

Světelná mikroskopie

3.1 Princip metody

Světelná mikroskopie je založena na zákonech optiky, která ve svém původním významu označuje část fyziky pojednávající o světle, jeho vlastnostech a chování. Nejprve se sledovalo chování světla v makroprostředích a byl položen základ geometrické optiky a fotometrie. Později se ukázalo, že *zákony geometrické optiky* platí jen přibližně a že odchylky jsou tím značnější, čím menší jsou rozměry částí prostoru, v nichž šíření světla zkoumáme. Tak se dospělo k interferenci, ohybu a polarizaci světla a tyto jevy byly zahrnuty do tzv. *fyzikální optiky*. V poslední době se ukázalo, že viditelné světlo projevuje kvantovou povahu, a proto je vhodnější pro jevy souvisící s vlnovým] charakterem záření používat názvu *vlnová optika* [1].

3.2 Fyzikální základy světelné mikroskopie

Světelná mikroskopie využívá především *zákonů geometrické optiky* (zákon o přímočarém šíření světla, o vzájemné nezávislosti paprsků, zákon odrazu a lomu). Základní pojmy geometrické optiky, jakož i konstrukční princip světelného mikroskopu a funkce jeho jednotlivých součástí jsou v dostatečné míře vysvětleny v příručkách technické optiky [2], fyziky [1] a nauky o materiálu [3].

V této práci je proto zaměřena pozornost na některé *vady zobrazení* (aberrace) a zejména na *popis speciálních metod metalografického studia* kovových materiálů světelnou mikroskopií. Hlavní důraz se klade zejména na metody novější a dosud v ČSSR relativně málo využívané.

Vady čoček

Jednoduché čočky nedávají dokonalý obraz předmětu, neboť mají různé optické vady (aberrace). Tyto vady se dělí na dva základní druhy [4]:

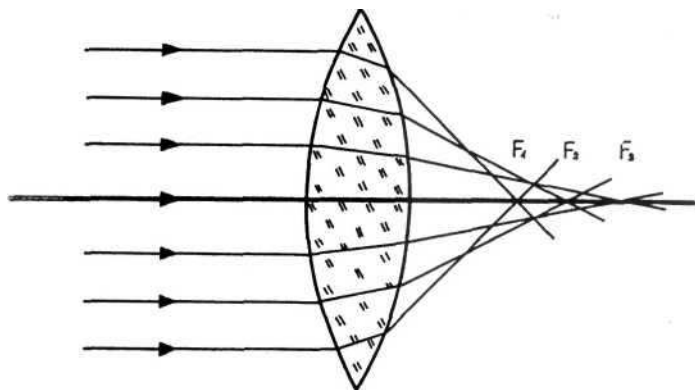
- a) *vady monochromatického zobrazení*, které vznikají i při použití monochromatického osvětlení,
- b) *vady chromatické*, vznikající při použití světla s širším rozsahem vlnových délek.

Aby se snížil vliv těchto vad, používá se soustav čoček vyrobených ze skla s různými optickými vlastnostmi a kombinací spojek a rozptylek majících předem vypočtený přesný tvar, tloušťku a vzájemnou vzdálenost. Avšak ani tak není možno plně odstranit vady zobrazení [5].

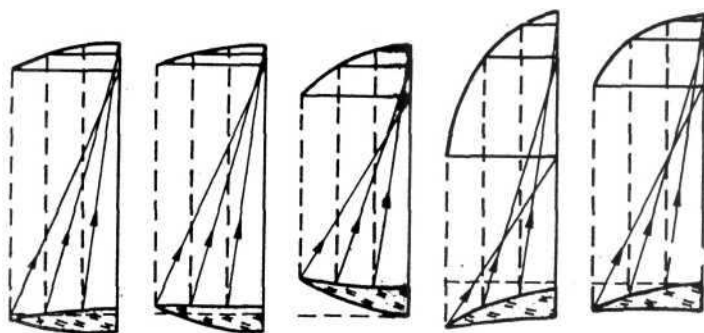
Sférická vada

Sférická vada vzniká tím, že paprsky rovnoběžné s optickou osou a procházející čočkou v různé vzdálenosti od osy se neprotínají v jediném bodě — ohnisku čočky (obr. 3.1). Výsledkem je, že bod na objektu není v rovině obrazu

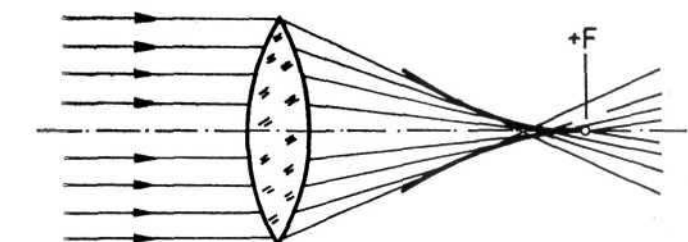
bodem, nýbrž má tvar kruhové plošky. Sférická vada závisí na tvaru čočky a její účinek na zobrazení může být značně omezen clonou vymezující pouze středovou část svazku světla. Z obrázku 3.2 je vidět, jak volba tvaru čočky umožňuje změnu sférické vady při zachování konstantní ohniskové vzdálenosti. U rozptylek se vyskytuje sférická vada opačného smyslu než u spojek (obr. 3.3). Proto lze kombinací spojky a rozptylky účinek sférické vady snížit. Obvykle se používá čoček spolu spojených — tak zvané kontaktní dvojice. Velký význam při odstranění sférické vady má volba skel s různými indexy lomu, z nichž jsou čočky vyrobeny.



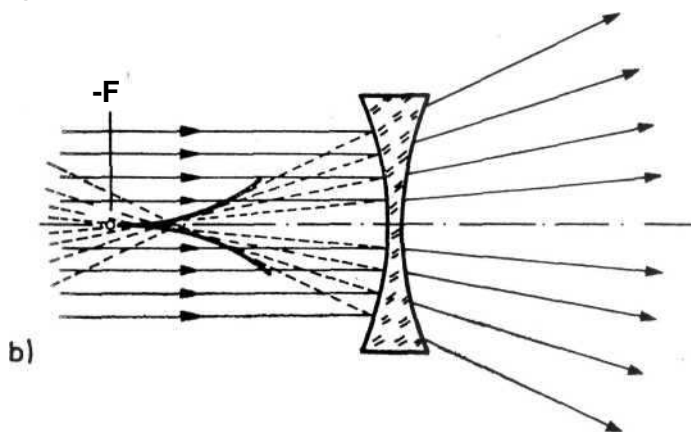
Obr. 3.1. Sférická varta spojky



Obr. 3.2. Vliv tvaru čočky na sférickou vadu



a)



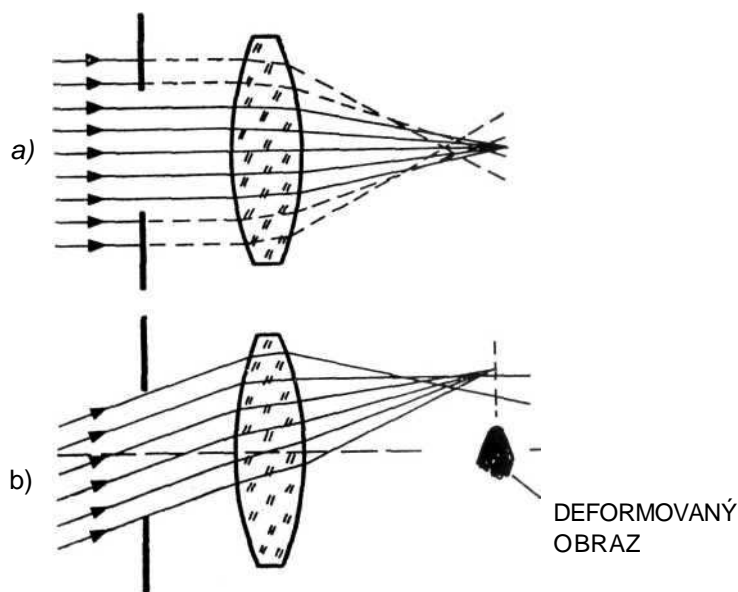
b)

Obr. 3.3. Sférické vady čoček [1, 2]
a) sférická vada spojky,
b) sférická vada rozptylky

Koma

Koma je vada stejného druhu jako sférická vada. Je-li účinek sférické vady snížen zařazením clony vymežující jen středovou část svazku světla procházejícího rovnoběžně s osou čočky, mohou šikmo dopadající paprsky procházet jejími okrajovými oblastmi (obr. 3.4). Tyto paprsky se neprotínají ve stejném bodě jako paprsky procházející středem čočky. Proto body objektu v okrajových oblastech zorného pole nejsou zobrazeny jako body, nýbrž jako deformované útvary připomínající tvarem kometu. Tato vada může být korigována stejným způsobem jako vada sférická. Na rozdíl od sférické vady je však možno i u jednoduché čočky nalézt tvar, který má nulové koma.

Soustavy čoček, u nichž jsou z velké části odstraněny sférická vada a koma, se nazývají *aplanáty* [3].

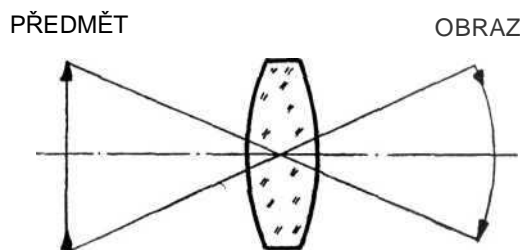


Obr. 3.4. Sférická vadu Koma
a) korekce sférické vady clonou, b) paprsky procházející čočkou šikmo se soustřeďují v jiném bodě než paprsky procházející podél osy a vzniká sférická vada

Vada astigmatická a vyklenutí zorného pole

Tyto dvě vady mají společný původ. Vada astigmatická vzniká při zobrazování bodů ležících mimo optickou osu, tedy v případě, kdy kužel zobrazovacích paprsků protíná osu čočky šikmo. Svazek paprsků se po lomu nesbíhá v jediném bodě, nýbrž tvoří dvě krátké navzájem kolmé úsečky, tak zvané fokály [3]. Jejich vzdálenost je mírou astigmatismu a nazývá se astigmatický rozdíl. Astigmatický rozdíl je malý pro body na ose a se vzrůstající vzdáleností zobrazovaného bodu od optické osy vzrůstá. Soustava čoček bez astigmatismu se nazývá *anastigmat* [3].

S astigmatickou vadou souvisí úzce i vada projevující se vyklenutím

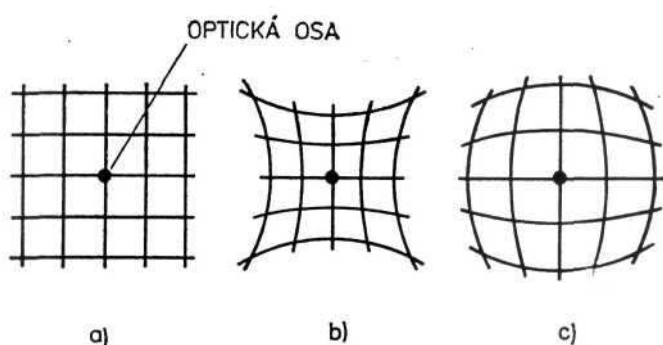


Obr. 3.5. Vyklenutí zorného pole

zorného pole. Tato vada způsobuje, že při zobrazování roviny neleží obraz vytvořený čočkou v rovině, nýbrž na vypuklé nebo vyduté ploše. Pouze nepatrná střední část je kolmá k optické ose (obr. 3.5). Při zaostřování takového obrazu na matnici (desku) se dostane ostrý obraz středu a neostře okraje, nebo naopak. *Vada vyklenutí zorného pole* se odstraňuje podobnými způsoby jako astigmatismus, tj. vhodnou vzdáleností čoček a správným umístěním clony [3].

Zkreslení (distorze)

Distorze vyvolává deformaci obrazu následkem rozdílu ve zvětšení oblastí ležící u optické osy a oblastí od této osy vzdálených. V souvislosti s tím je soustava vzájemně kolmých čar (obr. 3.6a) zobrazena deformovaně (obr. 3.6b, c) ve formě křivek. Tato deformace obrazu je patrná zejména na okrajích obrazového pole. Jedině přímky procházející optickou osou jsou zobrazeny jako přímky. Zkreslení lze snížit vhodně umístěnou clonou.

