

Rozbory středověkých železných předmětů

Analýze byly podrobeny železné předměty

- hřeb a hřebík z objektu pod hradem Auršperkem u Bystřice n. Pern.¹ a z povrchového sběru u Drnholce na Mikulovsku²
- kroužek a část udidla s torzem třmenu a zlomkem příčnicku.

Analyzované předměty jsou na obr. 1 až 3. K analýze, jejímž cílem bylo také alespoň přibližně přispět k datování těchto předmětů, byla využita světelná mikroskopie, elektronová rastrovací mikroskopie, energiově disperzní rtg. mikroanalýza³, zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a makrotvrdosti podle Brinella.

Výsledky

Výsledky kvantitativních analýz velikosti zrna, mikrotvrdosti a makrotvrdosti a prvkových analýz matrice a struskových vměstků jsou uspořádány v tab. 1 až 3.

Hřeb zobrazený na obr. 1 má v hlavové části a v části stopky do vzdálenosti asi 25 mm od vrchlíku (odkud byl odebrán vzorek k analýze) čistě feritickou strukturu s jemným až hrubým zrnem (7 až 5 dle ČSN) bez jakýchkoli stop po deformaci za studena. Ve struktuře se střídají pásma prostá fosforu (obr. 4, tab. 2, poř.čís. 1, oblast 1) s pásmy obsahujícími 0,21 % P (obr. 5, tab. 2, poř. čís. 1, oblast 2). Zvýšený obsah fosforu se projeví na morfologii feritu subzrny nepravidelného tvaru a velikosti (obr. 5), neboť ferit obsahující více fosforu je tímto prvkem zpevněn a má také poněkud vyšší mikrotvrdost (tab. 1, poř. čís. 1).

Mikrofraktografická analýza lomu připraveného z konce stopky hřebu prokázala, že jde o tvárné porušování jamkovou mikromorfologií (obr. 6), to znamená, že hřeb měl vysokou hou-

ževnatost, avšak nepříliš vysokou pevnost. Na základě měření tvrdosti podle Brinella (tab. 1) lze pomocí empirických vztahů odhadnout pevnost v tahu kolem 510 MPa.

Hřebík zobrazený také na obr. 1, má rovněž v okolí hlavové části, odkud byl odebrán vzorek, čistě feritickou strukturu, avšak s poměrně hrubým zrnem v rozmezí 3 až -1 dle ČSN. Struktura je prostoupena protvářenými struskovými vměstky (obr. 7), které jsou v hlavové části hřebíku fragmentovány (obr. 8). Stejně jako v předešlém případě u hřebu, nebyly ani u hřebíku zjištěny stopy plastické deformace za studena. Pevnost hřebíku odhadnutá na podkladě změřené tvrdosti podle Brinella, se pohybuje kolem 390 MPa, to znamená, že je menší než u hřebu.

Kroužek zobrazený na obr. 2 má jemnozrnnou strukturu tvořenou feritem a horním, nepříliš tvrdým bainitem. Feritické zrno je vcelku rovnoměrné velikosti (9 až 7 dle ČSN), zrna bainitu obklopená obálkami feritu (obr. 9 - axiální řez a obr. 10 - radiální řez kroužkem) jsou poněkud hrubší (5 dle ČSN), což ukazuje na to, že kroužek byl ochlazen z teploty dosti převyšující teplotu bodu A_3 čistého železa (cca 906°C). Svědčí o tom též stopy Widmannstätténovy struktury na obr. 9 i 10. Pevnost kroužku byla poměrně vysoká a pohybovala se kolem 630 MPa.

Udidlo zobrazené na obr. 3 mělo v třmenové části feriticko perlitickou strukturu s jemným až hrubým feritickým zrnem a hrubým perlitickým (tab. 1) zrnem obklopeným obálkami feritu (obr. 11). Perlit je velmi jemný. Místně má rozložení feritu a perlitu výrazné znaky Widmannstätténovy struktury, které jsou patrné na obr. 11, zejména však na obr. 12, z míst o větším podílu ve struktuře. Také tato struktura svědčí o rychlém ochlazení z teplot nad bodem A_3 . Pevnost třmenové části však nebyla vysoká, pohybovala se kolem 450 MPa.

Část označená jako příčník (obr. 3) spojující původně třmenový oblouk měla čistě feritickou strukturu s jemným až středně hrubým zrnem (6 až 4 dle ČSN) a beze stop Widmannstätténovy struktury. Pevnost této části posuzovaná na podkladě měření tvrdosti podle Brinella, byla 350 MPa, to znamená nejnižší ze všech analyzovaných předmětů.

Poznámky k technologii výroby

Jak plyne z tab. 2, je pro všechny železné předměty společný velmi nízký obsah příměsových prvků, manganu, křemíku, fosforu a síry v kovové matici. Obsah manganu nepřevyšuje v průměru 0,05 % a u hřebíku a kroužku bylo změřeno místně 0,21 a 0,14 %. Obdobně je tomu s koncentrací křemíku, jež v průměru nepřevyšuje 0,14 % a lokálně u příčnicku 0,22 %. Fosfor byl nalezen pouze v matici hřebu a síra byla ve všech vzorcích v matici pod mezí detekovatelnosti. Relativně nízký obsah substitučních prvků (Mn a Si) v matici nasvědčuje tomu, že původně vyrobený produkt (železná lupa) mohl být získán přímou výrobou železa z železných rud, tj. v těstovitém stavu, takže nedošlo k výraznějšímu nasycení matrice těmito prvky ze strusky. Teprve následujícím kovářským zpracováním primárního produktu (lupy), popř. druhotného zpracování tzv. vratných surovin (tj. železných předmětů vyřazených z dalšího použití) docházelo k mírnému obohacení matrice manganem a křemíkem.^{4,5} Fosfor se vymyká z tohoto pravidla, neboť má v tuhém roztoku (austenitu i feritu) řádově větší difuzivitu než oba zmíněné prvky, tj. Mn a Si, a na rozhraní strusky (struskového vměstku) a tuhého roztoku se rychleji přerozděluje.

Výsledky analýzy vměstků (tab. 3) se jeví v dobrém souladu s hodnotami koncentrací prvků v matici. Např. koncentrace 0,21 % P ve feritu v pásmech hřebu obohacených fosforem, koresponduje s relativně nejvyšším podílem P_2O_5 (1,9 a 3,4 %) ve vměstcích téhož železného předmětu (srovnej údaje v tab. 2 a 3). Také obsah manganu 0,14 % ve feritu kroužku koresponduje s relativně vysokým podílem MnO (63,1 a 64,0) ve vměstcích téhož vzorku (viz tab. 2 a 3). Obdobně relativně velmi nízký obsah SiO_2 (5,6 a 7,1) u hřebíku koresponduje s nulovou koncentrací křemíku ve feritu téhož vzorku.

Index bazicity vměstků stanovený podle^{4,5} je vysoký (tab. 3) a střední hodnota je $8,96 \pm 3,64$). Tato hodnota indexu bazicity vměstků významně přesahuje tutéž veličinu zjištěnou při analýze železných předmětů z Pfaffenschlagu⁴ ($I=2,56 \pm 1,61$). avšak v mezích směrodatných odchylek se shoduje s indexem bazicity železných výrobků ze Mstěnic⁵, kde je $I = 4,92 \pm 2,90$. Vysoká hodnota indexu bazicity vměstků udává za jinak stejných

podmínek větší sklon předmětu ke korozi.

Na podkladě analýz prvků v kovové matici a ve vměstcích lze tedy s jistou pravděpodobností předpokládat, že všechny železné předměty mohly být vyrobeny ještě před nástupem nepřímé výroby železa z rud v dřevouhelných vysokých pecích. Začátky této výroby spadají na Moravě do poloviny 17. století.

