

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ANALÝZA PROCESU STŘÍHÁNÍ KRUHOVÝCH TYČÍ

ANALYSIS OF CIRCULAR BARS SHEARING PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

EVA DOHNALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. RUDOLF FORET CSC.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Dohnalová Eva

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza procesu stříhání kruhových tyčí

v anglickém jazyce:

Analysis of Circular Bars Shearing Process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce bude navazovat na modelování procesu stříhání, které je prováděno na ÚMTMB pod vedením prof. J. Petrušky. Výsledků strukturních a fraktografických rozborů, doplněných o měření mikrotvrdosti, bude využito k verifikaci modelových výpočtů.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor literárních údajů o mechanismech stříhání tyčí.

Modelování procesu stříhání MKP.

Vliv procesu stříhání na mikrostrukturu (tok materiálu, změny mikrostruktury, změny hodnot mikrotvrdosti).

Analýza střížných ploch (morfologická studie, mechanismy porušování).

Experimentální materiál bude dodán.

Seznam odborné literatury:

- [1] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B., : Tváření ocelí, SNTL/ALFA, Praha 1988, 520s.
- [2] BOŘKOVEC, J., : Simulace dělení materiálu pomocí explicitní MKP, Studijní opora ÚMTMB FSI VUT v Brně, Brno 2006.
- [3] JANDOŠ, F., ŘÍMAN, R., GEMPERLE, A. : Využití moderních laboratorních metod v metalografii, SNTL, Praha 1985, 382 s.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

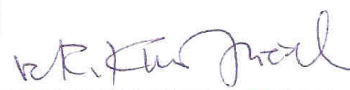
V Brně, dne 24.11.2008

L.S.



prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.
Ředitel ústavu





doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

V současné době jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a přesnost výrobků, ale zároveň je ze strany zákazníky požadována i co nejnížší cena. Cenová dostupnost výrobků může být zajištěna sériovou výrobou. V takovém případě je však nutné celý technologický proces detailně naplánovat, aby nedocházelo ke znehodnocování výrobků, případně i celých sérií. U technologických operací stříhání může být řešením simulace procesu pomocí počítačového softwaru, díky které by se předešlo pozdějším komplikacím.

Tato bakalářská práce se proto zabývá procesem stříhání kruhových tyčí a výsledků bakalářské práce bude využito pro modelování procesu metodou konečných prvků (MKP). Vliv procesu stříhání na experimentální materiál byl posouzen za pomoci světelné a rastrovací elektronové mikroskopie. K vyhodnocení zpevnění materiálu bylo využito měření mikrotvrdosti.

ABSTRACT

In these days customers require a high quality as well as precision of products together with a cost that is as low possible. The cost of products can be reduced in a way of batch production. Implementation of the batch production requires a detailed plan of a technological process to avoid making depreciated products or series of products. A software package can be used to simulate the technological process of shearing to avoid difficulties of particular technological process.

This bachelor paper contains analysis of technological process of shearing of circular section rods. The results of the analysis are going to be included in FEM simulations. The effect of the technological process of shearing on material was determined by optical and scanning electron microscopy method. The microhardness measurement was used to analyse the deformation hardening of the examined material.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Stříhání, deformace, zpevnění, tváření

KEYWORDS:

Shearing, deformation, hardening, forming

DOHNALOVÁ, E. *Analýza procesu stříhání kruhových tyčí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Rudolf Foret CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně 26. 5. 2009

Eva Dohnalová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Rudolfu Foretovi CSc. za ochotu, trpělivé vedení a množství rad během tvorby bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Borisovi Zítkovi za ochotnou pomoc při práci v laboratoři.

V neposlední řadě patří poděkování rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH:

1. ÚVOD	1
2. CÍLE PRÁCE	2
3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY	3
3.1 TVAŘITELNOST	3
3.1.1 Zákony tváření	3
3.1.2 Rozdělení tváření	3
3.1.3 Tváření za studena	4
3.1.4 Vliv chemického složení na tvařitelnost	4
3.1.5 Vliv krystalové struktury na tvařitelnost	4
3.1.6 Změna struktury tvářením za studena	6
3.1.7 Změna mechanických vlastností tvářením za studena	7
3.2 DEFORMACE	7
3.2.1 Elastická deformace	8
3.2.2 Plastická deformace	8
3.2.3 Deformační zpevnění	10
3.3 STŘÍHÁNÍ	12
3.3.1 Princip stříhání	12
3.3.2 Průběh napjatosti při stříhání	13
3.3.3 Střížná plocha	14
3.3.4 Střížná síla a práce	16
3.3.5 Výpočtové modelování stříhání kruhových tyčí	17
4. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ	20
4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL	20
4.2 POUŽITÉ METODIKY	22
5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	23
5.1 METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ	23
5.2 ANALÝZA LOMOVÝCH PLOCH	24
5.3 MĚŘENÍ MIKROTVRDOTI	25
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ	30
7. ZÁVĚR	31
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	32
9. LITERATURA	33
10. PŘÍLOHY	35

1. ÚVOD

Stříhání je jedna ze základních technologických operací dělení materiálu. Důraz je kladen především na kvalitu střížné plochy a úsporu materiálu. Z ekonomického hlediska patří stříhání k nejméně nákladným technologickým operacím.

Základní technologickou vlastností kovů a slitin je tvařitelnost. První kapitola literárního rozboru problematiky je věnována vlivu různých faktorů na tvařitelnost oceli. K nejdůležitějším faktorům patří vliv chemického složení a krystalové struktury. V poslední kapitole teoretické části je rozebrána problematika stříhání a výpočtového modelování tohoto procesu.

Experimentální část je věnována posouzení vlivu posuvu střížné síly (střížného nástroje) na tok materiálu a změnu mikrotvrdosti. K úplnému posouzení procesu stříhání slouží analýza lomových ploch.

V současné době je důležité propojení počítačových simulací technologických procesů a experimentů. K modelování různých aplikací je důležitý matematický popis těchto procesů. K dispozici jsou např. softwary ABAQUS/Explicit 6.5.1 nebo LS-DYMAN. Tato práce by měla přispět k získání představy o jevech, ke kterým dochází během procesu stříhání a pomoci tak při modelování technologických procesů explicitní metodou konečných prvků.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je analýza procesu stříhání kruhových tyčí.

V teoretické části se bude rozebrána problematika procesu stříhání a vlivu různých faktorů na výsledné technologické zpracování.

V experimentální části bude zkoušený materiál posuzován z hlediska změny mikrostruktury a mikrotvrdosti během procesu stříhání. Pozornost bude věnována vlivu procesu stříhání na tok materiálu. Dalším cílem této práce bude analýza střížných ploch a posouzení porušení materiálu.

Výsledky z měření mikrotvrdosti a morfologických (strukturních) rozborů budou využity k ověření modelování tohoto procesu metodou konečných prvků (MKP), které je prováděno na ÚMTMB FSI VUT v Brně.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY

3.1 TVAŘITELNOST

Pojem tvařitelnost je definován jako schopnost materiálu snášet velké plastické deformace, které vedou k trvalé změně tvaru bez porušení soudržnosti materiálu. Tato schopnost vyplývá zejména z krystalové mřížky kovů a jejich slitin, ale je ovlivněna i dalšími faktory. Výsledná tvařitelnost je tedy funkcí těchto činitelů [1,3]:

- metalurgicko-fyzikálních (chemické složení, strukturní stav a tepelně aktivované děje)
- termomechanických (teplota tváření, velikost deformace a deformační rychlost)
- napětových (vnější síly a přídavná napětí)
- technologických podmínek (tření, nerovnoměrná deformace, geometrie tvářecího procesu, způsob a průběh deformace)

3.1.1 Zákony tváření

Mezi základní zákony tváření patří:

- Zákon stálosti objemu

Objem tělesa (výrobku, polotovaru, součásti) před tvářením je roven objemu tělesa po tváření. Zákon stálosti objemu platí pouze pro materiály s homogenní strukturou [1].

- Zákon nejmenšího odporu

Každý bod tvářeného tělesa se bude pohybovat ve směru nejmenšího odporu. Tento odpor závisí na délce dráhy, o kterou se musí částice při přetváření přemístit. Například při přechování hranolu se zákon nejmenšího odporu a minima přetvárné energie projeví ve změně tvaru obdélníkové základny hranolu na tvar eliptický. Těleso se snaží získat tzv. nejmenší povrch [2].

- Zákon přídavných napětí

Takto jsou označována napětí, která vyrovnávají nerovnoměrné deformace při tváření. Tyto nerovnoměrné deformace jsou způsobeny chemickou a související strukturní nestejnorodostí, složitým tvarem tělesa a nástroje, nerovnoměrným rozložením teplot, atd. Nepříznivým důsledkem je zvýšení deformačního odporu a zhoršení tvařitelnosti [1].

Kromě výše zmiňovaných také: zákon stálosti potenciální energie změny tvaru, zákon maximálních smykových napětí, zákon odpružení po trvalé změně tvaru, zákony podobnosti a zákon tření.

3.1.2 Rozdělení tváření

Z hlediska teploty se tváření dělí na tváření za studena a tváření za tepla. Mezníkem mezi tvářením za studena a tvářením za tepla je považována rekrystalizační teplota, $T_{rek}=0,3T_{tav}$. Z hlediska rozměru součásti bývá tváření děleno na plošné a objemové.

K hlavním výhodám tváření za tepla patří použití menších přetvárných odporů, potřeba menší přetvárné práce a dynamické odpevnění struktury. Naopak nevýhodou je velká spotřeba energie a značné tepelné namáhání strojů a nástrojů [2]. Z důvodu smršťování a oduhličování povrchu je problémem menší tvarová a rozměrová přesnost. Jsou nutné větší přídavky. U výkovků vzniká anizotropie mechanických vlastností.

3.1.3 Tváření za studena

Tvařitelnost za studena je ovlivněna chemickým složením a strukturou materiálu a podmínkami při tváření.

Tváření za studena je realizováno za teplot nižších než je teplota rekrytalizace, $T_{\text{tvář}} = 0,3T_{\text{tav}}$. Dobrá tvařitelnost za studena je charakterizována nízkými pevnostními a vysokými plastickými vlastnostmi výchozího materiálu [3]. Během tváření za studena dochází ke zpevňování, které je způsobeno omezováním pohybu dislokací. Pohybu dislokací zabráňují dislokační sítě, hranice zrn a subzrn, vměstky, vyloučené částice a sekundární fáze.

K přednostem tváření za studena patří lepší kvalita povrchu a rozměrová přesnost. Naopak nevýhodou je nutnost použití velké tvářecí síly.

3.1.4 Vliv chemického složení na tvařitelnost

Na tvařitelnost ocelí má velký vliv obsah **uhlíku**. Již bylo zmíněno, že dobrá tvařitelnost za studena je charakterizována nízkými pevnostními a vysokými plastickými vlastnostmi. Platí, že s rostoucím obsahem uhlíku rostou pevnostní vlastnosti a naopak plastické vlastnosti klesají. Zároveň s rostoucí teplotou tváření roste sklon oceli k hrubnutí zrna. Pro běžné zpracování ocelí ke tváření se používají oceli s obsahem uhlíku 0,04-1,2%. Oceli s obsahem uhlíku nad 1,2% jsou zpracovávány kováním za tepla i za studena [6].

Vliv na tvařitelnost má **síra**, která musí být vyvážána např. na mangan. S železem tvoří síra nízkotající netvařitelné eutektikum FeS, které způsobuje lámavost za tepla. Lámavost za tepla je způsobena také nevhodným poměrem **manganu** a síry. Ideální poměr je udáván $\text{Mn:S} > 2,5-4$. Sirníky I. typu jsou vyloučeny jako tekuté fáze, naopak sirníky II. typu tuhnou eutekticky a vyskytují se na hranicích zrn. Jsou obtížně tvařitelné. Sirníky III. typu se liší velikostí. Na jejich vznik má vliv obsah C, Si a Al [5,10].

Oceli s vyššími obsahy **křemíku** jsou převážně feritické, s poměrně nízkou plasticitou a sklonem k hrubozrnnosti [6]. **Chrom** snižuje energii vrstevných chyb a tím ztěžuje kinetiku uzdravovacích procesů, to vede ke zvýšení deformačních odporů a zhoršení tvařitelnosti [1]. **Fosfor** způsobuje lámavost za studena, jeho obsah by měl být co nejnižší. **Dusík** se v oceli váže na nitridy, ty mají nepříznivý vliv na tvařitelnost oceli za tepla i za studena.

3.1.5 Vliv krystalové struktury na tvařitelnost

Kovy a jejich slitiny mají v tuhém stavu krystalickou strukturou, která ovlivňuje vlastnosti materiálu nejen mechanické, ale i fyzikální.

Existuje 14 prostorových mřížek, které jsou uspořádány v 7 krystalografických soustavách. Tyto soustavy jsou popsány pomocí délkových parametrů a , b a c a úhlových parametrů α , β a γ .

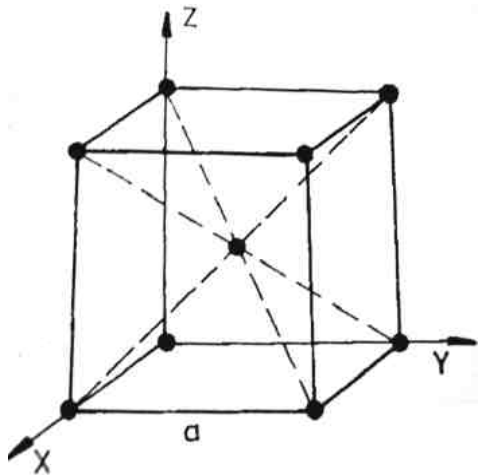
Uspořádání částic v prostoru závisí na jejich koordinaci kolem sebe. Závisí tedy na počtu symetricky rovnocenných atomů v bezprostředním okolí libovolného atomu v mřížce, který je nazýván koordinační číslo [8].

Uspořádání atomů v krystalové mřížce se řídí třemi geometrickými podmínkami:

- Princip nejmenšího objemu
- Princip nejvyšší souměrnosti
- Princip nejkratších spojnic

Kovy a jejich slitiny se nejčastěji vyskytují ve 3 krystalových strukturách. Jedná se o strukturu krychlovou plošně centrovanou (FCC), prostorově centrovanou (BCC) a hexagonální těsně uspořádanou strukturu (HCP). U čistých kovů jsou mřížky obsazeny v uzlových bodech pouze atomy základního kovu.

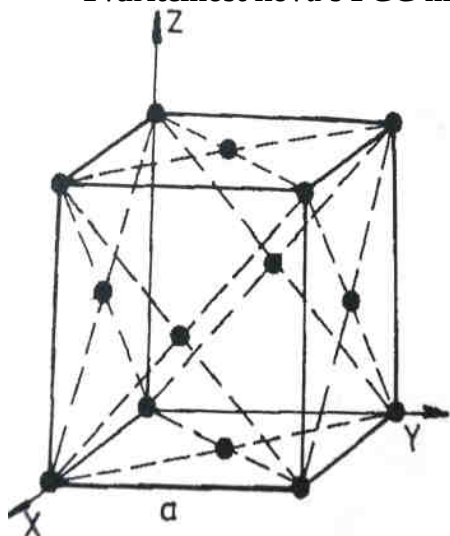
Tvařitelnost kovů s BCC mřížkou



Obr. 3.1 Mřížka BCC [8]

V této krystalové mřížce se vyskytuje např. Fe_α , Fe_δ , Mo, W, V, Ta, Nb a Cr. Koordinační číslo je 8. Počet skluzových systémů v mřížce je až 48. Tato krystalová struktura vykazuje relativně dobrou tvařitelnost.

Tvařitelnost kovů s FCC mřížkou

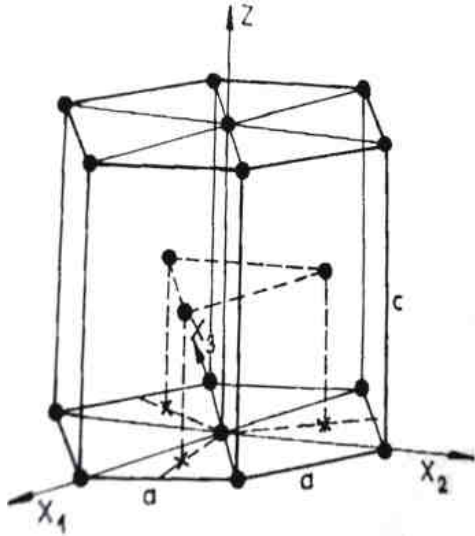


Obr. 3.2 Mřížka FCC [8]

V této krystalové mřížce se vyskytuje např. Fe_γ , Pb, Au, Cu, Pt, Ni a Al. Koordinační číslo je 12. Počet skluzových systémů v mřížce je 12. Tyto kovy jsou za studena dobře tvárné.

U austenitických ocelí s vysokým podílem legur nastávají potíže s tvařitelností. Příčinou je vysoký přetvárný odpor a praskání na hranicích zrn [4].

Tvařitelnost kovů s HCP mřížkou



Obr. 3.3 Mřížka HCP [8]

V hexagonální mřížce se vyskytuje např. Mg, Be, Zn, Cd, Zr, Co a Ti. Koordinační číslo 12. Počet skluzových systémů 3. Kovy s mřížkou hexagonální patří do skupiny kovů s obtížnou tvařitelností.

3.1.6 Změna struktury tvářením za studena

Během tváření za studena většinou nedochází ke změně fázového a strukturního složení. Dochází však ke změně tvaru a uspořádání strukturních složek a fází a tím i ke změnám mechanických a fyzikálních vlastností.

Zejména během procesu válcování dochází k usměrnění jednotlivých částic ve směru deformace. Jednotlivá polyedrická zrna jsou zplošťována, naopak jejich délka ve směru tváření se zvětšuje, zrna se protahují (obrázky 3.4 a 3.5). Intenzivněji jsou deformované měkké fáze (austenit, ferit), než tvrdé karbidy a vměstky. K deformaci za studena tvrdých fází dochází až při velikosti deformace nad 50-70%, kdy jsou tyto fáze zdeformovány a rozdrčeny [1,3].



Obr. 3.4 Vliv velikost deformace za studena na změnu mikrostruktury pro nízkouhlíkovou ocel $\epsilon = 30\%$ [3]



Obr. 3.5 Vliv velikost deformace za studena na změnu mikrostruktury pro nízkouhlíkovou ocel $\epsilon = 80\%$ [3]

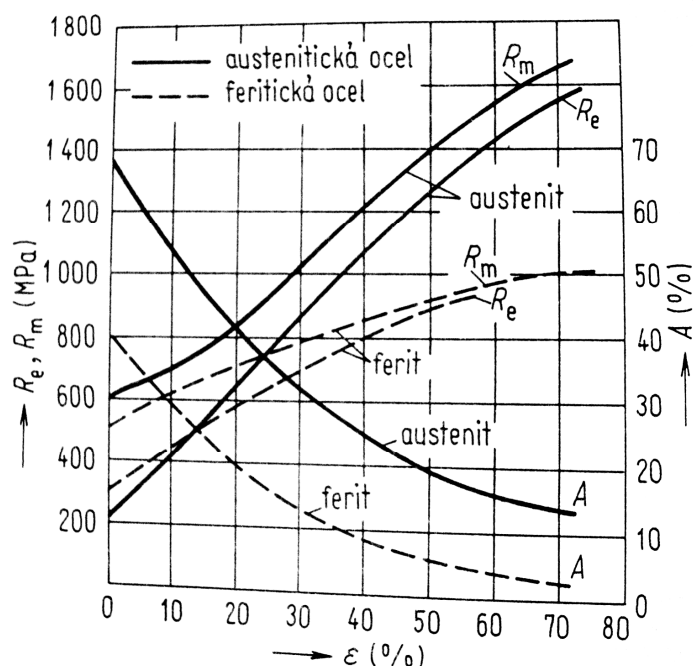
Protažený tvar deformovaných zrn a dalších částic vytváří tzv. deformační strukturní textury v hlavním směru deformace. Kromě tvarového usměrnění zrn dochází ke krystalografické orientaci, vzniká tzv. krystalografická deformační textura [1,3]. Dochází k přednostní směrové orientaci vůči hlavnímu směru deformace. Příčinou vzniku strukturních a krystalografických deformačních textur je směrová anizotropie mechanických vlastností, která je nežádoucí.