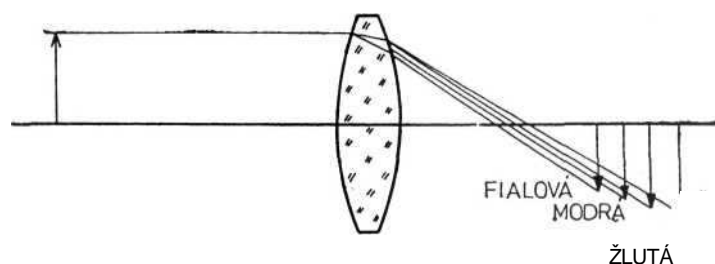


Obr. 3.6. Zkreslení obrazu

Chromatické vady

Protože ohnisková vzdálenost čočky je funkcí indexu lomu skla, z něhož je zhotovena, a hodnota tohoto indexu se mění s vlnovou délkou (barvou) světla, je ohnisková vzdálenost pro světlo různé barvy odlišná. Důsledkem toho je, že obraz tvořený pomocí bílého světla je složen z jednotlivých oddělených obrazů tvořených světlem o určité vlnové délce (barvě), jejichž ohniska jsou různě vzdálena od čoček. Tato vada se nazývá *podélná chromatická vada* (obr. 3.7). Jak je z tohoto obrázku patrné, láme se nejméně světlo červené barvy, nejvíce světlo fialové. Vzhledem ke směru průchodu světelných paprsků je pořadí barev u rozptylky opačné než u spojky. Spojením dvou čoček, a to spojky ze skla poměrně málo rozkládajícího bílé světlo (sklo korunové) a rozptylky, která je opticky slabší než spojka a je vyrobena ze skla s velkou disperzí (sklo flintové), je možno provést chromatickou *korekci pro dvě barvy spektra* [3].

Princip takovéto korigované soustavy dvou čoček, nazývaný *achromát*, je patrný z obr. 3.8.



Obr. 3.7. Podélná chromatická vada

fázový kontrast,
interferenční kontrast,
použití filtrů.

V principu může kovový povrch působit na odražené světlo dvojitým způsobem. Jednak ovlivňuje amplitudu světla a to se projevuje na hladkém povrchu *odlišnou odrazivostí* dvou rozdílných strukturních složek, jednak nerovnosti povrchu s konstantní hodnotou odrazivosti mají za následek *fázové difference paprsků* odražených *od* různých bodů povrchu. Protože oko nebo fotografická deska mohou přímo rozlišovat pouze rozdíly v amplitudě světla, fázové rozdíly se musí převést na změny amplitudy. To je základem fázového kontrastu a interferenčních technik.

Uvedené metody zvýšení kontrastu obrazu je možno bez velkých úprav aplikovat u většiny moderních metalografických světelných mikroskopů. Přestože jsou již dostatečně propracovány a jednoduše použitelné, neodpovídá jejich využití v našich metalografických laboratořích rozsahu dalších informací, které mohou pro studium struktury kovových materiálů přinést.

3.3.1 Světlé pole

Metoda světlého pole je nejpoužívanějším způsobem osvětlení v metalografii. Její princip je znázorněn na obr. 3.10a. Světelné paprsky dopadají na pozorovanou plochu metalografického vzorku kolmo nebo též „přímo“, proto se tento způsob osvětlení nazývá též *přímé osvětlení*.

Při tomto osvětlení nevznikají stíny a pozorovaný obraz je málo výrazný a kontrastní. Naproti tomu jemné strukturní součásti mají na obraze ostré obrysy [3].

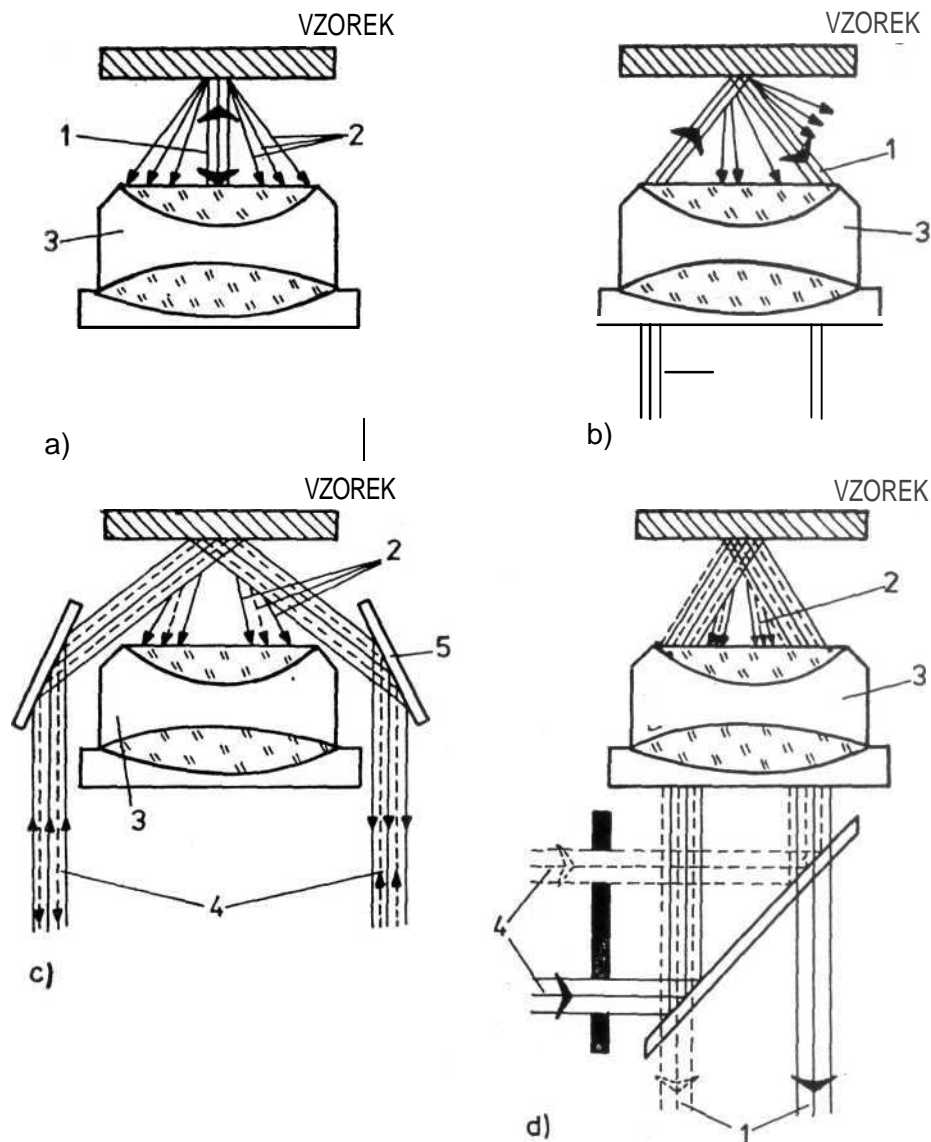
Ve světlem poli lze pozorovat podrobnosti struktury s odlišnými hodnotami odrazivosti (viz kap. 3.3.7), přičemž rozdíly odrazivosti musí dosahovat alespoň 10% [6]. Pomocí elektronového mikroanalyzátoru prokázali M. TOMÁŠOVÁ a B. KOLMAN [7] nehomogenitu chemického složení jednotlivých částic karbonitridů titanu v Cr-Ni austenitické oceli s přísadou 0,52 % Ti. Jak ukazují mikroskopní snímky pořízené pomocí charakteristického rtg. záření (obr. 3.11c, d, e), je obsah Ti v celé částici stejnoměrný, kdežto uhlík je koncentrován v okrajových oblastech a dusík ve středu každé karbonitridické částice. Jádru částice tedy odpovídá TiN s nízkým obsahem uhlíku a povrch částice TiC s nízkým obsahem dusíku. Uvedený rozdíl chemického složení povrchové a středové oblasti částice se projevuje i v koeficientu odrazivosti, a tedy v zabarvení obou oblastí při pozorování ve světlem poli (obr. 3.11a). Tento výsledek je v dobrém souhlase s údaji o hodnotách odrazivosti obou fází zjištěnými F. TROJEREM [60]; hodnota odrazivosti TiC je 47, kdežto TiN odpovídá 55.

Podobný efekt se uplatňuje i u směsi fází, které mají různou hodnotu odrazivosti. Na obrázku 3.12 je patrný shluk částic karbidů titanu (světlejší částice) a sulfidů titanu (tmavší částice) v austenitické Cr—Ni—Ti oceli. Obě fáze lze navzájem dobře odlišit podle zabarvení vyplývajícího z rozdílných hodnot odrazivosti.

Vliv různých koeficientů lomu strukturních součástí ležících v rovině výbrusu se bude při použití světlého pole uplatňovat málo. Rozlišitelnost hranic oblastí s různými koeficienty lomu může být zvýšena mírným rozostřením obrazu [6].

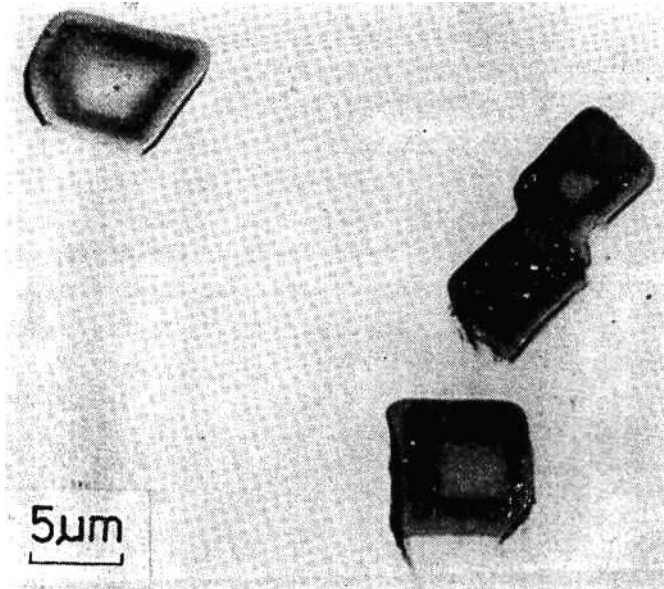
Nerovnosti povrchu výbrusu způsobují *difúzní rozptyl* světla a stávají se viditelnými, dosahuje-li jejich velikost alespoň vlnové délky použitého světla. Tyto nerovnosti mohou vzniknout nestejným odlešfováním strukturních

součástí následkem jejich odlišných mechanických vlastností, krystalografické orientace apod. nebo póry, dutinami a staženinami, přítomnými v kovové matici.

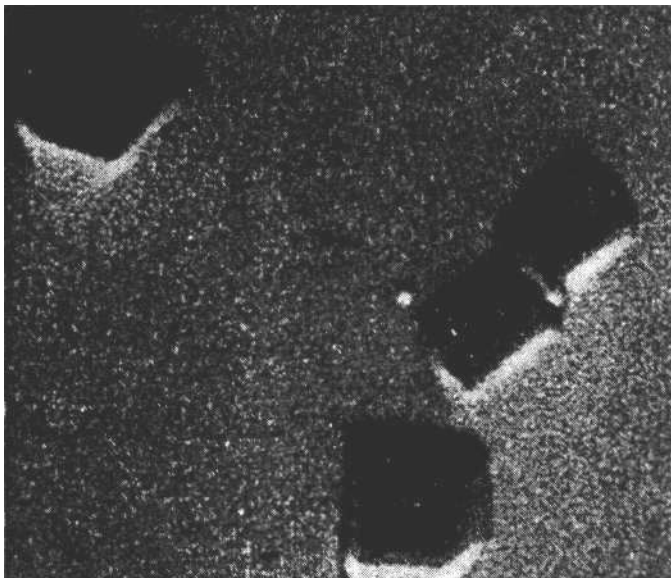


Obr. 3.10. Způsoby osvětlení metalografických vzorků
 a) světlé pole, b) šikmé osvětlení, c) temné pole, d) všestranné šikmé osvětlení
 1 — odražený svazek; 2 — rozptýlený svazek; 3 — objektiv; 4 — osvětlovací svazek;
 5 — zrcadlo