Předměty dále svědčí o standardní kovářské práci, avšak u žádného z nich nebylo použito speciálních postupů kovářského zpracování. U hřebu a hřebíku je pozoruhodné, že okolí hlavových partií nemá žádné stopy po deformaci za studena⁵ (tj. po zatloukání). To je možno vysvětlit dvojím způsobem: buď nebyly oba vůbec použity, anebo následkem požáru objektu proběhla znovu jejich austenitizace, (tj. ohřev nad teplotu bodu A_3) a ochlazení, popř. zotavení a rekrytalizace provázená zhrubnutím feritického zrna, pokud byly ohřáty pod teplotu A_1 , v krajním případě pak mezi $A_1 - A_3$.

Kroužek byl po vykování zakalen do vody, přičemž mohlo být použito tzv. lomené kalení, které zmírnilo intenzitu ochlazovacího účinku, takže nedošlo k transformaci austenitu na martensit, ale pouze na horní bainit. Téměř s jistotou lze tvrdit, že kroužek nebyl vysokoteplotně (tj. asi nad 400°C) popuštěn. Podobné tepelné zpracování prodělalo udidlo, které však bylo po vykování ochlazeno z vyšší austenitizační teploty než předchozí kroužek, ale menší rychlostí. Na místo horního bainitu je ve struktuře třmenu udidla jenom jemný perlit.

Zlomek příčnicku, který byl zakorodován ve třmenu (obr. 3), měl velmi nízkou pevnost, již zmíněných 350 MPa, takže nemohl přenášet žádné větší zatížení.

Ve srovnání s oceli současně produkce by mohly být analyzované železné předměty zařazeny mezi oceli třídy 10, což jsou nejlevnější oceli pro hromadnou spotřebu. Hřebík z objektu pod Auršperkem a zlomek příčnicku z udidla z Drnholce by snesly srovnání pouze s ocelí 10 001 o nezaručené pevnosti do 500 MPa. Hřeb od Auršperku může být srovnán s ocelí 10 002 o pevnosti 320 až 500 MPa, kroužek z Drnholce lze přibližně srovnat s ocelí 10 370, stejně tak jako třmen z udidla z téže lokality. Oceli třídy 10 však nejsou určeny pro tepelné zpracování.

Závěr

Analyzované železné předměty - hřeb, hřebík, kroužek a část udidla, mohly být vyrobeny ze železa získaného technologií přímé výroby z rud a jejich původ lze tím zařadit s jistou pravděpodobností před druhou polovinu 17. století.

Jde o výrobky běžné jakosti, k jejichž zhotovení byly také použity obvyklé postupy. Kroužek a třmenová část udidla byly po vykování rychle ochlazeny, takže se zvýšila jejich tvrdost. Hřeb a hřebík mají strukturu prostou znaků, které zanechává deformace za studena (tj. struktura je prostá skluzových pásů a deformačních dvojčat).

Hřeb a hřebík nebyly tedy buď vůbec použity (což je málo pravděpodobné) anebo prodělaly požár, či jiný ohřev až nad teplotu A_3 (cca 906°C), takže došlo buď k zotavení původně deformované struktury a k rekrytalizaci zrn feritu, nebo k úplné překrytalizaci. Posledně jmenovaný proces mohl být také spojen s oduhličením, takže původní struktura (tj. před požárem) mohla být feriticko-perlitická.

Literatura

1. Hosák, L. - Šrámek, R.: Místní jména na Moravě a ve Slezsku. Academia, Praha, 1970, s.49 (první zpráva o hradu je z r. 1355, kdy se uvádí "de Awersperch").
2. Tamtéž, s.196 (Ves se připomíná poprvé k r. 1046 ve falzu z 12. stol. jako "Drinowice").
3. Levíček, P. - Stránský, K.: Metalurgické vady ocelových odlitků. SNTL, Praha 1984 (v knize je podrobný popis použitých metod).
4. Stránský, K.: Rozbory železných předmětů. In. Nekuda, V.: Pfaffenschlag. Blok, Brno, 1975, s.209-218, a tab. LXXIII až LXXXIV.
5. Stránský, K. - Vrba, I.: Rozbory železných předmětů a strusek ze zaniklé středověké osady Mstěnice. In. Nekuda, V.: Mstěnice. Hrádek - tvrz - dvůr - předsunutá opevnění. Muzejní a vlastivědná společnost v Brně, 1985, s.193-222.

Tab. 1 Výsledky metalografické analýzy železných předmětů

Pořadové číslo	Lokalita	Předmět	Velikost feritického zrna dle ČSN 42 0462	Mikrotvrdost HV 0,02 dle ČSN 42 0375			Tvrdoost HB 187/2,5/15	Poznámka
				ferit	perlit	bainit		
1	Auršperk	hřeb	7 až 5 převážně 5 až 1 (místně)	209	-	-	143	Obr. 1 1) Zvýšený obsah P
				2 212 ¹⁾ 2	-	-	5	
2	Auršperk	hřebík	0 až -1 tělo 2 až 1 hlava 3 až 2 okraj stopky	191 3	-	-	109 7	Obr. 1
3	Drnholec	kroužek (axiální řez)	9 až 7 ²⁾	254 8	-	401 146	175 12	Obr. 2 2) původní austenitické zrnko 7 až 5
		kroužek (radiální řez)	9 až 7 ²⁾	233 5	-	365 117	177 17	
4	Drnholec	část uvidla (třmen)	6 až 5 ³⁾	193 13	262 16	-	127 17	Obr. 3 3) aust. zrnko 4 až 3
		část uvidla (příčník)	6 až 4	195 1	-	-	98 -	

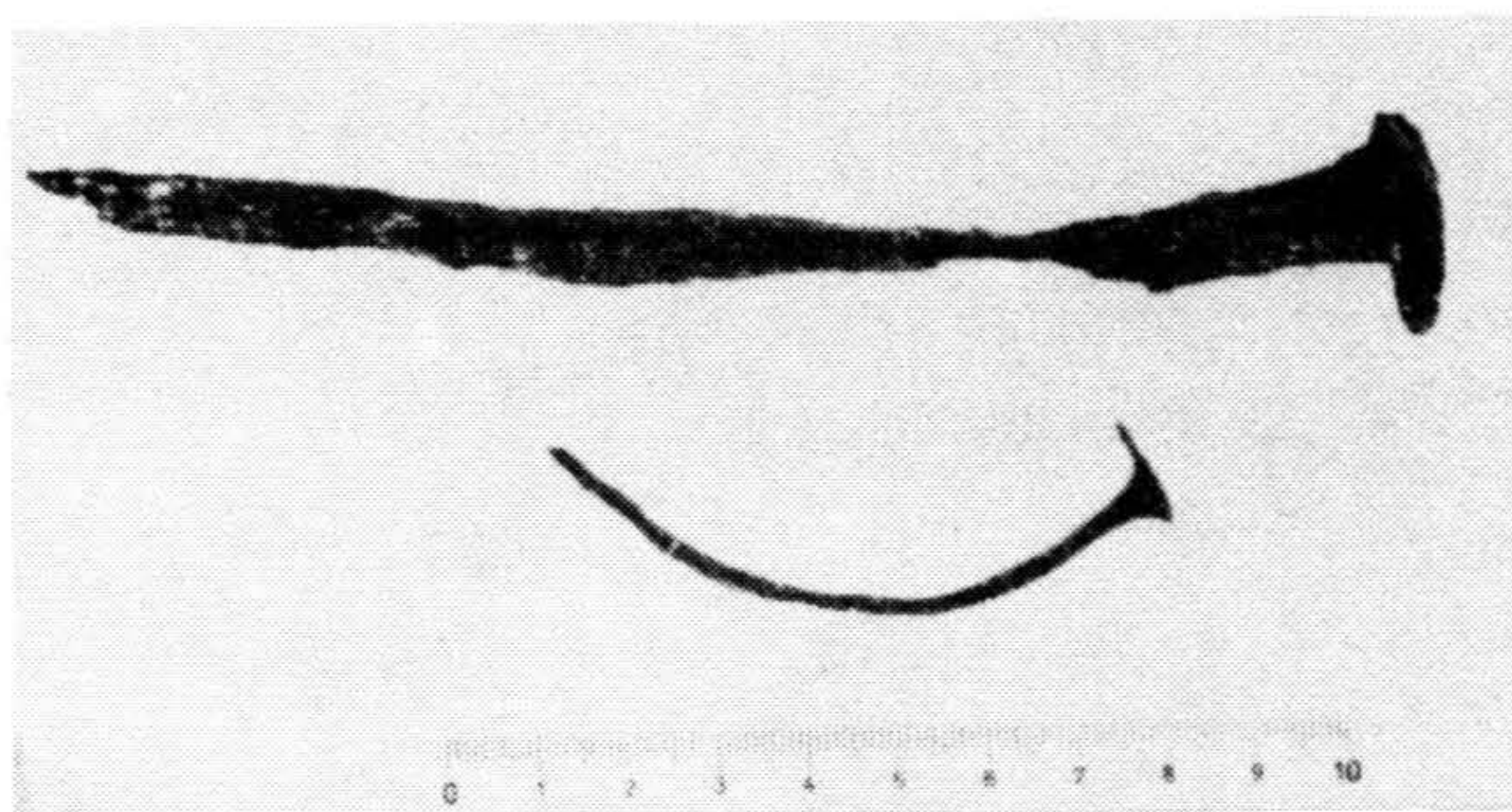
Tab. 2 Výsledky prvkové mikroanalýzy matrice (hmotn. %)

