

## Keltské nástroje k obrábění dřeva a jejich surovinová základna

Vít Jan, Vladimír Ustohal, Karel Stránský

Cílem analýz nástrojů, zbytků rudy a železářské strusky pocházejících z archeologických nálezů na lokalitě keltského oppida na Starém Hradisku bylo stanovení druhu použitého materiálu pro výrobu jednotlivých nástrojů, kvality jejich řemeslného vyhotovení, existenci a způsob tepelného zpracování pracovních částí předmětů, jejich tvrdosti. Předmětem zkoumání bylo také určení funkce, ke které byly jednotlivé předměty určeny a míry, se kterou mohly jednotlivé výrobky předpokládanou funkci plnit. Podmínkou omezující rozsah možných analýz nástrojů bylo minimální poškození původního vzhledu, tvaru a rozměrů těchto předmětů.

### Surovinová základna a železářské strusky

K analýze strusky a železné rudy, které byly nalezeny na lokalitě Staré Hradisko, byl použit analytický komplex JEOL JXA 8600/KEVEX Delta V. Pracovalo se v módu energiově disperzní mikroanalýzy, s urychlovacím napětím elektronového paprsku 15 kV, s dobou načítání rentgenových spekter 100 s a ke kvantitativnímu zpracování byl aplikován systém korekcí ZAF, který zahrnuje korekce na atomové číslo, absorpci a fluorescenční zesílení.

Vzorek k přípravě metalografického výbrusu a k chemické a mineralogické analýze strusky byl odebrán ze slitku strusky o přibližné velikosti mužské pěsti. Chemická analýza železářské strusky ukázala (tab.I), že struska má velmi nízkou koncentraci síry, nízký obsah fosforu a vysokou koncentraci oxidů železa. Její mineralogické složení svědčí o krystalické (nikoli amorfní) hmotě a struska obsahuje fáze charakterisované podle mikroanalýzy jako wüstit, fayalit a sklo, přičemž poslední fáze zaujímá nejmenší objemový podíl. Struska neobsahovala na řezu granule kovového (metalického) železa.

Vzorek k přípravě metalografického výbrusu železné rudy byl odebrán z kusu o velikosti menší mužské pěsti, a to tak, aby byla zachycena jak okrajová, zčásti již zvětřalá část suroviny, tak vnitřní, její poměrně homogenní oblast. Rovněž mikroanalýza proběhla jak na okrajové části rudy s velkým podílem hlusiny, tak na vnitřní části vzorku, který má velmi kompaktní konzistenci, krystalografickou strukturu a homogenní mineralogickou strukturu. Vnitřní, mineralogicky homogenní část rudy má po vyleštění modročerný lesk a představuje velmi čistý magnetit (tab.II), s nevelkým podílem oxidu křemičitého (6 hm.%) a hlinitého (1 hm.%). Okrajová část rudy má po vyleštění matnou strukturu načervenalého zbarvení a je pravděpodobně tvořena směsí hematitu, magnetitu, křemene a snad i dalších minerálů (korundu), jejichž chemické ani fázové složení nebylo blíže analyzováno.

Je pozoruhodné, že ruda obsahuje kolem 0,59 až 0,69 hm.% oxidu fosforečného (0,26 až 0,27 fosforu), zatímco v železné strusce z téže lokality je průměrná koncentrace pouze 0,52 až 0,58 hm.% oxidu fosforečného (0,23 až 0,26 hm.% P). Předpokládáme-li, že ruda obdobného složení byla technologicky zpracovávána v místní železářské huti (dílňě) v redukční peci, pak v prvním přiblížení lze soudit, že větší část oxidu fosforečného byla redukována, přešla do vyredukovaného železa a pouze menší část fosforu se rozdělila do strusky.