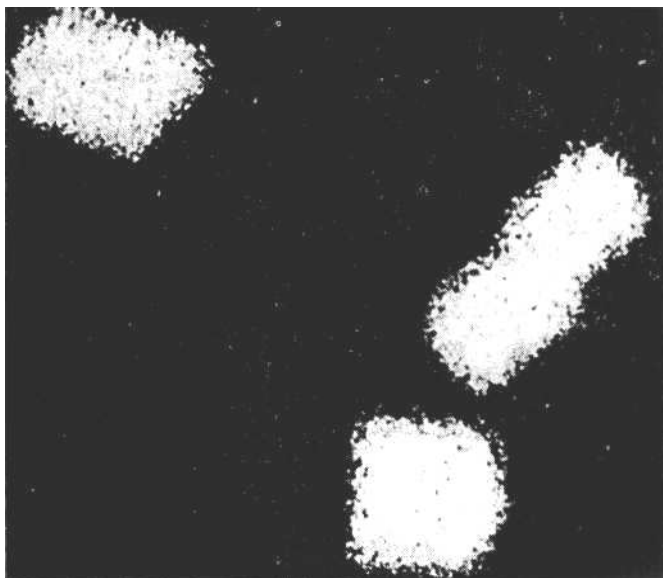
Aby se zvýšil kontrast obrazu při použití metody světlého pole, používá se vzájemného *sladění absorpce a difúzního rozptylu* zmenšením otvoru v aperturní cloně. Tím se odstraní přesvětlení, zmenší podíl rozptýleného světla [8] a zvýší se kontrast podrobností zviditelněných jak následkem absorpce, tak i difúzního rozptylu. Zmenšování otvoru aperturní clony je však účelné jen po určité mez, po jejímž překročení dochází k viditelnému zhoršení rozlišovací schopnosti vlivem klesající apertury osvětlení a ke ztrátě detailů obrazu. Podobného výsledku se dosáhne použitím barevných filtrů (nejčastěji zeleného), neboť v monochromatickém světle může být přesnějším zaostřením zviditelněno více podrobností než v bílém polychromatickém světle [9 až 12].



a)

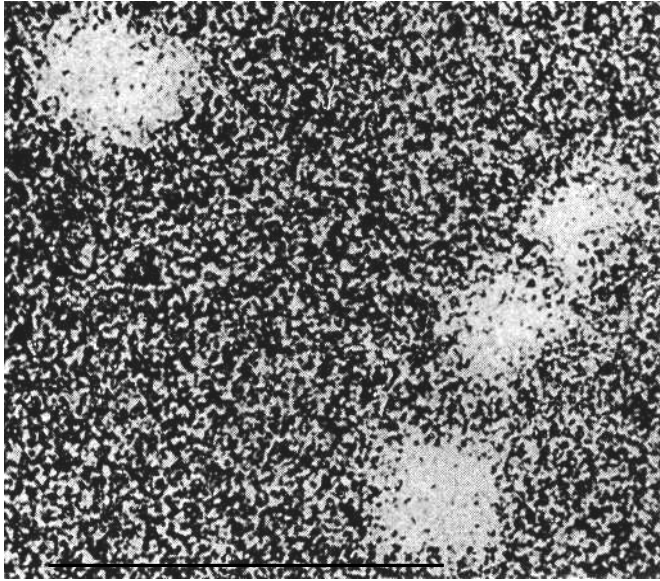


b)

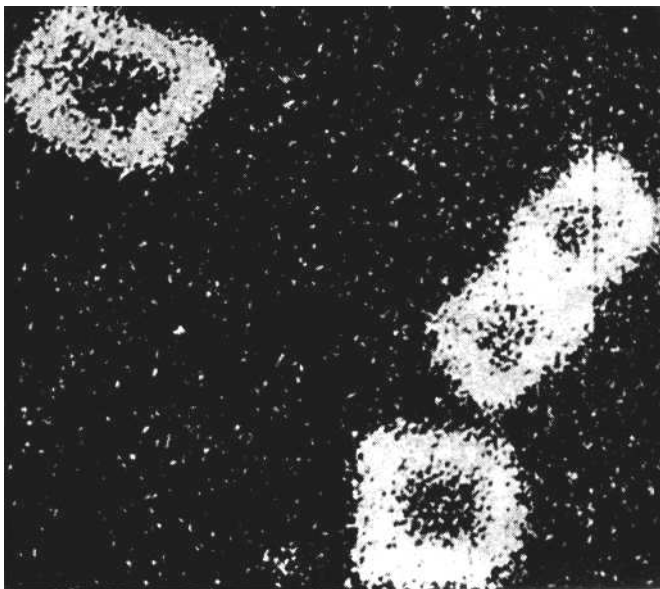


c)

Obr. 3.11. Karbonitridy titanu v austenitické oceli 05Cr17Ni13Ti Neleptaný stav (zvětšeno 2 000krát)
a) světlé pole, b) obraz sekundárních elektronů, c) obraz Ti Ka



d)



e)

Obr. 3.11

d) obraz N Ka, e) obraz C Ka

3.3.2 Šikmé osvětlení

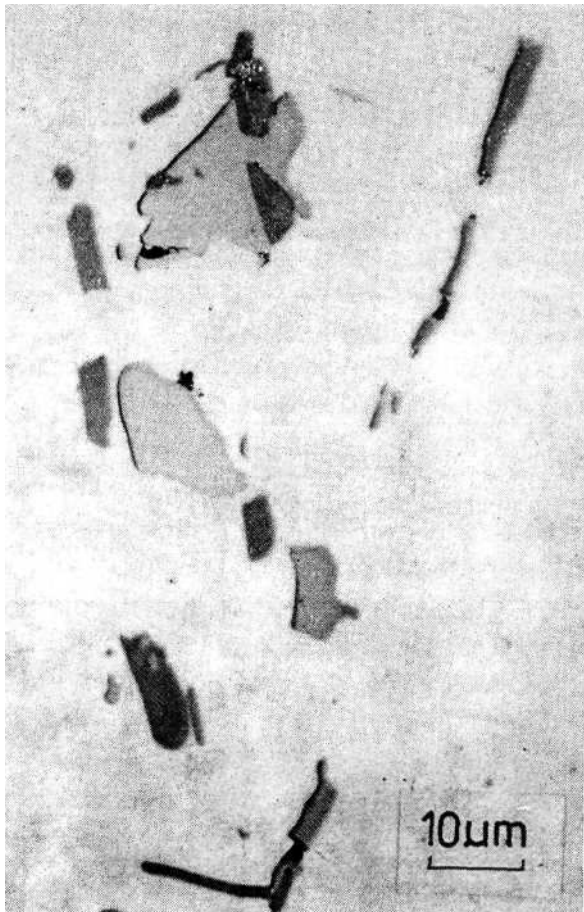
Šikmého osvětlení se dosahuje odkloněním osvětlovacího svazku (jednostranné šikmé osvětlení) (obr. 3.10b), nebo pomocí prstencové clony zacloňující střední část osvětlovacího svazku (obr. 3.10d) (všestranné šikmé osvětlení).

Při jednostranném šikmém osvětlení závisí rozlišitelnost podrobností na výbruse značně na směru dopadajícího světla [3, 8, 9]. Charakter struktury se použitím různého směru šikmého osvětlení mění a je proto vhodné stanovit nejvýhodnější úhel a směr dopadu světla, aby se získal optimální obraz struktury.

Směrový charakter se odstraní použitím osvětlení dopadajícího na výbrus šikmo ze všech stran. Tento způsob umožňuje lepší prostorové znázornění povrchu než světlé pole [8, 13]. Jeho nevýhodou však je, že jsou ve stejné míře zdůrazňovány nerovnosti povrchu vzniklé přípravou výbrusu jako nerovnosti strukturního charakteru. Kónickým šikmým osvětlením se dosáhne nejen zesílení

prostorového dojmu, ale i zvýšení kontrastu. Proto se ho využívá zejména pro zvýraznění slabě kontrastních struktur.

Zvýšení kontrastu je možné jen vzájemným sladěním absorpce a difúzního rozptylu, jakož i zdůrazněním difúzního rozptylu samého. Naproti tomu není uskutečnitelné zvýšení kontrastu změnou absorpce optickou cestou. Teprve použitím technik leptání se mění absorpční schopnost strukturních složek vedoucích k jejich zviditelnění. Přestože se pro hodnocení struktury používá většinou leptaných vzorků, je vhodné pro ohodnocení kvality povrchu výbrusu sledovat i neleptaný stav.



Obr. 3.12. Vměstky v oceli s odlišným koeficientem absorpce. Austenitická ocel 05Cr17Ni13Ti. Světlé pole, neleptaný stav, zvětšení 1 0000krát (M. TOMÁŠOVA). Světřejší částice TiC, tmavší částice TiS

3.3.3 Temné pole

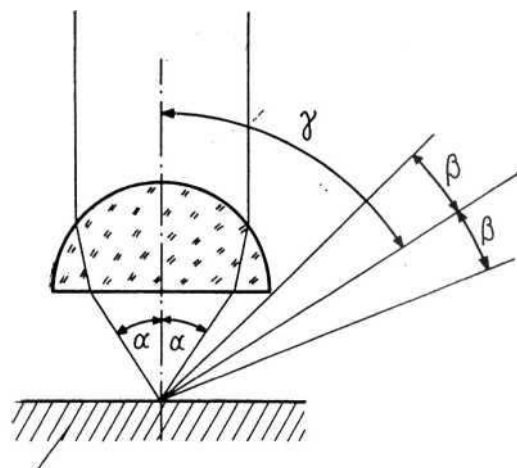
Kontrast obrazu charakteristický pro šikmé osvětlení může být zesílen dalším odkloněním osvětlovacího paprsku od kolmého směru. Jestliže je rozdíl mezi úhlem dopadu γ a aperturním úhlem osvětlovacího kužele α větší než aperturní úhel objektivu α , pak se do objektivu nevrací žádné přímo odražené světlo [6] (obr. 3.13). Toho lze dosáhnout osvětlením buď pomocí kondenzoru vestavěného přímo v objímce objektivu (obr. 3.10c), nebo pomocí kruhové clonky, která propustí pouze okrajové paprsky. Při tomto způsobu osvětlení nedochází k zobrazení povrchu výbrusu odraženým světlem, které prochází mimo objektiv, nýbrž světlem rozptýleným ve směru optické osy mikroskopu.

Použitím metody temného pole vzniká obraz, jehož kontrast je opačný ve srovnání se světlým polem. Podrobnosti na výbruse působící rozptyl světelného paprsku (difúzní rozptyl) se jeví světle a jejich okolí zůstává temné. Tato metoda

přináší užitek zejména v těch případech, kdy mají být zviditelněny strukturní součásti, na nichž je ve světlém poli difúzní rozptyl světla slabý.

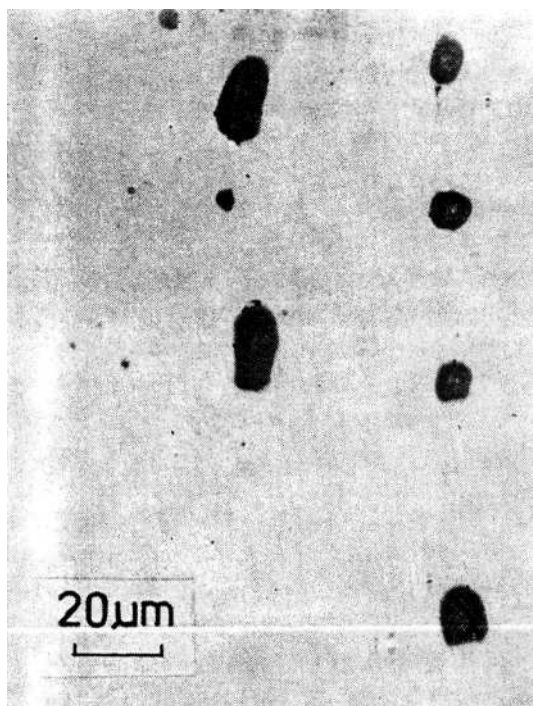
Pozorování v temném poli lze použít jen pro malé zvětšení, neboť intenzita světla vracejícího se do objektivu a tvořící obraz je velmi nízká, a to i při použití silných světelných zdrojů [3].

Rozdíl mezi pozorováním ve světlém a temném poli *záleží* v tom, že ve světlém poli je osvětleno zorné pole, kdežto při osvětlení v temném poli je zorné pole tmavé a osvětlen je *pouze detail působící rozptyl* [3]. Proto mohou být zviditelněny i detaily předmětu, které jsou menší, než je rozlišovací schopnost při pozorování ve světlém poli. Těto výhody temného pole lze využít např. při pozorování jemných nekovových vměstků v oceli (obr. 3.14a, b). Hrubé nekovové



VZOREK

Obr. 3.13. Rozdíl mezi aperturou objektivu a aperturou osvětlení

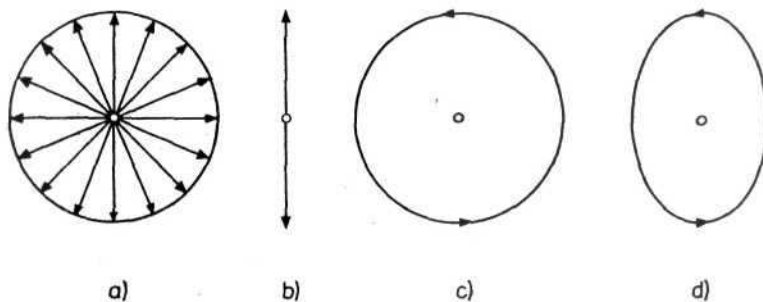


vměstky (obr. 3.14b) se v nepřímém osvětlení temného pole jeví světlejší nebo mají charakteristické zbarvení.