3.1.7 Změna mechanických vlastností při tváření za studena

Vliv velikosti deformace na změny mechanických vlastností graficky ukazuje tzv. zpevňovací křivka (obr. 3.6). Z obr. 3.6 je patrné, že s rostoucí velikostí deformace se zvyšují pevnostní a snižují plastické vlastnosti. Při tváření za studena je znalost zpevňovacích křivek nutná k určení deformačních odporů a k výpočtům tvářecích sil.

V oblasti velmi malých deformací je intenzita zpevnění menší. Příčinou je aktivita malého počtu skluzových systémů a relativně malá interakce dislokací. Naopak v oblasti maximálních deformací dochází ke značné interakci dislokací – intenzivní zpevnění [3].

U za studena tvářených materiálů se vyskytuje anizotropie mechanických vlastností nejen v podélném směru, ale i ve směru příčném. V podélném směru dosahuje materiál maximálních plastických a minimálních pevnostních vlastností. Důvodem je deformační textura, ve které jsou řádkovitě orientovány strukturní fáze a vměstky. V příčném směru je tomu naopak.



Obr. 3.6 Křivka zpevnění pro feritickou a austenitickou strukturu [3]

3.2 DEFORMACE

Při působení vnější síly na těleso může dojít ke změně tvaru a následnému porušení. Změna rozměrů, která byla vyvolána působením vnější síly, se nazývá deformace. Elastická nebo-li pružná deformace je charakterizována návratem do původního stavu, při odlehčení. Po překročení meze pružnosti dochází k plastické deformaci, která je trvalá a po odlehčení je těleso trvale deformováno [9].

Deformace je přímo měřitelná veličina, která může být podle druhu působícího napětí tahová, tlaková nebo smyková. Při působení vnějšího zatížení kolmo na těleso dochází k prodloužení ve směru zatížení – poměrná deformace:

$$\varepsilon = \frac{u}{L} \quad (1)$$

Kde L je původní délka a u je délka, o kterou se těleso prodlouží.

Naopak ve směru kolmém na působící zatížení dochází ke kontrakci – poměrné zúžení:

$$\gamma = \frac{v}{L} \quad (2)$$

Kde L je původní délka a v je délka, o kterou se těleso zúží.

Vztah mezi poměrným prodloužením a poměrným zúžením vyjadřuje součinitel příčné deformace tzv. Poissonův poměr μ .

$$\mu = \frac{\gamma}{\varepsilon} \quad (3)$$

U kovů se Poissonův poměr pohybuje okolo 0,33.

3.2.1 Elastická deformace

Elastická deformace je umožněna posunem atomů v krystalové mřížce okolo jejich rovnovážných poloh o malou vzdálenost. Po odlehčení dojde k vratnému pohybu atomů.

Vztah mezi tahovým napětím a poměrnou deformací vyjadřuje Hookeův zákon.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E [\text{MPa}] \quad (4)$$

Kde E je modul pružnosti v tahu.

Pro namáhání ve smyku platí obdobně vztah mezi smykovým napětím a smykovou deformací.

$$\tau = \gamma \cdot G [\text{MPa}] \quad (5)$$

Kde G je modul pružnosti ve smyku. Hodnoty modulů pružnosti mají přímou souvislost s typem vazby a s prostorovým uspořádáním atomů [8].

U monokrystalů jsou hodnoty E a G závislé na orientaci krystalové mřížky a směru působící síly. Naopak u polykystalů jsou hodnoty E a G nezávislé, protože polykystalické látky se skládají z velkého množství krystalů různě orientovaných [9].

3.2.2 Plastická deformace

Po překročení meze elasticity nastává trvalá deformaci materiálu. K nevratné deformaci dochází z důvodu porušení vazeb při oddálení atomů o vzdálenost $2r_0$, kde r_0 je vzdálenost atomů [8].

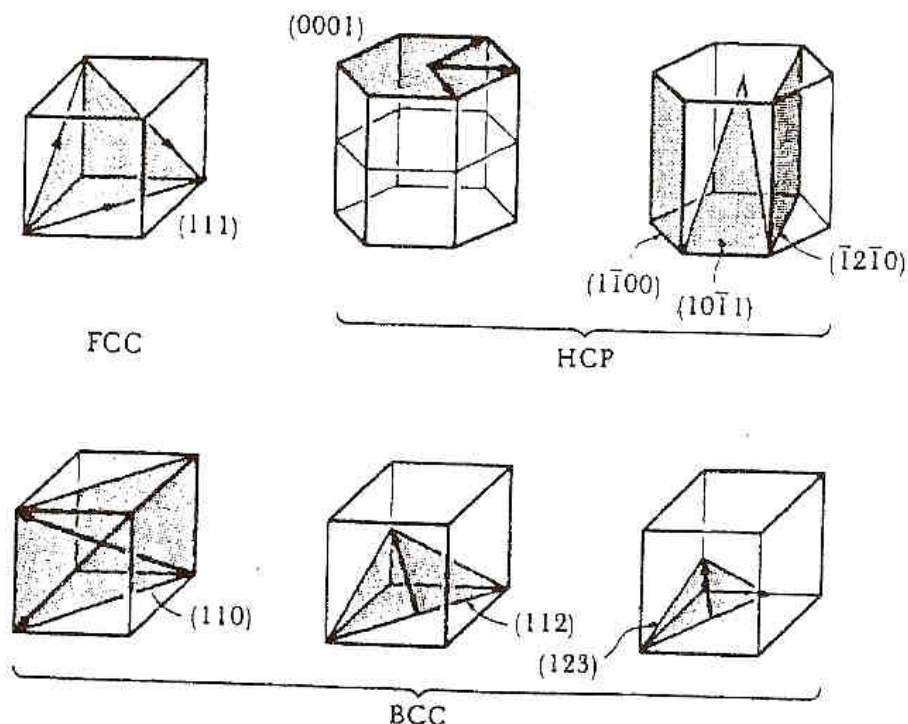
Mechanismy plastické deformace

Plastická deformace monokrystalů

Základní mechanismy plastické deformace monokrystalů jsou deformace skluzem a deformace dvojčatěním.

Deformace skluzem je charakterizována pohybem dislokací v určitých krystalografických rovinách a směrech, pro které platí:

- směr skluzu je vždy totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy
- skluz probíhá v nejhustěji obsazených rovinách
- ze všech skluzových systémů je aktivní ten skluzový systém, ve kterém působící smykové napětí je větší než τ_{krit}

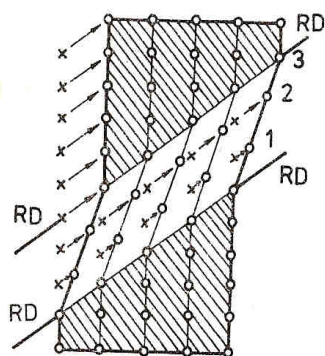


Obr. 3.7 Skluzové systémy [8]

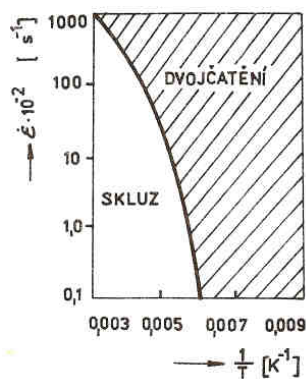
Kritické skluzové napětí τ_{krit} je materiálovou charakteristikou. Jeho hodnota závisí na čistotě kovu, struktuře, rychlosti zatěžování a tepelném nebo mechanickém zpracování [7]. S rostoucí čistotou kovu velikost kritického skluzového napětí klesá. Nečistoty τ_{krit} zvyšují. Kritické skluzové napětí klesá s rostoucí teplotou. Během skluzu se postupně mění sklon skluzové roviny v závislosti na směru působení hlavního napětí. Nejvíce skluzových systémů má mřížka BCC 48, FCC má 12 skluzových systémů a v mřížce HCP jsou pouze 3 skluzové systémy. Dobrá tvařitelnost vyžaduje minimálně 5 nezávislých skluzových systémů [3].

Druhým základním mechanismem plastické deformace je **deformace dvojčatěním**. Dvojčatění se projevuje náhlým přeskupením celého úseku krystalové mřížky. Nově vzniklá mřížka má stejnou orientaci jako původní, pouze je symetricky přetočena vůči původní rovině (obr. 3.8). Vznik dvojčatění je také ovlivněno napětím při ohřevu nebo při fázové přeměně [7]. Vliv má také teplota a rychlost deformace (obr. 3.9).

Rychlost s jakou se šíří dvojče v krystalu je velmi vysoká, může dosahovat až rychlosti zvuku v kovových materiálech. Napětí při dvojčatění je homogenní v celé oblasti [7]. Nejsnadněji dochází ke vzniku deformačních dvojčat v kovech s hexagonální těsně uspořádanou strukturou.

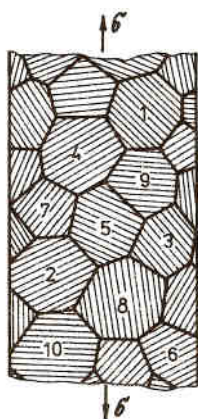


Obr. 3.8 Plastická deformace dvojčatěním
RD označuje rovinu dvojčatění[7]



Obr. 3.9 Závislost mechanismu plastické deformace na rychlosti deformace a teplotě pro BCC mřížku [7]

Plastická deformace polykrystalů



Obr. 3.10 Plastická deformace polykrystalu [7]

Mechanismy plastické deformace polykrystalů jsou stejné jako u monokrystalů. Z počátku probíhá deformace pouze v zrnech 1, 2 a 3, které jsou vhodně orientované ke směru zatížení (obr. 3.10). V důsledku natáčení krystalů se do vhodné pozice dostanou i zrna 4, 5 a 6. V některých zrnech nedojde k deformaci vůbec, to jsou zrna 9 a 10.

K dalším mechanismům plastické deformace patří superplastické tečení, dislokační teplotně závislý creep a difuzní nízkonapětový creep.

Průběh plastické deformace za studena je doprovázen vznikem a růstem mřížkových poruch. Dochází k interakci mezi poruchami nově vzniklými a poruchami existujícími. Vznikají dislokační stupně, dislokační smyčky, dochází k nakupení dislokací, k deformaci precipitátů a vzniku a zacelování mikrotrhlin [3]. Tyto jevy vedou ke zpevňování za studena deformovaného kovu a vyčerpání jeho plasticity.

3.2.3 Deformační zpevnění

Během plastické deformace dochází k pohybu dislokací a ke vzniku dislokací nových. Zdrojem je tzv. Frank-Readův zdroj. Deformační zpevnění bývá označováno také jako zpevnění dislokační.

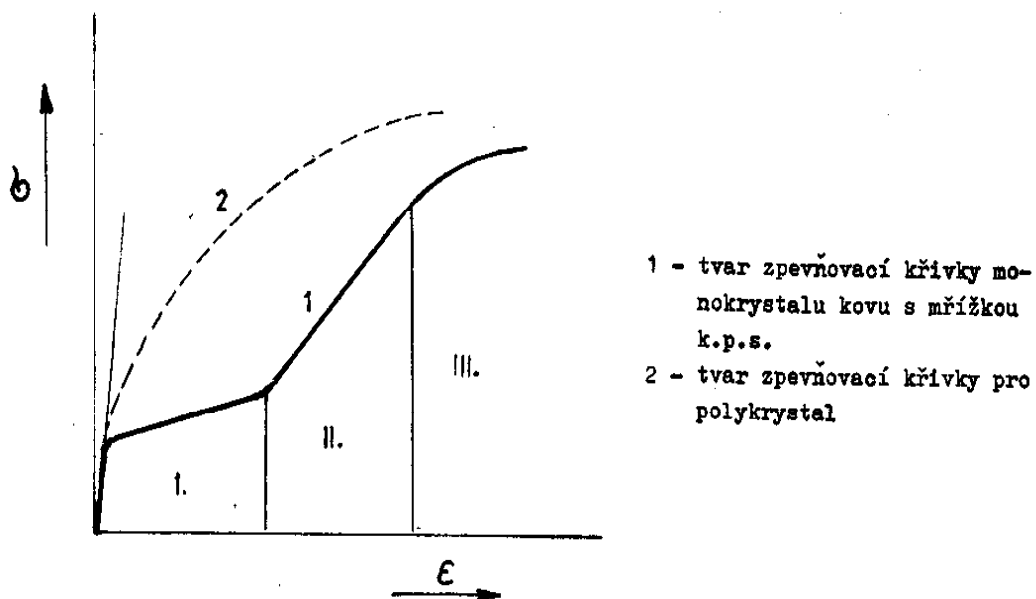
Postupným nárůstem plastické deformace dochází ke změně mechanických vlastností a k poklesu elektrické vodivosti. Nejvýrazněji dochází ke změně meze kluzu (pevnosti) oceli.

Deformační zpevnění monokrystalu

Na obrázku 3.11 je znázorněno deformační zpevnění monokrystalu číslicí 1, které je rozděleno do 3 oblastí [9]:

- I.oblast - jedná se o oblast snadného skluzu. Pro tuto oblast je charakteristický malý koeficient zpevnění. Délka této oblasti obecně závisí na velikosti a orientaci krystalů.
- II.oblast - v druhé části zpevnění dislokace zastavují svůj pohyb a dochází k rychlému nárůstu zpevnění. Křivka je lineární a její směrnice je nezávislá na teplotě nebo napětí.
- III.oblast - dislokace, která byla v předchozím stádiu bržděna, se díky vysokému napětí dává opět do pohybu. Tato oblast má parabolický tvar.

Pro vysvětlení způsobu zpevňování ve II. stádiu se uvádějí tři teorie: teorie kupení dislokací, teorie dislokačního lesa a teorie vlivu skoků [7].



Obr. 3.11 Křivka zpevnění [9]

Deformační zpevnění polykrystalu

Na obrázku 3.11 je deformační zpevnění polykrystalu označeno číslicí 2. Tvar této křivky je dán průměrnými hodnotami napětí a deformace v důsledku různé orientace krystalové mřížky v jednotlivých místech. U deformačního zpevnění polykrystalů se uplatňují stejné mechanismy jako u monokrystalů.

Podstatný vliv na deformační zpevnění má velikost zrna. Závislost deformačního napětí σ_k na velikosti zrna d je dána Hall-Petchovým vztahem.

$$\sigma_k = \sigma_o + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (6)$$

σ_k - mez skluzu polykrystalu

σ_o - napětí potřebné k překonání překážek při pohybu dislokací v monokrystalu

k - Hall-Petchova konstanta

d - velikost zrna polykrystalu

Během každé plastické deformace dochází k postupnému vyčerpání plasticity materiálu. Dochází k nakupení dislokací a tvrdých částic na hranicích zrn, to vyvolává napětový stav. Vznik napětových špiček vede ke vzniku mikrotrhlin a dutin. Tyto nespojitosti se ve fázi zpevňování šíří a vedou k následnému porušení za studena zpevněného kovu [3].

3.3 STŘÍHÁNÍ

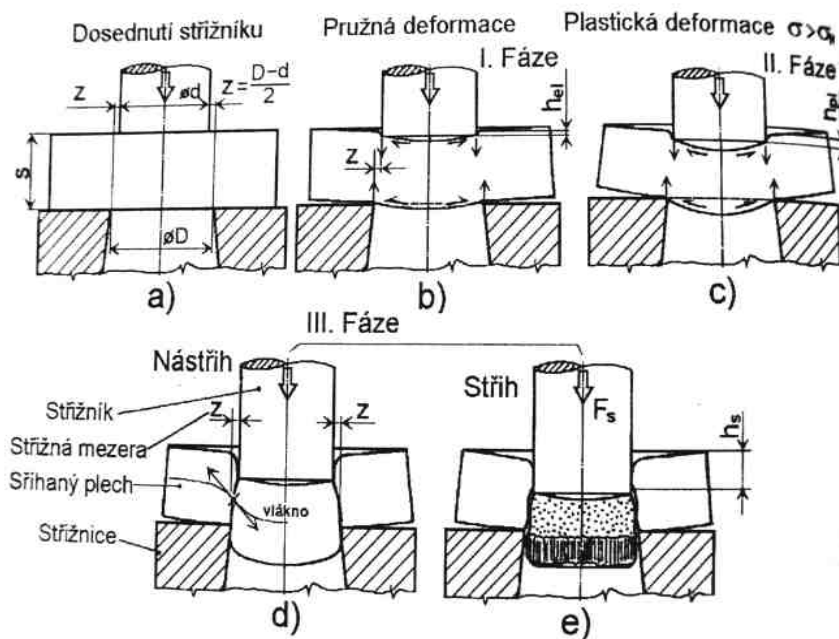
Podstata stříhání spočívá v oddělování materiálů protilehlými břity nožů. Stříhání je technologický proces, kde dochází k oddělování materiálu smykovým namáháním. Stříhání je jediný z technologických procesů tváření, kde je porušení materiálu žádoucím jevem. Stříhání je proces, při kterém se materiál ve stříhané oblasti deformuje. Proto je značným problémem, jak udržet plastickou deformaci v přijatelných mezích proto, že na jedné straně je nutné, aby se materiál dostal do plastického stavu a ustříhnul se a na druhé straně je plastická deformace nežádoucí, protože způsobuje deformaci profilu [11].

Z hlediska kvality střížné plochy se stříhání dělí na stříhání prosté a stříhání přesné. Z hlediska tvaru střížné součásti se bývá stříhání děleno na stříhání plošné a stříhání objemové, kdy je součást ve tvaru určitého profilu. Ke stříhání je využíváno několika způsobů od ručních nůžek a lisů až po hydraulické linky ve válcovnách a hutních závodech.

Za studena nebo za tepla se stříhají polotovary o průměru 15 až 250 mm. Oceli třídy 11 a částečně třídy 12 se stříhají za studena o průměru 50 až 70 mm. Větší rozměry se stříhají za tepla [12].

3.3.1 Princip stříhání

Proces stříhání lze rozdělit do 3 fází (obr. 3.12). První fáze je označována jako fáze pružných deformací. Během této fáze dochází ke stlačování a ohýbání materiálu. Druhá fáze je fáze plastických deformací. Je překročena mez kluzu materiálu R_e , která je způsobena postupným pohybem střížnice. Ve třetí fázi dochází k překročení meze pevnosti. Vznikají trhlinky na hranách, postupně se rozšiřují a dochází k ustřížení.



Obr. 3.12 Jednotlivé fáze procesu stříhání [2]

3.3.2 Průběh napjatosti při stříhání

V průběhu stříhání dochází k několika procesům. Lze je rozdělit na 3 části (obr. 3.13) [12]:

1. Pružná oblast

Na obrázku číslem 1 je označena oblast, kde dochází k vniknutí břitu nože do materiálu. V této oblasti nedochází k plastické deformaci. Stříhaný materiál se vznikem silových dvojic, které působí na rovinu kolmou ke střížným plochám, ohýbá a deformuje [13]. Tato oblast zaujímá přibližně 5-8 % celkové střížné plochy a končí dosažením meze kluzu R_e . Jedná se vlastně o smyk. a_x označuje zeslabení průřezu.

2. Oblast plastické deformace

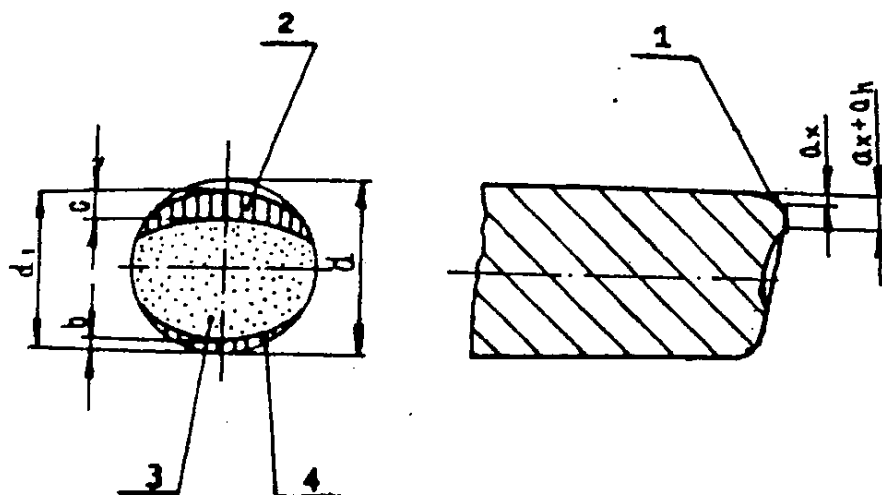
Na obrázku je tato oblast označena číslem 2. Postupným zvyšováním napětí nad mez kluzu R_e vzniká plastická deformace. Oblast zaujímá podle typu stříhaného materiálu přibližně 10-25% z celkové střížné plochy. Tato fáze je zakončena dosažením meze pevnosti ve smyku τ_m a je charakteristická vznikem trhlin v místech střížných hran. Vzhledově je tato plocha lesklá.

