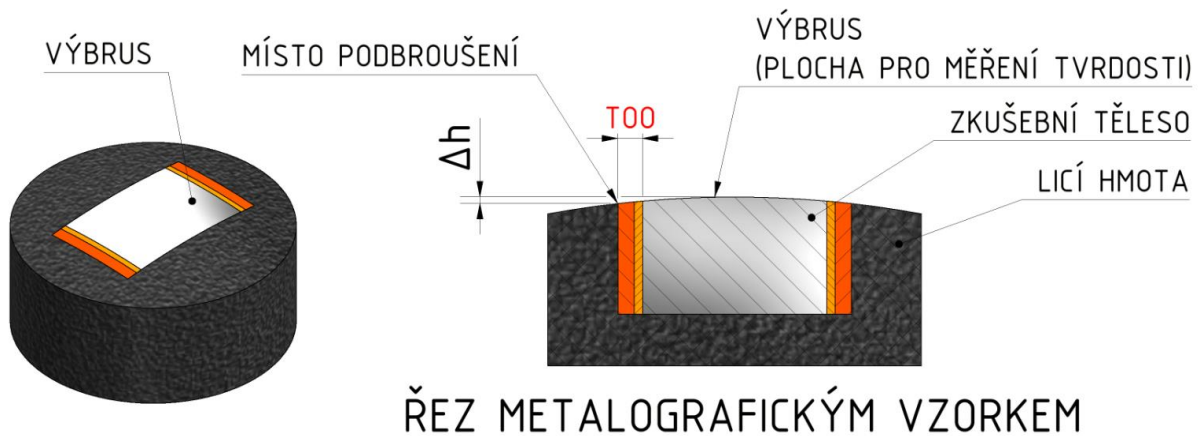
Jedním z kontrolních mechanismů nanotvrdoměru při maticovém měření je zjištění výšky povrchu testovaného materiálu před zahájením měření. Tento krok je v SW tvrdoměru označován jako ADO (Adjust Depth Offset). Zjištění výšky povrchu měřeného vzorku je prováděno pomocí referenčního kontaktního kroužku, který je znázorněn na Obr. 37.



Obr. 37 Konstruktivní řešení vyhledávání povrchu vzorku při měření DSI

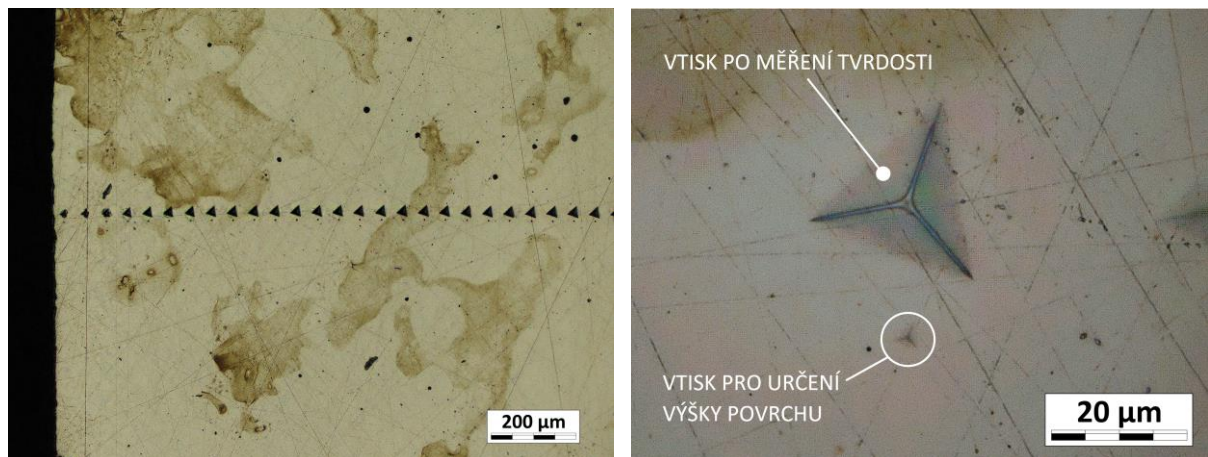
V místě styku lisovací hmoty a hrany zkušebního tělesa docházelo při broušení na metalografické leštičce kvůli rozdílným tvrdostem licí hmoty a oceli k podbrušování zkoumaného povrchu zkušebního tělesa. Tento jev je znázorněn na Obr.

38. Při nastavení jednotné výšky povrchu docházelo u většího množství zkušebních těles ke zkreslování výsledků, prodlužování doby měření či úplnému přerušování zkoušky, protože nedošlo ke kontaktu indentoru s povrchem zkušebního tělesa.



Obr. 38: Znárodnění podbroušené plochy

Z výše uvedeného důvodu obsahovala každá měřicí matice mezi jednotlivými kroky mezioperaci, která zahrnovala vyhledání aktuální výšky povrchu - ADO. Aktuální výška povrchu je zjišťována kontaktem povrchu měřeného materiálu s referenčním kroužkem a následnou indentací povrchu provedenou velmi malým zatížením (25 mN) v blízkosti místa skutečného měření tvrdosti. Maticové měření s ADO prvky je znázorněno na Obr. 39. Zařazení těchto prvků do měřicí matice výrazně zrychlilo délku jednotlivých měření a zpřesnilo naměřené výsledky.



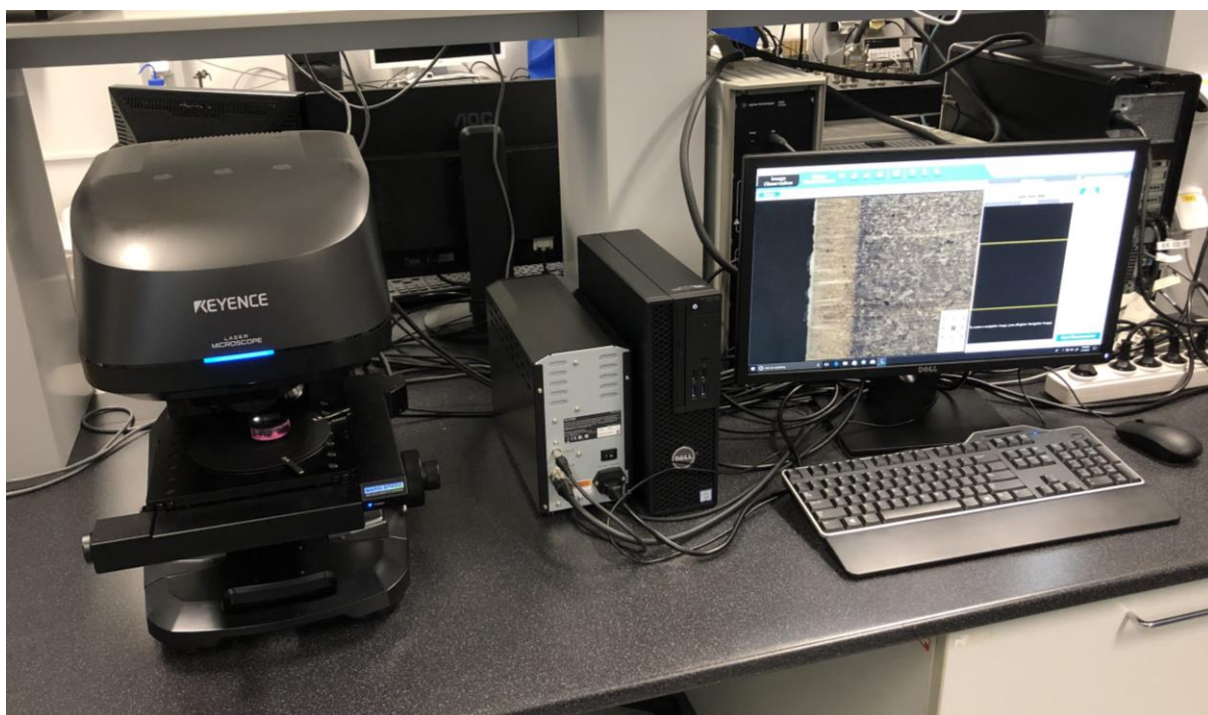
Obr. 39 Ukázka maticového měření (vlevo) a detail indentu (vpravo)

Pomocí popisné statistiky byla vyhodnocena směrodatná odchylka všech měření, která byla společně s hodnotami indentační tvrdosti a maximální indentační hloubky vynesena do grafů.

3.2.2 Optická analýza struktury TOO a základního materiálu

Pro optickou analýzu rozměrů a vnitřní struktury TOO byl zvolen 3D laserový skenovací mikroskop Keyence Laser Microscope, který je znázorněn na Obr. 40.

Výhodou použití konfokálního mikroskopu je schopnost snímání sérií optických řezů z rovin nad a pod rovinou ostrosti, jejichž seskládáním lze získat ostrý obraz sledovaného povrchu. Vyhodnocení TOO u zalisovaných zkušebních těles by bylo při použití klasického mikroskopu velmi obtížné, protože sledovaná oblast metalografického výbrusu nebyla z důvodu podbroušení zkoumané plochy ve stejné hloubce ostrosti.



Obr. 40 Konfokální mikroskop Keyence Laser Microscope

Před samotnou analýzou bylo nutné provést naleptání struktury zkušebních těles. Oceli 1.0553 (dle ČSN 11 523) a 1.7102 (dle ČSN 14 260) lze naleptat běžně používaným leptadlem Nital (5% kyselina dusičná), na korozivzdornou ocel 1.4301 (dle ČSN 17 420) bylo nutné připravit speciální leptadlo (směs kyseliny chlorovodíkové a chromové v poměru 3:1).

3.2.3 Měření drsnosti řezných ploch

Pro určení drsnosti řezných ploch byla zvolena bezkontaktní metoda měření profilu pomocí laserového mikroskopu Keyence Laser Microscope, který dokáže nasnímat jak povrch snímaného objektu, tak i jeho texturu. Vyhodnocení měření bylo realizováno v SW MultiFileAnalyzer dle doporučení udaných normou ČSN EN ISO 4287 [69].

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Jako hlavní měřené materiály pro zjištění vlivu způsobu dělení na míru ovlivnění oblasti řezu byly vybrány tři oceli různého chemického složení a mechanických vlastností. Jedná se o oceli:

- 1.0553 (dle ČSN 11 523)
- 1.7102 (dle ČSN 14 260)
- 1.4301 (dle ČSN 17 420)

Z těchto ocelí byla pomocí čtyř nekonvenčních metod dělení materiálu vyrobena zkušební tělesa, na nichž byl zkoumán vliv použité metody na míru ovlivnění místa řezu. Jednalo se o technologie:

- Řezání laserem
- Řezání plazmou
- Řezání vodním paprskem
- Elektrojiskrové drátové řezání

Polotovary pro výroby zkušebních těles zvolenými metodami dělení byly standardně dodávané plechy z vybraných ocelí o tloušťkách:

- 5 mm
- 10 mm
- 15 mm

V práci byla provedena měření tvrdosti metodou DSI, která popisují velikost TOO sledováním změn mechanických vlastností. TOO byla rovněž analyzována pomocí metalografické analýzy. Navazující měření drsnosti řezných ploch si kladlo za cíl zjistit, zda existuje korelace mezi drsností povrchu a velikostí TOO.

4.1 Vyhodnocení tvrdosti a predikce rozměrů TOO

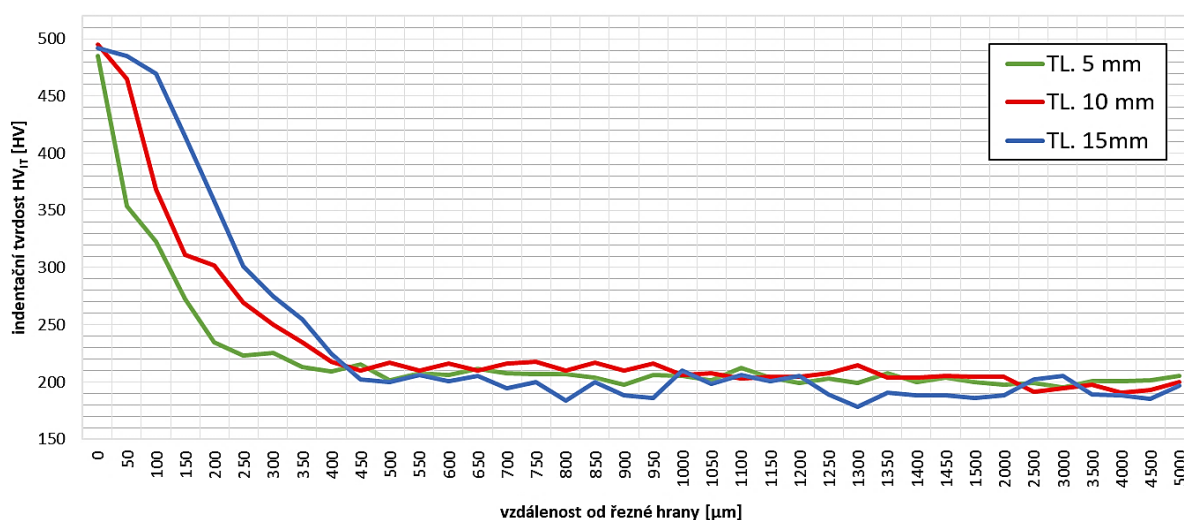
Tato část práce se zabývá vyhodnocením indentační tvrdosti v místě řezu zvolenými způsoby dělení. Posuzováním průběhu tvrdosti lze bez použití metalografické analýzy predikovat změny ve vnitřní struktuře materiálu a zároveň i rozměry TOO. Oblasti s konstantním průběhem tvrdosti budou mít velmi pravděpodobně homogenní strukturu, naopak oblasti s klesajícím průběhem tvrdosti budou pravděpodobně přechodovými pásmy s nehomogenní strukturou.

Drobné výkyvy hodnot v pásmech s konstantní tvrdostí však nemusí nutně znamenat změny ve vnitřní struktuře materiálu – struktura základního materiálu nemusí být vždy zcela homogenní nebo může obsahovat více fází s rozdílnou tvrdostí. Uspořádání struktury může být jak pravidelné (např. řádkovitá feriticko-perlitická struktura plechů způsobená válcováním), tak nepravidelné (např. feriticko-perlitická struktura po žíhání). Vícenásobné měření tvrdosti TOO na jednom zkušebním tělese mělo možné rozdíly ve vnitřní struktuře alespoň částečně redukovat.

U každého zkušebního tělesa byla po naměření průběhu tvrdosti provedena ještě kontrolní metalografická analýza, která si kladla za cíl vizuálně podpořit naměřené výsledky. Podrobnější metalografická analýza s vyhodnocením strukturálního složení a rozměrů TOO je provedena v kapitole 4.2.

Provedená měření tvrdosti metodou DSI ukázala, že tloušťka děleného materiálu má vliv na velikost TOO. Vliv tloušťky materiálu na míru ovlivnění místa řezu u oceli 1.0553 je znázorněn na Obr. 41. Pro tepelné způsoby dělení pomocí paprsku se dá obecně říci, že čím větší je tloušťka děleného materiálu, tím větší je míra ovlivnění místa řezu (tím více roste šířka TOO měřená od řezné hrany).

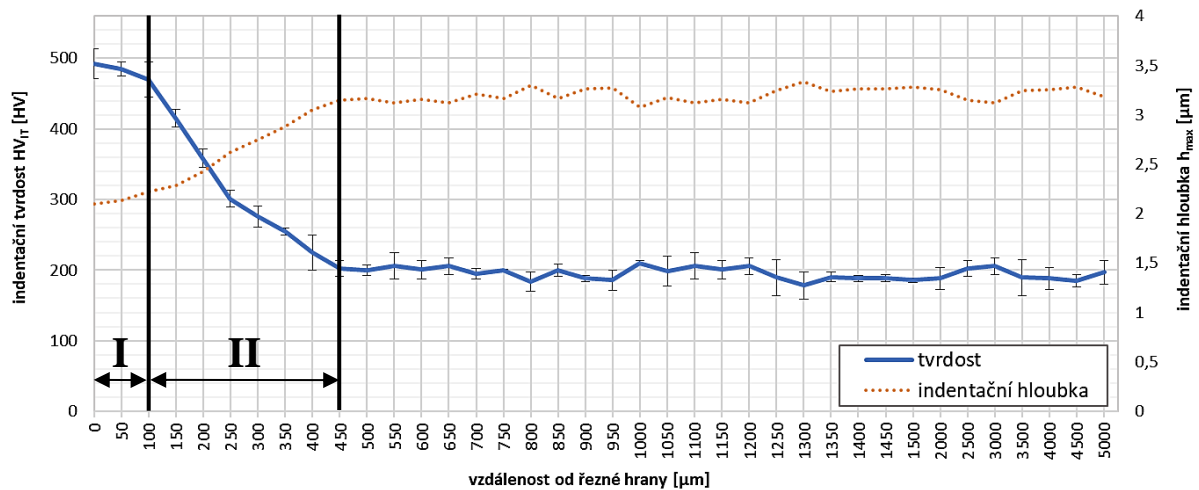
Výsledky uvedené v této kapitole reprezentují pouze zkušební tělesa o tloušťce 15 mm. Výsledky pro menší tloušťky dělených materiálů vykazují z hlediska indentační tvrdosti tendenčně stejný průběh, TOO je však užší.



Obr. 41 Vliv tloušťky zkušebního tělesa na vlastnosti TOO – ocel 1.0553

4.1.1 Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)

4.1.1.1 Řezání laserem

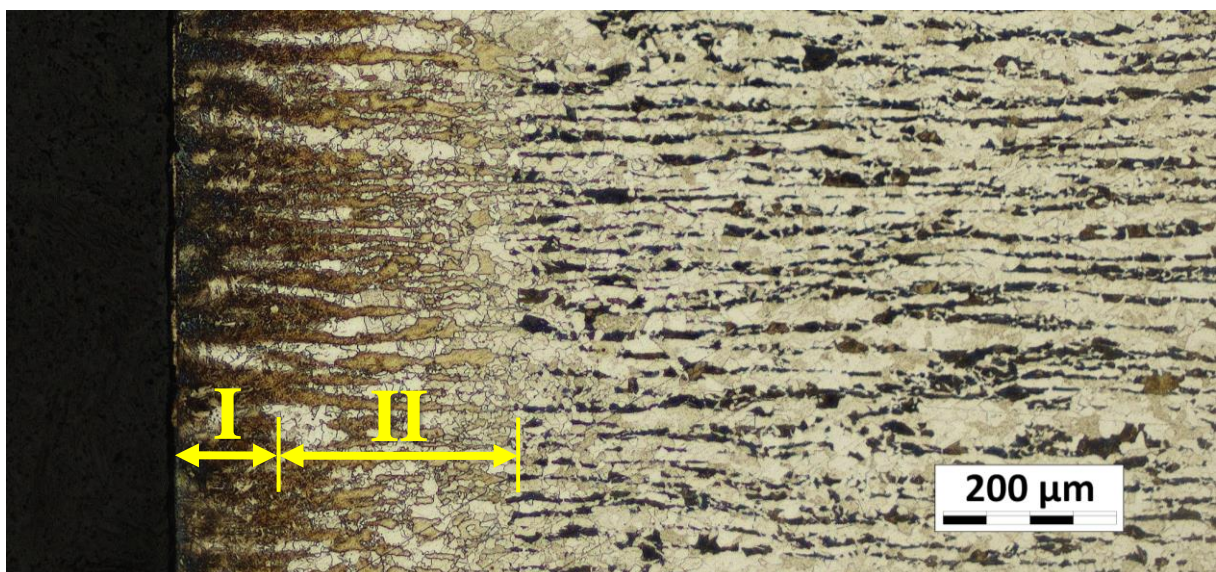


Obr. 42 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.0553

Průběh indentační tvrdosti po dělení oceli 1.0553 laserem je znázorněn na Obr. 42. V místě řezu vznikla TOO o šířce 0,45 mm, která se skládá ze dvou pásem. Šířka hlavního pásma TOO (v grafu označeno I) je 0,10 mm a maximální indentační tvrdost HV_{IT} naměřená v této oblasti je cca 500 HV.

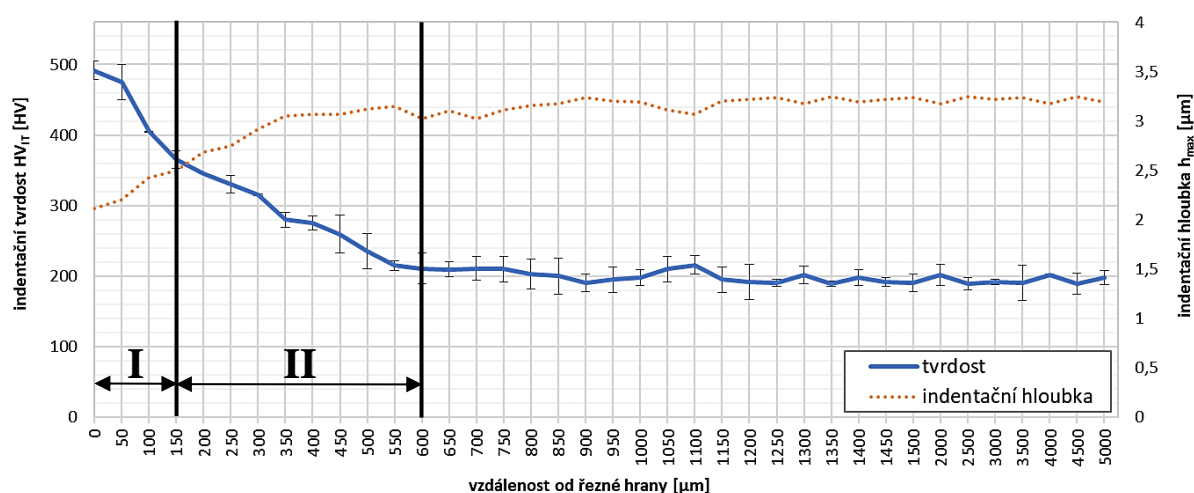
Za touto oblastí následuje pásmo přechodové (v grafu označeno II), ve kterém dochází k poklesu tvrdosti na tvrdost základního materiálu $HV_{IT} = 195$ HV. Toto pásmo je široké 0,35 mm.