Použití metody temného pole je užitečné především tehdy, když malé difúzně reflektující objekty jako trhlinky, staženiny, vměstky, póry, rysky a dutiny jsou ve světlém poli vlivem přezáření neznatelné. Pozorování v temném poli je výhodné při studiu pochodů probíhajících při korozi povrchů [14], při zviditelňování leptových efektů [15], jakož i při studiu rekrystalizace a fázových přeměn ve vysokoteplotním mikroskopu [16]. Je užitečné i při kontrole kvality výbrusu, neboť zviditelňuje i nejjemnější rysky a počátek vzniku reliéfu při leštění. Využití této metody je úspěšné i u objektů, jejichž povrch je pokryt tenkou průhlednou a zrcadlicí se vrstvičkou, např. tenkou vrstvou transparentních laků [8, 9].

3.3.4 Polarizované světlo

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, v němž kmitající vektory intenzity elektrického a magnetického pole jsou vždy kolmé navzájem i na směr šíření. Viditelné účinky světla jsou spojeny především s intenzitou elektrického pole, a proto bude v dalším ztotožněna jeho kmitová rovina s kmitovou rovinou světelné vlny. II denního světla a většiny druhů umělých světel jsou kmity rozloženy rovnoměrně do všech rovin procházejících paprskem. Takové světlo není polarizováno (obr. 3.15a). Jsou-li kmity omezeny na jedinou rovinu, je světlo *lineárně polarizováno* (obr. 3.15b).



Obr. 3.15. Různé druhy polarizace světla
a) nepolarizované světlo,
b) lineární polarizace,
c) kruhová polarizace,
d) eliptická polarizace

Kromě lineární polarizace může vzniknout následkem kombinace dvou světelných vln se vzájemně kolmými kmitovými rovinami *eliptická polarizace* (obr. 3.15d).

Zvláštním případem eliptické polarizace je *kruhová polarizace*, která vznikne kombinací dvou vln se stejnou amplitudou fázově posunutých o $\pi/2$ nebo jako lichý násobek (obr. 3.15c).

V metalografické praxi se využívá lineárně polarizovaného světla, které vzniká ze světla nepolarizovaného odrazem, dvojlomem nebo absorpcí.

Polarizace odrazem

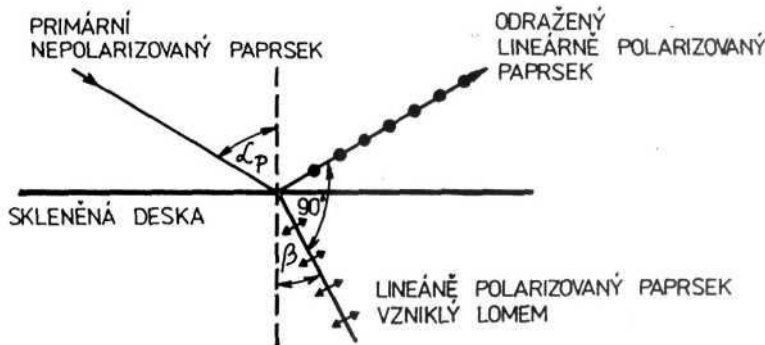
Polarizace odrazem vzniká při dopadu nepolarizovaného světelného paprsku na lesklý povrch (obr. 3.16). Odražený paprsek je částečně polarizován. Kmity nejsou rozloženy rovnoměrně do všech rovin, jejich složky ležící v rovině dopadu jsou částečně potlačeny. Pokud se odraz uskutečňuje na průhledné desce, druhá část paprsku se láme a je rovněž částečně polarizována (obr. 3.16). U průhledné desky dochází však při určitém úhlu dopadu k lineární polarizaci

odraženého paprsku. Tento úhel je určen podmínkou, že odražený a lomený paprsek jsou k sobě kolmé a nazývá se polarizačním úhlem α_p .

Vztah mezi indexem lomu průhledné látky n a polarizačním úhlem se nazývá *Brewsterovým úhlem*.

$$n = \frac{\sin \alpha_p}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha_p}{\sin (90 - \alpha_p)} = \operatorname{tg} \alpha_p$$

kde α_p je polarizační úhel, β — úhel lomu. U obvyklých optických skel se polarizační úhel rovná 57° až 60° .



Polarizace absorpcí

Krystaly většiny barevných látek mají při pozorování v různých směrech odlišné zabarvení. Jestliže se takovýto krystal pozoruje v polarizovaném světle, pak zabarvení vznikající absorpcí procházejícího světla je různé v závislosti na směru kmitání procházejícího světla. Tento jev se nazývá *pleochroismem*. Pleochroická látka s vysokou absorpcí světla kmitajícího v jednom směru a s velmi slabou absorpcí v kolmém směru polarizuje bílé světlo. Kmitová rovina souhlasí se směrem kmitů, pro který je absorpce nejslabší.

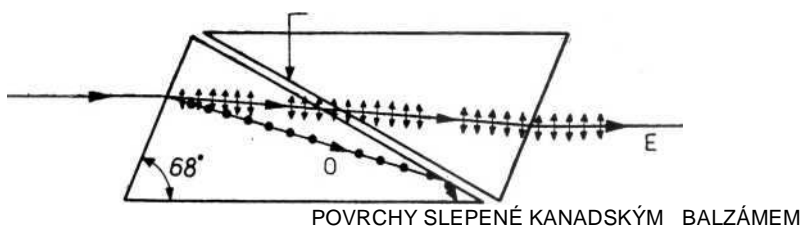
Polarizace dvojlomem

Z hlediska polarizace je nutno rozlišovat mezi látkami izotropními a anizotropními. Světlo se v izotropních látkách šíří všemi směry stejnou rychlostí, kdežto v látkách anizotropních se šíří v odlišných směrech různou rychlostí. Plyny, kapaliny, amorfní látky, jako je např. sklo a látky s kubickou strukturou, jsou vesměs opticky izotropní. Opticky anizotropní látky jsou dvojlomné, to znamená, že světlo procházející krystalem takovéto látky se štěpí do *dvou lineárně polarizovaných paprsků*, které se lámou pod odlišnými úhly. Směry kmitů obou paprsků jsou vzájemně kolmé a nezávislé na kmitání primárního světla.

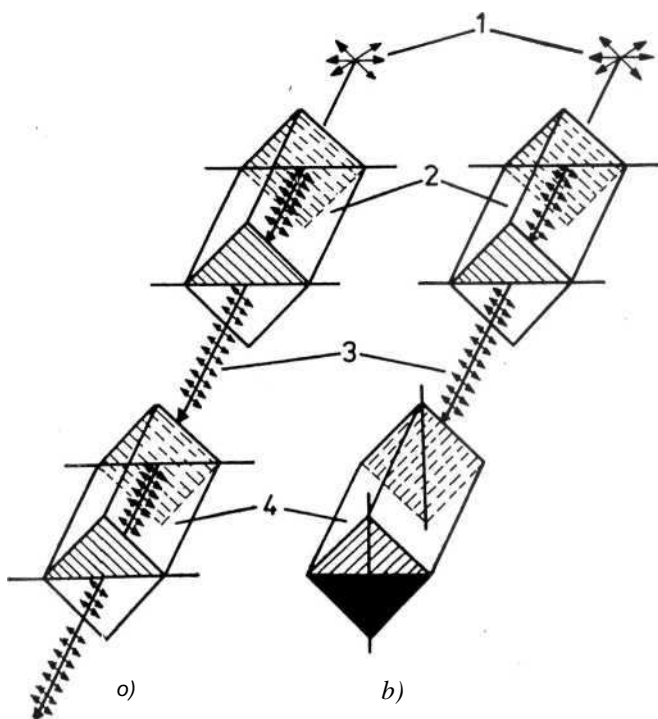
Každý z těchto dvou paprsků prochází krystalem charakteristickou rychlostí odlišnou od rychlosti paprsku druhého. Pro jeden paprsek (popřípadě pro oba, podle toho, ke které soustavě krystal náleží) je index lomu v různých směrech různý. Tento paprsek nazýváme mimořádným.

Lineárně polarizované světlo pro mikroskopii se získává nejčastěji pomocí dvojlomného krystalu islandského vápence, který je upraven tak, že odstraní jeden z obou polarizovaných paprsků. Takto upravený krystal se nazývá *Nicolův hranol* nebo též krátce *nikol* [3]. Krystal se seřízne tak, že má délku rovnou

trojnásobné šířce. Původní úhel 71° přirozených přímých rovin se zmenší na 68° . Kolmo na zbrúšené stěny se krystal rozřízne (obr. 3.17) a plochy se po vyleštění opět slepí kanadským balzámem. Dopadne-li světelný paprsek na jednu ze zbrúšených ploch, rozkládá se na dva paprsky, a to na řádný O a mimořádný E (obr. 3.17). *Paprsek řádný*, protože je odkloněn více, se na rozhraní vápenec--kanadský balzám úplně odrazí. *Mimořádný paprsek* prochází nezměněně oběma krystaly (obr. 3.17) a vystupuje na druhém konci krystalu ve stejném směru, v němž dopadl [3]. Oba paprsky, jak řádný, tak mimořádný, jsou rovinně polarizovány, ale ve směrech vzájemně kolmých.



Obr. 3.17. Polarizace světla nikolem



Obr. 3.18. Průchod světelných paprsků nikoly
a) rovnoběžnými,
b) zkříženými
1 — nepolarizovaný dopadající svazek;
2 — polarizátor;
3 — polarizovaný svazek;
4 — analyzátor

Dopadá-li na nikol obyčejné světlo kmitající všemi směry, prochází z každého kmitu pouze jedna složka v rovině rovnoběžné s polarizační rovinou nikolu (obr. 3.18).

Umístí-li se za nikol 2 nikol 4 (obr. 3.18a) v takové poloze, aby jejich polarizační roviny byly totožné, pak světelný paprsek polarizovaný nikolem 2 prochází nikolem 4 bez zábran. Pootočí-li se nikolem 4 o úhel 90° , jsou polarizační roviny obou krystalů na sebe kolmé a světelný paprsek nemůže procházet nikolem 4 (obr. 3.18b). Nikol 2 je v tomto případě polarizátorem, který světlo polarizuje, a nikol 4 se nazývá analyzátor [3].

V polarizační mikroskopii lze analyzátozem obvykle otáčet od 0 do 90° a „úhel pootočení je zjistitelný na úhloměru. Vlastní vyšetření strukturní

součásti se děje při zkřížených nikolech, kdy jsou polarizační roviny obou nikolů na sebe kolmé. Otáčeli-li se nyní vzorkem o 360° a strukturní součástka je jednolomná, zůstane zorné pole tmavé. Jde-li o strukturní součástku dvojlomnou, zasvítí v určitém úhlovém oboru při otáčení [3] a v určitém úhlovém oboru zůstane tmavá. Jsou-li její kmitové roviny souhlasné s kmitovými rovinami polarizátoru a analyzátoru, nemůže analyzátozem projít žádné světlo. Při otáčení o 360° se toto ztemnění pozoruje čtyřikrát. Nejsou-li tyto roviny souhlasné, potom dvojlomná částice rozloží lineárně polarizovaný paprsek ve dva kmitající v navzájem kolmých rovinách a pohybující se různými rychlostmi. Složka každého z nich souhlasná s kmitovou rovinou analyzátoru může projít. Obě spolu interferují a následkem různého fázového rozdílu pro různé vlnové délky bílého světla dojde k vyhasnutí některých barev a zesílení jiných. Částice jeví interferenční barvy. V některých případech není tento jev pozorovatelný ani u dvojlomné látky. Je to způsobeno buď takovou krystalovou orientací pozorovaného objektu, že jeho optická osa souhlasí s osou mikroskopu, nebo je pozorovaná součástka tak slabě dvojlomná, že množství světla nestačí vyvolat rozsvětlení zorného pole. V takovém případě se mezi polarizátor a analyzátor vloží tenká sádrovcová destička, jejíž polarizační roviny svírají s polarizačními rovinami zkřížených nikolů úhel 45° . Tato destička posunuje šedé interferenční barvy slabě anizotropních látek do oblasti pro oko zřetelnějších zbarvení.

