

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
=====

V LIBERCI
=====

Fakulta strojní - Katedra sklářství a keramiky
=====

H A B I L I T A Č N Í P R Á C E

GEOMETRIE A RYCHLOST RŮSTU PRIMÁRNÍCH KRYSTALŮ PŘI
SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM.

Předkládá: Ing. Jaroslav B E L D A , CSc

Liberec, 1977

O b s a h

1. Úvod
2. Studijní část
 - 2.1 Princip svařování pod tavidlem
 - 2.2 Šíření tepla při svařování
 - 2.3 Svarová lázeň (SL)
 - 2.3.1 Velikost a tvar SL
 - 2.3.1.1 Výpočet podle Rykalina v rovině $z = 0$
 - 2.3.1.2 Výpočet dle Mastrjukové
 - 2.3.1.3 Výpočet podle Rykalina pro prostor
 - 2.3.1.4 Výpočet metodou parametru tvaru
 - 2.3.1.5 Experimentální stanovení SL
 - 2.3.1.5.1 Vylitím tavné lázně
 - 2.3.1.5.2 Odsátím tavné lázně
 - 2.3.1.5.3 Filmováním SL, prozářené rentg. paprsky
 - 2.3.1.6 Vlivy na velikost a tvar SL
 - 2.3.1.7 Zhodnocení metod stanovení velikosti a tvaru SL
 - 2.4 Geometrie a rychlost růstu primárních krystalů (PK)
 - 2.4.1 Primární krystalizace
 - 2.4.1.1 Přechlazení tavné lázně
 - 2.4.1.2 Vznik krystalizačních zárodků
 - 2.4.1.3 Růst PK
 - 2.4.1.3.1 Teorie
 - 2.4.1.3.2 Druh a tvar PK
 - 2.4.1.3.3 Velikost PK
 - 2.4.1.3.4 Chemická nestejnoročnost

2.4.2 Směr růstu primárních krystalů

2.4.3 Výpočet geometrie a rychlosti růstu PK

2.4.3.1 Výpočet geometrie rychlosti růstu PK

v rovině $z = 0$, pro svařování koncentrovaným, rychle se pohybujícím zdrojem tepla

2.4.3.1.1 Výpočet pro polonekonečný prostor a náhradu IK elipsou

2.4.3.1.2 Výpočet pro jednovrstvý tupý svar desek a náhradu IK elipsou

2.4.3.1.3 Výpočet z obecné rovnice IK

2.4.3.2 Výpočet geometrie a rychlosti růstu PK v prostoru, pro svařování koncentrovaným, rychle se pohybujícím zdrojem tepla

2.4.3.2.1 Výpočet pro SL tvaru elipsoidu

2.4.3.3 Zhodnocení metod výpočtu geometrie a rychlosti růstu PK

3 Experimentální část

3.1 Stanovení geometrie a rychlosti růstu PK při svařování PT

3.1.1 Informativní zkoušky

3.1.1.1 Závěry z informativních zkoušek

3.1.2 Návrh nové metody

3.1.2.1 Experimentální stanovení SL

3.1.2.1.1 Sklopné vylévací zařízení

3.1.2.1.2 Pracovní postup

3.1.2.2 Náhrada skutečné SL soustavou bodů

3.1.2.2.1 Snímací zařízení

3.1.2.2.2 Pracovní postup

3.1.2.3 Program výpočtu

3.1.2.3.1 Stanovení souřadnic prostorových os PK

3.1.2.3.2 Stanovení rychlosti růstu PK

3.1.2.3.3 Sled vstupních dat a výstup výsledků

3.1.3 Ověřovací zkouška

3.1.3.1 Experimentální stanovení SL

3.1.3.2 Náhrada SL CAL soustavou bodů

3.1.3.3 Vyhodnocení záznamu ze samočinného počítače MINSK 22

3.1.3.3.1 Geometrie růstu PK

3.1.3.3.2 Rychlost růstu PK

3.1.3.4 Metalografické stanovení geometrie růstu PK

3.1.3.5 Zhodnocení naměřených výsledků

3.1.4 Faktory snižující přesnost měření a hodnocení

4. Závěr

5. Seznam použité literatury

6. Použité zkratky a značky

7. Seznam příloh

1. Ú v o d

Stavba výrobních strojů ve specializaci "stroje pro chemický, potravinářský a spotřební průmysl" doznala v posledním období bouřlivý rozvoj. V souladu se směrnicemi hospodářského a sociálního rozvoje naší společnosti, které vytýčil XV. sjezd KSČ v minulém roce, je třeba rychlého uvádění progresivních výsledků vědeckotechnického bádání do výrobní praxe. Z hlediska užšího odborného zaměření je tomu tak i ve sklářském a keramickém průmyslu.

Zavádění nových progresivních technologií do praxe je z hlediska kvalitativních a kvantitativních potřeb velmi náročné a je podmíněno především dalším rozvojem stavby jednoúčelových strojů a zařízení. Je pochopitelné, že tak vysoké předsevzaté úkoly lze plánovitě uskutečňovat jen v rámci daných výrobních možností. Výrobní možnosti lze ale zvyšovat.

Jednou z cest zvyšování dané výrobní kapacity je důsledné uplatňování technologičnosti konstrukcí jednoúčelových strojů a zařízení, ve které se stále více uplatňují konstrukce svařované. Při svařování samém je ale rovněž třeba uplatňovat ty nejvýkonnější způsoby svařování a svařovací stroje, aby realizace uvedeného záměru byla co největší.

Svařování pod tavidlem (PT) patří k nejosvědčenějším a nejvýkonnějším způsobům svařování. Z hlediska produktivity práce má svařování PT velké přednosti oproti způsobům svařování s odkrytým obloukem /1,2/. Vyznačuje se velkou intenzitou a hustotou svařovacího proudu, čímž vzniká velká svařovací lázeň se značným průvarem a podíl nataveného základního materiálu ve svařovém kovu bývá až 80 % /3/.

Relativní význam svařování PT se ve srovnání s ostatními vysoce produktivními metodami svařování upevnil a rozsah jeho použití bude v nejbližších letech stále stoupat /4/.

Nové výzkumy v oblasti svařování PT ukazují, že současnou hranici výkonu této metody lze značně překročit a produktivitu svařování zvýšit /5/. Problém, který je třeba v této souvislosti řešit, je zvyšování svařovací rychlosti /4 až 10/. Se zvyšováním svařovací rychlosti ale úzce souvisí nepříznivý součinitel tvaru svaru, zvýšené nebezpečí vzniku metalurgických vad a zhoršení mechanických vlastností svaru /5, 11 až 17/.

Těmto negativním jevům je možno při daných podmínkách čelit především ovládnutím primární krystalizace svařového kovu. Zejména geometrie a rychlost růstu primárních krystalů jsou při tom rozhodujícími činiteli /18, 19 (str. 603), 20 až 23/. Zmíněná problematika je proto předmětem intenzivního výzkumu.

Ka stanovení geometrie a rychlosti růstu primárních krystalů je řada výpočetních metod, při čemž poměrně jednoduché výpočetní metody, avšak se zjednodušujícími předpoklady, jsou značně nepřesné a metody přesnější jsou velmi složité a zdlouhavé a přesto nereprodukuje skutečnost do té míry, jak bychom od nich očekávali.

V předložené práci je uveden rozbor nedostatků stávajících výpočetních metod, návrh a ověření nové, poměrně nenáročné experimentálně výpočetní metody, s využitím analogového počítače MINSK 22, která umožňuje objektivněji a ve větší šíři stanovit geometrii a rychlost růstu primárních krystalů při svařování PT.

Cílem předložené práce není pouze technický záměr pokázat v hlubším dílčím pohledu na možnosti zproduktivnění výroby svařovaných konstrukcí a tím i rozvoje výroby zejména jednoúčelových strojů a zařízení, ale je zde uvedena i jedna z forem spojení studia na VŠST v Liberci s praxí, neboť řada dílčích prací byla řešena v rámci odborné praxe posluchačů IV. a V. ročníku, diplomových prací a soutěže

studentské vědecké odborné činnosti. V průběhu této výchovné spolupráce byl naplňován i záměr uplatňování světónázorové výchovy v odborné výuce, neboť prováděný dílčí výzkum vycházel a navazoval především na výsledky výzkumu vědeckovýzkumných prací sovětských vědců, kteří jsou v této odborné oblasti nejdále na celém světě. Jsou to vědecké kolektivy v čele s akademikem N. N. Prochorovem a akademikem E.O. Patonem.

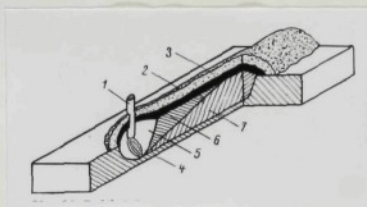
Předložená habilitační práce vyplynula z mých dřívějších prací před rokem 1973 a její náplň je v důsledku toho, v rámci mé současné specializace - stavba sklářských a keramických strojů, poněkud obecnějšího zaměření.

Pro dokreslení obrazu o mé vědeckovýzkumné práci od roku 1974 v přímém odborném zaměření na stavbu sklářských a keramických strojů, přikládám dvě závěrečné technické zprávy, týkající se bezprostředně uvedené specializace. Je v nich řešena problematika - 1. modelování tvarování válcových nátrubků Js 1000 odstředivým litím ze skloviny SIMAX, 2. chlazení forem nového vysokokapacitního řadového stroje na výrobu lahví. Na řešení obou uvedených úkolů se podíleli i pracovníci katedry sklářství a keramiky, studenti v odborné praxi IV. a V. ročníku specializace stavba sklářských a keramických strojů, studentské vědecké odborné činnosti a diplomových pracích. Oba úkoly jsou pro svou důležitost hospodářského a sociálního rozvoje naší společnosti rovněž příležitostmi pro formování světového názoru našich studentů, přičemž dosažených technických výsledků a obou výzkumných pracovišť k těmto účelům vybudovaných na katedře sklářství a keramiky je využíváno ve výuce naší specializace stavba sklářských a keramických strojů a rovněž i pro osobní odborný růst pracovníků katedry sklářství a keramiky.

2. Studijní část

2.1 Princip svařování PT

Svařování pod tavidlem probíhá pod vrstvou tavidla, které se po roztavení zužastňuje spolu s roztaveným základním materiálem a svařovacím drátem metalurgických pochodů v tavné lázni. Schematický náčrt tohoto pochodu udává obr. 1 /24/



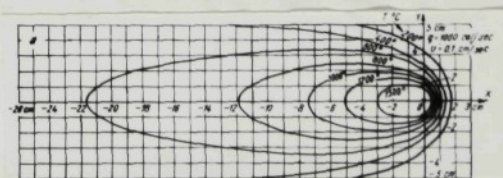
- 1 - svařovací drát, 2 - tavidlo,
3 - struska, 4 - el.oblouk,
5 - prostor vyplněný parami a plyn
6 - svařová lázeň, 7 - ztuhlý svar
kov,

Obr.1 - podélný řez
svarem

2.2 Šíření tepla při svařování

N.N. Rykalin /25/ vytvořil teorii šíření tepla při obloukovém svařování, podle které je možno stanovit teplotu libovolného místa v okolí svaru. Aby bylo možno šíření tepla při svařování vyjádřit matematicky, byla zavedena řada zjednodušujících předpokladů :

1. zdroj tepla se uvažuje jako bodový (koncentrovaný)
2. tepelné konstanty materiálu jsou nezávislé na teplotě
3. tepelná vodivost je ve všech směrech stejná
4. fázové přeměny nejsou endo ani exotermické



Obr. 2

Pro bodový, rychle se pohybující zdroj tepla odpovídá každému bodu prostoru v příslušném okamžiku určitá teplota. Vytvoří se tak teplotní pole (soustava izoterm) (obr.2), které je možno matematicky vyjádřit :

pro prostor $F = f(x, y, z, t)$ (1),

v rovině ($z = 0$, obr.2) $F = f(x, y, t)$ (2),

při čemž souřadnice x, y, z jsou funkcí času t .

Izoterma při svařování neohraničeného tělesa, bodovým, rychle se pohybujícím zdrojem tepla je podle [25, 19, 26] určena :

pro prostor $T(y, z, t) = \frac{q}{2\pi\lambda v_s t} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{4at}\right)$... (3),

v rovině ($z=0$)... $T(y, t) = \frac{q}{2\pi\lambda v_s t} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right)$ (4),

v rovině ($z=0$)

pro plech tloušťky δ $T(y, t) = \frac{q}{2v_s \delta \sqrt{\pi\lambda c \gamma} t} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right)$.. (5)

při čemž: q - efektivní výkon svař.oblouku (cal sec^{-1})

$$q = \eta_v \cdot \eta_{ef} \cdot 0,24 UI$$

η_v = součinitel skutečného využití přivedeného tepla svař. obloukem

η_{ef} = součinitel určující skutečné množství tepla přivedeného k tavení základního materiálu

U = napětí svařovacího oblouku (V)

I = svařovací proud /A/

λ - součinitel tepelné vodivosti

γ - měrná váha (g cm^{-3})

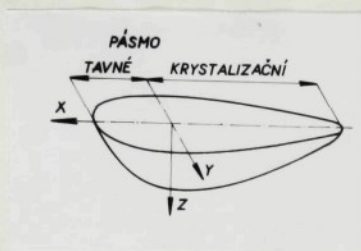
c - měrné teplo ()

t - čas (sec)

$a = \lambda / c \gamma$ - součinitel teplotní vodivosti

2.3 Svarová lázeň (SL)

Svarová lázeň je prostor vymezený mezifázovou hranicí roztaveného a tuhého kovu, nebo-li příslušnou izotermou teploty. V podstatě ji můžeme podle obr.3 rozdělit na pásmo tavné a pásmo krystalizační.



Obr. 3

Při svařování se SL pohybuje jako celek ve směru rychlosti svařování v_s . Technologickou důležitostí má hlavně pásmo krystalizační, proto se studium SL soustředilo hlavně na toto pásmo.

SL je v podstatě určena

1. velikostí a tvarem
2. chemickým složením
3. teplotou

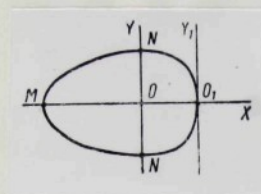
K dosažení vytyčeného cíle je třeba nezbytně provést rozbor stanovení velikosti a tvaru SL. Problematika chemického složení a teploty SL byla analyzována v [27, 23]; není pro náš záměr nezbytná a proto nebude dále rozebírána.

2.3.1 Velikost a tvar svarové lázně

Stanovení velikosti a tvaru SL je prováděno v současné době výpočtně experimentálními a experimentálně-výpočtními metodami. Při matematickém vyjádření bylo postupně vycházeno z výpočtu v rovině $z = 0$, později ze složitějšího výpočtu prostorového a to při svařování polokonečného tělesa, koncentrovaným bodovým, přímočarým, rychle se pohybujícím zdrojem tepla. Postupný vývoj výpočtu je zachycen v dalších odstavcích.

2.3.1.1 Výpočet podle Rykalina v rovině $z = 0$ -polokonečné těleso

Podle obr. 4 je SL zobrazena izotermou tavení $Q_1 N$ (tavné pásmo) a izotermou krystalizace $M N$ (krystalizační pásmo). Zdroj tepla soustředěný v bodě O_1 se pohybuje rychlostí v_s ve směru osy x a vytváří SL, jejíž velikost a tvar je dán po



Obr. 4

zavedení vztahu $t = x/v_s$
do rovnice (4)

$$T = \frac{q}{2 \pi \lambda K} \exp\left(-\frac{v_s y^2}{4a x}\right) \dots\dots (6),$$

kde T je tavicí teplota svažovaného materiálu. Ostatní proměnné byly uvedeny již v odst. 2.2.

Výpočet charakteristik SL (O_1M , ON , OO_1 , OM)

O_1M : Z rovnice (6) pro $y = 0$ získáme $T = \frac{q}{2 \pi \lambda K}$, z čehož

$$x = O_1M = \frac{q}{2 \pi \lambda T} \dots\dots\dots (7)$$

ON : Logaritmováním upravené rovnice (6) získáme vztah pro y.

$$\exp\left(-\frac{v_s y^2}{4ax}\right) = \ln \frac{2 \pi \lambda T}{q} \cdot x = \ln Ax$$

$$\text{kde } A = \frac{2 \pi \lambda T}{q}$$

$$\frac{v_s y^2}{4ax} = -\ln A - \ln x = \ln \frac{1}{A} + \ln \frac{1}{x}$$

$$y = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{1}{A} + \ln \frac{1}{x}\right) \frac{ax}{v_s}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$\frac{2}{v_s} (\ln A + \ln x + 1) = 0$$

$$\ln x = -1 - \ln A$$

$x = \frac{1}{e A} = O_1O \dots$ a dosazením do (8) je

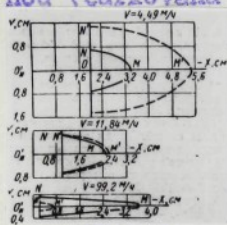
$$ON \equiv y_{\max} = 2 \sqrt{\frac{1}{e A} \frac{a}{v_s}} = 2 \sqrt{\frac{aq}{e 2 \pi \lambda T v_s}} = 0,484 \sqrt{\frac{qa}{\lambda T}} \dots (9)$$

$$O_1O = 0,0585 \frac{q}{\lambda T} \dots\dots\dots (10)$$

$$OM = O_1M - O_1O = 0,1006 \frac{q}{\lambda T} \dots\dots\dots (11)$$

Oprava vypočtených izoterm. krystalizace (IK)

Velikost a tvar vypočtené a skutečné IK se nezhoduje. Při velkých hodnotách q/v_s je vypočtená IK větší a je více protažená ve směru osy x , než IK skutečná a při malých hodnotách q/v_s je naopak menší a kratší. Rozdíly mezi vypočtenou (čárkovaná čára) a skutečnou IK je podle /28/ na obr. 5.