Mineralogickou strukturu strusky (obr. 1) tvoří kostrově uspořádané krystality wüstitu, jehož chemické složení je uvedeno v tab.I ve sloupci wüstit<sub>2</sub>. Zde je třeba poznamenat, že wüstit, chemicky oxid železnatý FeO, vznikající za vysokých teplot (jeho teplota tavení je 1370 °C), je pod teplotou 570 °C metastabilní a přechází v oxid železnato-železitý Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, který je krystalograficky totožný s magnetitem. Další mineralogickou složkou analyzované strusky je fayalit, který tvoří ve struktuře krystality nepravidelného tvaru. Chemicky se fayalit přibližuje stechiometrickému vzorci Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> a jeho teplota tavení se podle chemického složení pohybuje kolem 1200 °C. Chemické složení fayalitu je uvedeno v tab.I ve sloupci fayalit<sub>2</sub>. Třetí mineralogickou složkou strusky ze Starého Hradiska je sklovitá, převážně amorfní složka s nejnižší teplotou tavení, která chemicky představuje hlinito - vápenato - železité sklo, s obsahem kolem 40 hm.% oxidu křemičitého (tab.I, sloupec - sklo<sub>2</sub>).

Podle rozměru a způsobu vyloučení jednotlivých fází a složek této železářské strusky a podle analogie se struskami obdobného složení, lze soudit, že struska byla z teploty tavení ochlazována nepříliš

vysokou rychlostí, pravděpodobně v peci, popřípadě samovolně v písku. Ochlazování ve vodě lze s vysokou pravděpodobností vyloučit.

V homogenní středové části železné rudy, jejíž chemické složení je uvedeno v tab.II ve sloupci označeném homogenní ruda (střed), převažuje ve struktuře magnetit (91 hm.%) a zbytek tvoří nejspíše křemičitan hlinitý a křemen. Ve vzorku označeném nehomogenní ruda (okraj, obr. 2) dominuje ve struktuře křemičitan hlinitý a křemen a zbytek tvoří nejspíše směs magnetitu a hematitu. Chemická analýza jednotlivých složek železné rudy nebyla aplikována. K přesné identifikaci složek a fází by významně přispěla rtg. difrakční fázová analýza. Přehled železnorudných dolů na Moravě sestavil Kruťa [1]. Nejbližší k Starému Hradisku u Prostějova patrně patřila z dolů na železnou rudu na Dražanské vrchovině Stínava u Plumlova u Prostějova, kde je uváděno sedimentární ložisko železných rud silurského stáří, obsahující magnetit, limonit a hematit.

Z analýz železné rudy nalezené na Starém Hradisku plyne, že keltští hutníci zpracovávali velmi jakostní surovinu, s dominantním podílem železa a s nevelkou příměsí fosforu i síry (tab.II). Struska z téhož naleziště charakterisuje redukční proces při kterém se většina fosforu rozděluje do vyredukovaného železa a menší podíl do strusky. Struska se přitom obohacuje o prakticky neredukovatelné oxidy křemíku a hliníku. Plyne to z porovnání koncentrace obou zmíněných oxidů ve výchozí rudné surovině a ve strusce (tab.II a I). Zvýšení koncentrace oxidů křemíku a hliníku ve strusce vzhledem k jejich původní koncentraci v železné rudě je přitom přibližně trojnásobné. Naproti tomu koncentrace oxidu fosforečného ve strusce je na úrovni jeho koncentrace ve výchozí surovině, tj. v železné rudě (dokonce poněkud nižší - tab.I a II).

Pokud by nedocházelo během redukčního procesu v peci k částečné redukci fosforu a k jeho přechodu do vyredukované železné houby, potom by musel být i fosfor, obdobně jako v tomtéž případě oxid křemičitý a oxid hlinitý, koncentrován ve strusce v podstatně větším množství. Je proto reálné a oprávněně předpokládat, jeho částečnou redukci z rudné vsázky a přechod do železné houby, kde bývá zpravidla rozpuštěn ve formě tuhého roztoku ve feritu.

Velmi dobrá jakost železnorudné suroviny, kterou keltští hutníci zpracovávali v redukčních pecích, byla také jednou ze záruk relativně jakostní železné houby a z ní vyrobených nástrojů k obrábění dřeva..

#### Literatura:

[1] KRUŤA, T.: Moravské nerosty a jejich literatura 1940 - 1965. Moravské museum v Brně, Brno 1966.