Nároky na kvalitu výbrusů jsou při pozorování polarizovaným světlem velmi vysoké, neboť jakékoli nerovnosti, znečištění a vrstvičky na povrchu ovlivňují polarizaci odrazem a tím mohou potlačit efekty anizotropie. V tomto případě jsou chemické nebo elektrochemické metody leštění výhodnější, neboť při nich nevzniká vrstva deformovaného kovu (může však vznikat vrstva oxidů).

Aplikace polarizovaného světla

Technice polarizovaného světla by se mělo v metalografii věnovat více pozornosti než dosud. Ke kvantitativnímu hodnocení se této metody použilo především v *transmisní mikroskopii* v oblasti petrochemie a biologie. Možnosti kvantitativního hodnocení lze však se stejným úspěchem využít i v *reflexní mikroskopii* kovových materiálů.

Problematice využití polarizovaného světla v metalografii byla věnována řada prací a monografií [17, 18]. V této práci uvedeme krátce jen přehled některých možností aplikace.

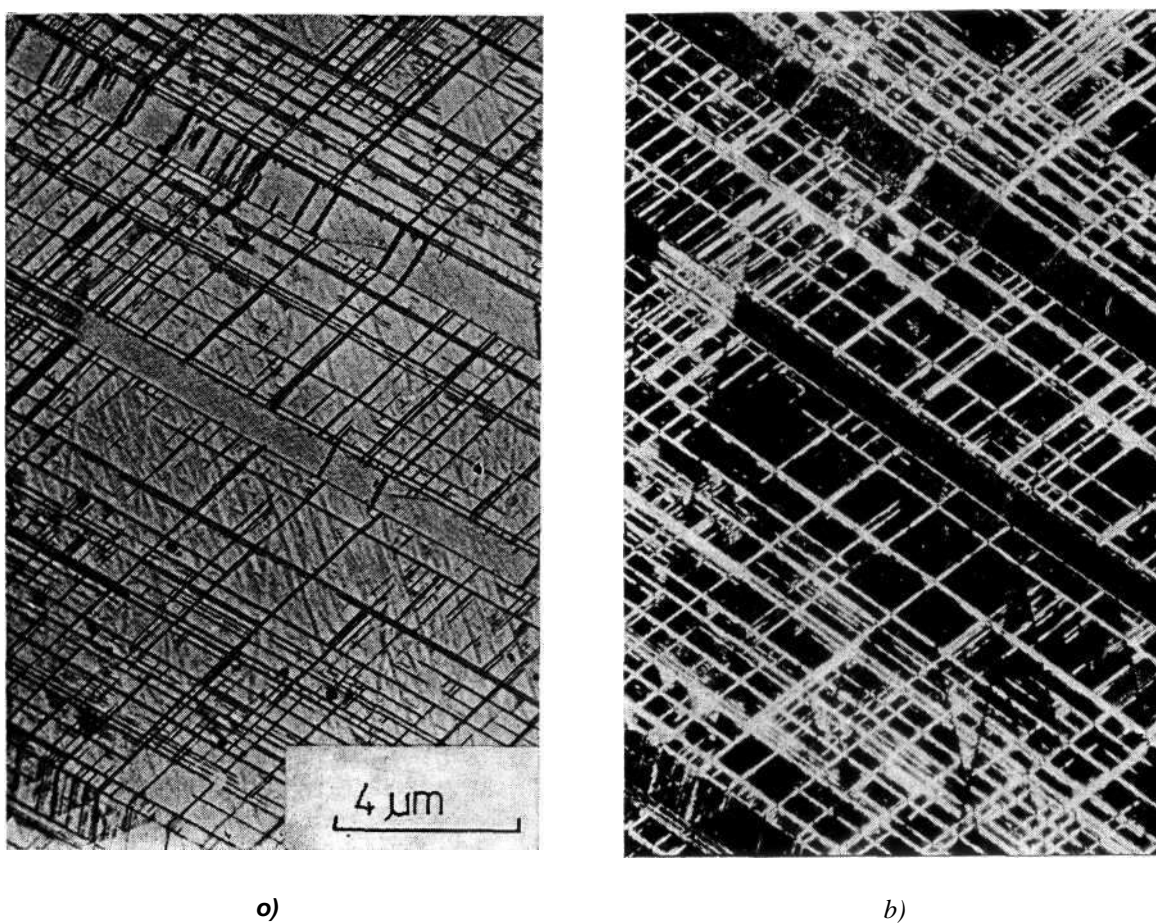
Hlavní oblastí uplatnění polarizovaného světla v metalografii je *stanovení orientace zrn* kovových materiálů. Kubické kovy jsou opticky izotropní a jejich povrch odráží kolmo dopadající polarizované světlo beze změny. V tomto případě není mezi jednotlivými zrny v intenzitě odraženého světla rozdíl. Pro zviditelnění rozdílu orientace jednotlivých zrn je proto nutno povrch kubických kovů buď hluboce naleptat, nebo zaktivovat tenkou povrchovou vrstvou oxidů nebo zplodin kovu.

Při hlubokém naleptání vznikají na povrchu kovů leptové důlky, jejichž tvar a orientace závisí na krystalové orientaci zrna [19, 20]. Šikmé plochy těchto důlků způsobují, že kolmé osvětlení je elipticky polarizováno. Odlišný geometrický charakter důlků na povrchu různých zrn ovlivňuje intenzitu odraženého světla procházejícího analyzátozem a umožňuje určení krystalové orientace zrn [4].

Intenzita odrazu a polarizace světla na opticky anizotropních látkách závisí na orientaci krystalů. Proto má u anizotropních polykrystalických kovů v polarizovaném světle různě orientované zrno odlišné zbarvení nebo intenzitu světla. Efekt anizotropie může být zesílen vytvořením tenké vrstvičky na po-

vrchu kovu, například oxidací [21, 22]. Tohoto příznivého vlivu se využívá zejména u hliníku a jeho slitin, kde se pozorování v polarizovaném světle uskutečňuje na anodicky oxidovaném povrchu [23]. Podobně i tenké vrstvy sulfidů usnadňují pozorování různé orientace zrna mědi [24] a korozní vrstvičky zviditelňují zrna monelu [25] a fosforového bronzu [26].

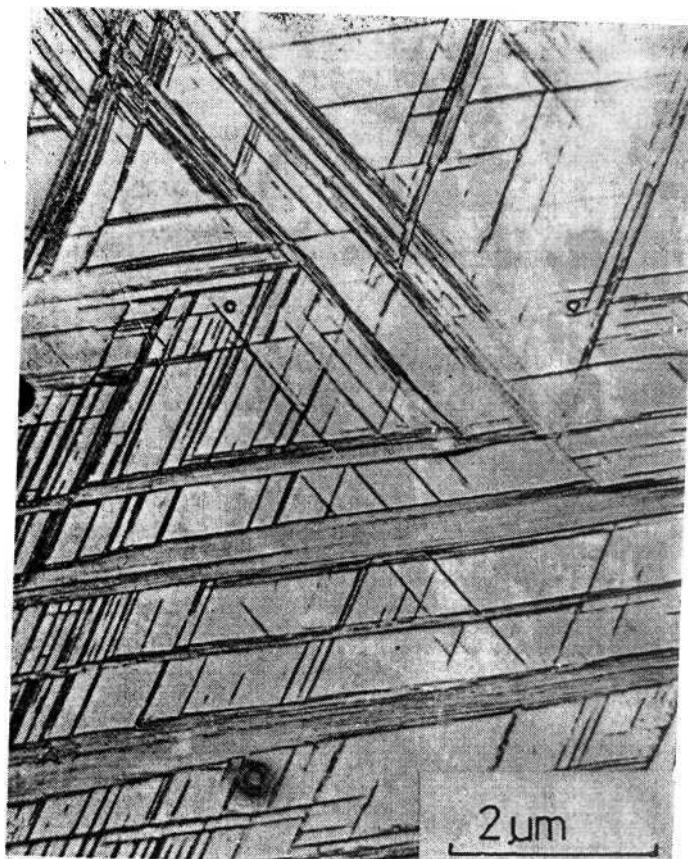
Kromě jednorázových struktur umožňuje polarizované světlo zviditelnění i *směsi fází* (obr. 3.19). U mnohofázových struktur přináší polarizované světlo proti světlému poli dodatečné možnosti fázového rozlišení [27]. Tímto způsobem lze v neleptaném nebo leptaném stavu rozlišit opticky anizotropní a izotropní strukturní složky. Na základě různé intenzity efektu anizotropie lze pomocí polarizovaného světla rozlišit více opticky anizotropních fází. Dokonce je možné i rozlišení dvou opticky izotropních fází v lineárně polarizovaném světle tehdy, když jsou tyto fáze rozdílně naleptány (obr. 3.20) nebo jsou rozdílně náchylné k vytvoření tenké povrchové korozní vrstvičky.



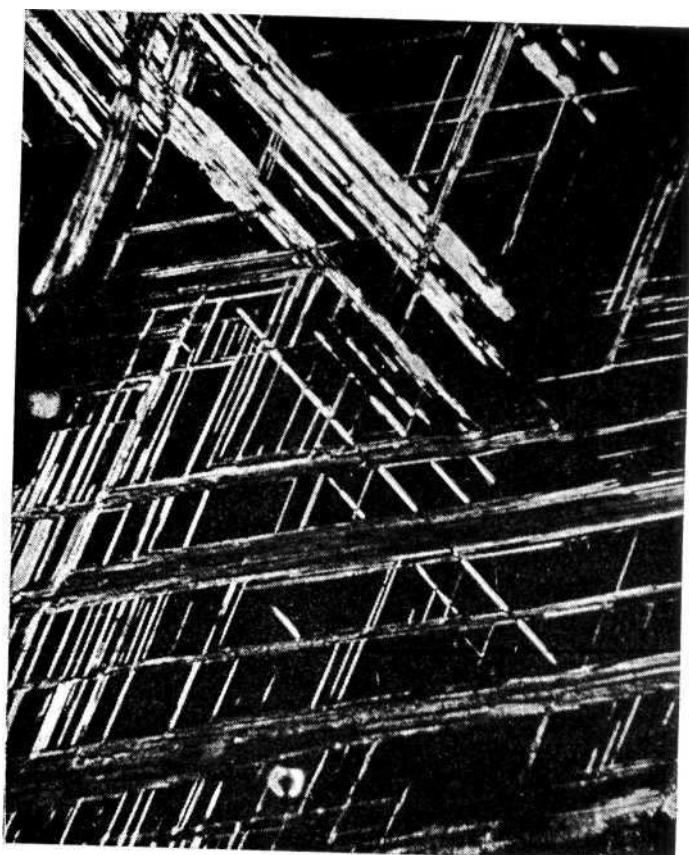
Obr. 3.19. Zobrazení mikrostruktury ve světlém a polarizovaném světle. Austenitická ocel 09Mn17Cr7V (17 482 podle ČSN); základní austenitická hmota s jehlicovitě vyloučenou fází a) světlé pole, b) polarizované světlo (V. ORŠOVSKÝ)

Metoda pozorování v polarizovaném světle se uplatňuje i při studiu některých *povlakových materiálů*, například galvanicky nanesených vrstev na uhlíkových ocelích, oxidových vrstviček na hliníku a povlaků grafitu nebo oxidu hlinitého na palivových Článcích pro jadernou techniku [28, 29].