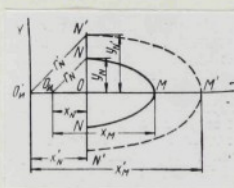


Obr. 5

Za předpokladu /28/, že vypočtená a skutečná IK jsou si podobné, což se předpokládá i o výpočtem uvažované a skutečné poloze tepelného zdroje lze podle obr. 6 stanovit vztah :

$$\frac{x_M^i}{x_N} = \frac{x_M}{x_N} \dots\dots\dots (12)$$

Pak je možno zavést opravné koeficienty m a n .



Obr. 6

$$m = \frac{x_M^i}{x_M}, \quad n = \frac{y_M^i}{y_M} \dots\dots\dots (13)$$

Pro součinitele m a n byly sestaveny empirické vzorce a jejich hodnoty byly vyneseny do grafů (obr.7) v závislosti na $\frac{q}{v_s}$ /cal/cm/.



Obr. 7

Pro nízkouhlíkaté oceli je

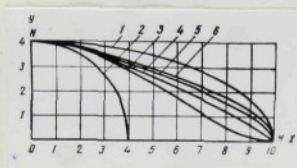
$$m = 0,0007 \frac{q}{v_s},$$

$$n = 0,00049 \frac{q}{v_s} + 0,2 \dots\dots\dots (14)$$

Abychom předchozí výpočet IK přiblížili skutečnosti, musíme ho opravit součiniteli m a n . Takto opravená rovnice IK údajně /28/ dostatečně odpovídá praxi při $\frac{q}{v_s} > 600$ cal/cm

a $v_s < 50$ m/hod.

Podle hodnot A a n , dosazených do rovnice (17) se mění vypočtený tvar SL. Na obr.9 je uvedeno šest tvarů IK, při čemž:



Obr. 9

- Křivka 1 $A=0$, $OM = ON$ (elipsa) - 2.1
 2..... $A=0$, $OM = ON$ (kružnice)
 3..... $A=0,5$, $n = 1$ (deformovaná elipsa)
 4..... $A=0,5$, $n = 2$ -"-
 5..... $A=0,5$, $n = 3$ -"-
 6..... $A=0,5$, $n = 4$ -"-

2.3.1.3 Výpočet podle Rykalina pro prostor - polonekonečné těleso.

Postup je obdobný jako v rovině $z = 0$. Vychází se však z rovnice prostorové IK

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda x} \exp\left(-\frac{v_g(y^2+z^2)}{4ax}\right) \dots\dots\dots (18)$$

Oprava vypočtené IK

Stejně jako u IK v rovině $z = 0$ je třeba v prostoru provést opravu vypočtené IK opravnými součiniteli m , n , j .

$$m = x_p/x_d, \quad n = y_p/y_d, \quad j = z_p/z_d \dots\dots\dots (19)$$

x_p, y_p, z_p - hodnoty souřadnic vypočtené SL

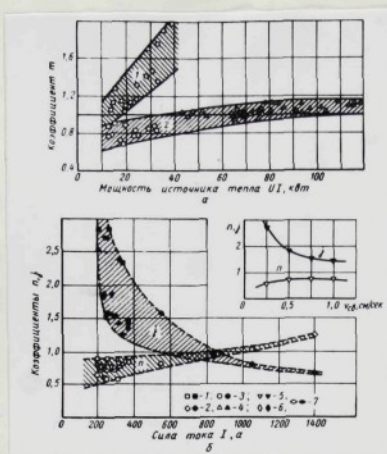
x_d, y_d, z_d - "- "- skutečné SL

Opravená rovnice prostorové IK - rovnice (18) má tvar :

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda m x} \exp\left(-\frac{v_g r_{xy}^2}{4amx}\right) \dots\dots\dots (20)$$

kde $r_{xy}^2 = n^2 y^2 + j^2 z^2$

Podle obr.10 /19/ je pak možno odečíst experimentálně získané závislosti opravných součinitelů m, n a j na svařovacích parametrech.



a - hodnota součinitele m
pro návar na ocelovou desku
1. svařování ruční
2. svařování PT

b - hodnota součinitele n
a j při různých způsobech svařování
1. svařování PT- $v_s = 0,59 \text{ cm/s}$
2. " $-v_s = 1,11 \text{ cm/s}$

Obr.10

2.3.1.4 Výpočet metodou parametru tvaru

N.N.Prochorov /30, 31, 19/ určil statistickou metalografickou analýzou možné hranice změny tvaru SL a za předpokladu, že kolmé řezy svarové lázně k ose x jsou si navzájem geometricky podobné, sestavil analytické vyjádření plochy IK. Do obecných analytických výrazů zahrnul velikost i tvar SL pomocí parametrů tvaru a velikosti, které pro konkrétní způsob a režim svařování určuje experimentálně.

Analytický tvar rovnic SL je :

$$\left(\frac{z}{z_{\max}} \right)^{\omega} + \left(\frac{y}{y_{\max}} \right)^{\tau} = 1$$

$$\left(\frac{z_{\max}}{h} \right)^{\tau} + \left(\frac{x}{l} \right)^{\omega} = 1 \dots\dots\dots (21)$$

$$\left(\frac{y_{\max}}{p} \right)^{\eta} + \left(\frac{x}{l} \right)^{\nu} = 1$$

kde l = délka izotermy krystalizace SL

h = max. hloubka SL

p = polovina max. šířky SL

$\omega, \nu, \tau, \mu, \eta, \gamma$ - jsou parametry tvaru SL

$z_{\max}, y_{\max}$ jsou parametry velikosti průřezu

v dané vzdálenosti od počátku souřadnic 0.

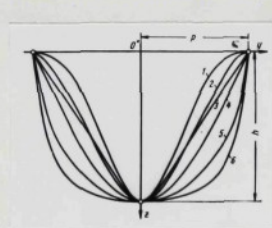
x, y, z jsou souřadnice.

První z rovnic (21) vyjadřuje příčné řezy SL, ležící v rovině kolmé na osu OX . Rozměry obrysů příčných řezů různé vzdálených od počátku souřadnic O jsou určeny parametry $z_{\max}$ a $y_{\max}$.

Druhá rovnice vyjadřuje podélný řez SL rovinou XOZ a charakter změny parametru $z_{\max}$ z první rovnice podél osy OX .

Třetí rovnice vyjadřuje řez rovinou YOX a zachycuje charakter změny $y_{\max}$ z první rovnice podél osy OX . Osa OX má opačný směr vektoru v_g , OY směr šířky a OZ hloubky SL.

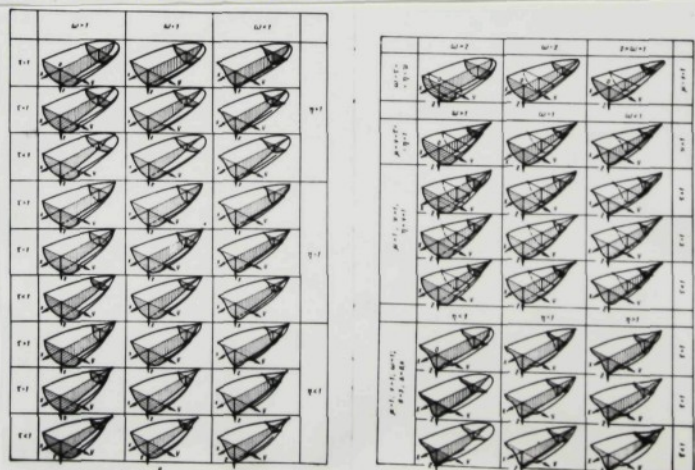
Každá z rovnic (21) představuje pro různé hodnoty parametrů tvaru soustavu křivek, takže např. příčné řezy mění svůj tvar při změně ω a ψ . Tvar příčných řezů SL pro danou hloubku h , šířku p a různé hodnoty ω a ψ je na obr. 1



Obr. 11

SL	ω	ψ
1	0,5	1,5
2	0,5	2
3	1	1,5
4	1	2
5	2	2
6	4	2

Podrobnější přehled možností tvaru SL, daných soustavou rovnic (18) je na obr. 12



Obr.12

Zavedeme-li do soustavy rovnic (21) bezrozměrné souřadnice

$k_x = x/l$, $k_y = y/p$, $k_z = z/h$ a dosadíme-li za $y_{\max}$ a $z_{\max}$ z druhé a třetí rovnice do rovnice první, dostaneme obecnou rovnici SL pro počátek souřadnic 0:

$$\frac{k_x^{\omega}}{(1 - k_x^{\omega})^{\omega/\tau}} + \frac{k_y^{\vartheta}}{(1 - k_y^{\vartheta})^{\vartheta/\eta}} = 1 \dots\dots\dots (22)$$

Předpokládá se, že rovina styku tavného a krystalizačního pásma SL (obr.3) je na izotermu SL kolmá.

Povrch SL v krystalizačním pásmu může nabýt ve zvláštních případech tvaru elipsoidu, paraboloidu, kužele a j. ploch.

Tvar SL	Podmínky	Rovnice plochy
elipsoid	$\omega = \nu = \eta = \vartheta =$ $= \tau = \omega = 2$	$\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \left(\frac{y}{p}\right)^2 + \left(\frac{z}{h}\right)^2 = 1 \dots\dots (23)$
paraboloid	$\omega = \nu = 1$ $\omega = \tau = \vartheta = \eta = 2$	$\frac{x}{l} + \left(\frac{y}{p}\right)^2 + \left(\frac{z}{h}\right)^2 = 1 \dots\dots (24)$
kužel II. řádu	$\omega = \nu = \tau = \eta = 1$ $\omega = \vartheta = 2$	$-(1 - \frac{x}{l})^2 + \left(\frac{y}{p}\right)^2 + \left(\frac{z}{h}\right)^2 = 0 \dots\dots (25)$

Tab.1

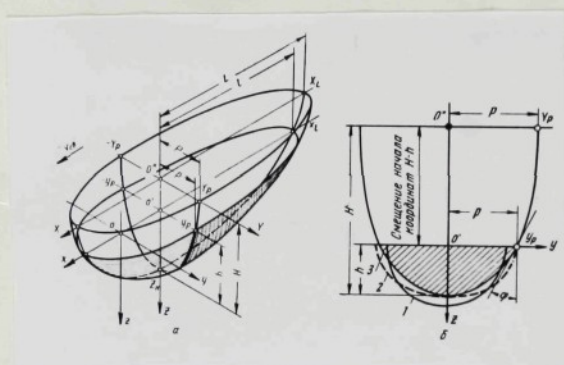
Tímto způsobem je možné nahradit SL jednoduchými plochami, jejichž další analytické zpracování nežli většinou obtíží.

Rovnice SL zavedením fiktivního elipsoidu

Plocha skutečné SL je nahrazena plochou fiktivního elipsoidu. Jeho skutečný tvar je dán parametry určenými ze skutečné SL. Rovnice fiktivního elipsoidu pro systém souřadnic O^*XYZ podle obr. 13 je :

$$\left(\frac{X}{L}\right)^2 + \left(\frac{Y}{P}\right)^2 + \left(\frac{Z}{H}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (26)$$

kde L, P, H jsou polosoxy fiktivního elipsoidu.



Obr. 13

Řez SL : 1 - vypočtenou;
2 - vypočtenou a
opravenou so
činiteli na a
3 - skutečnou

Příčný řez fiktivním elipsoidem na rozhraní pásmo krystalizace a tavení je eliptický a jeho rovnice je :

$$\left(\frac{Y}{P}\right)^2 + \left(\frac{Z}{H}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{z čehož } Y = P \sqrt{1 - \frac{Z^2}{H^2}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\frac{dY}{dZ} = -\frac{P}{H^2} \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2}{H^2}}} = \operatorname{tg} \varphi \quad \dots\dots\dots (29)$$

Dosažením souřadnic bodu y_p ($Z = H - h, Y = p$) do rovnice (28) a (29) získáme :

$$p = P \sqrt{1 - \left(\frac{H-h}{H}\right)^2} \dots\dots\dots (30)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-P}{H^2} \frac{H-h}{\sqrt{1 - \left(\frac{H-h}{H}\right)^2}} \dots\dots\dots (31)$$

Zavedeme-li do výpočtu funkci B

$$B = \frac{p+h \operatorname{tg} \varphi}{p+2 h \operatorname{tg} \varphi} \dots\dots\dots (32),$$

získáme v závislosti na známých parametrech SL polosoxy fiktivního elipsoidu :

$$P = \frac{p B}{\sqrt{2B-1}} ; H = hB ; L = \frac{l B}{\sqrt{2 B-1}} \dots\dots\dots (33)$$

Rovnici fiktivního elipsoidu pro počátek souřadnic v bodě O získáme z rov. (26) zavedením příslušného souřadnicového systému a dosazením L,P,H ze vztahů (33) :

$$\left(\frac{x-00'}{B l}\right)^2 \cdot (2B-1) + \left(\frac{y}{B p}\right)^2 \cdot (2B-1) + \left(\frac{z+0 0''}{B h}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots (34)$$

Obdobně lze provést náhradu svarové lázně paraboloidem, kuželem, případně jinou plochou, při čemž se parametry SL p, h, l odměří ze skutečných SL, nebo vypočítají z rovnice (4) /19, str.488/ a jsou pro polonekonečný prostor :

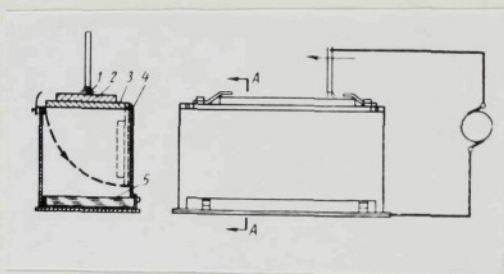
$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{n} \sqrt{\frac{4 a q}{2 \pi \lambda v_s e T_t}} \\ h &= \frac{1}{j} \sqrt{\frac{4 a q}{2 \pi \lambda v_s e T_t}} \\ l &= \frac{q}{2 \pi \lambda m T_t} \end{aligned} \dots\dots\dots (35)$$

2.3.1.5 Experimentální stanovení SL

Používá se ke korekci vypočítaných hodnot velikosti a tvaru SL při výpočetně experimentálních metodách a jako zdroje výchozích údajů pro další výpočet při metodách experimentálně výpočetních.

2.3.1.5.1 Sklopným vylitím tavné lázně

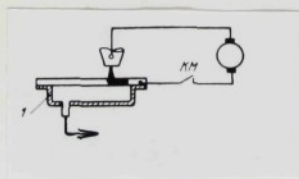
Rychlým sklopením svařovaného zkušebního vzorku se v okamžiku přeruší svařovací oblouk a roztavený kov se ze svarové lázně vylije. Vzniklá dutina odpovídá velikosti a tvaru svarové lázně v okamžiku sklopného vylití /32/. Schema sklopného zařízení je na obr. 14.



Obr. 14

2.3.1.5.2 Odsátím tavné lázně

Velikost a tvar SL se získá rychlým odsátím tavné lázně podle obr. 15 /33/.



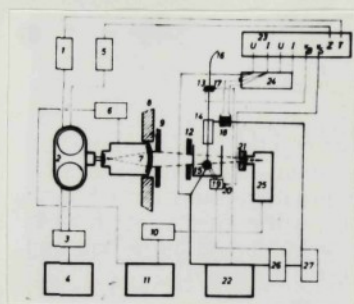
Obr. 15

tloušťce.

V odsávací komoře je tlak o 200 až 300 mm H_2O nižší, než hydrostatický tlak tavné lázně. Rychlým odsátím tavné lázně za dobu max. 0,25 sec. se získá SL přesněji, než při jejím vylití /33/. Tato metoda je ale použitelná jen při naplavení základního materiálu v celé

2.3.1.5.3 Filmováním SL, prozářené rentg. paprsky

Tato metoda byla vyvinuta pro studium přenosu roztavených kapek ze svařovacího drátu při svařování pod tavidlem. Lze ji však použít i pro stanovení velikostí a tvaru SL. Celé zařízení v podstatě sestává podle obr.16 /34/ ze zdroje rentgenova záření (pos.25), prozařujícího svařovaný materiál v místě svarové lázně (pos.15), při čemž se prozářený obraz



Obr. 16

2.3.2 Vliv na velikost a tvar SL.

Na velikost a tvar SL působí více či méně řada vlivů. Jsou to vlivy materiálové a technologické. Tyto vlivy byly již dříve předmětem naší vědeckovýzkumné práce /27,36,37,14/, proto budou popsány pouze stručně.

2.3.2.1 Vlivy materiálové

Chemické složení základního a přídatného materiálu

tavící teplota (T)

tepelná vodivost (λ)

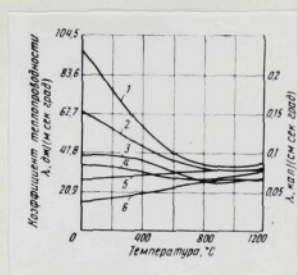
teplotní vodivost ($\alpha = \lambda / c \rho$)

měrné teplo (c)

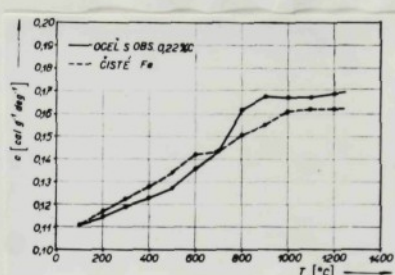
měrná váha (ρ)

Na charakteristiky SL, vyplývající z rovnic 9,10,11, případně z prostorové izotermy krystalizace, dané rovnicí 20 je zřejmý vliv tavící teploty, ve které se obráží chemické složení základního i přídatného materiálu, vliv tepelné

vedivosti , teplotní vodivosti a tedy i měrného tepla a měrné váhy (viz kap.2,2). Problémem materiálových vlivů však je jejich správné odhadnutí a zahrnutí do výpočtu, neboť jsou jak je vidět z obr. 17 /19/ a 18 /26/ závislé na chemickém složení materiálu a značně proměnné s teplotou.