3. Porušení

Porušení nastává po překročení τ_m , kdy se vzniklé trhliny spojí a tím dojde k oddělení materiálu. Oblast zaujímá 60 až 80% z celkové střížné plochy.

4. Pásmo otlacení nože

Oblast 4 zaujímá přibližně 4% z celkové střížné plochy.

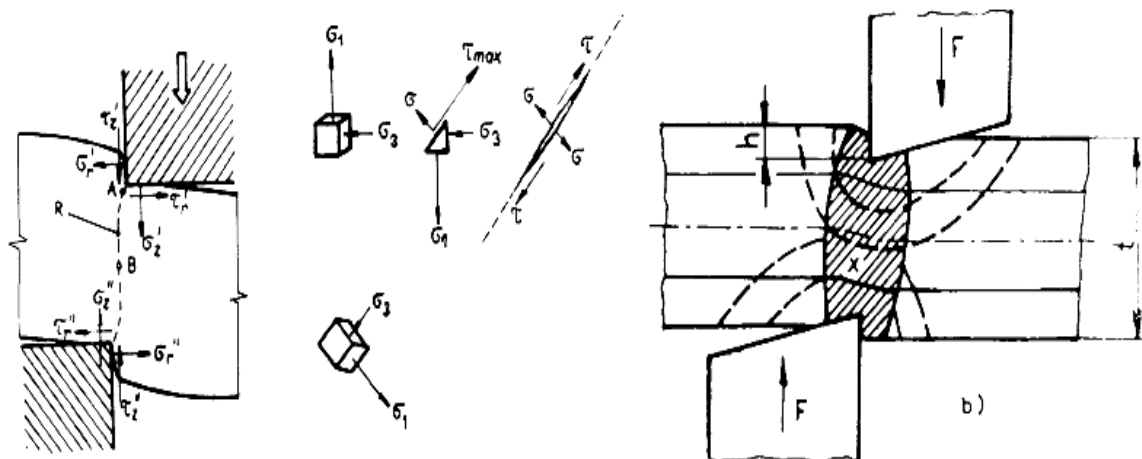


Obr. 3.13 Schéma střížné plochy [12]

Na obrázku 3.14 je znázorněn napěťově deformační stav v oblasti stříhu. Působení normálového napětí σ_z a napětí na hřbetní ploše σ_r jsou způsobena pohybem břitu do materiálu. Smyková napětí na čelní ploše τ_r a smyková napětí na hřbetní ploše τ_z jsou vyvolána třením na kontaktních plochách materiálu a nožů. Čára R na obrázku 3.14 vyznačuje, že směr a velikost hlavních napětí není konstantní [13]. Mění se směrem dovnitř materiálu. Hlavní osy jsou odkloněny o 45°. Výsledné přetvoření je výsledkem kluzů vznikající vlivem maximálních smykových napětí,

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma - \sigma_3}{2} \quad (7)$$

Normálové tahové napětí σ v rovině $\tau_{\max}$ vzniklé trhlinky rozšiřuje a ustřížení podporuje [13]. K největšímu přetvoření dochází na střížných hranách. Směrem dovnitř materiálu se deformace postupně snižuje.



Obr. 3.14 Napětový stav při stříhu [13]

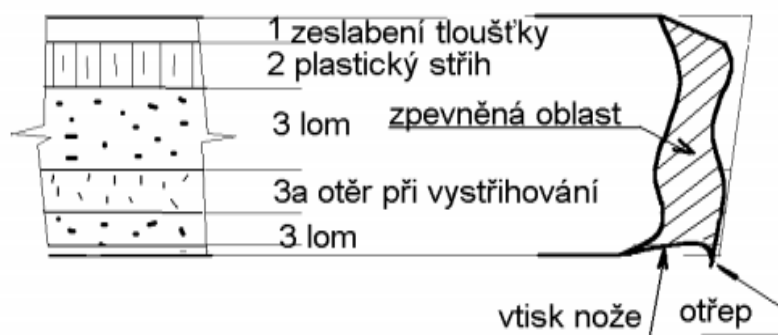
3.3.3 Střížná plocha

Přesnost a kvalita střížné plochy je ovlivněna mnoha faktory, z nichž k nejdůležitějším patří:

- velikost střížné mezery
- vlastnosti stříhaného materiálu
- způsob stříhání
- kvalita střížného nástroje

Výsledná kvalita střížné plochy je charakterizována kolmostí střížné plochy k ose tyče, tvarovou a objemovou přesností [12].

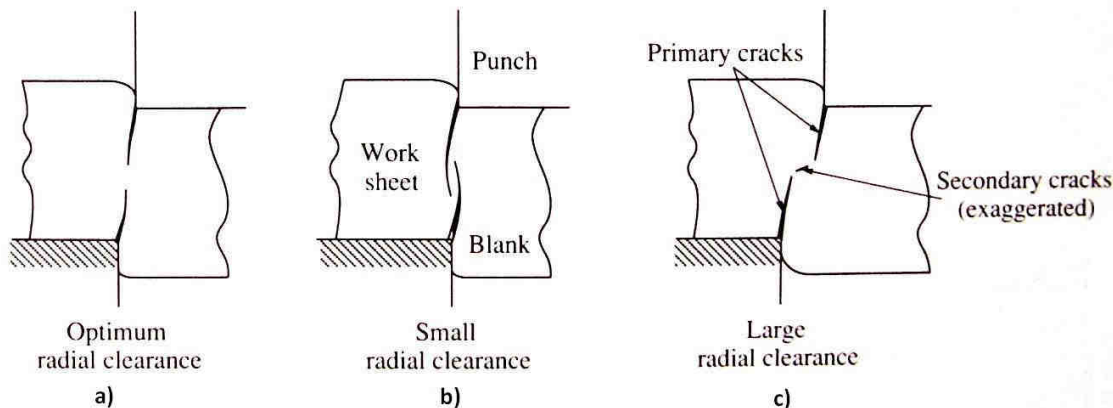
Na obrázku 3.15 je znázorněn vliv několika faktorů na tvar a kvalitu střížné plochy. Pásmo 1 zeslabení tloušťky je tím větší, čím je materiál tvárnější. Na pásmo 2 má vliv tloušťka stěny. Tvar lomové plochy 3 je určen směrem hlavního napětí (čára R). Otřep na konci materiálu je způsoben kvalitou nástroje. Otřep je tím větší, čím je nástroj tupější a materiál tvárnější. Vtisk nože je tím větší, čím je větší úhel čela nástroje. [13]



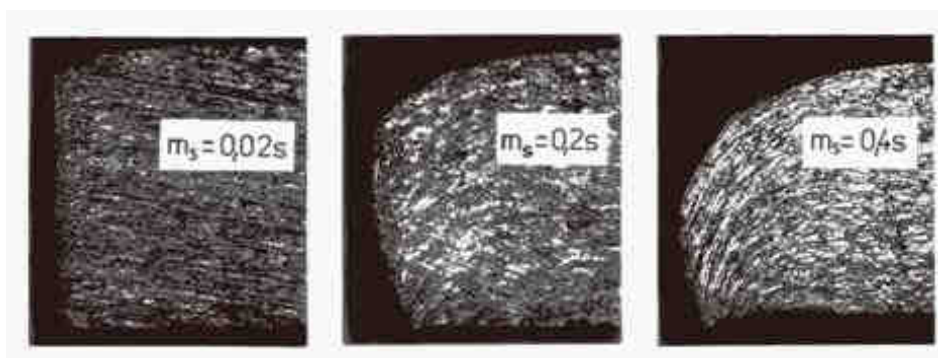
Obr. 3.15 Střížná plocha [13]

Vliv střížné mezery na kvalitu střížné plochy

Velikost střížné mezery závisí na druhu stříhaného materiálu. Velikost mezery se udává v % průměru střížné plochy. Mezera se volí tak, aby došlo k propojení trhlinek od střížných hran (obr. 3.16) [14]. Na obrázku 3.17 je ukázán vliv velikosti střížné mezery na výslednou kvalitu střížné plochy. Je patrné, že s rostoucí velikostí střížné mezery se kvalita povrch zhoršuje a materiál se deformuje.



Obr. 3.16 Velikost střížné mezery [14]
a) optimální vůle, b) malá vůle, c) velká vůle

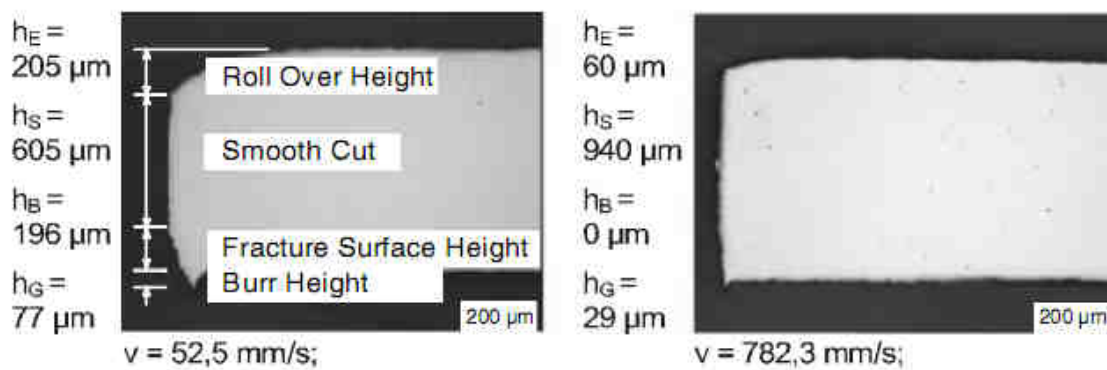


Obr. 3.17 Kvalita střížné plochy pro různou velikost střížné mezery [15]

Vliv rychlosti stříhání

K posouzení vlivu rychlosti stříhání na kvalitu střížné plochy byly provedeny zkoušky pro různé rychlosti a typy materiálů [16].

Na obrázku 3.18 je zobrazen konec zkoušeného materiálu DC04 (dle EN 10130). Rychlost stříhání 52,5 mm/s a 782,3 mm/s. Díky zvýšené rychlosti stříhání je otřep na konci tyče menší, kvalita povrchu se výrazně zlepšila.



Obr. 3.18 Vliv rychlosti stříhání na kvalitu střížné plochy [16]

3.3.4 Střížná síla a práce

Na velikost střížné síly má vliv střížná mezera, ostrost břitů, úhel sklonu břitu nože, pevnost ve smyku materiálu a hloubka vniknutí střížníku do materiálu [14].

Výpočet střížné síly [2]:

$$F_{stř} = n \cdot L \cdot (s_0 - h_s) \cdot \tau_s \quad (8)$$

n – 1,0 až 1,3. Koeficient zahrnující vliv vnějších podmínek při stříhání (nerovnoměrnost tloušťky plechu, nerovnoměrnost napjatosti, zhoršení kvality střížných hran)

L – délka křivky stříhu [m]

h_s – hloubka vniknutí střížné hrany [m]

s_0 – tloušťka plechu [m]

τ_s – napětí ve stříhu. Nazývá se též střížným odporem. Nabývá hodnoty 0,77 R_m

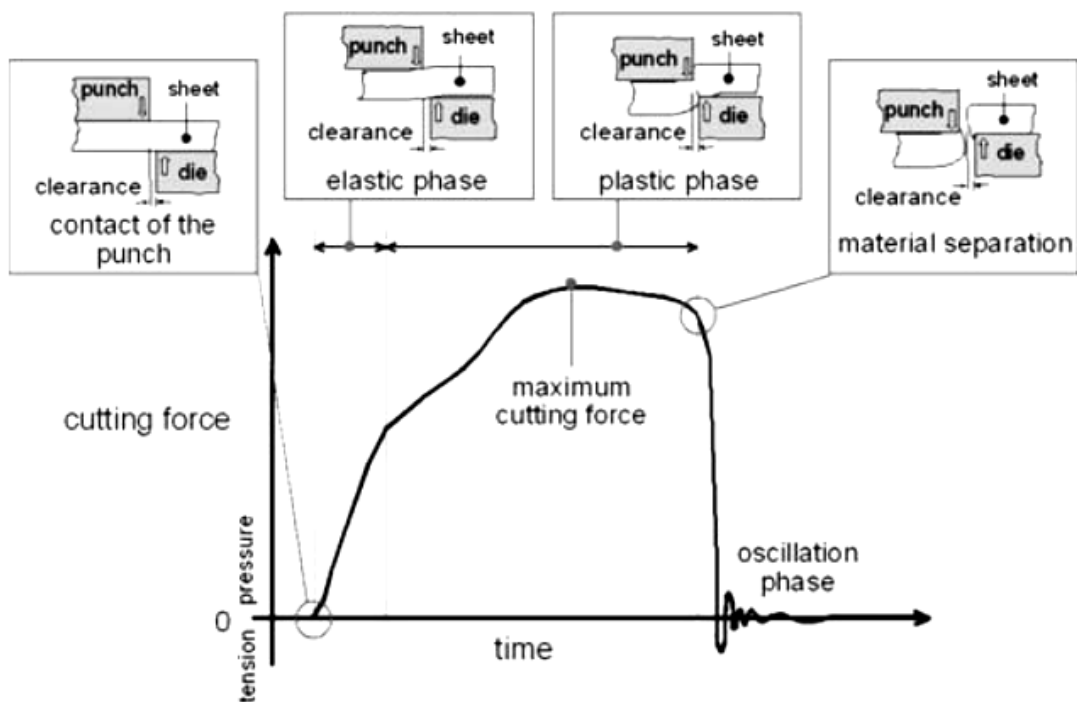
Výpočet střížné práce [2]:

$$A = \lambda \cdot F_{stř \cdot max} \cdot s \quad (9)$$

λ – součinitel plnosti, závisí na druhu materiálu (0,4 – 0,8)

s – tloušťka plechu

Na obrázku 3.19 je vyznačena závislost střížné síly na čase s jednotlivými fázemi stříhu.



Obr. 3.19 Závislost velikosti střížné síly na čase [16]

3.4 Výpočtové modelování stříhání kruhových tyčí [17]

Výpočtové modelování stříhu tyčí

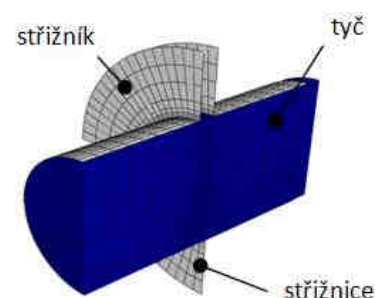
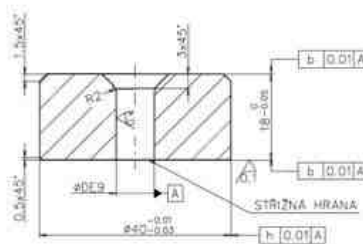
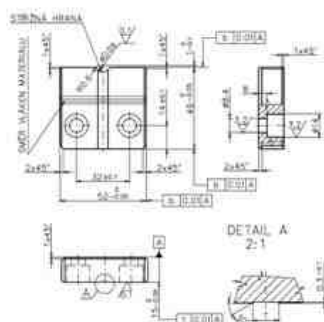
Výpočtové modelování tvárného porušení není jednoduché. Do současné doby nebylo definováno žádné obecně platné kritérium porušení, které by dobře popisovalo vznik a rozvoj tvárného porušení. Je známo mnoho empirických a fenomenologických kritérií. Je snadou testovat tyto kritéria na uspokojivý popis interakce nástrojů se zpracovávaným materiálem a popis technologické operace. K verifikaci výpočtového modelování neodmyslitelně patří i metalografický a fraktografický rozbor experimentu. S vhodným kritériem tvárného porušení pro konkrétní technologickou operaci lze optimalizovat rozměry střížných nástrojů, snižovat jejich zatížení a tím zvyšovat životnost.

Výpočtový model

Výpočtové modelování bylo realizováno v explicitním řešiči programu Abaqus 6.6 založeného na metodě konečných prvků (MKP), který se používá pro rychlé dynamické děje. Řešený problém je jak materiálově, tak geometricky a kontakto­vě nelineární. V případě stříhu se nedá využít zjednodušení modelu z 3D na 2D model, je však využito rovinné symetrie pro snížení výpočtových časů.

Geometrie modelu

Model geometrie nástrojů byl vytvořen v programu Abaqus dle výkresové dokumentace zaslané firmou J-VST Brno, obr.3.20 a obr.3.21. Při modelování byla modelována polovina sestavy za využití rovinné symetrie. Střížné nástroje byly modelovány jako tuhé skořepiny.



Obr. 3.20 Geometrie
střižníku[17]

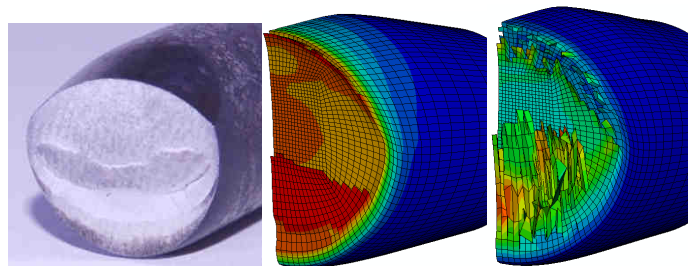
Obr.3.21 Geometrie
střižnice[17]

Obr.3.22 Sestava
střihu[17]

Na výpočtový model byly aplikovány tyto okrajové podmínky:

- Strážníku byly odebrány všechny stupně volnosti až na směr jeho pohybu
- Strážníci byly odebrány všechny stupně volnosti (vetknutí)
- Tyči byla předepsána rovinná symetrie

Vyhodnocovány jsou velikosti sřížných sil a tvar sřížných ploch, jako kritérium úspěšnosti popisu kritéria. Testovanými kritérii jsou kritéria redukovaného přetvoření a Johnson-Cook. Při porovnání sřížných ploch bylo dospěno k názoru, že nejlépe popisujícím kritériem sřížné plochy je kritérium redukovaného přetvoření viz obr. 3.23.

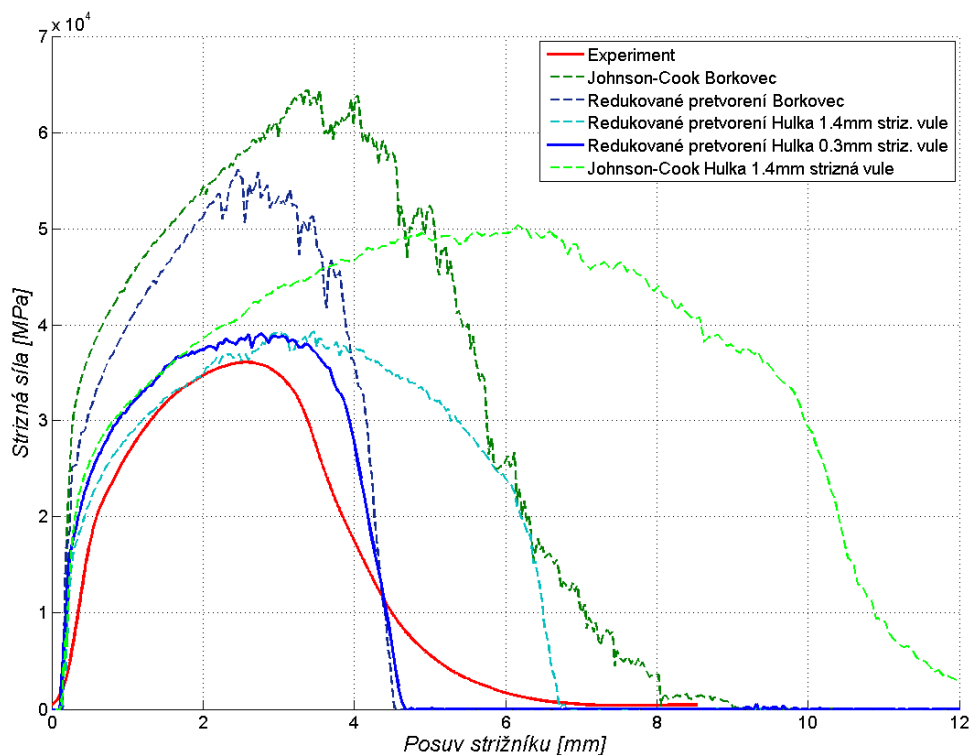


Obr. 3.23 Porovnání střižných ploch [17]

Druhým a důležitějším kritériem je velikost a průběh sřížných sil. Červená plná křivka znázorňuje průběh sřížné síly při experimentu. Dále jsou na obrázku 3.24 zobrazeny čárkovanými tmavými barvami (zelená, modrá) průběhy sřížných sil, které byly vypočteny s převzatými konstantami v modelech porušení pro ocel 12050.3. Tyto sřížné síly jsou příliš vysoké a nereálné. Příčina rozdílných hodnot byla nalezena po provedení tahové zkoušky, která odhalila značný rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi materiálu použitého k experimentu a materiálu použitého ke kalibraci modelů. Proto byly kritéria překalibrována.