Jevu polarizace světla odrazem se využívá rovněž k *fázové identifikaci*



o)

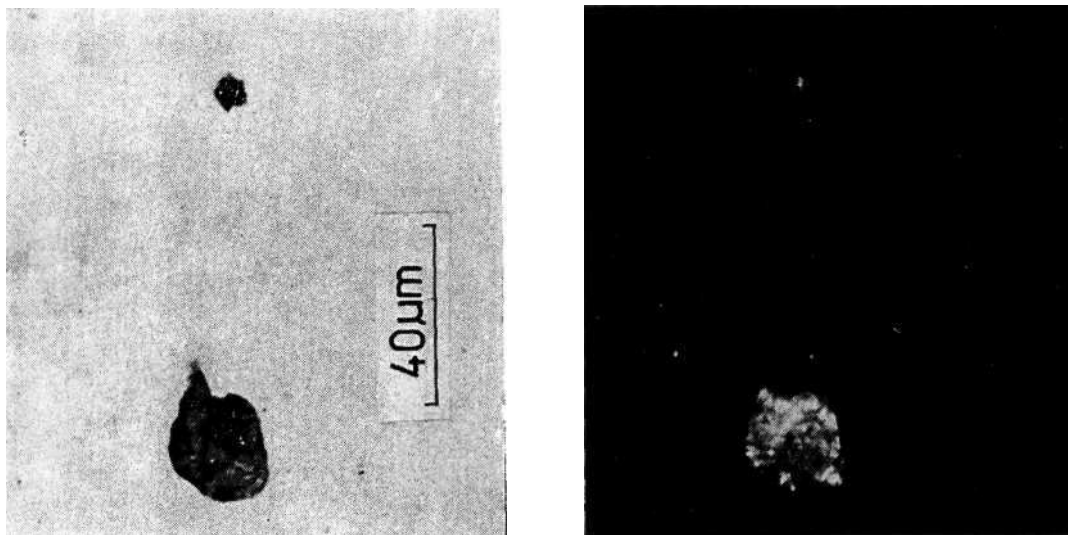


b)

Obr. 3.20. Zobrazení mikrostruktury ve světlém a polarizovaném světle. Austenitická ocel 09Mn17Cr7V (17 482 podle CSN); základní austenitická hmota s jehlicovitě vyloučenou fází e
a) světlé pole,
b) polarizované světlo
(V. ORŠOVÝ)

nekovových vměstků. Některé z těchto vměstků jsou opticky anizotropní a lze je na základě zabarvení nebo efektu anizotropie přesně definovat (obr. 3.21), Kvalitativní stanovení oxidových a sulfidových vměstků v ocelích provedl pomocí polarizovaného světla A. M. PORTEVIN [30] a M. BAEYERTZ [31]. Vměstky v litině jsou stejnou metodou identifikovány v pracích [30, 32].

V poslední době se uskutečňují i kvantitativní měření odrazivosti v lineárně polarizovaném světle, o nichž bude pojednáno v kap. 3.3.7.



Obr. 3.21. Komplexní oxidový vměstek v oceli 10Cr18Ni9 Neleptaný stav,
a) světlé pole: tmavé oblasti SiO_2 (odrazivost s_a 5,5), světlé oblasti $\text{Cr}^{\wedge}\text{O}_a$ (odrazivost
b) polarizované světlo (M. TOMÁŠOVA).

3.3.5 Fázový kontrast

Metoda fázového kontrastu, která byla poprvé publikována F. ZERNIKEM v roce 1935 [33], se nejvíce uplatnila v prozařovací mikroskopii při zvyšování kontrastu a rozlišení podrobností biologických objektů [4]. Pro pozorování neprůhledných materiálů v dopadajícím světle se používá méně, ale přesto přináší řadu výhod zejména při *zviditelňování nerovnosti povrchu*.

Fázový kontrast je důležitou metodou pro zvýšení kontrastu a je založen na interferenci fázově posunutých vln, podobně jako interferenční techniky umožňující měření malých rozdílů optických drah vzniklých odrazem od nerovností povrchu nebo rozdíly indexu lomu průhledných látek.

Jak bylo popsáno již v kapitole 3.3.1, mohou být ve světlém poli rozlišeny pouze strukturní součásti s rozdílnými hodnotami absorpce a difúzního rozptylu viditelného světla. Odražené vlny se proto odlišují v amplitudách, popřípadě intenzitě. Malé rozdíly v geometrii povrchu pozorovaného objektu, jakož i rozdílné hodnoty lomu světla pramenící z fyzikálních vlastností jednotlivých strukturních složek při konstantních hodnotách absorpce, nemohou být okem ve světlém poli rozlišeny. Výškové rozdíly, jakož i rozdíly koeficientu lomu, způsobují fázové rozdíly mezi vlnami odraženého světla, které lze metodou fázového kontrastu převést na rozdíly intenzit, a tím i zviditelnit [8 až 12]. Fázovým kontrastem lze zviditelnit výškové rozdíly na povrchu objektu od nejmenší hodnoty mezi 1 až 5 nm [35], ale nelze je touto metodou změřit.

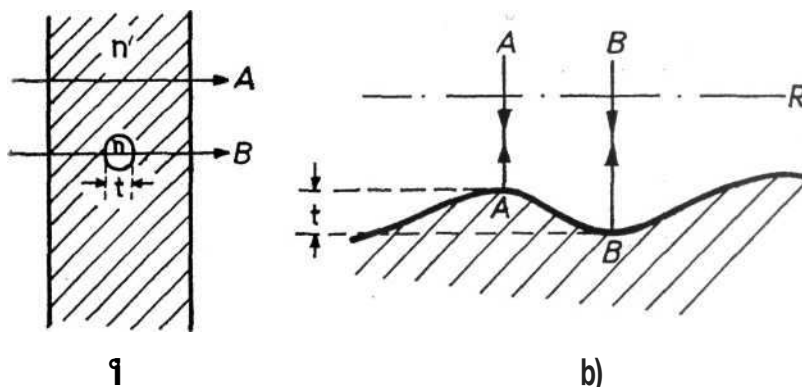
Princip metody

Je-li v průhledné vrstvě s indexem lomu n' přítomna malá oblast (např., vměstek) tloušťky t s indexem lomu n (obr. 3.22a), pak rozdíl v délce optické dráhy A a B je dán výrazem [4]

$$A = (n' - n)t \text{ rozdíl}$$

fáze Φ je vyjádřen

$$\Phi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$$



Obr. 3.22. Podmínky vzniku fázového kontrastu a) průchodem, b) odrazem

Uvažujeme-li odraz světla od povrchu neprůhledného objektu, který není absolutně rovný, například od naleptaného povrchu kovového vzorku (obr. 3.22b), pak rozdíl optické dráhy dvou paprsků A a B je dán rozdílem (t) vzdáleností dvou bodů A a B ležících na povrchu vzorku od srovnávací roviny R . Za předpokladu, že změna fáze odrazem je v obou bodech stejná, pak rozdíl fáze Φ obou paprsků je

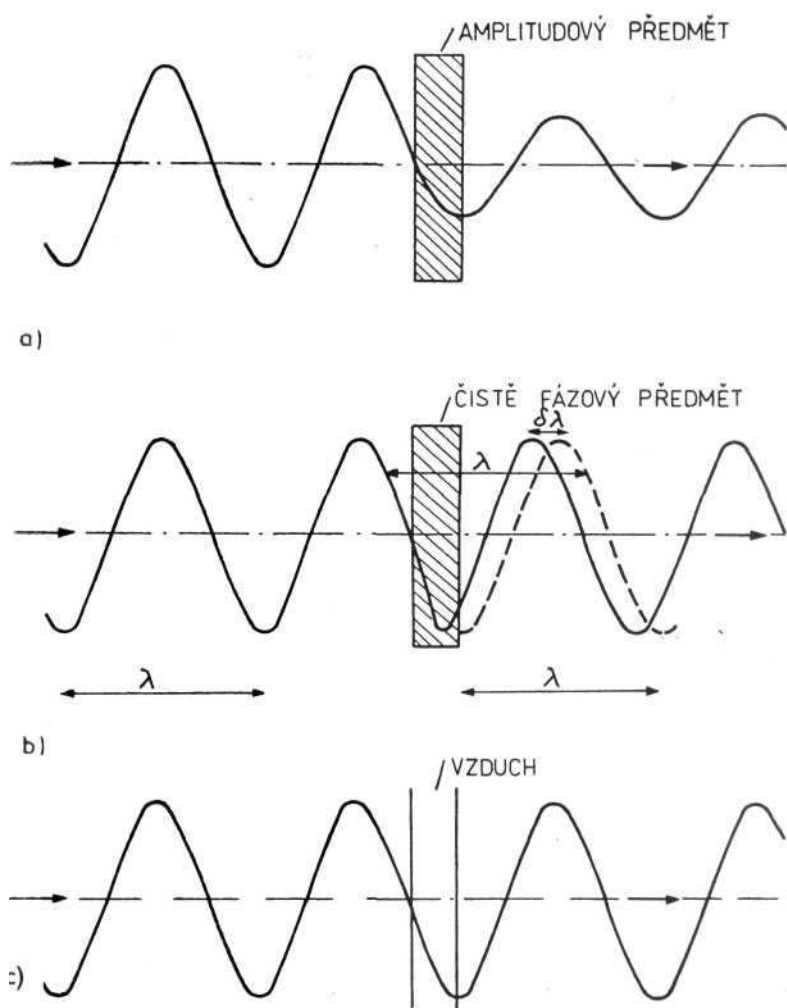
$$\Phi = 4\pi \frac{t}{\lambda}$$

Tento fázový rozdíl Φ lze zviditelnit prostřednictvím fázového kontrastu a velikost fázového posuvu měřit pomocí interferenčního kontrastu.

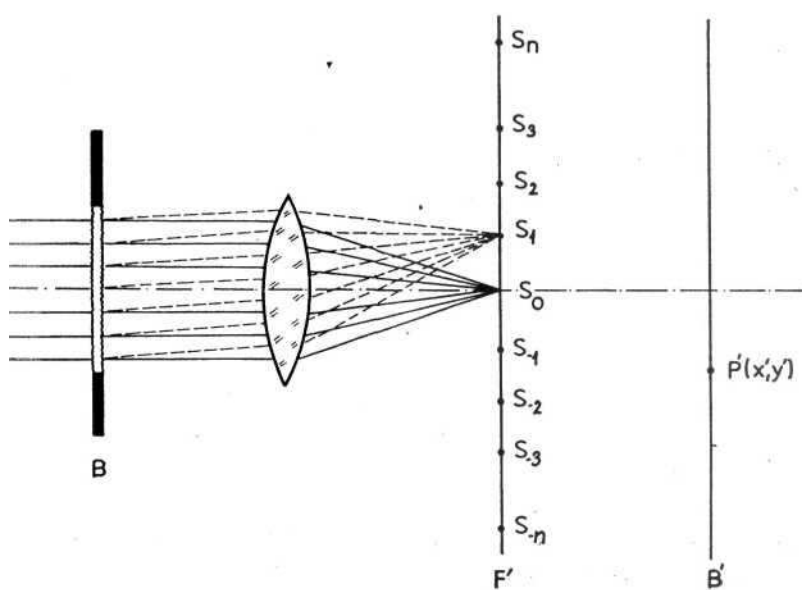
U absorpčního kontrastu se mění amplituda, a tedy i intenzita světla, ale jeho fáze je nezměněna (obr. 3.23a, c). Naproti tomu u objektu působícího změnu fáze vlny (například nerovnost povrchu objektu) nedochází ke změně její amplitudy. Vlna na obr. 3.23b má stejnou amplitudu jako vlna na obr. 3.23c, je však fázově posunuta o hodnotu $\delta\lambda$ (obr. 3.23b).

Aby byl fázový rozdíl zviditelněn, je třeba převést ho nějakým způsobem na změnu amplitudy. Podrobný výklad mechanismu tohoto převodu je velmi složitý a přesahuje rámec této knihy. Hlavní myšlenky lze však vysvětlit poměrně jednoduše.

Podle Abbeho teorie zobrazení [37] je možné uvažovat každý vzorek za difraktující, to je vytvářející v ohniskové rovině objektivu difrakční spektra nultého až n -tého řádu (obr. 3.24). Ke všem těmto spektrům přispívají všechny osvětlené části vzorku, z nichž vstupují paprsky do objektivu, ale v různé míře. Abychom dosáhli věrného zobrazení vzorku, musí do bodu obrazu dospět paprsky



Obr. 3.23. Průchod rovinné vlny čistě amplitudovým předmětem (a), čistě fázovým předmětem (b) a vzduchem (c)



Obr. 3.24. Difrakční spektrum předmětu v ohniskové rovině objektivu
 B — rovina vzorku, F' — ohnisková rovina objektivu, B' — obrazová rovina objektivu

z co největšího počtu řádů spekter, tedy alespoň z těch, jejichž intenzita je podstatná.

Uvažujme rovinnou vlnu s jednotkovou amplitudou osvětlující vzorek. Vyjádříme ji funkcí

$$\exp(2\pi ikr)$$

kde k je vlnový vektor mající směr šíření vlny a velikost $k = 1/\lambda$ a r je polohový vektor bodu. Zvolíme souřadný systém s osou rovnoběžnou s optickou osou soustavy a počátek těsně za vzorkem. V rovině $z = 0$ můžeme pak v případě bez vzorku pro rovinnou vlnu psát

$$\exp[2\pi i(k_x x + k_y y)] = V_0(x, y)$$

Položíme-li na rovinu vzorek, potom v oblasti jeho geometrického stínu bude rovinná vlna modifikována a můžeme ji vyjádřit jinou funkcí $V(x, y)$.