Obr. 17



Obr. 18

- 1 - elektrolytické Fe,
- 2 - ocel s 0,1%C,
- 3 - 0,45%C,
- 4 - 0,1%C; 4,98% Cr,
- 5 - 1,52%C; 13,1 Cr,
- 6 - austenitická ocel

2.3.2.2 Vliv technologické a konstrukční

Svařovací proud (I_g)

svařovací napětí (U_g)

rychlost svařování (v_g)

průměr svařovacího drátu (d)

hustota svařovacího proudu (i)

úhel sklonu svařovacího drátu (α)

— " — α při svařování na nakloněné rovině

tloušťka plechu, příp. geometrický tvar

teplota předehřátí

velikost stykové mezery

velikost úhlu rozevření úkosu

výška navrtvení a prodyšnosti tavidla

Rozhodující vliv na velikost a tvar SL mají I_s , U_s , v_s a d . Tím je současně případně v souvislosti s polaritou I_s /3/ vymezen i vliv hustoty svař.proudu a měrné tepelné energie q/v_s přivedené do svaru. Tyto vlivy jsou ve vzájemné shodě podrobně popsány, zobrazeny, nebo shrnuty v /24,3,38,39, 11,40,19,16,27,37/. Orientační přehled vlivu uvedených veličin udává opravená a doplněná tabulka 2 dle /16/

S rostoucí veličinou	Roste (+), zmenšuje se(-), je konstantní (=)			
	2P	H	A	L (x)
I_s	+	+	+	+
U_s	+	-	-	+
v_s	-	-	-	-
d	+	-	-	-

Tab.2 Závislost šířky svaru 2P, hloubky H, převýšení A a délky krystalizačního pásma SL na I_s , U_s , v_s a d .

(x) Opraveno a doplněno dle výše uvedené literatury.

Pro zachování stejného tvaru příčného průřezu svaru musí být mezi I_s a U_s zachován vztah dle /41/

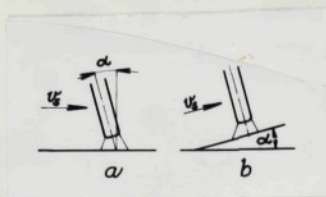
$$U = b \cdot \sqrt{I_s} \dots \dots \dots (36)$$

při čemž b je při svařování PT závislá na stabilizačním účinku tavidla. Vztah (36) je však většinou udáván graficky /38, a.34/.

Sklon svařovací elektrody a svařování na nakloněné rovině má velký vliv na velikost a tvar SL /16,24,38/, ale běžně se nepoužívá.

co?

Vliv zvětšujícího se úhlu α podle obr. 19a,b je na tab.3.



Obr. 19

Vliv tloušťky plechu δ , případně jeho geometrického tvaru je možno stanovit z Rykalinovy teorie šíření tepla. Z rovnice (5) je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou plechu se množství využit^{ho} tepla, přivedeného

do svaru zmenšuje a tím se zmenšují i parametry SL (tab.3).

Vliv teploty předehřátí je možno stanovit rovněž z rovnice (5). Jinak jej lze stanovit podle /25,26/ z rychlosti ochlazování teplem ovlivněného pásma :

$$w = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/\sqrt{g}} \dots\dots\dots (37)$$

w = rychlost ochlazování teplem ovliv. pásma

q = množství přivedeného tepla

T = teplota, při které uvažujeme w

T_0 = " základního materiálu

Zvýšenou teplotou předehřátí se do svaru přivede při daných svařovacích parametrech více tepla, čímž se parametry svař. lázně zvětší (tab.3).

Vliv mezery svarových ploch při tupém svaru a úhlu rozevření svarových ploch při svaru V je zvláště na tvar SL značný /3, 24, 38, 41/. S rozšiřující se mezerou svarových ploch se podle /41/ šířka a převýšení svaru zmenšuje a hloubka závaru zvětšuje (tab.3). Se zvětšujícím se rozevřením svarových ploch se šířka svaru zvětšuje, převýšení zmenšuje a hloubka závaru zprvu zvětšuje a dále zmenšuje (tab.3).

S rostoucí veličinou	Roste (+) zmenšuje se (-), je konstantní (=)			
	2 P	H	A	L
α	-	+	+	+
δ	-	-	+	-
T_0	+	+	-	+
m	-	+	-	
β	+	+	-	

tab.3. α - sklon svařovací elektrody a svařování na nakloněné rovině podle obr.19, δ - tloušťka plechu, T_0 - teplota předehřátí, m - mezera mezi svarovými plochami, β - úhel rozvětvení svarových ploch

Značný vliv na parametry svarové lázně má i druh, zrnitost a výška vrstvy tavidla. O vlivu druhu tavidla byla již zmínka ve vztahu (36) a porovnání nejčastěji používaných našich tavidel je ve /14/. Vliv zrnitosti a výšky vrstvy tavidla je analyzován v souvislosti se svařovacími parametry v /42/ a v souvislosti s přetlakem plynů a par v prostoru svařovacího oblouku v /43/.

2.3.1.7 Zhodnocení metod stanovení velikosti a tvaru SL

Matematicko-experimentální metody vycházejí z matematického vyjádření hlavních vlivů na velikost a tvar SL. Z předchozích odstavců je však zřejmé, jak je obtížné alespoň přibližně pojmout do výpočtu jednotlivé vlivy, které jsou na sobě velmi závislé a proměnné. Vypočtené parametry SL se tak značně liší od parametrů skutečných a musí se proto korigovat opravnými součiniteli, stanovenými v porovnání se skutečnými SL. I tak je však výpočet nedokonalý a má malou oblast použití, neboť se dá aplikovat víceméně jen pro návary.

Značné zjednodušení bylo docíleno experimentálně matematickou metodou, která vychází ze skutečných, experimentálně stanovených SL, které jsou nahrazeny snadno matematicky vyjádřitelnými plochami. Tím byla eliminována otázka obtížné

stanovitelných vlivů a výsledky této metody jsou celkově přesnější a prakticky použitelnější, než u předchozích metod. Přesto je však třeba poznamenat, že skutečné, v praxi se vyskytující SL jsou obtížné a proto často jen přibližně nahraditelné matematicky jednoduše vyjadřitelnými plochami, čímž nakonec opět dochází v dalších výpočtech k značným nepřesnostem.

Porovnáním metod k experimentálnímu stanovení velikosti a tvaru SL se jeví metoda sklupným vylitím tavné lázně při svařování PT jako nejvhodnější. Dává dobrou reprodukovatelnost SL a při tom je jednoduchá a dostatečně univerzální.

2.4 Geometrie a rychlost růstu primárních krystalů (PK)

2.4.1 Primární krystalizace

Při tuhnutí svarového kovu probíhají v podstatě tři fáze :

1. Přechlazení tavné lázně
2. Vznik krystalizačních zárodků
3. Růst primárních krystalů

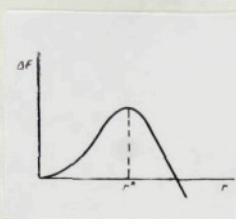
2.4.1.1 Přechlazení tavné lázně

Přechlazení tavné lázně rozeznáváme dvoji : tepelné a koncentrační. Tepelné přechlazení je vztaheno k rovnovážné teplotě likvidu a je nezbytné k tomu, aby mohl proběhnout proces nukleace krystalizačních zárodků. Pojem koncentračního přechlazení bude popsán v souvislosti s růstem primárních krystalů.

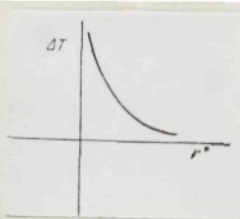
2.4.1.2 Vznik krystalizačních zárodků

Pro každý kov existuje teplota T_0 , při které je tavenina v termodynamické rovnováze s tuhou fází. Při poklesu teploty taveniny pod T_0 se počnou tvořit krystalizační zárodky. Při tavném svařování rostou primární krystaly z plošných krystalizačních zárodků, které jsou vždy přítomny na natavených zrnech postupujícího mezifázového rozhraní /20,21/. Podle /20/ může zvětšená koncentrace přísad a nečistot ve středu svaru vést i k tvoření heterogenních objemových krystalizačních zárodků, čímž vznikne tak zvané druhé pásmo tuhnutí.

Ve /44/ je proveden podrobný rozbor a výpočet kritické velikosti růstu schopných plošných i objemových krystalizačních zárodků. Kritická velikost růstuschopných krystalizačních zárodků je závislá na změně volné energie (obr.20) a na tepelném přechlazení (obr.21), při čemž bylo dokázáno, že kritický poloměr plošných krystalizačních zárodků je při stejných podmínkách poloviční, než u krystalizačních zárodků objemových.



Obr. 20

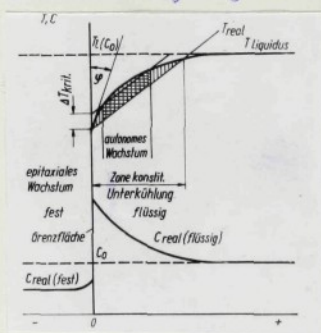


Obr. 21

2.4.1.3 Růst primárních krystalů

2.4.1.3.1 Teorie

Tuhne-li slitina, která obsahuje přísady a nečistoty snižující teplotu likvidu dochází podle obr. 22 /20,45/ na mezifázovém rozhraní směrem do taveniny k růstu krystalů o koncentraci přísad a nečistot nižší, než je průměrné složení taveniny C_0 . V důsledku toho se naopak na mezifázovém rozhraní zbylá tavenina obohatí o přísadové prvky a nečistoty a v závislosti na vzdálenosti směrem do taveniny se mění její tavící teplota podle křivky T_{likvidus} . Průběh skutečné teploty od mezifázového rozhraní směrem do

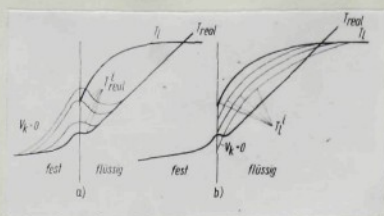


Obr. 22

taveniny je naznačen čarou T_{real} .

Ve vzdálenosti průsečíku T_{likvidus} s T_{real} od mezifázového rozhraní je tavenina přechlazená a jen v této oblasti, které se nazývá oblast koncentračního přechlazení může dojít k růstu krystalů.

Obr. 22 analyzuje však pouze okamžitý stav při tuhnutí na mezifázovém rozhraní, daný okamžitým konstantním tepelným přechlazením. Ve skutečnosti se ale při krystalizaci uvolňuje skupenské teplo tuhnutí a velikost oblasti koncentračního přechlazení se podle obr. 23a zmenšuje. Současně se podle obr. 23b snižuje i teplota likvidu T_l , protože krystalizační rychlost je větší, než odvod tepla.



Obr. 23

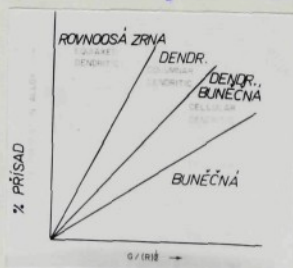
2.4.1.3.2 Druh a tvar primárních krystalů /46,47,20,21/

Ve SK rozlišujeme :

1. Jehlicovité (buněčné) krystaly, které rostou pouze v jednom krystalografickém směru a jsou ohraničeny relativně rovnými plochami.
2. Dendritické krystaly, které rostou více či méně přednostně v jednom krystalografickém směru a jsou ohraničeny nerovnými plochami.
3. Rovnoosé krystaly, které rostou rovnoměrně ve všech třech krystalografických směrech.

Podle Tillera a Ruthera /20,21/ závisí vznik určité primární struktury jednak na množství přísad a nečistot a jednak na gradientu teploty G a krystalizační rychlosti R . G a R jsou však na sobě navzájem závislé. Na základě

analytických výpočtů a experimentálních výsledků jsou podmínky vzniku určité primární struktury dány obr. 24.



Obr. 24

2.4.1.3.3 Velikost primárních krystalů

Souvisí úzce s podmínkami primární krystalizace a tím i s druhem a tvarem primárních krystalů. Z obrázku 22 je zřejmé, že čím bude rychlost ochlazení na mezifázovém rozhraní větší, tím bude strmější koncentrační gradient (C) a čára $T_{likvidus}$ bude vypouklější. Současně se zvětší i teplotní gradient (G) a čára T_{real} bude strmější. Tím se oblast koncentračního přechlazení zmenší a důsledkem bude v souladu s /44/ zmenšení rozměrů primárních krystalů, případně i změna jejich druhu a tvaru.

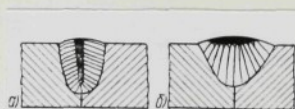
2.4.1.3.4 Chemická nestejnorodost SK

Při primární krystalizaci vzniká bezprostředně chemická nestejnorodost. Podle toho, jedná-li se o rozdíly koncentrace přísad v rámci celého průřezu svaru, nebo jen jednotlivých krystalů, mluvíme o nestejnorodosti makroskopické, nebo mikroskopické.

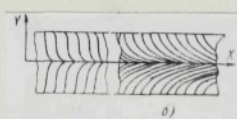
Makroskopická nestejnorodost se projevuje jako zonální segregace a vrstevnatá nestejnorodost.

Zonální segregace (obr.25) je v přímé souvislosti s geometrií růstu primárních krystalů (schema krystalizace) /18/ (obr.26).

Vrstevnatá nestejnorodost (obr. 27) je zapříčiněna tím, že



Obr. 25



Obr. 26



Obr. 27

primární krystalizace je v souladu s obr.23 dějem přetržitým s "pulzující" rychlostí krystalizace. Tomu odpovídá i větší či menší difúzní vyrovnaní chemického složení krystalizujících vrstev SK.

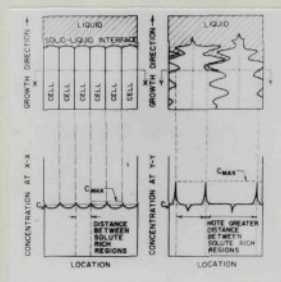
Mikroskopická nestějnost

se dělí podle Beneše a Tlusté /48/ na mikroskopickou segregaci mezikrystalovou a vnitrokrystalovou.

Mezikrystalová segregace se projevuje jen při pomalém růstu rovnoosých zrn a pomalém tuhnutí středních částí svaru. Čím více se tavná lázeň s postupujícím mezifázovým rozhraním ke středu svaru obohacuje na příměsi, mění se celkově i chemické složení krystalů.

Vnitrokrystalová segregace doprovází vznik jak jehlicovité (buněčné), tak i dendritické krystalizace. Nejprve tuhne stvol,

přip. větve prvního a druhého řádu chudé na příměsi. Naposledy tuhne tavenina mezi jehlicemi či dendrity, která je bohatá na příměsi. Rozdíl a špičky koncentrace segregovaných příměsí struktury jehlicovité a dendritické je zřejmý z obr. 28.



Obr. 28

2.4.2 Směr růstu primárních krystalů

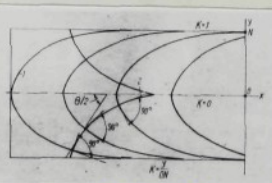
Podle Chakmerse /44, str.244/ se dendritická krystalizace v kovech a slitinách s plošně a prostorově středěnou krychlovou mřížkou děje v krystalografickém směru $\langle 100 \rangle$. Stejný závěr uvádí /49, str.31/ a i jiní autoři /47/.

Všeobecně byl zprvu obecně přijat názor /51/, že směr růstu primárních krystalů je kolmý na izotermu krystalizace a spadá

do směru maximálního teplotního gradientu G (obr. 29).

Postupně se však objevovaly i jiné názory. Sterenbogen /50/ říká, že ortogonální růst k IK probíhá jen tehdy, jsou-li při krystalizaci SK značné změny

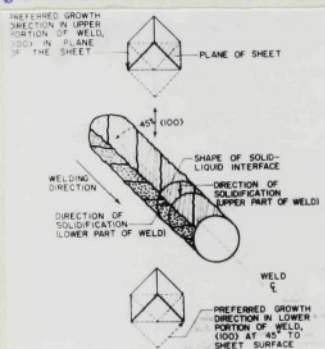
rychlosti ochlazování. Tato podmínka je splněna spíše pro kružnicovou IK, méně pro eliptickou.



Obr. 29

Sagawe, Lundin a Aronson /21/ zkoumali vliv textury základního materiálu na směr růstu krystalů ve SK. Zjistili a experimentálně ověřili, že :

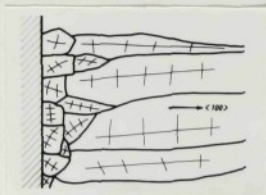
1. směr růstu PK u ocelí s výraznou texturou se neděje kolmo na IK, ale v tom krystalografickém směru $\langle 100 \rangle$, který se nejvíce blíží směru max. teplotního gradientu G . Důkaz jejich tvrzení je doložen na obr. 30. Plech s texturou o krystalografické



Obr. 30

ale v druhé polovině (v dolní části obr.30) s ní svírají 45° .