Pořadové číslo	Lokalita	Předmět	Oblast	Mn	Si	P	S	Fe	Poznámka
1	Auršperk	hřeb	1	0,00	0,20	0,00	0,00	99,82	obr.
			2	0,00	0,00	0,21	0,00	99,90	obr.
2	Auršperk	hřebík	1	0,21	0,00	0,00	0,00	99,79	
			2	0,00	0,00	0,00	0,00	99,99	
3	Drnholec	kroužek (axiální řez)	1	0,14	0,21	0,00	0,00	99,67	
			2	0,00	0,21	0,00	0,00	99,81	
4	Drnholec	udidlo (třmen)	1	0,00	0,17	0,00	0,00	99,93	
			1	0,00	0,22	0,00	0,00	99,80	

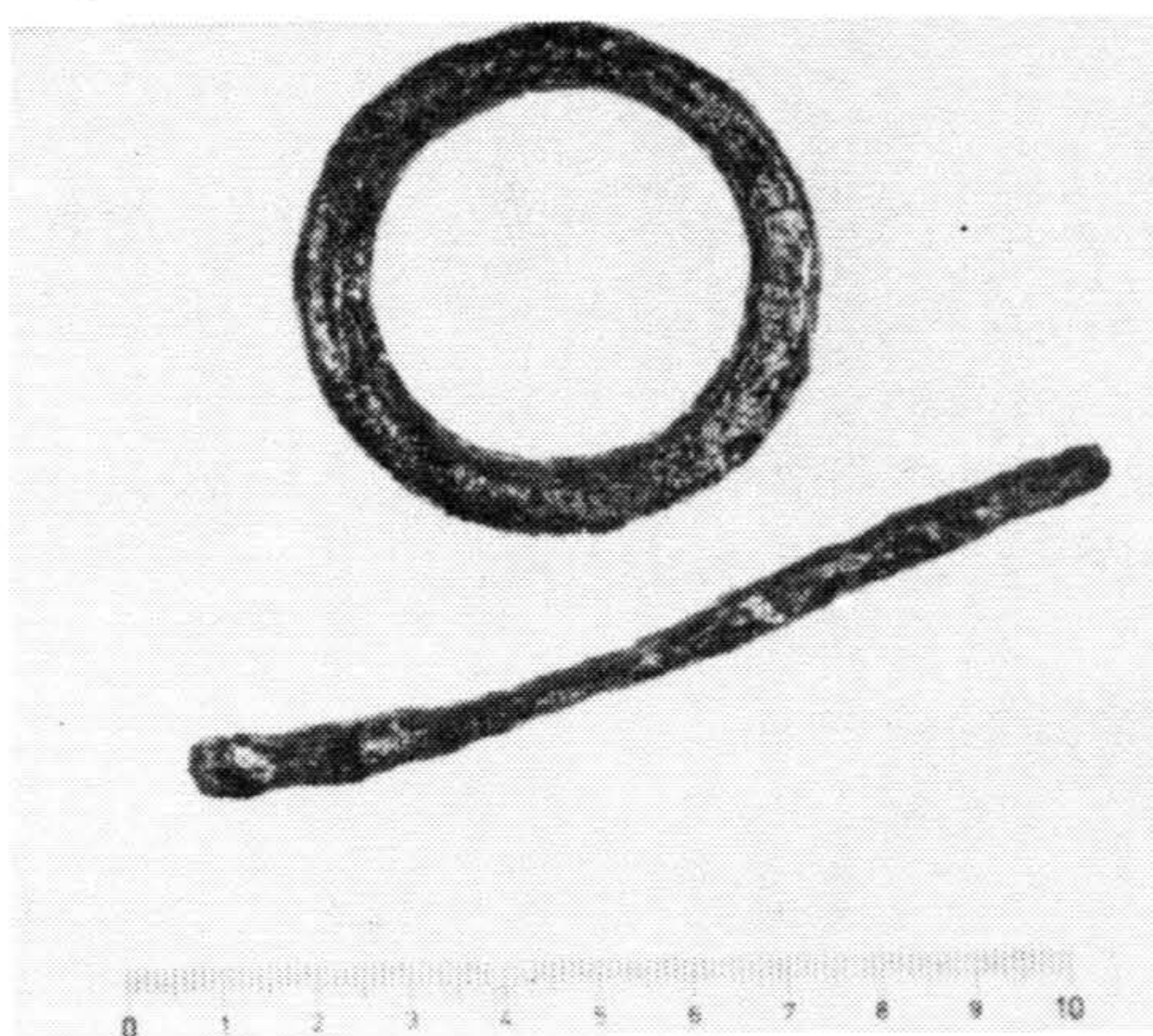
Tab. 3 Výsledky mikroanalýzy struskových vměstků (hmot. %)

Poř. č.	Předmět (lokalita)	Vměstek	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Pozn. I
1	hřeb Auršperk	1	0,0	0,5	9,1	1,9	1,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	8,9	77,1	7,6
		2	0,0	0,3	7,7	3,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	6,8	81,0	
2	hřebík Auršperk	1	0,0	0,5	5,6	1,7	0,0	0,3	1,2	0,0	0,0	0,0	2,6	87,6	11,7
		2	0,0	0,2	7,1	0,6	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	1,9	89,3	
3	kroužek axiální řez Drnholec	1	0,2	1,0	16,0	1,3	1,2	0,0	2,1	0,3	0,1	0,0	63,1	14,1	4,4
		2	0,3	1,1	16,0	0,7	0,8	0,2	2,0	0,4	0,1	0,0	64,0	13,6	
4	udidlo - třmen Drnholec	1	0,0	0,7	8,5	0,1	0,7	0,3	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	87,9	6,6
		2	0,0	1,0	17,0	0,1	1,3	0,9	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	76,3	
	udidlo - příčník Drnholec	1	0,6	0,6	9,5	0,1	0,0	0,3	2,4	0,1	0,0	0,0	17,0	68,9	14,5
		2	3,9	0,0	2,6	0,0	0,2	0,0	0,7	0,0	0,1	0,2	25,1	66,9	