Čárkované, světlé křivky (zelená, modrá) odpovídají vypočteným sřížným silám pro překalibrovaná kritéria se sřížnou vůlí o velikosti 1,4mm, oproti 0,3mm v původních modelech. Z těchto průběhů vyplývá, že se zvětšující se sřížnou mezerou roste plasticita materiálu a doba do porušení materiálu.

Plná, modrá křivka znázorňuje průběh sřížné síly pro překalibrovaný model redukovaného přetvoření a sřížnou vůli 0,3mm. Rozdíl mezi maximální sřížnou silou při experimentu a výpočtu je do 7%.



Obr. 3.24 Průběh střížných sil [17]

Při vyhodnocování problematiky simulování stříhu je důležitým součástí i experimentální verifikace a její metalografický rozbor. Je též nezbytné ověření shodnosti materiálových charakteristik simulovaného materiálu a materiálu použitého při experimentu, neboť není pravidlem, že materiál stejného označení (v našem případě 12050.3) má stejné mechanické vlastnosti.

4. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

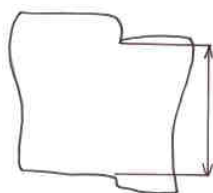
Pro provedení experimentu byl dodán vzorek, tyč kruhového průřezu $\varnothing 12\text{mm}$, vyrobená z oceli 12 050.3. Nastřížení tyče bylo provedeno pouze z jedné strany na mechanickém klikovém lisu. Bylo použito různé střížné síly a po každém stříhu byla tyč pootočená (obr. 4.1). Příklad průběhu střížné síly v závislosti na posuvu je uveden na obr. 4.4.



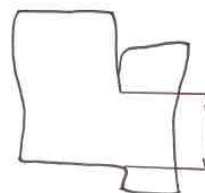
Obr. 4.1

Použité označení vzorků použitých k rozborům:

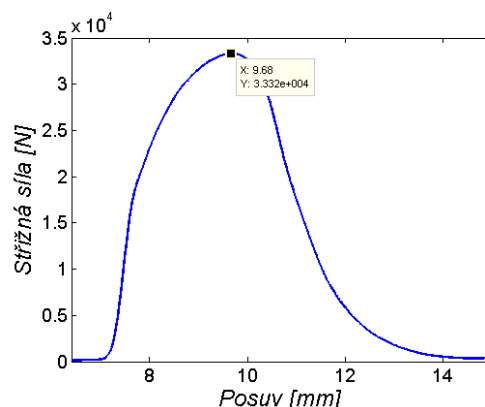
- 11 – 12, vzorek 1 deformovaná oblast mezi střížnými hranami - 12mm (obr.4.2)
- 12 – 13, vzorek 2 deformovaná oblast mezi střížnými hranami - 11mm (obr.4.2)
- 13 – 14, vzorek 3 deformovaná oblast mezi špičí trhliny a střížnou hranou - 7mm (obr.4.3)
- 14 – 15, vzorek 4 deformovaná oblast mezi špičí trhliny a střížnou hranou - 6mm (obr.4.3)
- 28 – 29, vzorek 5 deformovaná oblast mezi špičí trhliny a střížnou hranou - 5mm (obr.4.3)



Obr. 4.2 Schéma deformované oblasti bez trhliny



Obr. 4.3 Schéma deformované oblasti s trhlinou



Obr. 4.4 Průběh střížné síly na mechanickém klikovém lisu [17]

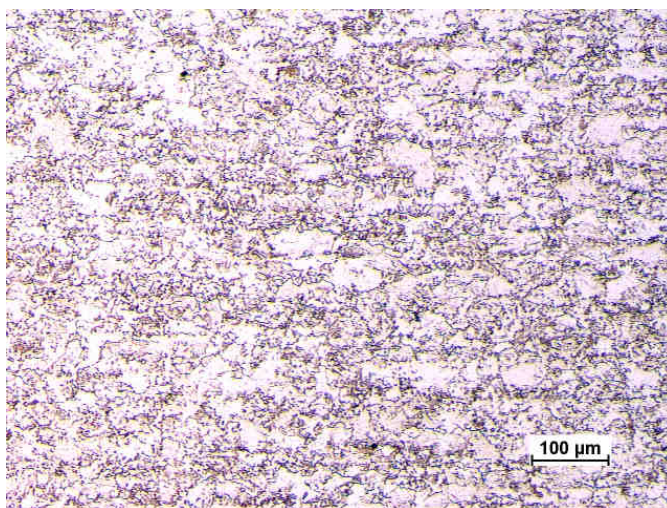
Materiál dodané tyče byl zpracován žiháním na měkko. Struktura tedy byla tvořena feritem a globulárním perlitem (obr. 4.5). Na struktuře byla patrná řádkovitost po tváření. Povrch vzorku byl oduhličen přibližně do hloubky 60-100 μm (obr. 4.6).

Kontrolní analýza chemického složení byla provedena na optickém emisním spektrometru s doutnavým výbojem SPECTRUMAT GDS-750. Z výsledků uvedených v tab. 4.1 je patrné, že obsah uhlíku je na spodní hranici povoleného rozmezí, obsahy S a P jsou nízké – ocel je relativně čistá.

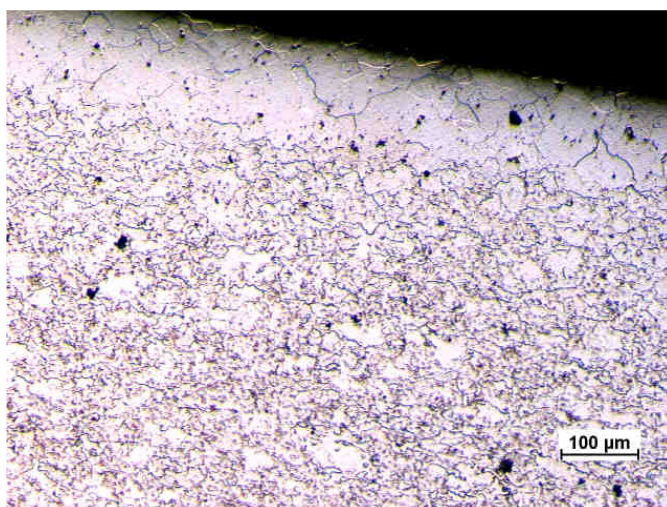
Mikrostruktura byla pozorována na metalografickém mikroskopu Neophot 30 a dokumentována digitální kamerou Nikon DS-Fil při zvětšení 100x a 200x. Makrostruktura byla pozorována při zvětšení 15x.

Tab. 4.1 Chemické složení v hm. %

12 050.3	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
Předepsané složení	0,42	0,50	0,17	max.	max.	max.	max.
	0,50	0,80	0,37	0,040	0,040	0,25	0,30
Naměřené složení	0,41	0,60	0,23	0,015	0,008	0,04	0,04



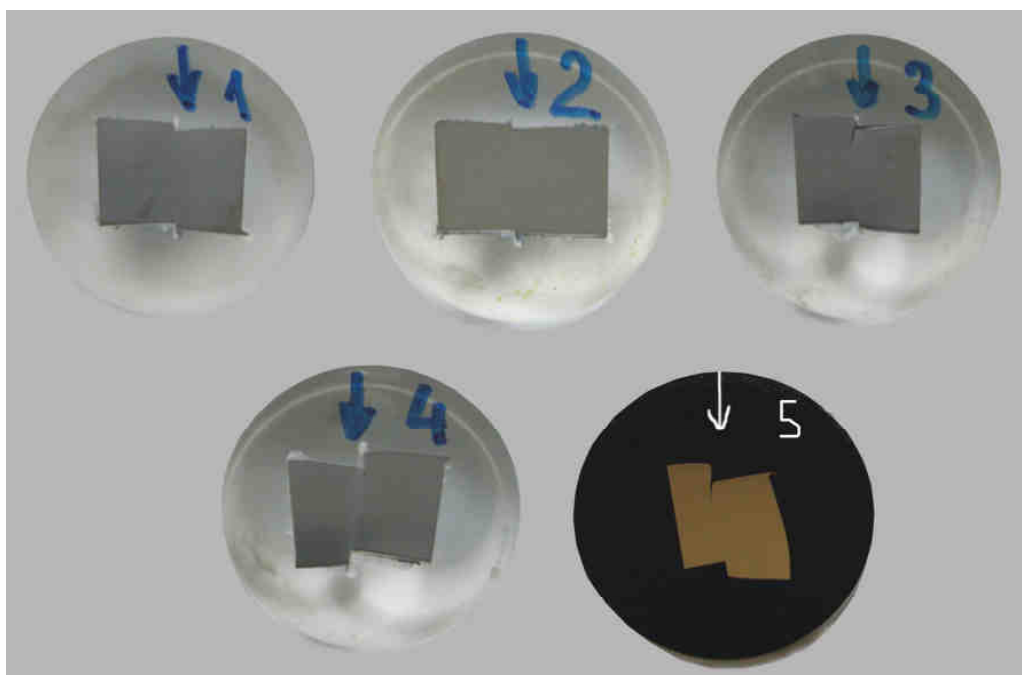
Obr. 4.5 Mikrostruktura oceli 12 050.3, Nital



Obr. 4.6 Oduhličený povrch vzorku 3, Nital

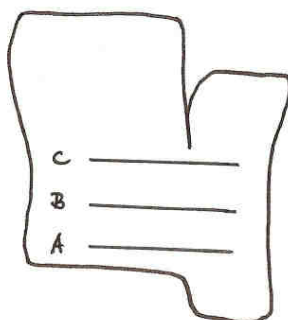
4.2 POUŽITÉ METODIKY

Vzorky pro metalografické pozorování byly připraveny standardním způsobem. Vzorky byly rozřezány v oblasti stříhu o délce cca 1cm a poté v podélné ose rozříznuty na poloviny. Dále byly broušeny, leštěny diamantovou pastou na přístroji ABRAMIN 150N a poté leptány 2 % Nitalém. K pozorování makrostruktury byly vzorky leptány 5 % Nitalém. Po naleptání byly vzorky pozorovány na mikroskopu Neophot 30. Připravené metalografické vzorky s označeným směrem stříhu jsou uvedeny na obrázku 4.7.



Obr. 4.7 Připravené metalografické vzorky

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno metodou dle Vickerse HV0,1 dle ČSN EN ISO 4516 při použitím zatížení 0,98 N na automatizované mikrotvrdoměru LM 247AT od firmy Leco. Na každém vzorku byla mikrotvrdost měřena ve 3 řadách: 0,5mm pod povrchem, uprostřed a 0,5mm od konce (obr.4.8). Měřená délka byla 8 mm. V oblasti pod břitem nože v délce 5mm bylo provedeno 40 vpichů, v okolních částech na každé straně 10 vpichů.



Obr. 4.8 Schéma měření mikrotvrdosti

Analýza lomových ploch byla provedena v modu sekundárních elektronů na vzorcích 31 a 32 na rastrovacím elektronovém mikroskopu PHILIPS X L-30.

5. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

5.1 METALOGRAFICKÉ POZOROVÁNÍ

Pro hodnocení **makrostruktury** byly vzorky leptány 5% Nitalém. Po naleptání bylo u vzorků na obr. P.1až P.11 patrné řádkovité usměrnění struktury.

Makrostruktura vzorku **1** (P.1 a P.2) vykazuje pouze nepatrný tok materiálu. Na vzorek působila nízká sřížná síla. Makrostruktura vzorku **2** (P.3 a P.4) opět vykazuje nepatrný tok materiálu. Na vzorek **3** působila vyšší sřížná síla než u předchozích vzorků. Sřížná síla byla tak velká, že došlo ke vzniku trhliny. Na obrázcích P.5 a P.6 je patrný tok materiálu ve směru působící sřížné síly. U vzorku **4** došlo opět ke vzniku trhliny. Zdeformovaná oblast vzorku **4** je v porovnání se vzorkem **3** vyšší. Tok materiálu je patrný na snímcích P.7 a P.8. Makrostruktura vzorku **5** (P.9 až P.11) zachycuje tok materiálu ve směru působení sřížné síly. Z obrázku P.10 je patrný odklon špice trhliny pod účinkem smykových napětí.

Pro pozorování **mikrostruktury** byly vzorky leptány 2% Nitalém. Pozorování bylo zaměřeno především na změnu mikrostruktury a vznik trhlinek resp. dutin v oblasti sříhu.

U všech vzorků byla patrná změna ve velikosti zrn v oblasti sříhu. Velikost zrn se zvětšovala od povrchu směrem ke středu vzorku. Příčinu různé velikosti zrna je nutné hledat ve výrobním procesu použité tyče. Působícím napětím při sříhu byla zrna pouze deformována.

Na obrázcích P.12 a P.13 je zobrazena horní (P.12) a dolní (P.13) část vzorku **1**. Z obrázků je patrný tok materiálu ve směru působící síly. U vzorku **1** činila tloušťka oduhličené vrstvy přibližně 50μm.

U vzorku **2** byl výrazný tok materiálu pouze z horní strany (P.15). Spodní strana (P.14) byla bez výraznějšího toku materiálu. Výrazná je ovšem oduhličená vrstva, která byla přibližně čtyřnásobná v porovnání se vzorkem **1**. Tloušťka oduhličené vrstvy tedy dosahovala 150-250μm.

Na obrázku P.16 a P.17 je dokumentována trhlina pro vzorek **3**. Obrázek P.16 zachycuje špici trhliny. Obrázek P.17 zobrazuje trhlínky, mezi kterými ještě nedošlo k propojení a v jejich okolí jsou patrné jamky. Šířka trhliny u jejího kořene činila přibližně 200μm. Povrch byl oduhličen do hloubky 200 – 250μm. Na obrázku P.18 je patrný tok materiálu na spodní straně vzorku.

Na obrázku P.19 až P.22 byl dokumentován průběh trhliny vzorku **4**. Na snímku P.22 jsou opět patrné jamky. Šířka trhliny u kořene byla přibližně 200μm. Na obrázku P.23 je zobrazen tok materiálu na spodní straně vzorku. Oduhličená vrstva u vzorku **4** sahala přibližně do hloubky 150-200μm.

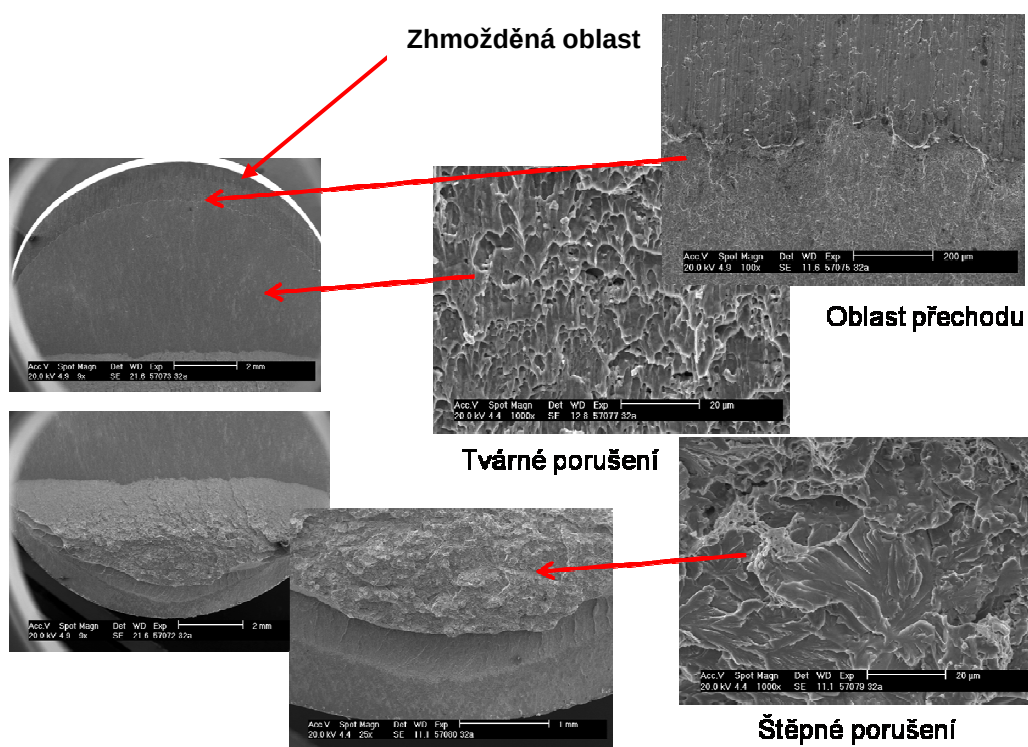
Pro vzorek **5** je v příloze (P.24 až P.26) dokumentován pouze průběh trhliny. Na snímcích je patrné postupné odklání trhliny pod úhlem přibližně 40°.

5.2 ANALÝZA LOMOVÝCH PLOCH

Analýza lomových ploch byla provedena u dodatečně zařazených vzorků 31 (P.27-P.32) a 32 (P.33-P.34). Na obrázku 5.1 jsou zobrazeny místa jednotlivých typů porušení.

Na obrázku P.27 a P.28 jsou přehledové snímky střížné plochy vzorku 32. Z nich jsou již patrné jednotlivé oblasti porušení. Na detailním snímku P.29 je zachycena oblast přechodu mezi poškozenou a nepoškozenou částí lomové plochy. K tomuto poškození došlo třením nástroje o vzorek. Nepoškozená část lomové plochy vznikla transkrystalickým tvárným mechanismem. Na obrázku P.30 je patrné usměrnění porušení. Postupně dochází ke kombinaci tvárného a štěpného porušení (P.31). Po dosažení kritické délky trhliny převládá transkrystalické kvazištěpení (obr.P.32).

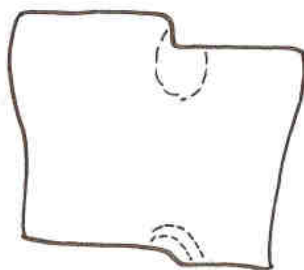
U vzorku 31 bylo hodnocení totožné. Detailní tvárné transkrystalické porušení (P.33) a kvazištěpení (P.34).