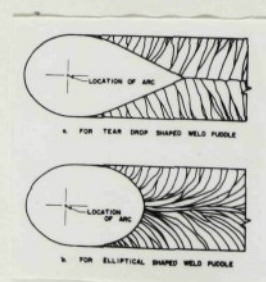
2. Směr růstu PK u ocelí s náhodnou krystalografickou orientací zrn se děje v podstatě téměř ve směru max G . Na obr.31 /49, str.31/ je naznačen přednostní "epitaxiální" růst PK v krystalografickém směru $\langle 100 \rangle$, spadajícího do přímého



Obr. 31

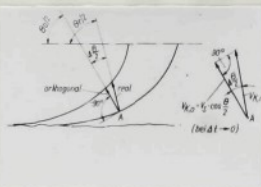
směru max G . Ve skutečnosti se přednostní růst PK projeví u slzovitě a eliptické SL v souladu s křivočarým průběhem max G podle obr. 32 /52/.

Wittke uvádí, že odklon reálného směru růstu PK od ortogonálního závisí na množství legur a svařovacích parametrech. Odklon reálného směru od ortogonálního o $\Delta\theta/2$ (obr.33) stanovil při svařování PT experimentálně v závislosti na rychlosti svařování v_s pro různé poměrné hodnoty $k = v_r/v_s$, kde v_r - reálná, průměrná rychlost krystalizace je :

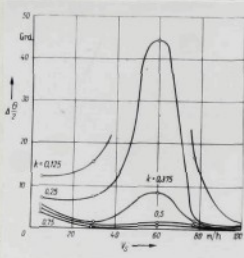


Obr. 32

$$v_r = v_s \cdot \frac{\cos \theta/2}{\cos \Delta\theta/2}$$

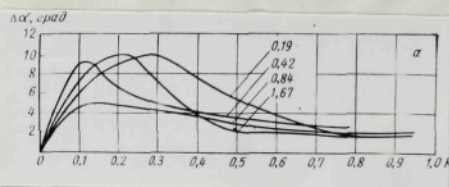


Obr. 33



Obr. 34

Prochorov /19/ zkoumal růst PK svarového kovu širokého sortimentu konstrukčních materiálů a uvádí, že maximální odchylka skutečného směru růstu od ortogonálního $\Delta\alpha$ je 15° a to ve směru opačném natáčení vektoru rychlosti krystalizace. Míra neortogonálnosti $\Delta\alpha$ v závislosti na $k = y/p$, kde y je souřadnice a p polovina max. šířky SL, je v obr.35 vynešena pro čisté Fe a různé rychlosti svařování /cm/sec/.



Obr. 35

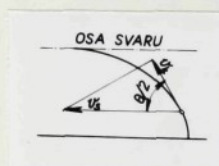
Poukázal též na to, že s množstvím příměsí jsou kovy více netečné k vlivu max G a krystaly jsou přímější, než ortogonální trajektorie k IK.

Přes uvedené odchylky růstu PK od růstu ortogonálního se však Prochorov /19/, shoduje s jinými autory /např. 21, 22/ v tom, že výpočet tvaru (geometrie růstu/ je možno založiti na podmínce ortogonálnosti na IK, neboť vzhledem k velkému počtu krystalů a ke statistickému rozložení jejich krystalografických směrů jsou průměrné směry růstu jen málo odlišné od směrů ortogonálních.

2.4.3 Výpočet geometrie a rychlosti růstu PK

V této kapitole je stručně podán postupný vývoj výpočtu a to nejprve v rovině $z = 0$ a dále i v prostoru.

Výpočet geometrie růstu PK je založen v obou případech na ortogonálním růstu PK na IK (v prostoru na izotermickou plochu krystalizace), pohybující se konstantní rychlostí v_s ve směru osy x . Pro IK (izotermickou plochu krystalizace) získanou z teorie šíření tepla by však byl výpočet velmi složitý, proto se tato s jistou přesností /18/ nahrazuje matematicky jednoduše zvládnutelnou křivkou (plechou).



Obr. 36

Výpočet rychlosti krystalizace v rovině $z = 0$ i v prostoru sestává ze stanovení velikosti průřezu v_k na tečnu k ose PK podle vztahu (obráz. 36) :

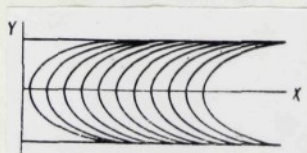
$$v_k = v_s \cdot \cos \theta/2 \dots \dots \dots (38)$$

2.4.3.1 Výpočet geometrie a rychlosti růstu PK v rovině $z = 0$ pro uzavřené koncentrované rychlé se pohybující zdroj tepla

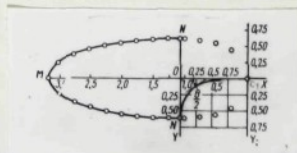
2.4.3.1.1 Výpočet pro polovnekonečný prostor s náhradou IK elipsou /18/

Ortogonální trajektorie obecné soustavy křivek, pohybujících se ve směru osy x ve tvaru

$$F(x+i, y) = 0 \text{ (obráz. 37)} \dots \dots \dots (39)$$



Obr. 37



Obr. 38

je dána vztahem

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\partial F / \partial y}{\partial F / \partial x} \dots \dots \dots (40)$$

Po náhradě JK elipsou dle rov. (15) a obr. 38 bude analogicky

$$F(x+i, y) = \left(\frac{x+i}{OM}\right)^2 + \left(\frac{y}{ON}\right)^2 - 1 = 0 \dots\dots\dots(41),$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{OM}{ON} \frac{y}{\sqrt{(ON)^2 - y^2}} \dots\dots\dots(42),$$

z čehož rovnice osy krystalu je

$$x = \frac{OM}{ON} / \sqrt{(ON)^2 - y^2} - ON \ln \frac{1 + \sqrt{1 - (y/ON)^2}}{y/ON} / \dots\dots\dots(43)$$

a po zavedení $k = y/ON$ je

$$x = \frac{(ON)^2}{OM} \sqrt{1 - k^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k^2}}{k} / \dots\dots\dots(44)$$

Dosadíme-li do rov. (44) za ON a OM pomocí n, m opravené vztahy (9), (11) a zavedeme-li funkci

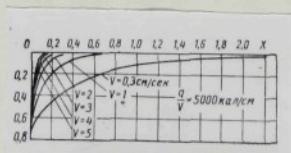
$$\psi = \sqrt{1 - k^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k^2}}{k} \dots\dots\dots(45),$$

dostaneme rovnici osy krystalu ve tvaru

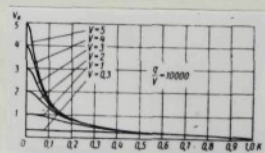
$$x = 2,328 \frac{\lambda}{c \frac{d^u}{dv} v_s} \psi \dots\dots\dots(46),$$

při čemž hodnoty k a ψ jsou tabelovány.

Na obr. 39 je znázorněn průběh os krystalů podle vztahu (46) v závislosti na v_s a q/v_s .



Obr. 39



Obr. 40

Rychlost krystalizace se stanoví ze vztahu (38)

$v_k = v_s \cos \theta/2$, při čemž $\cos \theta/2$ získáme úpravou první derivace rov. (43)

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \theta/2 = \frac{OM}{ON} \cdot \xi \quad \dots\dots\dots (47),$$

$$\text{z čehož } \cos \theta/2 = 1 / \sqrt{1 + (OM/ON)^2 \xi^2} \quad \dots\dots\dots (48),$$

$$\text{kde } \xi = k / \sqrt{1 - k^2}$$

Po dosazení za OM a ON z rovnice 11 a 9 je

$$v_k = \frac{v_B}{\sqrt{1 + 0,0432 \frac{q v_B}{a \lambda T} \cdot \xi^2}} \quad \dots\dots\dots (49)$$

2.4.3.1.2 Výpočet pro jednovrstvý tupý svar desek a náhradu IK elipsou /53.18/

Výpočet provedeme stejným způsobem jako v odst. 2.4.3.1.1, jen s tím rozdílem, že vycházíme z IK dané vztahem (5).
Rovnice osy krystalu a rychlosti krystalizace pro tento případ je

$$x = 1,164 \frac{\lambda}{c \delta^2 v_B} \psi \quad \dots\dots\dots (50),$$

$$v_k = \frac{v_B}{\sqrt{1 + 0,043 \frac{q^2}{\lambda^2 \delta^2 T^2} \xi^2}} \quad \dots\dots\dots (60)$$

2.4.3.1.3 Výpočet z obecné rovnice IK /29/

Vyděme-li z obecné rovnice IK (rov.17) a zvolíme-li např. $n = 4$, zjistíme, že rovnice osy PK jakožto ortogonální trajektorie ke zvolené IK a rychlost krystalizace je

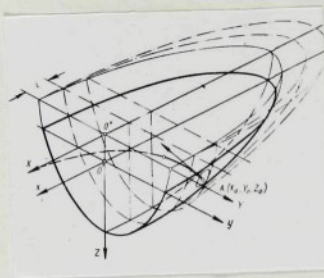
$$x = \frac{ON}{OM} \frac{1}{1+2A} \sqrt{\frac{ON}{2}} \ln \frac{1 + \sqrt{1-k^2}}{1 - \sqrt{1-k^2}} + ON \sqrt{\frac{1-A}{3A}} \operatorname{aretg} \frac{\sqrt{1-k^2}}{\sqrt{(1-A)/3A}} / \dots\dots (61)$$

$$v_k = \frac{v_B}{\sqrt{1 + \left(\frac{OM}{ON}\right)^2 \frac{k^2}{1-k^2} [1 + A(2-3k^2)]^2}} \dots \dots \dots (62)$$

2.4.3.2 Výpočet geometrie a rychlosti růstu PK v prostoru pro svařování koncentrovaným, rychle se pohybujícím zdrojem tepla.

Souborný výpočet navrhl a zpracoval /19/. Vychází z experimentálně stanovené velikosti a tvaru SL, kterou nahradí plochou IK z obecné rovnice SL (22). S výhodou volí náhradu jedním ze zvláštních případů obecné rovnice SL,, která nabývá tvaru elipsoidu, paraboloidu, kužele (rov.23,24, 25) případně jiné matematicky snadno popsatelné plochy a předpokládá, že krystaly rostou kolmo k této ploše ve směru max G t.j. ortogonálně.

2.4.3.2.1 Výpočet pro SL tvaru elipsoidu



Obr. 41

Rovnice soustavy izotermických ploch krystalizace (fiktivních elipsoidů podle obr.41) pohybujících se ve směru osy X má tvar

$$F(X+i,Y,Z) = \frac{(X+i)^2}{L^2} + \frac{Y^2}{P^2} + \frac{Z^2}{H^2} - 1 = 0 \dots (63)$$

Výpočet tvaru PK je proveden pro PK s počátkem v bodě A. Rovnice tečné roviny k fiktivnímu elipsoidu v bodu A má tvar

$$\frac{\partial F}{\partial X}(X-X_0) + \frac{\partial F}{\partial Y}(Y-Y_0) + \frac{\partial F}{\partial Z}(Z-Z_0) = 0 \dots \dots \dots (64),$$

který je po dosazení parciálních derivací podle X,Y,Z rovnice (63)

$$\frac{2(X+i)}{L^2}(X-X_0) + \frac{2Y}{P^2}(Y-Y_0) + \frac{2Z}{H^2}(Z-Z_0) = 0 \dots \dots \dots (65)$$

Rovnice tečny ke krystalu v bodu A má tvar

$$(X-X_0) = \frac{Y-Y_0}{d/dX} = \frac{Z-Z_0}{dZ/dX} \dots\dots\dots(66),$$

a je kolmá k rovině dané rov.(65). Jejich koeficienty musí být nepřímo úměrné, z čehož plyne

$$\frac{L^2}{2(X+1)} = \frac{P^2 dY/dX}{2Y} = \frac{H^2 dZ/dX}{2Z} \dots\dots\dots(67)$$

Po dosazení za i z rovnice (63) získáme diferenciální rovnice ortogonálních trajektorií-os PK

$$\frac{dY}{dX} = \frac{L}{P^2} \cdot \frac{Y}{\sqrt{1-(Y/P)^2-(Z/H)^2}} \dots\dots\dots(68)$$

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{L}{H^2} \cdot \frac{Z}{\sqrt{1-(Y/P)^2-(Z/H)^2}} \dots\dots$$

Tyto diferenciální rovnice je možno řešit na samočinném počítači metodou Runge-Kutta.

Po úpravě například druhého a třetího členu rov. (67) s následující integrací je

$$\begin{aligned} \frac{dY}{Y} &= \left(\frac{H}{P}\right)^2 \frac{dZ}{Z} \\ \ln Y &= \ln Z \left(\frac{H}{P}\right)^2 + C \dots\dots\dots(69) \end{aligned}$$

Zavedením integrační konstanty C

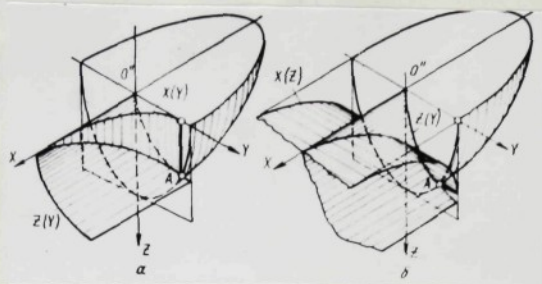
$$C = \ln Z_0 \left(\frac{H}{P}\right)^2$$

do rovnice (69) a odlogaritmováním získáme vztah mezi Y a Z

$$Y = \left(\frac{Z}{Z_0}\right) \left(\frac{H}{P}\right)^2, \text{ nebo } Z = Z_0 Y \left(\frac{P}{H}\right)^2 \dots\dots\dots(70),$$

což jest parabolická válcová plocha.

Dalšími vztahy z rov. 67 získáme obdobně vztah mezi X a Y , nebo X a Z (obr.42)



Obr. 42

Dosadíme-li vztahy z rov. (70) do dif.rov. (68) získáme rovnici osy PK ve tvaru

$$X = \frac{P^2}{L} \int \sqrt{1 - \left(\frac{Y}{P}\right)^2 - \left(\frac{\mathcal{H}}{H} \cdot \frac{Y(P/H)^2}{H}\right)^2} dY \dots\dots\dots (71)$$

$$X = \frac{H^2}{L} \int \sqrt{1 - \left(\frac{Z}{H}\right)^2 - \left(\frac{1}{\mathcal{H}} \cdot Z(H/P)^2\right)^2} dZ$$

Na obr.42 je zřejmé, že osa PK je průsečnicí dvou parabolických válcových ploch $X(Y)$ a $Z(Y)$, nebo $X(Z)$ a $Z(Y)$.

Řešení těchto integrálů je možno pro obecný případ provést pouze na samočinném počítači. Ve zvláštních případech se však mohou závislosti $X(Y)$ a $X(Z)$ vypočítat přímo a to např.:

1. Pro $Z = 0$ je $\mathcal{H} = 0$ a první rov. (71) má po integraci tvar

$$X = \frac{P^2}{L} / \sqrt{1 - (Y/P)^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - (Y/P)^2}}{Y/P} / + C \dots\dots\dots (72)$$

Z okrajové podmínky pro $Y = P$ je $X = 0$ a $C = 0$

2. Pro $Y = 0$ je $\mathcal{H} = \infty$, čímž analogicky s ad.1 bude

$$X = \frac{H^2}{L} / \sqrt{1 - (Z/H)^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - (Z/H)^2}}{Z/H} / + C \dots\dots\dots (73)$$

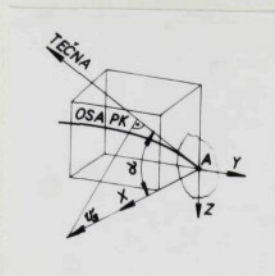
Z okrajové podmínky $Z = H$ je $X = 0$ a $C = 0$.

Rychlost krystalizace se stanoví ze vztahu (38) $v_k = v_s \cdot \cos \alpha$.
Je podle obr. 43 ortogonální v bodu A k ploše IK a svírá

s osou X úhel α . Při výpočtu se vychází z upravené rovnice (63) soustavy fiktivních elipsoidů ve tvaru

$$X = f(Y, Z) = L \sqrt{1 - (Y/P)^2 - (Z/H)^2} - 1 \dots \dots \dots (74)$$

Po dosazení parciálních derivací rov. (74) dle Y a Z do rov. (75)



Obr. 43

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f(Y, Z)}{\partial Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(Y, Z)}{\partial Z}\right)^2}} \dots \dots \dots (75)$$

získáme

$$\cos \alpha = \sqrt{1 + \frac{(K_Y/K_{PL})^2 + (K_Z/K_{HL})^2}{1 - K_Y^2 - K_Z^2}}^{-\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (76)$$

kde

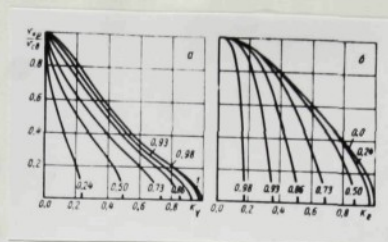
$$K_{PL} = \frac{P}{L} = \frac{p}{l} \text{ a } K_{HL} = \frac{H}{L} = \frac{h}{l}$$

Konečně dosazením vztahů z rov. (35) je

$$v_k = v_s \sqrt{1 + 0,043217 \frac{q v_s}{a \lambda T_t m^2} \cdot \frac{n^2 K_Y^2 + \frac{j^2}{2E-1} K_Z^2}{1 - K_Y^2 - K_Z^2}}^{-\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (77)$$

Na obr. 44 je znázorněn poměr v_k/v_s v závislosti na $K_Y =$

$= Y/P$ a $K_Z = Z/H$. Přiřazená čísla k jednotlivým křivkám jsou poměrné souřadnice počátku FK.