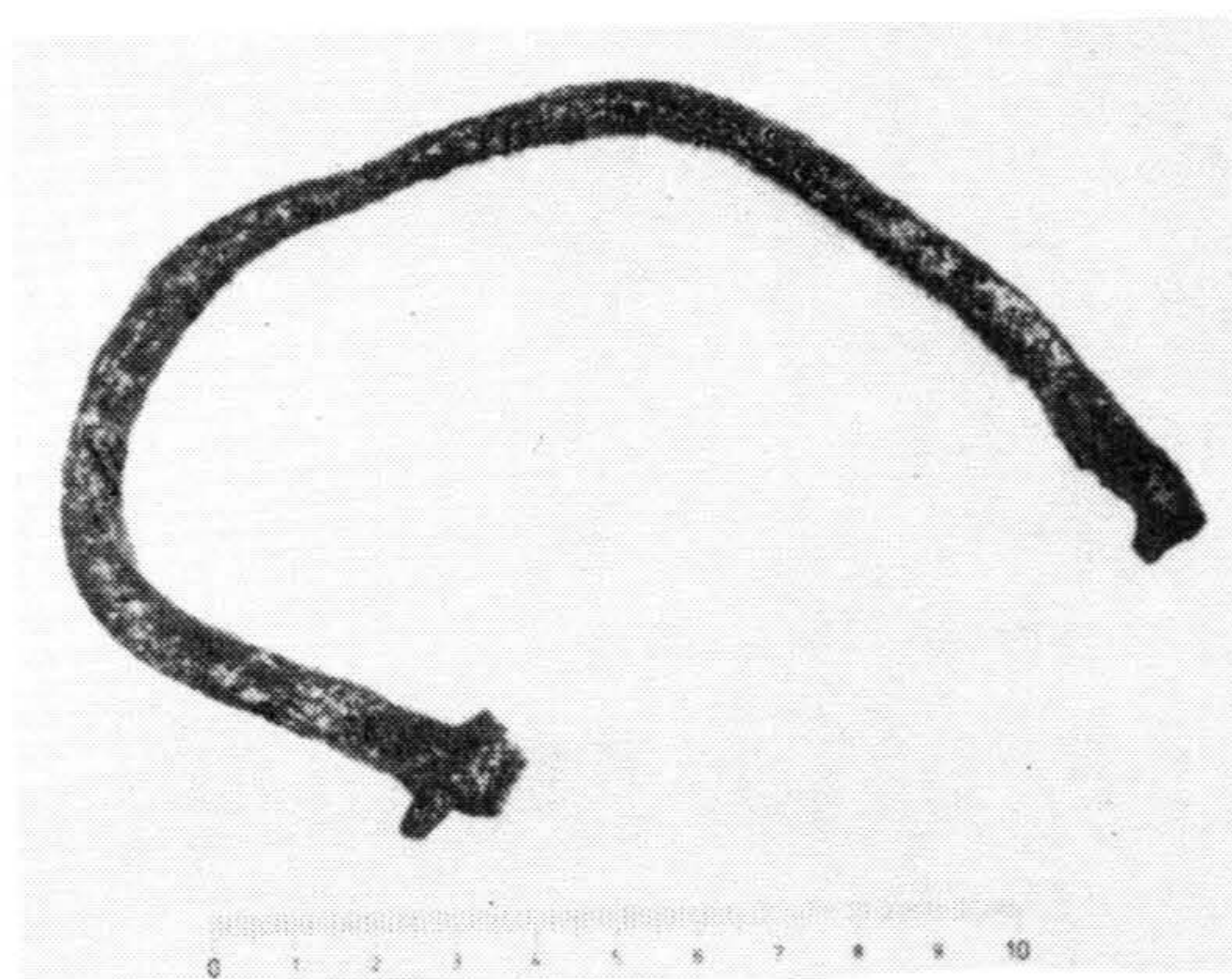
Pozn.: Index zásaditosti (bazicity) struskových vměstků 4,5)
I = (%FeO + %MnO + %CaO + %K₂O + %MgO) / (%SiO₂ + %P₂O₅ + %Al₂O₃)



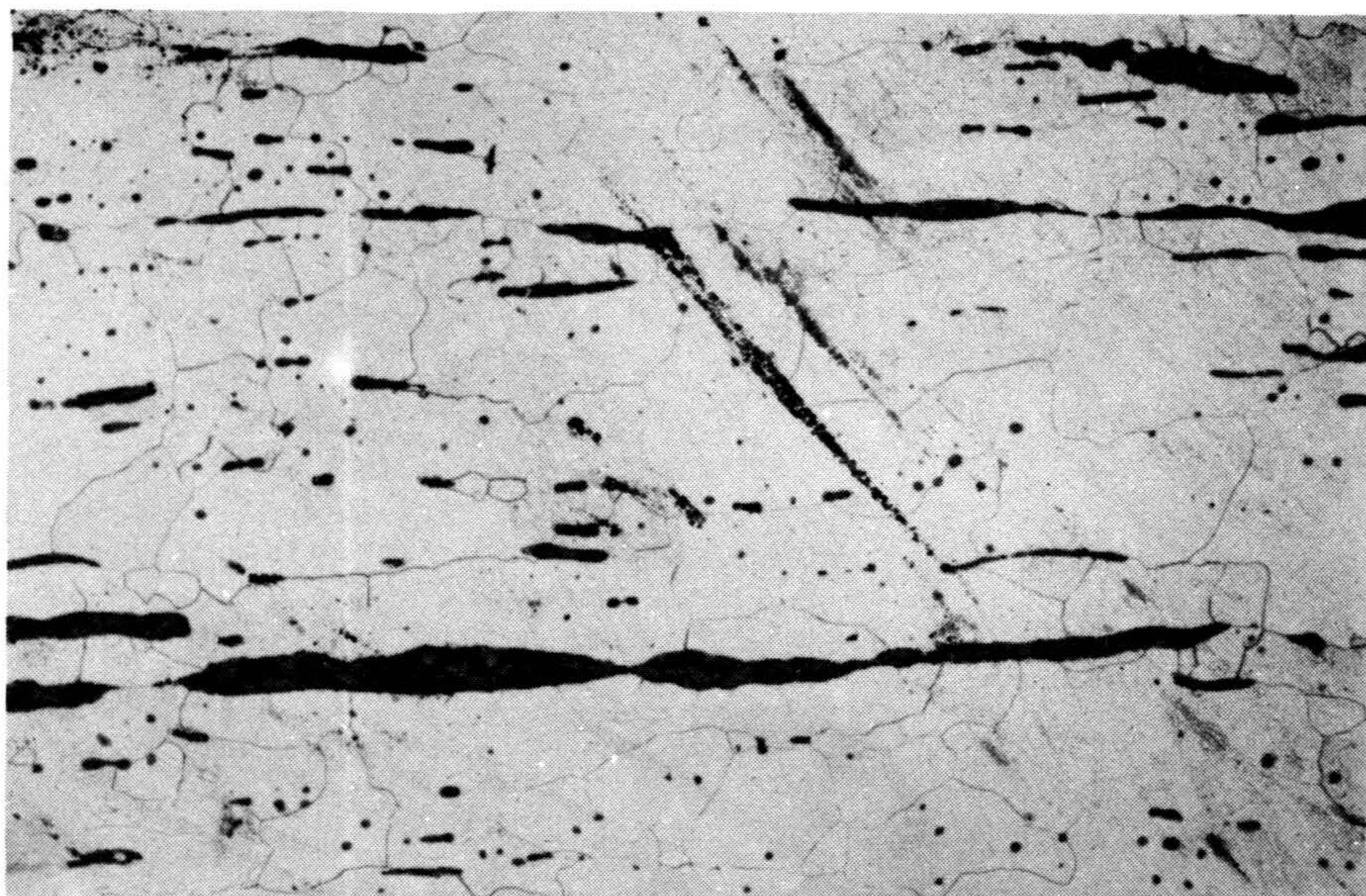
Obr. 1 Objekt pod Auršperkem. Hřeb a hřebík.