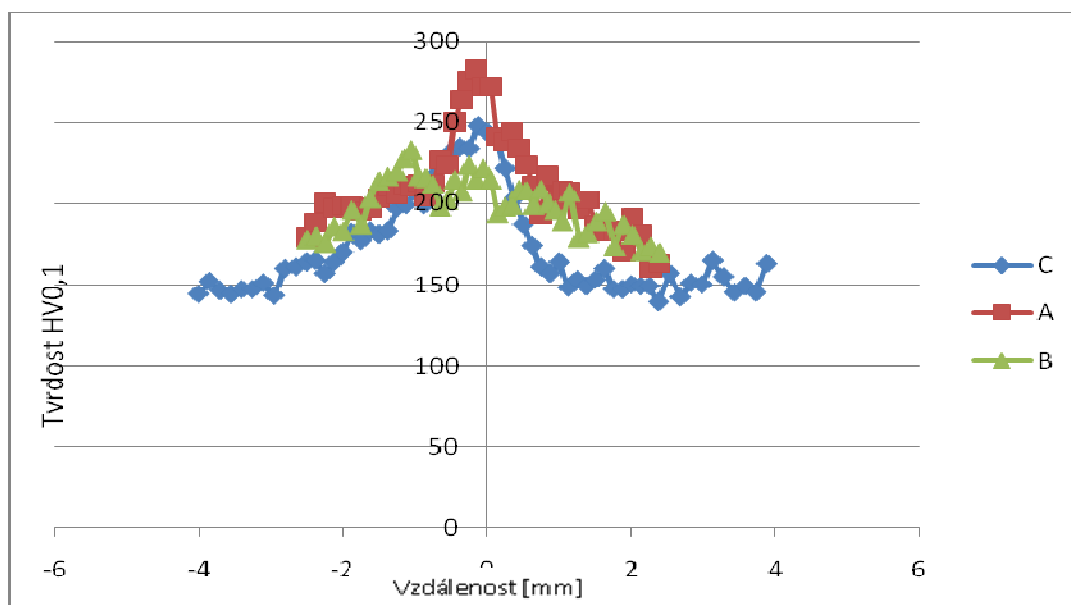
5.1 Schéma jednotlivých oblastí porušení

5.3 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

U vzorku 1 dochází k největšímu zpevnění v oblasti A (283 HV_{0,1}). V oblasti B je tvrdost téměř rovnoměrná a pohybuje se kolem 230 HV_{0,1}. V oblastech, které nebyly ovlivněny plastickou deformací, se tvrdost pohybovala okolo 160 HV_{0,1}. U měřené oblasti C došlo k prudkému poklesu tvrdosti. Tento jev byl způsoben tím, že konec tyče při stříhu nebyl nijak přidržován, jak ukazuje tok materiálu (P.13). Na obrázku 5.2 je zobrazeno schéma toku materiálu. Graf s naměřenými hodnotami je na obrázku 5.3.

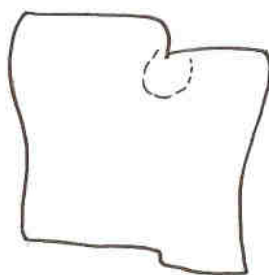


Obr. 5.2 Schéma toku materiálu vzorku 1

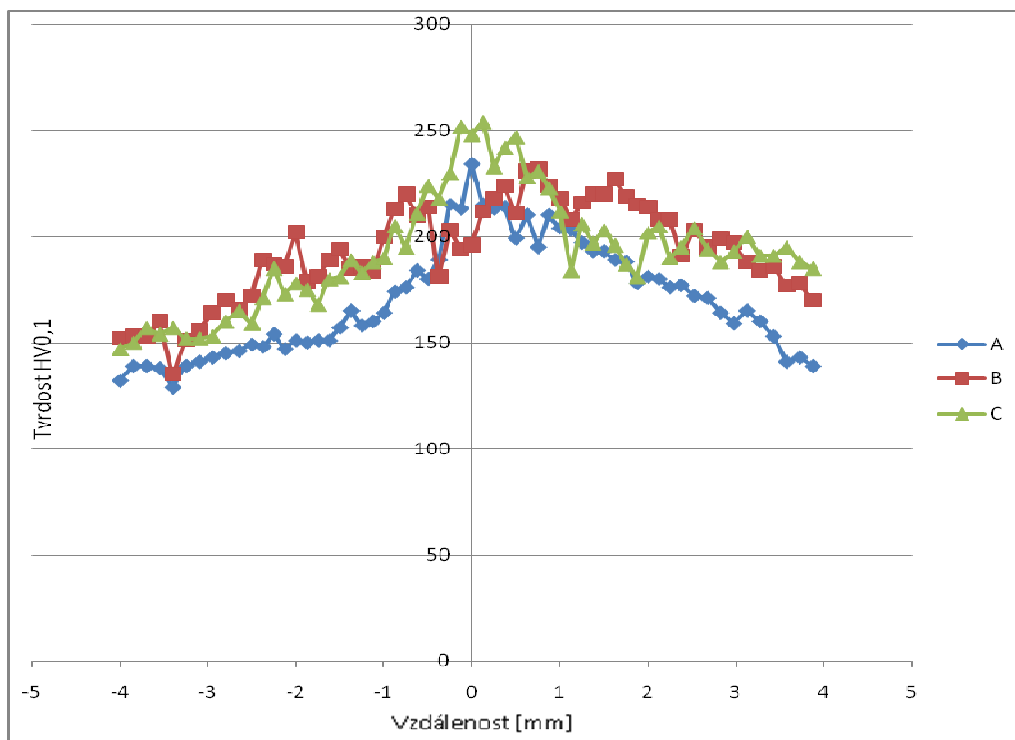


Obr. 5.3 Mikrotvrdost vzorku 1

U vzorku 2 naopak docházelo k největšímu zpevnění v oblasti C (254 HV_{0,1}), tj. pod břitem nástroje. Vyšší zpevnění v oblasti C bylo zřejmě způsobeno nerovnoměrným rozložením napětí při stříhu. Opět dochází ke strmějšímu poklesu tvrdosti v levé části (oblast C). V pravé části, která byla bez přidržovače, dochází ke zpevnění, které souvisí s tokem materiálu (P.15). Na obrázku 5.4 je schéma toku materiálu. Graf s naměřenými hodnotami HV_{0,1} je na obrázku 5.5.

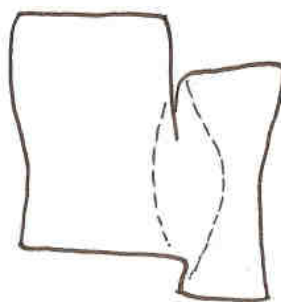


Obr. 5.4 Schéma toku materiálu vzorku 2

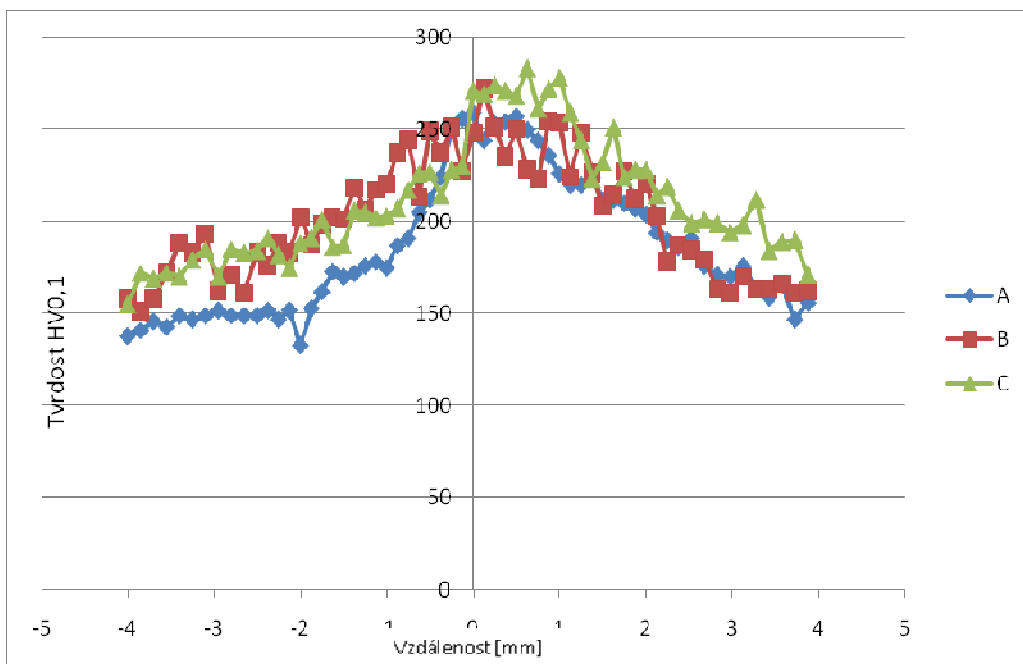


Obr. 5.5 Mikrotvrdość vzorku 2

U vzorku 3 se oblasti A a C v pravé části prolínají, což je zřejmě způsobeno trhlinou, která vznikla pod břitem nástroje. Opět prudký pokles tvrdosti v levé části v oblasti C. V pravé části dochází ke zpevnění, které souvisí s tokem materiálu jak je patrné z makrostruktury (P.5 a P.6) i mikrostruktury (P.18). Na obrázku 5.6 je schéma toku materiálu. Graf s naměřenými hodnotami HV0,1 je na obrázku 5.7.

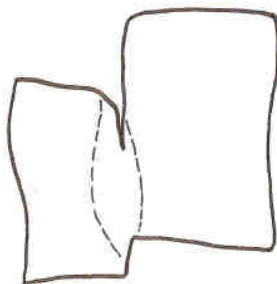


Obr. 5.6 Schéma toku materiálu vzorku 3

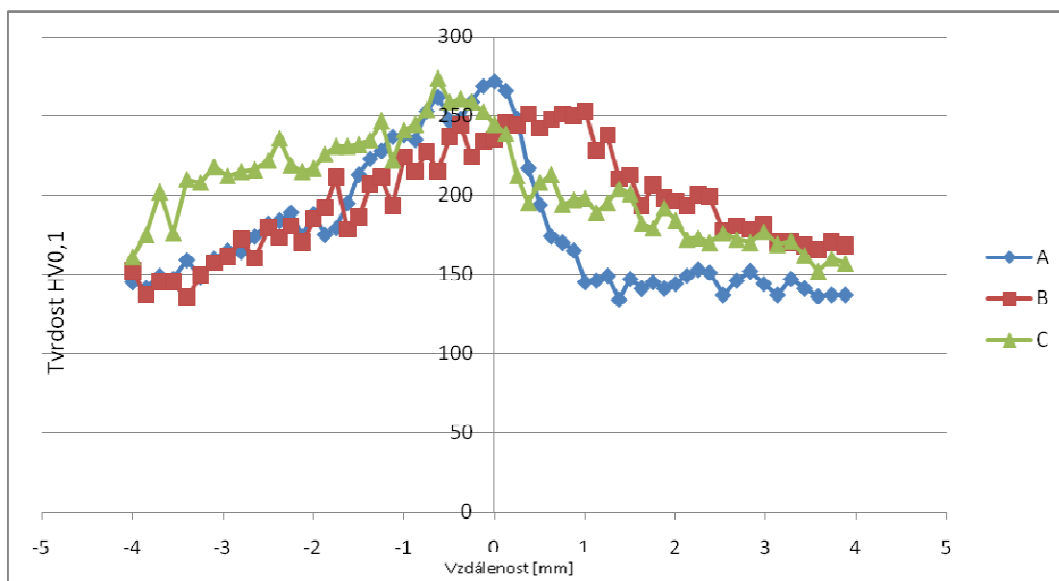


Obr. 5.7 Mikrotvrdost vzorku 3

U vzorku 4 bylo největší zpevnění v oblasti A (272 HV_{0,1}). (Pík 274 HV_{0,1} v oblasti C je považován za chybu měření). Tok materiálu u vzorku 4 (P.7, P.8 a P.23) opět odpovídá naměřené tvrdosti. V pravé části byl naměřen prudší pokles tvrdosti. V levé části došlo ke zpevnění materiálu. Tyč v pravé části nebyla přidržována. Na obrázku 5.8 je schéma toku materiálu. Graf s naměřenými hodnotami HV_{0,1} je na obrázku 5.9.

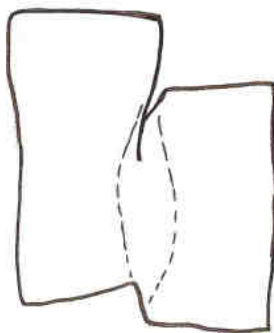


Obr. 5.8 Schéma toku materiálu vzorku 4

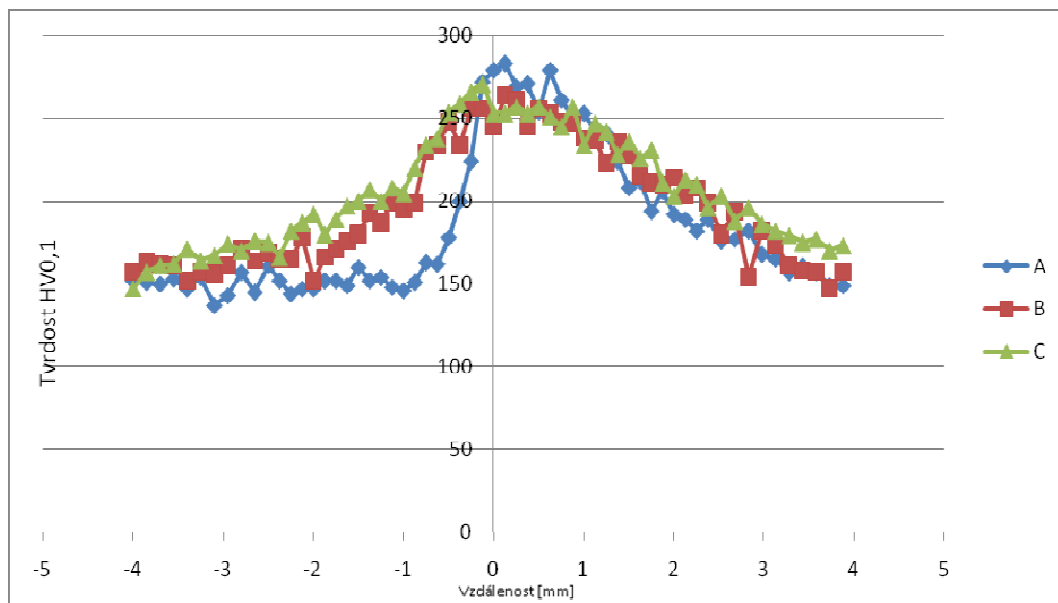


Obr. 5.9 Mikrotvrdost vzorku 4

U vzorku 5 bylo naměřeno největší zpevnění v oblasti A (283 HV_{0,1}). Tok materiálu (P.9 a P.10) odpovídá naměřené mikrotvrdosti, zejména pak oblasti A (P.11). Pokles v levé části v oblasti C je způsoben trhlinou. Na obrázku 5.10 je zobrazen tok materiálu. Graf s naměřenými hodnotami HV_{0,1} je na obrázku 5.11.



Obr. 5.10 Schéma toku materiálu vzorku 5



Obr. 5.11 Mikrotvrdost vzorku 5

S rostoucí střížnou silou docházelo k větší plastické deformaci směrem ke středu vzorku, to se projevilo rostoucím nárůstem tvrdosti v oblasti B. U vzorku 1 činila tvrdost průměrně okolo 230 HV_{0,1} a u vzorku 5 okolo 260 HV_{0,1}.

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V teoretické části byl popisován princip stříhání a jednotlivé fáze stříhu, kterými materiál prochází. U vzorku 1 a 2 nedošlo ke vzniku tak výrazné deformace, aby došlo ke vzniku trhlin. Napětí se pohybuje v oblasti plastických deformací pod mezí pevnosti ve smyku τ_m . U vzorku 3, 4 a 5 byla deformace tak velká, že došlo ke vzniku trhlin.

V souhrnu lze konstatovat, že střížná (lomová) plocha vzniká převážně pod účinkem smykových napětí. Nejdříve dochází k ohybu a plastické deformaci celého průřezu, tvar tyče se deformuje, tyč se ohýbá a patrně dochází k deformačnímu zpevnění materiálu tyče mezi střížnými hranami. Poté pod střížnými hranami dochází k nukleaci a šíření tvárného porušení pod dominantním účinkem smykových napětí. Toto porušení se postupně šíří přes průřez tyče a po dosažení kritické délky trhliny, patrně v důsledku změny napjatosti a zvýšení rychlosti deformace, dojde k dolomení. V tomto případě se uplatňuje kombinace transkrystalického kvazištěpného a tvárného porušení. Okraje střížné plochy jsou dodatečně deformovány střížnými nástroji, dochází k zhmoždění povrchu.

S ohledem na výše uvedené výsledky faktografického rozboru je nepřesný popis střížné plochy uvedený na obrázku 3.13, který byl převzat z literatury [12]. Na obrázku 3.13, oblasti 1, není vhodné hovořit o pružné deformaci, protože dochází k plastické deformaci celého průřezu. I proces vniknutí nože do materiálu je spojen s tvorbou lomového povrchu a s plastickou deformací. Oblast 2 obrázku 3.13 vznikla dodatečnou plastickou deformací (zhmožděním) povrchu střížné plochy. Střížná plocha je hladká a lesklá. Na obrázku 3.13, v oblasti 3, pokračuje stabilní šíření lomové plochy tvárným mechanismem. V popisu obrázku 3.13 chybí oblast dolomení.

Poměr stabilního a nestabilního lomu se bude měnit v závislosti na plasticitě stříhaného materiálu, lze připustit, že oblast nestabilního lomu bude chybět u „plastických“ materiálů.

Z rozboru mikrostruktury je patrné, že tvorbě střížné (lomové) plochy předchází značná plastická deformace spojená s růstem hustoty dislokací a tedy i s deformačním zpevněním. Měřítkem tohoto zpevnění jsou hodnoty mikrotvrdosti. Z jejího průběhu napříč budoucí střížnou plochou lze usuzovat i na velikost plastické deformace.

Lze předpokládat, že pod střížným nástrojem (oblast C) a pod střížnou hranou (oblast A) bude maximální lokalizace plastické deformace a že hodnoty tvrdostí budou právě zde vykazovat výrazné maximum. V oblasti B patrně bude plastická deformace zasahovat větší objem materiálu, maximální hodnoty HV_{0,1} nebudou tak vysoké, jako v oblastech A a C. S uvedenými předpoklady korespondují maximální naměřené hodnoty HV_{0,1} na jednotlivých vzorcích a v jednotlivých oblastech uvedené v tab. 6.1. Z tab. 6.1 dále vyplývá, že s rostoucím posuvem střížného nástroje vrůstají hodnoty HV_{0,1}.

Tab.6.1 Maximální hodnoty mikrotvrdosti v jednotlivých oblastech HV_{0,1}

oblast/vzorek	1	2	3	4	5
A	283	234	259	272	283
B	233	232	272	253	264
C	248	254	283	274	271

7. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo určit vztah mezi strukturou a změnou tvrdosti při procesu stříhání. Pro posouzení velikosti střížné síly na zpevnění materiálu byl experimentální vzorek postupně nastřiháván rostoucí střížnou silou. Z výsledků práce vyplynulo, že existuje souvislost mezi tokem materiálu a naměřenými hodnotami mikrotvrdosti.

Fraktografický rozbor střížné plochy přispěl k upřesnění představy o jejím vzniku a poukázal na nepřesnosti objevující se v některých učebních textech.