Obr. 44

2.4.3.3 Zhodnocení metod výpočtu geometrie a rychlosti růstu PK

Souborně lze říci, že snaha o jednoduchý výpočet s sebou přináší řadu předpokladů. Čím méně jsou tyto předpoklady splněny, tím je výpočet nepřesnější a nedokonalější. Naopak ale, čím je výpočet objektivnější, tím je složitější. Poměrně jednoduché, ale značně nedokonalé jsou výpočty v rovině $z = 0$. Podstatně objektivnější, důležitý výpočet v prostoru je však značně složitý. Je proto opět zjednodušován, což ale znovu vede k jeho nepřesnosti a nedokonalosti.

Výpočet v rovině $z = 0$ je svým pojetím velmi jednoduchý, ale nedává skutečný obraz o geometrii růstu a rychlosti krystalizace, neboť PK nerostou rovnoběžně s rovinou $z = 0$ a tím je celý výpočet zkreslený. Mimo výpočet Wittkeho se předpokládá ortogonální růst, ale rostou-li ve skutečnosti PK v rovině $z = 0$ případ od případu pod jiným úhlem, je zde otázka uplatňování ortogonalitě skutečně pochybná. Rovněž náhrada krystalizační části SL elipsou neodpovídá skutečnosti, neboť při svařování pod tavidlem jsou SL převážně slzovitého tvaru. Tuto ne rovinnost do jisté míry odstranila Mastrjukova t.zv. obecnou rovnicí krystalizace. Výpočet v rovině $z = 0$ bere v úvahu pouze plošný tvar a velikost SL. Rykalinova teorie šíření tepla, jakožto základ výpočtu v rovině $z = 0$ operuje s řadou těžko přesně postižitelných materiálových vlastností, proměnných nejen s teplotou, ale i ve vzájemných vazbách, při čemž některé vlivy (např. skup. teplo tuhnutí, anisotropie) nejsou do výpočtu vůbec počítány.

Výpočet v prostoru je složitější než v rovině $z = 0$, ale dává podstatně objektivnější pohled na geometrii a růst PK. Vychází rovněž z všeobecně uznávané podmínky ortogonálního růstu. Náhrada SL se provádí co možno matematicky jednoduše vyjadřitelnou fiktivní plochou IK. Na její vhodné volbě a tím i reprodukci závisí objektivnost výpočtu. Předpokládá se při tom, že rozhraní mezi tavným a krytalizačním pásmem ve SL je rovina kolmá k ose X, což zdaleka nesouhlasí se skutečností. Výpočet zahrnuje pouze tvar SL pod rovinou $z = 0$ t.j. mimo převýšení svaru. V případě že by pro výpočet bylo použito místo velikosti a tvaru skutečné SL, SL vypočítané podle Rykalinovy teorie šíření tepla dojdeme ke stejným nepřesnostem jako v případě výpočtu pro rovinu $z = 0$.

Konečně je pro rovinný i prostorový výpočet nutno konstatovat, že jsou určeny vlastně jen pro jednovrstvý návar na desku (při nejlepším definované tloušťky) a nezahrnují důležité případy, běžné v technické praxi t.j. např. svařování do úkosu, vícevrstvé a koutové svary a p.

3. Experimentální část

3.1 Stanovení geometrie a rychlosti růstu PK při svařování PT

Ze zhodnocení v odst. 2.4.3.3 vyplynula celá řada nedostatků současných výpočetních metod, které vedou případ od případu k více či méně zkresleným výsledkům proti skutečnosti. Řada zmíněných dílčích nedostatků - vlivů byla od r. 1966 předmětem vědecko-výzkumné práce v návazných fakultních úkolech LFS 28, LFS 45/1,2,3 a LFS 103/1,2, řešících informativně problematiku krystalizace SK při svařování PT. Vyplynulo z ní několik prací /27,54,55,56,36,37,57/, ve kterých byly v podstatě řešeny tyto dílčí úkoly :

1. Vliv vláken na krystalizaci SK
2. Vliv textury na směr růstu PK
3. Vliv max. teplotního gradientu na směr růstu PK
4. Srovnání tvaru PK získaných výpočtem a experimentálně
5. Srovnání velikosti a tvaru SL získaných výpočtem a experimentálně, při čemž byl sledován vliv I_s , v_s a teploty předehřátí.

3.1.1.1 Závěry z informativních zkoušek

Všechny zkoušky v rámci uvedených prací (kap. 3.1) byly provedeny na oceli 11373.1 tl. 12 a 20 mm svařováním PT (Z-41-ČSN 05 5711, VÚZ 34 Mn-ČSN 05 5712), svařovacím drátem Ø 5 mm (Al02, ČSN 05 5376) svařovacími parametry v rozsahu $I_s = 700$ až 1000 A, $v_s = 20$ až 40 m/hod. Vyplynulo z nich :

1. Orientace vláken základního materiálu vzhledem k ose svaru má vliv na odvod tepla a tím i na primární krystalizaci SK /55/. Při dalších zkouškách je třeba tento fakt respektovat a vlákna orientovat jedním směrem.
2. Vliv textury se u jednovrstvých svarů neprojevil, neboť ocel 11373.1 se texturou nevyznačuje. Neprojevil se však ani podle očekávání podstatně u vícevrstvých svarů. Toto tvrzení bylo experimentálně ověřeno metalograficky a rentgenovou difrakcí /56/. Podle /27/ byly svařeny desky, jejichž

stykové plochy byly upraveny z předchozích svarů 1,2 (obr.45).



PK svaru 3 jsou sice na rozhraní svarů 1,3 a 2,3 orientovány (ve vrstvě asi od 0,05 do 0,2 mm) ve směru PK 1 a 2, ale dále již ve směru max G.

Obr. 45

3. Z /55,56,57/ plyne, že se lze pro danou ocel (nebo ocel podobné charakteristiky) ztotožnit s všeobecně uznávanými závěry, podle nichž je možno považovat růst PK SK v podstatě ve směru max G t.j. kolmo na IK, nebo-li ortogonálně a to jak u svarů jednovrstvých, tak i vícevrstvých.
4. Při experimentálním ověřování výpočtu s neortogonálním růstem v rovině $z = 0$ podle Wittkeho byly zjištěny značné rozdíly mezi hodnotami vypočtenými (pomocí diagramu na obr. 34) a námi experimentálně stanovenými /54/. Tyto závěry ale již nejsou v současné době rozhodující, neboť jsou již k dispozici údaje, které vystihují skutečnost lépe /19/. V rámci LFS 103/1,2 a /57/ bylo provedeno srovnání prostorové geometrie růstu PK výpočtem podle Prochorova s experimentálními výsledky. Výchozí náhrada SL elipsoidem se ukázala při svařování PT jako zcela nevyhovující. Srovnatelnější vypočtený tvar PK se skutečným byl při náhradě SL kuželem.
5. Na stejných experimentálních vzorcích SL jako v /57/, provedených při odstupňovaném I_g a v_g byla porovnána velikost a tvar SL, vypočtených dle Prochorova, s hodnotami experimentálními /37/. Srovnání se vyznačuje rozkolísanými výsledky. V /36/ bylo dosaženo ještě menší shody vypočtené a skutečné velikosti a tvaru SL. Zkoušky byly provedeny bez i s odstupňovaným předehřátím svařovaných zkušebních vzorků. Experimentální SL ale byly na rozdíl od /37/ provedeny ne jako návar, ale jako tupý svar plechu tl. 12 mm na tavidlové podložce.

3.1.2 Návrh nové metody

Ze zhodnocení metody výpočtu geometrie a rychlosti růstu PK v prostoru (odst.2.4.3.3) vyplynula řada jejích nedostatků, které byly závěry z informativních zkoušek (kap.3.1.1) ještě rozšířeny o neshodu s našimi experimenty. Možno proto říci, že i tato, dosud nejdokonalejší metoda neposkytuje výsledky dostatečně odpovídající skutečnosti a nedá se bez větších nepřesností aplikovat na řadu důležitých případů v technické praxi.

Byla proto navržena nová, poměrně jednoduchá a nenáročná experimentálně-výpočetní metoda, která odstraňuje shora uvedené nedostatky zmíněného výpočtu v prostoru a která je založena pouze na jediném, do značné míry proanalyzovaném předpokladu - ortogonálním růstu PK.

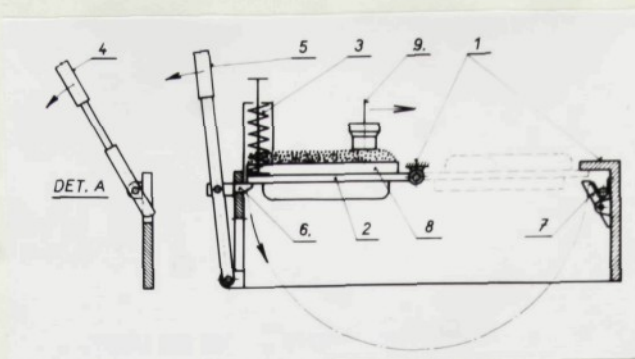
Princip nové metody spočívá v tom, že se vychází z experimentálně získané SL, jejíž plocha je nahrazena dostatečně četnou soustavou bodů souřadného systému XYZ. Geometrie a rychlost růstu PK je za předpokladu ^{prakt} přibližně ortogonálního růstu z dané soustavy bodů stanovena podle předem stanoveného (pro všechny lázně stejného) programu na samočinném počítači MINSK 22.

3.1.2.1 Experimentální stanovení SL

Na základě zhodnocení experimentálních metod stanovení velikosti a tvaru SL v odst. 2.3.1.7 bylo pro náš účel navrženo a vyrobeno zařízení, pracující na principu rychlého sklopného vylití tavné lázně.

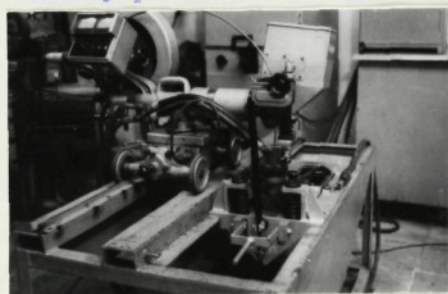
3.1.2.1.1 Sklopné vylévací zařízení

Zařízení sestává podle obr. 46 z dílů 1 až 7. Obr. 46. 1- nosný rám, 2-sklopná deska, upravená i pro svařování na tavidlové podložce, 3-pružiny, 4-napínací páka, 5-ovládací páka, 6-pojistka, 7-zachycovač, 8-zkušební vzorek, 9-svařovací hlava.

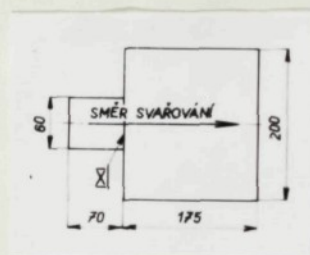


Obr. 46

Celkový pohled na sklopné zařízení je na obr. 47



Obr. 47



Obr. 48

Velikost a tvar zkušebního vzorku byla navržena podle obr.48 s ohledem na velikost SL při svařování PT již při konstrukci sklopného zařízení. Povrch zkušeb. vzorků je obeustranně otryskán ocelovými broky.

3.1.2.1.1 Pracovní postup(obr.46):

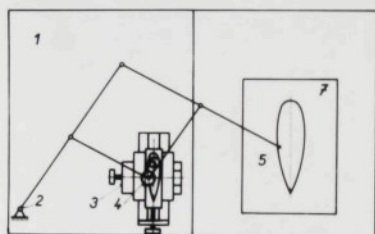
Uazením sklopné desky 2 do výchozí polohy napínací pákou 4 s jejím zajištěním pojistkou 6 pomocí ovládací páky 5 se stlačí pružiny 3. Na sklopnou desku se upne příchýtkami zkušební vzorek a zařízení je připraveno ke zkoušce. Svařovací zkouška se děje v šipkou naznačeném směru. V určité poloze svařovací hlavy 9 vzhledem ke konci zkušebního vzorku se spouštěcí pákou uvolní pojistka a sklopná deska i se zkušebním vzorkem je stlačenými pružinami vymrštěna ve směru šipky a zajištěna zachycovačem v poloze o 180° otočené. Setrvačností a odstředivou silou se celá tavná lázeň vylije a ve zkušebním vzorku zůstane dutina - skutečná SL.

3.1.2.2 Náhrada skutečné SL soustavou bodů

Náhrada vychází z grafického záznamu vrstevnic, provedeného na snímacím zařízení navrženého a vyrobeného speciálně pro daný účel na VŠST v Liberci.

3.1.2.2.1 Snímací zařízení

Sestává podle obr.49 z dílů 1 až 5. Celkový pohled je na obr. 50.



Obr. 49



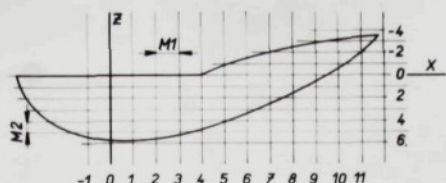
Obr. 50

1- podstavec, 2- stojan, 3- posuvný svěrák, 4- snímací hlava, 5- písačko, 6- vzorek, 7- záznam.

3.1.2.2.2 Pracovní postup (obr.49):

Vyříznutý vzorek SL (6) ze zkušebního vzorku se upevní do posuvného svěráku, při čemž se rovina $z = 0$ srovná tak, aby byla shodná s rovinou pohybu kuličkového hrotu snímací hlavy. Sledujeme-li kuličkovým hrotem v této rovině obrys SL, запиše nám písačko 5 na záznam 7 nulitou vrstevnicí v měřítku 2 : 1. Dále již jen provedeme nastavení kuličkového hrotu mikrometrickým šroubem snímací hlavy ve směru +, nebo - osy Z o zvolenou diferenci M2 (obr.51) a stejným postupem запиšeme vrstevnici v příslušné rovině XI. Tak získáme grafický záznam soustavy vrstevnic SL.

Náhrada SL soustavou bodů je pak provedena tak, že průřezy zmíněných vrstevnic s rovinami YZ, vzdálených od sebe o diferenci M1 (obr.51) jsou hledanou soustavou bodů, potřebnou pro další výpočet na samočinném počítači.



Obr. 51

3.1.2.3 Program výpočtu

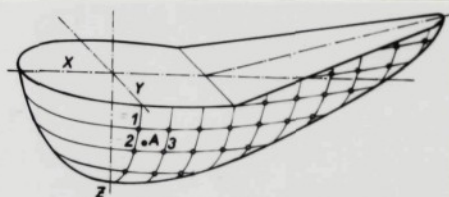
Program výpočtu byl proveden ve spolupráci s Automatizačním střediskem VŠST Liberec.

Cíl výpočtu:

1. Stanovení souřadnic prostorových os PK
2. "- rychlosti růstu PK

Svarová lázeň musí být zadána dostatečně četnou soustavou bodů. Její prostorově hladkou plochu je potom možno ze zadané soustavy bodů nahradit rovněž četnou soustavou sečných rovin.

3.1.2.3.1 Stanovení souřadnic prostorových os PK

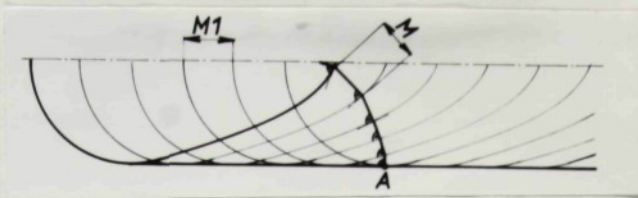


Obr. 52

zadané soustavy bodů 1,2,3. Směrový vektor zmíněné normály byl získán jako součin směrových vektorů tří přímek, procházejících body 2,3 a 1,2, t.j. prakticky tečen k SL v rovinách rovnoběžných s rovinami XY a YZ, procházejících bodem A.

Průsečík zmíněné normály s posunutou SL ve směru osy X o diferenci $M1$ je dalším bodem osy PK. Položíme-li tento bod opět jako výchozí, dojdeme stejným postupem k dalšímu bodu osy PK atd., až je stanovena celá osa PK. Tento děj je ve zjednodušeném rovinném pojetí na obr. 53.

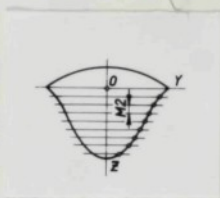
Ve shodě s principem nové metody, která respektuje ortogonální růst (kap.3.1.2) poroste krystal např. z výchozího bodu A (obr.52) ve směru normály k sečné rovině, procházející nejbližšími body



Obr. 53

U SL byl za počátek osové soustavy O (obr.52) vzat průsečík roviny YZ, vedené jejím nejhlubším místem s osou X.