Tab. I Staré Hradisko. Složení hutnické železářské trusky [hm.%]

Složka	struska <sub>1</sub>	struska <sub>2</sub>	wüstit <sub>2</sub>	fayalit <sub>2</sub>	sklo <sub>2</sub>
Na <sub>2</sub> O	0,54	0,57	0,34	0,07	1,80
MgO	0,38	0,38	0,51	1,20	0,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,37	3,47	1,59	0,20	16,86
SiO <sub>2</sub>	20,21	20,50	0,44	30,49	39,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,58	0,52	0,13	0,55	2,22
(P)	0,26	0,23	0,06	0,24	0,97
S	0,06	0,09	0,09	0,16	0,26
K <sub>2</sub> O	0,90	0,97	0,06	0,08	4,18
CaO	4,04	4,00	0,10	2,03	14,74
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,08	0,19	0,08	0,019
MnO	0,08	0,09	0,20	0,06	0,06
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	69,75	69,33	96,33	65,08	19,45

Tab. II Staré Hradisko. Složení železné rudy [hm.%]

Složka	ruda mineralogicky homogenní (střed)	ruda mineralogicky nehomogenní (okraj)
Na <sub>2</sub> O	0,20	1,78
MgO	0,06	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,00	9,29
SiO <sub>2</sub>	5,94	56,85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,62	0,59
(P)	0,27	0,26
S	0,20	0,23
K <sub>2</sub> O	0,14	2,71
CaO	0,14	0,21
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,24
MnO	0,21	0,09
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	91,40	28,02

### Keltské nástroje pro obrábění dřeva

Obecně lze říci, že všechny keltské kovářské výrobky byly vyráběny ze svářkového železa s nízkým obsahem uhlíku. Toto železo bylo získáváno v malých hutnických pecích, kde byla železná ruda redukována při hoření dřevěného uhlí. Výsledkem tohoto hutnění byla železná houba, velmi nesourodý a porézní kus materiálu, který bylo nutno dále kovářsky zpracovat tak, aby se při kování odstraňovala struska a další nečistoty a vznikal použitelný materiál. Železo bylo zřejmě vykováváno do kusů plechu, které byly pak dále při paketování kovářsky svařovány a byl tak vyroben homogenní materiál, který mohl být i větší, než co mohla poskytnout jedna tavba v peci. Tento materiál je však stále nerovnoměrně znečištěn vměstky, stopami po kovářském svařování, jsou patrné nesvařené dutiny a povrchy spojovaných plechů. Jednotlivé oblasti těchto paketovaných polotovarů mají různý obsah uhlíku, tak jak byly různě nauhličený plechy, ze kterých byly svařeny.

Výsledkem tohoto zpracování železné houby bylo tzv. svářkové železo, které bylo ve formě hřiven, nebo jiných polotovarů dále zpracováváno. Je zde třeba uvést, že pojem železo a ocel nemají stejnou náplň v literatuře technické a historické, resp. archeologické. Z historické tradice vyplývá označení železo pro slitiny železa a uhlíku s malým obsahem uhlíku, které mají nižší pevnost a jsou vyráběny nanejvýš v těstovitěm stavu, takže výsledným produktem je železná houba, která vždy obsahuje zbytky strusky. Ocel, v historickém slova smyslu je označení pro materiál tvrdý, s vyšším obsahem uhlíku a s určitou zakalitelností. V archeometalurgickém pojetí je tedy pojem železo vyhrazen buďto chemickému prvku, při popisu reakcí, nebo slitině železa a uhlíku, kde obsah uhlíku nedovoloval zakalení, tedy asi do 0.25 %C. Oceli jsou pak nazývány ty materiály, které jsou zakalitelné.

Svářkové železo keltští kováři zpracovávali na nejrůznější výrobky. Často však bylo potřeba materiál tvrdší než samotné svářkové železo. Nauhličováním polotovarů, nebo hotových výrobků vyráběli keltští kováři ocel, jejíž obsah uhlíku kolísá v rozmezí asi 0.25-0.7 % C. Tato ocel, pokud obsahovala alespoň 0.25 % C byla zakalitelná, takže při rychlém ochlazení z kalících teplot získala strukturu, jejíž tvrdost několikanásobně převyšovala tvrdost nezakaleného materiálu. Zvýšenou křehkost zakalené struktury bylo možno potlačit popouštěním, které spočívá v dalším ohřevu, ovšem na podstatně nižší teplotu a následném ochlazení.