Zjištěné výsledky velmi dobře korelují s metalografickou analýzou, jejíž výstupem je Obr. 43. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 43 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení laserem

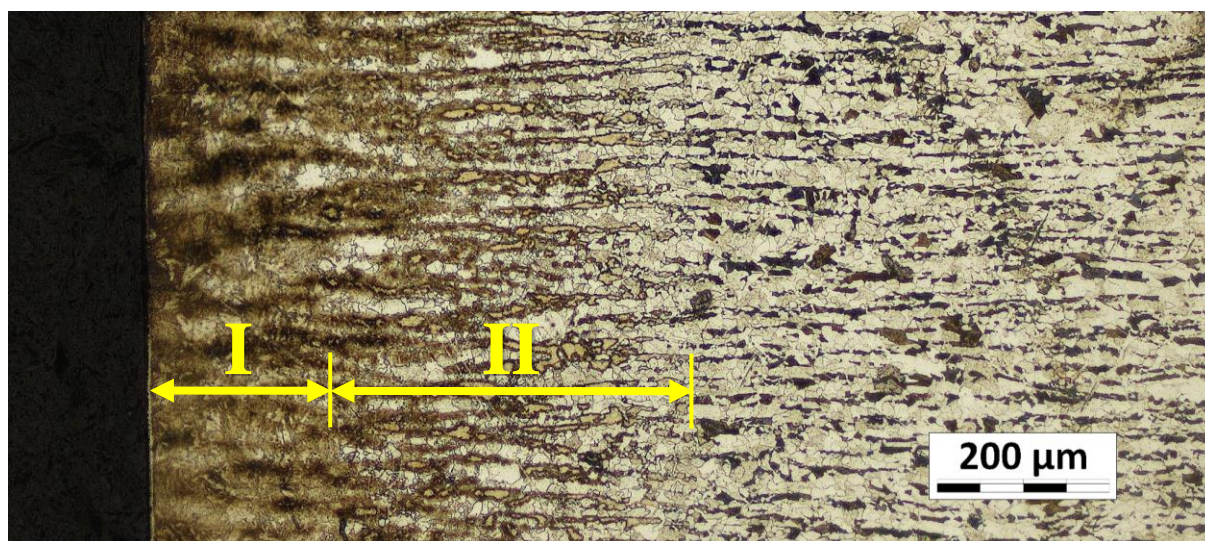
4.1.1.2 Řezání plazmou

Obr. 44 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.0553

Průběh indentační tvrdosti po dělení oceli 1.0553 plazmou je znázorněn na Obr. 44. V místě řezu vznikla TOO zasahující do hloubky 0,60 mm. TOO se rovněž skládá ze dvou pásem. Šířka hlavního pásma TOO (I) je 0,15 mm. Indentační tvrdost této oblasti HV_{IT} klesá se vzdáleností od řezné hrany z maximální hodnoty cca 490 HV na hodnotu cca 440 HV. Maximální zjištěná hodnota tvrdosti v hlavním pásmu TOO je při řezání plazmou téměř shodná jako při řezání stejné oceli laserem.

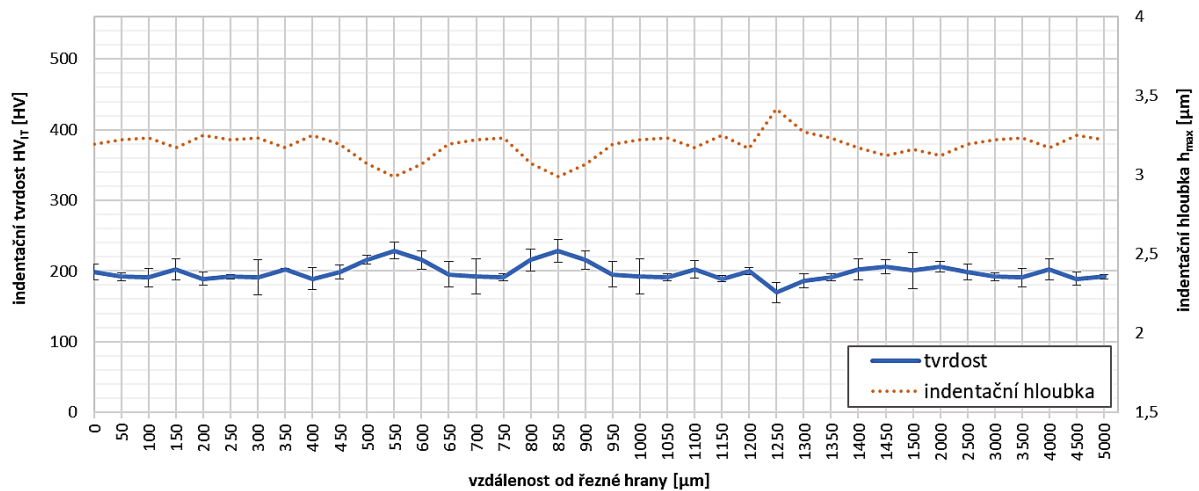
Za touto oblastí následuje přechodové pásmo (II), ve kterém dochází k pozvolnému snížení tvrdosti na tvrdost základního materiálu HV_{IT} = 195 HV. Šířka tohoto pásma je cca 0,45 mm.

Uvedená zjištění jsou podpořena metalografickou analýzou, jejíž výstupem je Obr. 45. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 45 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení plazmou

4.1.1.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 46 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.0553

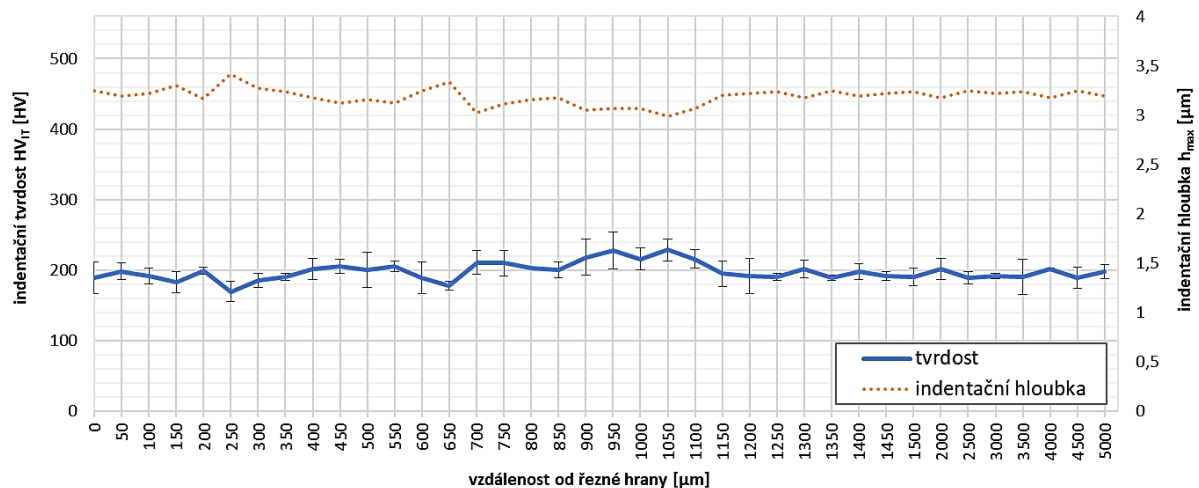
Přestože literatura [46][47][48] uvádí, že při dělení materiálu pomocí elektroerozivního drátového řezání dochází ke vzniku TOO, měření tvrdosti metodou DSI nebyly u oceli 1.0553 v blízkosti řezu zjištěny žádné rozdíly v indentační tvrdosti. Průběh indentační tvrdosti po elektroerozivním drátovém řezání oceli 1.0553 je znázorněn na Obr. 46. U naměřených výsledků nedochází k žádným výraznějším výkyvům od hodnoty indentační tvrdosti základního materiálu $HV_{IT} = 195$ HV.

Komparační metalografická analýza neprokázala vznik hlavního pásma TOO. Přesto byla v těsné blízkosti řezu identifikována velmi tenká vrstva o šířce několika mikrometrů s rozdílnými vizuálními vlastnostmi v porovnání se základním materiálem. Výsledek této analýzy je znázorněn na Obr. 47. Podrobnější popis této struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 47 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po elektroerozivním drátovém řezání

4.1.1.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 48 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.0553

Při dělení oceli 1.0553 vodním paprskem nevznikla z podstaty technologie v blízkosti řezu žádná TOO. Dle dostupných materiálů [37] nepřevyšuje teplota při dělení vodním paprskem v místě řezu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tohoto důvodu nemůžou ve vybraných ocelích nastat žádné strukturní změny.

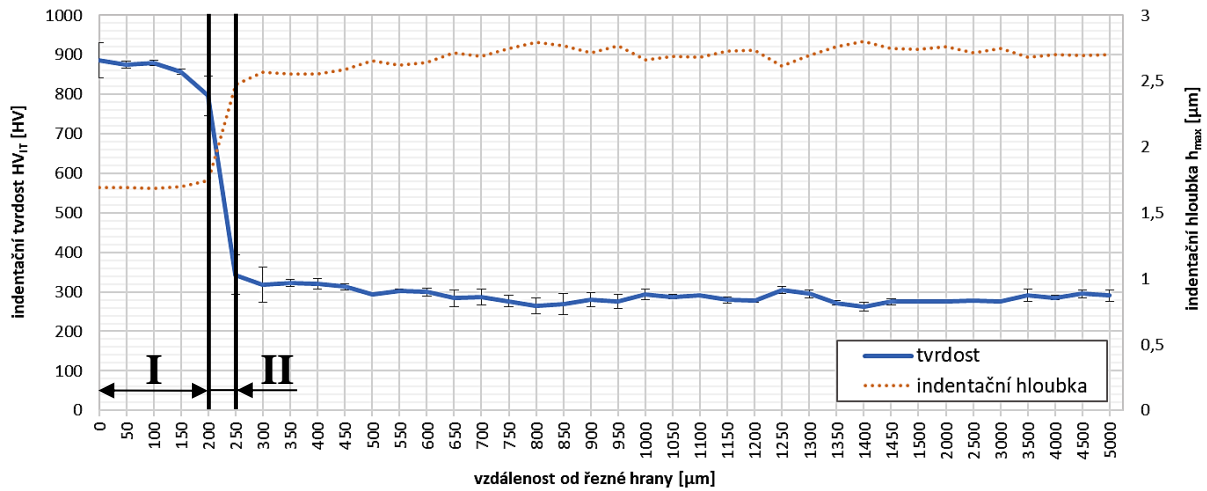
Měření nanotvrdosti mělo prokázat, zda v místě řezu nedošlo k lokálnímu zvýšení tvrdosti vlivem mikroplastické deformace vyvolané působením abraziva. Výsledky měření indentační tvrdosti znázorněné na Obr. 48 nevykazují v blízkosti místa řezu žádné rozdíly v porovnání se základním materiálem o indentační tvrdosti $\text{HV}_{IT} = 195$. Uvedené zjištění je podpořené komparační metalografickou analýzou. Výstupem metalografické analýzy je Obr. 49.



Obr. 49 Struktura oceli 1.0553 v místě řezu po dělení vodním paprskem

4.1.2 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

4.1.2.1 Řezání laserem

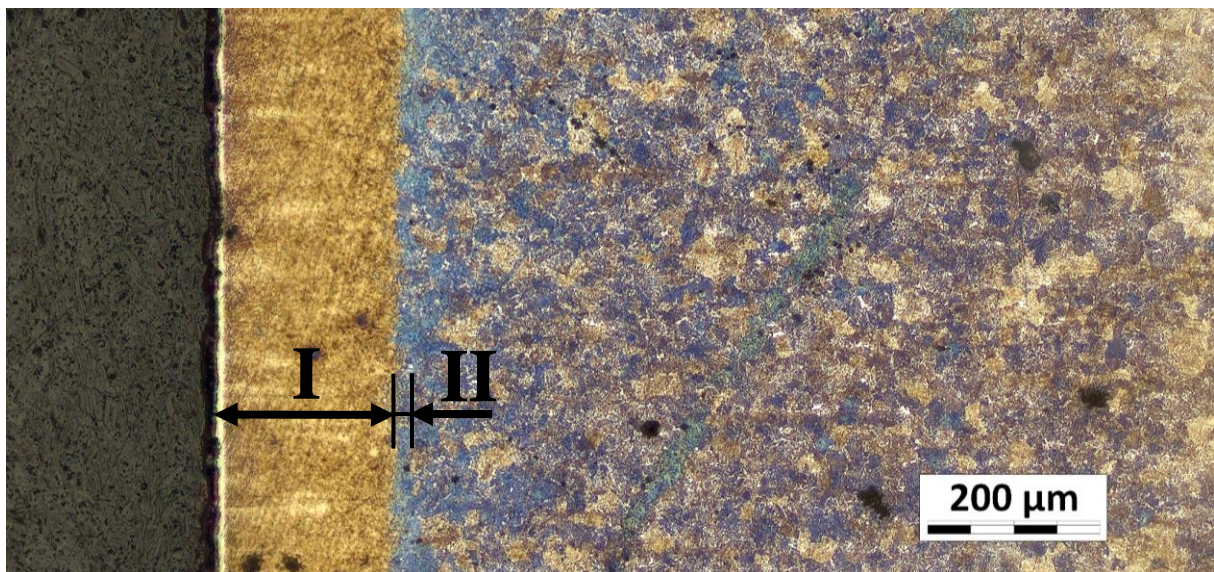


Obr. 50 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.7102

Průběh indentační tvrdosti po dělení oceli 1.7102 laserem je znázorněn na Obr. 50. V místě řezu vznikla TOO o šířce cca 0,25 mm, která se skládá ze dvou pásem. Hlavní pásmo TOO (I) je široké 0,20 mm a maximální indentační tvrdost HV_{IT} v této oblasti je 890 HV.

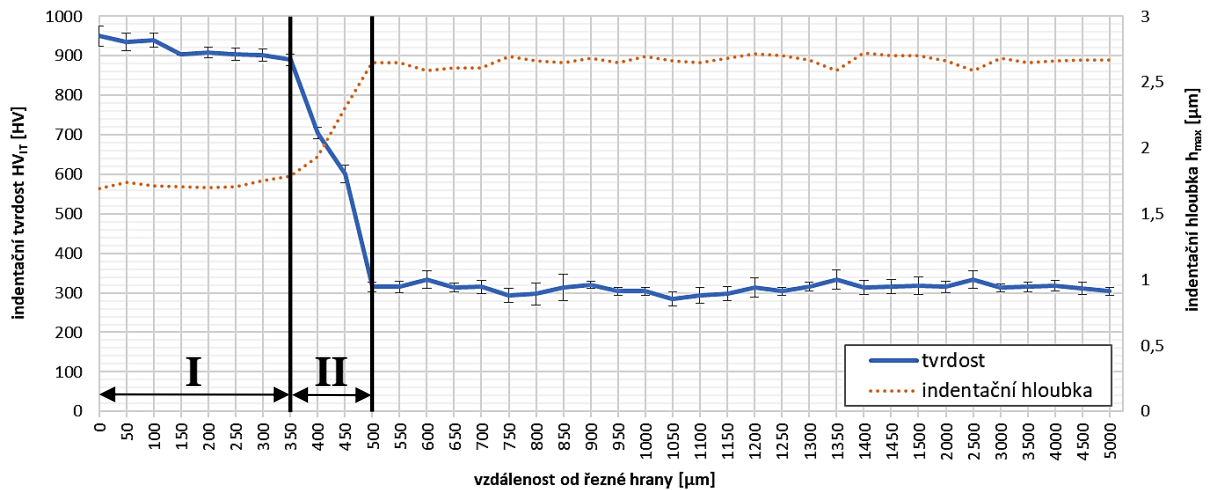
Za touto oblastí následuje velmi úzké přechodové pásmo (II) o šířce 0,05 mm, ve kterém dochází k téměř skokovému poklesu tvrdosti TOO až na tvrdost základního materiálu $HV_{IT} = 295$ HV.

Uvedená zjištění korelují s komparační metalografickou analýzou, jejíž výstup je znázorněn na Obr. 51. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 51 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení laserem

4.1.2.2 Řezání plazmou



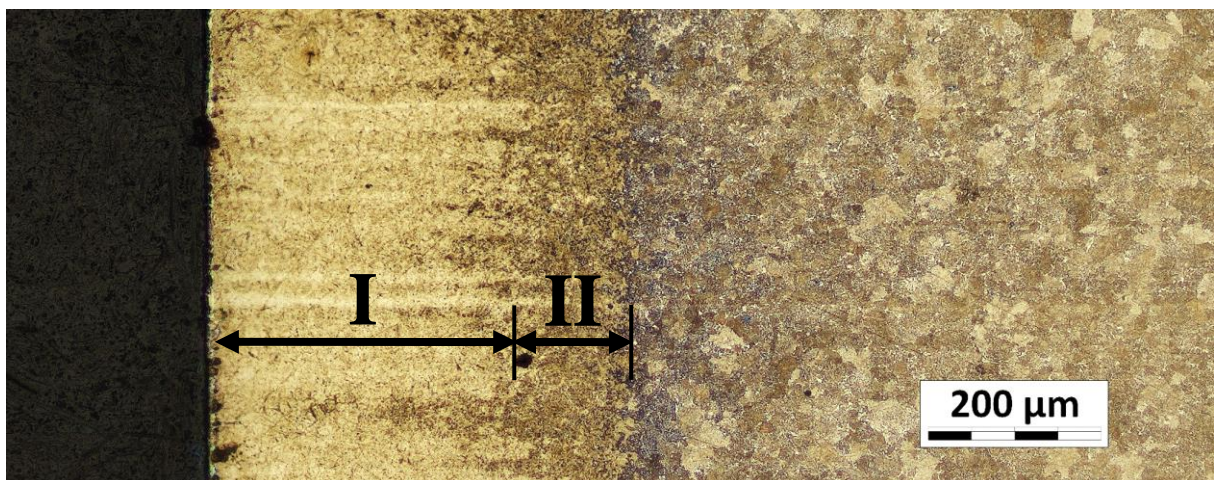
Obr. 52 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.7102

Obdobná tendence jako v případě dělení laserem je pozorovatelná i při dělení oceli 1.7102 plazmou. Průběh indentační tvrdosti je znázorněn na Obr. 52. V blízkosti řezu vznikla TOO o šířce 0,50 mm, která je tvořena dvěma pásmy. Hlavní pásmo TOO (I) je široké 0,35 mm a maximální naměřená indentační tvrdost HV_{IT} v této oblasti je 945 HV.

Za touto oblastí následuje přechodové pásmo (II), ve kterém dochází k pozvolnému snížení tvrdosti na tvrdost základního materiálu $HV_{IT} = 295$ HV. Šířka tohoto pásma je 0,15 mm.

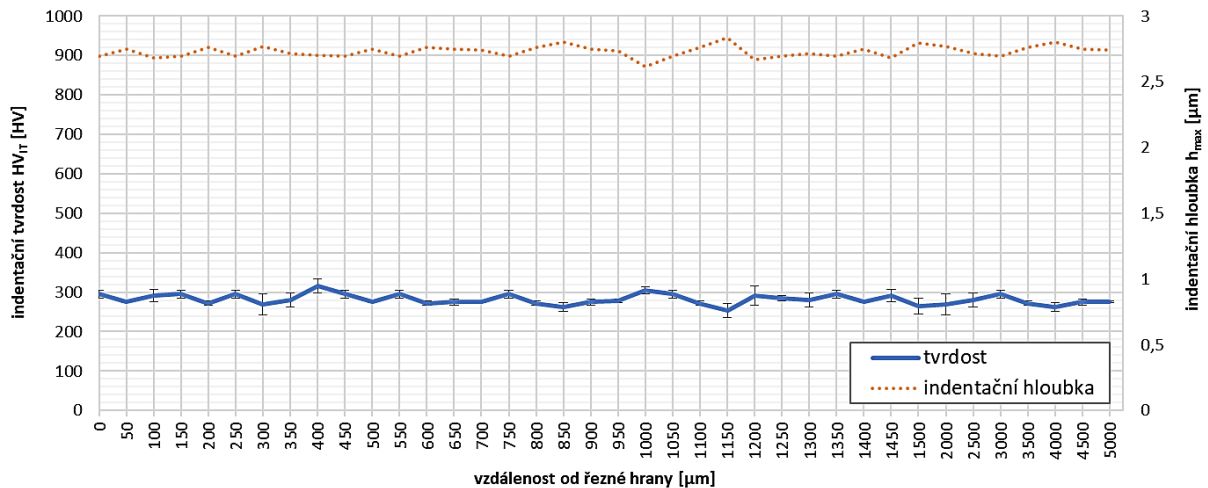
V porovnání s TOO vyvolanou řezáním laserem jsou v případě řezání stejné oceli plazmou obě pásma TOO téměř dvojnásobně širší. Rovněž je dosaženo i vyšší indentační tvrdosti v hlavním pásmu TOO (rozdíl cca 6%).

Naměřené výsledky jsou podpořeny vyhodnocením metalografické analýzy, jejíž výstup je znázorněn na Obr. 53. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 53 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení plazmou

4.1.2.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 54 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102

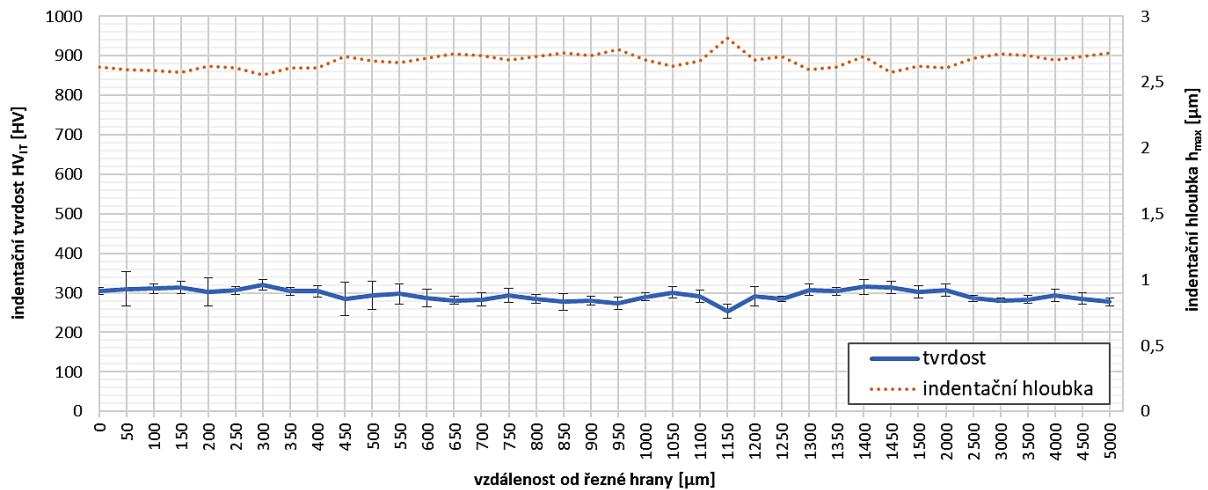
Stejně jako v případě dělení oceli 1.0553 pomocí elektrojiskrového drátového řezání nedochází ani v případě dělení oceli 1.7102 touto metodou v blízkosti řezu k měřitelným změnám indentační tvrdosti. Průběh indentační tvrdosti je znázorněn na Obr. 54. U naměřených výsledků v místě řezu nedochází k žádným výrazným výkyvům od hodnoty indentační tvrdosti základního materiálu $HV_{IT} = 195$ HV.

Metalografická analýza znázorněná na Obr. 55 ukázala, že v oblasti řezu nedochází ke vzniku hlavního TOO pásma. Přesto však vlivem tepelnému účinku této metody došlo v těsné blízkosti řezu ke vzniku tenké vrstvy široké několik mikrometrů. Podrobnější popis této struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 55 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po elektroerozivním drátovém řezání

4.1.2.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 56 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.7102

Při dělení oceli 1.7102 vodním paprskem nevznikla v blízkosti řezu žádná TOO. Zkouška nanotvrdosti měla prokázat, zda nedošlo k lokálnímu zvýšení tvrdosti vlivem mikroplastické deformace způsobené působením abraziva v místě řezu. Průběh indentační tvrdosti je zobrazen na Obr. 56.

Výsledky měření indentační tvrdosti nevykazují v místě řezu žádné rozdíly v porovnání se základním materiálem o indentační tvrdosti $HV_{IT} = 295$ HV.