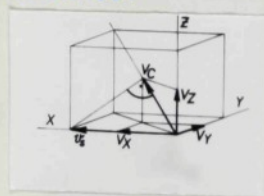
Program je uspořádán tak, že se nezadává jen jeden počáteční bod, ale automaticky se spočítají souřadnice X,Y,Z postupně vznikajících bodů všech os PK, vyrůstajících z průsečíků vrstevnic (v hloubce Z, = $\sqrt{2}, 2\sqrt{2}$, atd.) s rovinou YZ, procházející počátkem osové soustavy ($X=0$) (obr.54)



Obr. 54

3.k.2.3.2 Stanovení rychlosti růstu PK

V programu jsou spočítány rychlosti růstu PK ve všech bodech spočítaných podle odst. 3.1.2.3.1 a to v jednotlivých směrech X,Y,Z (V_X, V_Y, V_Z) a rovněž i rychlost růstu výsledná V_C (obr. 55)



Obr. 55

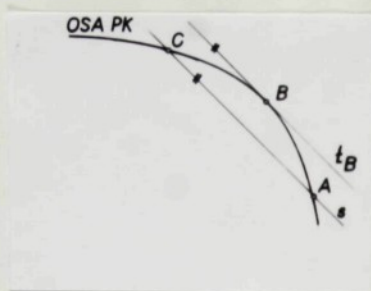
v_s - svařovací rychlost

V_C - výsledná rychlost růstu PK

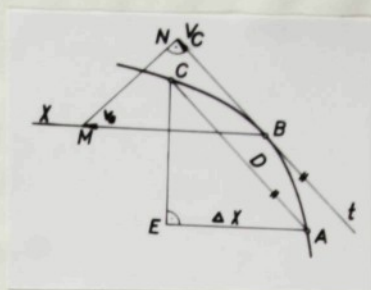
V_X, V_Y, V_Z - složky V_C

V_C

Výsledná rychlost růstu V_C má směr tečny prostorové osy PK. Směr tečny byl stanoven (např. v bodě B) podle obr.56 jako směr sečny, procházející předchozím (A) a následným vypočteným bodem (C) osy PK.



Obr. 56



Obr. 57

Z podobnosti rychlostního $\triangle BMN$ a $\triangle ACE$ plyne, že

$$V_C / v_s = \Delta X / D, \text{ z čehož}$$

$$V_C = v_s \cdot \Delta X / D \dots\dots\dots (78)$$

kde ΔX = rozdíl X-ových souřadnic předchozího a následného bodu osy PK (tj. A a C) a

D = skutečná vzdálenost bodů AC.

3.1.2.3.3 Sled vstupních dat a výstup výsledků

Program je vypracován v jazyce FEL - ALGOL /58/.

Sled vstupních dat (příkladně podle obr.51)

1. Počet řešených případů P
2. Jmenovka - 3 znaky označující svař. podmínky SL a pořadové číslo zkoušky
3. Pořadové číslo N1 poslední roviny rovnoběžné s rov. XY v oblasti osy +Z, v rozsahu $\Delta X = -1$ a výše (na obr.=5).
4. Pořadové číslo N2 poslední roviny rovnoběžné s rov. YZ, určující šířku v oblasti osy +Z (na obr. = 9).
5. Pořadové číslo N3 první roviny rovnoběžné s rov. YZ, určující šířku v oblasti osy - Z (na obr. = 4)
6. Pořadové číslo N4 poslední roviny rovnoběžné s rov. YZ, určující šířku v oblasti osy - Z (na obr. = 11)
7. Pořadové číslo N5 poslední roviny, rovnoběžné s rov. XY, v oblasti osy -Z (na obr. = - 3).

8. Hodnoty šířky vrstevnic SL v jednotlivých rovinách YZ t.j. od roviny $X = -1$ do $X = N2$ a to postupně od $Z=0$ až do $Z = + \max$.
9. Hodnoty šířky vrstevnic SL v jednotlivých rovinách v oblasti osy -Z, t.j. od roviny $X=N3$ do $X=N4$ postupně od $Z = -1$ do $Z = N5$.
10. Hodnoty hloubek SL ve svislých rovinách $X = -1$ až $X = N4$
11. Vzdálenost mezi rovinami YZ, t.j. M1 v mm
12. -W- XY, t.j. M2 v mm
13. Svařovací rychlost v m/hod.

Výstup výsledků

1. Pořadové číslo bodu osy PK
2. X-ová souřadnice bodu osy PK
3. Y- " " " "
4. Z- " " " "
5. X-ová složka rychlosti růstu osy PK v odp. bodě
6. Y- " " " " "
7. Z- " " " " "
8. Celková rychlost růstu PK

Hodnoty 1.až 8.se vytisknou automaticky pro všechny PK se souřadnicemi výchozích bodů v oblasti osy + Z = 1 až N1.

3.1.3 Ověřovací zkouška

3.1.3.1 Experimentální stanovení SL

Zkušební vzorek

Materiál: Ocel jakosti 11 373.1, tl. 20 mm

Rozměry: dle obr.48

Povrch: Oboustranně otryskán ocelovými broky

Experimentální zařízení

Svařovací traktor pro svařování pod tavidlem SUM 1000

Svařovací transformátor TS 1000/3

Sklopné vylévací zařízení (popis v odst.3.1.2.1)

2 zapisovače typu VAREG

Převodový transformátor proudu 1500/5A

Přídavný materiál

Svařovací drát: A102-ČSN 05 5376, $\varnothing$ 5 mm

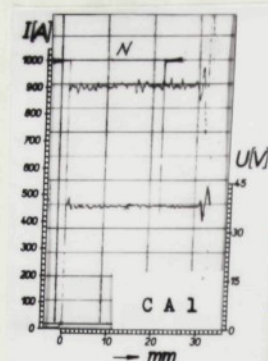
Tavidlo: VÚZ-34 Mn-ČSN 05 5712

Svařovací parametry

Při svařovacích zkouškách, ze kterých je vyňata tato ověřovací zkouška, byly předurčené a na svařovacím zařízení nastavené hodnoty svařovacích parametrů $I_s = 900A$, $U_s = 41V$, $v_s = 20m/hod.$ kontrolovány přímým sledováním ručičkových ukazatelů. Navíc byly pro přesnější vyhodnocení a sledování rovnoměrnosti svařovacích parametrů v průběhu svařování zkoušky svařovací proud I/A a napětí U/V zapisovány na zapisovačích VAREG.

Na obr. 58 jsou uvedeny hodnoty svařovacích parametrů nastavených, zapsaných a odečtených při svařovací zkoušce SL CA1.

Ze záznamu je vidět, že sledované parametry byly v průběhu svařovací zkoušky poměrně dostatečně rovnoměrné. Rychlost záznamu byla 3600 mm/hod. Označený úsek N je úměrný celé délce skutečné SL L podle vztahu $N = 3,6 L/v_s$.

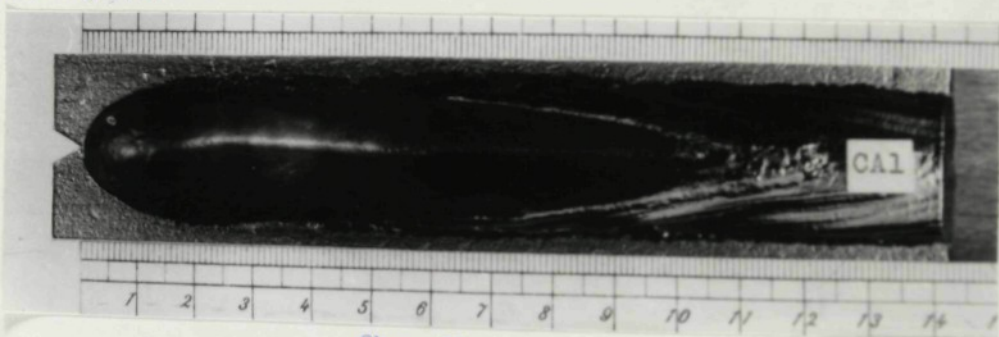


Vzorek	SL	CAL	
Hodnota	na voltmetru SUM 1000	odečtená ze záznamu	
I_s	900	903	
U_s	41	37,6	
V_s	20		

Obr. 58

Skutečná SL CAL

Výsledkem sklopné vylévací zkoušky, provedené podle pracovního postupu, popsaného v odst. 3.1.2.1.1 je skutečná SL, uvedená na obr. 59.



Obr. 59

3.1.3.2 Náhrada skutečné SL CAL soustavou bodů

Pracovní postup:

1. Grafický záznam vrstevnic očištěné SL CAL v měř. 2 : 1 (příloha P1) byl proveden pracovním postupem, navrženým v odst. 3.1.2.2 na snímacím zařízení, popsaném tamtéž. Roviny XY, ve kterých leží jednotlivé vrstevnice skutečné SL jsou od sebe vzdálené o diferenci $M_2=1$ mm.
2. Grafický záznam byl překreslen na výkres v měř. 10:1 (volná příloha P2), ve kterém byl zvolen počátek souřadného systému v nejhlubším místě SL. Celá délka SL byla rozdělena rovinami YZ (řezy), vzdálenými od sebe (v měř. 1 : 1) o diferenci $M_1=2,5$ mm.

3. Z výkresu SL v měř. 10 : 1 (volná příloha P2) byly ve všech řezech rovinami YZ (od-1 do M4, t.j. poslední roviny YZ protínající SL odečteny :

a. Šířky všech uvedených vrstevnic SL

b. Hloubky a převýšení SL

Zmíněné hodnoty byly zaznamenány do tabulky v příloze P3.

4. Z přílohy P3 byl sestaven sled vstupních dat podle odst.

3.1.2.3.3 a to pro počátek souřadného systému v nejhlubším místě SL. Je vytištěn ve volné příloze P4.

3.1.3.3 Vyhodnocení záznamu ze samočinného počítače MINSK 22

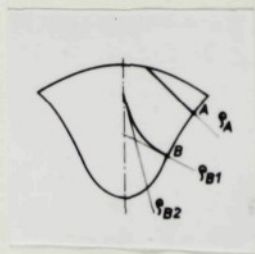
Na záznam z počítače MINSK 22 ve volné příloze P5 jsou číselné výstupní výsledky ve sledu 1 až 8, udaném v odst.

3.1.2.3.3. Z tohoto záznamu byla vyhodnocena zvlášť geometrie růstu PK a zvlášť rychlost růstu PK.

3.1.3.3.1 Geometrie růstu PK

Ve volné příloze P5 jsou stanoveny souřadnice jednotlivých bodů os PK. Z těchto bodů jsou v příloze P6 nakresleny průměty vypočítaných os PK do roviny YZ a v příloze P8 do rovin XY (Zal až 12).

V rovinách XY se však geometrie růstu PK nedá dobře srovnat se skutečnými tvary PK na příslušných metalografických výbrusech. Možné je to ale podle obr. 60 v případě, že PK roste v rovině φ_A , nebo v případě zakřivené osy PK a jistou přibližností v rovinách φ_{B1} a φ_{B2} .



Obr. 60

V příloze P9 je ve smyslu obr. 60 nakreslena geometrie růstu dvou PK, při čemž první má počátek v hloubce $Z = 2$ a druhý $Z = 8$.

3.1.3.3.2 Rychlost růstu PK

V příloze P5 jsou stanoveny XYZ-složky celkové rychlosti růstu V_c a rovněž i V_c sama. Průběh V_c podél všech dvanácti vypočítaných PK je nakreslen v příloze P11, při čemž délky PK v prostoru (pro případ SL CAL přibližně v rovině YZ) byly transformovány do podélných pořadnic.

3.1.3.4 Metalografické stanovení geometrie růstu PK

Geometrie růstu PK ve zkušebním svaru CAL byla pro porovnání s geometrií vypočítanou stanovena metalograficky v souladu s odst. 3.1.3.3.1.

1. V příloze P7 je příčný řez svarem (rovinou YZ).
2. V příloze P10 je v souladu s obr. 60 a podle přílohy P9 podélný řez svarem :
 - a) Rovinou φ_A , ve které rostou PK s počátkem v hloubce $Z = 2$.
 - b) Tečnými rovinami φ_{B1} a φ_{B2} k PK s počátkem PK v hloubce $Z = 8$

3.1.3.5 Zhodnocení naměřených výsledků

I. Geometrie růstu PK

1. V rovině YZ

Srovnáním vypočtené geometrie růstu PK (příloha P6) s geometrií růstu PK skutečnou (příloha P7) je možno konstatovat jejich dobrou shodu. Malá odchylka tvaru obrysu svaru vypočteného (ve skutečnosti odečteného ze skutečné SL) a daného metalografickým výbrusem dokumentuje jen to, že svařovací proces podél osy X při svařování PT neprobíhá v souladu se záznamem na obr. 58 nikdy zcela rovnoměrně. V našem případě je však možno tuto skutečnost zanedbat.

2. V rovině φ_A :

Srovnáním vypočtené g. růstu PK s počátkem v hloubce $Z=2$ (příloha P9) s geometrií růstu PK skutečnou (příloha P10) je možno konstatovat jejich velmi dobrou shodu.

3. V rovinách φ_{B1} a φ_{B2} :

Srovnáním vypočtené geometrie růstu PK s počátkem v hloubce $Z=8$ v rovině φ_{B1} a φ_{B2} (příloha P9) lze rovněž konstatovat celkem dobrou shodu s g. růstu skutečnou, dokumentovanou v příloze P10.

Sledování růstu PK se značně zakřivenou osou v rovině YZ je však obtížnější a také nepřesnější, než v předchozím případě, neboť stopami rovin φ_{B1} a φ_{B2} jsou osy sledovaných krystalů nahrazeny pouze přibližně. Rovněž v oblasti středu svaru (roviny XZ) nelze již v důsledku projevu velkého obohacení taveniny přísadami, nebo nečistotami (viz obr. 24) přesněji směr růstu PK stanovit, neboť se zde již projevuje velké rozvětvení dendritů. I tak je však možno na základě uvedeného srovnání souhlasit s uvedeným vyhodnocením.

II. Rychlost růstu PK

Z přílohy P11 je zřejmé, že průběhy v_k PK, vyrůstající v různých hloubkách svaru se svým charakterem navzájem značně liší.

U PK v horní části svaru se směrem k jeho ose v_k zvětšuje.

Čím vyrůstá PK z větší hloubky (souřadnice Z), tím více nabývá průběh v_k podoby ležatého ^{obrázcového} S s maximem ^{ve středu} svaru, ale stále relativně nižším oproti druhému vznikajícímu maximu v určitém místě podél PK. Posléze u spodních PK maximum v ose svaru zcela zmizí a v_k je v těchto místech minimální.

První maximum v_k u konce PK ve středu svaru se nejprve s rostoucí souřadnicí počátku PK (do $Z=3$) zvětšuje, dále zůstává (od $Z=3$ do 5) přibližně stejné a posléze (od $Z=6$ až 10) má klesající tendenci až u posledních dvou PK přechází v minimum.

Druhé maximum v_k s rostoucí souřadnicí Z jeho počátku roste (až do $Z = 10$) a potom mírně klesá (až do $Z = 12$).

Stanovené průběhy v_k byly srovnány s literárními údaji sk. Prochorova /19/. Ze srovnání je možno učinit tyto závěry :

1. Charakter stanovených průběhů v_k souhlasí rámcově se schematickými údaji vyplývajícími z výpočtu v_k dle /19, str. 611/. Schematicnost je však v našem případě nahrazena konkrétností.
2. Při srovnání námi stanovených absolutních hodnot v_k s údaji /19, str.606/ (t.j. obdobný diagram jako v obr.44, ale pro prohnutou plochu SL) je vidět, že literární hodnoty v_k jsou zvláště ve středu svaru vyšší. Výpočet v prostoru, provedený dle /19/ však vychází z náhrady SL plochou, při čemž náhrada provedená např. podle obr. 13b dokumentuje, že PK rostou teoreticky až do bodu O'' , což se ale nekryje se skutečností. Tím podle prostorového výpočtu uvedeného v /19/ vychází nutně v_k poblíž osy Z větší, než je v_k skutečná.

Z uvedené analýzy vyplývá, že námi stanovený průběh rychlosti růstu PK je možno považovati (za předpokladu náhrady SL dostatečně četnou soustavou bodů) ve srovnání s literárními údaji za reálnější.

3.1.4 Faktory snižující přesnost měření a hodnocení

1. Stanovení geometrie a rychlosti růstu PK vychází při dané metodě z experimentálně získané SL. Z toho vyplývá, že pokud to metoda svařování PT dovoluje je třeba při svařovací zkoušce zajistit přesné svařovací parametry a podmínky, s jejich minimálním kolísáním.
2. Sejmutí SL popsaným způsobem a věrné překreslení do výkresu v měř. 10 : 1 umožňuje získat její velikost a tvar s minimální chybou.
3. Odečtení hodnot souřadnic jednotlivých vrstevnic SL je z výkresu 10:1 pro daný případ poměrně přesné, neboť se dají odečítat s jistotou na 0,05 mm. Odečítání hodnot bylo v daném případě provedeno vizuálně, ale v budoucnu je počítáno s přesnějším

a rychlejším odečtem na souřadnicovém zapisovači BAK 4, který je k dispozici na našem Výpočetním středisku. Každá nepřesnost ve čtení souřadnic se projeví příslušnou nepřesností a rozkolísaností hlavně průběhu v_k a to především v místech s malým poloměrem křivosti IK; t.j. poblíž paty a středu svaru.

4. Na přesnost výsledků má vliv volba četnosti bodů, t.j. (podle obr.51) volba difference M1 a M2. Zmenšením těchto diferencí se úměrně zpřesní i dosažené výsledky, ale jen při současném zpřesnění čtení hodnot souřadnic pro samočinný počítač, o kterém bylo pojednáno v bodu ad 3. Diference M1 a M2 určují také více či méně dokonalý ortogonální růst. Čím jsou větší, tím jsou (podle obr.53) PK přímější než teoreticky ortogonální, při čemž v místech menších poloměrů křivosti IK je odklon větší, než v místech poloměrů křivosti větších.

Na uvedeném příkladu SL CAI je možno souhlasně v příloze P6 pozorovat, že se osy PK v blízkosti osy Z k této ose mírně přiklánějí. Obdobně se tato okolnost projeví poblíž středu svaru i jistým zmenšením v_k .