Nejpravděpodobnější variantou výroby ocele je patrně nauhličování malých kusů plechů v sybkém prostředí dřevěného uhlí v uzavřeném tyglíku, který byl umístěn do výhně. V tyglíku se vytvořila nauhličující atmosféra a uhlík difundoval do železných plechů, takže byly vytvořeny plechy ocelové. Z dnešního pohledu šlo tedy v podstatě o cementaci. Při výrobě oceli byly nauhličovány jen tenké železné plechy, které potom byly kovářsky svařovány. Při ohřevu pro kovářské svařování docházelo k difúzi uhlíku, a tím k částečnému vyrovnání jeho nehomogenního rozložení v profilu vyráběných kusů oceli.

Uvedená obtížná dostupnost oceli byla často nahrazována nauhličováním hotových výrobků, které bylo použito ke zvýšení kvality jejich pracovní části. Toto nauhličování se provádělo patrně jen zanořením čepele výrobku do rozžhaveného dřevěného uhlí s možnou příměsí organických (dusíkatých) látek, urychlujících difúzi uhlíku. Jinou možností, jak vyrobit např. nůž s tvrdým ostřím, aniž by musel celý být z

ocele, bylo použití ocelového plechu, který se kovářsky navařil na místo ostří. Vznikl tak nástroj s ocelovým tvrdým ostřím a tělem z měkkého houževnatého materiálu.

Stanovení použité výrobní technologie v případě keltských železných a ocelových výrobků je dosti problematické. Veškeré tehdejší znalosti byly čistě empirického rázu a i při znalosti jednotlivých technik nemusely být výsledky konstantní, již proto, že podmínky procesů byly regulovány jen odhadem a jejich přesnost a reprodukovatelnost závisela na zkušenostech kováře. V některých případech pak došlo k chybné volbě materiálu, na tvarově dokonalé, ale zato funkčně nevyhovující výrobky bylo někdy použito velmi měkkého feritického materiálu, přestože od měkkého železa bylo možno tvrdou ocel odlišit řadou jednoduchých zkoušek (pilníkem, zvukem, ohýbáním zkušební tyčinky, jiskrami při broušení), někdy je kovář snad opomněl provést. Existují i předměty, na kterých kovář jednoznačně zaměnil materiál železný za materiál ocelový a vyrobil tak např. nůž s tvrdým ocelovým tělem a železným, zcela měkkým ostřím.

Pro materiálové analýzy bylo třeba odebrat vzorky ze zkoumaných předmětů nařiznutím a dolomením předmětu na vhodném místě. Při výběru místa pro odběr vzorků bylo nutno brát ohled na požadavek archeologů na minimální poškození předmětu a na možnost domodelování předmětů, po odběru vzorků, do původního tvaru. Stejně důležitým kritériem při výběru vzorků byla také možnost porovnání vlastností materiálu pracovních částí nástrojů (ostří) a ostatních částí nástrojů.

Byla provedena mikrofraktografická analýza lomových povrchů vzorků, metalografická analýza vzorků, byla posouzena velikost zrna, strukturní složení zkoumaného materiálu, mikrotvrdost jednotlivých struktur a v některých případech jejich chemické složení. Přibližné střední obsahy uhlíku byly stanoveny odhadem dle poměrného zastoupení koexistujících strukturních složek, popřípadě přibližným odhadem dle dosažené tvrdosti.

V případě konkrétních materiálových analýz nástrojů pro obrábění dřeva, byla u dláta s tulejí potvrzena technologie výroby polotovaru paketačním – prokazatelně byly svařovány dva různé materiály. Jedním z těchto materiálů je uhlíková ocel, v níž je odhadem podle zastoupení strukturních složek asi 0.6% C, druhým je naopak materiál s nízkým obsahem uhlíku – asi 0,2% (obr. 3). Uhlíková ocel, která tvoří část tuleje je materiálem jednoznačně zakalitelným, žádný pokus o zlepšení mechanických vlastností tepelným zpracováním však nebyl učiněn, materiál je ve stavu, který odpovídá žihání, resp. volnému ochlazení po dokování. Jsou zřetelně patrné nezkované dutiny a oblast spojení obou materiálů.