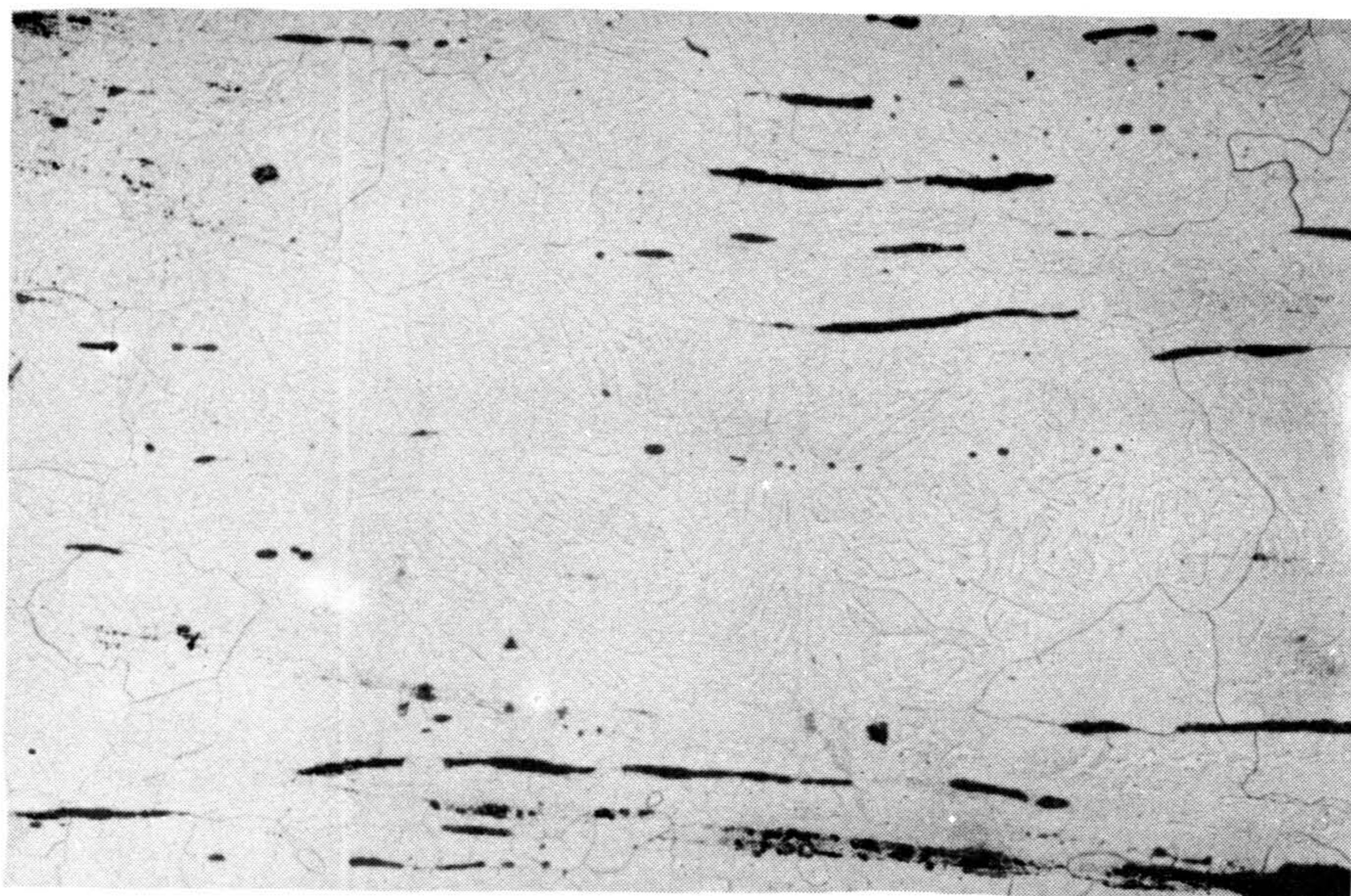
Obr. 2 Drnholec. Kroužek a trn. Trn nebyl analyzován.



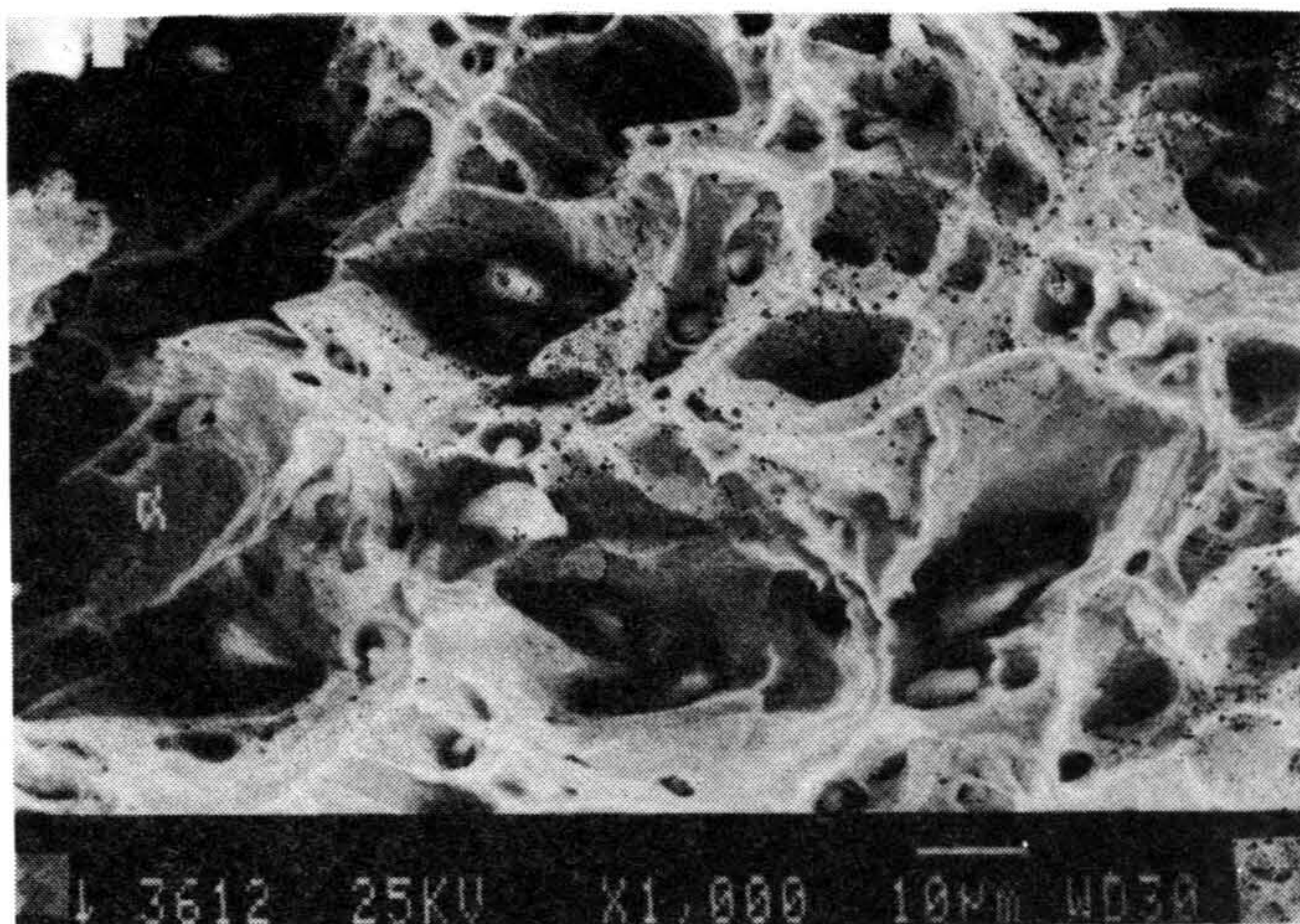
Obr. 3 Část udidla s třmenem a zlomkem příčnicku.