Nedokonalý ortogonální růst je však s ohledem na výsledky měření vyplývajících z obr.35 možno označiti jako výhodu - přiblížení se ke skutečné geometrii růstu. Vyžaduje to však odpovídající správnou volbu diferencí M1 a M2.

- 5.2 podstaty stanovení souřadnic prostorových os PK v odst. 3.1.2.3.1 je zřejmé, že souřadnice PK nelze v horní části svaru spočítat zcela až do jejich konců. Možné to ale přesto je korekcí vstupních hodnot v oblasti návaru pro samočinný počítač. Nedopustíme se však velké chyby provedeme-li dokreslení konců PK jednoduše prostým odhadem, tak, jak to bylo učiněno (čárkovaně) v příloze P6.

4. Z á v ě r

Předložená habilitační práce má dvojaký cíl. Ukazuje nejen na osobní technickou činnost v průběhu minulých let z pohledu vědeckovýzkumného, ale i z pohledu jejího využívání pro účely výchovy mladé technické generace na VŠST v Liberci, neboť informativní ověřování správnosti postupu celé práce bylo řešeno v návaznosti s našimi studenty v rámci jejich odborné praxe ve IV. a V. ročníku a v jejich diplomových pracích, jak bylo již řečeno v úvodu.

Z hlediska technického byl v předložené práci proveden rozbor nedostatků stávajících výpočetních metod ke stanovení geometrie a rychlosti růstu primárních krystalů při tavném svařování, návrh a ověření nové poměrně nenáročné experimentálně výpočetní metody s využitím samočinného počítače MINSK 22, která umožňuje objektivněji stanovit geometrii a rychlost růstu primárních krystalů při svařování pod tavidlem a to pro všechny technicky důležité druhy svarů, používaných při výrobě svařovaných konstrukcí.

Na základě teoretického rozboru řady informativních zkoušek a zhodnocení současných metod výpočtu geometrie a růstu primárních krystalů při tavném svařování byla navržena a vyvinuta nová experimentálně výpočetní metoda. Princip nové metody stanovení geometrie a rychlosti růstu primárních krystalů při svařování pod tavidlem spočívá v tom, že vychází z experimentálně získané svarové lázně sklopnou vylévací zkouškou, jejíž plocha je nahrazena dostatečně četnou soustavou bodů souřadného systému XYZ. Geometrie a rychlost růstu primárních krystalů je za předpokladu (přibližně) ortogonálního růstu z dané soustavy bodů stanovena podle předem stanoveného programu na samočinném počítači MINSK 22.

Princip metody byl ověřen pro zkušební svar při svařování pod tavidlem ($I_s = 900$ A, $U_s = 41$ V, $v_s = 20$ m/hod, $\delta_d = 5$ mm - A 102, VÚZ 34 Mn na oceli 11373.1) a vypočtené výsledky byly shledány v dobré shodě s výsledky stanovenými metalograficky.

Srovnáním dosažených výsledků s údaji literárními je možno konstatovat, že výsledky docílené novou metodou se blíží podstatně více skutečnosti, než údaje literární. Je to umožněno tím, že nová metoda vychází bezprostředně z reálné svarové lázně a není zatížena řadou předpokladů, jako metody jiné.

Výpočtem podle nové metody se stanoví najednou geometrie a průběh rychlosti růstu celé odstupňované řady primárních krystalů, což přináší obraz o skutečných poměrech při krystalizaci v celém průřezu svaru. Jsou tím např. vytvořeny předpoklady dokonalejšího poznání teplotního a deformačního pole při svařování. Čím přesnější budou znalosti o jejich průbězích, tím snadněji bude možno zvyšovat produktivitu svařování při současné záruce bezdefektních svarů, což jest při výrobě svařovaných konstrukcí primární podmínkou.

Další výhodou nové metody ve srovnání s metodami jinými je, že umožňuje stanovení geometrie a rychlosti růstu primárních krystalů u všech důležitých druhů svarů, běžných v technické praxi, což jiné metody neumožňují.

Především je však třeba zdůraznit, že vytčený technický cíl vyplynul ze snahy vědecky sledovat technické možnosti metody svařování pod tavidlem včetně jejích moderních modifikací, neboť jak bylo uvedeno v úvodu je nutno a je možno současnou hranici výkonu zmíněné metody značně překročit a urychlit výrobu svařovaných konstrukcí a přispět tak k zvyšování výroby nových jednoúčelových strojů a zařízení a podpořit tím sekundárně urychlení zavádění nových vědecko-výzkumných poznatků do výroby.

Zvyšování výkonu zvyšováním rychlosti svařování však s sebou přináší i zvýšené nebezpečí metalurgických vad, hlavně trhlin za tepla, které jsou v přímé souvislosti s geometrií a rychlostí růstu primárních krystalů ve svarovém kovu. Takto vyspecifikovaný problém bezprostředně související se zvyšováním produktivity svařování pod tavidlem, které je ve velké míře zavedeno v našich průmyslových podnicích a závodech, vyrábějících svařované konstrukce, si zaslouhuje, aby mu byla věnována patřičná pozornost.

Závěrem děkuji všem pracovníkům VŠST v Liberci, kteří mi umožnili a pomohli habilitační práci s úspěchem dokončit. Můj dík patří rovněž bývalým diplomantům, dnes Ing. V. Vašíčkovi, Ing. V. Stejskalovi, Ing. J. Halajovi, Ing. J. Říhovi, Ing. V. Dlouhému, Ing. J. Šantrůčkovi za spoluúčast na provedení informativních zkoušek, s. F. Hálkovi z Výrobních dílen VŠST za pomoc při realizaci zkušebních zařízení a Ing. J. Mojžíšovi, Ing. K. Hnykovi z Výpočetního střediska VŠST za spolupráci spojenou s výpočtem, programem a realizací výpočtu na samočinném počítači MINSK 22.

5. Seznam použité literatury

- 1 Zváranie pre prax-příloha časopisu Zváranie, č.2, s.12
- 2 Ruckdeschel, W.: Schweißtechnik-ein modernes Arbeitsgebiet von Linde. Firemní literatura fy Linde, Sonderdruck, Nr.30, 1969
- 3 Mathias, K.H.: Möglichkeiten und Massnahmen beim Einsatz maschineller Schweißverfahren, S+S, H.3, 1960, s.102-111.
- 4 Paton, B.E.: Úvahy o vývoji svařování kovů v SSSR, ČVTS, Praha, 1970
- 5 Belda J.: Současný stav a tendence ve vývoji metody svařování pod tavidlem. Připravený článek pro čas. Zváranie
- 6 Weisselberg, A.: Grundlagen der UP-Schnellschweißung, ZIS Mitteilungen, Nr.8, 1971, S.1095-1104
- 7 Plüschke, E.W.: UP-und ES-Schweißen in Japan, ZIS - Mitteilungen, H.1, 1966, S.107-136
- 8 Yoshinori, J.-Masahiko, J.-Nobuyuki, Y.: Vysokoskorostnaja svařka pod fljusom s posledovatelnyj raspoloženiem dvuch elektrodov, EJ-Svarka, No 2, 1972, s.15-24
- 9 Weisselberg, A.-Ratzsch, H.: Die Leistungsfähigkeit der UP - Pulsschweißung bei Stumpf - und Kehlnähten, ZIS-Mitteilungen, H.6, 1970, S. 701-714
- 10 Richter, E.: Einfluss Unserer Magnetfelder auf die Keupenform beim teilantomatischen Lichtbogenschmelzschweißen, Schweißtechnik, H.7, 1969, S.310-314
- 11 Paton, B.E.: Technologija električeskoj svarki plavlenijem, Našgiz, Moskva 1962 Kijev
- 12 Dokument IIW - komise XII.-Zkouška praskavosti svarového kovu za tepla
- 13 Hampl, J.: Nové metody zkoušení praskavosti za tepla při tavném svařování kovů, kandidátská dizertační práce, ČVÚT-Praha, 1972

- 14 Belda, J.: Praskavost koženové housenky za tepla, technická zpráva, VŠST-Liberec, 1971
- 15 Sohn, M.-Fehr, H.P.: Einfluss der Nahtform auf das Zähigkeitsverhalten von Schweissverbindungen, Schweiss-technik, H.3, 1969, S. 131-134
- 16 Richter, E.: Einfluss der Auseren Nahtform auf die Ermüdungsfestigkeit von Schweissverbindungen, Schweissttechnik, H.7, 1969, S.320 - 322.
- 17 Echtermayer, F.: -Stadermann, R.: Steuerungs und Regelungsprobleme in der Lichtbogen und Widerstandsschweisstechnik, ZIS-Mitteilungen, H.12, 1971, S.1721 - 1730
- 18 Prochorov, N.N. - Mastrjukova, A.S.: Rasčet schemy kristallizacii svarnovo žva, SP, No 2, 1961, s. 4-8
- 19 Prochorov, N.N.: Fyzičeskiye processy v metallach pri svarke, Metallurgija, Moskva, 1968
- 20 Wittke, K.: Gesetzmässigkeiten der Primärkristallisation beim Schweissen, Schweissttechnik, H.4, 1966, S.158-164
- 21 Sawage, W.F.-Lundin, C.D.-Aronson, A.H.: Weld Metal Solidification Mechanics, WJ - WRS, No4, 1965, 175-s - 181-s.
- 22 Eichhorn, F. - Engel, A.: Die Erstarrungsfront beim Lichtbogenschweissen von Stahl in Abhängigkeit von den Schweissbedingungen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Nr 1, 1971, S.71-74
- 23 Belda, J.: Odolnost svarového kovu proti trhlinám za tepla, Kand. dizertač. práce, VŠST-Liberec, 1969
- 24 Hora, V.: Kurs svařování pod tavídkem a elektrostruskového svařování, SNTL, Praha, 1963
- 25 Rykalin, N.N.: Die Wärmegrundlagen des Schweissvorganges, Verlag Technik Berlin, 1952
- 26 Havalda, A.: Tepelná kinetika při zvarání elektrickým oblúkom, SNTL, 1960
- 27 Belda, J.: Praskavost svarového kovu za tepla, Práce k aspirant. minimu, VŠST-Liberec, 1966

- 28 Mastrjukova, A.S.-Prochorov, N.N.: Rasčet izotermny krystalizacii pri svarke plastin v styk, SP, No 3, 1963, s. 5-7
- 29 Mastrjukova, A.S.: Rasčet schemy krystalizacii svarnych švov, AS, No 9, 1964, s.15-21
- 30 Prochorov, N.N. - Jakušin, B.F.-Prochorov, N.Nikol.: Technologická pevnost kovov v procese kryštalizácie pri zvarení, Zvaračské zprávy, č.5, 1967
- 31 Prochorov, N.N.-Jakušin, B.F.-Prochorov, N.Nikol.: Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen während des Kristallisationsprozesses beim Schweißen,, Schweißtechnik, H.1, 1968, S.8-11
- 32 Erochin, A.A.: Kinetika metallurgičeskich processov dugovoj sarki, Mašinostrojenije, Moskva, 1964
- 33 Iščenko, Ju.S.-Grečiškin, V.J.: Ocenka vesa svaročnoj vanny i geometričeskich razměrov zony proplavlennija, AS, No 11, 1966, s. 30-31
- 34 Eichhorn, P.: Dilthey, U.: High-speed X - ray fotography for submerged arc welding, Metal Constr. and BWJ, Nr 12, 1971, 453-456
- 35 Schmidt, V.: Zur Metallurgie des Unterpulverschweißens, S + S, H1, 1971, S.22-24
- 36 Říha, J.: Stanovte vliv teploty přehřátí na velikost a tvar svarové lázně, diplomová práce, VŠST-Liberec, 1970
- 37 Dlouhý, Vl.: Vliv svařovacích parametrů na velikost a tvar svarové lázně, diplomová práce, VŠST-Liberec, 1971
- 38 Blaškovič, P. - Koseček, M.-Vehner, L.: Zváranie pod tavidlom Alfa, Bratislava, 1970
- 29 Zváranie pre prax - príloha časopisu Zváranie, č.3
- 40 Paton, B.O.: Avtomatičeskaja elektrodugovája sarka, Mašgis, Kijev, 1953

- 41 Dončenko, V.F.: Vlijanije zazoru v styke na razmery poperačnovogo sečenija stykovovo šva pri avtomatičkoj svarke i fljusom, SP, No 9, 1964
- 42 Missikewitsch, A.: Die Definition des Übergangsquotienten Lichtbogenschweißung, Wissenschaftliche Zeitschrift der TH-Magdeburg, H.4, 1962, S.435-438
- 43 Missikewitsch, A.-Hanke, H.: Einfluss der Schüttdichte und Schütthöhe auf den Gasdruck in der Kaverne Wissenschaftliche Zeitschrift der TH-Magdeburg, H.4, 1962, S 439-445
- 44 Chalmers, B.: Fyzičeskoje metallovedenije, Metallurgizdat, Moskva 1963
- 45 Pluhař, J.: Koritta, J.: Strojářenské materiály, SNTL, 1966, Praha
- 46 Movčan, B.A.: Mikroskopičeskaja neodnorodnost v litych splavach, Gostechizdat USSR, 1962, Kijev
- 47 Gladštejn, L.I.: O pėrvičnoj kristalizacii metalla šva, AS, No 10, 1959, s.67 - 76
- 48 Polushkin, E.P.: Příčiny a odstraňování vad kovů, SNTL, 1963, Praha
- 49 Pokorný, A. a J.: De ferri metallographia, Berger-Levrault, 1967, Paris, Nancy
- 50 Sterenbogen, J.A.: O krystalizacii svaročnoj vany i osobennostjach jevo rasčeta, AS, No 6, 1966
- 51 Wittke, K.: Besonderheiten der Primärkristallisation des Schweißguts, Schweißtechnik, H.G., 1966, S 289-292
- 52 Sawage, W.F.-Aronson, A.H.: Preferred Orientation in the weld Fusion Zone, WJ-WRS, No 2, 1966, 85-s-89-s.
- 53 Prochorov, N.N.-Mastrjukova, A.S.: Rasčet schemy kristallizacii metalla šva pri svarke plastin vetyk, SP, No 6, 1962, s. 2-3

- 54 Vašíček, M.: Stanovení schéma krystalizace SK při svařování PT, diplomová práce, VŠST-Liberec, 1967
- 55 Stejskal, V.: Vliv krystalizace SK na praskavost za tepla, diplomová práce, VŠST - Liberec, 1967
- 56 Halaj, J.: Vliv textury na krystalizaci SK, diplomová práce VŠST - Liberec, 1967
- 57 Šantrůček, J.: Vliv velikosti a tvaru SL na schéma krystalizace, diplomová práce, VŠST-Liberec, 1972
- 58 Melichar, B.-Plášil, F.: Programování v ALGOLU, ČVÚT, Praha, 1969
- 59 Rossošinskij, A.A.: O metodach issledovanija pervičnoj struktury svarnych švov, AS, No 4, 1955

6. Použité zkratky a značky

PT	-	pod tavidlem
SL	-	svarová lázeň
IK	-	izoterma krystalizace
SK	-	svarový kov
PK	-	primární krystal (γ)
I_s	-	svařovací proud
U_s	-	-"- napětí
v_s	-	rychlost svařování
v_k	-	rychlost růstu PK (r. krystalizace)
G	-	teplotní gradient
AS	-	Avtomatičeskaja svorka
SP	-	Svaročnoje proizvodstvo
WJ	-	Welding Journal
BWJ	-	Britisch WJ
EI	-	Express informacija
S + S	-	Schweissen und Schneiden

7. Seznam příloh

- P1 - Grafický záznam vrstevnic SL (2:1)
- P2 - Výkres vrstevnic SL (10:1)
- P3 - Tabulka souřadnic bodů, nahrazujících SL
- P4 - Tabulka vstupních hodnot
- P5 - Záznam ze samočinného počítače MINSK 22
- P6 - Grafický záznam geometrie růstu PK (10 : 1)
v rovině YZ
- P7 - Metalografický řez svaru rovinou YZ (10:1)
- P8 - Grafický záznam geometrie růstu PK (10 : 1)
v rovině XY
- P9 - Grafický záznam geometrie růstu PK (10 : 1)
v rovině φ_A a φ_{B1} , φ_{B2}
- P10 - Metalografický řez svaru rovinou φ_A a φ_{B1} ,
 φ_{B2} (10 : 1)
- P11 -- Průběh rychlosti růstu v_k podél os PK