Na fotografii vzorku odebraného z ostří stejného nástroje, tedy z pracovní části nástroje je patrná struktura tvořená pouze feritickými zrny znečištěnými vměstky. Z této struktury je patrné, že na ostří nástroje byl použit velmi měkký materiál obsahující asi 0.1% C (obr. 4). Takový materiál je zcela nezakalitelný a dláto se jistě při používání rychle utupilo. I v tomto materiálu jsou patrné nezkované dutiny, některé již napadené korozi. Není žádná známka pokusu o nauhličení ostří.

Důvod, proč je tulej dláta tvořena podstatně kvalitnějším materiálem, než vlastní ostří nástroje může být například záměna obou konců polotovaru při výrobě. Je ovšem možné že v tomto konkrétním případě kovář vyrobil polotovar pro dláto ze zbytků různých materiálů a rozložení uhlíku v profilu nástroje je tak zcela náhodné.

U dalšího dláta s tulejí byla prokázána technologie nauhličování již hotových výrobků spojená s následným zakalením. Takže vznikl předmět, který měl velmi tvrdou povrchovou vrstvu, a měkké, ale houževnaté jádro. V zásadě zcela stejné zpracování se dnes používá např. při výrobě ozubených kol.

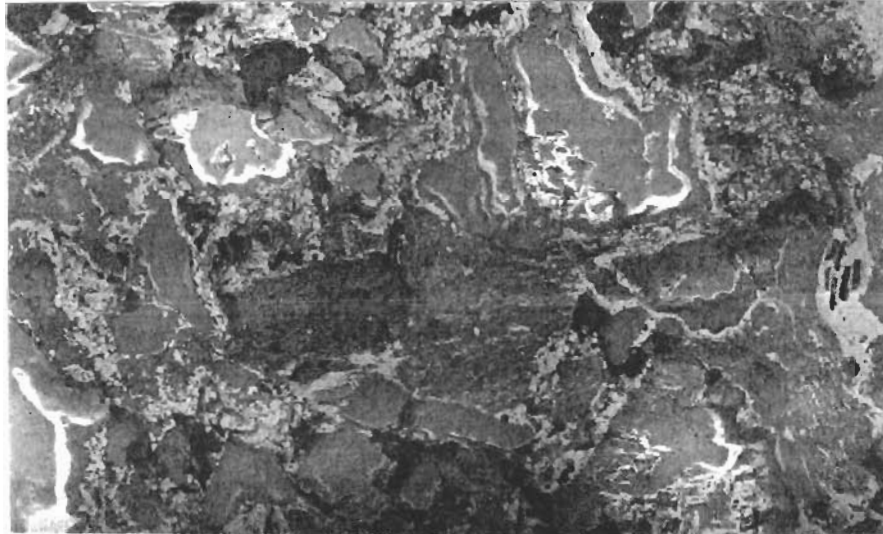
Jak je vidět na fotografiích struktury materiálu, bylo zde použito opět nehomogenního polotovaru. Základní materiál ostří je železo s 0.1% C, zatímco tulej je tvořena ocelí s 0.3% C. V tomto případě však bylo úspěšně provedeno nauhličení povrchu ostří a následné zakalení, takže vznikla struktura tvořená na povrchu tmavými zakalenými zrny martenzitu, která plynule přechází do světlých zrn feritických (obr. 5). Tímto způsobem byl vyroben zřejmě velmi kvalitní nástroj. Jak je patrné z obou fotografií, došlo zřejmě při ohřevu při cementaci k nárůstu zrna materiálu v tuleji dláta (obr. 6). Při zakalení čepele došlo také k rychlejšímu ochlazení tuleje a tím ke vzniku feritických zrn, které mají widmanstättenovu morfologii a projevují se jako jehlice mířící přímo do velkých zrn perlitu.

Jiný případ nauhličení povrchu nástroje je vidět na fotografii struktury vzorku z ostří sekery. Je vidět pásmo se zvýšeným obsahem uhlíku (až 0.5% C) a základní materiál s nízkým obsahem uhlíku asi 0.15% C (obr. 7). V tomto případě nebylo aplikováno kalení nauhličené vrstvy, takže nebyla dosažena maximální tvrdost povrchu. Je opět patrný velký podíl nezkovaných dutin a nečistot v materiálu.