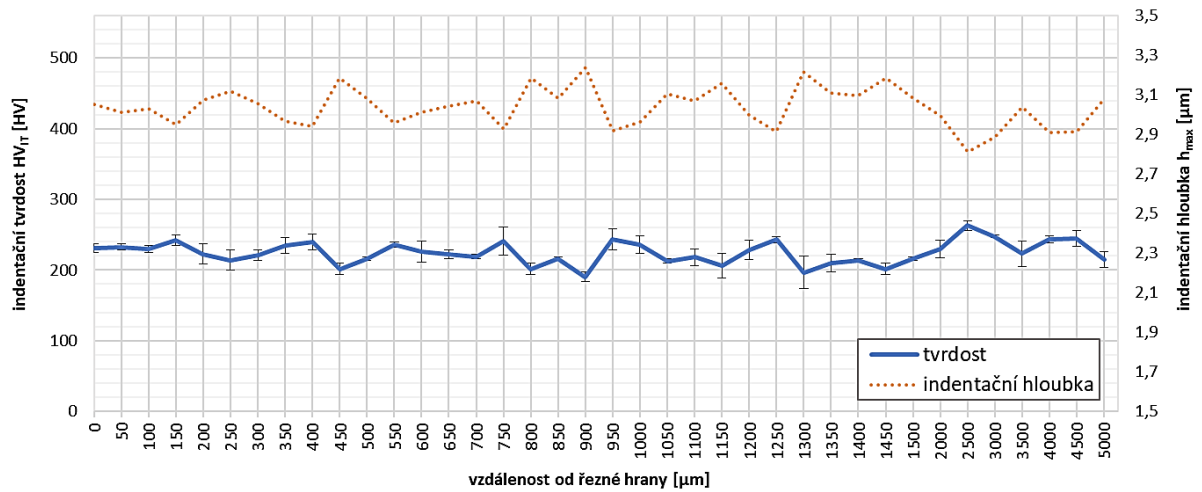
Žádné změny struktury nebyly pozorovány ani při optické analýze metalografického výbrusu. Výstup z této analýzy je Obr. 57.



Obr. 57 Struktura oceli 1.7102 v místě řezu po dělení vodním paprskem

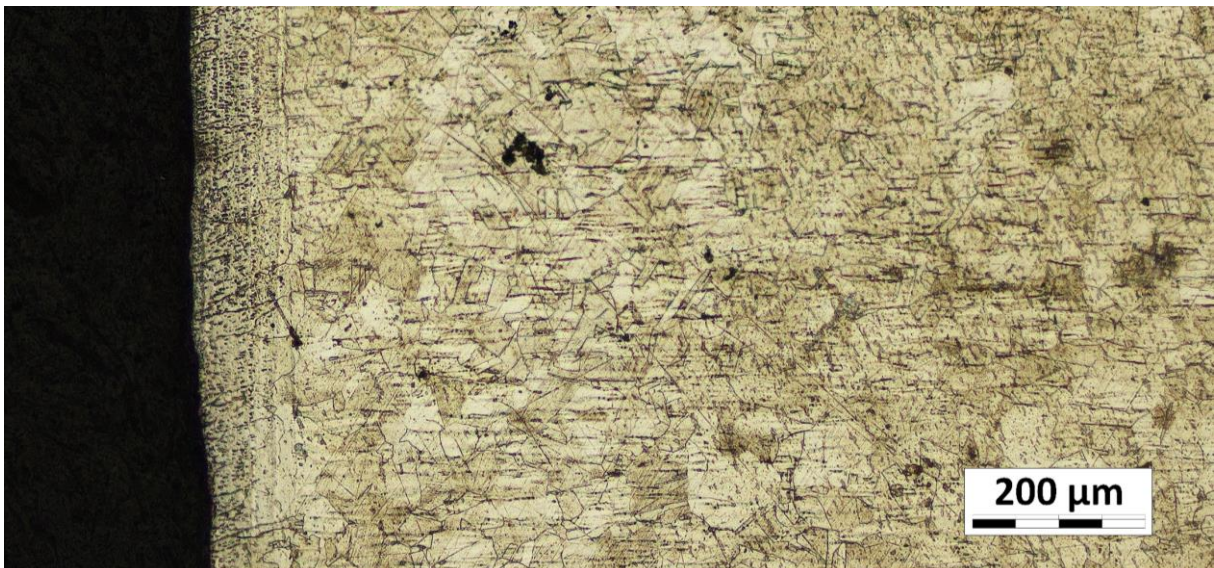
4.1.3 Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)

4.1.3.1 Řezání laserem



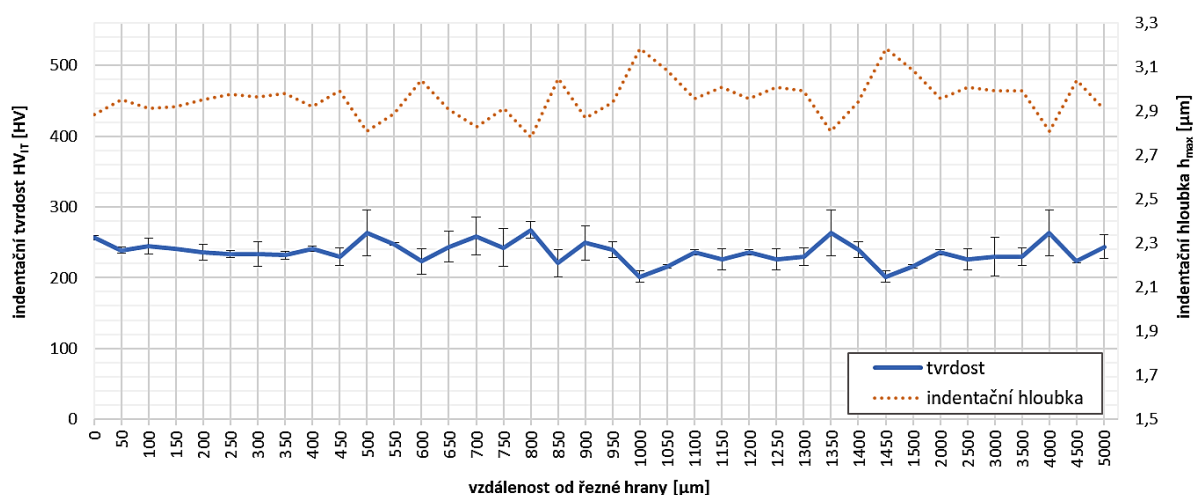
Obr. 58 Průběh HV_{IT} při řezání laserem – ocel 1.4301

Průběh indentační tvrdosti při dělení oceli 1.4301 laserem je zobrazen na Obr. 58. V místě řezu vznikla TOO o šířce cca 0,10 mm, ve které došlo vlivem působení tepelné energie ke změně struktury. Tuto oblast byla identifikována až při metalografické analýze po naleptání vnitřní struktury. Výsledek této analýzy je znázorněn na Obr. 59. Ani vícenásobné přeměření indentační tvrdosti v této oblasti však nevykazovalo žádné rozdíly v porovnání se základním materiálem o průměrné indentační tvrdosti $HV_{IT} = 225$ HV. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



Obr. 59 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení laserem

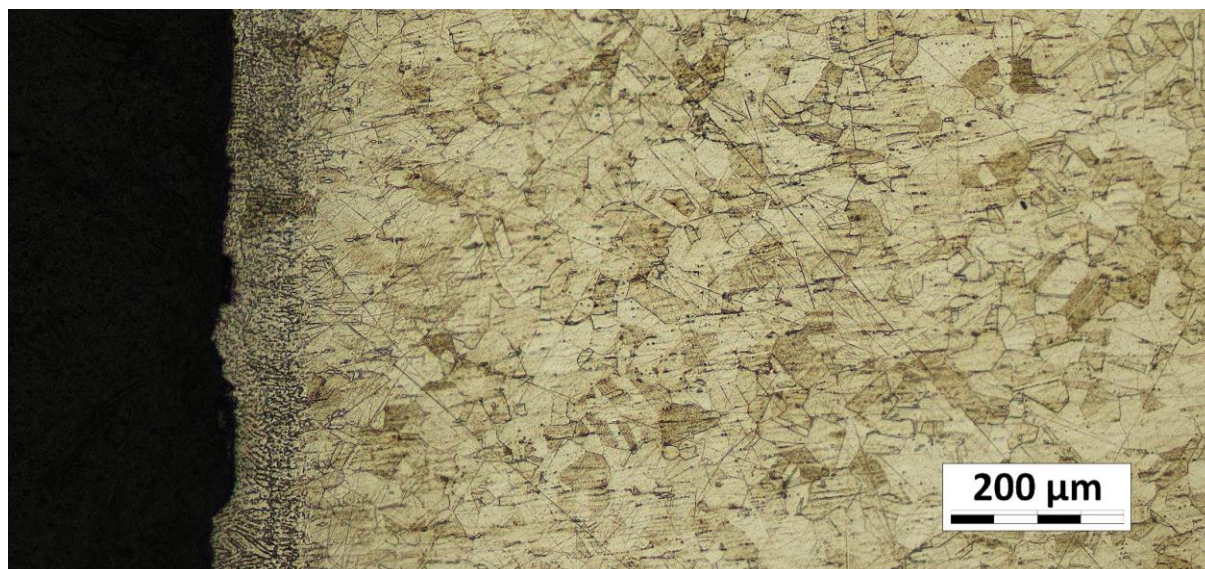
4.1.3.2 Řezání plazmou



Obr. 60 Průběh HV_{IT} při řezání plazmou – ocel 1.4301

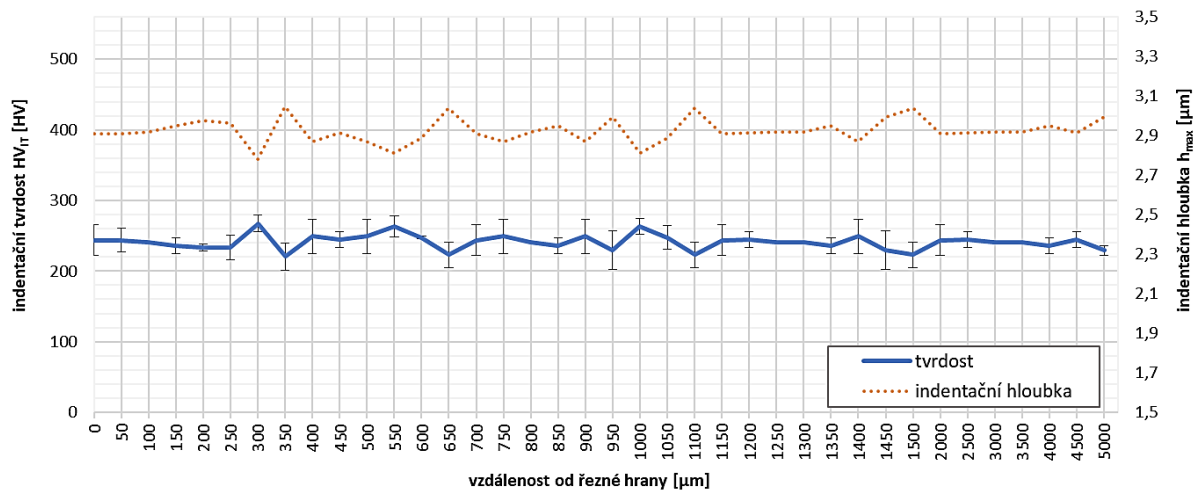
Obdobné chování jako v případě dělení laserem vykazuje ocel 1.4301 i při dělení plazmou. Průběh indentační tvrdosti je zobrazen na Obr. 60.

V místě řezu vzniká TOO s rozdílnou vnitřní strukturou, než je struktura základního materiálu. Naměřené hodnoty indentační tvrdosti v této oblasti však stejně jako v předchozím případě nevykazovaly žádné rozdíly v porovnání se strukturou základního materiálu o indentační tvrdosti $\text{HV}_{\text{IT}} = 225 \text{ HV}$. Šířka této oblasti je cca 0,10 mm a je rozpoznatelná až při metalografické analýze. Výsledkem této analýzy je Obr. 61. Podrobnější popis struktury TOO a základního materiálu je uveden v kapitole 4.2.



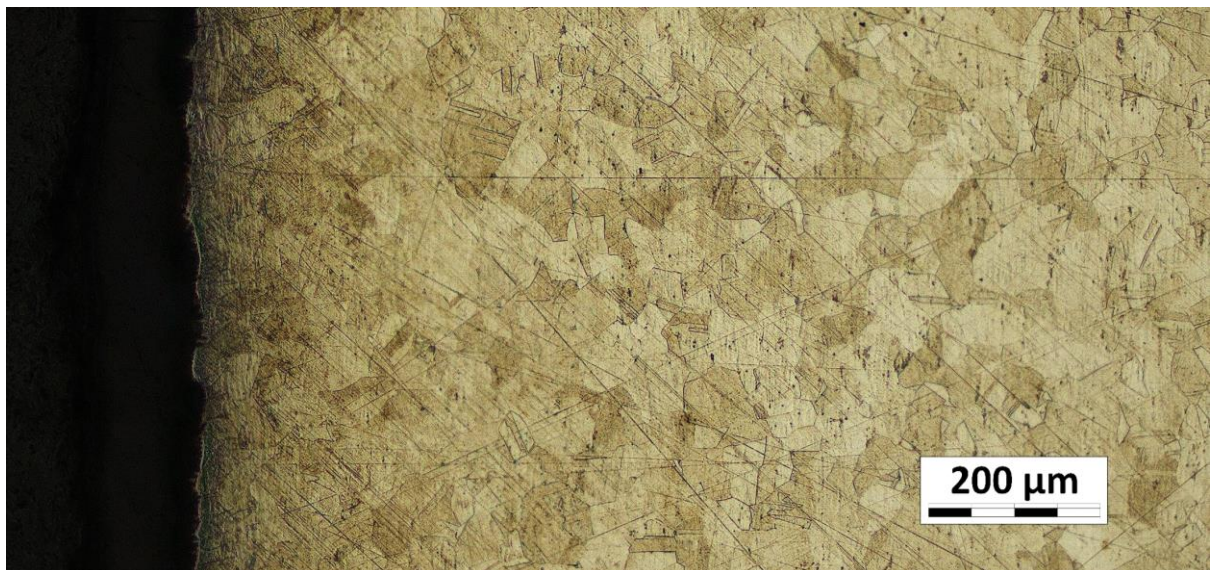
Obr. 61 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení plazmou

4.1.3.3 Elektroerozivní drátové řezání



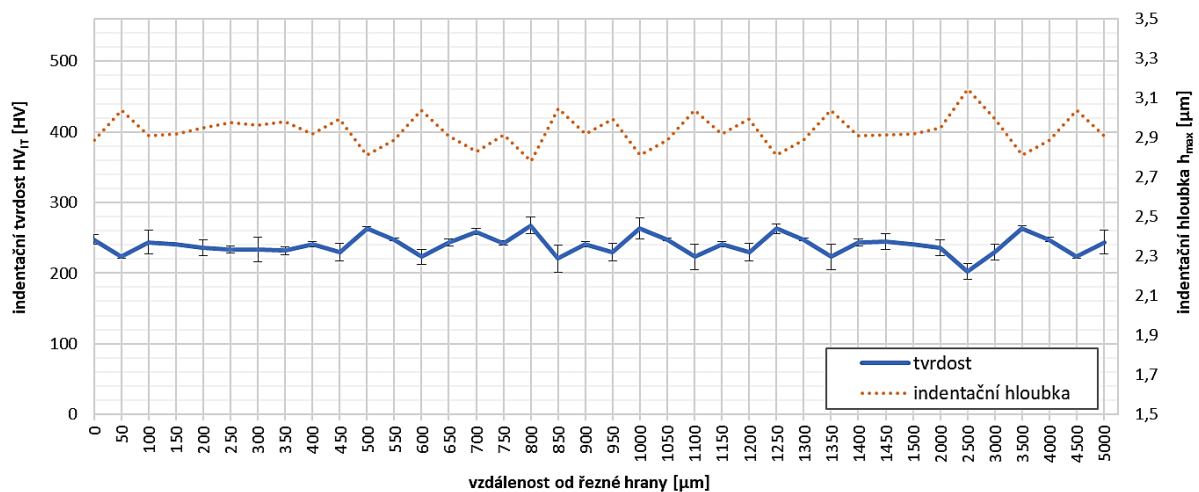
Obr. 62 Průběh HV_{IT} při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.4301

Průběh indentační tvrdosti je zobrazen na Obr. 62. Z naměřených hodnot je patrné, že při dělení oceli 1.4301 elektroerozivním drátovým řezáním nedochází v blízkosti řezu ke vzniku TOO. U naměřených výsledků nedochází k žádným výrazným výkyvům od hodnoty indentační tvrdosti základního materiálu $HV_{IT} = 225$ HV. Výsledky měření odpovídají vyhodnocení metalografické analýzy, jejíž výstup je znázorněn na Obr. 63.



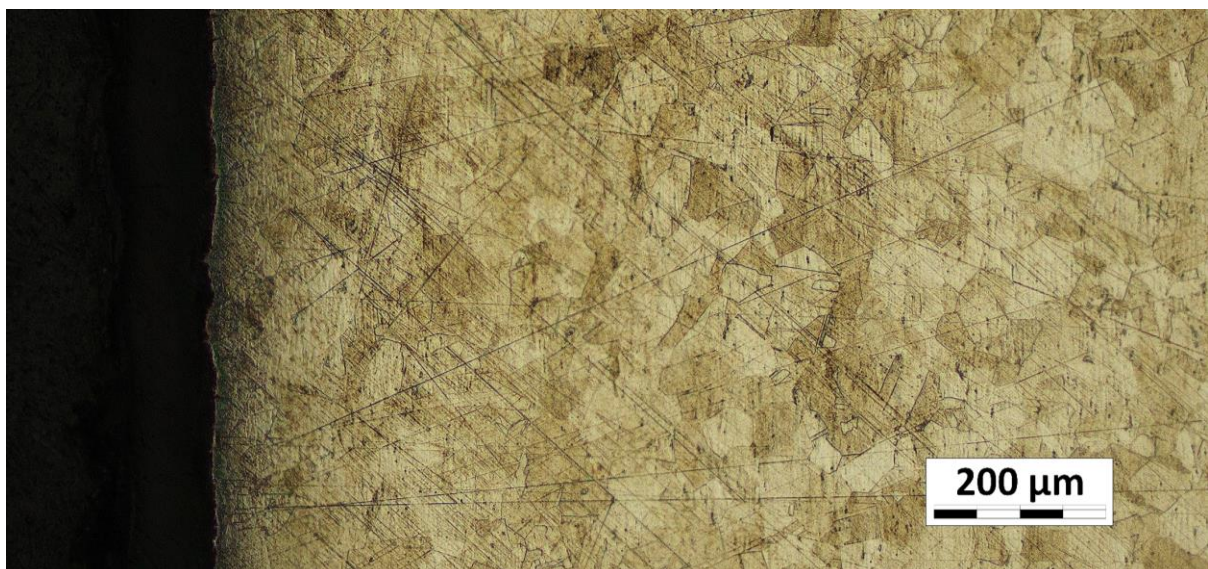
Obr. 63 Struktura oceli 1.4301 v místě po elektroerozivním drátovém řezání

4.1.3.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 64 Průběh HV_{IT} při řezání vodním paprskem – ocel 1.4301

Při dělení oceli 1.4301 vodním paprskem nevznikla v blízkosti řezu žádná tepleně ovlivněná oblast. Zkouška nanotvrdomosti měla prokázat, zda nedošlo v místě řezu k lokálnímu zvýšení tvrdosti, které by bylo vyvolené působením abrazivních částic ve vodním paprsku na řeznou plochu. Průběh indentační tvrdosti je zobrazen na Obr. 64. Výsledky měření indentační tvrdosti nevykazují žádné rozdíly v porovnání se základním materiálem o indentační tvrdosti $\text{HV}_{\text{IT}} = 225 \text{ HV}$. Žádné strukturální změny v blízkosti řezu nebyly pozorovány ani při optické analýze metalografického výbrusu. Výstup z této analýzy je Obr. 65.



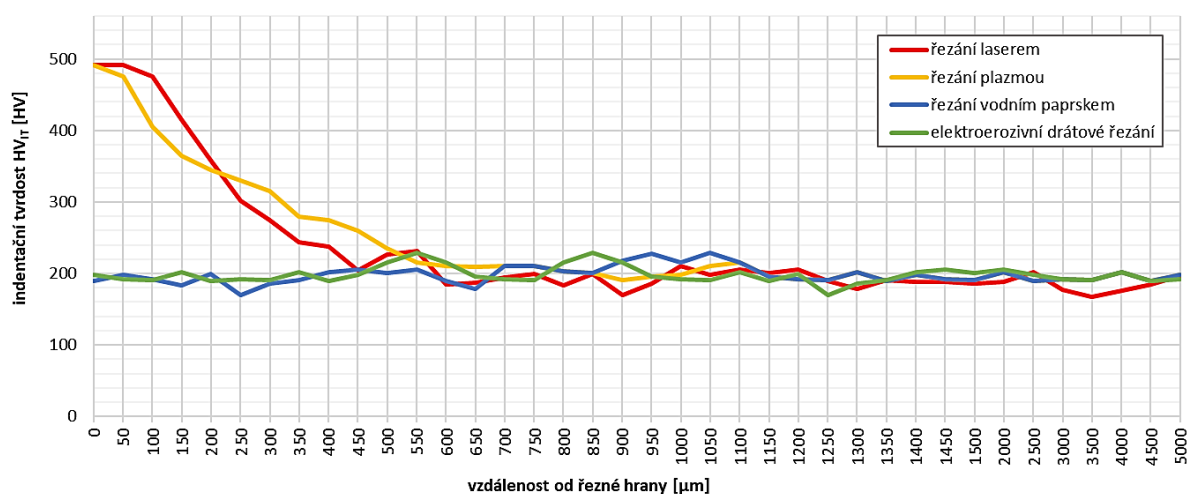
Obr. 65 Struktura oceli 1.4301 v místě řezu po dělení vodním paprskem

Porovnání vlivu všech použitých metod dělení na vznik TOO a změnu mechanických vlastností pro všechny testované materiály je shrnuto v grafech na Obr. 66-68.

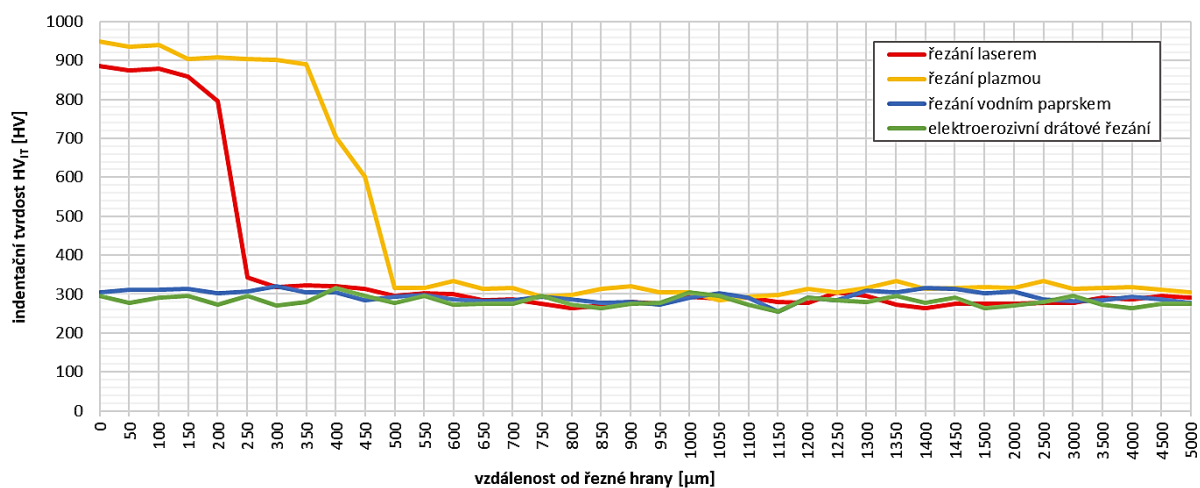
Z uvedených výsledků je patrné, že tepelné účinky jednotlivých technologií na místo řezu jsou odlišné. Největší tepelný účinek ze všech použitých technologií má řezání plazmou.