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

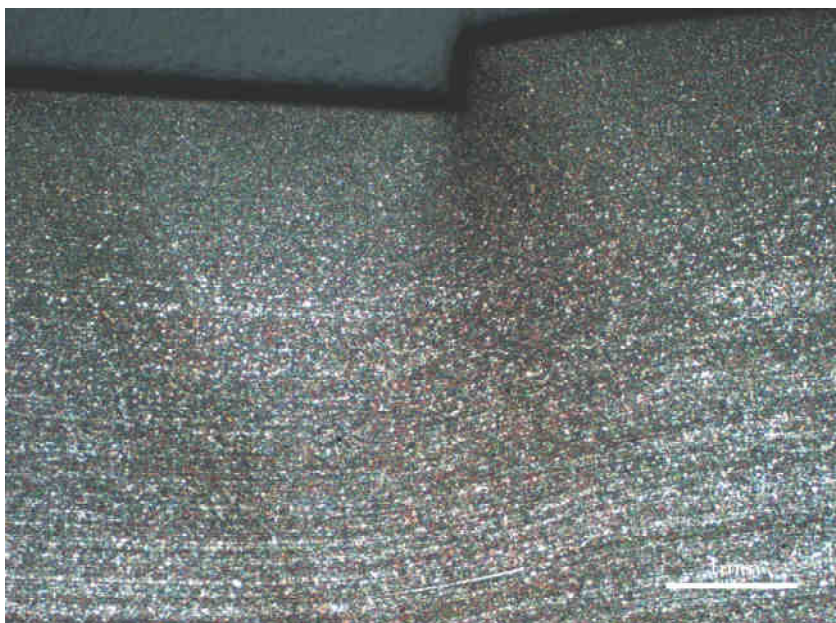
MKP	metoda konečných prvků
T_{rek} [K]	teplota rekrytalizace
T_{tav} [K]	teplota tavení
$T_{\text{tvář}}$ [K]	teplota tváření
a, b, c [m]	délkové parametry krystalografické mřížky
α, β, γ [°]	úhlové parametry krystalografické mřížky
ε [-]	poměrná deformace
u [m]	délka, o kterou se těleso prodlouží
L [m]	původní délka tělesa
γ [-]	poměrné zúžení
v [m]	délka, o kterou se těleso zkrátí
μ [-]	Poissonovo číslo
σ, σ_z [MPa]	normálové napětí
E [MPa]	modul pružnosti v tahu
τ [MPa]	smykové napětí
G [MPa]	modul pružnosti ve smyku
τ_{krit} [MPa]	kritické smykové napětí
σ_k, R_e [MPa]	mez skluzu polykrystalu
σ_o [MPa]	napětí potřebné k překonání překážek při pohybu dislokací v monokrystalu (Peierls-Nabarrovo napětí)
k [-]	Hallova-Petchova konstanta
d [m]	velikost zrna polykrystalu
τ_m [MPa]	pevnost ve smyku
σ_r [MPa]	napětí na hřbetní ploše
τ_z [MPa]	smyková napětí na hřbetní ploše
τ_r [MPa]	smyková napětí na čelní ploše
τ_{max} [MPa]	maximální smykové napětí
n [-]	koeficient zahrnující vliv vnějších podmínek při stříhání (nerovnoměrnost tloušťky plechu, nerovnoměrnost napjatosti, zhoršení kvality střížných hran)
L [m]	délka křivky stříhu
h_s [m]	hloubka vniknutí střížné hrany
s_0 [m]	tloušťka plechu
τ_s [MPa]	napětí ve stříhu
λ [-]	součinitel plnosti, závisí na druhu materiálu (0,4 – 0,8)
s [m]	tloušťka plechu
HV0,1	mikrotvrdost tvrdost dle Vickerse

LITERATURA

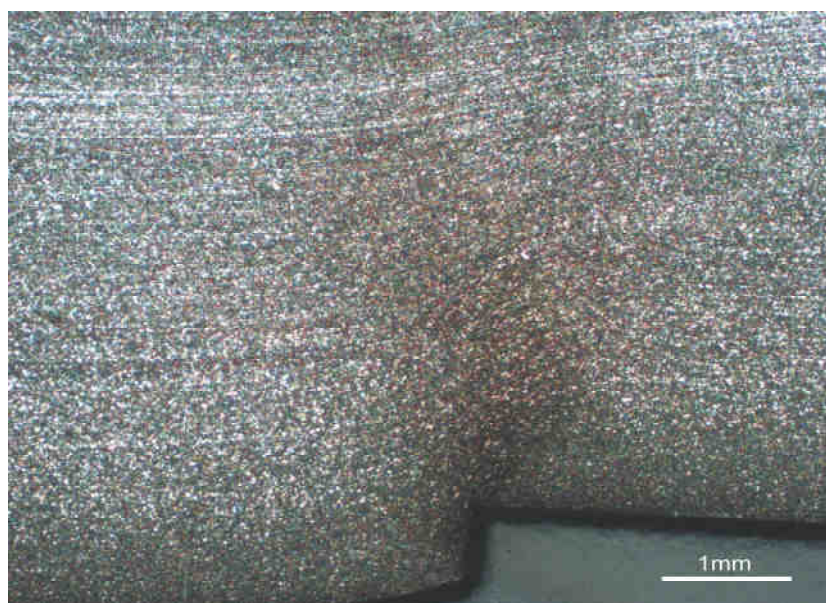
- [1] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 520s. DT 669.14; 621.77(075.8)
- [2] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225s. ISBN 80-214-2374-9
- [3] ŽÍDEK, M. *Metalurgická tvařitelnost oceli za tepla a za studena*. 1. vyd. Praha: Aleko, 1995, 356s. ISBN 80-85341-45-X
- [4] PETRUŽELKA, J., SONNEK, P. *Tvařitelnost kovových materiálů* [online]. 2006, poslední revize 9.1.2007. Dostupné z: < <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TvCELEupr.pdf> >
- [5] PEJČOCH, O., ŽÍDEK, M. Vliv doprovodných prvků a technologických přísad na tvařitelnost ocelí za tepla. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě*. VŠB v Ostravě. Ostrava: 1979, článek 840
- [6] ŽÍDEK, M., PEJČOCH, O. Vliv základních a legujících prvků na tvařitelnost ocelí za tepla. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě*. VŠB v Ostravě. Ostrava: 1979, článek 839
- [7] PLUHAŘ, J., PUŠKÁR, A., KOUTSKÝ, J. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 420s. DT 669.017(075.8)
- [8] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516s. ISBN 80-7204-283-1
- [9] MOHYLA, M. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. 1.vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1992, 268s. ISBN 80-7078-138-6
- [10] MITURA, K., LANDOVÁ, S. *Vměstky v oceli a jejich vliv na užité vlastnosti oceli*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 158s. DT 669.14 : [621.746.019: 620.192.45]
- [11] VALENTA, D. Stříhání ocelových profilů za studena. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě*. VŠB v Ostravě. Ostrava: 1974, článek 81
- [12] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 2.vyd. Brno: Nakladatelství PC-DIR Real, 1999, 169s. ISBN 80-214-1481-2

- [13] PETRUŽELKA, J. *Úvod do tváření II.* [online]. 2001, Dostupné z: < http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/Texty/Uvod_TV2.pdf >
- [14] MIELNIK, E. H., *Metalworking science and engineering.* 2.vyd. New York: McGraw-Hill, 1991, 976s. ISBN 0-07-041904-3
- [15] Technická univerzita Liberec. Technologie II.[online]. [cit. 2009-03-17]. Dostupné z: < http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm >
- [16] BEHRENS, B.A., SCHAEFER, E.F., KAMP, M. *Oscillation overlaid shearing of sheet* [online]. 2007, vol.1, no.1 [cit. 2009-3-20],s.19-24. Dostupné z: <<http://springerlink.com/content/8l22757535347518/?p=5a6af04bf6494371a4e0278f9bec8604&pi=0>>
- [17] HŮLKA, J. *Aplikace modelů tvárného porušování při výpočtové simulaci technologických operací.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 84s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