Poměr
$$F(x, y) = \frac{V(x, y)}{V_0(x, y)}$$

se nazývá *přenosovou funkcí vzorku*. Je-li vzorek čistě amplitudový, potom $F(x, y)$ je reálná funkce. Je-li vzorek čistě fázový, pak $|F| = 1$ a můžeme $F(x, y)$ psát ve tvaru

$$F(x, y) = \exp[i\Phi(x, y)]$$

kde $\Phi(x, y)$ je reálná funkce.

Při věrném zobrazení bude intenzita v obrazovém bodě $P'(x', y')$, odpovídajícím bodu vzorku $P(x, y)$, dána vzorcem

$$I = C^2 |F|^2$$

kde C je konstanta daná zobrazovacím systémem.

Je-li vzorek *čistě fázový*, je intenzita v obraze konstantní a obraz nemá kontrast. Za předpokladu, že $\Phi(x, y)$ je malé vůči 1, to znamená, že fázové změny jsou malé (slabý fázový předmět), můžeme $F(x, y)$ rozvinout v řadu, v níž se omezíme na první dva členy.

$$F(x, y) = 1 + i\Phi(x, y)$$

V tomto výrazu představuje první člen přímo procházející světlo, které je soustředěno v oblasti nultého spektra (S_0 na obr. 3.24). Druhý člen představuje světlo difraktované a to je z největší části rozloženo v oblasti mimo nulté spektrum. Zakryjeme ohniskovou rovinu v oblasti nultého spektra fázovou destičkou, která mění fázi procházejícího světla o $\pm\pi/2$, popřípadě může i absorbovat. První člen v rovnici násobíme tedy činitelem $a \exp(\pm i\pi/2) = \pm ia$, kde a představuje snížení amplitudy absorpcí. Místo skutečného fázového předmětu dostaneme pomyslný amplitudový předmět

$$G(x, y) = \pm ia + i\Phi(x, y)$$

Při věrném zobrazení bude intenzita v bodě obrazu

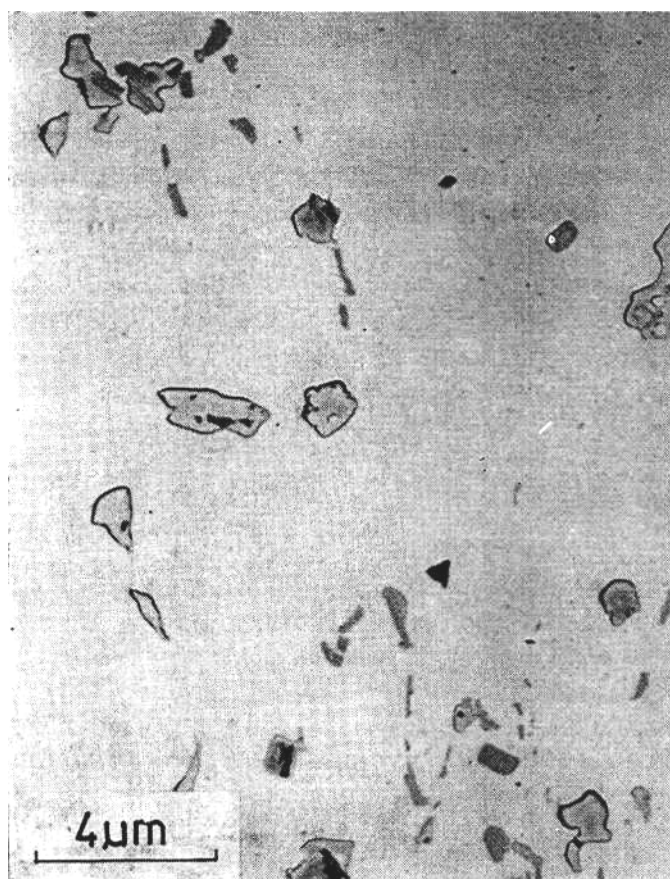
$$I = C^2 |G|^2 \approx a^2 \pm 2a\Phi(x, y)$$

zanedbáme-li člen s druhou mocninou $\Phi(x, y)$ jako malý. Kontrast v obraze se potom rovná poměru obou členů $\pm 2\Phi(x, y)/a$ a je úměrný fázovému posunutí způsobenému vzorkem. Znaménko $+$ odpovídá tak zvanému pozitivnímu kontrastu, přičemž oblasti s větší optickou tloušťkou jsou světlé na tmavém pozadí. Znaménko $-$ odpovídá negativnímu kontrastu, který je opačný.

Aby se dosáhlo dobrého rozlišení při praktickém provedení zařízení pro fázový kontrast, nepoužívá se v kondenzoru clony se středovým kruhovým otvorem, při níž je nulté spektrum rovněž kruhové v optické ose soustavy. Místo ní se volí osvětlení odpovídající cloně ve tvaru mezikruží a nulté spektrum má v ohniskové rovině rovněž tvar mezikruží.

Aplikace fázového kontrastu

Příklady použití metody fázového kontrastu v metalografii jsou uvedeny v pracích [26, 34, 35, 36] a dalších. Tato metoda je výhodná pro zviditelnění nepatrných stupňů nebo nerovností na povrchu kovového vzorku, vzniklých například při deformaci nebo zkouškách únavy. S její pomocí se mohly rozlišit nepatrné vyvýšeniny nebo prohlubně na naleptaných hranicích zrn oceli, u níž byla vyvolána popouštěcí křehkost [34]. Fázového kontrastu lze rovněž použít při studiu otisků sejmutých z naleptaného povrchu vzorku [4]. Fázového kontrastu se použilo při studiu velmi jemných pokluzů při krípu [38] a vlivu deformace za studena na vznik povrchového reliéfu, při studiu popouštěcí křehkosti, tvorby dvojčat v hořčíku a charakteru svaru mezi sklem a kovem.



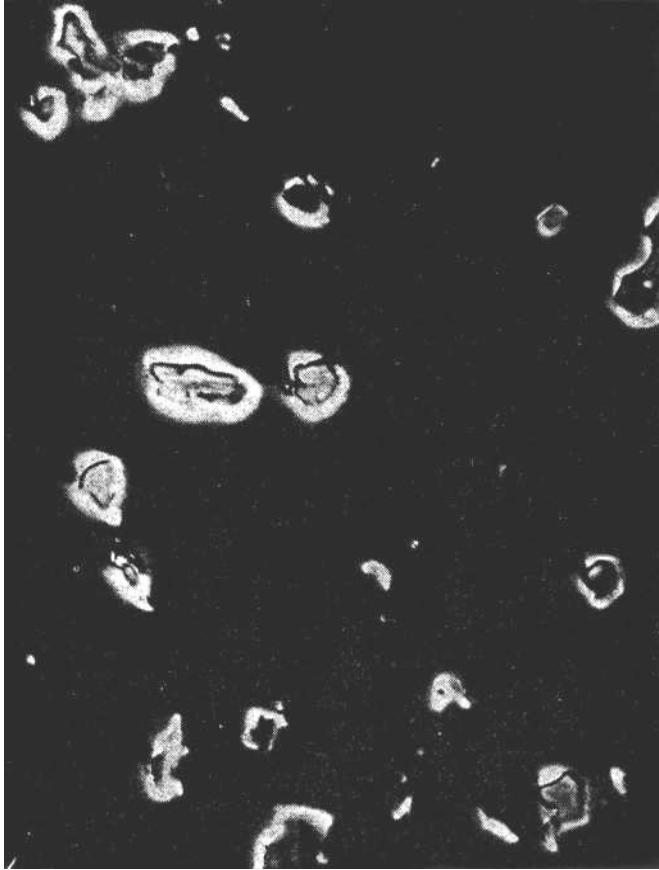
a)

Obr. 3.25. Vměstky v austenitické oceli 05Cr17Ni13Ti. Neleptaný stav, a) světlé pole: světlé částice TiC, tmavé částice TiS

Využití této metody umožnilo rozlišit karbidy a fázi *a* ve feritických chromových ocelích, karbidy a sulfidy v austenitické Cr—Ni oceli s přísadou titanu (obrázek 3.25), jakož i identifikaci fáze *o* v austenitu [39]. Fázový kontrast se dále uplatnil při studiu struktury uhlíkových ocelí [40, 41], legovaných martenzitických [40] a austenitických ocelí [27, 42], jakož i vytvrditelných ocelí rychlořezných [43]. Leptáním se může kontrast jednotlivých strukturních složek dále zvýšit [26],

jak bylo prokázáno při studiu popuštěných ocelí, perlitické struktury šedé litiny a struktury slitin neželezných kovů [26, 39].

Metody fázového kontrastu se použilo i při studiu struktury ve vysoko-teplotním mikroskopu [44].



b)

Obr. 3.25
b) fázový kontrast
(M. TOMÁŠOVA)

3.3.6 Interferenční mikroskopie

Interferenčních mikroskopických metod se používá již delší dobu ke zvýšení kontrastu obrazu. V současné době vzrůstá jejich význam zejména při studiu topografie povrchu a při kvantitativním hodnocení povrchového reliéfu.

Interferenční mikroskopie dává zcela nové informace o povrchu objektu, které nelze jinými metodami světelné mikroskopie získat. Je to umožněno zejména vysokou rozlišovací schopností při studiu nerovností povrchu ve směru optické osy mikroskopu. Principem této techniky je hodnocení interference mezi paprskem odraženým od studovaného povrchu a paprskem odraženým od srovnávacího povrchu. V určitých případech může být referenční povrch částí povrchu studovaného.

Interferenční mikroskop je kombinace světelného mikroskopu a interferometru spojených v jeden celek. V současné době je propracována a vyrábí se řada technicky dokonalých typů interferenčních mikroskopů. Tyto různé mikroskopy podrobně popsal i W. KRUG, J. RIENOTZ a G. SCHULZ [45], V metalografii se nejvíce uplatňuje dvoupaprskový interferenční mikroskop.

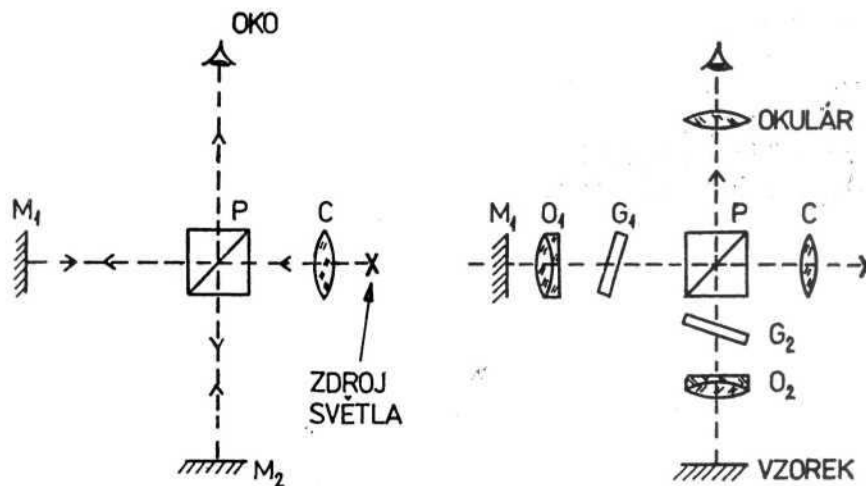
Ve všech druzích interferometrů se primární světelný paprsek štěpí do dvou nebo více paprsků, které se po proběhnutí rozdílných optických drah znovu

spojují a navzájem interferují. Protože optická dráha závisí na dráze geometrické a na indexu lomu prostředí, jímž světelný paprsek prochází, umožňuje interferenční mikroskopie měřit buď rozdíly v geometrické dráze paprsku (jestliže obě části rozštěpeného paprsku procházejí stejným prostředím), nebo v hodnotách indexů lomu, je-li geometrická dráha stejná, ale oba paprsky procházejí prostředím s rozdílným indexem lomu. Jednotkou, kterou se uvedené rozdíly měří, je vlnová délka použitého světla.

V dalších statích budou popsány některé základní typy interferenčních mikroskopů [4].