U ocelí 1.0553 i 1.7102 se vyšší tepelný účinek plazmy projevuje vznikem širší TOO (v porovnání s řezáním laserem). V případě oceli 1.7102 rovněž dochází k rozdílům v nejvyšší naměřené tvrdosti v hlavním pásmu TOO.

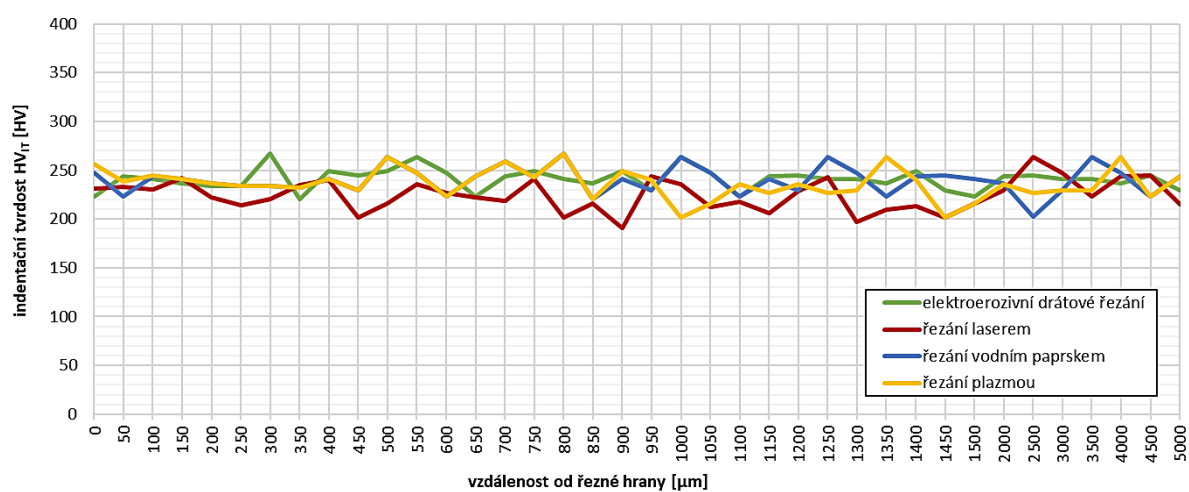
Z grafů je rovněž patrné, že dělení materiálu vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním nevyvolává vznik TOO s měřitelnou změnou tvrdosti. Metalografická analýza struktury místa řezu však ukázala, že při dělení zkušebních těles elektroerozivním drátovým řezáním docházelo v místě řezu u ocelí 1.0553 i 1.7102 ke vzniku tenkých vrstev s rozměry v řádech jednotek mikronů, které vykazovaly jinou strukturu než byla struktura základního materiálu. Tvrdost těchto vrstev nebyla vzhledem ke svým rozměrům a umístění na zkušebním tělese změřitelná.



Obr. 66 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.0553



Obr. 67 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.7102



Obr. 68 Porovnání vlivu technologií dělení na vlastnosti TOO – ocel 1.4301

4.2 Optická analýza struktury TOO a základního materiálu

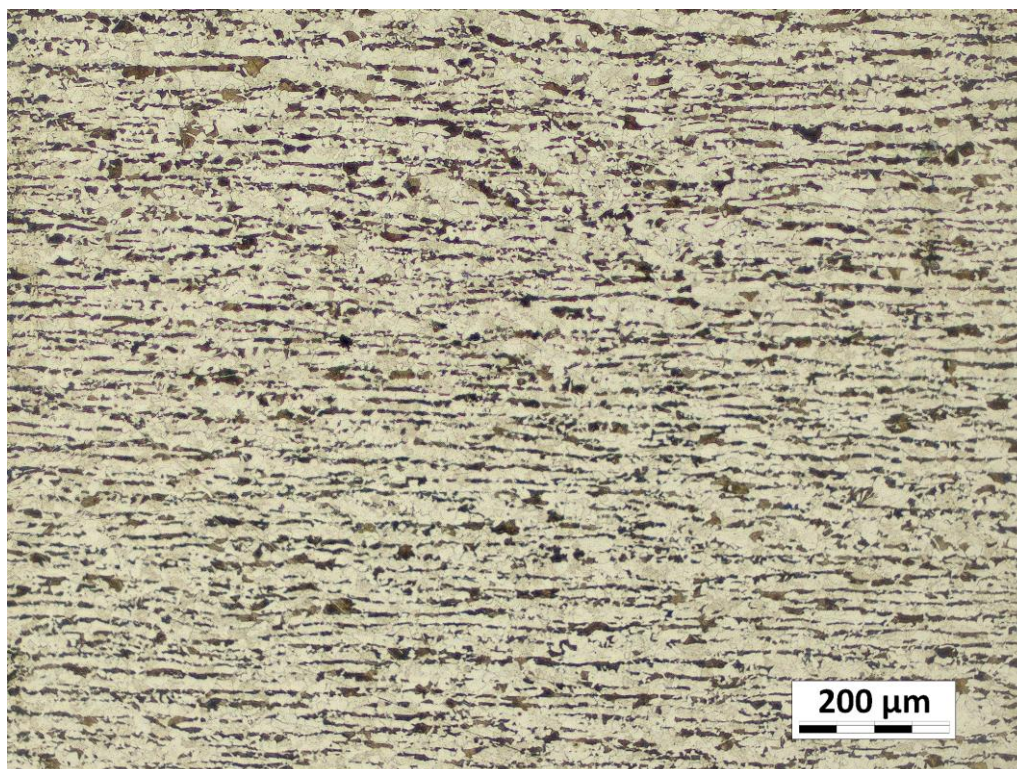
Optická analýza rozměrů a vnitřní struktury TOO u naleptaných zkušebních těles byla provedena na 3D laserovém skenovacím mikroskopu Keyence Laser Microscope. Cílem této analýzy bylo především ověření předpokladu, že posouzením průběhu tvrdosti lze predikovat strukturní složení či změny struktury materiálu. Základem této hypotézy je myšlenka, že oblasti s konstantním průběhem tvrdosti budou mít velmi pravděpodobně homogenní vnitřní strukturu a naopak u oblastí s klesajícím či vzrůstajícím průběhem tvrdosti bude velmi pravděpodobně docházet ke změnám ve vnitřní struktuře.

Cílem optické analýzy bylo rovněž určení, nakolik přesný je odhad reálných rozměrů TOO pouze z výsledků měření tvrdosti metodou DSI bez doprovodné optické analýzy.

Optická analýza prokázala, že při řezání vodním paprskem nedochází u žádného zkušebního tělesa ke vzniku TOO či jiné opticky identifikovatelné oblasti s odlišnou strukturou než je struktura základního materiálu. Z tohoto důvodu nejsou v této části práce výsledky z dělení vodním paprskem prezentovány.

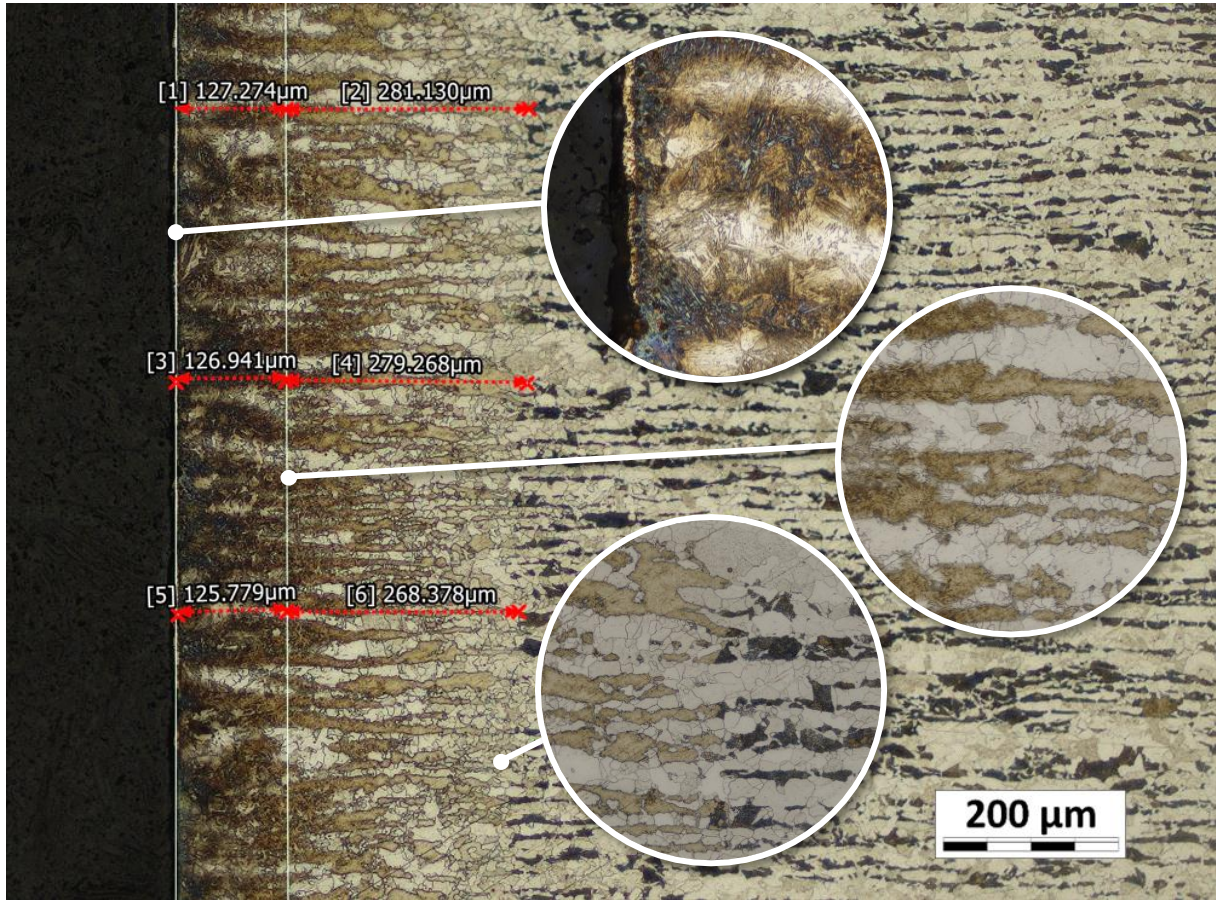
4.2.1 Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)

Struktura základního materiálu oceli 1.0553 znázorněná na Obr. 69 je feriticko-perlitická s rovnoměrným řádkovitým uspořádáním o průměrné indentační tvrdosti $HV_{IT} = 195$ HV. Tento typ struktury je typický pro plechy válcované za tepla.



Obr. 69 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.0553

4.2.1.1 Určení velikosti TOO při řezání laserem



Obr. 70 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.0553

Z optické analýzy znázorněné na obr. 70 je zřejmé, že vzniklá TOO zasahuje do hloubky cca 0,41 mm. TOO lze vizuálně rozdělit na 2 pásma – hlavní pásmo TOO o šířce 0,13 mm a přechodové pásmo o šířce cca 0,28 mm.

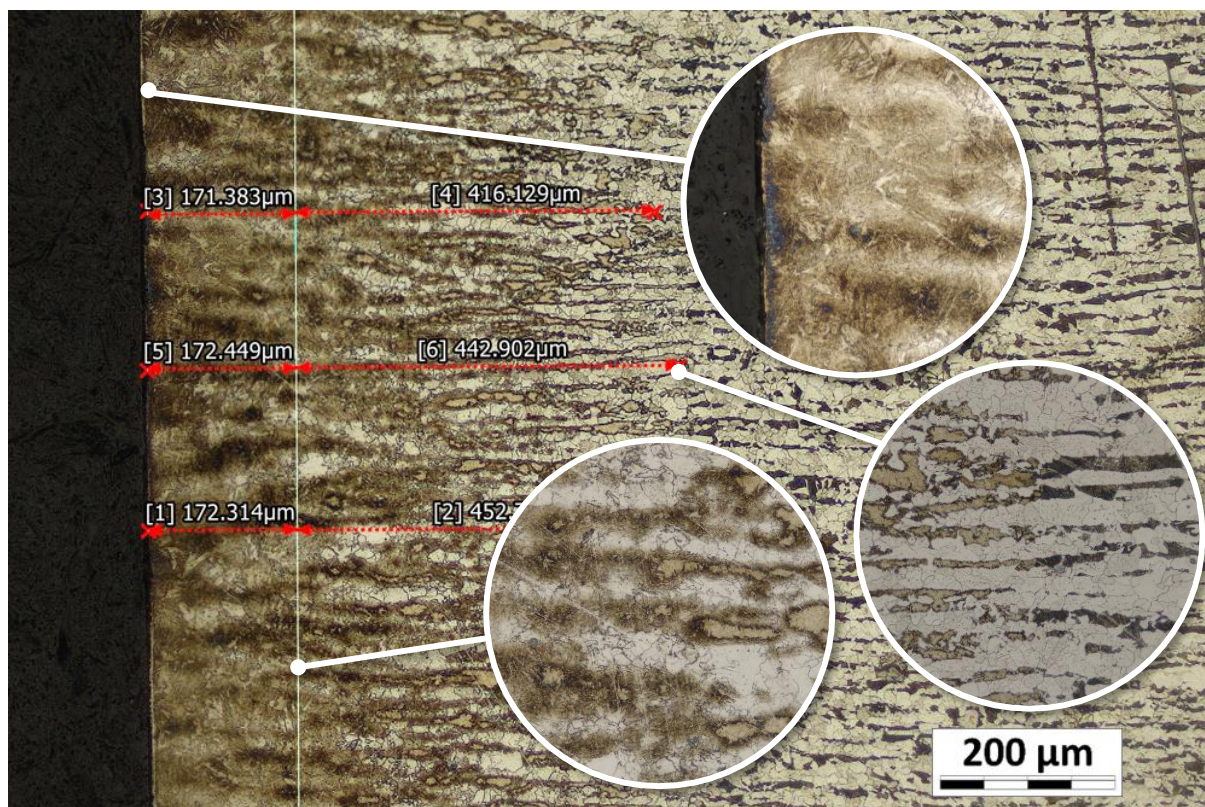
Hlavní pásmo TOO je tvořené nízkouhlíkovou jehlicovitou martenzitickou strukturou, která je místy narušována zbytkovým austenitem vyloučeným na hranici zrn. V přechodovém pásmu dochází k pozvolnému přechodu martenzitické struktury na feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu. Místa přechodu jsou pomocí optické analýzy velmi dobře identifikovatelná. Hodnocení struktury velmi dobře koresponduje s výsledky získanými zkouškami tvrdosti.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 9.

Tab. 9 Rozměry TOO při řezání oceli 1.0553 laserem

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	450	406
šířka hlavního pásma TOO	100	126
šířka přechodového pásma	350	276

4.2.1.2 Určení velikosti TOO při řezání plazmou



Obr. 71 Měření rozměrů TOO při řezání plazmou – ocel 1.0553

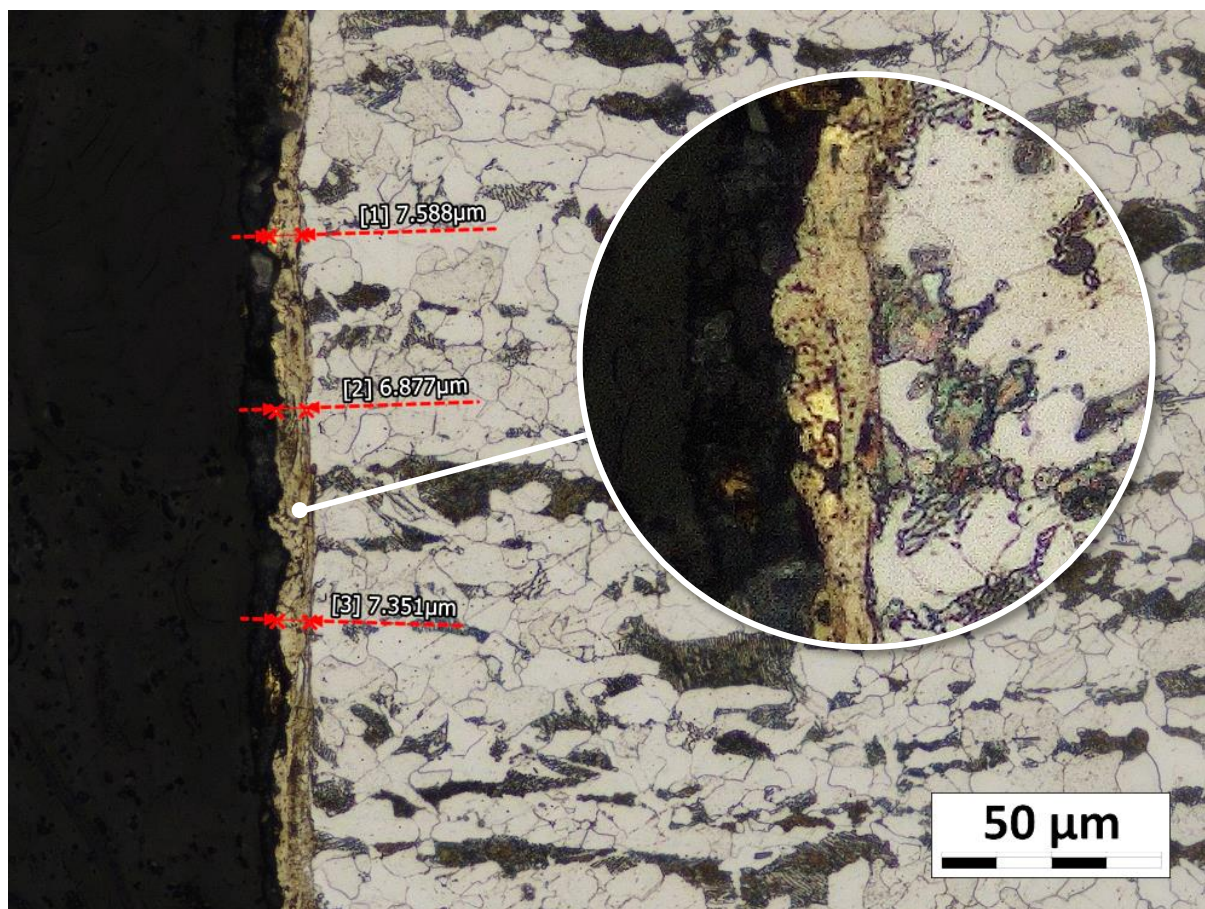
Z optické analýzy na Obr. 71 je zřejmé, že vzniklá TOO zasahuje do hloubky cca 0,62 mm. Přestože tomu průběh indentační tvrdosti nenasvědčoval, optická analýza dokázala, že se TOO skládá rovněž ze dvou pásem. Hlavní pásmo TOO má šířku 0,17 mm a je tvořeno nízkouhlíkovou jehlicovitou martenzitickou strukturou se zbytkovým martenzitem. Za touto oblastí následuje přechodové pásmo, jehož šířka je proměnlivá v závislosti na šířce hlavního pásma TOO a pohybuje se v rozmezí 0,41 - 0,45 mm. V tomto pásmu dochází k pozvolnému přechodu martenzitické struktury na feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v tab. 10. Z uvedených hodnot je patrné, že naměřené výsledky korespondují s výsledky získanými zkouškou tvrdosti v kapitole 3.1.2

Tab. 10 Rozměry TOO při řezání oceli 1.0553 plazmou

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	600	614
šířka hlavního pásma TOO	150	172
šířka přechodového pásma	450	450

4.2.1.3 Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání



Obr. 72 Měření rozměrů TOO při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.0553

Průběh indentační tvrdosti u zkušebního tělesa děleného pomocí elektroerozivního drátového řezání nevykazoval žádné změny ani drobná kolísání, které by naznačovaly přítomnost TOO.

Optická analýza znázorněná na Obr. 72 však ukázala, že v místě řezu vznikla velmi úzká oblast TOO, jejíž šířka je poměrně stálá po celé délce řezu a pohybuje se v rozmezí 0,0068 - 0,0075 mm. Dostupná literatura [46][47][48] tento typ TOO popisuje jako tzv. bílou vrstvu, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti v místě řezu. Struktura této oblasti je martenzitická. Za touto oblastí není žádné přechodové pásmo – následuje skoková změna materiálu na základní feriticko-perlitickou strukturu.