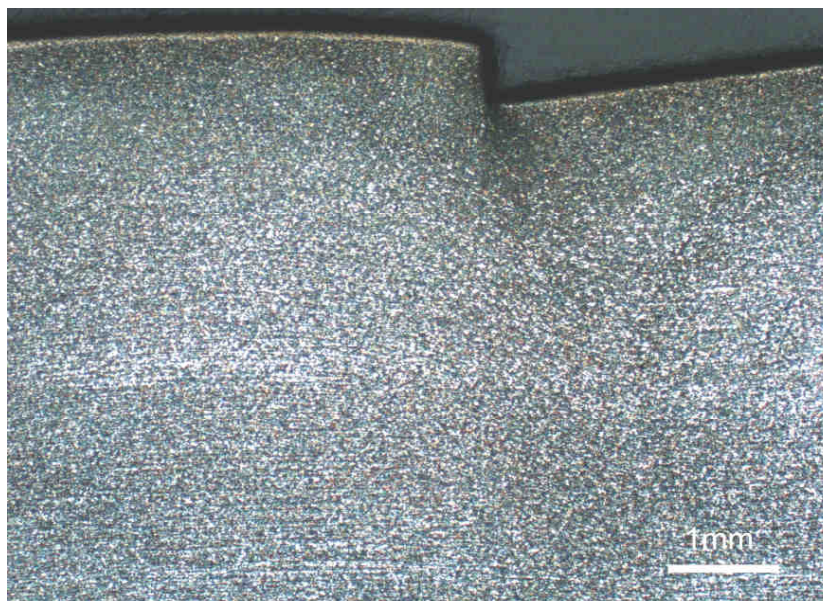
PŘÍLOHY



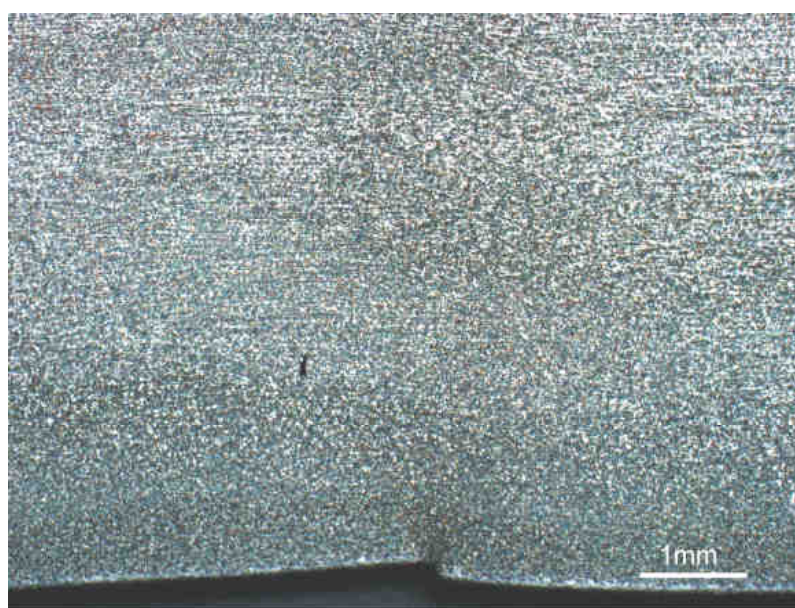
P.1 Makrostruktura vzorku 1, Nital



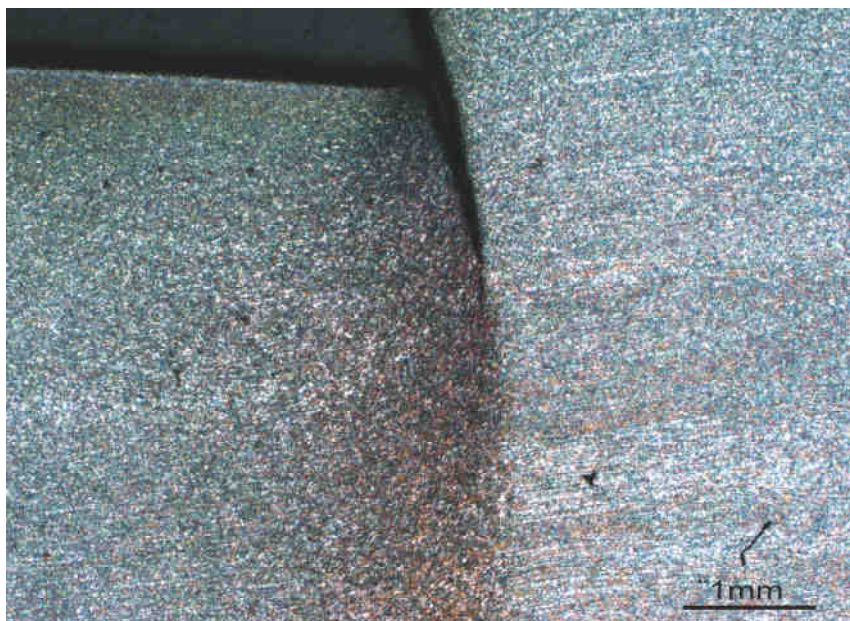
P.2 Makrostruktura vzorku 1, Nital



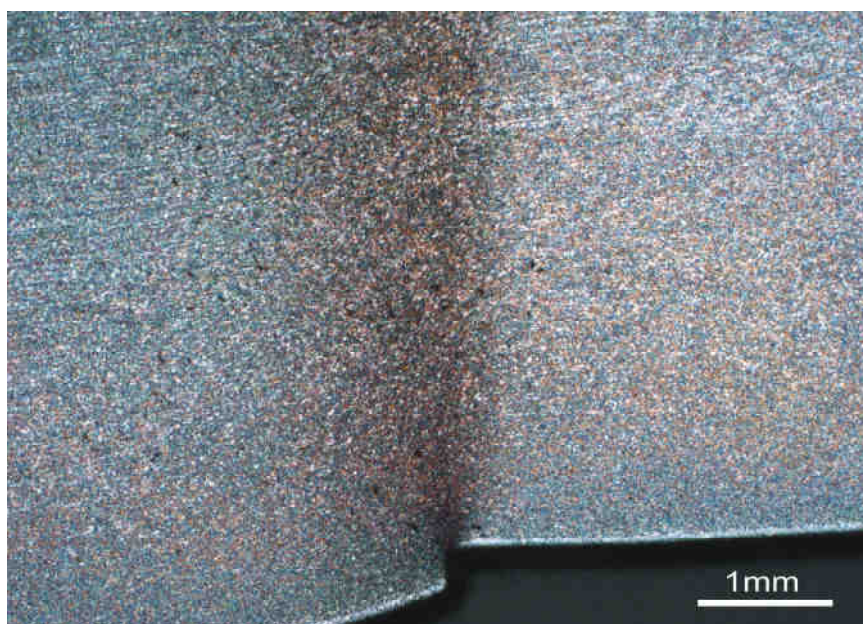
P.3 Makrostruktura vzorku 2, Nital



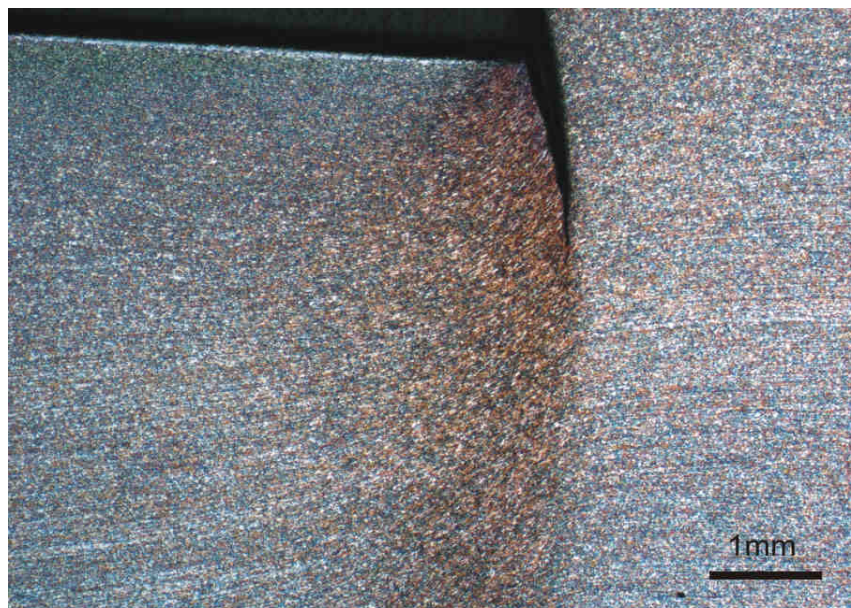
P.4 Makrostruktura vzorku 2, Nital



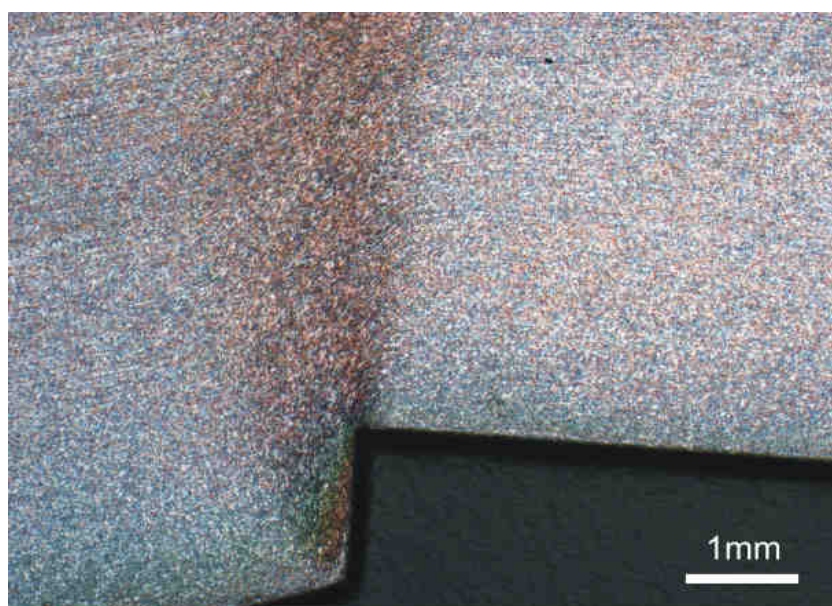
P.5 Makrostruktura vzorku 3, Nital



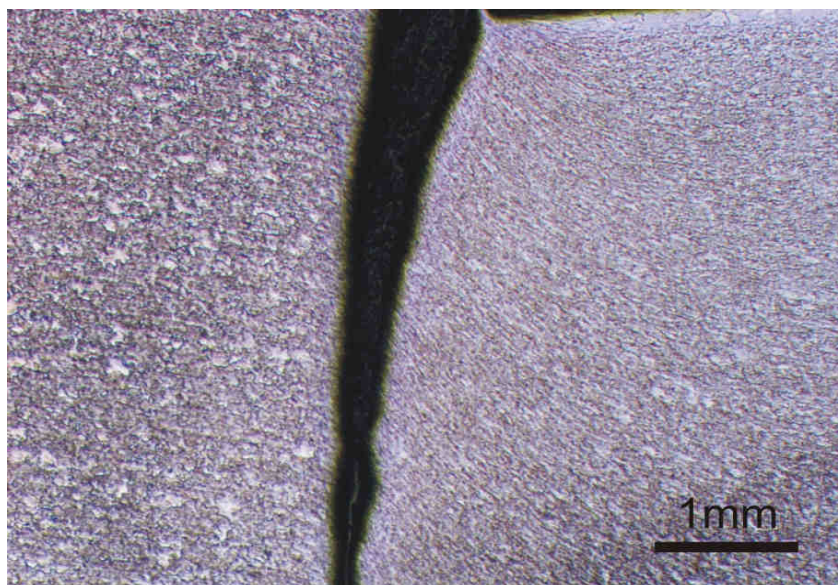
P.6 Makrostruktura vzorku 3, Nital



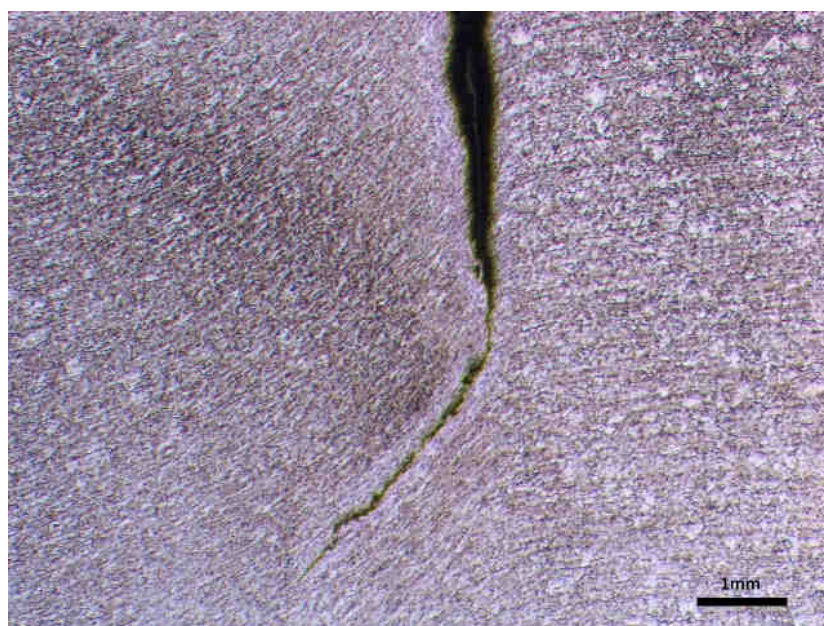
P.7 Makrostruktura vzorku 4, Nital



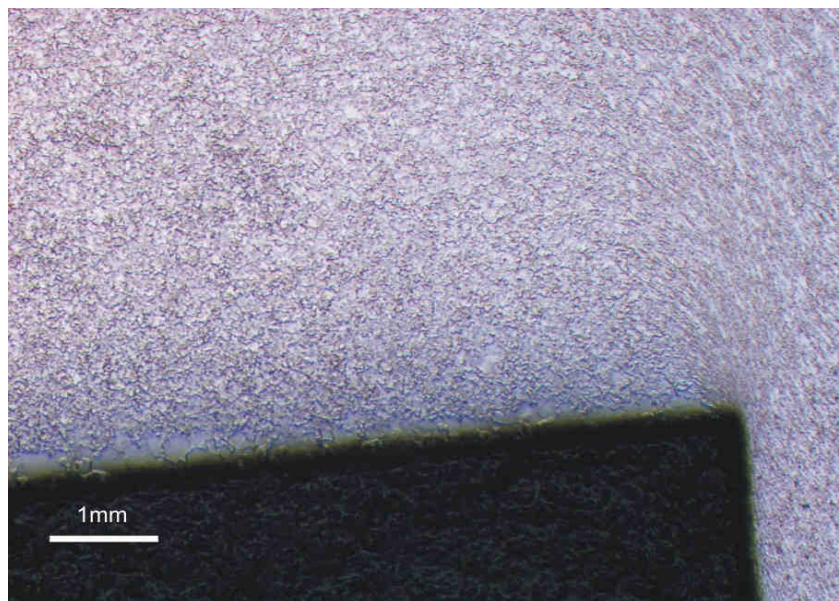
P.8 Makrostruktura vzorku 4, Nital



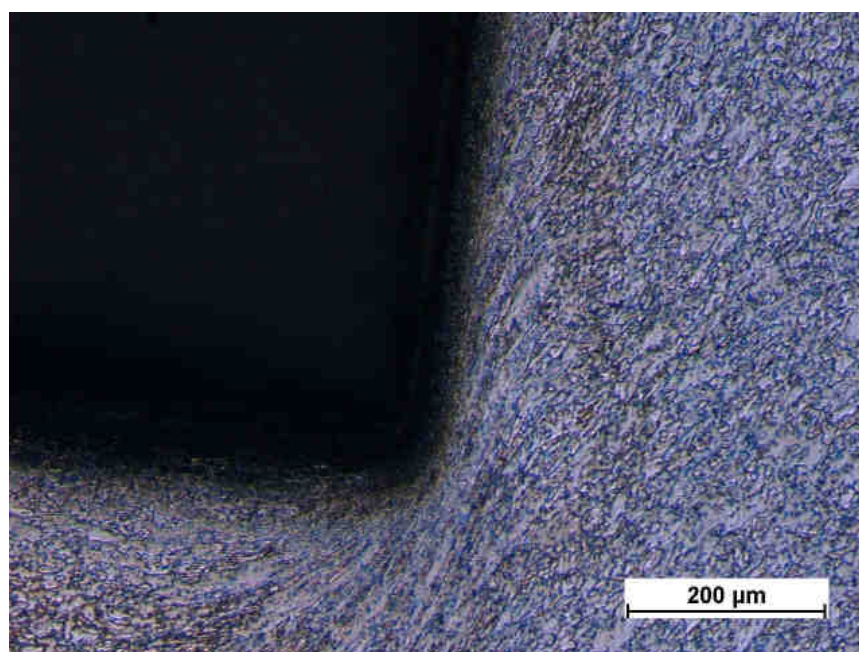
P.9 Makrostruktura vzorku 5, Nital



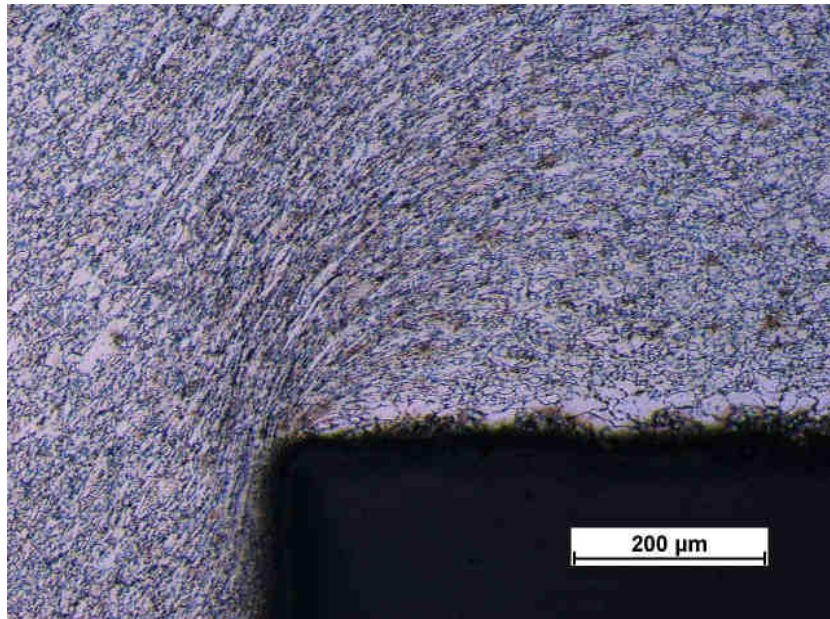
P.10 Makrostruktura vzorku 5



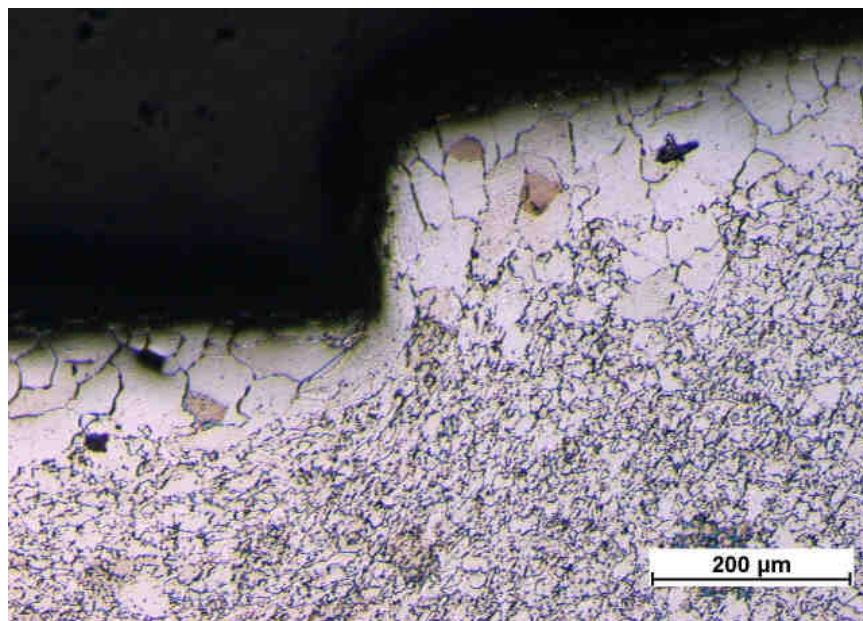
P.11 Makrostruktura vzorku 5, Nital



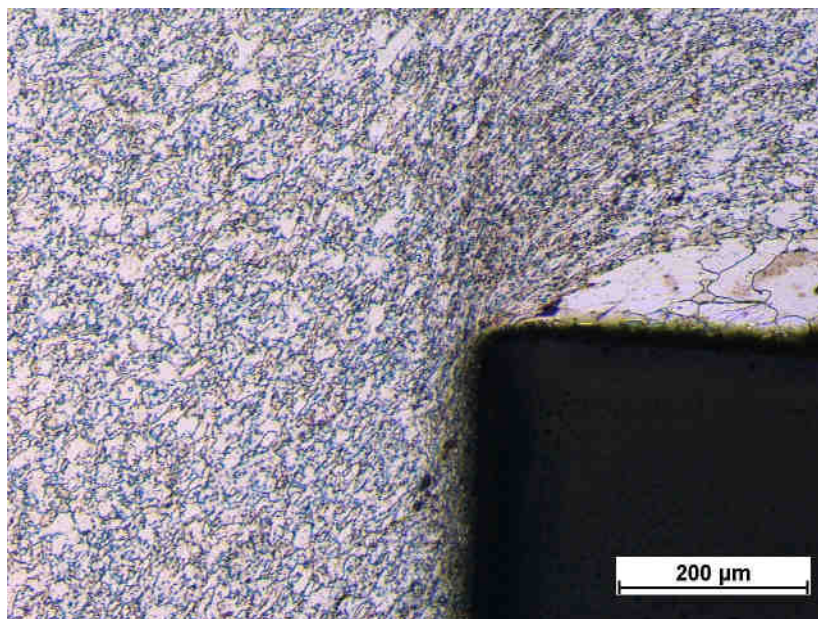
P.12 Mikrostruktura vzorku 1, Nital



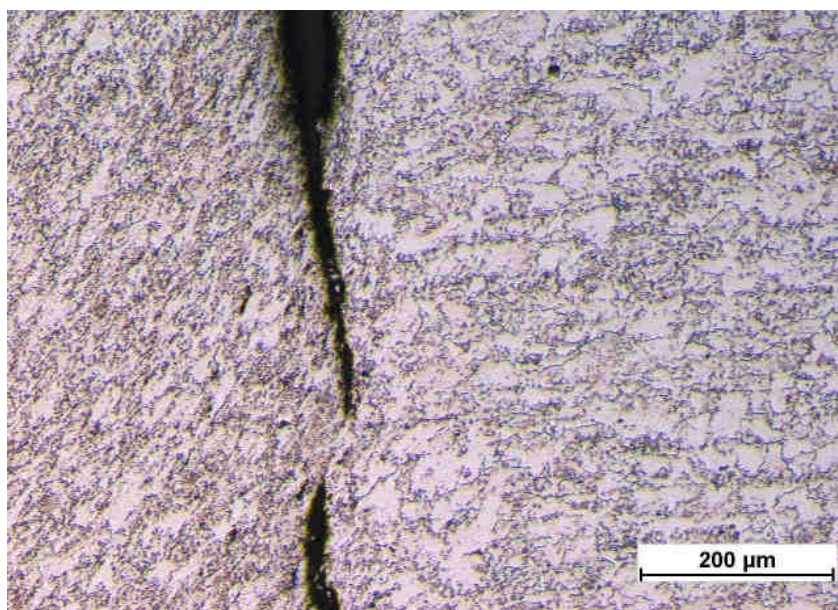
P.13 Mikrostruktura vzorku 1, Nital



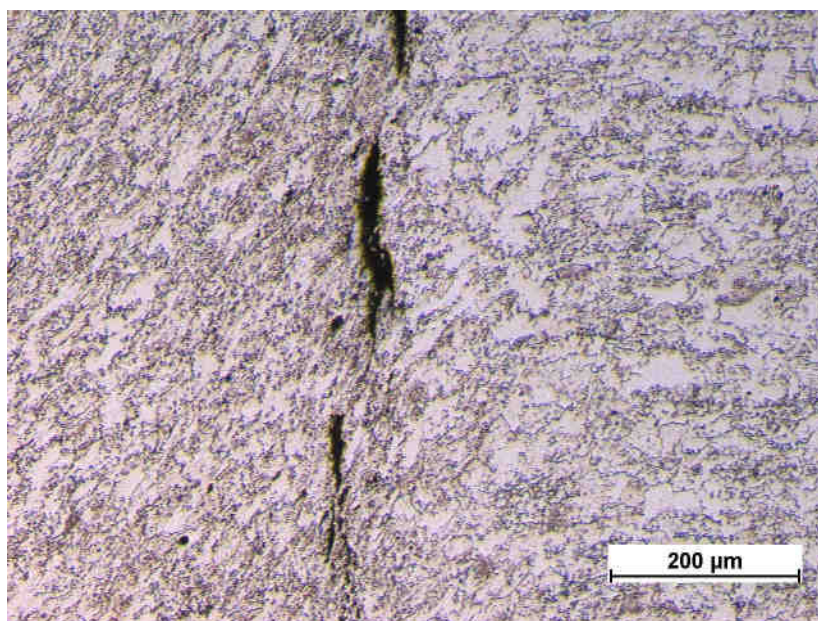
P.14 Mikrostruktura vzorku 2, Nital



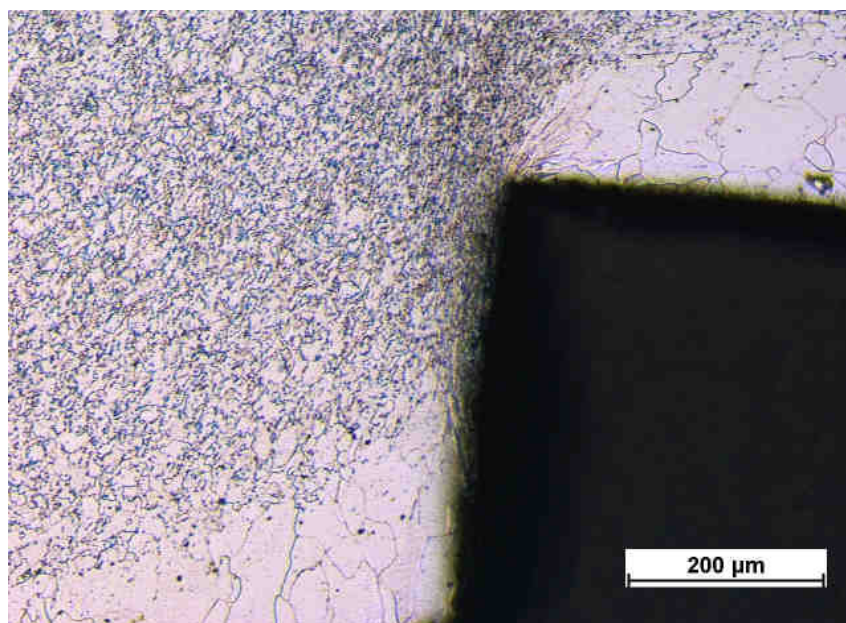
P.15 Mikrostruktura vzorku 2, Nital



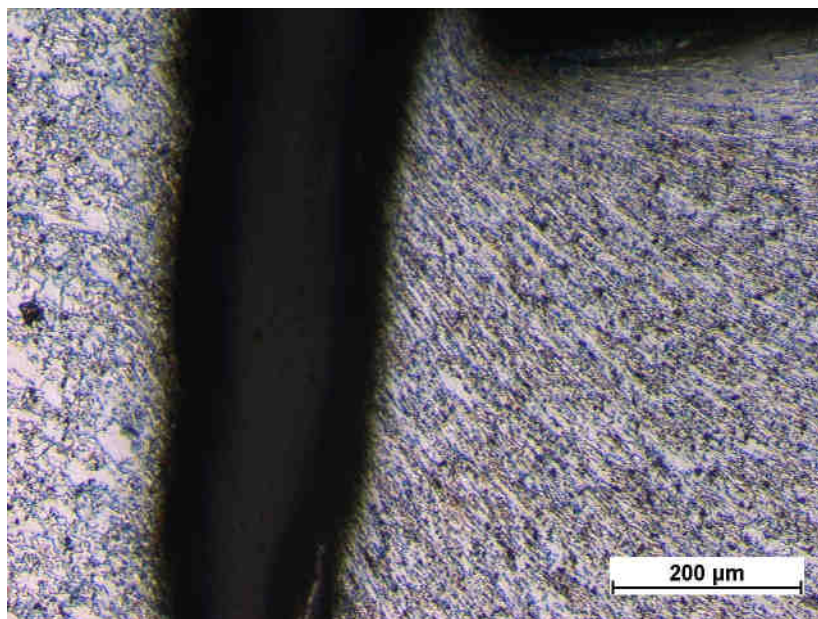
P.16 Mikrostruktura vzorku 3, Nital



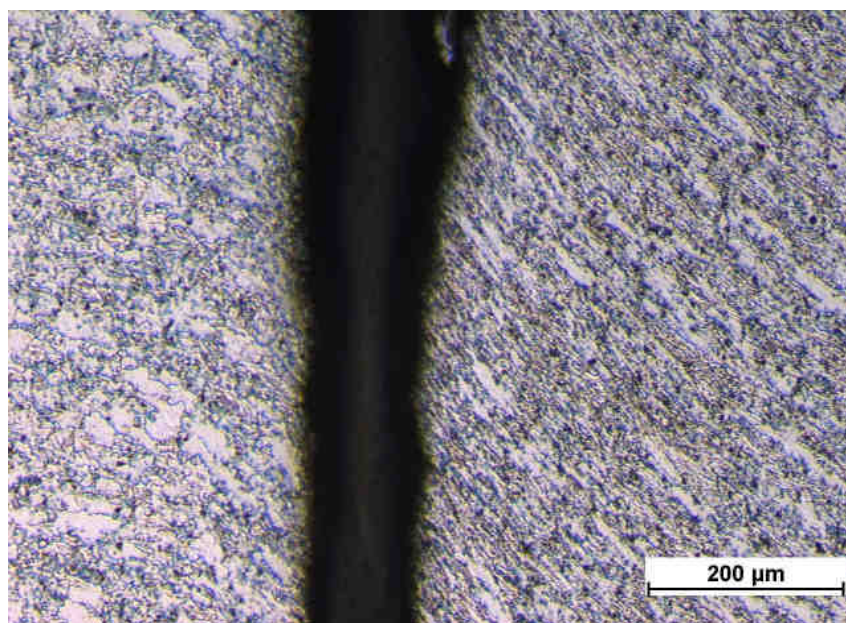