Interferometrie pomocí dvou světelných paprsků

Princip Zeissova interferenčního mikroskopu využívajícího nepolarizovaného světla je znázorněn na obr. 3.26a. Světlo ze zdroje prochází čočkou G a štěpí se s hranolem P do dvou paprsků dopadajících na zrcadlicí plochy M_1 a M_2 . Po reflexi od obou ploch se oba paprsky znovu spojují do jediného svazku a dochází k interferenci. Jestliže jsou odrazové plochy M_1 a M_2 vzájemně kolmé a nejsou úplně stejně vzdáleny od středu hranolu P , pak bude dráha obou paprsků různá a zorné pole bude světlé nebo tmavé podle jejich fázové difference. Jestliže nebudou obě odrazové plochy na sebe kolmé, ale jedna z nich bude od kolmého směru nepatrně odkloněna, projeví se vlivem interference obou paprsků v zorném poli mikroskopu soustava rovnoběžných tmavých a světlých interferenčních proužků ve vzdálenostech odpovídajících rozdílu optických drah rovnému polovině vlnové délky použitého světla.



Obr. 3.26. Princip Zeissova interferenčního mikroskopu se dvěma paprsky
 C — čočka; P — hranol; M_1 , M_2 — zrcadlicí plochy; G_1 , G_2 — skleněné destičky;
 O_1 , O_2 — objektiv

V praxi je jednou z reflexních ploch povrch studovaného objektu (obrázek 3.26b). V tomto případě je důležité, aby sledovaný povrch měl dostatečnou odrazivost, aby tedy oba paprsky měly srovnatelné amplitudy. Aby se dosáhlo optimálních podmínek interference, jsou do optického systému znázorněného na obr. 3.26b zahrnuty i skleněné destičky G_1 a G_2 . Vzdálenosti interferenčních proužků lze regulovat naklápěním jedné z destiček, směr proužků se ovlivní rotací destičky.

Ze vzájemné vzdálenosti interferenčních proužků lze posuzovat sklon povrchu objektu. Nerovnosti na povrchu se projeví zakřivením proužků. Stupně na povrchu způsobí posun proužků.

Popsaný Zeissův interferenční mikroskop je představitelem techniky porovnání pozorovaného objektu s rovným referenčním povrchem. *Interferenční mikroskop Nomarského* [46, 47] je představitelem techniky, při níž se porovnávací paprsek rovněž odráží na pozorovaném povrchu. Osvětlovací svazek je lineárně polarizován polarizátorem a dopadá na vzorek. Po odrazu prochází objektivem a dopadá na Wollastonův hranol umístěný v obrazové ohniskové rovině objektivu. Polarizované světlo se v hranolu rozkládá na dva paprsky navzájem kolmo lineárně polarizované a šířící se různými směry. Kmitové roviny paprsků jsou stočeny proti kmitové rovině polarizátoru o 45° . Výsledek je, že navzájem kolmo polarizované složky dvou paprsků dopadajících na hranol pod dvěma poněkud odlišnými úhly vystupují z hranolu jako jeden paprsek. Malý náklon paprsků v obrazové ohniskové rovině objektivu je však ekvivalentní malému posunu v rovině vzorku. Ke každému bodu obrazu přispívají tedy *paprsky ze dvou bodů vzorku*. Jejich vzájemná vzdálenost je tím větší, čím větší je vzájemný náklon obou paprsků vyvolaný Wollastonovým hranolem. Obě složky paprsku vycházejícího z hranolu jsou přivedeny k interferenci analyzátozem, jehož kmitová rovina souhlasí s kmitovou rovinou polarizátoru.

Intenzita v každém obrazovém bodě je potom výsledkem interference paprsků odražených od dvou bodů předmětu. Kromě toho dochází i ke zdvojení obrazu. Podle vzdálenosti bodů předmětu, které přispívají k vytvoření jednoho obrazového bodu, tj. velikosti zdvojení, rozlišujeme *diferenciální interferenční kontrast a polarizační interferenční mikroskopii*. Při diferenciálním interferenčním kontrastu je zdvojení menší než rozlišovací schopnost mikroskopu a není v obraze patrné. Relativní výškové rozdíly na povrchu vzorku nelze měřit, ale kontrast nerovnosti je značně zvýšen ve srovnání s pozorováním ve světlém poli. Při polarizační interferenční mikroskopii je velikost zdvojení větší než rozlišovací schopnost mikroskopu a zdvojení je pozorovatelné. Relativní výškové rozdíly na povrchu lze změřit z tvaru proužků, má-li vzorek alespoň části povrchu dostatečně rovné. Proužky na obraze spojují místa stejného výškového rozdílu povrchu (měřeno ve směru zdvojení obrazu). Posuvem hranolu lze v určitých mezích měnit velikost zdvojení a nastavit optimální podmínky kontrastu.

Aby se využila celá apertura osvětlení, prochází při praktickém provedení mikroskopů i osvětlovací svazek Wollastonovým hranolem. To, že polarizované světlo je již před dopadem na vzorek rozštěpeno na dvě složky, nijak neovlivní popsanou funkci mikroskopu.

Nevýhodou Nomarského uspořádání proti Zeissovu mikroskopu je, že každý bod studovaného povrchu je srovnáván s okolím a ne s přesně definovanou referenční plochou. Hodnocení povrchového reliéfu je proto jen relativní.

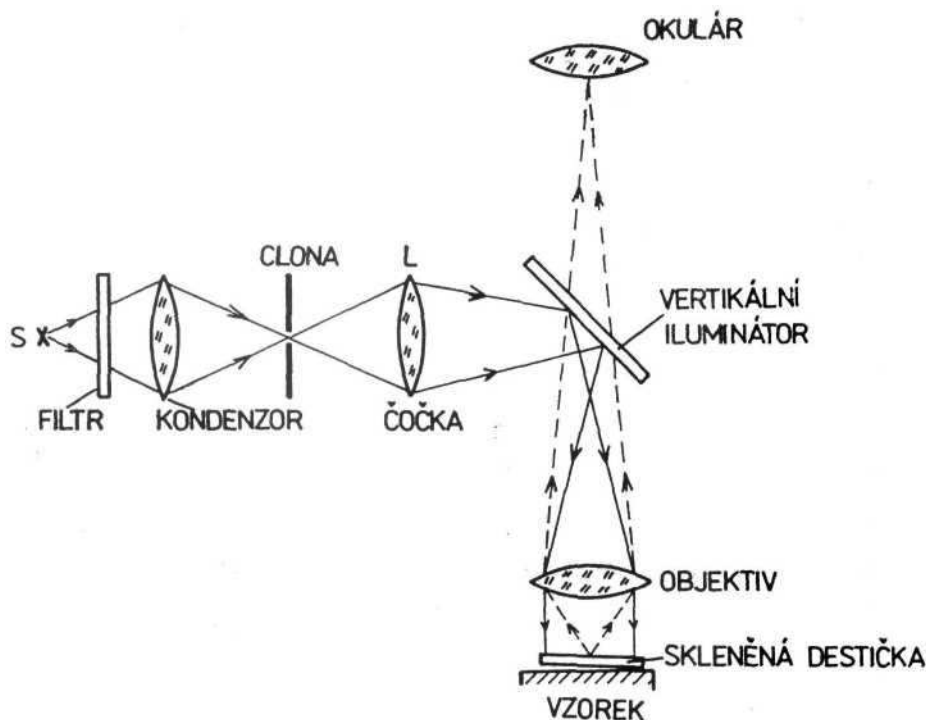
Při použití monochromatického světla mají interferenční proužky světlý a tmavý kontrast. Při použití bílého světla jsou střední černé proužky po obou stranách doprovázeny barevnými pruhy, jejichž intenzita klesá ve směru od středu.

Interferometrie pomocí více světelných paprsků

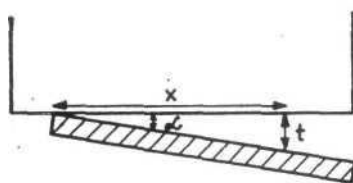
Techniku interferometrie více světelnými paprsky vyvinul a popsal S. TOLANSKI [48 až 50]. Metalografické mikroskopy umožňující využití této techniky vyrábí například firma E. Leitz.

Princip optické soustavy je znázorněn na obr. 3.27. Monochromatické světlo

ze zdroje S prochází kondenzorem, irisovou clonou a čočkou L , dále po odrazu od vertikálního iluminátoru prochází objektivem a dopadá kolmo na povrch vzorku. Z obrázku 3.27 vyplývá, že světlo ještě před dopadem na vzorek prochází skleněnou destičkou mající určitý malý sklon k povrchu vzorku. Stříbrem napařený povrch této rovinné destičky je umístěn v těsné blízkosti zkoumaného povrchu. Napařená vrstvička (tloušťky $\approx 50\text{nm}$) má odrazivost okolo 0,90, tzn. že odráží 90 % primárního světla. Mezi povrchem rovinné destičky a povrchem vzorku se uskuteční mnohonásobná reflexe, přičemž po každém odrazu projde napařenou vrstvičkou část světla a interferuje s paprskem, který se přímo odráží od vrstvičky stříbra [4].



Obr. 3.27. Optický systém vícesvazkové interferometrie
 S — zdroj monochromatického světla



Obr. 3.28. Geometrie mnohonásobného odrazu

x — vzdálenost od vrcholu úhlu α ;
 α — úhel mezi rovinnou destičkou a povrchem vzorku; $t = x \operatorname{tg} \alpha$

Vznik velkého počtu vzájemně interferujících paprsků má za následek, že interferenční proužky jsou mnohem ostřejší než při použití rovinné destičky bez napařené stříbrné vrstvičky, které odpovídá interference dvou paprsků.

Interferencí paprsků dochází k jejich zesílení, je-li rozdíl dráhy $2t$ (na obr. 3.28) roven $m\lambda$, kde m je celé číslo a λ je vlnová délka použitého světla. Z obrázku 3.28 vyplývá, že

$$t = x \operatorname{tg} \alpha$$

kde α je úhel mezi rovinnou destičkou a povrchem vzorku,
 x — vzdálenost od vrcholu úhlu α .

Zesílení interferencí se uskuteční, když

$$x \operatorname{tg} \alpha = \frac{m\lambda}{2} ml$$

V souhlase s tím se vytvoří řada rovnoběžných interferenčních proužků vzdálených navzájem o $\Delta x = (\lambda/2) \cot g \alpha$.

Zmenšováním sklonu destičky, tj. úhlu α , vzhledem k povrchu vzorku, zvětšují se vzdálenosti mezi proužky a úměrně s tím se zvyšuje citlivost metody při stanovování velmi malých nerovností povrchového reliéfu.

Za mezní hodnotou výškových rozdílů identifikovatelnou interferenční metodou Nomarského se považuje převýšení 1 nm. Je-li však povrch vzorku velmi nerovný, stávají se interferenční proužky difúzními a metoda ztrácí na citlivosti.

Aplikace interferometrických metod

Interferenční mikroskopy umožňují při pozorování v dopadajícím světle sledovat nejjemnější reliéfy na povrchu objektu. Proti mechanickým metodám měření nerovností má interferenční mikroskopie výhodu vysoké citlivosti. Výhodou interferogramu je, že kromě výškových rozdílů reliéfu znázorňuje současně i plošný obraz struktury, kdežto výsledkem mechanických měřicích metod jsou jednotlivé profilové diagramy.

Kromě aplikace při hodnocení kvality opracovaných povrchů umožňuje interferenční mikroskopie stanovit nejjemnější změny povrchového reliéfu následkem plastické deformace, fázových přeměn a korozních pochodů.

Interferenční mikroskop se dále uplatní při studiu morfologie leptových důlků nejrůznějšího druhu. Jednou z metod hodnocení hustoty dislokací je naleptání jejich průsečíků s povrchem vzorku za vzniku leptových důlků. Tvar a hloubka těchto důlků umožňují blíže charakterizovat sklon dislokací k povrchu.

Podle charakteru leptových důlků je možno hodnotit i účinek chemického působení na zrna různé orientace. Zejména z hlediska koroze je důležité stanovit odolnost zrn s různou orientací vůči vlivu různých korozních prostředí. Opačně lze z charakteru a tvaru leptových důlků odvodit krystalografickou orientaci zrna. Ve světlém poli lze krystalografickou orientaci zrn stanovit jen tehdy, mají-li leptové důlky charakteristickou symetrii. Naproti tomu interferenční mikroskop umožňuje proměřit kterýkoli leptový důlek a tím stanovit orientaci kteréhokoli zrna.

Na povrchu kobaltových slitin se železem je možno zviditelnit strukturu feromagnetických domén leptáním [51]. Pomocí interferenční mikroskopie bylo prokázáno, že reliéf vznikající leptáním je důsledek hlubšího plošného naleptání domén a že Blochovy stěny jsou leptáním mnohem méně napadány než domény.

Interferenční mikroskopie se široce uplatňuje i při měření tloušťek ve vakuu napařených kovových vrstev.