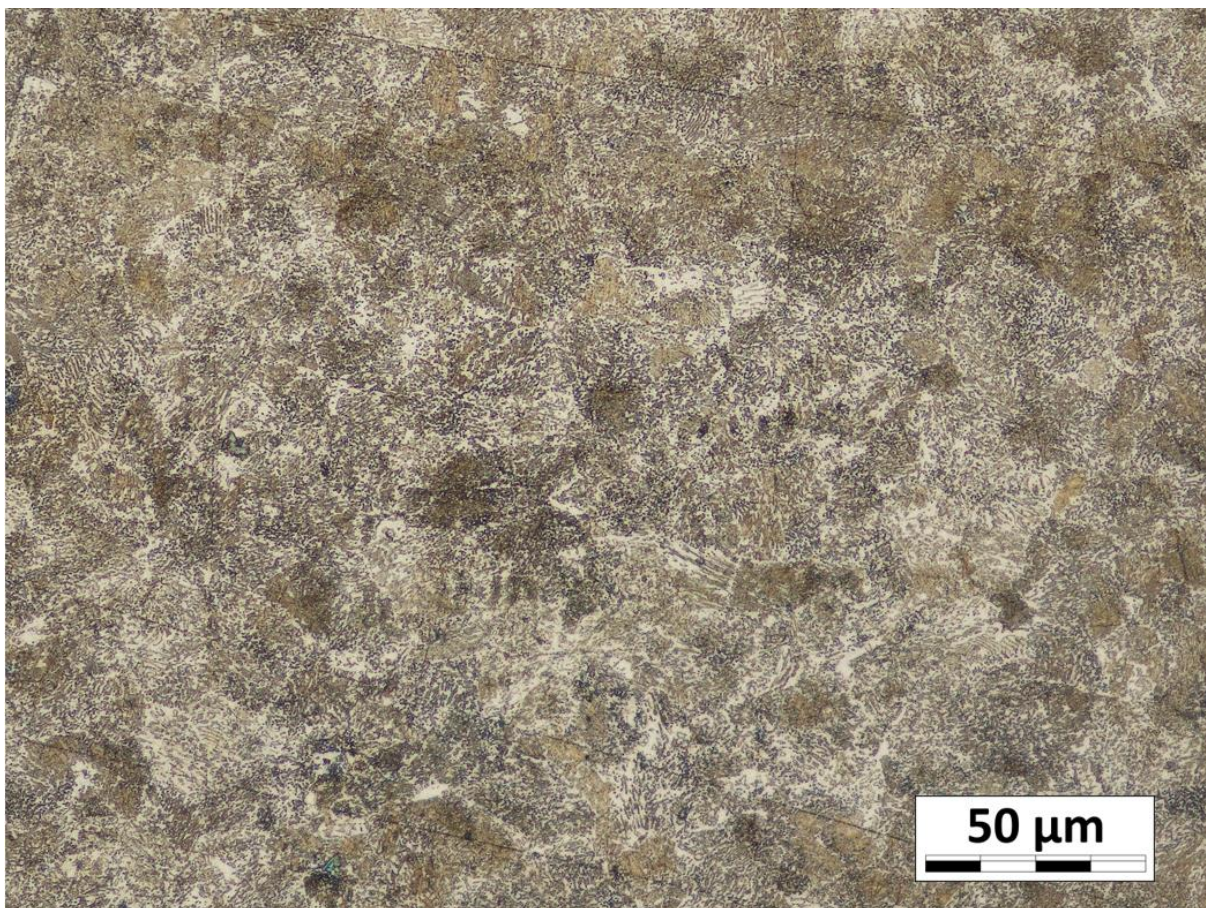
Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 11

Tab. 11 Rozměry TOO při dělení oceli 1.0553 elektroer. drátovým řezáním

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	neidentifikováno	7

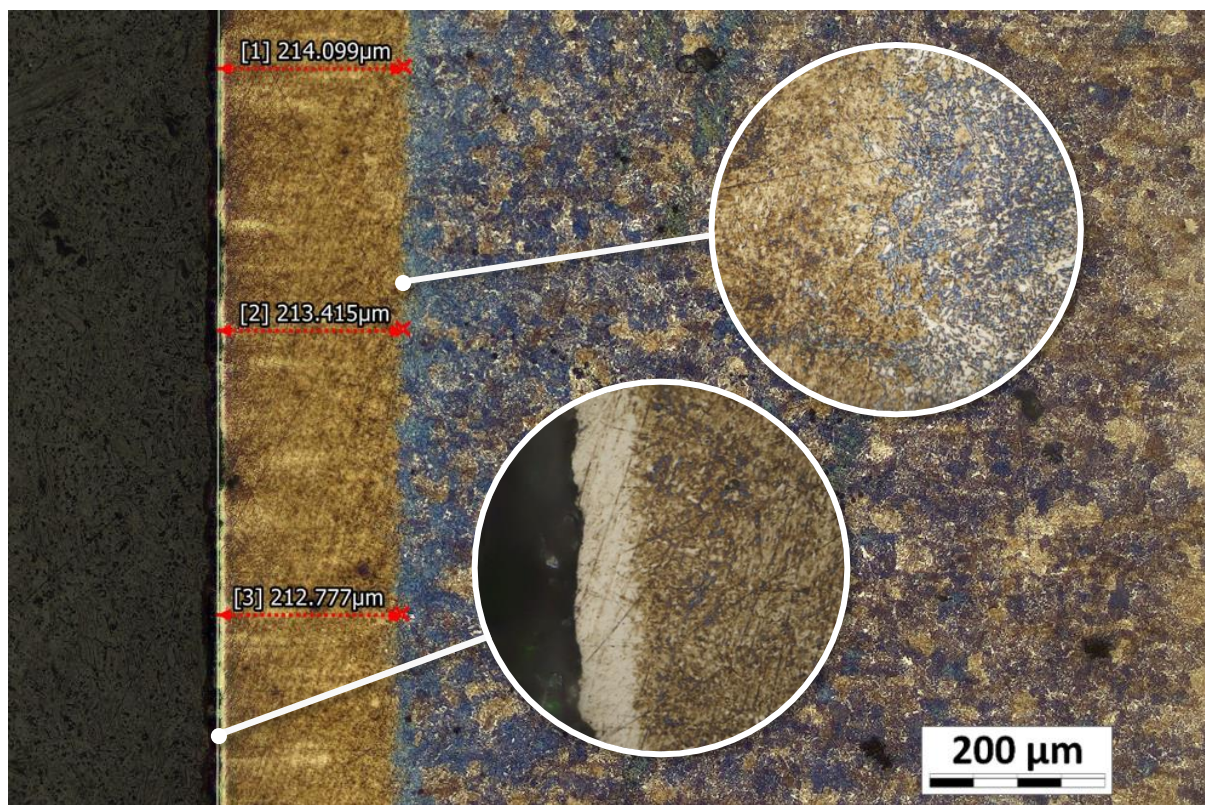
4.2.2 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

Základní materiál oceli 1.7102 je stejně jako u oceli 1.0553 tvořen feriticko-perlitickou strukturou. Perlit je však ve feritu vyloučen v globulární formě. Materiál plechů byl po válcování pravděpodobně vyžihán na měkko. Struktura tohoto materiálu je znázorněná na Obr. 73.



Obr. 73 Feriticko-perlitická struktura základního materiálu 1.7102

4.2.2.1 Určení velikosti TOO při řezání laserem



Obr. 74 Měření rozměrů TOO při řezání laserem – ocel 1.7102

Z optické analýzy na Obr. 74 vyplývá, že při dělení laserem vznikla ve zkušebním tělese z materiálu 1.7102 TOO o šířce cca 0,21 mm. TOO se skládá celkem ze dvou pásem .

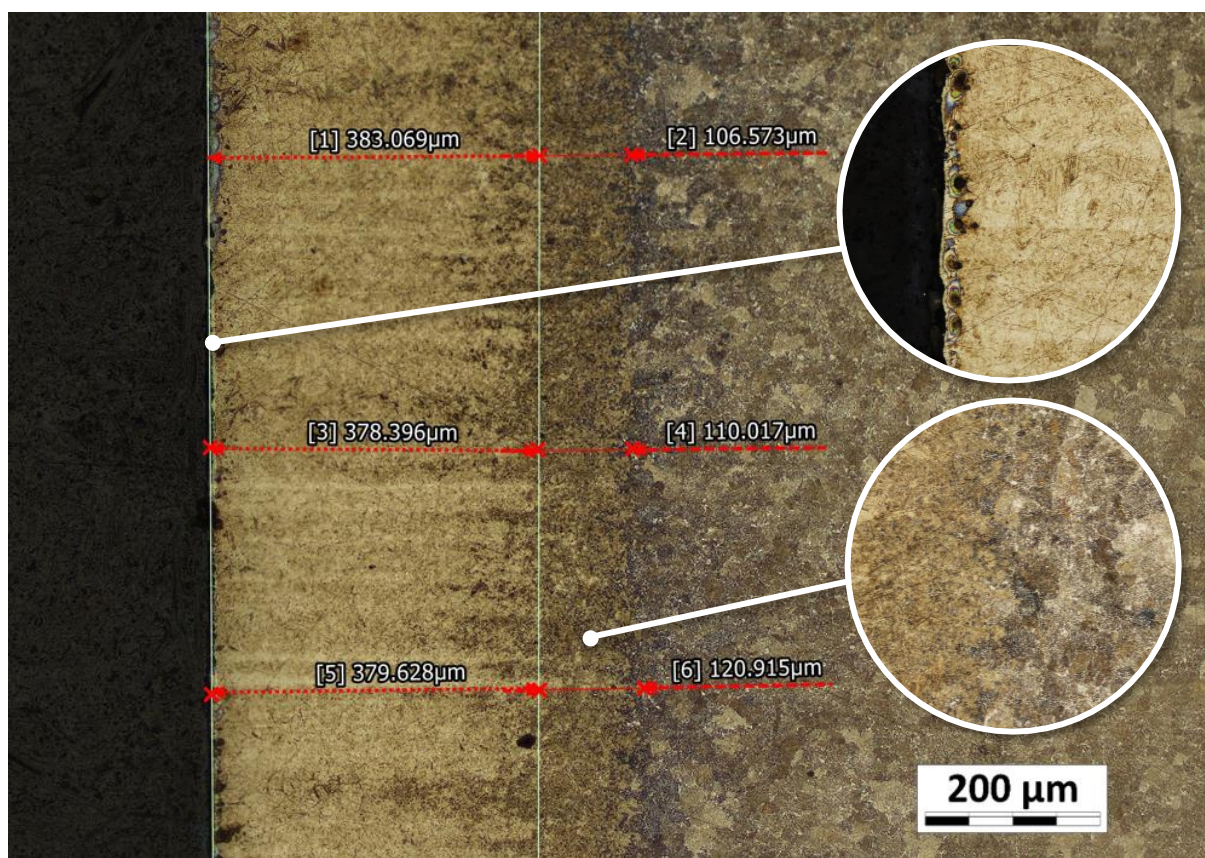
První pásmo je široké cca 0,012 mm, je tvořené čistě martenzitickou strukturou a opticky připomíná tzv. bílou vrstvu, která vzniká při elektroerozivním drátovém řezání. Za tímto pásmem následuje hlavní pásmo TOO o šířce cca 0,21 mm. Jeho struktura je tvořena jehlicovitou martenzitickou strukturou. Za hlavním pásmem TOO následuje velmi úzká přechodová oblast široká cca 0,045 mm, ve které dochází k téměř okamžité změně na feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 12.

Tab. 12 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 laserem

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	250	212
šířka bíle vrstvy	neidentifikováno	12
šířka hlavního pásma TOO	200	250
šířka přechodového pásma	50	45

4.2.2.2 Určení velikosti TOO při řezání plazmou



Obr. 75 Měření rozměrů TOO při řezání plazmou – ocel 1.7102

Při dělení zkušebního tělesa z oceli 1.7102 plazmou vznikla v místě řezu TOO o šířce cca 0,49 mm. Tato oblast se skládá celkem ze tří pásem (viz Obr. 75)

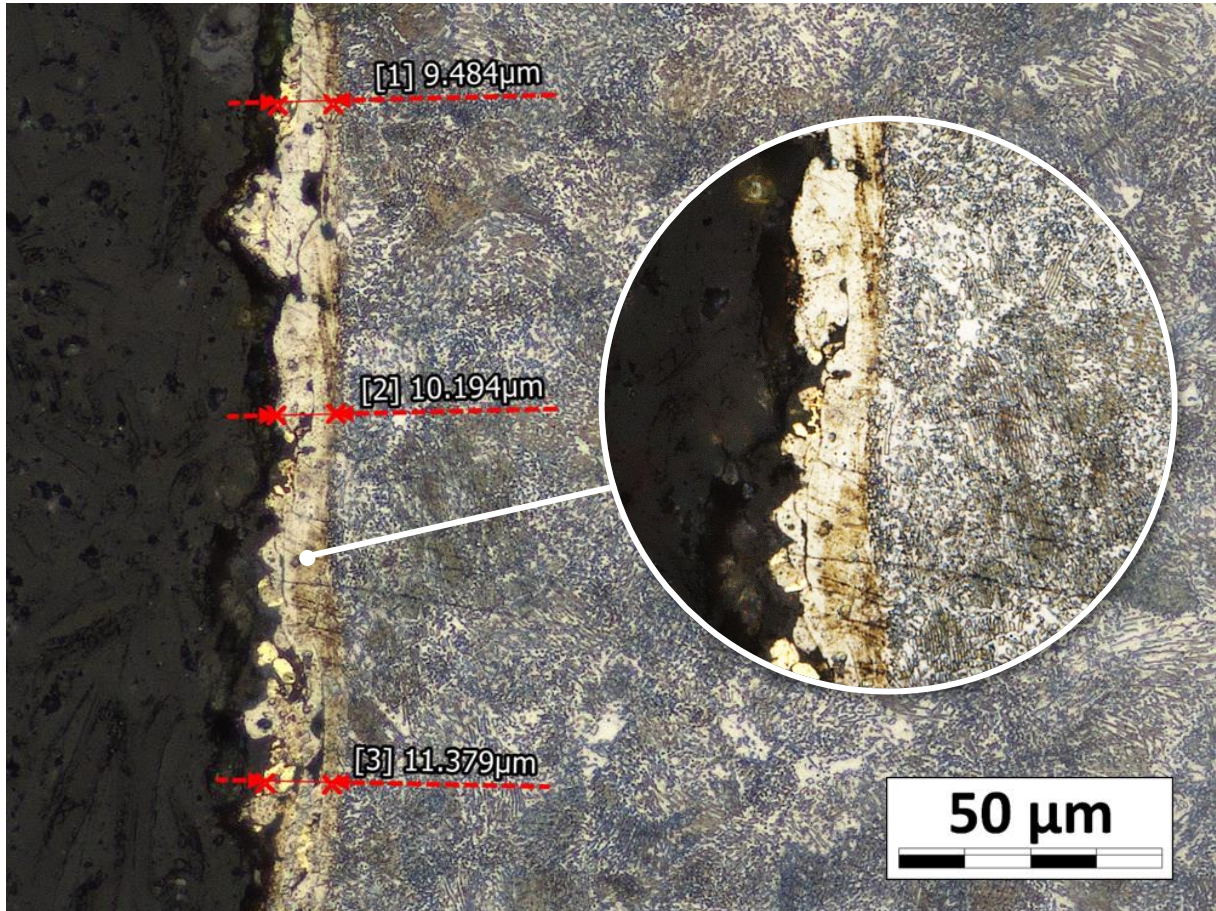
První pásmo je široké cca 0,007 mm a je tvořené čistě martenzitickou strukturou. Za tímto pásmem následuje hlavní pásmo TOO, které je široké cca 0,38 mm. Struktura tohoto pásma tvořena jehlicovitou martenzitickou strukturou a svým charakterem je velmi podobná struktuře tzv. bílé vrstvy. Za hlavním pásmem TOO následuje velmi úzká přechodová oblast o šířce cca 0,11 mm, ve které dochází k téměř skokové změně přechodové struktury na feriticko-perlitickou strukturu základního materiálu.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 13.

Tab. 13 Rozměry TOO při řezání oceli 1.7102 plazmou

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	500	490
šířka bílé vrstvy	neidentifikováno	7
šířka hlavního pásma TOO	350	380
šířka přechodového pásma	150	110

4.2.2.3 Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání



Obr. 76 Měření rozměrů TOO při elektroerozivním drátovém řezání – ocel 1.7102

Průběh indentační tvrdosti u zkušebního tělesa z oceli 1.7102 děleného pomocí elektroerozivního drátového řezání nevykazoval žádné změny ani drobná kolísání, které by naznačovaly přítomnost TOO.

Optická analýza znázorněná na obr. 76 však potvrdila vznik velmi úzké TOO, kterou literatura [46][47][48] popisuje jako tzv. bílou vrstvu. Šířka tohoto pásma je po celé délce řezu poměrně stálá a pohybuje se v rozmezí 0,009 - 0,01 mm. Struktura této oblasti je martenzitická. Za touto oblastí není žádné přechodové pásmo – následuje skoková změna na základní feriticko-perlitickou strukturu.

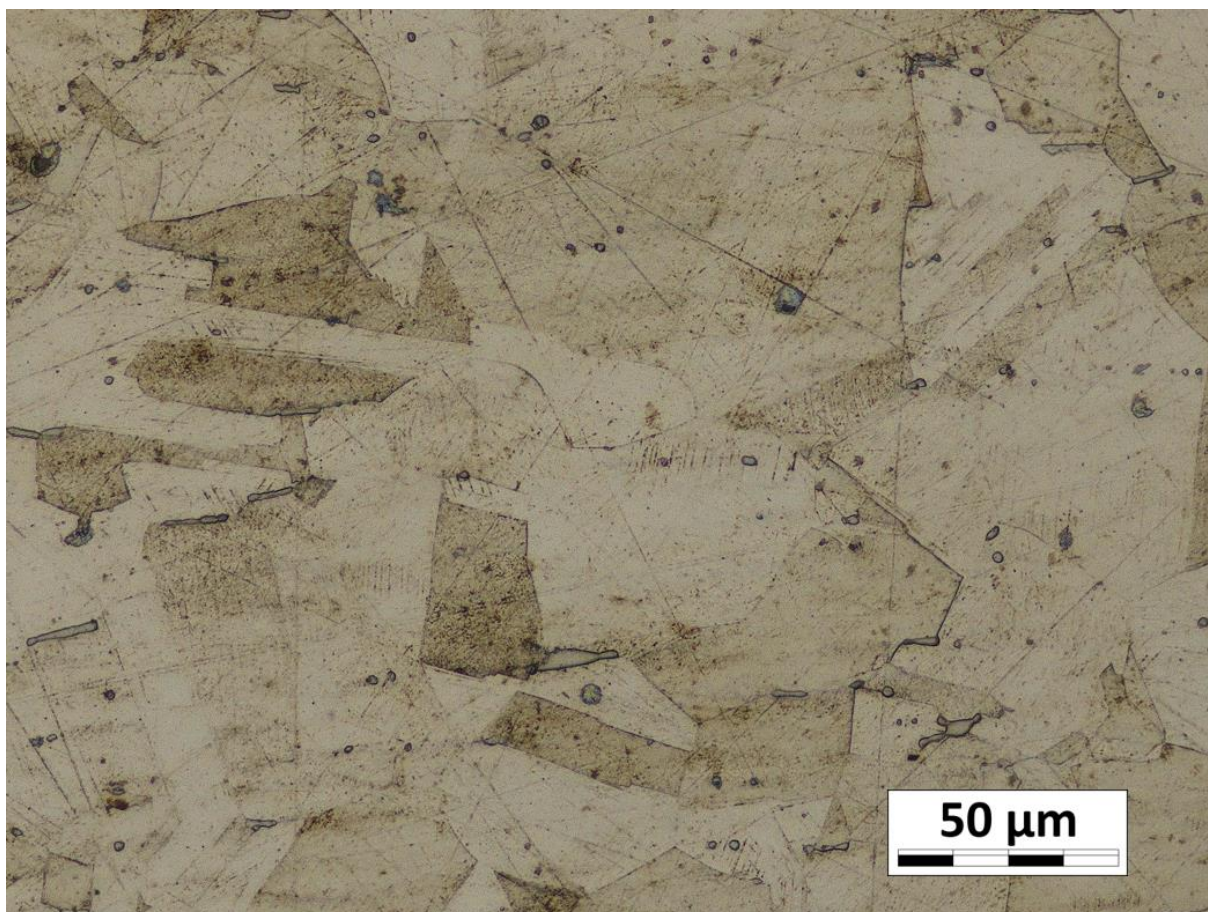
Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 14.

Tab. 14 Rozměry TOO při dělení oceli 1.7102 elektroer. drátovým řezáním

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	neidentifikováno	10

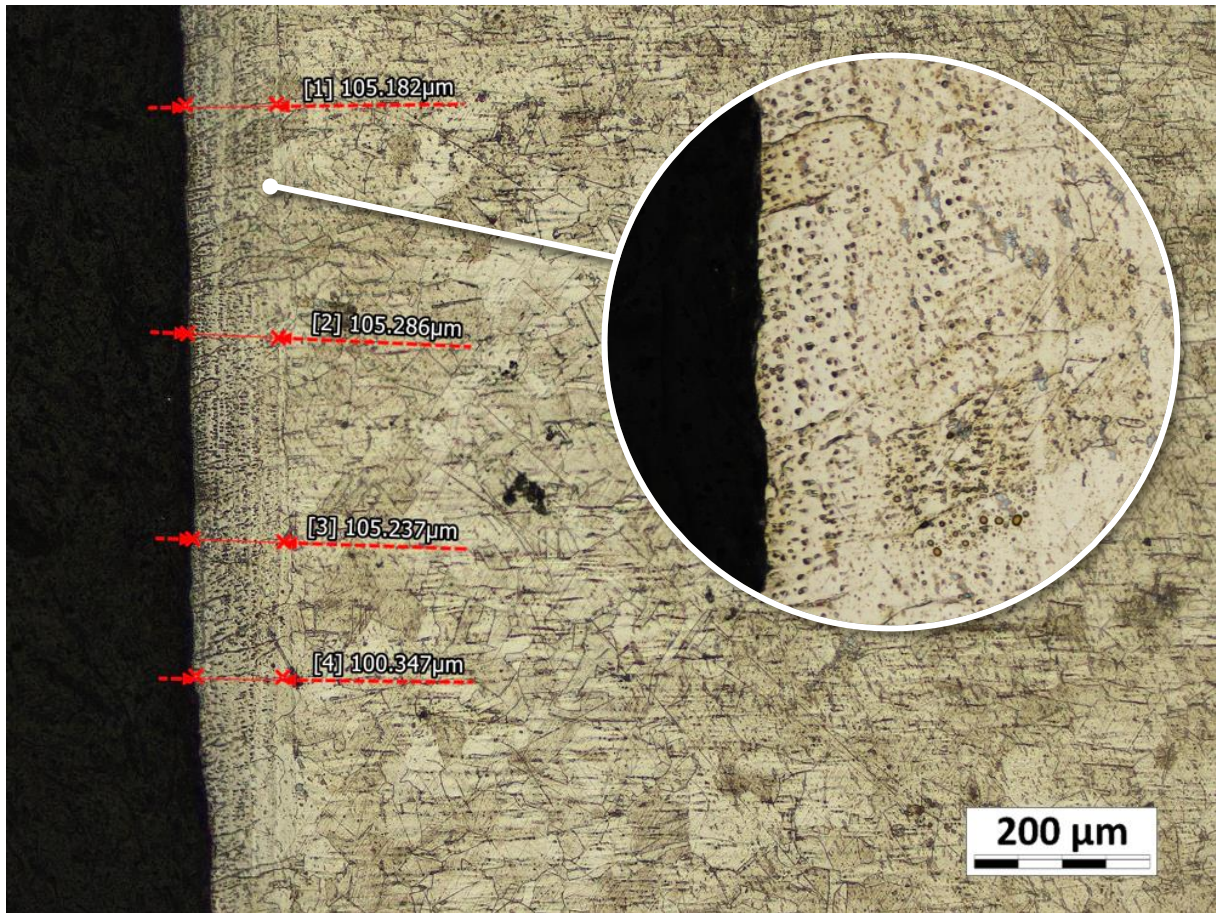
4.2.3 Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)

Základního materiálu této oceli je tvořen austenitickou strukturou s rovnoměrnou velikostí zrna o průměrné indentační tvrdosti $HV_{IT} = 225 \text{ HV}$. Struktura této oblasti je znázorněna na Obr. 77. Jedná se o tzv. nestabilizovanou ocel, která je dodávána ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Tomuto tepelnému zpracování odpovídají i tzv. žíhací dvojčata viditelná ve struktuře (dvojice rovnoběžek protínající austenitické zrno).



Obr. 77 Austenitická struktura základního materiálu 1.4301

4.2.3.1 Určení velikosti TOO při řezání laserem



Obr. 78 Měření velikosti TOO při řezání laserem – ocel 1.4301

Průběh indentační tvrdosti u zkušebního tělesa z materiálu 1.4301 děleného laserem nevykazoval v blízkosti řezu žádné změny, které by naznačovaly přítomnost TOO. Optická analýza (obr. 78) však ukázala, že v místě řezu vznikla velmi úzká oblast TOO, jejíž šířka je po celé délce řezu cca 0,10 mm.