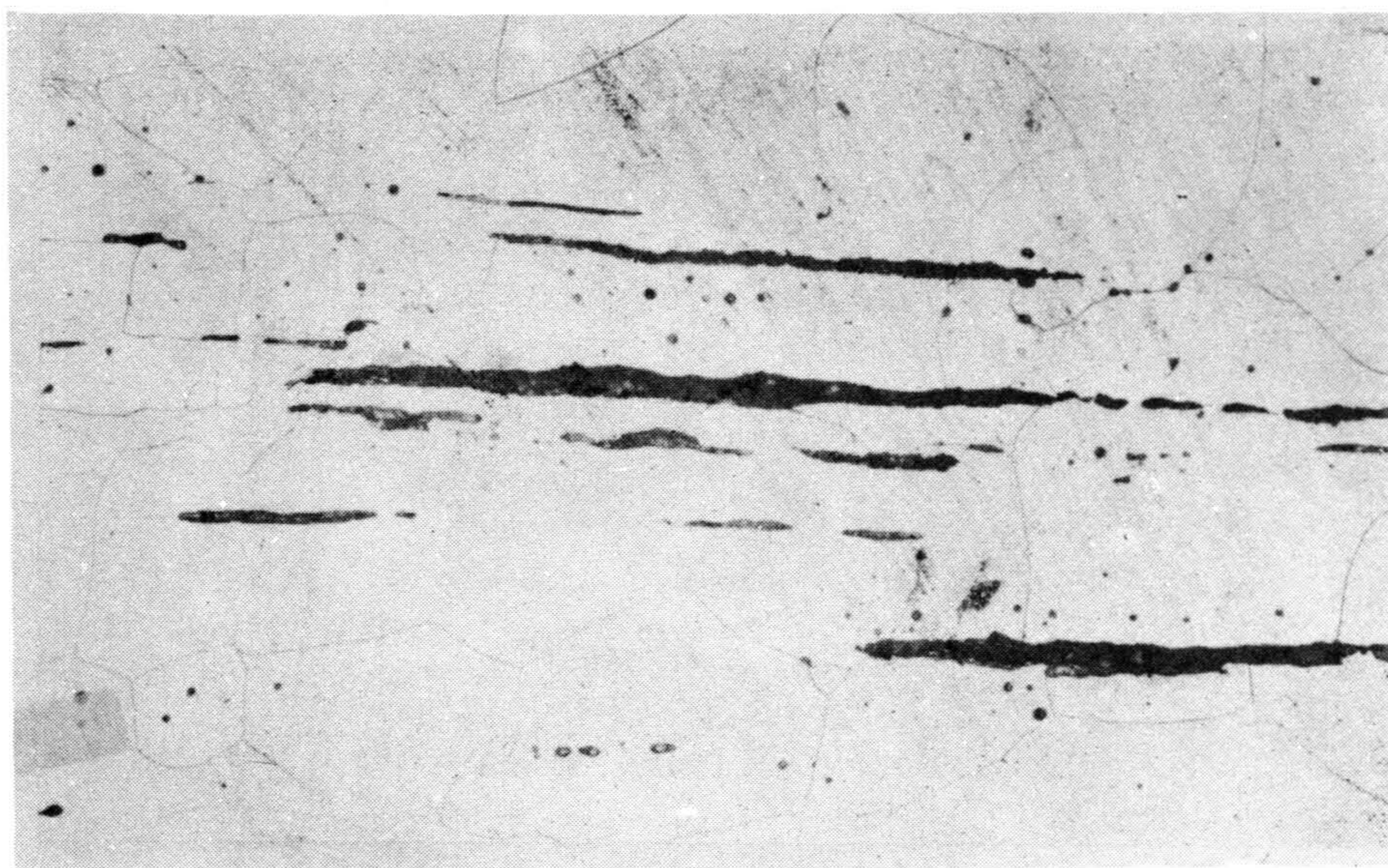
Obr. 4 Struktura stopky z okolí hlavy hřebu. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



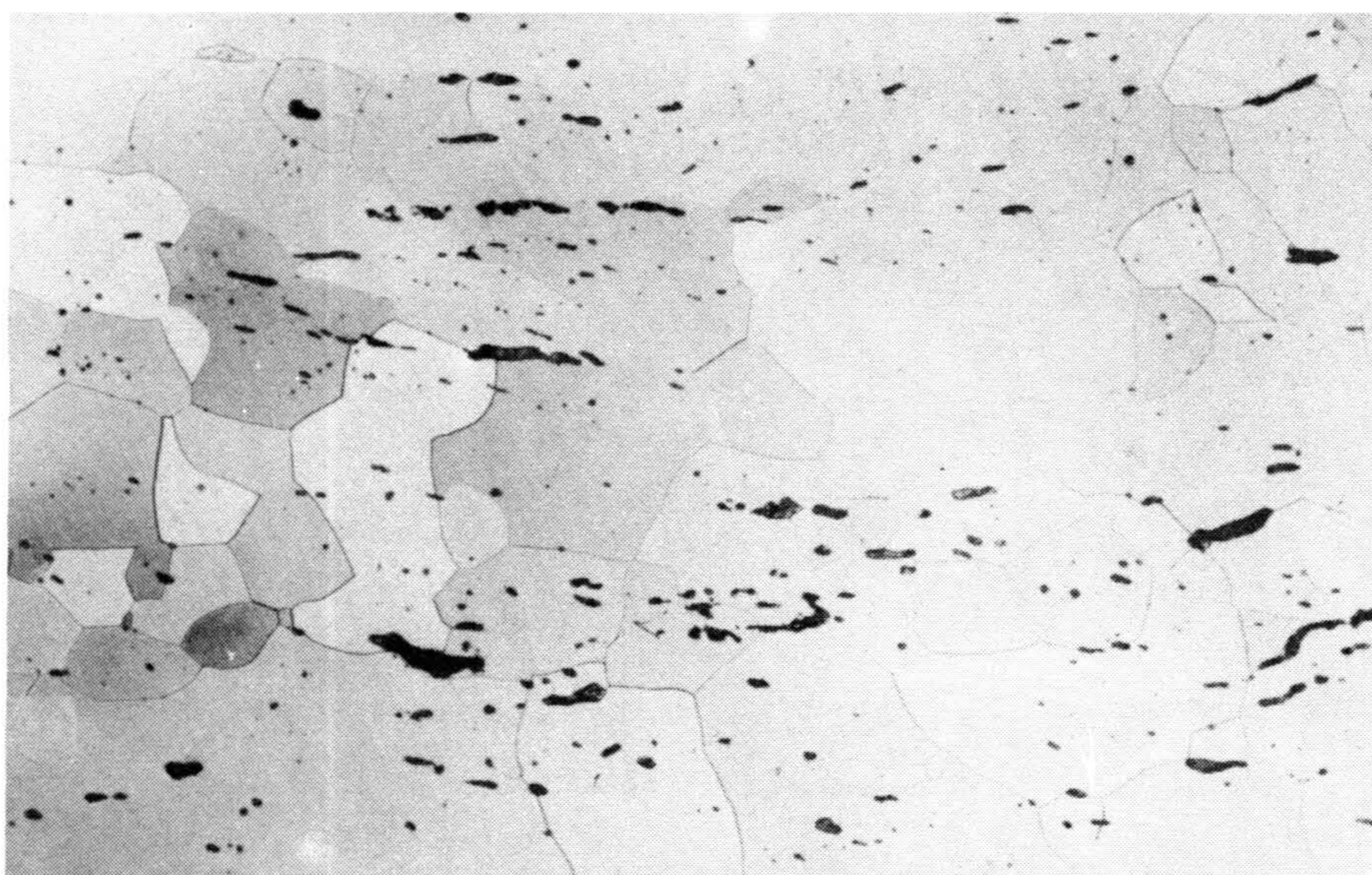
Obr. 5 Struktura stopky z okolí hlavy hřebu v pásmu obohaceném fosforem, Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