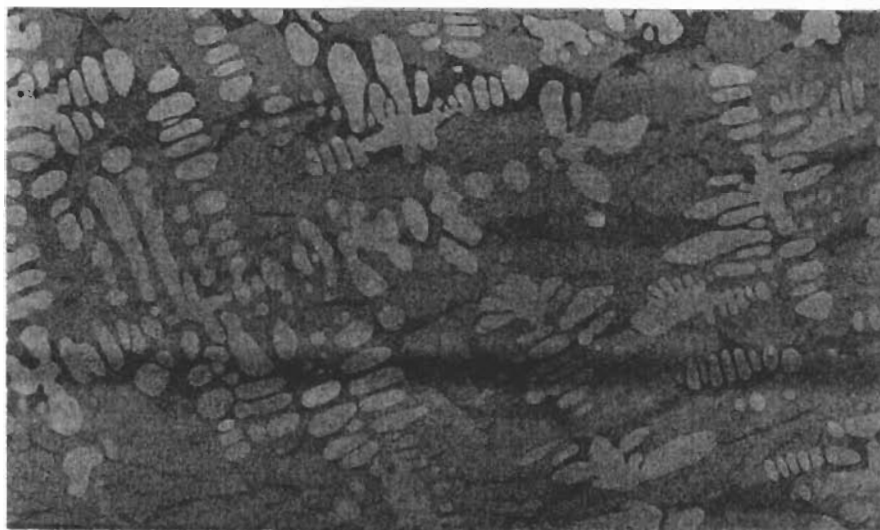
Z provedených analýz nástrojů nalezených na Starém Hradisku je zřejmé, že keltští kováři záměrně požívali materiály s vyšším obsahem uhlíku a tím i s vyššími mechanickými vlastnostmi pro exponované části nástrojů, i když jsou případy, kdy se této zásady nedrželi. Keltským kovářům byla známá technolo-

gie nauhličování materiálu, kterou používali pro výrobu oceli a pro cementaci povrchu nástrojů. Na více předmětech bylo zjištěno úspěšně provedené zakalení.

Ačkoliv je kvalita analyzovaných nástrojů z dnešního hlediska často velmi špatná, při vědomí technických možností keltských kovářů a jejich znalostí získaných dlouhodobými pokusy je naopak tvarová dokonalost a kvalita některých nástrojů překvapivá a dává tak obraz o řemeslných kvalitách keltských kovářů.