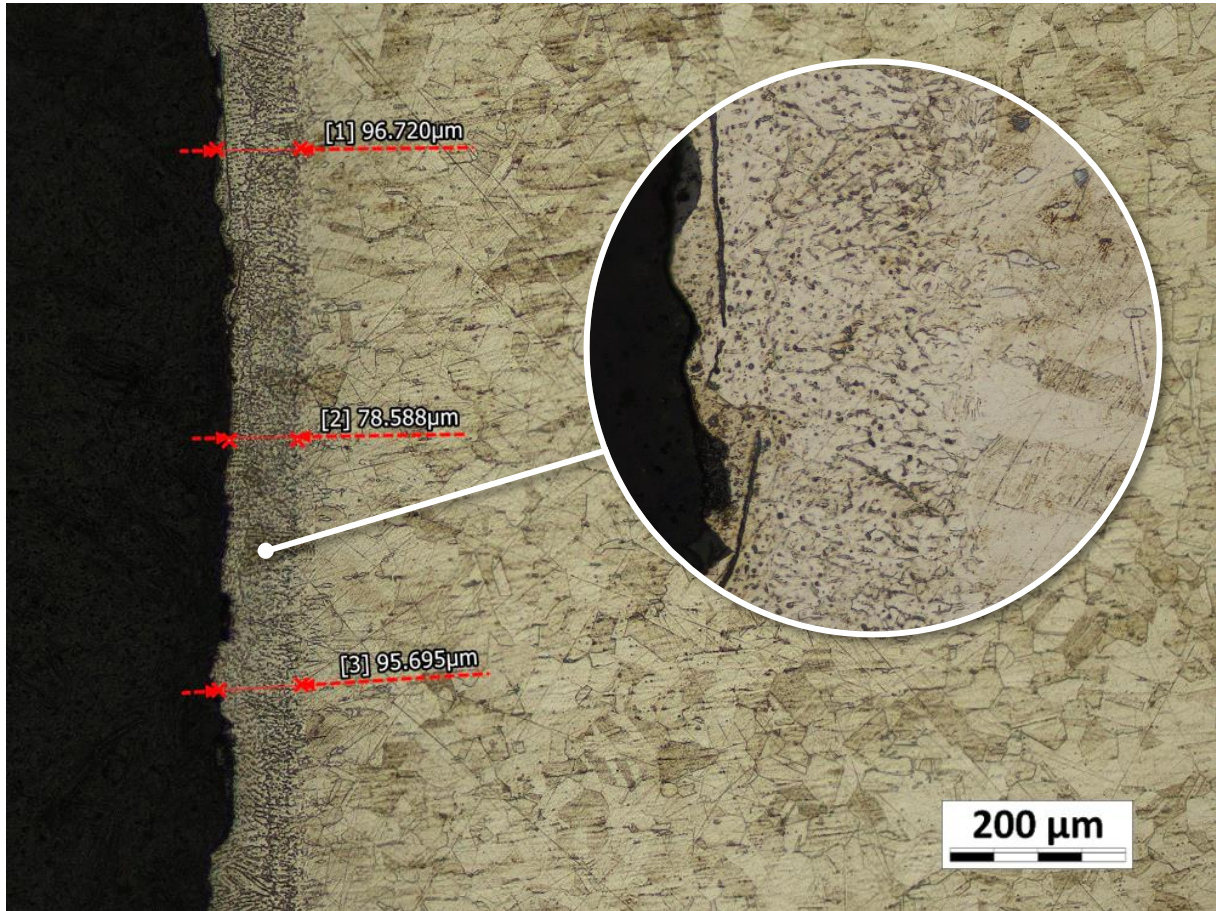
Ve struktuře TOO dochází vlivem tepelného účinku laserového paprsku k vylučování karbidů chromu. K precipitaci těchto karbidů dochází při teplotě 400 až 900 °C. Tento jev se nazývá zcitlivění korozivzdorných ocelí. K vylučování karbidů chromu dochází přednostně na hranicích zrn, ale i na rozhraních dvojčat. Oblast s vyloučenými karbidy chromu má nižší korozivzdornost než základní materiál a často v ní dochází k mezikrystalické korozi.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 15.

Tab. 15 Rozměry TOO při řezání oceli 1.4301 laserem

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	neidentifikováno	104

4.2.3.2 Určení velikosti TOO při řezání plazmou



Obr. 79 Měření velikosti TOO při řezání plazmou – ocel 1.4301

Průběh indentační tvrdosti u zkušebního tělesa z materiálu 1.4301 děleného plazmou nevykazoval stejně jako v případě dělení laserem v blízkosti řezu žádné změny, které by naznačovaly přítomnost TOO.

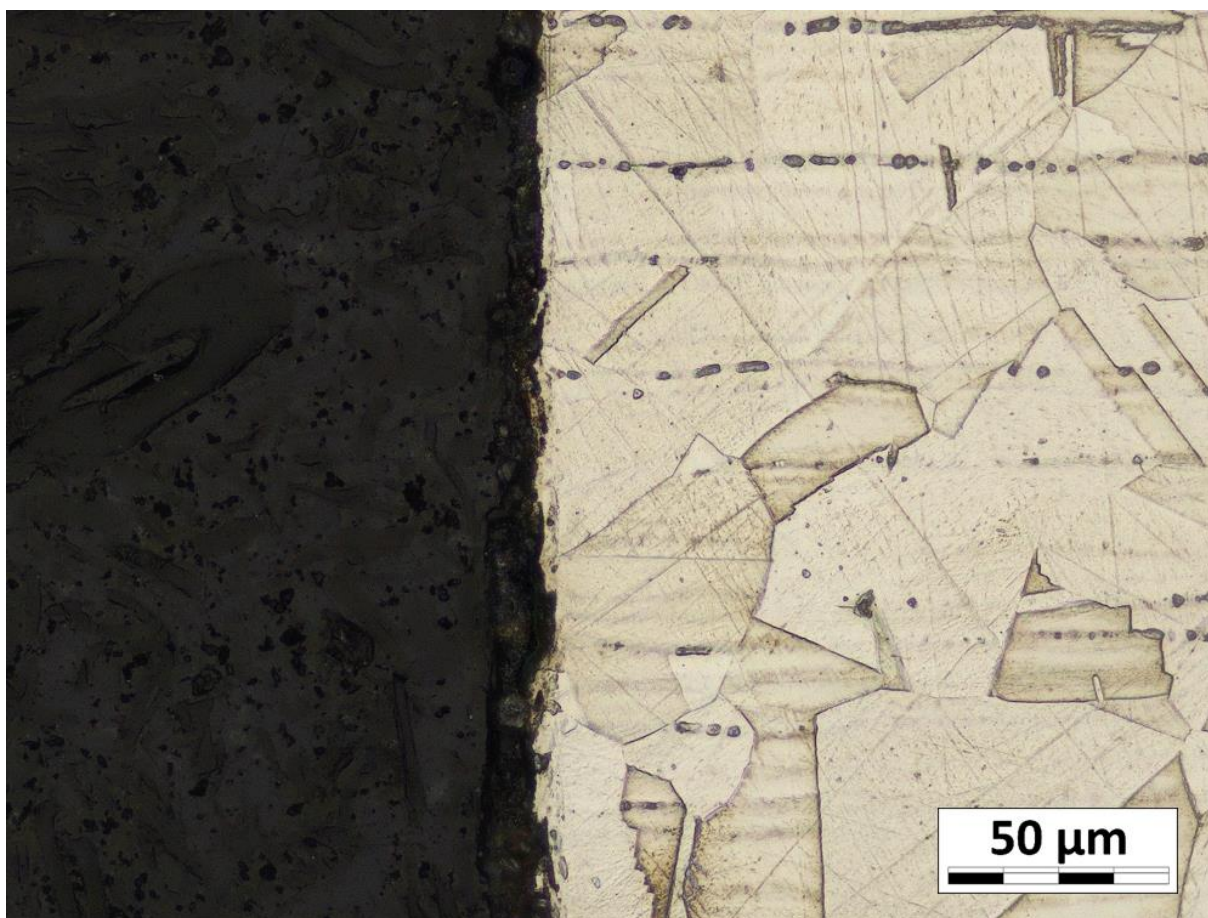
Optická analýza (viz Obr. 79) však stejně jako v případě dělení laserem odhalila, že v místě řezu vznikla velmi úzká oblast TOO, jejíž šířka je cca 0,10 mm. Tato oblast je po celé délce řezu poměrně stálá a nedochází k žádnému výraznějšímu kolísání její šířky. Ve struktuře TOO dochází vlivem tepelného účinku plazmy k vylučování karbidů chromu.

Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 16.

Tab. 16 Rozměry TOO při řezání oceli 1.4301 plazmou

	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	neidentifikováno	90

4.2.3.3 Určení velikosti TOO při elektroerozivním drátovém řezání



Obr. 80 Měření velikosti TOO při elektroer. drátovém řezání – ocel 1.4301

Průběh indentační tvrdosti u zkušebního tělesa z materiálu 1.4301 děleného elektroerozivním drátovým řezáním nevykazoval žádné změny či poklesy hodnot tvrdosti, které by naznačovaly přítomnost TOO.

Optická analýza znázorněná na Obr. 80 prokázala, že v místě řezu nevznikla vlivem dělení žádná TOO. Porovnání naměřených rozměrů TOO a odhadovaných hodnot z průběhu indentační zkoušky je uvedeno v Tab. 17.

Tab. 17 Rozměry TOO při dělní oceli 1.4301 elektroerozivním drátovým řezáním

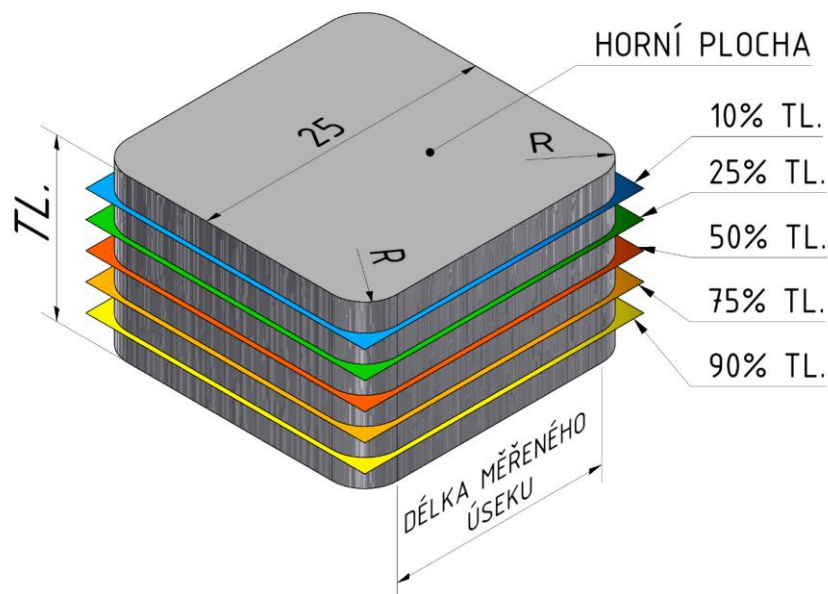
	Odhad z průběhu indentační zkoušky [μm]	Průměr naměřených hodnot z optické analýzy [μm]
šířka TOO	neidentifikováno	neidentifikováno

4.3 Vyhodnocení drsnosti řezných ploch

Pro měření drsnosti řezných ploch byla využita bezkontaktní metoda měření profilu pomocí laserového mikroskopu Keyence Laser Microscope. Přestože dodavatelé zařízení pro nekonvenční dělení uvádí drsnost řezných ploch při různých procesních parametrech jako jednu hodnotu, z povrchu řezných ploch některých zkušebních těles je zřejmé, že drsnost na celé řezné ploše není konstantní.

Drsnost řezné plochy zkušebního tělesa byla měřena v celkem pěti řezných rovinách rovnoběžných s horní plochou zkušebního tělesa. Horní plocha zkušebního tělesa je shodná s horní plochou plechu, který sloužil jako polotovár pro jeho výrobu. Je to rovněž plocha, na kterou začal působit paprsek či nástroj při zahájení procesu dělení. Vzdálenost řezných rovin od horní plochy zkušebních tělesa je 10%, 25%, 50%, 75% a 90% tloušťky zkušebního tělesa (viz Obr. 81). Drsnost řezné plochy byla v těchto rovinách měřena liniově po celé délce hrany zkušebního tělesa mimo technologických rádiusů ostrých rozích (cca 20 mm). Vyhodnocovanými parametry drsnosti byly:

- největší výška profilu drsnosti Rz
- průměrná aritmetická úchylnka profilu Ra



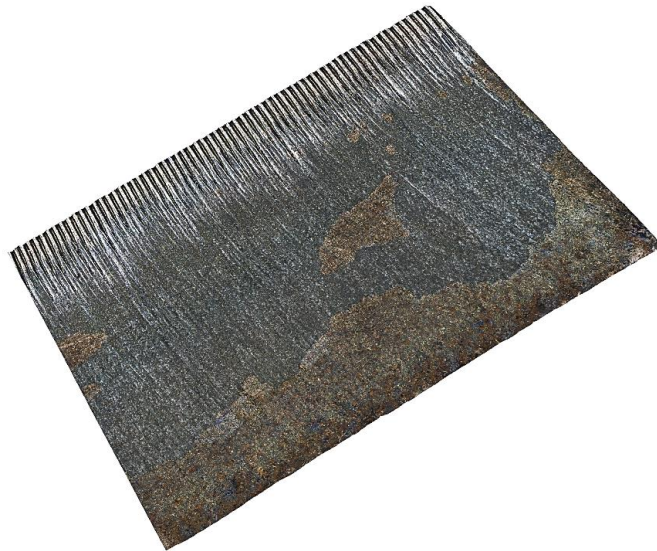
Obr. 81 Schéma měření drsnosti na zkušebním tělese

V této části jsou prezentovány pouze výsledky měření drsnosti ploch u zkušebních těles tloušťky 15 mm. U většiny zkušebních těles této tloušťky byla pozorována největší nekonzistentnost drsnosti na šířce řezné plochy.

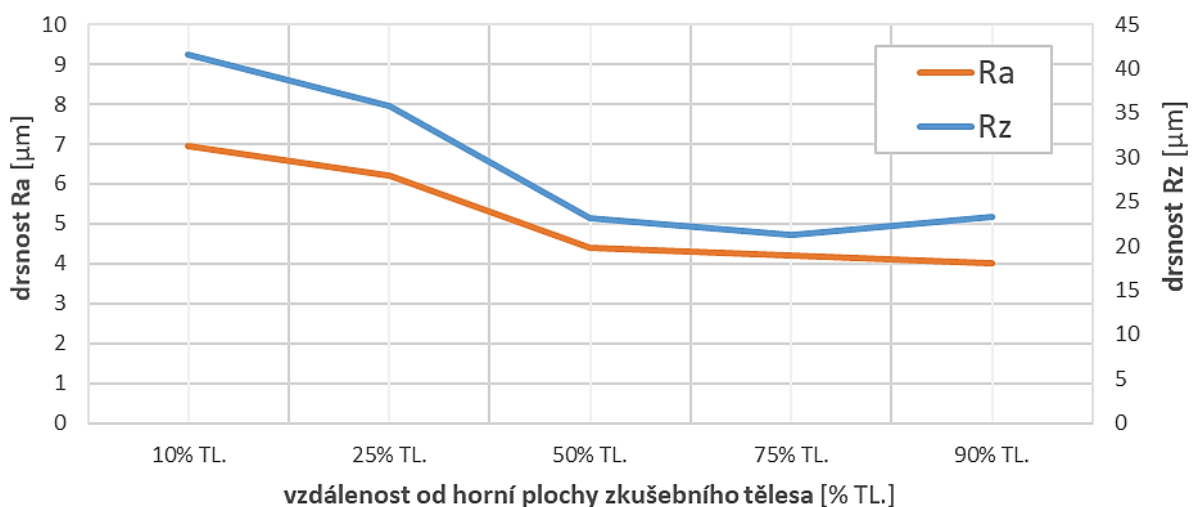
Při měření drsnosti laserovým skenovacím mikroskopem byla rovněž nasnímana textura řezné plochy, která sloužila pro zhodnocení pohledových vlastností řezné plochy.

4.3.1 Ocel 1.0553 (dle ČSN: 11 523)

4.3.1.1 Řezání laserem



Obr. 82 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez laserem



Obr. 83 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez laserem

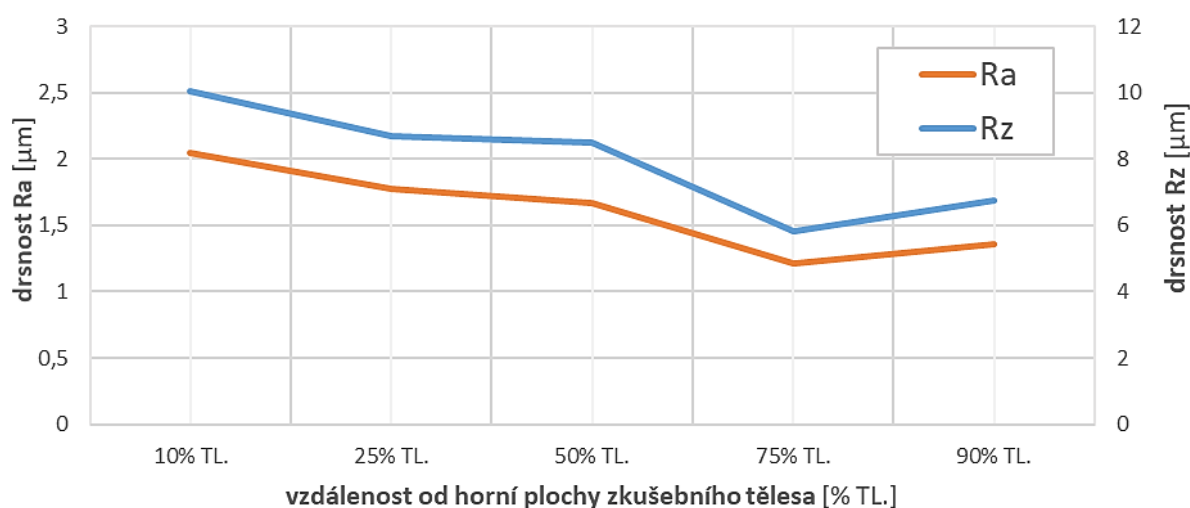
Z výsledků znázorněných na Obr. 83 vyplývá, že při dělení materiálu 1.0553 laserem není drsnost na řezné ploše konstantní. Nejvyšší naměřená drsnost Ra je v místě vniku paprsku do materiálu (Ra 6,9). S přibývajícím tloušťkou dochází k postupnému snižování drsnosti až do místa, kdy laserový paprsek opouští řez (Ra 4,0). Průběh výšky profilu Rz vykazuje obdobné chování jako hodnota Ra.

Řezná plocha vykazuje typické vroubkování v místě vniku laseru do materiálu. Řez je poměrně čistý, bez výrazných opalů či známek koroze. Ve spodní čtvrtině řezu dochází ke vzniku viditelných okují (viz Obr. 82).

4.3.1.2 Řezání plazmou



Obr. 84 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez plazmou



Obr. 85 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez plazmou

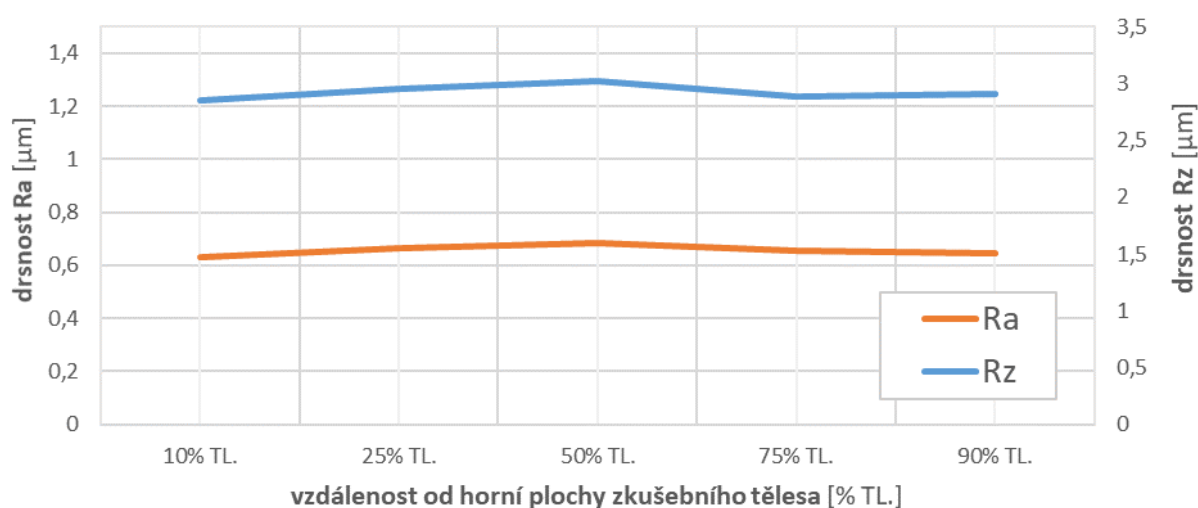
Z výsledků uváděných na Obr. 85 vyplývá, že při dělení materiálu 1.0553 plazmou rovněž nedochází ke vzniku řezné plochy s konstantní drsností. Nejvyšší naměřená drsnost Ra je v místě vniku plazmového paprsku do materiálu (Ra 2,0). S přibývajícím tloušťkou dochází k postupnému snižování drsnosti až do místa, kdy laserový paprsek opouští řez (Ra 1,35). Průběh obou sledovaných hodnot vykazuje stejné tendenci chování jako při dělení laserem. Počáteční drsnost místě vniku plazmového paprsku je však cca trojnásobně nižší než při řezání laserem.

Řezná plocha vykazuje tzv. vlnkování, které je pro řezání plazmou typické. Řez je poměrně čistý, s mírným opalem horní hrany a bez známek koroze. V dolní polovině řezu dochází na celé ploše ke vzniku okují (viz Obr. 84).

4.3.1.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 86 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání



Obr. 87 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání

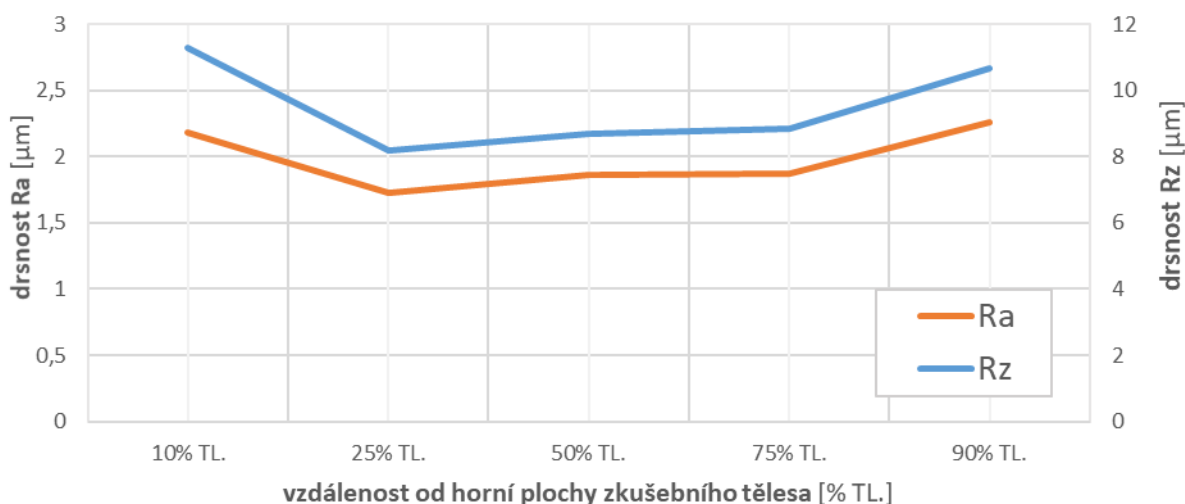
Z výsledků měření drsnosti na Obr. 87 vyplývá, že při dělení materiálu 1.0553 pomocí elektroerozivního drátového řezání dochází ke vzniku řezné plochy s konstantní drsností cca Ra 0,65. Oba sledované parametry drsnosti mají po celém řezu téměř shodný průběh.