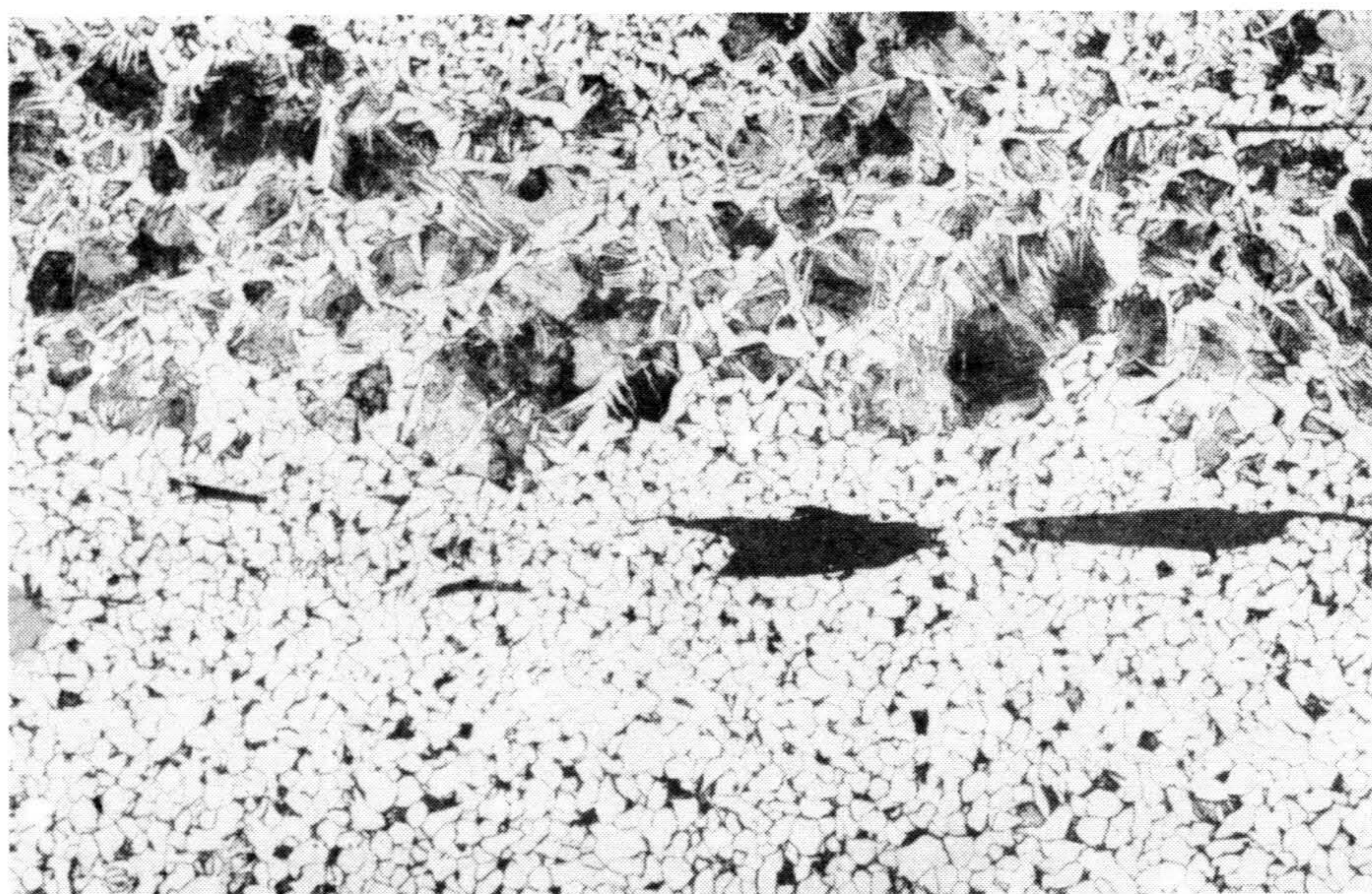
Obr. 6 Tvárný lom konce stopky hřebu. Rastrovací elektronový mikroskop.



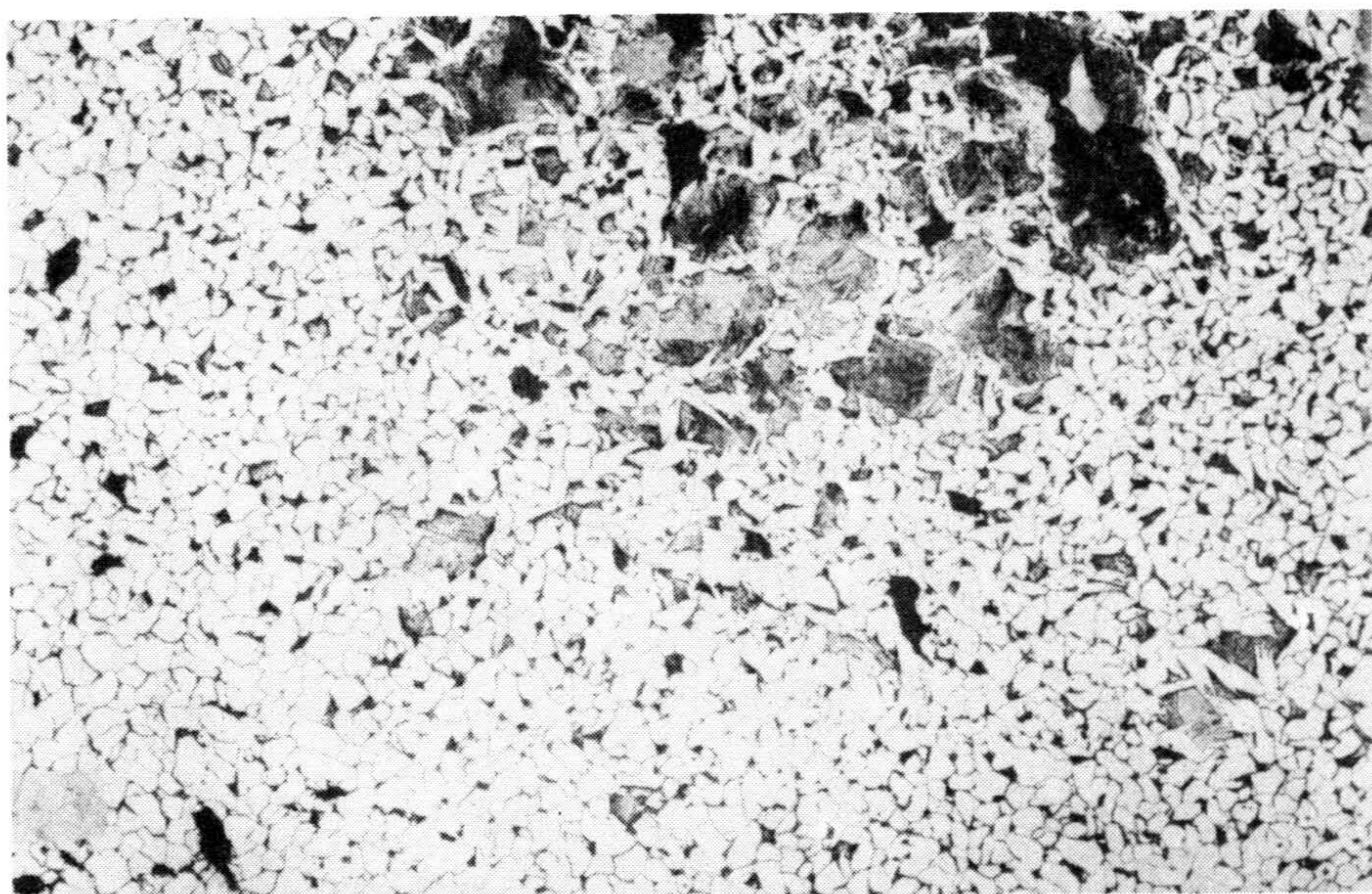
Obr. 7 Struktura stopky z okolí hlavy hřebíku. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