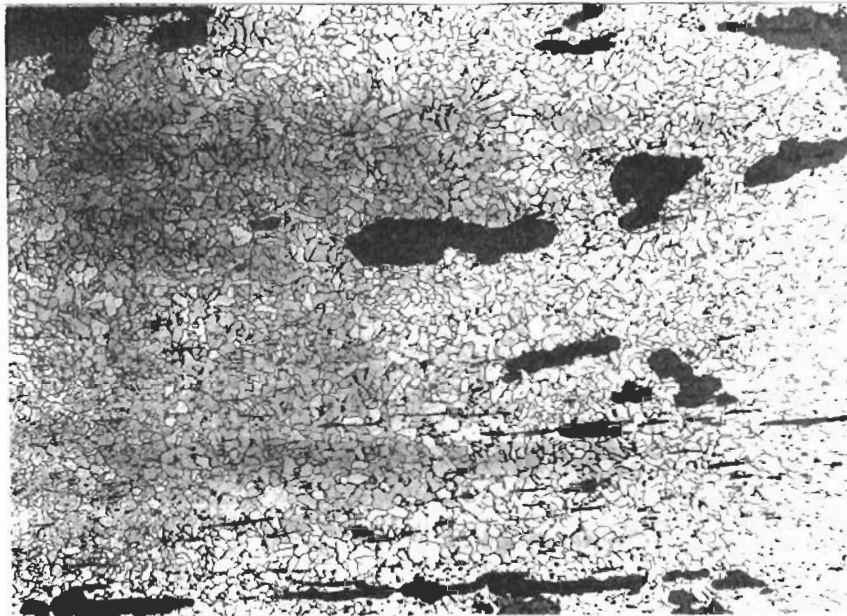
**Obr. 1** Struktura hutnické strusky



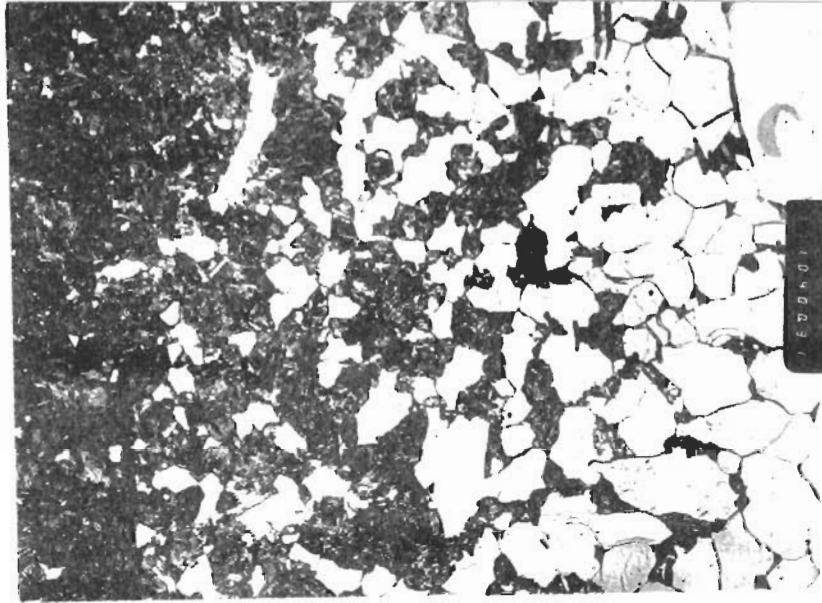
**Obr. 2** Struktura zvětralého okraje rudy



Obr. 3 Svařené dva různé materiály v tuleji dláta – ocel 0.6 %C a železo 0.2%C



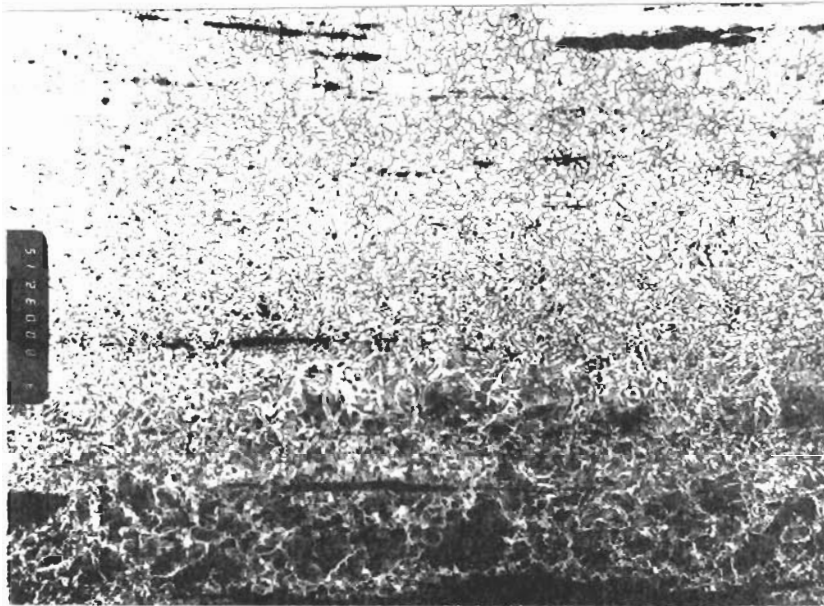
Obr. 4 Měkké železo v ostří dláta 0.1%C



Obr. 5 Nauhličené a zakalené ostří dláta, základní materiál 0.1%C



Obr. 6 Ocel 0.3%C v tuleji dláta, nárůst zrna při ohřevu pro cementaci



**Obr. 7** Nauhličená vrstva v ostří sekery, bez dalšího zpracování,  
základní materiál 0.15%C, nauhličení 0.5%C