Celá řezná plocha vykazuje známky rovnoměrného opalu, který má silně oranžovou barvu (viz Obr. 86).

4.3.1.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 88 Textura řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez vodním paprskem



Obr. 89 Drsnost řezné plochy – ocel 1.0553, TL. 15 mm, řez vodním paprskem

Z výsledků uvedených na Obr. 89 vyplývá, že při řezání materiálu 1.0553 vodním paprskem rovněž dochází ke vzniku řezné plochy s téměř konstantní drsností Ra 2,0. K drobnému vychýlení hodnot Ra a Rz dochází v místě vniku a v místě výstupu vodního paprsku do materiálu (cca Ra 2,2).

Řez vykazuje známky lokální koroze, která vzniká v horní třetině řezné plochy a postupuje směrem k dolní hraně zkušebního tělesa (viz Obr. 88).

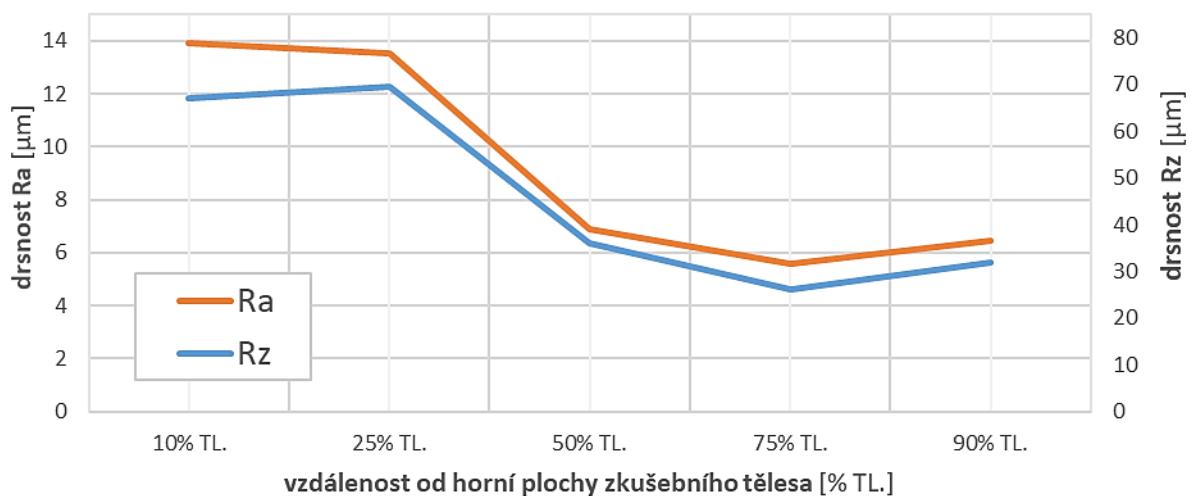
4.3.2 Ocel 1.7102 (dle ČSN: 14 260)

Výsledky měření drsnosti a optických vlastností řezných ploch u oceli 1.7102 vykazují tendenčně stejné chování jako u oceli 1.0553. Z tohoto důvodu jsou zde výsledky uvedeny bez doprovodného komentáře.

4.3.2.1 Řezání laserem



Obr. 90 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez laserem

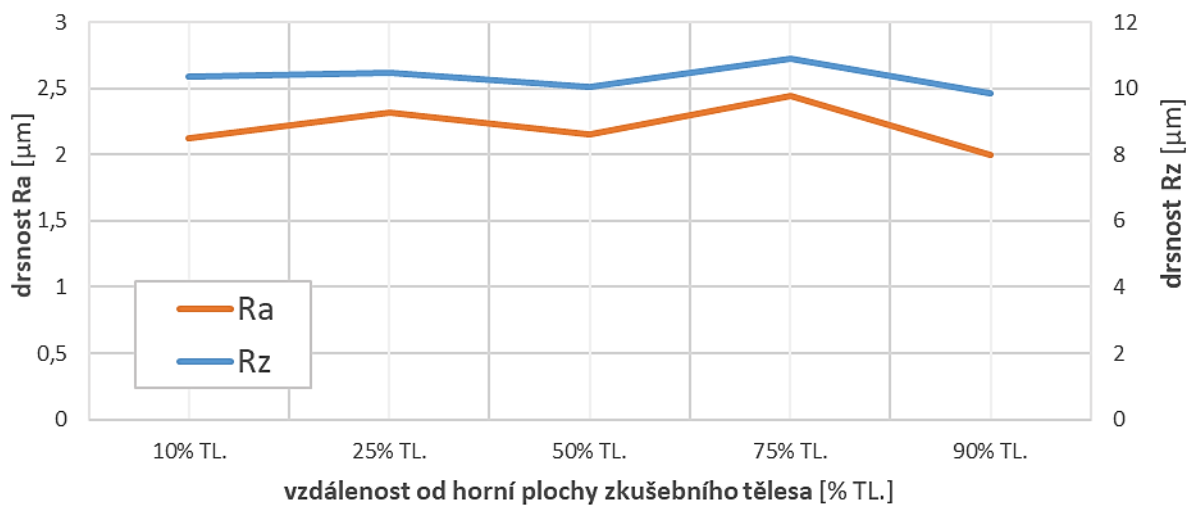


Obr. 91 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez laserem

4.3.2.2 Řezání plazmou



Obr. 92 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez plazmou

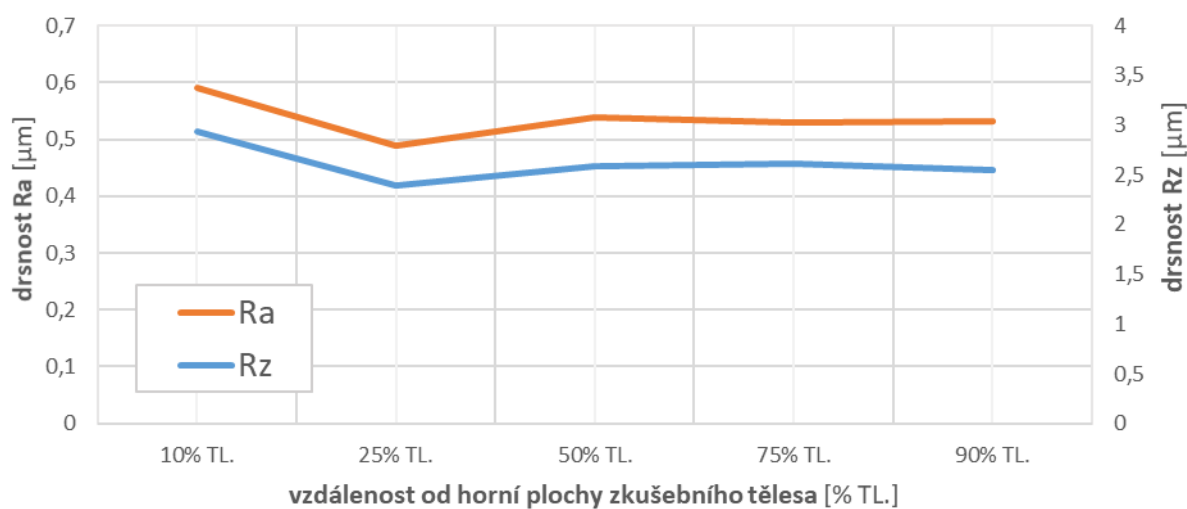


Obr. 93 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez plazmou

4.3.2.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 94 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání

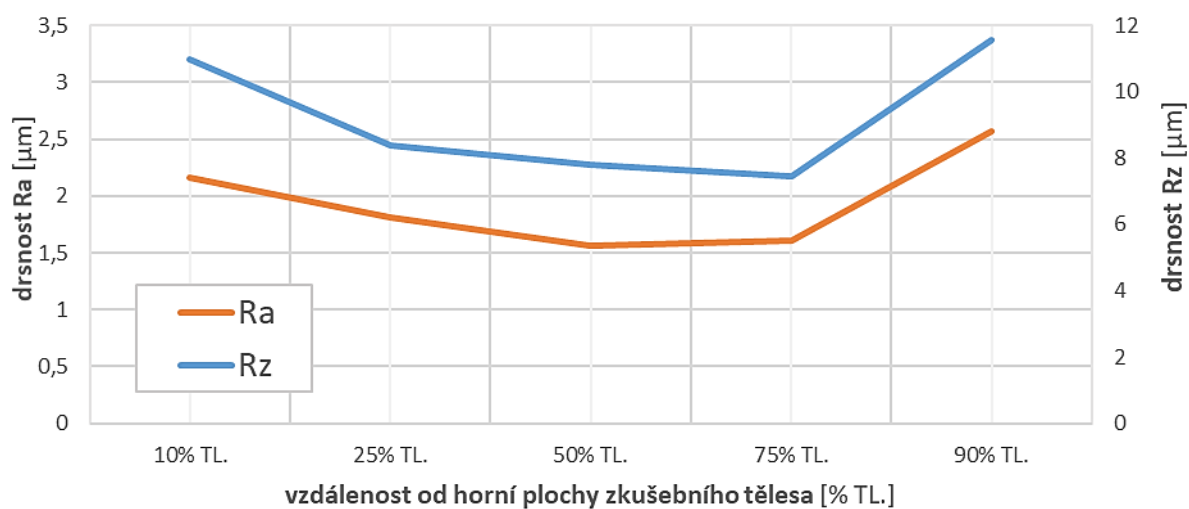


Obr. 95 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání

4.3.2.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 96 Textura řezné plochy – ocel 1.7102, TL. 15 mm, řez vodním paprskem



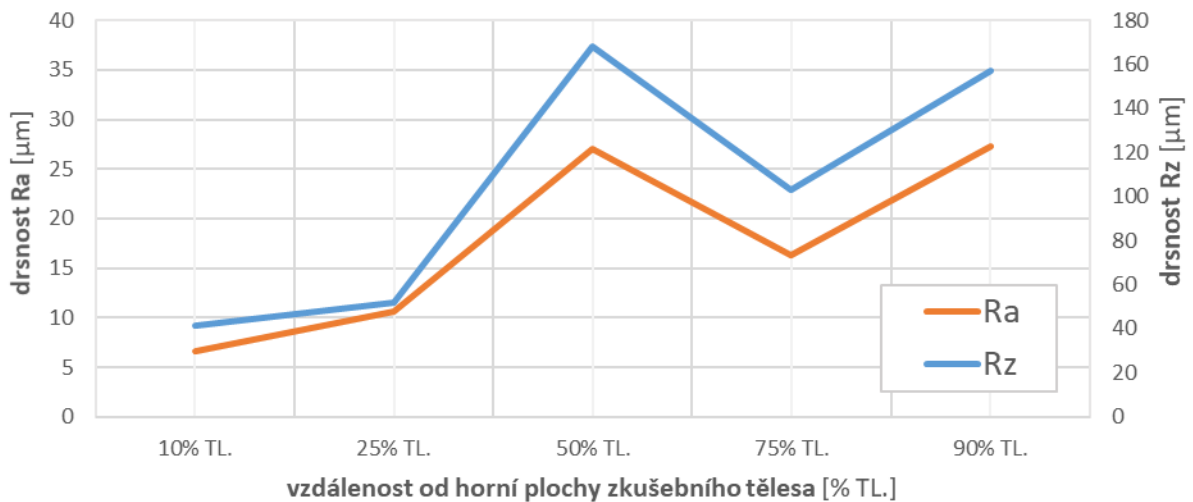
Obr. 97 Drsnost řezné plochy – ocel 1.1702, TL. 15 mm, řez vodním paprskem

4.3.3 Ocel 1.4301 (dle ČSN: 17 240)

4.3.3.1 Řezání laserem



Obr. 98 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez laserem



Obr. 99 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez laserem

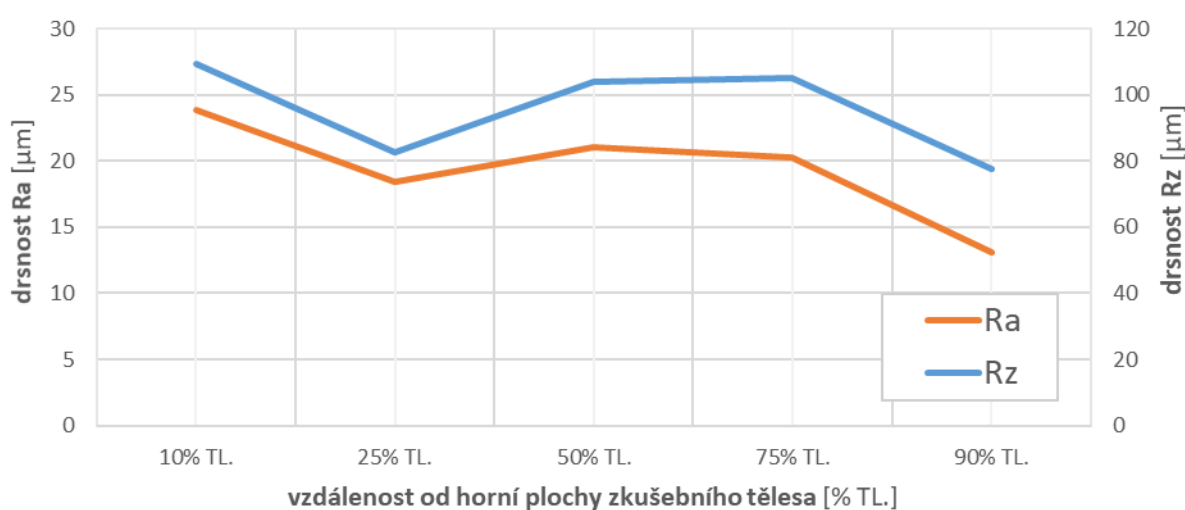
Z výsledků znázorněných na Obr. 99 vyplývá, že při dělení oceli 1.4301 laserem není drsnost na řezné ploše konstantní a má přesně obrácený průběh než v případě dělení ocelí 1.0553 a 1.7102. Nejnižší naměřená drsnost Ra je v místě vniku paprsku do materiálu (Ra 6,6). S přibývajícím tloušťkou dochází k postupnému zvyšování Ra až do místa, kdy laserový paprsek opouští řez (Ra 27,2). Průběh výšky profilu Rz vykazuje obdobné chování jako hodnota Ra.

Řezná plocha je vizuálně velmi nesourodá a na horní i dolní ploše plechu docházelo ke vzniku barevných oxidačních pásů (viz Obr. 82).

4.3.3.2 Řezání plazmou



Obr. 100 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez plazmou



Obr. 101 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez plazmou

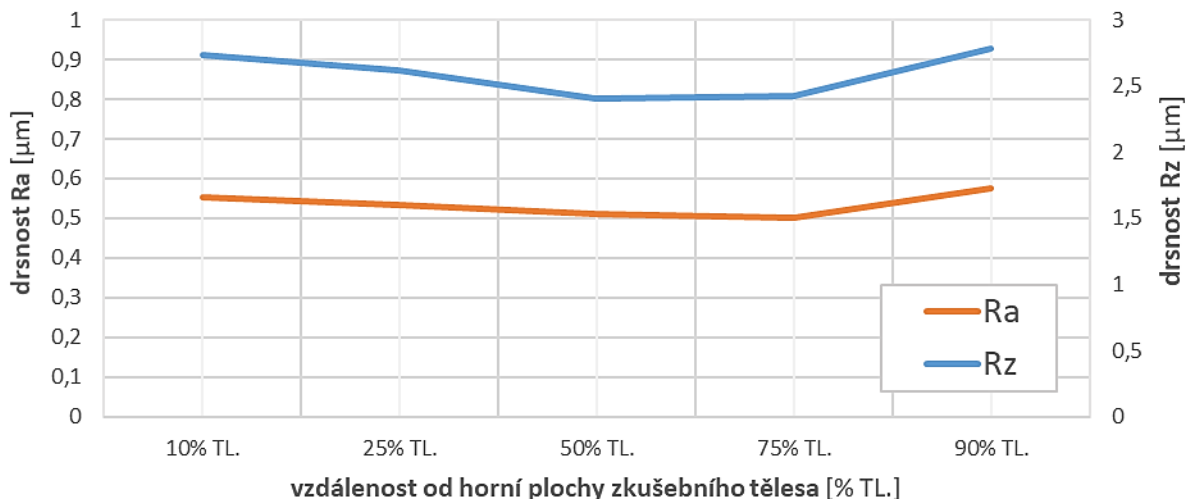
Z výsledků uváděných na Obr. 101 vyplývá, že při dělení materiálu 1.04301 plazmou rovněž nedochází ke vzniku řezné plochy s konstantní drsností. Nejvyšší naměřená drsnost Ra je v místě vniku plazmového paprsku do materiálu (Ra 23,8). S přibývajícím tloušťkou dochází k postupnému snižování drsnosti až do místa, kdy laserový paprsek opouští řez (Ra 13,1).

Řezná plocha je po řezání oceli 1.4301 plazmou silně opálena. Stejně jako v případě dělení stejné oceli laserem docházelo ke vzniku barevných pásem TOO na horní i dolní ploše plechu.

4.3.3.3 Elektroerozivní drátové řezání



Obr. 102 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání



Obr. 103 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, elektroer. drátové řezání

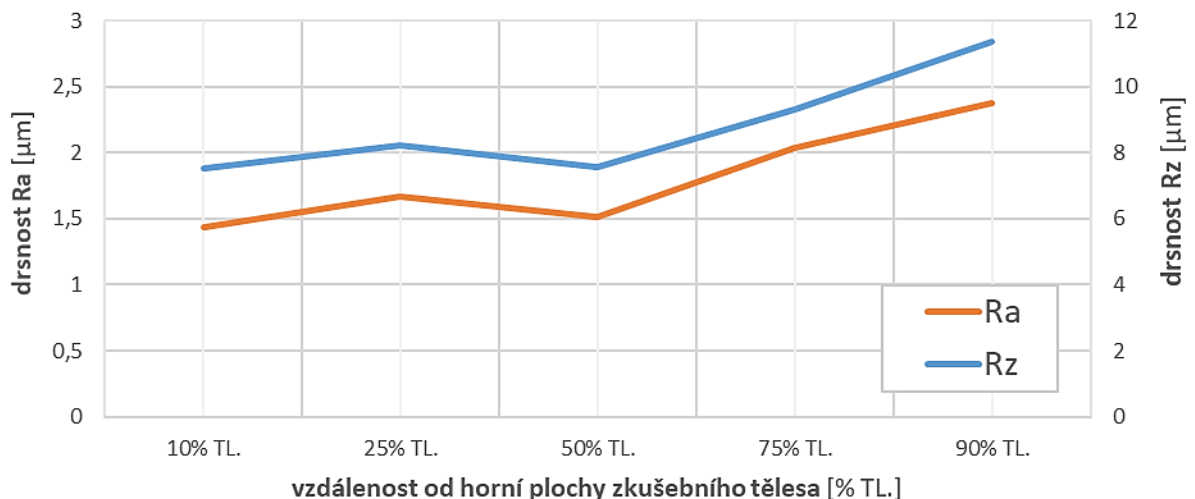
Z výsledků měření drsnosti na Obr. 103 je patrné, že při dělení materiálu 1.4301 pomocí elektroerozivního drátového řezání dochází ke vzniku řezné plochy s konstantní drsností cca Ra 0,53. Oba sledované parametry drsnosti Ra i Rz mají po celém řezu téměř shodný průběh.

Celá řezná plocha vykazuje známky opalu, který má silně oranžovou barvu. Plocha je vizuálně rozdělena na 3 oblasti s různou intenzitou opalu v poměru cca 15 – 60 – 25 % tloušťky plechu (viz Obr. 102).

4.3.3.4 Řezání vodním paprskem



Obr. 104 Textura řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez vodním paprskem



Obr. 105 Drsnost řezné plochy – ocel 1.4301, TL. 15 mm, řez vodním paprskem

Z výsledků uvedených na Obr. 109 vyplývá, že při řezání materiálu 1.4301 vodním paprskem rovněž dochází ke vzniku řezné plochy s téměř konstantní drsností Ra 1,9. K drobnému vychýlení hodnot Ra a Rz dochází v místě vniku paprsku do materiálu a v místě výstupu vodního paprsku z materiálu

Řez je poměrně homogenní a bez výrazného typického vlnkování v místě, kde vodní paprsek opouští materiál.

5 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Hlavním přínosem pro vědu je objasnění vlivu použité technologie dělení na vlastnosti vybraných typů ocelí, zejména změn vlastností v okolí místa řezu a kvality řezné plochy. Dalším přínosem je ověření vhodnosti využití instrumentované zkoušky tvrdosti (DSI) pro posuzování mechanických změn testovaných ocelí v okolí místa řezu. Zvolená metoda měření tvrdosti umožňuje studovat oblasti extrémně blízké místu řezu a má vysokou vypovídající schopnost, zejména ve spojitosti s hodnocením struktury na metalografických výbrusech.

Metoda bezkontaktního měření drsnosti povrchu řezných ploch umožňuje popis a kvantifikaci drsnosti povrchu s ohledem na použitou technologii a tloušťku řezaného materiálu.

Většina plošných výpalků do tloušťky 5 mm nepotřebuje z hlediska obecných požadavků průmyslu žádné další obrábění řezných ploch, protože drsnost řezných ploch obvykle vyhovuje požadavkům zákazníka. U větších tlouštěk materiálů je jakost řezné plochy výrazně ovlivněna použitou technologií dělení.

Výpalky větších tlouštěk se velmi často používají jako polotovary a vyžadují další obrábění. Při volbě nástroje pro obrábění řezné hrany se v praxi velmi často nezohledňuje zvýšená tvrdost TOO. Nevhodná volba nástroje pro obrobení řezné plochy má negativní vliv na jeho opotřebení a životnost. Z hlediska životnosti obráběcích nástrojů je další studium této problematiky velmi žádoucí.

Význam práce pro praxi je v možnosti využití získaných výsledků při volbě vhodného obráběcího nástroje pro konkrétní typ vstupního polotovaru s ohledem na jeho technologii výroby. Optimálně zvolený nástroj pro dokončovací operace po nekonvenčních způsobech dělení by měl nalézt kompromis mezi životností nástroje a tvrdostí a jakostí obráběného povrchu.