P.17 Mikrostruktura vzorku 3, Nital



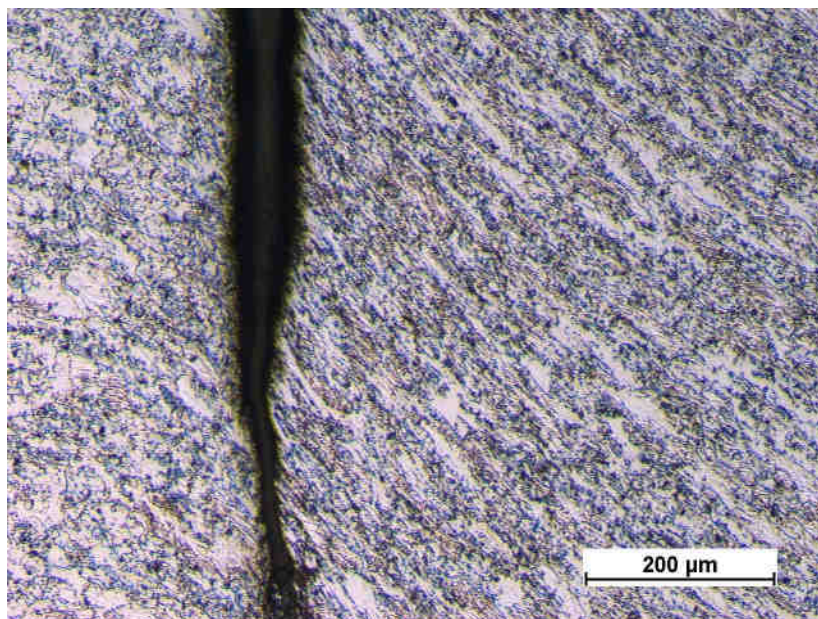
P.18 Mikrostruktura vzorku 3, Nital



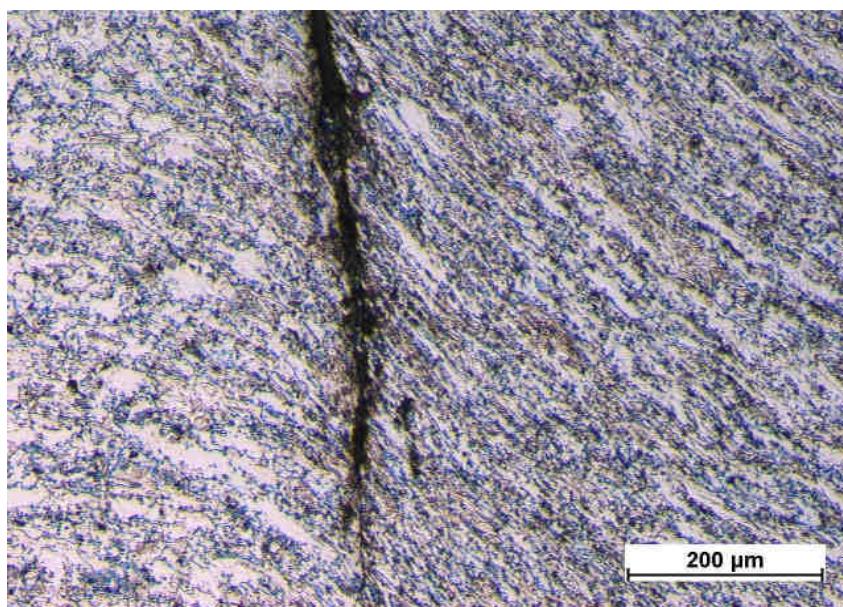
P.19 Mikrostruktura vzorku 4, Nital



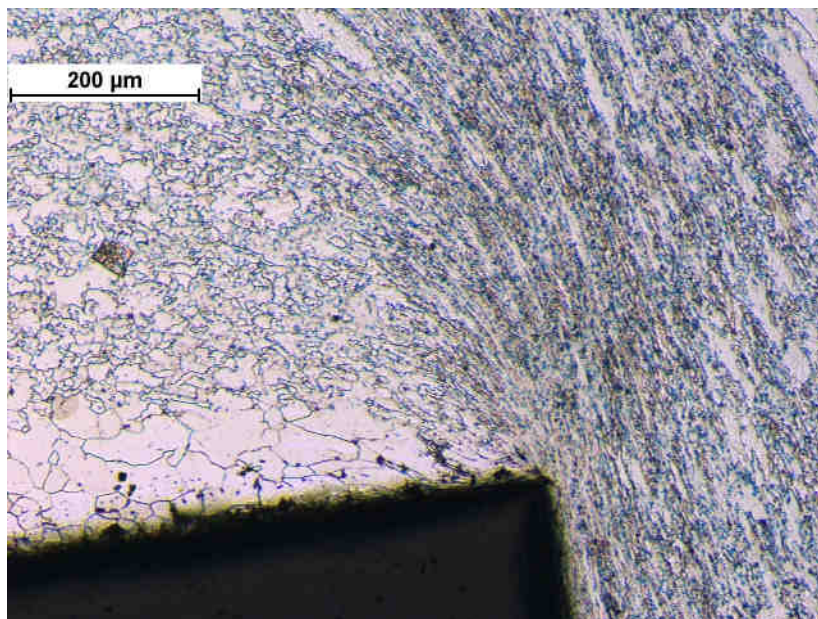
P.20 Mikrostruktura vzorku 4, Nital



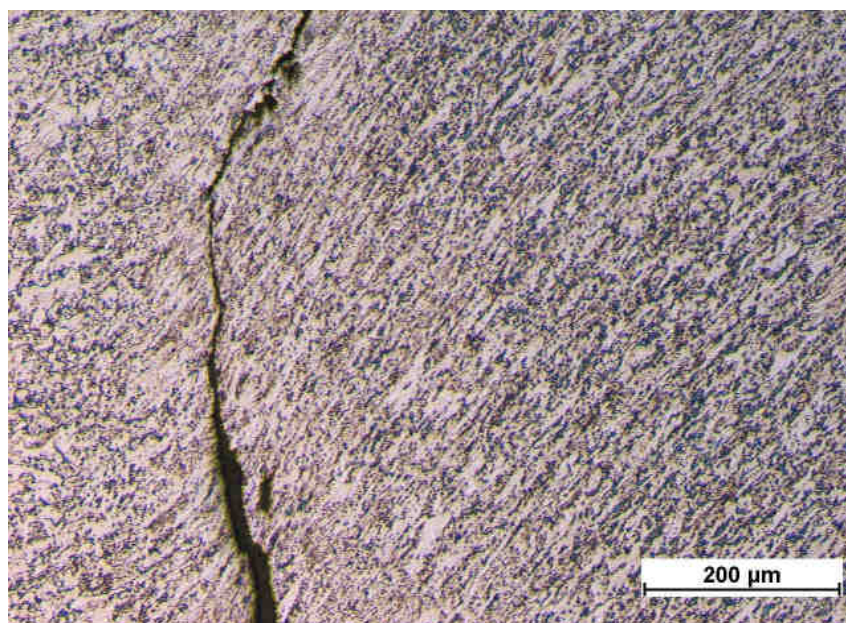
P.21 Mikrostruktura vzorku 4, Nital



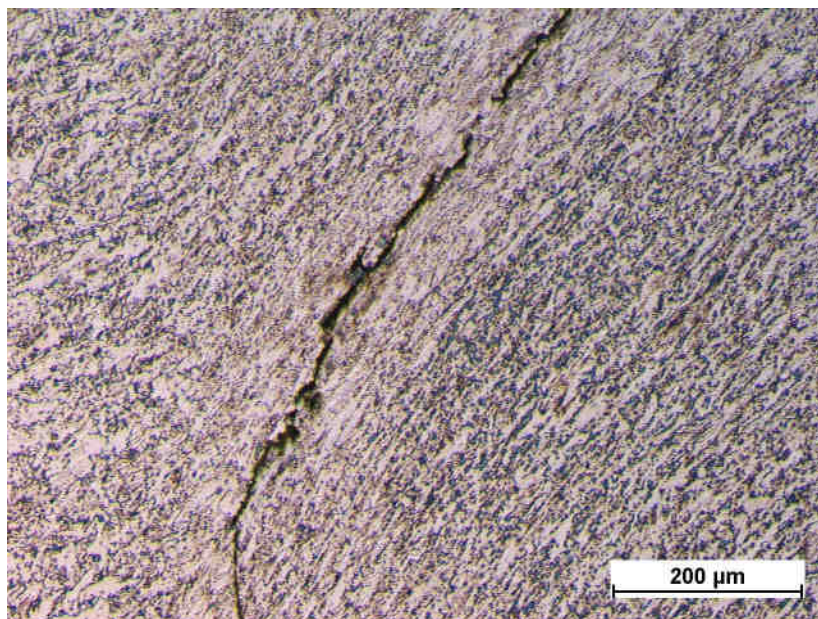
P.22 Mikrostruktura vzorku 4, Nital



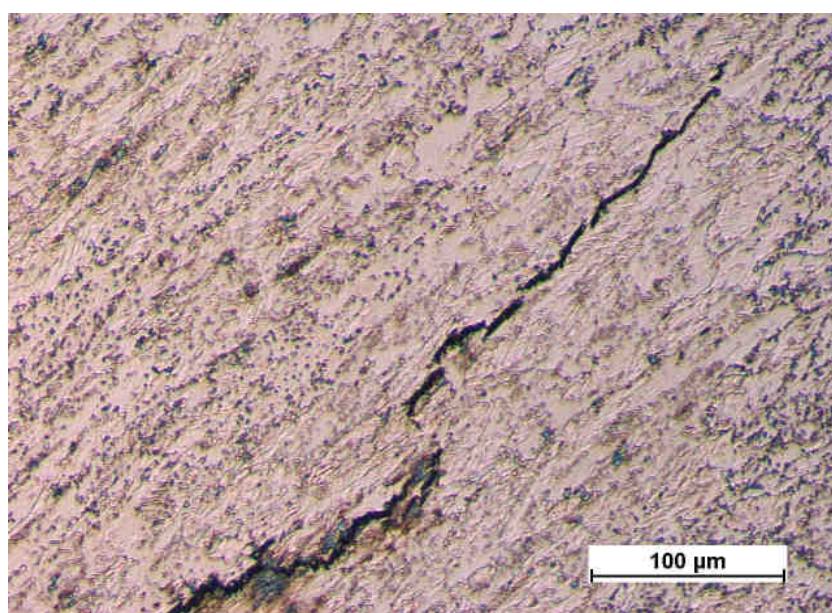
P.23 Mikrostruktura vzorku 4, Nital



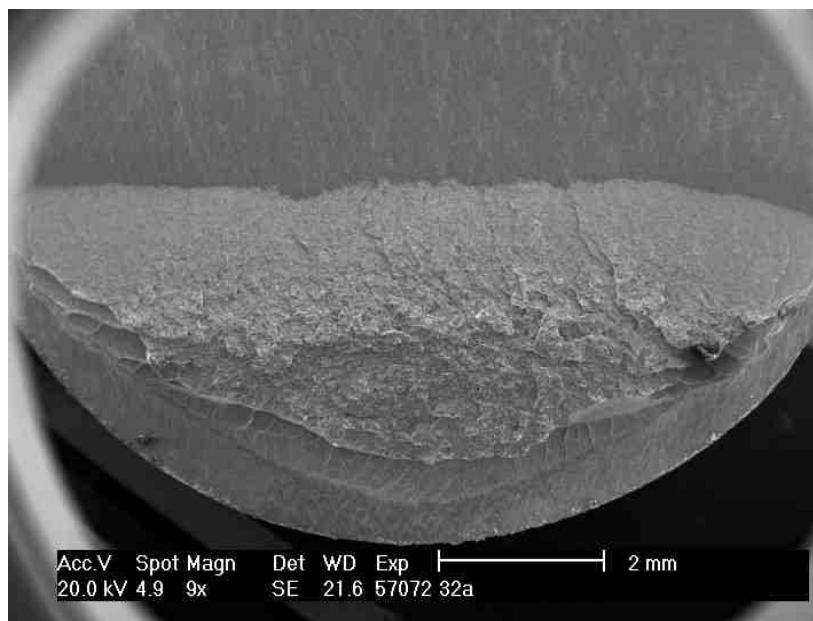
P.24 Mikrostruktura vzorku 5, Nital



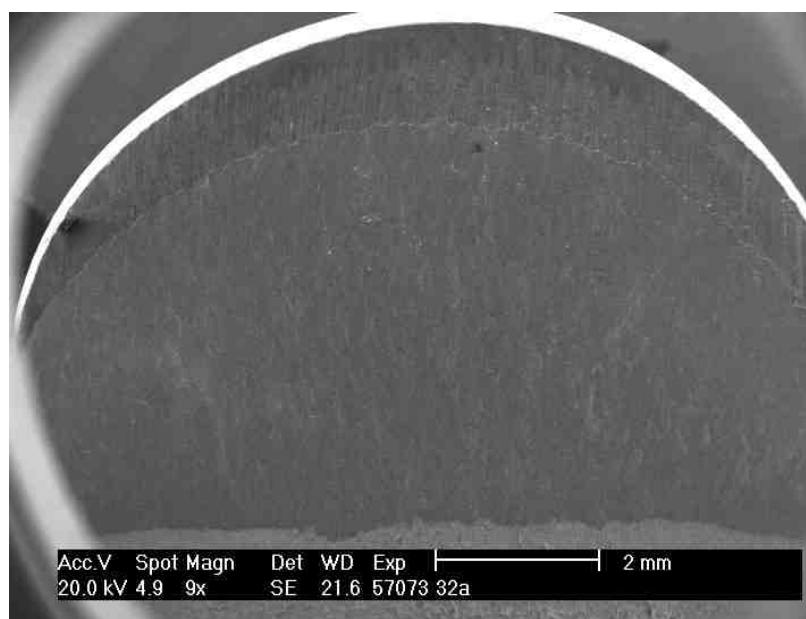
P.25 Mikrostruktura vzorku 5, Nital



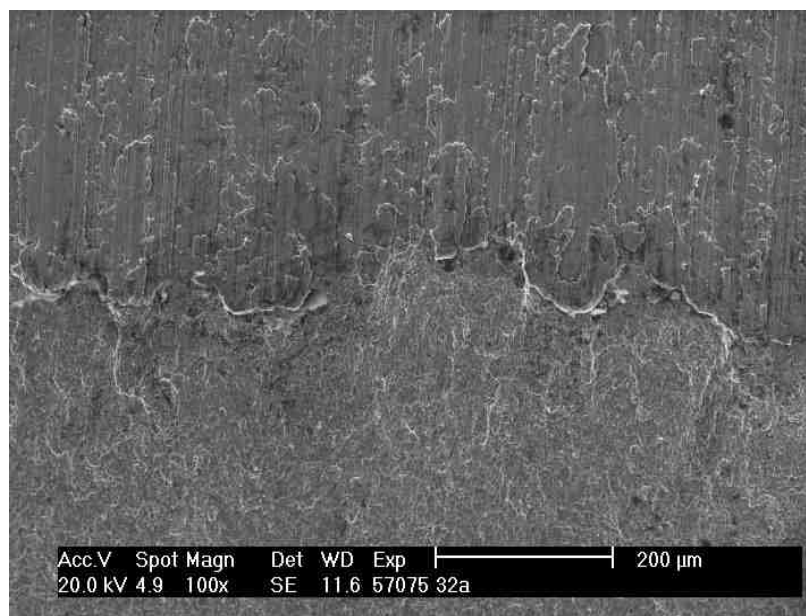
P.26 Mikrostruktura vzorku 5, Nital



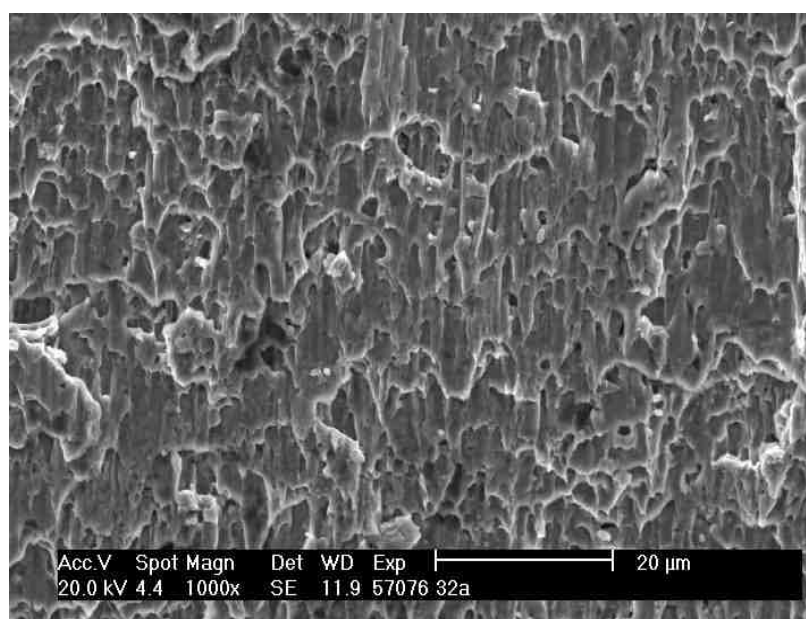
P.27 Lomová plocha, vzorek 32



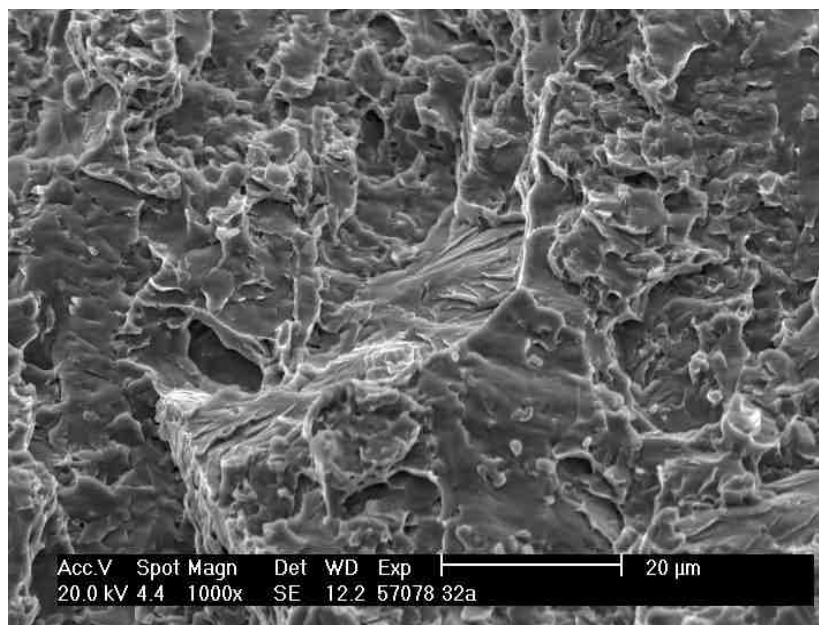
P.28 Lomová plocha, vzorek 32



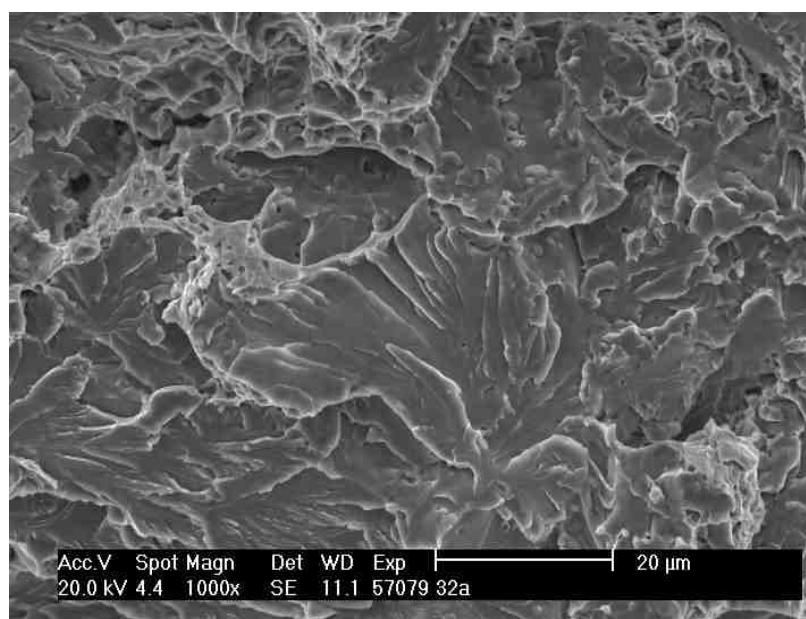
P.29 Oblast přechodu mezi poškozenou a lomovou plochou, vzorek 32



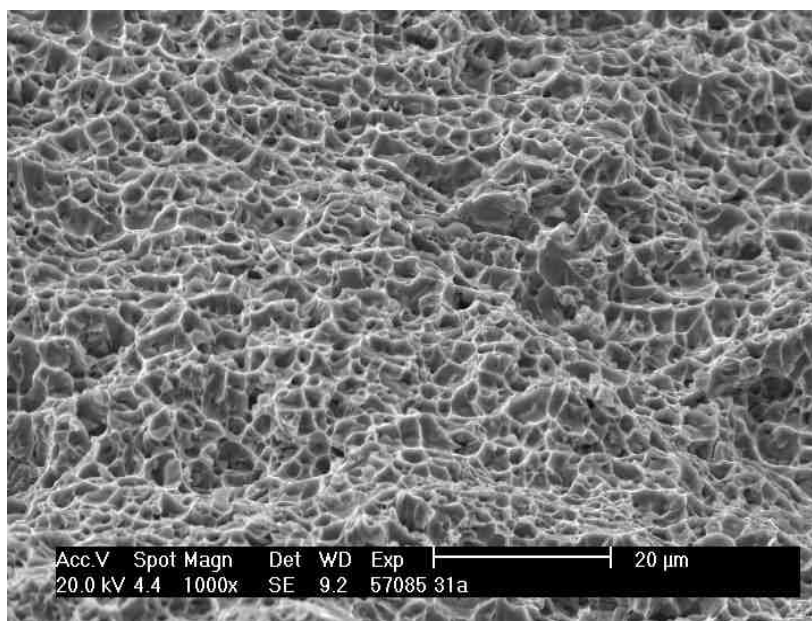
P.30 Usměrněné tvárné porušení, vzorek 32



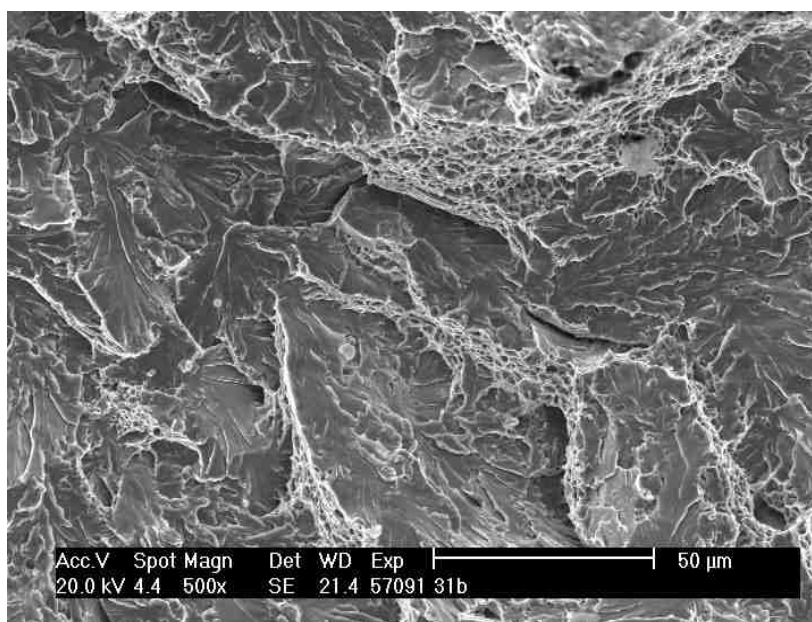
P.31 Kombinace tvárného a štěpného porušení, vzorek 32



P.32 Transkrystalické kvazištěpení, vzorek 32



P.33 Tvárné porušení, vzorek 31



P.34 Štěpné porušení, vzorek 31