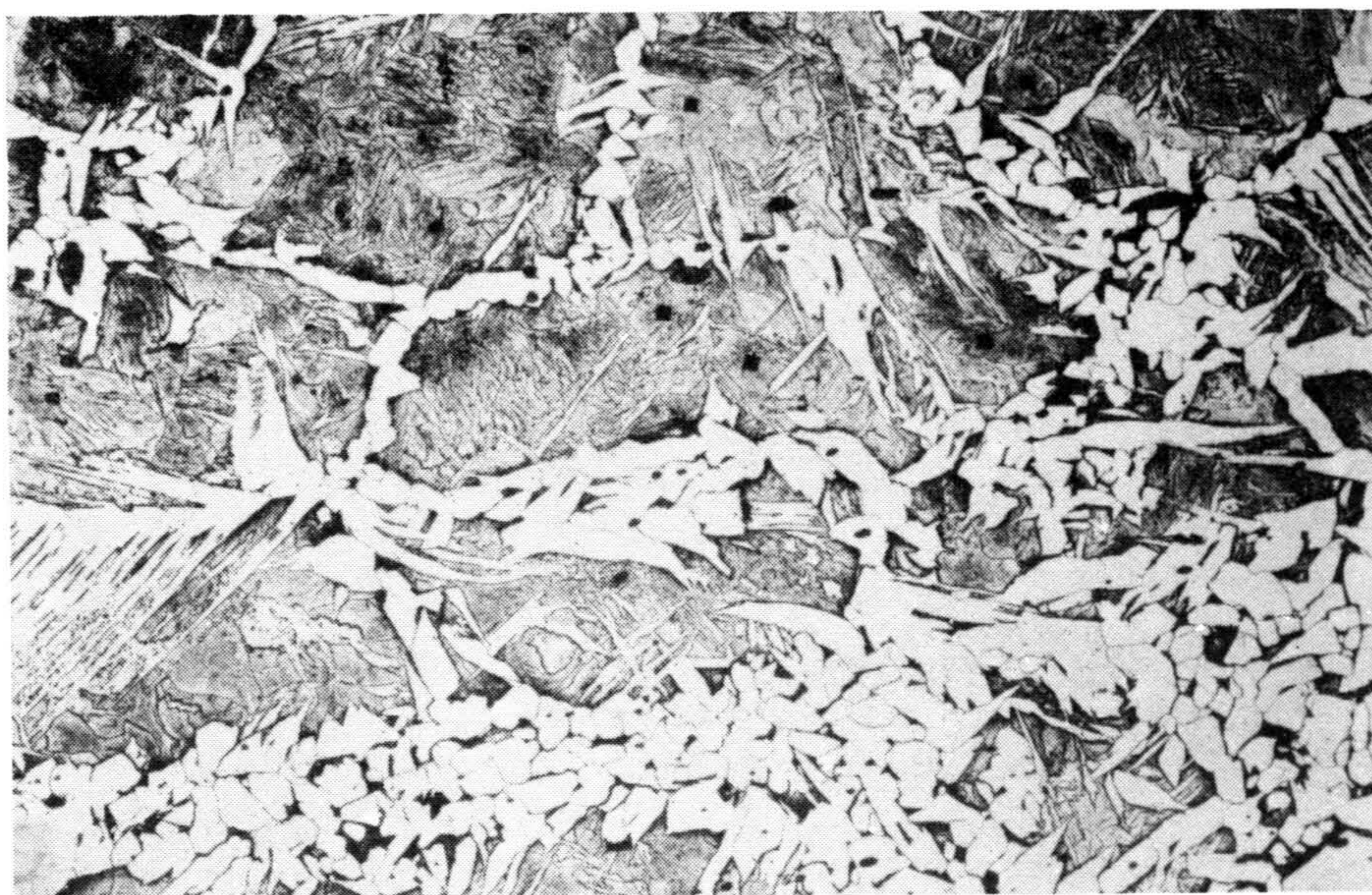
Obr. 8 Fragmentované struskové vměstky ve struktuře hlavy hřebíku. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



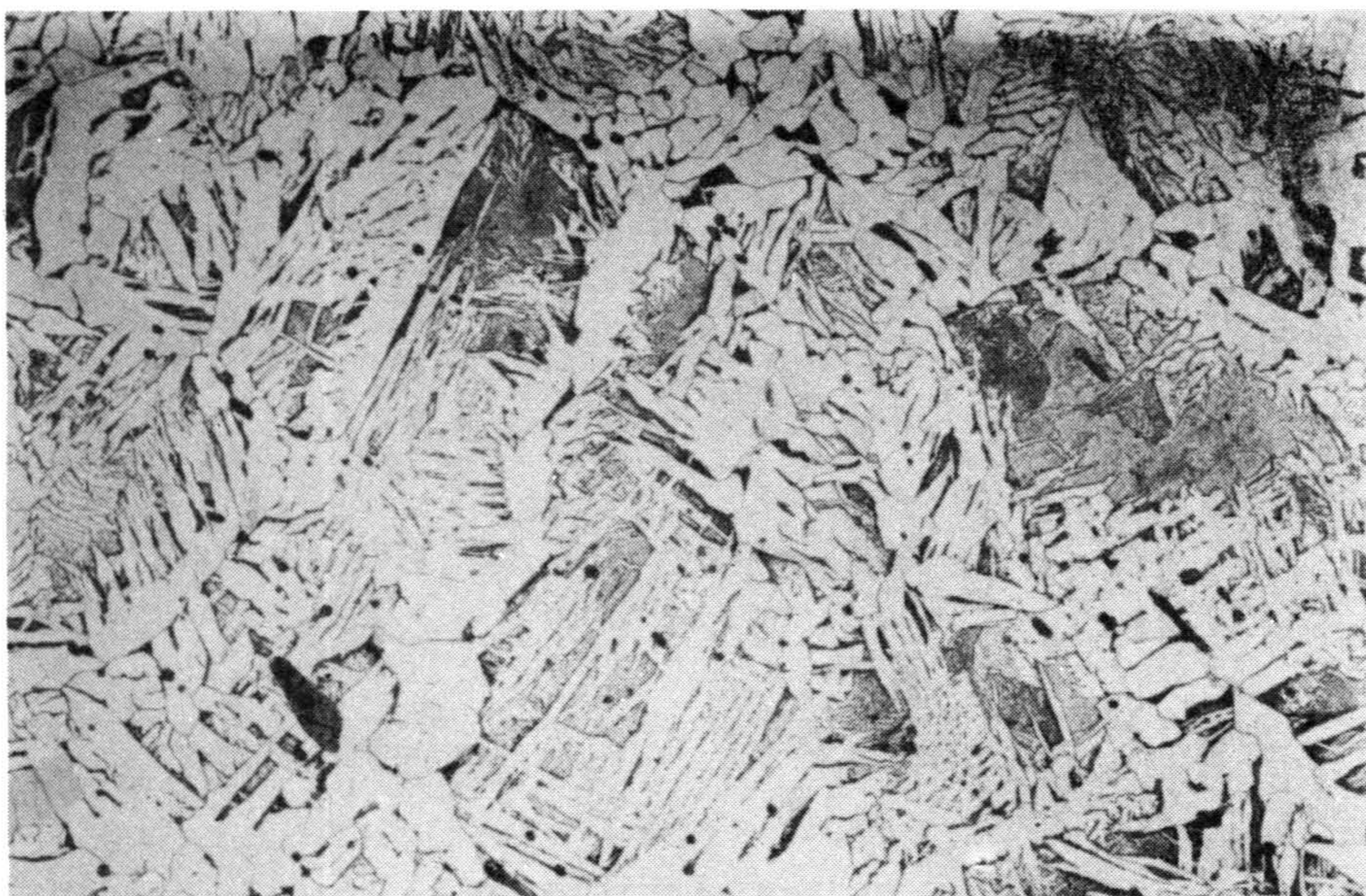
Obr. 9 Axiální řez kroužkem. Strukturu tvoří ferit a horní bainit. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



Obr. 10 Radiální řez kroužkem. Ferit a horní bainit. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



Obr. 11 Struktura v oku třmenové části udidla. Ferit a jemný perlit s výraznými znaky Widmannstätténovy struktury. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.



Obr. 12 Struktura v oku třmenové části udidla. Ferit a perlit s uspořádáním podle Widmannstättenuv struktury. Leptáno nitalem, zvětšeno 250x.