6 ZÁVĚR

Hlavní náplní disertační práce bylo stanovení vlivu nekonvenčních metod dělení vybraných ocelí na změnu jejich vlastností v místě řezu. Provedený výzkum ukázal, že s výjimkou korozivzdorné oceli 1.4301 došlo ve všech ostatních případech v místě řezu ke vzniku TOO s výrazně vyšší tvrdostí, než je tvrdost základního materiálu. Přítomnost TOO se dá predikovat i podle zabarvení v místě řezu. Zabarování místa řezu však zkušebních tělesech bylo pozorováno jen u oceli 1.4301.

Velikost pásem TOO se u vybraných ocelí liší v závislosti na chemickém složení, tloušťce děleného materiálu a intenzitě a koncentraci tepelného účinku použitého při procesu dělení. Měření tvrdosti metodou DSI ukázala, že tloušťka děleného materiálu má výrazný vliv na velikost TOO. Pro dělení laserem a plazmou se dá obecně říci, že čím větší je tloušťka děleného materiálu, tím více roste šířka TOO měřená od řezné hrany.

Při dělení oceli 1.0553 laserem a plazmou dosahovala nejvyšší indentační tvrdost v TOO hodnot téměř 500 HV. Při dělení oceli 1.7102 stejnými metodami a shodnými procesními parametry byla nejvyšší naměřená indentační tvrdost v TOO v rozsahu 900 – 950 HV. Tento rozdíl je způsoben především rozdíly v chemickém a strukturním složení obou ocelí. Nejvýraznější vliv na velikost a tvrdost TOO z pohledu chemického složení má množství uhlíku v oceli. Rozdíly maximálních naměřených hodnot indentační tvrdosti rovněž souvisí s podílem zbytkového austenitu v martenzitické struktuře a jeho rozložením v neovlivněné základní struktuře.

Výrazný vliv na rozměry TOO mají i procesní parametry výrobních zařízení. Metody řezání, které pracují při vyšších teplotách a nižší rychlosti, vytvářejí větší TOO. Provedená měření prokázala, že tepelný účinek plazmy je výrazně vyšší než tepelný účinek laseru. Toto zjištění se projevilo rozdílnou šířkou TOO a je podpořeno jak průběhem indentační tvrdosti, tak metalografickými analýzami u oceli 1.0553 a 1.7102.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že velikost TOO se zvýšenou indentační tvrdostí se u zkoumaných ocelí pohybuje od 0,20 do 0,60 mm. U austenitické oceli 1.4301 byla přítomnost úzké vrstvy TOO potvrzena až při metalografické analýze. V této vrstvě došlo k viditelné změně struktury, která se však neprojevuje zvýšením indentační tvrdosti. Tato vrstva je po dělení laserem i plazmou široká cca 0,10 mm a vlivem tepelného účinku laserového paprsku v ní došlo k precipitaci karbidů chromu. Tento jev se nazývá zcitlivění korozivzdorných ocelí a je velmi často doprovázen vznikem mezikrystalové koroze a snížením chemické odolnosti. Odstranění této vrstvy lze dosáhnout tzv. rozpouštěcím žíháním při teplotě 1000 – 1150 °C, při kterém dojde k opětovnému rozpuštění vyloučených karbidů.

Z naměřených výsledků je rovněž zřejmé, že při řezání vodním paprskem s abrazivem nedochází u žádného zkušebního tělesa ke vzniku TOO či jiné opticky identifikovatelné oblasti s odlišnou strukturou než je struktura základního materiálu.

Získané výsledky z měření nanotvrlosti metodou DSI poskytnou přesnou informaci o rozměrech TOO, kterou je v běžné praxi možné detekovat pouze pomocí metalografických a optických metod. Data z tohoto výzkumu bude rovněž možné aplikovat do výpočtových modelů FEM analýz pro ověření tepelného vlivu vybraných metod nekonvenčních způsobů dělení.

Metalografická analýza zkušebních těles vyrobených tepelným způsobem dělení rovněž prokázala výskyt drobných povrchových vad na řezné ploše. Vlivem vysoké ochlazovací rychlosti docházelo u zkušebních těles v TOO k vnitřnímu pnutí, které se projevilo vznikem trhlin a jejich dalším šířením po hranicích zrn. Tato místa všeobecně vykazují nejnižší odolnost proti korozi a rovněž v nich dochází k výraznému zhoršení mechanických vlastností. Nejnáchylnější ke vzniku povrchových vad a trhlin z testovaných ocelí byla ocel 1.7102.

Výsledky získané měřením drsnosti řezných ploch ukázaly velkou nekonzistentnost drsnosti v různých místech řezné plochy při dělení laserem a plazmou. Obecně bylo lepší drsnosti dosahováno při dělení vodním paprskem a elektroerozivním drátovým řezáním. Nejnižší drsnosti bylo dosahováno při elektroerozivním drátovém řezání. Nejlepší pohledové vlastnosti řezu vykazovalo dělení vodním paprskem.

LITERATURA

- [1] KOCMAN, K. a kol. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 270 s.
- [2] BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění. *Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.*
- [3] KUNCIPÁL, J. a kol. Teorie svařování, Praha: SNTL, 1986, 265 s.
- [4] RICKFÄLT, C. et al. Oxy-fuel cutting of thick plates. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*. 1995, vol. 35, iss. 4, pp. 238-242. ISSN 0043-2288.
- [5] KUPKA, J. Vliv řezání kyslíkem na vlastnosti základního materiálu. Praha, 2015. 135 s. *Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.*
- [6] KRAUS, M. Cutting techniques influence on a properties of tool steels. *METAL 21.-23.5. 2014 Brno*. 2014.
- [7] HARRIS, J. et al. Laser cutting of thick plate. *Materials Forum*. 2001, vol. 25, pp. 88-115. ISSN 0883-2900.
- [8] ION, J. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application, 2005. 576 s.
- [9] MAŇKOVÁ, I. Progresívne technologic. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [10] KOLEKTIV AUTORŮ. Laser processing – CO₂ Laser. *Technická dokumentace*. TRUMPF Werkzeugmaschine, GmbH+Co KG. 02/2007.
- [11] BROD, D at al. A powerful CO₂ cutting tool, *Laser Focus*, August 1969, pp.36
- [12] HILTON, P. A. In the beginning (The history of laser cutting). Presented at ICALEO 2002 Scottsdale, Arizona, USA. 2002.
- [13] FLEMMING, O. O. Laser Cutting. *Laser Technologies in Industry*. 1988.
- [14] *Optics and Laser Technology*. 2018, vol. 103, pp. 311-317. ISSN 0030-3992.
- [15] RODRIGUES, G.C. et al. Laser cutting with direct diode laser. *Physics Procedia*. 2013, vol. 41, pp. 558-565. ISSN 1875-3884.
- [16] WANDERA, C. et al. Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminium using a high power fiber laser. *Journal of Laser Applications*. 2009, vol. 21, pp. 154-161. ISSN 1042-346X.
- [17] SHIN, J.S. et al. Laser cutting of steel plates up to 100 mm in thickness with a 6-kW fiber laser for application to dismantling of nuclear facilities. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018, vol. 100, pp. 98-104. ISSN 0143-8166.
- [18] RODRIGUES, G.C. et al. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP*. 2018, vol. 74, pp. 714-718. ISSN 2212-8271.

- [19] ANAND, Y. et al. Optimization of machining parameters for green manufacturing. *Cogent Engineering*. 2016, vol. 3, pp. 1-16. ISSN 2331-1916.
- [20] ALSOUFI, M.S. et al. Experimental study of surface roughness and microhardness obtained by cutting carbon steel with abrasive waterjet and laser beam technologies. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016, vol. 4, iss. 5, pp. 173-181. ISSN 2328-4102.
- [21] POCORNI, J. et al. The geometry of the cutting front created by fibre and CO₂ lasers when profiling stainless steel under standard commercial conditions. *Optics and Laser Technology*. 2018, vol. 103, pp. 318-326. ISSN 0030-3992.
- [22] SEON, S. et al. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting.
- [23] RODRIGUES, G.C. et al. Direct diode lasers for industrial laser cutting: A performance comparison with conventional fiber and CO₂ technologies. *Physics Procedia*. 2014, vol. 56, pp. 901-908. ISSN 1875-3884.
- [24] POCORNI, J. et al. Measuring the melt flow on the laser cut front. *Physics Procedia*. 2015, vol. 78, pp. 99-109. ISSN 1875-3884.
- [25] MOHYLA, P. et al. Investigation of heat affected zone of steel P92 using the thermal cycle simulator. *International Scholarly and Scientific Research and Innovation*. 2017, vol. 11, pp. 464-467.
- [26] RODRIGUES, G.C. et al. Theoretical and experimental aspects of laser cutting with elliptically polarized laser beams. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 264, pp. 448-453. ISSN 0924-0136.
- [27] GUNES, T. Effect of laser-cutting and spark erosion techniques and heat treatment on the magnetic properties of grain-oriented transformer steels. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2018, vol. 31, pp. 3933-3939. ISSN 1557-1939.
- [28] TAMURA, K., YAMAGISHI, R. Observation of the molten metal behaviors during the laser cutting of thick steel specimens using attenuated process images. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2017, vol. 54, pp. 655-661. ISSN 0022-3131.
- [29] ANDERSON, N., GRANBERG, C. Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters informative. Gothenburg, Sweden, 2015. 45 s. Diplomová práce. Chalmers University in Gothenburg.
- [30] CHOUBEY, A. et al. Studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of thick stainless steel in dry air and underwater environment for dismantling applications. *Optics and Laser Technology*. 2015, vol. 71, pp. 6-15. ISSN 0030-3992.

- [31] LI, G., THOMAS, B.G. Thermo-mechanical finite element model of shell behavior in continuous casting of steel. *The Mineral, Metals and Materials Society*. 2003, pp. 385-392.
- [32] MIRAOU, I. et al. High-power laser cutting of steel plates: heat affected zone analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 2016, pp. 1-8. ISSN 1687-8434.
- [33] YILBAS, B.S. et al. Laser cutting of alumina tiles: heating and stress analysis. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013, vol. 15, pp. 14-24. ISSN 1526-6125.
- [34] JIA, X., ZHAO, X. Numerical study of material decomposition in ultrafast laser interaction with metals. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 463, pp. 781-790. ISSN 0169-4332.
- [35] MINAŘÍK, V. Tepelné dělení materiálu. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 50s. ISBN 80-01-01028-7.
- [36] KUBÍČEK, J. et al. Technologie svařování a zařízení. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395s., ISBN 80-85771-81-0.
- [37] HÍREŠ O. et al. Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [38] HASHISH, M. In Memoriam – Dr. Norman Charles Franz. *Water Jet Technology Association*. 2007, pp. 2.
- [39] MILLER, R. Waterjet cutting: Technology and industrial applications. *The Fairmont Press*. 1991. 154 s. ISBN 0-88173-068-8.
- [40] MADADNIA, J. et al. A Study of Cavitation Induced Surface Erosion in Abrasive Waterjet Cutting Systems. *Advanced Materials Research*. 2008, vol. 53–54.
- [41] ODEHNAL, O. Řezání vodním paprskem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 59 s
- [42] HLOCH, S. et al., Abrasive type influence on surface roughness at abrasive waterjet cutting. *Machines, technologies, materials: International virtual journal for science, technics and innovations for the industry*. 2008, no. 10-11, ISSN 1313-0226.
- [43] KULEKCI, M. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. vol. 22, pp. 1297-1306, ISSN 0890-6955.
- [44] HLAVÁČ, L., et al. Prevence koroze kovů po obrábění kapalinovým paprskem. *Sborník referátů konference AKI 2003*, Praha: Asociace korozních inženýrů, 2003.

- [45] ELMAN, J. Electrical discharge machining. Dearborn, USA: *Society of Manufacturing Engineers*, 2001
- [46] MCGEOUGH, J. A. Advanced methods of machining. *New York: Chapman and Hall*, 1988. ISBN 0412319705.
- [47] VANDERAUWERA, W. Development of proces planning tools for EDM operations. Gent, 2017. Katholieke Universiteit Leuven.
- [48] EL-HOFY, H.. Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes. New York: McGraw-Hill Professional, 2005. ISBN 0071453342
- [49] KUDĚLKA V. et. al., Vliv zbarvených pásem kolem svarů na vlastnosti svaru i jeho tepelně ovlivněné oblasti. *Česká svářečská společnost ANB*. 2017.
- [50] PTÁČEK, L. a kol.,: Nauka o materiálu I, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 505 s.
- [51] SKÁLOVÁ, J. et al. Základní zkoušky kovových materiálů. 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [52] PLUHAŘ, J.: Nauka o materiálech, SNTL, Praha 1989, 552 s.
- [53] HORÁČEK J.: Nauka o materiálu, ČZU v Praze, Praha 2000, 71 s.
- [54] ČSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [55] FISCHER-CRIPPS, A.C., *Nanoindentation*. 2nd ed., 2004, New York: Springer-Verlag. 226 s.
- [56] WALLEY, S.M., Historical origins of indentation hardness testing. *Material Science and Technology*. 2012. vol. 28. pp. 1028-1044
- [57] FISCHER-CRIPPS, A.C., Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data. *Surface and Coatings Technology*. 2006. vol 200, pp. 4153-4165, ISSN 0257-8972.
- [58] BROITMAN, E., Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters*, 2017. 18p. ISSN 1573-2711.
- [59] OLIVER, W., PHARR, G. Nanoindentation in materials research: Past, present, and future. *MRS Bulletin*, 2010. vol. 35, pp. 897-907.
- [60] HERTZ, H., On the contact of elastic solids. *J. Reine Angew. Math* 92, 1881: p. 156-171.
- [61] HERTZ, H., On hardness. *Verh. Ver. Beförderung Gewerbe Fleisses* 61, 1882.

- [62] BIG-ALABO, A. et al. Contact model for elastoplastic analysis of half-space indentation by a spherical impactor. *Computers & Structures*, 2015. vol. 151, pp. 20-29. ISSN 0045-7949.
- [63] TABOR, D., The Hardness of Metals. 1951, *Oxford: Clarendon Press*.
- [64] ČERMÁKOVÁ, V. Zkoušení materiálu instrumentovanou vnikací zkouškou. Praha, 2017. 130 s. *Diplomová práce*. České vysoké učení technické v Praze.
- [65] ALMASRI A. H. et al. Analytical and Numerical Simulation of Dynamic Indentation for Different Indenter Shapes. *Journal of Applied Mechanical Engineering*. 2017. vol. 6. ISSN: 2168-9873.
- [66] CHEN, L. et al. *Numerical and Experimental Study of the Roughness Effects on Mechanical Properties of AISI316L by Nanoindentation*. Scientific Research. 2014. vol. 14. p.153-162.
- [67] BUMBÁLEK, L. et al. *Kontrola a měření*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [68] PERNIKÁŘ, J. et al. *Strojírenská metrologie II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
- [69] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [70] STRATIL, Pavel. Analysis of instrumented indentation. Brno, 2009. *Diploma thesis*. Masaryk University, Faculty of Science.
- [71] BERKOVICH, E.S., Three-faceted diamond pyramid for micro-hardness testing. *Ind. Diamond Rev.* 11, 1951. 127: p. 129-133.
- [72] KNOOP F. et al., A sensitive pyramidal-diamond tool for indentation measurements. *Journal of Research*, 1939. National Bureau of Standards.
- [73] OVSÍK, M. Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů. Zlín, 2013. 179 s. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Publikace evidované v databázi Web of Science (12)

- [1] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. The High Density Polyethylene Composite with Recycled Radiation Cross-Linked Filler of rHDPEx. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 12, pp. 1-13. ISSN 2073-4360.
- [2] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. The Electrical, Mechanical and Surface Properties of Thermoplastic Polyester Elastomer Modified by Electron Beta Radiation. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 12, pp. 1-14. ISSN 2073-4360.
- [3] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Effect of Beta Irradiation on mechanical Properties of Surface Layer of Injection Moulded Polyamide 11. *KGK – Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2018, vol. 71, iss. 5, pp. 30-33. ISSN 0948-3276.
- [4] MANAS, David et al. Mechanical Properties Changes of Irradiated Thermoplastic Elastomer. *Polymers*. 2018, vol. 10, iss. 1, pp. 1-14. ISSN 2073-4360.
- [5] **STOKLASEK, Pavel**, **STOKLASEK, Pavel** et al. Local mechanical properties of irradiated cross-linked filled poly (butylene terephthalate) (PBT). *Materiali in Tehnologije*. 2018, vol. 52, iss. 1, pp. 35-37. ISSN 1580-2949.
- [6] ZAPLETALOVA, Andrea, **STOKLASEK, Pavel** et al. Objective measurements of skin surface roughness after microdermabrasion treatment. *Skin Research and Technology*. 2017, vol. 23, iss. 3, pp. 346-353. ISSN 0909-752X.
- [7] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Micro-hardness of surface layer of irradiated Polybutene Terephthalate (PBT). *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [8] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties and temperature stability of modified polybutylene terephthalate by beta rays. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [9] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties change of thermoplastic elastomer after using of different dosage of irradiation by beta rays. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016)*. 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.
- [10] **STOKLASEK, Pavel** et al. Improvement of handle grip using reverse engineering, CAE and Rapid Prototyping. *MATEC Web of Conferences (20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and*

Computers, CSCC 2016; Corfu Island; Greece; 14 July 2016 through 17 July 2016). 2016, vol. 76, pp. 1-4. ISSN 2261-236X.

- [11] **STOKLASEK, Pavel** et al. Mechanical properties of modified HDPE by ionizing radiation after temperature load under and above the pure HDPE melting temperature. *Advances in Intelligent Systems Research (International Conference on Innovative Material Science and Technology 2016, IMST 2016; Shenzhen; China; 19 August 2016 through 21 August 2016)*. 2016, vol. 139, pp. 416-420. ISSN 1951-6851.
- [12] PALOUSEK, David et al. Pilot study of the wrist orthosis design process. *Rapid Prototyping Journal*. 2014, vol. 20, iss. 1, pp. 27-32. ISSN 1355-2546.

Publikace evidované v databázi SCOPUS (11):

- [1] **STOKLASEK, Pavel** et al. Case study research: Optical digitization, reverse engineering and rapid prototyping as a solution in pedal car development process. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-5. ISSN 2261-236X.
- [2] **STOKLASEK, Pavel** et al. Flexural behaviour of ABS 3D printed parts on professional printer Stratasys Fortus 900mc. *MATEC Web of Conferences (22nd International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSCC 2018; Majorca; Spain; 14 July 2018 through 17 July 2018)*. 2018, vol. 210, pp. 1-5. ISSN 2261-236X.
- [3] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Impact resistance study of high-density polyethylene through drop-weight and tensile impact tests. *Materials Science Forum*. 2018, vol. 919, pp. 246-253. ISSN 0255-5476.
- [4] KLIMA, Ondrej, **STOKLASEK, Pavel** et al. Virtual 2D-3D Fracture Reduction with Bone Length Recovery Using Statistical Shape Models. *Lecture Notes in Computer Science (International Workshop on Shape in Medical Imaging, ShapeMI 2018 held in conjunction with 21st International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, MICCAI 2018; Granada; Spain; 20 September 2018 through 20 September 2018)*. 2018, vol. 11167, pp. 207-219. ISSN 0302-9743.
- [5] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Hermal properties of irradiated duramid with 45 % of glass fibre by beta rays. *MM Science Journal*. 2017, vol. 2017, iss. 12, pp. 1986-1989. ISSN 1803-1269.
- [6] **STOKLASEK, Pavel** et al. Influence of beta rays on polypropylene. *MM Science Journal*. 2017, vol. 2017, iss. 12, pp. 1937-1941. ISSN 1803-1269.
- [7] **STOKLASEK, Pavel** et al. Influence of beta rays on nylon 6 mechanical properties. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 756, pp. 27-34. ISSN 1013-9826.

- [8] MIZERA, Ales, **STOKLASEK, Pavel** et al. Physical properties of polyamide 11 after radiation cross-linking by accelerated electrons. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 756, pp. 19-26. ISSN 1013-9826.
- [9] **STOKLASEK, Pavel** et al. Cross-linked low density polyethylene mechanical properties after temperature load at 110, 180 and 220 °C. *MM Science Journal*. 2016, vol. 2016, iss. 10, pp. 1105-1109. ISSN 1803-1269.
- [10] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Evaluation of mechanical properties of surface layer injection molded polypropylene by nanoindentation test. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 699, pp. 86-90. ISSN 1013-9826.
- [11] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Effect of high doses beta irradiation on the micromechanical properties of surface layer of glass-filled polypropylene. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 662, pp. 185-188. ISSN 1013-9826.

Ostatní publikace (2):

- [1] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. New apparatus for Chip-Chunk resistance testing. *Elastomery*. 2017, vol. 21, iss. 3, pp. 167-172. ISSN 1427-3519.
- [2] MANAS, David, **STOKLASEK, Pavel** et al. Chip-chunk resistance tests. *Tire Technology International*. 2017, vol. December 2017, pp. 104-108. ISSN 1462-4729.

Patenty, užité a průmyslové vzory (9):

- [1] **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob polohování tluku ručního poklepového nástroje a poklepový nástroj k jeho provádění. *Patent číslo 307307 udělený* 11. 4. 2018.
- [2] **STOKLASEK, Pavel** et al. Ruční poklepový nástroj s výměnným a otočným tlukem. *Užitný vzor číslo 30782 udělený* 20. 6. 2017.
- [3] **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob výroby krycí masky k překrytí neupravených částí výrobků. *Patent číslo 306604 udělený* 8. 2. 2017.
- [4] **STOKLASEK, Pavel** et al. Poklepový nástroj s výměnnou funkční částí. *Patent číslo 306083 udělený* 15. 6. 2016.
- [5] MALOCH, Jaroslav, **STOKLASEK, Pavel** et al. Způsob snímání průběhu deformací při rázových testech a zařízení k provádění tohoto způsobu. *Patent číslo 305946 udělený* 30. 3. 2016.
- [6] **STOKLASEK, Pavel** et al. Poklepový nástroj s výměnnou funkční částí. *Užitný vzor číslo 28539 udělený* 11. 8. 2015.
- [7] **STOKLASEK, Pavel** et al. Kladiva a jiná podobná nářadí a nástroje. *Průmyslový vzor číslo 002712968-0002 udělený* 10. 6. 2015.
- [8] **STOKLASEK, Pavel** et al. Kladiva a jiná podobná nářadí a nástroje. *Průmyslový vzor číslo 002712968-0001 udělený* 10. 6. 2015.

- [9] MANAS, Miroslav et al. Ruční nástroj. *Průmyslový vzor číslo 002570630-0001 udělený* 4. 11. 2014.

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul Pavel Stoklásek, Ing.
Datum a místo narození 8. leden 1989, Zlín
Adresa Křiby 4720, 760 05 Zlín
Česká republika
Telefon +420 777 241 286
E-mail pstoklasek@utb.cz
Státní příslušnost česká

Vzdělání:

7/2014 – dosud UTB ve Zlíně
Fakulta technologická
doktorský studijní program: Procesní inženýrství
studijní obor: Nástroje a Procesy

7/2008 – 6/2013 Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
studijní program: Konstrukční inženýrství
studijní obor: Strojní inženýrství

9/2004 – 6/2008 Střední průmyslová škola Zlín
obor: Strojírenství
zaměření: Počítačová grafika

Pracovní zkušenosti:

10/2013 – dosud UTB ve Zlíně, CEBIA-TECH
Výzkumný projektový pracovník projektu CEBIA-Tech

Vedení cvičení v předmětech:

A1UMV/AQUMV – Úvod do materiálových věd