CA1

-3,62 -3,76 -3,9 -4,05 -4,2 -4,34 -4,47 -4,62 -4,76 -4,88 -5,03 -5,17

4,8 2,6

12,3 11,3 10,1 8,9 7,6 6,0 4,5 2,4

13,4 12,4 11,4 10,4 9,5 8,3 7,1 5,6 3,9 1,4

11,4 10,4 9,4 8,4 7,4 6,4 4,9 3,1

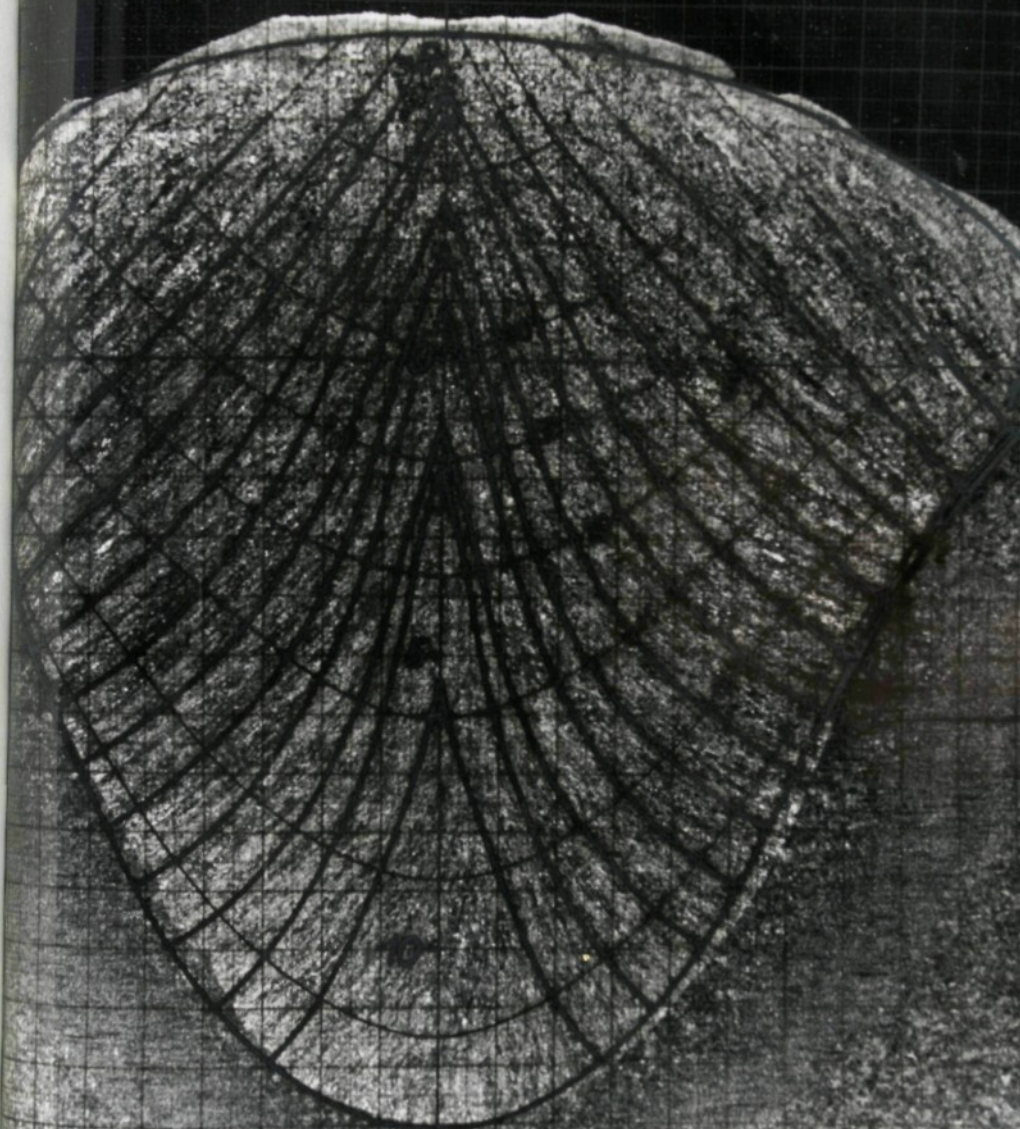
9,5 8,5 7,4 6,3 5,0 3,4 0,0

26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37

7,1 6,0 4,6 3,0

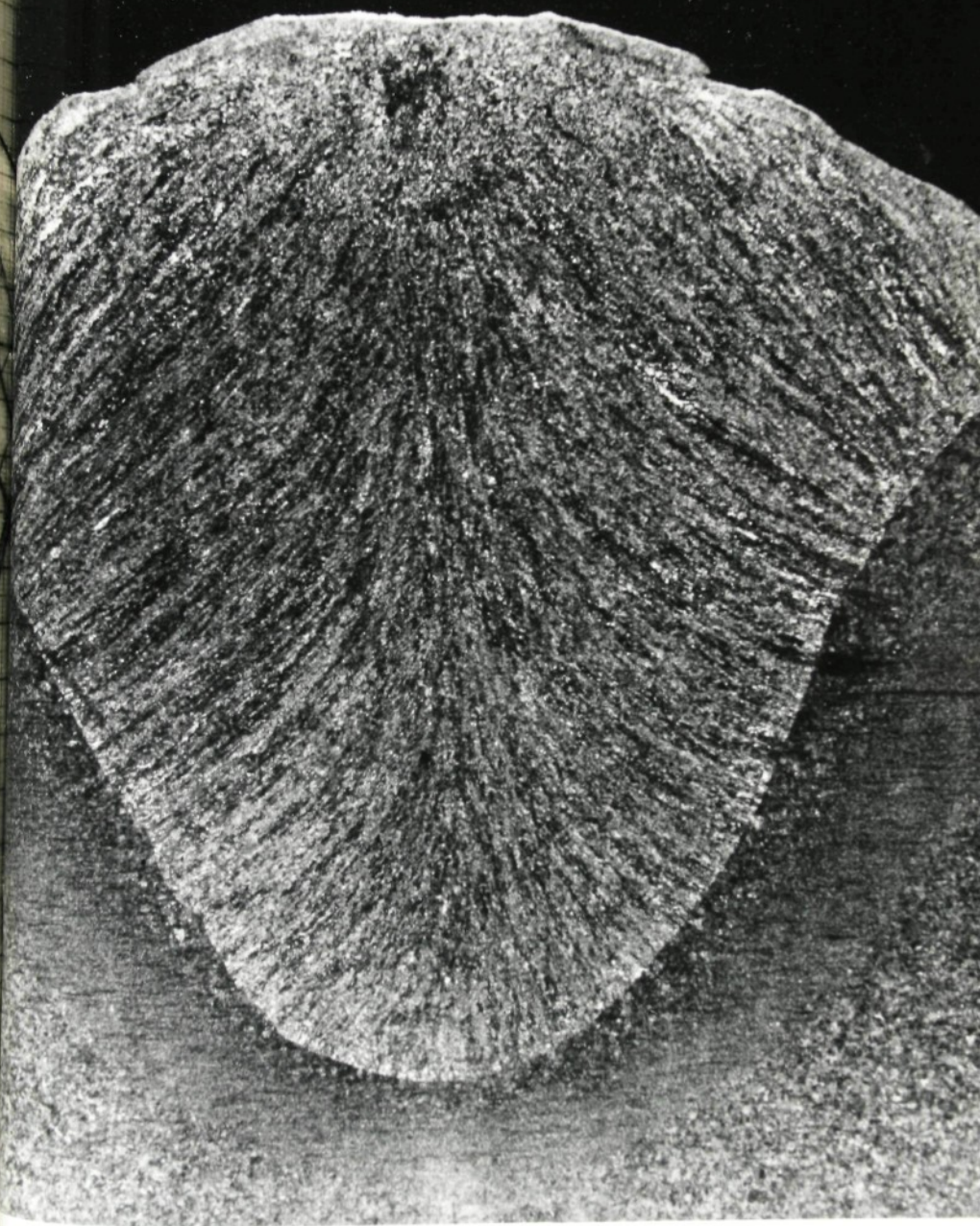
3,6 2,0

1,5 1,18 0,8 0,4 0,0 -0,5 -1,0 -1,6 -2,25 -2,9 -3,6 -4,5



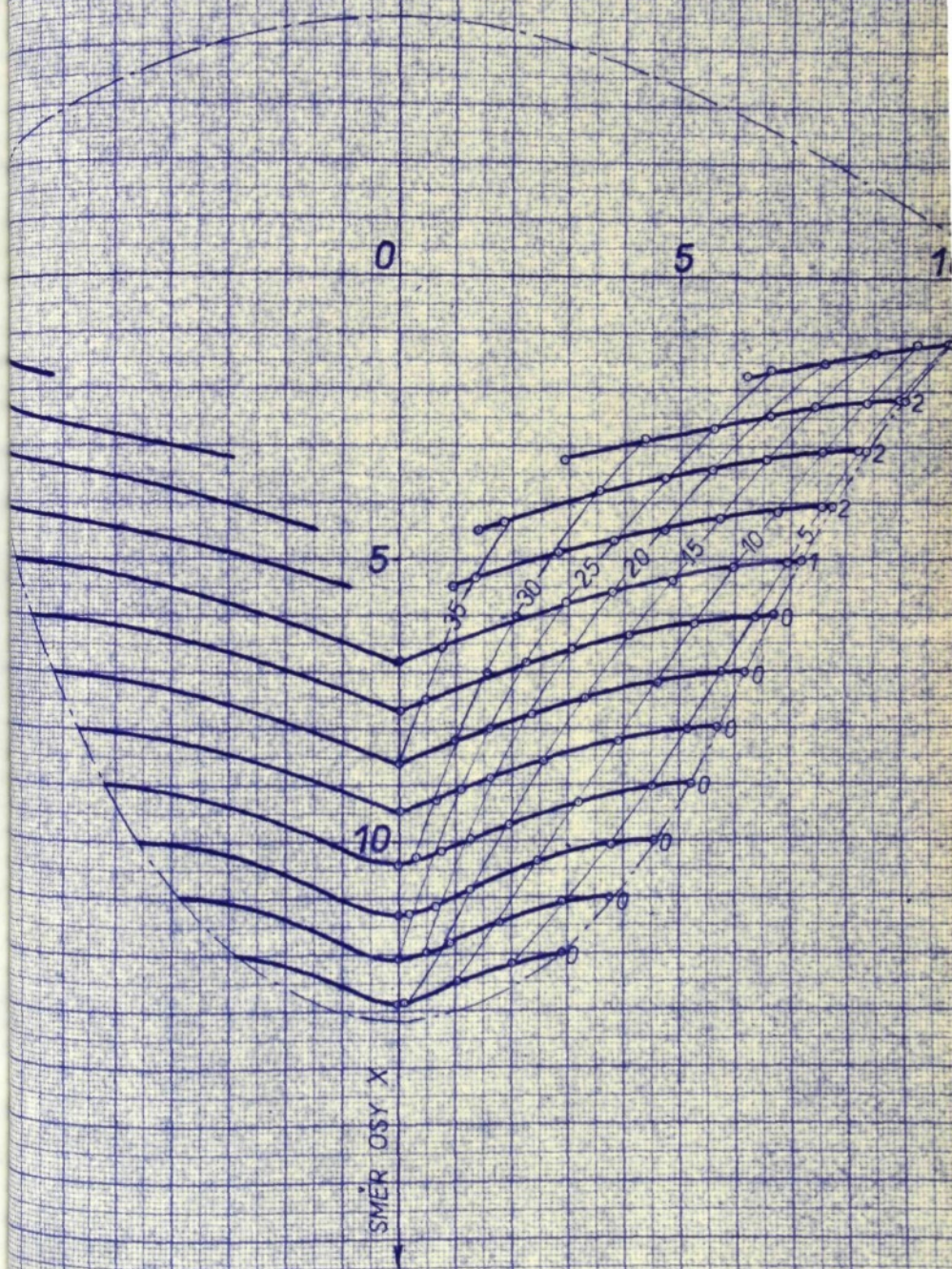
FRY 3

10 : 1



FRY 3

10 : 1



SMĚR RŮSTU PK

V ROVINĚ

OSA PK (Z=2) V R

SMĚR OSY X

FRY 3

SMĚR RŮSTU PK

V ROV. ρ_{B1} ρ_{B2}

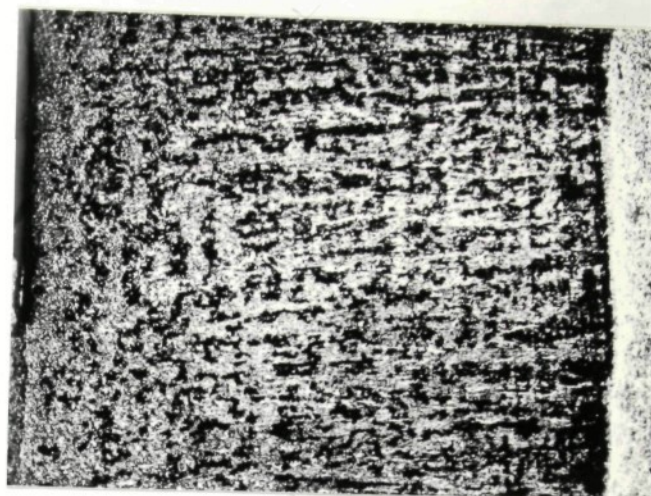
10:1

OSA PK (Z=8) V ROV



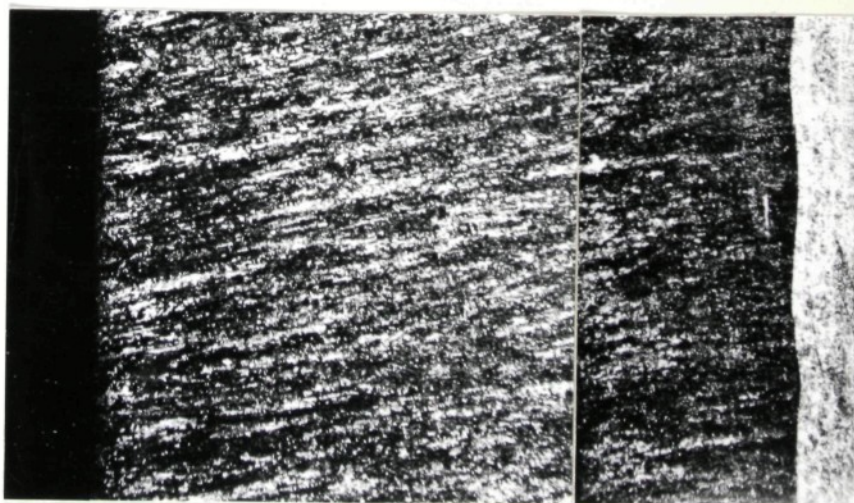
FRY 3

10:1



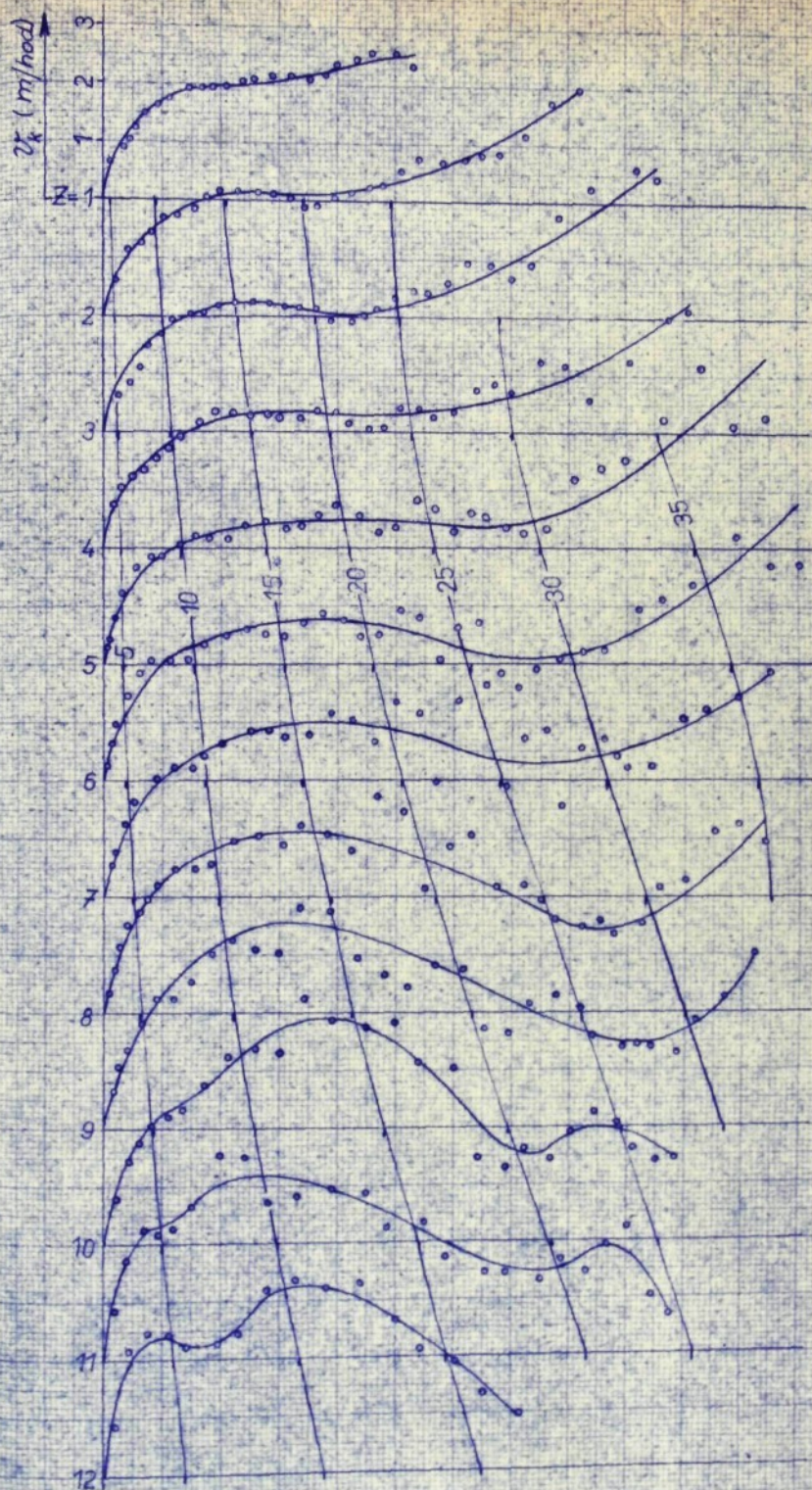
FRY 3

10:1



FRY 3

10:1



VZDÁLENOST VYPOČTENÝCH BODŮ PK. V ROV. YZ